

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA FLORESTAL**

**PERFORMANCE DO *Pinus elliottii* Engelm. E *Pinus taeda* L. EM ÁREAS ARENIZADAS E DEGRADADAS
NO OESTE DO RIO GRANDE DO SUL**

TESE DE DOUTORADO

Luiz Ernesto Grillo Elesbão

Santa Maria, RS, Brasil

2011

PERFORMANCE DO *Pinus elliottii* Engelm. E *Pinus taeda* L. EM ÁREAS ARENIZADAS E DEGRADADAS NO OESTE DO RIO GRANDE DO SUL

Luiz Ernesto Grillo Elesbão

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Manejo Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Florestal.**

Orientador: Prof. Dr. Paulo Renato Schneider

Santa Maria, RS, Brasil.

2011

E39p Elesbão, Luiz Ernesto Grillo
 Performance do *Pinus elliotti* Engelm e *Pinus taeda* L. em áreas arenizadas e degradadas no oeste do Rio Grande do Sul / por Luiz Ernesto Grillo Elesbão. - 2011.
 155 p. ; il. ; 30 cm

 Orientador: Paulo Renato Schneider
 Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2011

 1. Engenharia Florestal 2. Manejo florestal 3. Crescimento 4. Arenização
 5. Degradação 6. Erosão I. Schneider, Paulo Renato II. Título.

 CDU 630.2(816.5)

Ficha catalográfica elaborada por Cláudia Terezinha Branco Gallotti - CRB 10/1109
Biblioteca Central UFSM

©2011

Todos os direitos autorais reservados a Luiz Ernesto Grillo Elesbão. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: Avenida Roraima S/ Nº, Campus da UFSM, Bairro: Camobi, Santa Maria, RS, Brasil, CEP: 97105-960;

Fone: (0xy) 55 32208444

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Tese de Doutorado

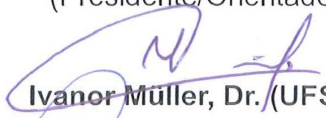
**PERFORMANCE DO *Pinus elliottii* Engelm. E *Pinus taeda* L. EM
ÁREAS ARENIZADAS E DEGRADADAS NO OESTE DO RIO GRANDE
DO SUL**

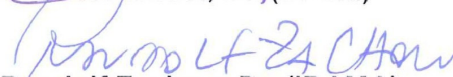
elaborada por
Luiz Ernesto Grillo Elesbão

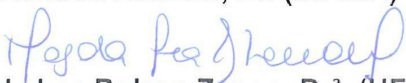
como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Engenharia Florestal

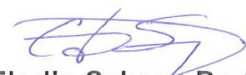
COMISSÃO EXAMINADORA

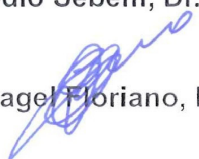

Paulo Renato Schneider, Dr.
(Presidente/Orientador)


Ivanor Müller, Dr. (UFSM)


Randolf Zachow, Dr. (IBAMA)


Magda Lea Bolzan Zanon, Dr^a. (UFSM)


Elodio Sebem, Dr. (UFSM)


Eduardo Page Floriano, Dr. (UNIPAMPA)

Santa Maria, 09 de outubro de 2011.

DEDICO...

À minha família, pelo apoio sincero à
minha capacitação florestal, e aos meus
pais, *in memoriam*.

HOMENAGEM AO GAÚCHO PAMPEANO

Busquem nossas sementes nas danças índias sob o sol, no extermínio de
uma raça, na miscigenação forçada, nas alturas da cordilheira, nas correrias pela
grande pampa de Artigas.

Muitos caminhos levaram sob a pele mestiça que nos cobre.

Somos europeus, negros, índios.

Somos o resultado dessa fusão incoerente de tantos sangues.

Dessa mistura nascemos.

E foi dessa aparente impossibilidade que nasceu nossa arte.

Mestiça como a nossa raça.

*Trecho da música Caminhos de si,
de Martim César, Hélio Ramirez e Paulo Timm*

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é dedicado a todos aqueles que acreditaram na minha capacidade de realização da pós-graduação em Engenharia Florestal e que entendem os reflexos desta conquista.

Em especial, gostaria de externar meus agradecimentos:

Ao Prof. Dr. Paulo Renato Schneider, meu orientador, pela rara amizade e compreensão e pelas considerações no estudo;

Ao meu comitê de orientação, composto pelo Prof. Dr. Paulo Renato Schneider, Prof. Dr. Solon Jonas Longhi e Prof. Dr. Frederico Dimas Fleig, pelas contribuições importantes durante a condução e conclusão deste estudo;

Aos demais professores da Engenharia Florestal e aos meus colegas, pelo companheirismo e pelas importantes observações durante o período de estudante do Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal do Centro de Ciências Rurais da UFSM;

À técnica administrativa Cerlene da Silva Machado, secretária do Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal, pela compreensão e presteza no trato de minhas peculiaridades acadêmicas.

RESUMO

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil.

PERFORMANCE DO *Pinus elliottii* Engelm. E *Pinus taeda* L. EM ÁREAS ARENIZADAS E DEGRADADAS NO OESTE DO RIO GRANDE DO SUL

AUTOR: LUIZ ERNESTO GRILLO ELESBÃO

ORIENTADOR: Dr. Paulo Renato Schneider

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 09 de outubro de 2011.

Esta tese foi realizada com o objetivo de estudar o desempenho do *Pinus elliottii* Engelm. e *Pinus taeda* L. na resiliência de áreas arenizadas e degradadas por ação antrópica, na região da fronteira oeste do estado do Rio Grande do Sul. Em povoamentos, foram selecionadas árvores médias e dominantes, que foram abatidas e seccionadas pelo método de Smalian, para a obtenção de discos de madeira para a análise dendrocronológica do diâmetro, da altura, do volume e do incremento médio e anual, além do fator de forma comum. Amostras de solo foram coletadas na área de projeção da copa em cada árvore-amostra e em locais testemunhas, para determinação e avaliação dos elementos químicos. Para a análise da correlação entre o incremento corrente anual em diâmetro com os fatores climáticos, foram avaliados dados históricos das precipitações e temperaturas ocorridas na área do estudo, nos últimos 29 anos. Os resultados obtidos neste estudo permitiram concluir que: o incremento corrente anual em diâmetro não apresentou correlação significativa com a precipitação anual e temperatura média anual, o que pode ser explicado pela não ocorrência de déficit hídrico; alguns elementos químicos do solo apresentaram correlação positiva, e outros, negativa quando relacionados com o incremento periódico anual em diâmetro, indicando que o teor disponível no solo pode ser mais ou menos importante para o crescimento da espécie, podendo tornar as plantas limitantes; as equações de crescimento testadas para ajustar o crescimento em diâmetro, altura e volume em função da idade, nas duas localidades estudadas, apresentaram excelente ajuste e elevada precisão estatística, permitindo estimar essas variáveis em função do tempo, com alta precisão e baixo erro padrão da estimativa; o crescimento em diâmetro do *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, quando comparados, apresentou tendência diferente de desenvolvimento no tempo; o uso de variáveis dummy no modelo de crescimento de Backmann permitiu definir uma equação única para estimar o diâmetro, a altura e o volume em função da idade para ambas as espécies (*Pinus elliottii*: dummy = 0 e *Pinus taeda*: dummy = 1), como uma variável que possibilita estratificar o crescimento da espécie; as espécies *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* apresentaram grande capacidade de resiliência do solo degradado pela ação antrópica, promovendo, após 29 anos de observação de um reflorestamento realizado em área arenizada, um aumento significativo dos teores médios de quase todos os elementos químicos e da quantidade de matéria orgânica do solo.

Palavras-chave: Crescimento. Arenização. Degradação. Nutrientes. *Pinus*.

ABSTRACT

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil.

PERFORMANCE OF *Pinus elliottii* Engelm. AND *Pinus taeda* L. IN ARENIZATED DEGRADED AREA ON THE WESTERN OF RIO GRANDE DO SUL

AUTHOR: LUIZ ERNESTO GRILLO ELESBÃO

ADVISOR: DR. Paulo Renato Schneider

Date and Place of Defense: Santa Maria, October, 09th, 2011.

This work aims the performance of *Pinus elliottii* Engelm. and *Pinus taeda* L. in the resilience of degraded arenized area by antropic action in the western of Rio Grande do Sul state. Average trees, in the stand, were sampled, felled and sectioned by Smalian method to obtain discs for dendrochronological analysis of the diameter, height, volume, average and current increments and common form factor. Soil samples were taken over crown projection area in each tree-sample and in additional checks field to determine and evaluation of chemical elements. To analyze the correlation between the annual diameter increments with weather conditions, historical rainfall and temperature, occurring in the study area, in the last 29 years were evaluated. The current annual increment in diameter was not correlated with annual precipitation and annual mean temperature, which can be explained by the absence of drought; Some chemicals in soil showed positive and negative correlation when related to the periodic annual diameter increment, indicating that the content available in the soil may be more or less important to the growth of the species, may become limiting by the plants; the equations tested to fit the growth in diameter, height and volume by age in the two cities studied, showed an excellent fit and high statistical accuracy, allowing estimation of these variables in time with high accuracy and low standard error; the diameter growth of *Pinus elliottii* and *Pinus taeda*, had different trend along the age; the use of dummy variables into the Bachmann growth model enables a single equation to estimate the diameter, height and volume by age for both species (*Pinus elliottii*: dummy = 0 and *Pinus taeda*: dummy = 1) and it works as a stratifying variable that enables the growth of the species; the *Pinus taeda* and *Pinus elliottii* showed a great resilience of degraded soil by human action, where after 29 years of observation conducted in a reforestation arenized area, promoted a significant increase in mean levels of almost all chemical elements and the amount of soil organic matter.

Keywords: Growth. Arenization. Degradation. Nutrients. *Pinus*.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Equações para o ajuste do volume total das árvores.....	64
Tabela 2 – Equações testadas para o ajuste do crescimento das variáveis estudadas.....	65
Tabela 3 – Equações testadas para ajuste da altura em função do diâmetro.....	66
Tabela 4 – Estatísticas das variáveis climáticas e diâmetro utilizadas para correlação de Pearson para <i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i>	74
Tabela 5 – Matriz diagonal simétrica de correlação de Pearson, probabilidade de significância do crescimento em diâmetro e fatores de clima para <i>Pinus elliottii</i>	75
Tabela 6 – Estatística das médias, desvio padrão e limites mínimos e máximos dos fatores de solo e incremento periódico anual, em diâmetro, para <i>Pinus elliottii</i>	76
Tabela 7– Matriz diagonal simétrica de correlação de Pearson e probabilidade de significância entre o incremento periódico anual em diâmetro (IPA_{dap}) e fatores do solo.....	77
Tabela 8 – Alteração nos elementos químicas dos solos arenizados em três locais degradadas após o plantio com <i>Pinus elliottii</i> e em campo nativo.....	84
Tabela 9 – Análise de covariância do crescimento em diâmetro das espécies de <i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i> e nível de degradação do solo.....	88
Tabela 10 – Análise de covariância do crescimento em altura das espécies de <i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i> e nível de degradação do solo.....	89
Tabela 11 – Análise de covariância do crescimento em volume das espécies de <i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i> e nível de degradação do solo.....	90
Tabela 12 – Parâmetros estatísticos das equações testadas para ajustar o crescimento de diâmetro em função da idade de <i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i>	92
Tabela 13 – Valor ponderado dos escores dos parâmetros estatísticos das equações testadas.....	93
Tabela 14 – Estimativa do crescimento em diâmetro por idade de <i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i> pelo modelo de Backmann modificado.....	95
Tabela 15 – Análise de variância do diâmetro com inclusão de variável dummy para as espécies de <i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i>	97
Tabela 16 – Estimativa dos diâmetros por idade e respectivos incrementos corrente e médio anual para <i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i> , representados por variável dummy.....	99
Tabela 17 – Parâmetros estatísticos das equações testadas para ajustar o crescimento da altura em função da idade de <i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i>	101
Tabela 18 – Valor ponderado dos escores dos parâmetros estatísticos das equações testadas.....	102

Tabela 19 – Estimativa do crescimento em altura por idade de <i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i> pelo modelo de Backmann modificado	104
Tabela 20 – Análise de variância da altura com inclusão de variável dummy para as espécies de <i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i>	105
Tabela 21 – Estimativa das alturas por idade e respectivos incrementos corrente e médio anual para <i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i> , representados por variável dummy	108
Tabela 22 – Alturas dominantes por idade dos índices de sítio para <i>Pinus elliottii</i> .	110
Tabela 23 – Alturas dominantes por idade dos índices de sítio para <i>Pinus taeda</i> ..	111
Tabela 24 – Parâmetros estatísticos das equações testadas para ajustar o crescimento em volume em função da idade de <i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i>	113
Tabela 25 – Valor ponderado dos escores dos parâmetros estatísticos das equações testadas.....	114
Tabela 26 – Estimativa do crescimento em volume por idade de <i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i> pelo modelo de Backman modificado	115
Tabela 27 – Análise de variância do volume com inclusão de variável dummy para as espécies de <i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i>	118
Tabela 28 – Estatísticas dos parâmetros do modelo de crescimento em volume com inclusão de variável dummy para as espécies de <i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i>	119
Tabela 29 – Estimativa dos volumes por idade e respectivos incrementos corrente e médio anual para <i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i> , representados por variável dummy.....	120
Tabela 30 – Equações de volume sem casca testadas para <i>Pinus elliottii</i>	122
Tabela 31 – Valor ponderado dos escores dos parâmetros estatísticos das equações de volume testadas para <i>Pinus elliottii</i>	123
Tabela 32 – Equações de volume sem casca testadas para <i>Pinus taeda</i>	124
Tabela 33 – Valor ponderado dos escores dos parâmetros estatísticos das equações testadas para <i>Pinus taeda</i>	125
Tabela 34 – Parâmetros estatísticos das equações testadas para ajustar crescimento em altura em função do diâmetro de <i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i>	128
Tabela 35 – Valor ponderado dos escores dos parâmetros estatísticos das equações testadas.....	130

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição geográfica natural do <i>Pinus elliottii</i> Engelm. nos EUA (AL, FL, GA, LA, MS, NC, SC, TX). Fonte: USDA (2010).	23
Figura 2 – Distribuição geográfica natural do <i>Pinus taeda</i> L. nos EUA (AL, AR, DC, DE, FL, GA, IL, KY, LA, MD, MO, MS, NC, NJ, OK, SC, TN, TX, VA). Fonte: USDA (2010).	25
Figura 3 – Formação de voçoroca (A) e erosão em colinas (B) em área arenizada, Manoel Viana, RS. Foto: Schneider (2010).	33
Figura 4 – Regiões Fitogeográficas do Rio Grande do Sul com a área de estudo em destaque. Fonte: RIO GRANDE DO SUL (2001).	49
Figura 5 – Informações climáticas e edáficas da região de estudo. Fonte: http://www.seplag.rs.gov.br/atlas/indice_mapas.asp?menu=331 ; EMATER/UFRGS (2005).	51
Figura 6 – Aspecto dos solos arenizados da região do estudo. Foto: Schneider (2010).	53
Figura 7 – Vista parcial da área arenizada do conhecido “deserto” de São João, Alegrete - RS. Fotos: 1968 (A) e 1973 (B) (ANDRAE, 1973).	53
Figura 8 – Vistas parcial atual da área conhecida por “deserto” de São João, com plantio de <i>Pinus</i> (A) e <i>Eucalyptus</i> (B), Alegrete, RS. Foto: Schneider (2010).	54
Figura 9 – Tipos de vegetação das áreas arenizadas: Myrtaceae (A), cactus-miúdo-do-campo (<i>Echinocactus muricatus</i>) (B), butiazeiro-anão (<i>Butia lallemantii</i>) (C) e mata de restinga (D), respectivamente, Manoel Viana, RS. Fotos: Schneider (2010).	56
Figura 10 – Área reflorestada com <i>Eucalyptus</i> sp. em solo arenizado, Manoel Viana, RS. Foto: Schneider (2010).	58
Figura 11 – Imagens mostrando a presença de formigueiro e toca de tatu nas áreas amostradas. Foto: Schneider (2010).	59
Figura 12 – Imagens de áreas amostradas neste estudo. Foto: Schneider (2010).	61
Figura 13 – Material e equipamento Lintab II acoplado em computador utilizado para determinação e medição dos anéis de crescimento, Laboratório de Manejo Florestal – UFSM. Foto: Milani (2010).	63
Figura 14 – Temperatura média anual no período de 1980 a 2009, com dados obtidos na estação meteorológica de São Borja, RS.	72
Figura 15 – Temperatura média mensal no período de 1980 a 2009, com dados obtidos na estação meteorológica de São Borja, RS.	73
Figura 16 – Precipitação anual no período de 1980 a 2009, coletada na Estância São João, local próximo da área da pesquisa, Distrito de São João, Alegrete, RS.	73

Figura 17 – Precipitação média mensal no período de 1980 a 2009, coletada na Estância São João, local próximo da área da pesquisa, Distrito de São João, Alegrete, RS.	74
Figura 18 – Relação do crescimento (linha sólida) e índice de precipitação do período de dezembro a abril (linha pontilhada).....	76
Figura 19 – Alteração do pH e teor de matéria orgânica no solo antes e após o plantio de <i>Pinus elliottii</i> e no campo nativo.	84
Figura 20 – Alteração dos teores dos elementos químicos cálcio, magnésio, alumínio, enxofre, potássio, fósforo do solo antes e após o plantio de <i>Pinus elliottii</i> e no campo nativo.....	85
Figura 21 – Alteração dos teores dos elementos químicos: zinco, boro e manganês do solo antes e após o plantio de <i>Pinus elliottii</i> e no campo nativo.....	85
Figura 22 – Distribuição dos resíduos de diâmetro por idade para os dados de <i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i> agrupados e ajustados pela função de Backmann modificada	94
Figura 23 – Crescimento em diâmetro em função da idade de <i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i> pelo modelo de Backmann modificado	96
Figura 24 – Distribuição dos resíduos de diâmetro por idade para os dados de <i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i> agrupados e ajustados pela função de Backmann modificada, com variável dummy.....	98
Figura 25 – Comparação do crescimento em diâmetro do <i>Pinus elliottii</i> versus <i>Pinus taeda</i> , em solos arenizados degradados da fronteira oeste do Rio Grande do Sul.....	100
Figura 26 – Distribuição dos resíduos da altura por idade para os dados de <i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i> agrupados e ajustados pela função de Backmann modificada	103
Figura 27 – Crescimento em altura em função da idade de <i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i> pelo modelo de Backmann modificado	103
Figura 28 – Distribuição dos resíduos da altura por idade para os dados de <i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i> agrupados e ajustados pela função de Backmann modificada, com variável dummy.....	106
Figura 29 – Comparação do crescimento em altura do <i>Pinus elliottii</i> versus <i>Pinus taeda</i> , em solos arenizados, degradados da fronteira oeste do Rio Grande do Sul.	103
Figura 30 – Classificação de sítio para <i>Pinus elliottii</i>	105
Figura 31 – Classificação de sítio para <i>Pinus taeda</i>	112
Figura 32 – Distribuição dos resíduos de volume por idade para os dados de <i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i> agrupados e ajustados pela função de Backmann modificada	114
Figura 33 – Crescimento em volume em função da idade de <i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i> pelo modelo de Backmann modificado	112

Figura 34 – Distribuição dos resíduos de volume por idade para os dados de <i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i> agrupados e ajustados pela função de Backmann modificada, com variável dummy	114
Figura 35 – Comparação do crescimento em volume do <i>Pinus elliottii</i> versus <i>Pinus taeda</i> , em solos arenizados degradados da fronteira oeste do Rio Grande do Sul	121
Figura 36 – Distribuição de resíduos de volume de <i>Pinus elliottii</i>	124
Figura 37 – Distribuição de resíduos de volume de <i>Pinus taeda</i>	126
Figura 38 – Tendência do fator expansão do volume sem casca para com casca em relação ao diâmetro.....	127
Figura 39 – Distribuição de resíduos de altura em relação à altura observada para <i>Pinus elliottii</i>	131
Figura 40 – Distribuição de resíduos de altura em relação à altura observada para <i>Pinus taeda</i>	131
Figura 41 – Comparação do crescimento em altura dominante do <i>Pinus elliottii</i> em três regiões do estado do Rio Grande do Sul.....	132

LISTA DE ANEXOS

ANEXO I – Temperatura média mensal e anual de 1980 a 2009. Estação meteorológica de São Borja, RS.....	153
ANEXO II – Precipitação média mensal e anual de 1980 a 2009. Dados da Estância São João próxima da área de pesquisa, Local São João, Alegrete, RS.....	154
ANEXO III – Elementos químicos médios das amostras de solo das árvores amostras	155

LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

AGEFLOR	Associação Gaúcha de Empresas Florestais
Al	Alumínio
B	Boro
Ca	Cálcio
cm	Centímetro
Cu	Cobre
DAP	Diâmetro à altura do peito (cm).
EMATER	Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EUA	Estados Unidos
F	Valor de F calculado
Fe	Ferro
FEPAGRO	Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária do RS
FV	Fonte de variação
GL	Graus de liberdade
h	Altura
h_{100} hectare (m).	Altura dominante: altura média das 100 árvores mais grossas por hectare (m).
ha	Hectare: unidade de medida de área, equivalente a 10.000 m ²
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICA	Incremento corrente anual
IMA	Incremento médio anual
IPA	Incremento periódico anual
K	Potássio
km ²	Quilômetro quadrado
m	Metro
MO	Matéria orgânica
m ³	Metro cúbico
MA	Ministério da Agricultura
MERCOSUL	Mercado Comum do Sul
Mg	Magnésio
mm	Milímetro

Mn	Manganês
mst	Metro stereo
N	Nitrogênio
NS	Não-significativo
°C	Graus centígrados
P	Fósforo
PCA	Principal Component Analyse
Ph	Potencial de hidrogênio no solo
Precip.	Precipitação em milímetros
Prob F	Probabilidade de significância para F
QM	Quadrado médio
R^2_{Aj}	Coeficiente de determinação ajustado
RS	Rio Grande do Sul
S	Enxofre
SAS	Statistical Analysis System
SEMA	Secretaria de Estado de Meio Ambiente
SQ	Soma de quadrados
S_{yx}	Erro padrão da estimativa
t	Idade
UA	Unidade animal
UNCCD	United Nations Convention to Combat Desertification
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
UFV	Universidade Federal de Viçosa
Zn	Zinco

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	19
1.1	Objetivos	21
1.1.1	Objetivo geral.....	21
1.1.2	Objetivos específicos.....	21
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	23
2.1	Sobre o gênero <i>Pinus</i>	23
2.2	Crescimento e produção	26
2.3	Arenização dos solos	32
2.4	Água no solo e clima	36
2.5	Elementos nutritivos e biológicos do solo.....	39
2.6	Vegetação do entorno dos areais.....	46
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	49
3.1	Localização e descrição da área de estudo	49
3.2	Clima	51
3.3	Solos	52
3.4	Fisiografia.....	55
3.5	Vegetação	55
3.6	Histórico dos povoamentos florestais estudados	57
3.7	Coleta de dados	60
3.7.1	Amostragem do solo.....	60
3.7.2	Amostragem das árvores	61
3.8	Análise de tronco.....	62
3.9	Estimativa do volume por diâmetro e altura	64
3.10	Crescimento no tempo	65
3.11	Crescimento da altura em função do diâmetro.....	65
3.12	Classificação do sítio.....	66
3.13	Critérios de seleção dos modelos matemáticos	66
3.14	Validação das equações de regressão	68
3.15	Análise de covariância.....	68
3.16	Análise do crescimento diamétrico em relação aos fatores do clima e solo.....	69
3.17	Processamento dos dados	70
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	71

4.1 Crescimento em diâmetro em função de variáveis ambientais.....	71
4.1.1 Crescimento em diâmetro em função de variáveis do clima.....	71
4.1.2 Crescimento em diâmetro em função de variáveis químicas do solo	77
4.2 Atributos químicos dos solos arenizados degradados antes e depois do reflorestamento com <i>Pinus elliottii</i> e no campo nativo	83
4.3 Análise do crescimento em diâmetro em função da espécie de <i>Pinus</i> e níveis de degradação do solo	87
4.4 Análise do crescimento em altura em função da espécie de <i>Pinus</i> e níveis de degradação do solo	88
4.5 Análise do crescimento em volume em função da espécie de <i>Pinus</i> e nível de degradação do solo	90
4.6 Crescimento de <i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i>	91
4.6.1 Crescimento do diâmetro em função da idade	91
4.6.2 Modelo de crescimento em diâmetro sob o efeito da espécie com variável dummy.....	96
4.6.3 Crescimento da altura em função da idade	100
4.6.4 Modelo de crescimento em altura sob o efeito da espécie com variável dummy.....	104
4.7 Classificação de sítio	109
4.8 Crescimento do volume em função da idade.....	112
4.8.1 Modelo de crescimento em volume sob o efeito da espécie com variável dummy.....	117
4.9 Volumetria.....	122
4.9.1 Equações de volume sem casca para <i>Pinus elliottii</i>	122
4.9.2 Equações de volume sem casca para <i>Pinus taeda</i>	124
4.10 Fator de expansão do volume sem casca para com casca	126
4.11 Crescimento em altura em função do diâmetro	127
4.12 Comparação do crescimento em altura do <i>Pinus elliottii</i> da área em estudo com o de outras regiões do Rio Grande do Sul	132
5 CONCLUSÕES	135
6 RECOMENDAÇÕES.....	137
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	139

1 INTRODUÇÃO

Grande parte das terras ocupadas pela agropecuária do Rio Grande do Sul foi outrora coberta por florestas naturais. A ocupação desordenada dessas áreas provocou grande redução das matas naturais, diminuiu a disponibilidade de madeira, aumentou a erosão das terras e provocou o assoreamento dos rios e a poluição das águas. Em decorrência disso, hoje a maioria das propriedades rurais do estado estão com baixa capacidade de produção.

Na fronteira oeste do estado do Rio Grande do Sul, por apresentar terras arenosas, pobres e dobradas, impróprias para o cultivo agrícola anual, muitas delas estão degradadas pela ação antrópica.

A formação dos areais, interpretada a partir de estudos geomorfológicos, está associada à dinâmica dos fatores hídricos e eólicos. Estes, relacionados com uma topografia favorável, permitem, numa primeira fase, a formação de ravinas e voçorocas, que, na continuidade do processo, desenvolvem uma erosão lateral e regressiva, conseqüentemente alargando suas bordas. Por outro lado, à jusante dessas ravinas e voçorocas, em decorrência do processo de transporte de sedimentos pela água durante episódios de chuvas torrenciais, formam-se depósitos arenosos em forma de leques. Com o tempo, esses leques vão se agrupando e, em conjunto, dão origem a um areal, e o vento atuando sobre esses areais, em todas as direções, permite a ampliação deste processo.

Os núcleos de areanização têm origem por vários fatores, os quais, muitas vezes, em conjunto, agem desencadeando o processo de arenização. Esses fatores de arenização estão vinculados: à alta precipitação pluviométrica anual, em torno de 1.400 mm; à velocidade do vento; à textura arenosa do solo, em torno de 80% de areia; à cobertura vegetal insuficiente; à localização geográfica e ao relevo; e ao uso intensivo da área com pecuária e/ou agricultura.

A partir de relatos históricos feitos por naturalistas, foi verificada a ocorrência de áreas arenizadas na região da fronteira oeste do Rio Grande do Sul que apresentavam essas formas naturais, pelo menos desde a época em que se iniciou a colonização luso-espanhola, o que pode ser confirmado pela descrição feita em

1858 por Robert Avé-Lallemant (1980), em seu relatório de viagem quando de sua passagem por esta região:

A lua pouco velada deitava um clarão turvo sobre a região. Subitamente, em torno de nós tudo parecia branco. Crer-se-ia viajar num campo de neve. Em volta areia pura, limpa sem nenhuma vegetação, verdadeiro deserto africano, embora de pouca extensão. Dava-me uma impressão particularmente melancólica. Viajávamos juntos em silêncio. (AVÉ-LALLEMANT, 1980).

No Brasil, além da ocorrência do processo nas regiões semiáridas do nordeste, existe um ponto de “desertificação” na região sudoeste do estado do Rio Grande do Sul, onde, apesar do clima subtropical e da distribuição abundante de chuvas, grandes extensões de terra estão sendo perdidas pelo processo de erosão, adquirindo o aspecto de áreas “desérticas”.

No Rio Grande do Sul, as áreas arenizadas situam-se entre a bacia hidrográfica dos rios Ibicuí e Ibirapuitã. Essas áreas em degradação encontram-se sobre uma formação arenítica que abrange, aproximadamente, 1,4 milhão de hectares, distribuídos em 15 municípios da região.

O solo, originário do arenito, é classificado como arenoso e, em função da sua estrutura física, não apresenta resistência à erosão quando desprovido de proteção vegetal. Esse fator, aliado ao pastoreio excessivo, às práticas agrícolas inadequadas, às chuvas abundantes e à incidência de ventos fortes em determinadas épocas do ano, proporciona, ao longo do tempo, a ocorrência de processos erosivos. Atualmente, encontram-se vários estágios de degradação do solo na região, desde manchas de areia descobertas e afloramentos rochosos até voçorocas profundas.

De acordo com o levantamento de recursos naturais, a formação vegetal da região pode ser enquadrada nas regiões fitogeográficas de estepe e savana estépica, apresentando florestas de galeria ao longo dos cursos d’água, com predomínio de vegetação de porte arbustivo.

Devido à fragilidade do solo, ao uso de técnicas inadequadas para o local e à necessidade da manutenção da produção econômica da região, a introdução de espécies florestais exóticas, mesmo contrapondo a característica original da vegetação, é uma alternativa tanto para a prevenção como para a minimização do problema de arenização do solo.

A disposição de árvores protege a vegetação contra o secamento e assoreamento. Quando intercaladas com áreas cultivadas ou pastagens, as permanentes cortinas verdes permitem, ainda, a diminuição do escoamento superficial da água da chuva, em função do acúmulo da matéria orgânica formada através da queda de folhas e galhos. Aliada a esses fatores, a existência de agrupamentos arbóreos produz reflexos positivos para o gado, por proporcionar abrigo aos animais, permitindo um aumento de produtividade.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é estudar o desempenho das espécies *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* na resiliência de áreas de solos arenizados e degradados na região da fronteira oeste do estado do Rio Grande do Sul.

1.1.2 Objetivos específicos

- a) Estudar o crescimento temporal em diâmetro, altura e volume em povoamentos implantados em solos arenizados;
- b) Comparar o crescimento temporal em diâmetro, altura e volume das árvores médias e dominantes dos povoamentos implantados em áreas arenizadas em diferentes níveis de degradação;
- c) Verificar a relação dos fatores do solo, definidos pelos elementos químicos, com o incremento periódico anual em diâmetro;
- d) Verificar a influência das variáveis meteorológicas precipitação e temperatura com o incremento corrente anual em diâmetro;
- e) Efetuar uma classificação de sítio para as espécies estudadas em função da altura dominante por idade para a região de áreas arenizadas do Rio Grande do Sul.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Sobre o gênero *Pinus*

De acordo com Gilman e Watson (1994), o gênero *Pinus* pertence à família *Pinaceae*, ordem *Coniferales* e classe *Gymnospermae*.

A *Pinus elliottii* Engelm. é vulgarmente conhecida por *Slash pine* ou pinheiro da Flórida nos Estados Unidos e pinheiro americano no Brasil. É originária do sudeste da América do Norte, dos estados de Alabama (AL), Florida (FL), Georgia (GA), Louisiana (LO), Mississippi (MS), Carolina do Norte (NC), Carolina do Sul (SC) e Texas (TX) (Figura 1).

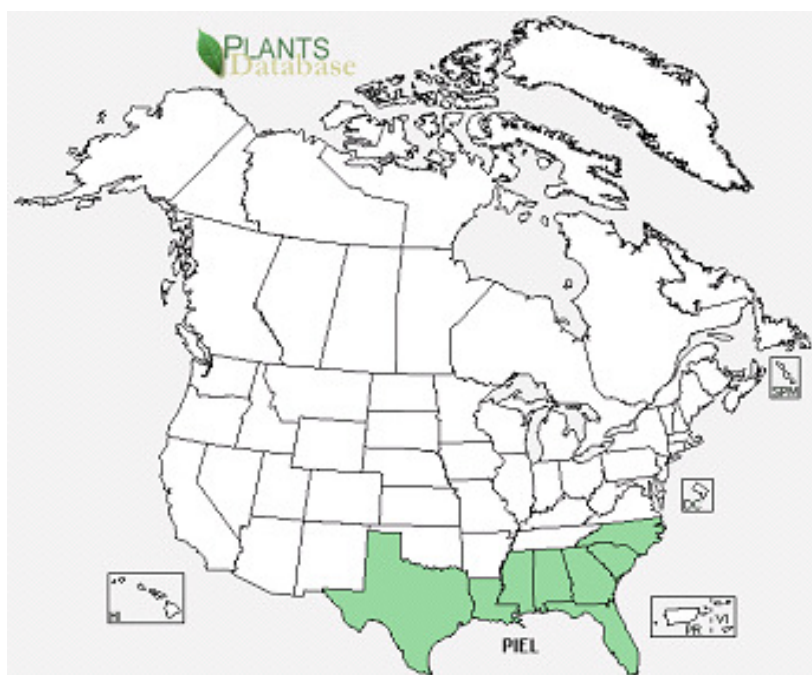


Figura 1 – Distribuição geográfica natural do *Pinus elliottii* Engelm. nos EUA (AL, FL, GA, LA, MS, NC, SC eTX).

Fonte: USDA (2010).

Segundo Gilman e Watson (1994), a espécie é árvore de grande porte, apresentando muitos galhos. A casca é marrom-acinzentada, escura, fortemente

sulcada e escamosa. Cresce a sol pleno e à meia-sombra em solos argilosos até arenosos, de levemente alcalinos até ácidos, bem drenados e ocasionalmente úmidos; é tolerante aos solos pobres e moderadamente tolerantes às secas e aos solos salinos; solos úmidos com pH alto são danosos para a espécie. Apresenta desrama natural dos galhos, e a copa é aberta, criando uma sombra clara; a queda de acículas é constante e forma uma manta espessa abaixo de si. Suas raízes são muito agressivas, competindo intensamente com as plantas ao redor. As sementes espalham-se na paisagem, podendo a espécie tornar-se invasora. Apresenta sensibilidade acentuada para algumas doenças e pragas que afetam sua sanidade e que podem resultar em problemas sérios, como o surgimento de clorose, a podridão da madeira, o cancro e a ferrugem (que tem os carvalhos como hospedeiros intermediários); como também brocas da madeira (larvas de besouros) e larvas de moscas desfoliadoras, entre outros.

A espécie *Pinus taeda* L. é conhecida popularmente como *Pinus*, pinheiro-americano, pinheiro-amarelo ou *loblolly pine* (GILMAN; WATSON, 1994). Essa espécie, morfofisiologicamente, é caracterizada por ser uma árvore que pode atingir mais de 20 m de altura, com casca gretada, ramos acinzentados, acículas reunidas em grupos de três, com 15 a 20 cm de comprimento, e de cor verde-escura. Seus cones masculinos são cilíndricos e amarelados, e os femininos, ovado-oblongos, sésseis ou subsésseis, muito persistentes e dotados de escamas espinhosas. As sementes são pequenas, com cerca de 5 mm de comprimento e com alas de até 25 mm, tendo dispersão anemocórica.

O *Pinus taeda* é oriundo das planícies adjacentes ao Golfo do México e da Costa Atlântica, ao sudeste dos Estados Unidos, dos estados de Virgínia (VA), Tennessee (TN), Oklahoma (OK), New Jersey (NJ), Missouri (MO), Maryland (MD), Kentucky (KY), Distrito de Columbia (DC), Arkansas (AR), Illinois (IL), Delaware (DE), Alabama (AL), Florida (FL), Georgia (GA), Louisiana (LO), Mississippi (MS), Carolina do Norte (NC), Carolina do Sul (SC) e Texas (TX). Essa área abrange ecossistemas desde a planície costeira atlântica até os Montes Apalaches, estendendo-se até o oeste do Rio Mississippi, totalizando 14 estados (Figura 2). A cobertura florestal com essa espécie, nos Estados Unidos, é estimada em 11,7 milhões de hectares (USDA, 2010).

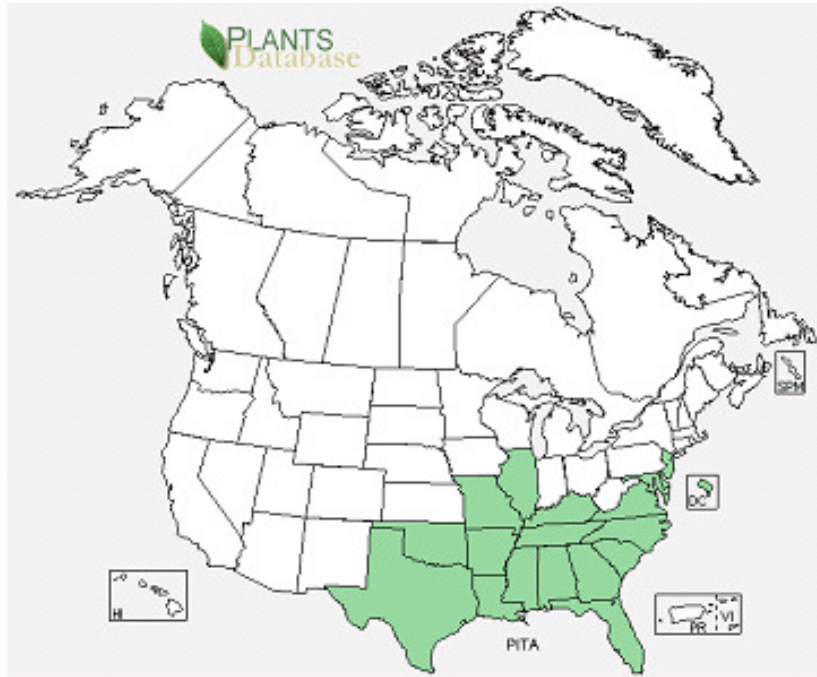


Figura 2 – Distribuição geográfica natural do *Pinus taeda* L. nos EUA (AL, AR, DC, DE, FL, GA, IL, KY, LA, MD, MO, MS, NC, NJ, OK, SC, TN, TX e VA).
Fonte: USDA (2010).

As diversas espécies do gênero *Pinus* plantadas nas regiões sul e sudeste do Brasil foram introduzidos, por volta de 1954, com o objetivo de substituir a madeira da *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze, cujos povoamentos naturais achavam-se em rápido processo de exaustão.

Os plantios de *Pinus* foram acelerados, a partir de 1966-1967, com a implantação da política de incentivos fiscais. Em face disso, em 1975, dos 459 mil hectares implantados em São Paulo, cerca de 190 mil eram do gênero *Pinus* (MONTAGNA; YAMAZOC, 1978).

No Rio Grande do Sul, a área total de florestas plantadas corresponde a 480 mil hectares, dos quais cerca de 180 mil são do gênero *Pinus*, contribuindo com mais de 700 mil m³ de toras por ano (TONINI, 2000).

2.2 Crescimento e produção

De acordo com Spiecker (1981), o crescimento das árvores é o resultado dos efeitos de sua constituição genética, das características ambientais, definidas pelo clima, solo e sistema de manejo e das interações entre eles.

Segundo Daniel, Helms e Baker (1979), o crescimento total de um povoamento, incluindo tocos e raízes, pode ser expresso de várias formas, dependendo do propósito do manejo, o que pode incluir a produção total sobre a rotação, os volumes removidos nos cortes intermediários e o crescimento bruto e líquido. Cada termo pode ser expresso em uma grande variedade de unidades (m^3 , mst, tonelada, etc.), sendo a análise do crescimento influenciada pela escolha da unidade, que depende dos objetivos do manejo e da utilização potencial.

Segundo Assmann (1970), uma vez que se tem como objetivo utilizar a madeira que é produzida em uma floresta com propósitos comerciais, o fator tempo assume especial importância. Como a capacidade produtiva de árvores e povoamentos é dependente da idade, torna-se possível fazer inferências sob o desempenho de árvores ou povoamentos sob diferentes condições ambientais e tratamentos.

A qualidade do sítio determina a quantidade de madeira que uma área pode produzir, enquanto o estoque florestal mede a extensão em que a capacidade produtiva de um sítio florestal está sendo utilizada no crescimento das árvores em um determinado momento (DAVIS, 1966).

Segundo Andrae (1978), o solo constitui o ambiente sólido de suporte dos vegetais, existindo, até certo grau, uma influência mútua quanto à sua presença ou não e ao seu nível de desenvolvimento. Certamente, quando se observa uma extensa região, o clima é o fator responsável pela diversificação das formações florestais. Porém, para um habitat em particular, o solo figura como elemento principal, não só decidindo parcialmente sobre qual a formação que ocorrerá, mas também sendo responsável pela aparência e produtividade vegetal.

A atividade de assimilação de uma determinada área foliar ou quantidade de folhas é decisivamente influenciada pelo suprimento de nutrientes, que dependem da fertilidade do solo. Um solo com completo suprimento de nutrientes é capaz de produzir, para uma mesma quantidade de folhagem, duas vezes mais madeira do

que seria produzido em um solo pobre. Na reação dos povoamentos florestais aos desbastes, observa-se que as árvores remanescentes aumentam rapidamente seu incremento, devido ao melhor aproveitamento dos fatores ambientais. Isso se denomina Efeito de Aceleração do Crescimento, que é dependente da época e do peso do desbaste. Quando da aplicação de desbastes na fase juvenil, antes do ponto de culmínio do incremento corrente em volume, ocorre uma maior reação de crescimento (ASSMANN, 1970).

A resposta de aceleração do crescimento não é imediata, podendo levar até quatro anos, pois a árvore necessita ampliar a sua superfície foliar e radicular para, a partir daí, produzir um incremento significativo em diâmetro (SCHNEIDER; SCHNEIDER, 2008).

Entre os especialistas europeus, existe a tendência de associar a designação de Lei de Eichhorn ao conjunto de princípios que decorrem das relações entre volume e altura dominante, em homenagem ao engenheiro florestal alemão de mesmo nome, que a enunciou pela primeira vez, em 1904. Essa lei afirma que o volume total pode ser considerado exclusivamente uma função da altura dominante do povoamento (ALVES, 1982).

A densidade do povoamento é o segundo fator em importância, depois da capacidade produtiva do sítio, para a determinação da produtividade de um povoamento, sendo o principal fator que pode ser manejado pelo silvicultor durante o desenvolvimento do mesmo (SCHNEIDER; SCHNEIDER, 2008).

Estudos sobre competição por água, luz e nutrientes demonstraram que, para uma produção mais econômica de madeira, as árvores devem estar espaçadas mais amplamente, significando que o espaçamento inicial deve ser mais amplo, e os desbastes, mais fortes. Essa estratégia permite postergar o primeiro desbaste do povoamento, fazendo com que as árvores retiradas apresentem maior volume e maior valor comercial (HILEY, 1959).

Assmann (1970) afirma que as áreas florestais manejadas com desbastes pesados produzem menor volume total do que as com desbastes leves. Sobre isso, Reinstorf (1970) estudou a influência da densidade populacional no crescimento de *Pinus elliotii* e constatou que a produção foi maior em povoamentos de alta densidade quando comparada a povoamentos de menor densidade e que a qualidade do sítio também influencia a produção, pois sítios mais produtivos, para

atingirem todo o seu potencial produtivo, necessitam de um número maior de árvores por unidade de área do que sítios menos produtivos.

A teoria de Mar-Müller atesta que, dentro de limites amplos de densidade, o incremento em volume não é afetado pela densidade, ou seja, eliminando-se os limites extremos de densidade populacional, em longo prazo, a produção total em volume é praticamente igual para diferentes níveis de densidade. Baseando-se nessa constatação, pode-se afirmar que o incremento em área basal ou volume, dentro de limites razoáveis de densidade, é uma função da qualidade do sítio florestal e que o efeito do desbaste, então, é de concentrar incremento em um número menor de árvores e não aumentar o incremento absoluto do povoamento (ASSMANN, 1970).

O espaçamento ótimo é aquele capaz de produzir o maior volume de produto em tamanho, com forma e qualidade desejáveis. As árvores em povoamentos com espaçamentos amplos crescem mais rápido do que em espaçamentos pequenos e terão, em uma determinada idade, maior diâmetro, maior conicidade, casca mais grossa e copa maior. Teoricamente, a maior produção volumétrica é alcançada em plantações suficientemente densas, para atingir a plena ocupação do sítio, o mais cedo possível. Em espaçamentos maiores, o povoamento permanece subestocado, até que as copas fechem, havendo, portanto, uma perda de produção, pois o tempo para que haja plena ocupação da área será maior (SMITH; WOODS, 1997).

O processo de seleção natural faz com que as árvores aloquem carboidratos, aumentando, dessa forma, a habilidade das árvores de sobreviver. O fato de algumas funções serem mais cruciais do que outras determina uma prioridade no quadro de alocações. Isto, segundo Oliver e Larson (1996), é feito na seguinte ordem de sequência de prioridades: manutenção da respiração dos tecidos vivos; produção de folhas e raízes finas; produção de flores e sementes; crescimento primário com crescimento lateral e terminal dos galhos; e crescimento em extensão das raízes. Então, quando ainda houver carboidratos disponíveis, estes são utilizados para adicionar xilema (crescimento em diâmetro) e desenvolver mecanismos de resistência contra o ataque de insetos e doenças.

Coelho e Finger (1997) estudaram o crescimento em altura de *Pinus elliottii* na região de Canela, RS, comparando árvores originadas de regeneração natural e artificial. Os pares de dados de altura e idade foram obtidos através da análise de tronco, sendo as árvores amostradas em cada tratamento tomadas entre a média e

mais ou menos um desvio padrão. Foram amostradas 10 árvores para o tratamento com mudas produzidas em saco plástico, 9 árvores para o tratamento com regeneração natural e 11 árvores para o tratamento com mudas produzidas em raiz nua. A comparação entre os tratamentos, feita por análise de covariância, mostrou que a regeneração natural tem crescimento inicial maior, crescendo 21,85% a mais do que árvores originadas de mudas produzidos em recipientes do tipo saco plástico e 45,62% a mais que as originadas de raiz nua.

Sobre o crescimento em altura, Assmann (1970) relata reações diferentes entre folhosas e coníferas, ocasionadas pela retirada de árvores em um desbaste. Como regra geral, desbastes moderados oferecem um melhor crescimento em altura, e aberturas severas do dossel proporcionam o aumento do incremento em diâmetro sem aumentar o incremento em altura. Em folhosas, a abertura do dossel pode provocar o crescimento dos ramos da periferia da copa, em detrimento do incremento em altura, como foi observado em *Fagus sylvatica* L.

O crescimento é comumente expresso em termos de unidades de volume, que são mais fáceis de medir e, certamente, mais óbvias. No entanto, o manejo objetivando simplesmente a produção em volume muitas vezes não é suficiente, pois as condições de crescimento podem afetar profundamente as propriedades físicas e químicas da madeira e, conseqüentemente, a sua utilização para vários usos. A mensuração do crescimento em termos de unidade de volume é o primeiro e imediato problema, sendo a transformação em unidade de valor o passo final necessário (DAVIS, 1966).

Segundo Simões (1972), o crescimento de uma árvore é influenciado por diversos fatores, como deficiência ou excesso de umidade, aeração inadequada do solo, adaptação genética da espécie, ataque de insetos e patógenos e nutrição do solo, sendo que a deficiência dos elementos essenciais à planta reduz drasticamente seu ritmo de crescimento.

Para Hess (2006), os efeitos dos fatores ambientais sobre o crescimento das florestas agem de forma inter-relacionada e dificilmente podem ser analisados isoladamente. Assim, a determinação dos sítios naturais das diferentes regiões é importante do ponto de vista de que cada uma apresenta tipos de solos diferenciados e, conseqüentemente, limitações que resultam na necessidade de planos de manejo também diferenciados, levando à obtenção de resultados

econômicos que podem ser mais ou menos favoráveis para o produtor (PEZZUTTI et al., 2008).

Além das características ambientais, é importante considerar as características da planta e de seu processo de crescimento, como, por exemplo, o tecido fotossintético ativo, chamado mesófilo das folhas, que possui pigmentos especializados para a captação de luz, característicos das plantas superiores, as clorofilas. A energia solar captada pela planta durante a fotossíntese é usada para oxidar a água, produzir oxigênio e reduzir o gás carbônico, produzindo compostos orgânicos como açúcares. A velocidade com que a planta realiza a fotossíntese depende da capacidade de assimilação imediata dos nutrientes mineralizados a partir da decomposição da serapilheira e de elementos químicos do solo (SCHNEIDER; SCHNEIDER, 2008).

Para Baker (1950), a importância do processo fotossintético, no manejo das florestas, para fins de produção de madeira, restringe-se a cinco razões: a madeira é composta, em quase toda a sua totalidade, por C, H e O; o interesse econômico está no fuste, sendo descartadas as folhas, os ramos e a ponteira; em termos econômicos, é praticamente inviável fazer adubação, a qual depende da análise econômica do investimento, vinculada diretamente com a grandeza da rotação; o manejo da floresta permite a manipulação da incidência de luz no povoamento através de tratamentos silviculturais, como os desbastes; quando se consorciavam duas espécies corretamente, é possível manter alto grau de produtividade.

O crescimento de maior interesse econômico para a produção de madeira apresenta um baixo valor na escala biológica de propriedades, sendo controlado somente por desbastes ou por outra forma de regulação de densidade dos povoamentos. O crescimento em diâmetro dá-se em função das atividades do câmbio vascular, o qual produz células que dão origem ao lenho, as quais, por sua vez, diferenciam-se em alburno e cerne. Em termos de altura, o crescimento se dá em função do meristema primário ou gema apical, através de divisões celulares. Por outro lado, o crescimento de uma árvore isolada apresenta poucas semelhanças com o crescimento de uma árvore dentro de um povoamento, por isso o estudo é feito separadamente. O crescimento é, geralmente, expresso em volume, pois é mais simples e fácil de medir. Porém, quando o objetivo do manejo florestal são produtos que, além de tamanho, também possuam qualidade, essa unidade de medida não satisfaz a necessidade (IMAÑA-ENCINAS; SILVA; PINTO, 2005).

A curva de produção é dividida basicamente em três períodos. O primeiro, definido como a fase juvenil, apresenta uma alta aceleração do crescimento. Nessa fase, a taxa de crescimento atinge o valor máximo, fazendo coincidir o ponto de inflexão da curva de produção com o valor máximo da curva de crescimento de ICA. O segundo período é denominado período de maturação e apresenta um baixo nível de crescimento, caracterizado pelo valor máximo de IMA coincidindo com o ponto de tangência máxima na curva de produção. Este ponto também coincide com o cruzamento das curvas de IMA e ICA. O terceiro e último período é denominado fase de senescência, em que o crescimento é interrompido e a árvore atinge a dimensão máxima (SPURR, 1952).

Rovedder e Eltz (2008) realizaram um estudo com espécies florestais exóticas para a recuperação de solos degradados, auxiliando no controle da erosão hídrica e eólica. No sudoeste do Rio Grande do Sul, foram testados o *Pinus elliottii* e o *Eucalyptus tereticornis*, com o objetivo de avaliar o crescimento destas espécies e testar sua capacidade na contenção do fenômeno da arenização. Os tratamentos consistiram do plantio das duas espécies sobre o solo degradado por arenização (SD), sobre o campo nativo (C), sobre o campo nativo associado a plantas de cobertura (C+PC) e sobre o solo degradado com plantas de cobertura (SD+PC). Como planta de cobertura, foi testada a aveia-preta (*Avena strigosa* Schireb.) e um tremoço nativo do ecossistema dos campos sulinos, o *Lupinus albescens* Hoor et Arn. Determinaram-se o percentual de sobrevivência inicial, a altura, o diâmetro à altura do colo (DAC) e o fator de produtividade (FP) das espécies florestais, aos 30 dias, 6 meses e 12 meses após o plantio. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, e os resultados, submetidos ao teste de Duncan, em um nível de 5% de probabilidade de erro. Em relação à sobrevivência inicial, apenas o *Pinus* apresentou diferenças estatísticas, com menor percentual no tratamento C+PC. Os resultados demonstraram que o eucalipto beneficiou-se do consórcio com plantas de cobertura, enquanto o *Pinus* apresentou maior sensibilidade à competição interespecífica.

A produtividade de *Pinus taeda* está positivamente associada aos solos de maior fertilidade, com maiores teores de nitrogênio e fósforo (REISSMANN; WISNEWSKI, 2005). Enquanto isso, nos sítios de maior produtividade, as árvores tendem a ser mais uniformes, tendendo a diminuir com a idade (BINKLEY et al., 2010).

Para o gênero *Pinus*, a adaptação às condições edafoclimáticas explica o rápido crescimento e produtividade, podendo atingir cerca de $25 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ e ultrapassando, em alguns sítios, $45 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ (KRONKA et al., 2005).

2.3 Arenização dos solos

Para entender a gênese do processo de degradação dos solos no sudoeste do estado do Rio Grande do Sul, inicialmente deve-se fazer uma necessária conceituação da diferença entre desertificação e arenização. O termo desertificação foi conceituado na Conferência sobre Desertificação, realizada em Nairobi no Quênia, em 1977, sendo definido como a diminuição ou a destruição do potencial biológico do solo, que pode desembocar, em definitivo, na condição do tipo desértico. Nessa conferência, além do plano de ação, foi elaborado um mapa mundial com a localização dos desertos e das áreas de risco à desertificação, classificados em muito alta, alta e moderada. Assim, observando-se esse mapa, verifica-se que, no Brasil, somente o nordeste inclui-se nesse processo.

Por outro lado, a United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD) definiu desertificação como a degradação do solo em regiões áridas, semiáridas e de áreas secas a subúmidas, resultante de vários fatores, incluindo a variação climática e atividades humanas, tendo por consequência a redução ou perdas biológicas ou de produtividade econômica (UNCCD, 1994).

O Rio Grande do Sul não se apresenta como região afetada pela desertificação. As razões são claras: sua localização geográfica em região de clima subtropical, com precipitação média anual em torno de 1.400 mm. Por consequência, o estado está fora da zona onde o clima, juntamente com a ação do homem, tem sido o motivo principal da degradação do solo, o que não leva à classificação destas áreas arenizadas como desertos.

Os areais ocorrem sobre unidades litológicas frágeis (depósitos arenosos), em áreas com baixas altitudes e declividades, sendo também comuns nas médias colinas ou nas rampas em contato com escarpas de morros testemunhos, como mostra a Figura 3A e 3B, respectivamente.

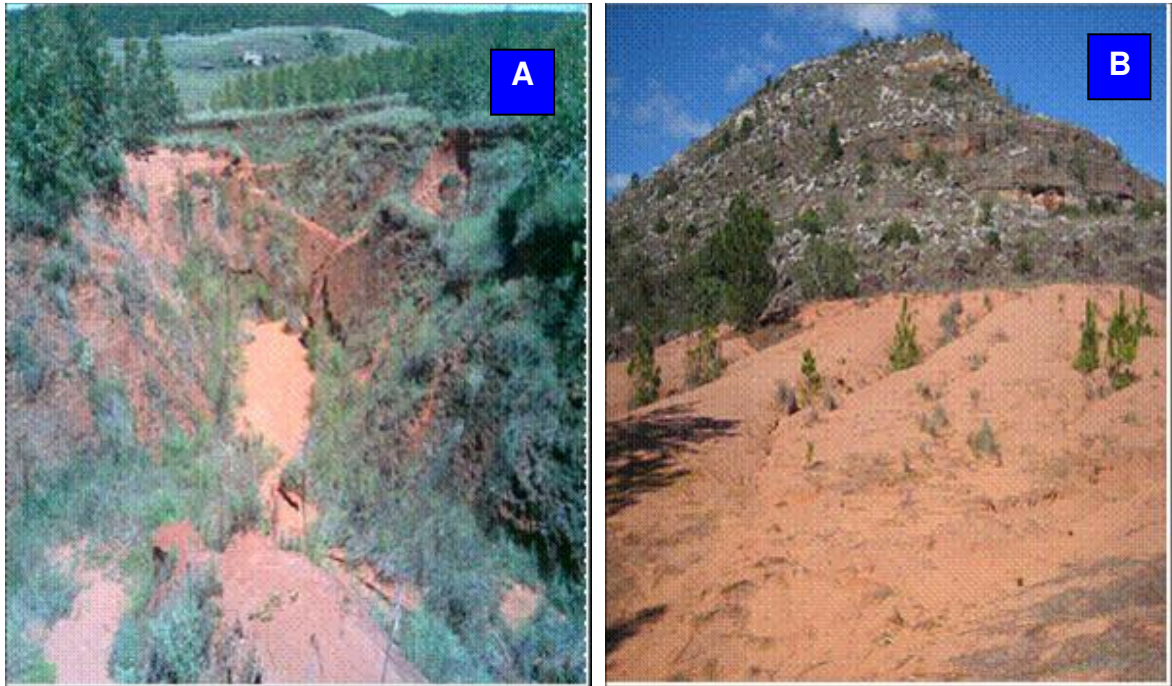


Figura 3 – Formação de voçoroca (A) e erosão em colinas (B) em área arenizada em Manoel Viana, RS.
Foto: Schneider (2010).

Conforme Moller et al. (1975), no passado geológico, a região de ocorrência dos atuais areais da fronteira sudoeste do Rio Grande do Sul apresentava um clima árido, responsável por um ambiente típico de desertos, constituído essencialmente por areias. Com o passar do tempo, a variação do clima permitiu o desenvolvimento de vegetação e a conformação da paisagem atual, composta por vegetação de campo e matas de galeria.

Gomes, Carvalho e Barbosa (1980) afirmam que alguns campos de dunas existentes no local devem ter sido ativados durante períodos secos do Quaternário, sendo, atualmente, reativados pela ação humana quando da remoção da cobertura vegetal.

As manchas de areia brotam nos campos de dez municípios do Rio Grande do Sul próximos da fronteira com a Argentina e o Uruguai: Alegrete, Cacequi, Itaqui, Maçambará, Manoel Viana, Quaraí, Rosário do Sul, São Borja, São Francisco de Assis e Unistalda. Nessa região, a formação de pradarias mistas sobre o substrato arenítico constitui-se em um dos mais frágeis ecossistemas da América do Sul (AB'SABER, 1995).

Devido a isso, o Ministério do Meio Ambiente, em 1992, considerou essas áreas arenizadas como prioritárias. Os dados do Atlas da Arenização produzido por uma equipe do Departamento de Geografia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul mostram que a degradação atinge 3.670 hectares, aos quais se somam mais 1.600 hectares em que são encontrados focos de arenização. Isso representa 0,26% da região sudoeste do estado. Este número, na prática, traduz-se em um grave problema ambiental, que se reflete na destruição dos campos e no assoreamento dos rios, com efeitos na capacidade produtiva e econômica da região. Existem areais em expansão, mas, embora pareça estranho, verificam-se locais em que houve retrocesso.

A arenização não pode ser chamada de desertificação, porque um deserto é caracterizado pela escassez de chuvas, enquanto a região de Alegrete tem média pluviométrica anual de cerca de 1.500 mm. A isso se alia um solo extremamente arenoso, assentado sobre um arenito conhecido como Formação Botucatu. As precipitações torrenciais acabam criando sulcos na terra frágil, que resultam em ravinas, as quais, ao longo do tempo, vão se expandindo pela ação das enxurradas e formam as voçorocas, grandes crateras no campo, que dão origem aos areais a partir da ação do vento.

O fenômeno da degradação do solo, em toda a América Latina, tem influências negativas diretas sobre cerca de 160 milhões de pessoas. No Brasil, as áreas degradadas somente pelos processos de desertificação e arenização compreendem 10% da superfície do país (SAADI, 2000).

Segundo Suertegaray (1995), a gênese dos areais está vinculada a três processos naturais: a deflação, o escoamento superficial e o escoamento concentrado sob a forma de ravinas e voçorocas. Nos meses de verão, predomina a deflação. As chuvas ocasionais e de curta duração, associadas às altas temperaturas e à evaporação, provocam, em alguns locais, o ressecamento do solo, favorecendo a movimentação de suas partículas pela ação dos ventos. O choque entre partículas maiores e menores ocasiona o fracionamento das mesmas em unidades cada vez menores, até o tamanho de um grão de areia.

Contudo, a intensificação das atividades agropecuárias, durante o século passado, constituiu-se em fator decisivo para a rápida expansão dos processos de degradação. Os focos de arenização são conhecidos regionalmente como “areais”,

pelo fato de exporem o solo extremamente arenoso, formando “campos de areia” em meio à vegetação campestre (SUERTEGARAY, 1998).

Essa região dos areais apresenta como principal característica o relevo suave ondulado com presença de morros residuais de arenito silicificado, formando planícies de grandes extensões, onde predominam solos de textura arenosa (SOUTO, 1984; SUERTEGARAY, 1998; KLAMT; SCHNEIDER, 1995).

Esses solos são caracterizados por apresentarem limitação natural quanto à fertilidade, baixa capacidade de retenção de água devido à granulometria grosseira e alta suscetibilidade à erosão, características relacionadas ao material geológico e aos processos de evolução das superfícies geomórficas e de retrabalhamento de sedimentos (KLAMT, 1994; AZEVEDO; KAMINSKI, 1995).

Alguns estudos e tentativas de recuperação dessas áreas foram realizados com o apoio de entidades governamentais e privados (SOUTO, 1984; SUERTEGARAY, 1987; AMADO, 2001; ROVEDDER, 2003). Uma dessas experiências iniciais, realizada na década de 1960 a 1970, teve por local um dos areais mais antigos da região, conhecido popularmente como “Deserto de São João”. Neste local, foram testados diferentes métodos de contenção da erosão eólica. Outro método eficiente em conter o processo de arenização foi o plantio de eucalipto na borda de transição entre o areal e o campo nativo (SOUTO, 1984).

Em 1973, um grupo de professores da Universidade Federal de Santa Maria realizou uma visita às áreas dos desertos de São João, tendo emitido um relatório sob o título “Os desertos do Rio Grande do Sul e a opinião da UFSM”, no qual Andrae (1973) afirma o seguinte:

Os focos de erosão e conseqüentemente o enfraquecimento da vegetação são motivados por vários fatores, os quais geralmente manifestam-se em conjunto. Trata-se principalmente do uso tradicional das pastagens manejada com queimas periódicas e o pastoreio excessivo, que provocam o surgimento de pontos e manchas onde inicia a erosão, e o material erodido avança sobre áreas adjacentes. Este processo dá-se mais pronunciadamente pela erosão em áreas do que pela formação de voçorocas. Caso não haja eliminação da queima e pastoreio nestes núcleos, os areais podem aumentar, já que as áreas limítrofes aos areais são as mais sujeitas a perder a sua cobertura vegetal. Supõe-se que seja este o motivo principal da formação dos ‘desertos atuais’, provocados então pelo não cessamento das práticas de queima e pastoreio em torno dos focos iniciais. Assim a vegetação

não consegue se fixar nestas áreas, isto principalmente quando estas forem maiores e com uma dinâmica própria, quando as areias alastram-se via erosão eólica formando pequenas dunas que avançam sobre o campo ainda intacto. (ANDRAE, 1973).

A tipologia vegetal é fortemente influenciada pela constituição edáfica, caracterizada pela predominância da formação campestre, constituindo-se de uma paisagem testemunha de um paleoambiente semiárido ou semiúmido estepário, o qual, mais recentemente, sofreu umidificação, vindo a caracterizar a vegetação e o clima atuais (SUERTEGARAY, 1995).

Apesar das pesquisas desenvolvidas no decorrer das últimas décadas (SOUTO, 1984; SUERTEGARAY, 1987; REINERT et al., 1998), permanece a escassez de informações específicas e conclusivas sobre os mecanismos de degradação, as modificações que ocorrem no ambiente regional e as formas de reconversão, fazendo com que muitas dúvidas permaneçam sem respostas. Estudos mais aprofundados favoreceriam o desenvolvimento de estratégias de recuperação dessas áreas com maior probabilidade de sucesso. Dentre os inúmeros aspectos que poderiam ser avaliados, destaca-se o estudo das comunidades bióticas dos solos areníticos da região. Assim sendo, a compreensão do comportamento dos solos, em sistemas naturais ou antrópicos, exige o conhecimento da pedofauna, a qual se distribui em comunidades extremamente complexas em número de organismos, apresentando ainda grande diversidade genética e funcional (ASSAD, 1997).

2.4 Água no solo e clima

Em geral, o crescimento das árvores aumenta com a precipitação (MURPHY; LUGO, 1986) e diminui com a seca (NATH et al., 2006; LOLA DA COSTA et al., 2010). Independentemente da chuva, a fertilidade do solo também pode afetar a taxa de crescimento das árvores (LU; MORAN; MAUSEL, 2002; MALHI et al., 2004), com melhor crescimento em solos mais ricos em nutrientes (RUSSO et al., 2005).

A disponibilidade de água da área depende da posição topográfica em que ela se encontra, pois influencia diretamente o desenvolvimento das plantas do local, assim como a formação do solo (HANNAH; HARLAN; LEWIS, 1982).

Para Gonçalves (1990), frequentemente a disponibilidade de água no solo é o fator que mais determina o crescimento das árvores, sendo importante a avaliação de seus determinantes. Para Schultz (1997), a produtividade do gênero *Pinus* está positivamente associada aos sítios com regimes hídricos mais favoráveis ao crescimento da espécie, com temperaturas amenas e menor déficit hídrico.

Segundo Landsberg (1986), de todos os recursos que a planta mais necessita para seu crescimento, a água é o mais limitante à produtividade, por controlar a abertura e o fechamento estomático, a absorção de nutrientes do solo e, obviamente, por ser o meio onde todas as reações químicas e bioquímicas ocorrem, como a fotossíntese.

De acordo com Stone e Silveira (1999), quando se efetua um preparo do solo, suas propriedades físico-hídricas são alteradas. Sobre isso, alguns autores concluem que, em plantio direto, o conteúdo de água do solo é maior que em áreas cultivadas com preparo convencional (LAL, 1974; VIEIRA, 1981; SIDIRAS; DERPSCH; MONDARDO, 1983; SALTON; MIELNICZUK, 1995).

Outro fator que influencia positivamente a retenção de água no solo é o acúmulo de matéria orgânica na camada superficial, ocasionando uma melhoria em sua estrutura (FERNANDES et al., 1983; REEVES, 1995), pois mantém a umidade do solo, evitando a incidência direta da radiação solar, e diminui a lixiviação das partículas e nutrientes do solo.

O efeito do déficit hídrico sobre o rendimento em uma cultura vai depender da intensidade, duração, época de ocorrência e interação com outros fatores determinantes da expressão do rendimento final (CUNHA; BERGAMASCHI, 1992). Em solos com maior disponibilidade de água, ar e nutrientes, a planta tem a possibilidade de melhor desenvolvimento e distribuição do seu sistema radicular no perfil do solo, estando mais bem preparada para enfrentar um estresse hídrico (GATTO, 2000).

Em locais onde a precipitação não é a fonte principal de água para as plantas, a vegetação desenvolve mecanismos para buscar a água necessária para o seu desenvolvimento, através da expansão de suas raízes até uma fonte de água. Um exemplo é o cerrado no estado de São Paulo, onde a vegetação lenhosa sofre com

um déficit hídrico acentuado, devido à maior densidade de árvores com sistemas radiculares profundos (NAVES-BARBIERO et al., 2000).

A disponibilidade hídrica, se reduzida, afeta vários processos metabólicos da planta, provocando fechamento total ou parcial dos estômatos e limitando a perda de água e fixação do CO₂. Além disso, também afeta a distribuição dos nutrientes, uma vez que ela se constitui no meio de transporte que permite aos nutrientes serem absorvidos pela planta e levados até todos os seus pontos de processamento fisiológico (NOBEL, 1974).

A radiação solar, temperatura, umidade do ar e precipitação são os principais fatores climáticos que influenciam no crescimento de uma floresta (TROVATI, 1982). Em plantio de *Pinus taeda*, a baixa disponibilidade de água no solo e temperaturas extremas têm sido os principais fatores que afetam negativamente a área foliar e, conseqüentemente, reduzem a interceptação e uso da radiação pelas plantas. Para as coníferas, a capacidade ótima de fotossíntese requer uma temperatura que varia entre 10 a 25°C. Por isso, as plantas podem reduzir a assimilação de carbono devido ao aumento da transpiração e ao fechamento dos estômatos (LARCHER, 2006).

Toledo et al. (2011), em estudo realizado nas florestas da Bolívia, concluíram que o ambiente tanto quanto a perturbação podem explicar a variação da taxa de crescimento em florestas de planície. Essa variação foi mais fortemente determinada pelo clima e pela água da chuva avaliada. Porém, em período mais curto em anos intensa seca e temperaturas elevadas leva a maiores taxas de crescimento. A fertilidade e a textura do solo por si só, no entanto, não apresentaram fortes efeitos. Enquanto a taxa de crescimento aumentou com distúrbios relacionados com exploração madeireira, o estímulo positivo dessa exploração desapareceu após 6 anos. Em alguns casos individuais, as variáveis climáticas, tais como a duração do período seco, precipitação anual e temperatura apresentam correlações mais fortes com a taxa de crescimento do que os multivariados eixos climáticos (PCA¹ ambiental). Da mesma forma, Mg, CTC e MO foram mais fortemente correlacionados com a taxa de crescimento do que o multivariado eixo do solo (PCA edáfico). Os cenários das alterações climáticas para trópicos preveem uma futura diminuição das chuvas e aumento da temperatura. A alta sensibilidade do crescimento das árvores para estes fatores climáticas pode ter grandes conseqüências para a produtividade

¹ PCA = Principal Component Analyse.

da floresta e o sequestro de carbono. Os efeitos negativos do aumento da sazonalidade sobre o crescimento das árvores, entretanto, pode ser parcialmente compensado pelos efeitos positivos da alta temperatura nas florestas.

2.5 Elementos nutritivos e biológicos do solo

Muitas florestas tropicais diferem das florestas temperadas em seus estoques e fluxos de nutrientes biologicamente importantes tanto quanto em recursos de biomassa. Em particular, ecossistemas tropicais úmidos são relativamente ricos em N disponível (VITOUSEK, 1984; SOLLINS, 1998) e a taxa de crescimento é, provavelmente, limitada pelo P ou outros nutrientes derivados das rochas (VITOUSEK; DENSLOW, 1986, 1987).

O solo pode ser definido como uma mistura de materiais inorgânicos e orgânicos, formados a partir de uma série de processos na superfície terrestre, que ocasionam a decomposição de rochas e minerais primários, devido à ação de agentes atmosféricos, físicos, químicos e biológicos (LENZI; COSTA, 2001).

Para Barros e Novais (1990), uma planta em solo fértil pode estar mal nutrida de um determinado nutriente, devido à umidade insuficiente para o transporte deste na planta, ficando na dependência, assim, de fontes mais distantes e podendo sugerir outras soluções que não a simples adição de doses desse nutriente ao solo. Em regiões com maior pluviosidade, tanto na quantidade quanto na distribuição, solos com maior retenção, sistemas de manejo conservador de água e plantas com sistema radicular mais profundo são situações que podem contribuir para a nutrição da planta. Quando fatores como disponibilidade do nutriente no solo, quantidade e qualidade do tecido amostrado, idade fisiológica, época, condições climáticas, entre outros, permanecem constantes, a concentração crítica de um nutriente pode variar de um solo para outro. Para os autores, a disponibilidade de umidade do solo tem grande influência na deficiência nutricional das plantas, que geralmente desaparecem em períodos chuvosos. Além disso, influencia também no tamanho do caule, que se apresenta curto quando exposto a pequena quantidade de umidade. Consegue-se observar, assim, a íntima relação entre o crescimento e a distribuição de chuvas ao longo do tempo.

Um dos mais importantes elementos presente nos solos é o alumínio, que, em solos ácidos, pode encontrar-se em solução, ser transportado e absorvido e trazer problemas de toxicidade para a planta. Segundo Mossor-Pietraszewska (2001), a toxicidade de alumínio é um dos principais fatores que limitam o crescimento das plantas em solos muito ácidos, que pode ser contornado através de calagem, a qual transforma uma forma iônica transportável em hidróxido de alumínio não mais transportável (BARROS; NOVAIS, 1990).

Furlani e Furlani (1991) afirmam que uma planta tolerante a alumínio consegue desenvolver seu sistema radicular em profundidade e explorar maior volume de solo, em busca de água e nutrientes. Além disso, a planta tolerante apresenta maior conteúdo de fósforo, assim como dos demais nutrientes. A interação do Al com os nutrientes P, Ca, K e Mg pode estar envolvida no mecanismo de tolerância e varia de importância conforme a espécie.

A tolerância ao alumínio é conferida em plantas que produzem ácidos orgânicos nas suas raízes, como, principalmente, ácido cítrico e oxílico, formando, assim, complexos com os íons de Al (MULLETTE; NOLA; ELLIOTT, 1974). Furlani e Furlani (1991) ainda relatam que a baixa concentração de alumínio pode ser benéfica, pois estas pequenas concentrações de alumínio solúvel podem estimular o consumo de fósforo em raízes e partes aéreas de espécies leguminosas tolerantes.

O nitrogênio é um macronutriente que chega ao solo através do ar, sendo seu teor, no solo, indicador do grau de riqueza em matéria orgânica. Ele tem a capacidade de exercer efeito mais rápido sobre a planta, estimulando o crescimento vegetativo e sendo responsável pela cor verde-escura da folhagem (COELHO, 1973). Além disso, participa da formação de diversos compostos, como as proteínas e clorofilas, ambas importantes para o crescimento e desenvolvimento das plantas (CRUZ; PELACANI; ARAÚJO, 2006).

As plantas cultivadas sob deficiência de nitrogênio não expressam seu potencial produtivo. No entanto, além da quantidade de nitrogênio disponível, a proporção nitrato x amônio ($\text{NO}_3^-:\text{NH}_4^+$) presente no solo pode alterar o crescimento das plantas (BARKER; MILLS, 1980). O N pode ser encontrado, principalmente, nas formas de nitrato e amônio na solução do solo. No entanto, na maioria dos solos cultivados, o nitrato é a principal forma de aquisição de N pelas plantas (MARSCHNER, 1995). Estudos têm sido realizados sobre a absorção de nitrogênio

em plantas com micorrizas arbusculares, devido ao aumento da área de abrangência pelas hifas forjicas (AMES et al., 1984).

O fósforo tem grande importância no crescimento vegetal, por ser responsável pela transferência de energia na síntese de substância orgânica (PRIMAVESI, 2002). A forma orgânica, que constitui a maior parte presente no solo, tem efeito no desenvolvimento do sistema radicular, estimulando, principalmente, a formação das raízes secundárias (COELHO, 1973).

Os estudos envolvendo a nutrição e disponibilidade de fósforo para o cultivo de diversas espécies torna-se muito importantes, pois as adubações recomendadas para as culturas podem acabar em fracassos devido ao fato de que as culturas possuem hábitos de crescimento e exigências nutricionais diferenciadas. A determinação do nível crítico de certo nutriente para cada espécie ou grupos de espécies é realizada de acordo com as exigências nutricionais e nas diferenças de absorção e/ou utilização do nutriente (BARROS; NOVAIS, 1990). Quando o solo apresenta deficiência de fósforo, as plantas que se desenvolvem com nitrato absorvem menos nitrogênio do que as plantas que crescem com amônia, devido à exigência de maior energia para a redução de NO_3^- (BEZLYUDNYI; BELENKEVICH, 1970).

O potássio ocorre no solo de forma solúvel, trocável extraível, não-trocável, mineral e total. A passagem de K trocável para K solução é muito rápida, de maneira que o K trocável é disponibilizado às plantas. Já o K não-trocável é moderadamente disponível às plantas, uma vez que a passagem dessa forma para a trocável é lenta (SPARKS, 1980).

O cálcio tem grande importância no desenvolvimento e funcionamento das raízes, além de ser necessário nas formações de folhas das plantas. A necessidade de correção do solo está amparada pela tolerância de determinada planta ao alumínio trocável e na sua exigência por cálcio e magnésio em níveis e relações satisfatórias. Além disso, visa-se também eliminar excessos de manganês e/ou ferro solúvel, que pode tornar-se tóxico para algumas plantas (BARROS; NOVAIS, 1990).

Estudos que visam verificar a influência da aplicação de enxofre no solo, com vistas a melhorar o crescimento de espécies florestais, são raros (PRITCHETT, 1979). Da mesma forma, também são raros os estudos sobre a disponibilidade de enxofre do solo para a maioria das espécies vegetais (FONTES et al., 1982).

O zinco apresenta baixa concentração na solução do solo, devido à grande absorção pelo solo, e um transporte predominantemente por difusão. Sua absorção pela planta é fortemente influenciada pelo potencial hídrico do solo (KALBASI; RACZ; LOEWEN-RUDGERS, 1978) assim como pelas baixas temperaturas, de acordo com a relação Zn:planta (MENGEL;KIRKBY,1982), bem como pela solubilidade do Zn, também altamente dependente do seu pH. De acordo com Lindsay (1972), a elevação de uma unidade de pH acarreta diminuição da solubilidade deste elemento em cerca de 100 vezes.

Os sintomas de deficiência de zinco e boro são frequentemente observados em solos de textura arenosa a média, que, devido à baixa retenção de água, agravam os problemas de transporte, além de tratar-se geralmente de solos mais pobres, conforme Barros e Novais (1990). Para os autores, o ferro e manganês têm sua atividade basicamente determinada pelo potencial-redox e pelo pH do sistema. Ambientes anaeróbicos, como áreas alagadas, apresentam menor potencial-redox, contrariamente a ambientes bem drenados e arejados, onde o potencial-redox é maior, sendo possível a redução de formas e compostos pouco solúveis no solo (Fe^{3+}) em formas mais solúveis (Fe^{2+}), aumentando a disponibilidade dos nutrientes para as plantas.

Com relação aos elementos químicos cobre e molibdênio no solo, existe pouca informação. Sobre o cobre, alguns estudos visam determinar a concentração ótima ou crítica nos tecidos vegetais. Já sobre o molibdênio, sabe-se que ele é um constituinte essencial da nitrato-redutase, enzima responsável pela redução do nitrato absorvido na planta (BARROS; NOVAIS, 1990).

Simões (1972) afirma existir uma baixa correlação entre o crescimento das árvores e o resultado da análise química do solo, já que esta indica apenas as concentrações dos nutrientes que, teoricamente, estariam disponíveis para a planta. Sobre isto, Kramer e Kozlowski (1972) complementam que a análise do solo tem valor limitado, pois o extrato do solo não é um indicador seguro da disponibilidade dos elementos nutritivos para as árvores.

A nutrição das plantas dependerá também das condições do sistema radicular e da densidade de indivíduos da área em estudo, pois indicará a competição por nutrientes do solo, principalmente tratando-se de populações homogêneas. A nutrição das plantas dependerá da capacidade do solo em fornecer os nutrientes e

dos fatores que afetam a habilidade da planta para absorvê-los da solução do solo (COREY, 1973).

Gonçalves (1990) recomenda que 20 a 40% das doses de N e K_2O e 100% da dose de P_2O_5 sejam aplicadas, por ocasião do plantio, para espécies de *Pinus*. Alternativamente, para evitar que o P seja imobilizado no solo, sobretudo nos mais argilosos, é recomendado parcelar as aplicações de P_2O_5 . Já para a adubação de cobertura, o autor recomenda cerca de 60 a 80% das doses de N e K_2O e, opcionalmente, P_2O_5 .

Witschoreck (2008) realizou um estudo em um povoamento de *Pinus taeda* de 17 anos de idade no município de Cambará do Sul, RS, em cambissolo húmico alumínico típico, como objetivo de estimar a biomassa e os nutrientes nos diferentes componentes das árvores e na serapilheira acumulada sobre o solo. A biomassa arbórea foi estimada em $253,56 \text{ Mg ha}^{-1}$, sendo que 62,4% é madeira do tronco, 13,6% é raiz, 8,9% é galho vivo, 7,4% é casca do tronco, 4,8% é acícula e 2,9% é galho seco. Considerando a biomassa arbórea total, o estoque de nutrientes corresponde a $567,90 \text{ kg ha}^{-1}$ de N; 42,37 de P; 206,66 de K; 261,19 de Ca; 96,03 de Mg; 93,87 de S; 1,73 de B; 0,84 de Cu; 13,36 de Fe; 11,09 de Mn; e 1,43 de Zn, sendo que tronco, madeira e casca, correspondem a 44,0%, 39,0%, 53,8%, 50,5%, 52,9%, 61,6%, 50,4%, 37,6%, 41,2%, 54,8% e 52,9%, respectivamente, do montante de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn. A serapilheira apresentou um acúmulo de biomassa de $14,93 \text{ Mg ha}^{-1}$, e o conteúdo de nutrientes, em kg ha^{-1} , foi de 152,73 de N; 7,79 de P; 10,05 de K; 47,78 de Ca; 12,87 de Mg; 8,94; 0,20 de B; 0,17 de Cu; 85,05 de Fe; 4,49 de Mn; e 0,41 de Zn. O solo apresentou um estoque de nutrientes disponíveis, concentrado na camada superior de solo, em kg ha^{-1} , de 1.205,8 de N; 15,5 de P; 209,5 de K; 1.838,0 de Ca; 449,7 de Mg; e 163,3 de S.

Vogel (2005) estudou os efeitos de diferentes doses de N, P e K no crescimento inicial de plantas de *Pinus taeda* aos 19 meses de idade. O experimento ocorreu em um povoamento próximo do município de Cambará do Sul. O solo da região é classificado como cambissolo húmico alumínico típico, textura argilosa. Os resultados indicam que foi obtida resposta linear e quadrática significativa para o P, evidenciando a importância da aplicação desse nutriente no crescimento inicial das plantas de *Pinus taeda*, com máximo ganho em volume cilíndrico, nas doses de 64 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 87 kg ha^{-1} de K_2O .

Rovedder et al. (2005), com o objetivo de avaliar o efeito de diferentes usos do solo sobre a fauna edáfica de um solo arenítico no sudoeste do Rio Grande do Sul, conduziram um estudo nesse sentido. Para isso, selecionaram quatro áreas adjacentes: área degradada, plantio direto, campo nativo e povoamento de eucalipto. Os organismos foram coletados com armadilhas do tipo Provid, em outubro, novembro e dezembro de 2001. Para cada uso do solo, avaliou-se a abundância para as ordens de maior ocorrência e a diversidade, através do Índice de Diversidade de Shannon. Devido à importância da ordem Collembola como indicador biológico, esta foi caracterizada até o nível de família e determinou-se a abundância em cada uso do solo. A maior diversidade foi encontrada em plantio direto. Os níveis de abundância e diversidade encontrados na área com eucalipto foram similares ao das áreas de plantio direto e campo nativo. A área degradada apresentou os menores índices de abundância e diversidade da fauna edáfica e menor abundância de colêmbolos, evidenciando as características de degradação do meio. O maior número de colêmbolos coletados, encontrado no campo nativo, no povoamento de eucalipto e na área de plantio direto, é explicado pelo maior suprimento de material vegetal nestes três usos, quando comparados à área degradada. Nesta última, a carência de fontes alimentares, devido à ausência da cobertura vegetal, aliada às altas temperaturas do solo exposto, faz com que a população de colêmbolos seja muito reduzida.

Em recente estudo, Rovedder (2003) encontrou temperaturas de até 49°C a 3 cm de profundidade do solo exposto em um areal do mesmo distrito rural do Deserto de São João, com reduções de até 18,6% na temperatura do solo quando este foi revegetado com culturas de cobertura. Altas temperaturas na superfície do solo atuam, juntamente com outras características de solo degradado, como um fator de restrição ao número de indivíduos e ao número de gerações anuais de Collembola. Para elevadas temperaturas do ar, diretamente proporcionais às temperaturas de solos expostos, foi encontrado um limite de apenas uma geração anual em algumas espécies de colêmbolos (BELLINGER, 1954).

Reissmann e Wisnewski (2005) relatam que as espécies de *Pinus* demonstram capacidade extraordinária de gerenciamento dos recursos nutricionais em sítios de baixa fertilidade, sem, no entanto, manifestar sintomas visuais de deficiência. Esses aspectos, embora positivos sob um determinado ponto de vista, geraram uma expectativa que se mostrou negativa no sentido do manejo nutricional

dessas espécies. A rapidez de crescimento e ausência de sintomas de deficiência, especialmente durante as primeiras rotações, reforça a expectativa de que os *Pinus* sp., em geral, dispensariam grandes cuidados com a adubação, ou que esta fosse totalmente dispensável.

Segundo Silva, Antonioli e Andrezza (2005), os fungos ectomicorrízicos podem ser considerados um importante componente para o desenvolvimento das plantas em solo em processo de arenização. Esses fungos pertencem à subdivisão basidiomicotina, que desenvolvem uma associação simbiótica mutualística com as plantas superiores. Ocorrem em um grupo restrito de plantas (aproximadamente 5%), sendo economicamente importantes para o setor florestal, e podem melhorar a eficiência de absorção de alguns nutrientes, tendo sido encontradas mais altas concentrações de Cu, Mn, Mg, Ca, Fe e Zn nos rizomas e frutificações dos fungos do que nos órgãos das plantas sem micorrizas (BELLEI; CARVALHO, 1992). Desse modo, espera-se que as plantas micorrizadas apresentem uma condição nutricional mais favorável ao seu estabelecimento, desenvolvimento e produção.

As micorrizas desempenham um importante papel no estabelecimento de diversas espécies vegetais, proporcionando um aumento na capacidade de absorção de nutrientes e água. Por exemplo, em mudas de jacarandá-da-bahia (*Dalbergia nigra* (Well.) Allemão ex Benth.), a inoculação promoveu maior crescimento das plantas em relação às mudas não-inoculadas (CHAVES et al., 1995). Em mudas de *Pinus* sp., também se obteve efeito significativo da inoculação com fungos micorrízicos, na matéria seca da parte aérea e das raízes, na altura e no diâmetro do colo (VIEIRA; PERES, 1990). Esse incremento da massa seca, especialmente no sistema radicular, pode ser um fator importante para o estabelecimento dessas espécies em solos degradados. Os fungos ectomicorrízicos podem auxiliar o estabelecimento de mudas de *Pinus* após o transplante para o campo. Nesse aspecto, várias pesquisas têm demonstrado a importância da inoculação com fungos ectomicorrízicos sobre o crescimento e desenvolvimento de mudas de *Pinus* a campo. Assim, o transplante dessas mudas, inoculadas com fungos ectomicorrízicos, pode ser uma importante alternativa visando o estabelecimento dessas espécies em solos degradados ou em processo de arenização.

Segundo Silva, Antonioli e Andrezza (2005), os fungos F1 – RS e Pt Silv.1 beneficiaram as mudas de *Pinus* nos parâmetros radiculares, como massa verde

radicular, comprimento e área superficial específica da raiz. A associação micorrízica não favoreceu a absorção de nutrientes (N, P e K) e o desenvolvimento da parte aérea da muda de *Pinus*.

2.6 Vegetação do entorno dos areais

Rovedder et al. (2005) fizeram um amplo estudo sobre a vegetação do entorno dos areais. Nos campos existentes ao redor do areal, por exemplo, foram encontradas 42 espécies de plantas pertencentes a 13 famílias. A família Poaceae é a mais representativa, com 16 espécies, predominando o *Andropogon lateralis* Nees (capim-caninha). Esta espécie forma touceiras altas, nas quais ocorrem associações com espécies de menor porte de diversas famílias.

Depois das espécies da família Poaceae, destacam-se aquelas das famílias Fabaceae (cinco espécies), Rubiaceae (três espécies), Asteraceae (quatro espécies) e Myrtaceae (quatro espécies). Foram encontradas, ainda, espécies das famílias Amaranthaceae (duas espécies), Sterculiaceae (uma espécie), Rosaceae (uma espécie), Solanaceae (duas espécies), Portulacaceae (uma espécie) e Cyperaceae (uma espécie), além de uma da família Cactaceae, o *Farodia muricata* (Otto) Hofacker, *Echinocactus muricatus* Otto (cactus-miúdo-do-campo) e outra da família Arecaceae, o *Butia lallemantii* (Deble & Marchiori), que se trata de um butiazeiro-anão com caule subterrâneo, endêmico da região.

O cactus-miúdo-do-campo (*Echinocactus muricatus*) foi encontrado na vegetação do campo ainda não afetado pela arenização, porém não tendo sido constatado em área arenizada. Em contrapartida, o butiazeiro-anão (*Butia lallemantii*) geralmente aparece formando extensos maciços sobre os campos da região. Sua distribuição geográfica estende-se desde o Paraguai, passando pela Argentina e Uruguai, até o Rio Grande do Sul, no qual sua presença é mais frequente nos municípios de Manoel Viana, São Francisco de Assis e Alegrete. Em todas essas regiões, sua presença é correlacionada a solos arenosos e pedregosos (MARCHIORI, 1995). Contudo, nos arredores do núcleo de arenização do estudo, constatou-se que esta espécie aparece em raros agrupamentos de poucos exemplares, já com seus caules subterrâneos tendo sido expostos pela erosão

eólica, sugerindo que a colonização do campo por esta espécie possa ter sido interrompida pela arenização.

Existe uma grande diferença de composição vegetal à medida que se aproxima da borda do areal, onde também se observa uma maior ocorrência de mirtáceas, como *Eugenia pitanga* (O. Berg) Nied. e *Psidium incanum* (O. Berg) Burret, portulacáceas, como a *Portulacca* sp. (onze-horas), e uma solanácea, *Solanum symbriifolium* Lam. (joá-bravo). Entre as poáceas, *Andropogon lateralis* Nees aparece em touceiras isoladas. Além desta, uma leguminosa *Chamaecrista flexuosa* (L.) Greene e uma mirtácea, *Eugenia arenosa* Mattos, estão entre as mais frequentes no areal, formando agrupamentos esparsos e de poucos indivíduos. A *Vernonia sellowii* Less. (Asteraceae) se apresentou bem distribuída em toda a área do estudo, tanto sobre o campo, quanto sobre o areal.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e descrição da área de estudo

Segundo o IBGE (2005), o estado do Rio Grande do Sul é dividido em mesorregiões, sendo que, na sudoeste, situa-se a região da campanha ocidental, onde se encontra a área deste estudo, localizada na metade sul do estado (Figura 4).

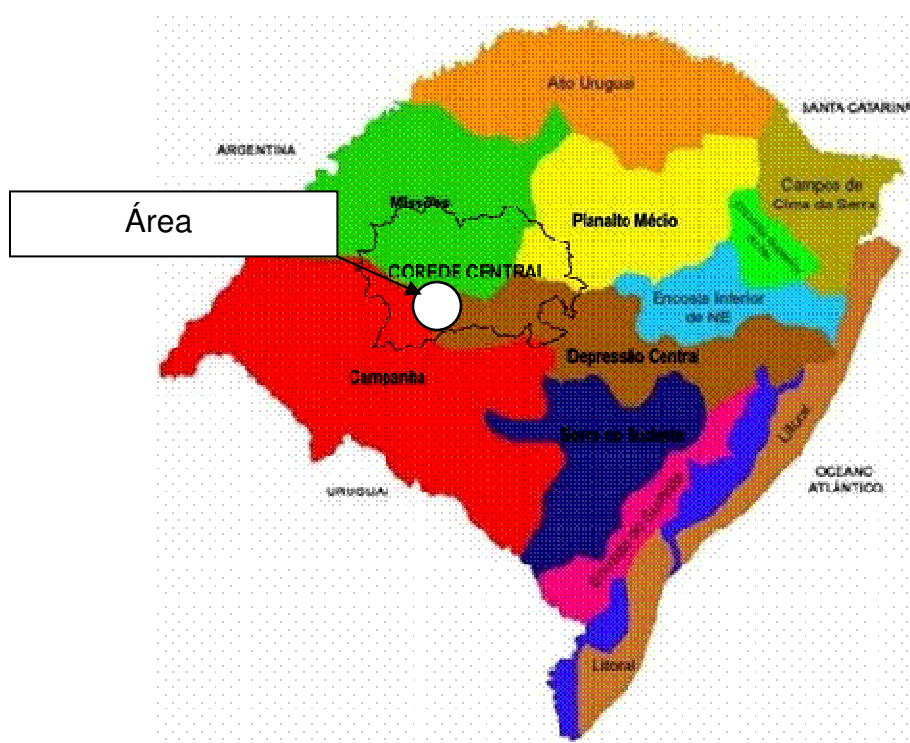


Figura 4 – Regiões fitogeográficas do Rio Grande do Sul com a área de estudo em destaque

Fonte: Rio Grande do Sul (2001).

Este estudo foi realizado em áreas arenizadas localizadas em Palma, Tigre, Passo Novo e São João, no município de Alegrete, e Manjolo e Rincão, no município de São Francisco de Assis. Estes locais encontram-se situados na região da

campanha ocidental e fronteira oeste, no estado do Rio Grande do Sul, na latitude de 29°47'01,63" Sul e longitude de 55°47'27,54" Oeste.

O município de Alegrete possui uma área de 7.804 km², sendo o maior município do estado do Rio Grande do Sul em extensão territorial e contando com uma área de, aproximadamente, 120 mil hectares, formada a partir de rochas areníticas. Esta área corresponde a cerca de 25 % do total do município, cujos solos são profundos, fisicamente pouco estruturados e de baixa fertilidade, características que os tornam extremamente frágeis e, conseqüentemente, suscetíveis aos efeitos da erosão eólica e hídrica e aos efeitos do maquinário, quando este é usado sem os cuidados necessários para este tipo de solo (SOUTO, 1984).

Nessas áreas, constata-se um grande potencial para a atividade florestal, principalmente nos municípios de São Francisco de Assis, Alegrete e Manoel Viana e municípios limítrofes, visto que, nas áreas impróprias para a agricultura, é possível implantar florestas, protegendo os solos frágeis, e adotar práticas de exploração racional (RIBASKI et al., 2005). O cultivo de espécies florestais de crescimento rápido é lucrativo e, muitas vezes, mais vantajoso do que os cultivos agrícolas, particularmente em solos mais pobres. Sob essa ótica, os gêneros *Eucalyptus* e *Pinus* já demonstraram viabilidade para as condições locais, constituindo-se em importantes referências para plantios comerciais (MARCHIORI, 1992; FREITAS; GOULART; ALVES, 2003).

Por outro lado, CASTILHOS et al. (2003), em uma pesquisa realizada na região, constataram a variação no peso vivo (PV) e na carga animal, conforme a estação do ano. A capacidade de suporte da pastagem foi menor no outono e no inverno, quando ocorreram menores ganhos e maiores perdas de peso. Já Sattler et al. (2002) salientam que o manejo padrão, empregado no campo nativo dessa região, é o de pastejo contínuo na área, com baixas lotações no inverno, de cerca de 0,4 animal/ha, e médias lotações no verão de 0,7 animal/ha. O rendimento animal obtido anualmente sobre o campo nativo, nas condições de pecuária extensiva, gira em torno de 60 kg de PV/ha/ano (PILLAR et al., 2006).

3.2 Clima

A Figura 5 apresenta informações climáticas e edáficas da região de estudo. O clima da área de São Francisco de Assis, Alegrete e Manoel Viana, de acordo com a classificação de Köppen, recebe a denominação de Cfa1g, subtropical mesotérmico úmido (Figura 5A) (NIMER, 1990).

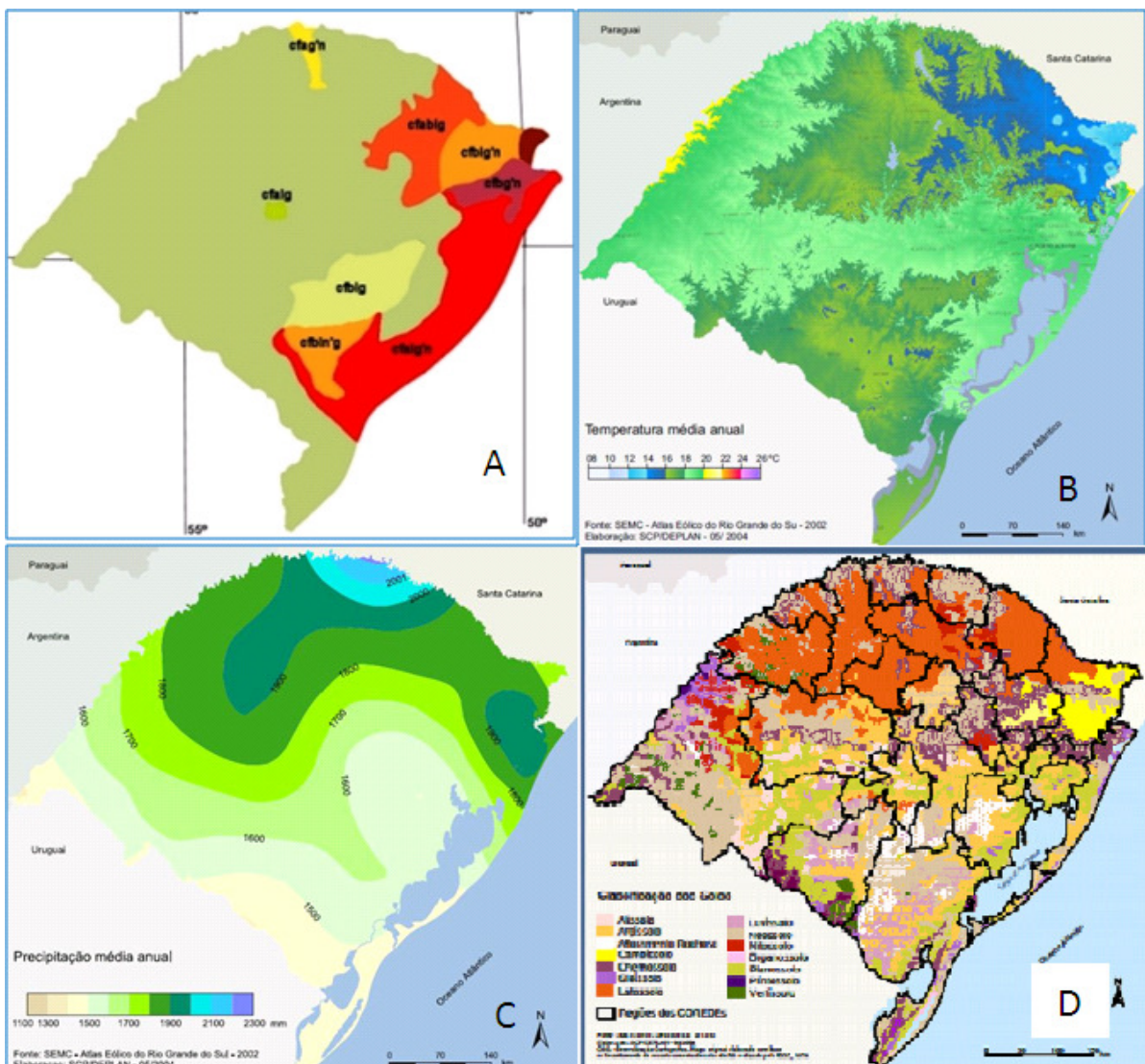


Figura 5 – Informações climáticas e edáficas da região de estudo.
 Fonte: FEE (2005); <http://www.seplag.rs.gov.br/atlas/indicemapas.asp/menu=331>;
 EMATER/UFRGS (2001).

Esse clima é caracterizado por meses de frio, com geadas de maio a agosto, e calor intenso, principalmente nos meses de janeiro e fevereiro, sendo que a temperatura média nos meses mais quentes é superior a 20°C (Figura 5B).

As precipitações são bem distribuídas durante todo o ano, e sua gênese está associada aos sistemas de frentes frias que dominam periodicamente o clima do estado. Seus índices variam entre 1.250 e 1.500 mm/ano (Figura 5C). Devido à regularidade das frentes frias, os ventos predominantes são os dos quadrantes sul (Minuano) e sudoeste (Pampeano).

3.3 Solos

Segundo a EMATER/UFRGS (2001), a região dos areais apresenta uma pedologia bastante variada, ocorrendo oito unidades diferentes de solos, os quais têm origem arenítica, principalmente os Alissolos, os Cambissolos, os Neossolos e os Argilossolos, como pode ser observado no mapa de classificação do solo do estado do Rio Grande do Sul da Figura 5D. Esses solos de origem arenítica são bastante frágeis, extremamente susceptíveis a erosão, principalmente em áreas mais declivosas de solos rasos, associados às rochas aflorantes. Na várzea dos rios Inhacundá e Ibicuí, encontram-se os solos de origem hidromórfica, associadas aos solos argilosos.

Nas áreas do estudo, a ocorrência dos areais tem como substrato o arenito da Formação Botucatu. Nesta formação Mesozoica, assentam-se depósitos arenosos não consolidados, originários de deposição fluvial e eólica durante o Pleistoceno e o Holoceno, os quais, sob uso e remoção atual, originam os areais. A análise da formação dos areais, interpretada por estudos geomorfológicos, associada à dinâmica hídrica e eólica, indica que os areais resultam, inicialmente, de processos hídricos.

Um exemplo dessas áreas arenizadas é o “deserto” de São João, como mostra a imagem parcial interna da Figura 7, com fotos tiradas em 1968 (A) e 1973 (B), com plantio inicial no interior da área com *Eucalyptus* e *Pinus*.



Figura 6 – Aspecto dos solos arenizados da região do estudo
Foto: Schneider (2010).

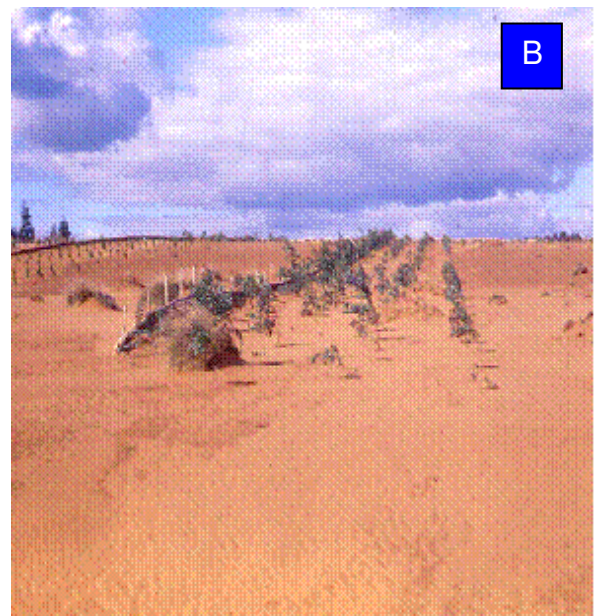


Figura 7 – Vista parcial da área arenizada do conhecido “deserto” de São João, Alegrete, RS.
Foto: 1968(A) e 1973 (B), Andrae (1973).

Essa mesma área reflorestada recebeu um maior efeito da bordadura para o interior do areal, como mostra a Figura 8. Percebe-se que houve uma reconversão quase integral dessa área arenizada com a silvicultura, especialmente com o *Pinus*, o que demonstra uma capacidade impressionante de resiliência do solo arenizado, através da incorporação de matéria orgânica proveniente das acículas e outras partes das árvores.

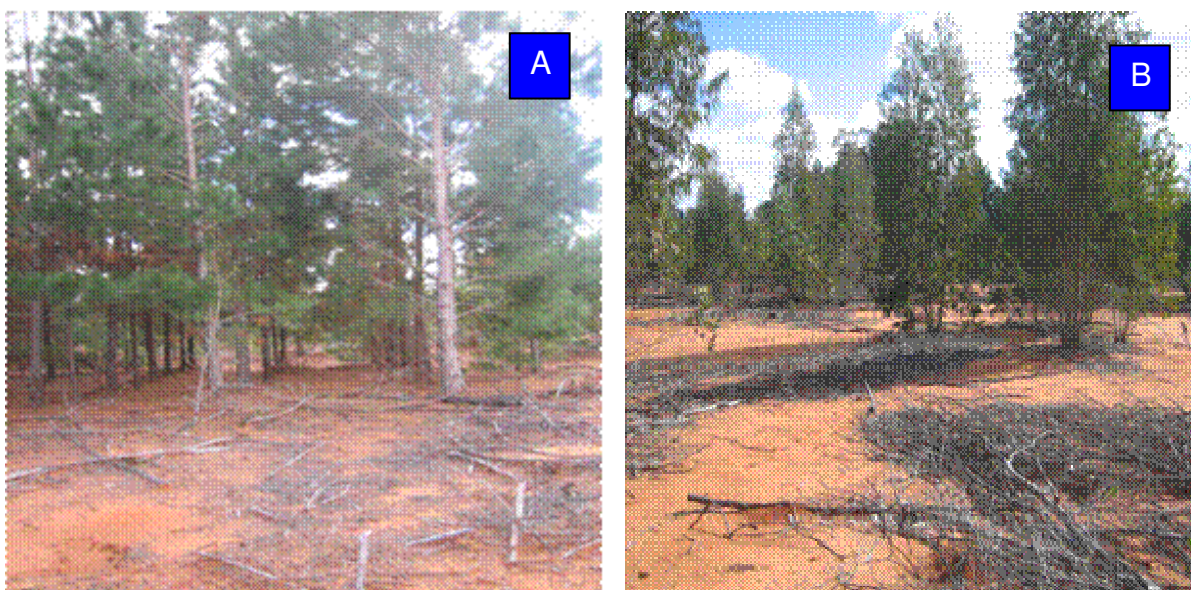


Figura 8 – Vista parcial atual da área conhecida por “deserto” de São João, com plantio de *Pinus* (A) e *Eucalyptus* (B), Alegrete, RS
Foto: Schneider (2010).

Na continuidade do processo, as ravinas e voçorocas desenvolvem-se por erosão lateral e regressiva, conseqüentemente, alargando as suas bordas. Por outro lado, em decorrência dos processos de transporte de sedimentos pela água durante episódios de chuvas torrenciais, à jusante dessas ravinas e voçorocas formam-se depósitos arenosos em forma de leque. Com o tempo, esses leques agrupam-se e, em conjunto, originam um areal. O vento que atua sobre essas areias, em todas as direções, permite a ampliação desse processo erosivo.

Os areais ocorrem sobre unidades litológicas frágeis (depósitos arenosos), em áreas com baixas altitudes e declividades, sendo comuns nas médias colinas ou nas rampas em contato com escarpas de morros testemunhos. Sobre a formação de

ravinas e voçorocas, processos associados à origem dos areais, ela pode também ser resultado do pisoteio do gado e do uso de maquinário pesado na atividade agrícola, originando sulcos e desencadeando condições de escoamento concentrado (LEMOS et al., 1973).

3.4 Fisiografia

O relevo da região do estudo é suave ondulado com áreas planas, em decorrência do desgaste geológico, compondo uma superfície aplainada inferior que contrasta com os platôs de arenito silicificado da paisagem regional.

3.5 Vegetação

A distribuição da vegetação na área do estudo está associada ao solo, às condições climáticas e à disponibilidade de água. As variedades de vegetação são bastante limitadas, devido ao tipo de solo ser de origem arenítica em sua maioria e medianamente fértil. A vegetação é representada por campos limpos com pastagens nativas e exóticas, bons para criação de gado. As espécies florestais nativas mais comuns são: angico, cedro, cabriúva, ipê e guajuvira, e as espécies exóticas mais cultivadas pertencem aos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*.

Nas áreas do estudo, podem ser observados três tipos de conjuntos florísticos: os campos, os capões de mata nativa e as matas de galerias ao longo dos rios. Essas tipologias foram largamente estudadas por Marchiori (2004), que desenvolveu diversos trabalhos sobre este assunto. O autor debruçou-se sobre a vegetação dos campos sulinos, tecendo diversas comparações com outros tipos de campos nativos espalhados pelo globo. Marchiori afirma que estes campos são relíquias de climas pretéritos mais secos, fato que explica a ocorrência de espécies como a Mirtácea *Eugenia arenosa* Mattos, o cactus-miúdo-do-campo (*Echinpcactus muricatus* K. Schum.) e o butiazeiro-anão (*Butia lallemantii* Deble & Marchiori), em climas úmidos como o sul do Brasil, como mostram as imagens da Figura 9.



Figura 9 – Tipos de vegetação das áreas arenizadas: Myrtaceae (A), cactus-miúdo-do-campo (*Echinocactus muricatus*) (B), butiazeiro-anão (*Butia lallemantii*) (C) e mata de restinga (D), respectivamente, Manoel Viana, RS. Foto: Schneider (2010).

As matas de galerias limitam-se às várzeas dos rios e são constituídas por arbustos de pequeno porte. As principais espécies são sarandi (*Phyllanthus sellowiae* (ex. Klotzsch) Müll. Arg) e amarelo (*Terminalia australis* Cambers), além

de pequenas plantas, como unha-de-gato (*Acacia* sp.), viuvinha (*Chomelia obtusa* Cham & Schetdl.) e espinilho (*Vachellia caven* (Molina) Seigler & Ebinger), que são encontradas nos limites entre as matas ciliares e outros biomas.

Os capões localizam-se geralmente entre as coxilhas, com água em abundância, oferecendo uma rica diversidade de espécies, ocorrendo, principalmente, o pau-ferro (*Myracrodemon balansae* (Engl.) Santin), a timbaúva (*Enterolobium contortosiliquum* (Vel.) Morong) e o espinilho (*Vachellia caven* (Molina) Seigler & Ebinger). Ainda, ressalta-se a presença do butiazeiro-anão (*Butia lallemantii* Deble & Marchiori).

Na introdução de espécies exóticas na região, destacam-se, entre as mais significativas, os *Pinus elliottii*, *Pinus taeda* e *Eucalyptus* spp., que se adaptam ao clima e ao solo arenizado.

3.6 Histórico dos povoamentos florestais estudados

No total, foram amostrados dados dendrométricos e solos em sete fazendas (locais distintos), denominados: Manjolo, Zezé, Tigre 1, Tigre 2, Rincão, Palma e São João, reflorestadas com *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*. Esses povoamentos florestais foram implantados em diferentes épocas, em espaçamento inicial variando de 3,0 x 2,0 m a 3,0 x 3,0 m, com o objetivo inicial de amenização do processo de degradação e recuperação de solos arenizados, como mostra a Figura 10.

Em 1990, a empresa Riocell S.A. realizou, no “deserto” de São João, em Alegrete, a implantação de faixas de reflorestamento com *Eucalyptus grandis* W. Hill ao longo do entorno da área arenizada, num espaçamento de 2,7 x 2,0 m. No plantio, foi realizada correção da deficiência de minerais no solo, sendo realizada fosfatagem em covas profundas com a incorporação de 300 g/cova de fosfato e 90 g de NPK (10.20.10). Aos 6 meses, foi feita adubação em cobertura com 100 kg/ha de NPK (20.00.20) e, aos 18 meses, 100 kg/ha de NPK (20.00.20).

A mesma empresa fez um segundo plantio na mesma área ou região, em 1993, numa área de 22,2 ha, com *Eucalyptus saligna* Sm., em espaçamento de 2,0 x 3,0 m. No plantio, foram aplicados, em cova profunda, 600 kg/ha de calcáreo, 100 g/cova de NPK (06.30.06), 50 kg/ha de FTE BRIZ na cova e 600 kg/ha de fosfato.

Após 50 dias, foi feita uma adubação em cobertura de 50 g/planta de NPK (20.05.20) e, após 12 meses, mais 250 g/planta de NPK (20.05.20).



Figura 10 – Área reflorestada com *Eucalyptus* sp. em solo arenizado, Manoel Viana, RS.
Foto: Schneider (2010).

Posteriormente ao plantio do *Eucalyptus*, foi efetuado o plantio de *Pinus* numa faixa interna, entre o plantio do *Eucalyptus* sp. e o interior da área arenizada. No plantio, foi utilizado um espaçamento de 3,0 x 2,0 m, com correção do solo em 600 kg/ha de calcáreo, 100 g/cova de NPK (06.30.06) e 600 kg/ha de fosfato. Após, foi feita adubação em cobertura de 50 g/planta de NPK (20.05.20).

Em todos os povoamentos de *Pinus* e *Eucalyptus*, observa-se uma intensa presença de formigueiros de saúva (*Atta* sp.) e quem-quem (*Acromirmex* sp.), o que contribuiu com o aumento de mortalidade de indivíduos nos povoamentos, conforme Figura 11, respectivamente A e B.

Outro aspecto interessante é a grande presença de toca de tatu-peludo e de tatu-rabo-mole e de colêmbolos no interior dos povoamentos de *Pinus* sp. e *Eucalyptus* sp., o que tem contribuído para a aeração e infiltração de água no solo, como mostra o exemplo da Figura 11D.

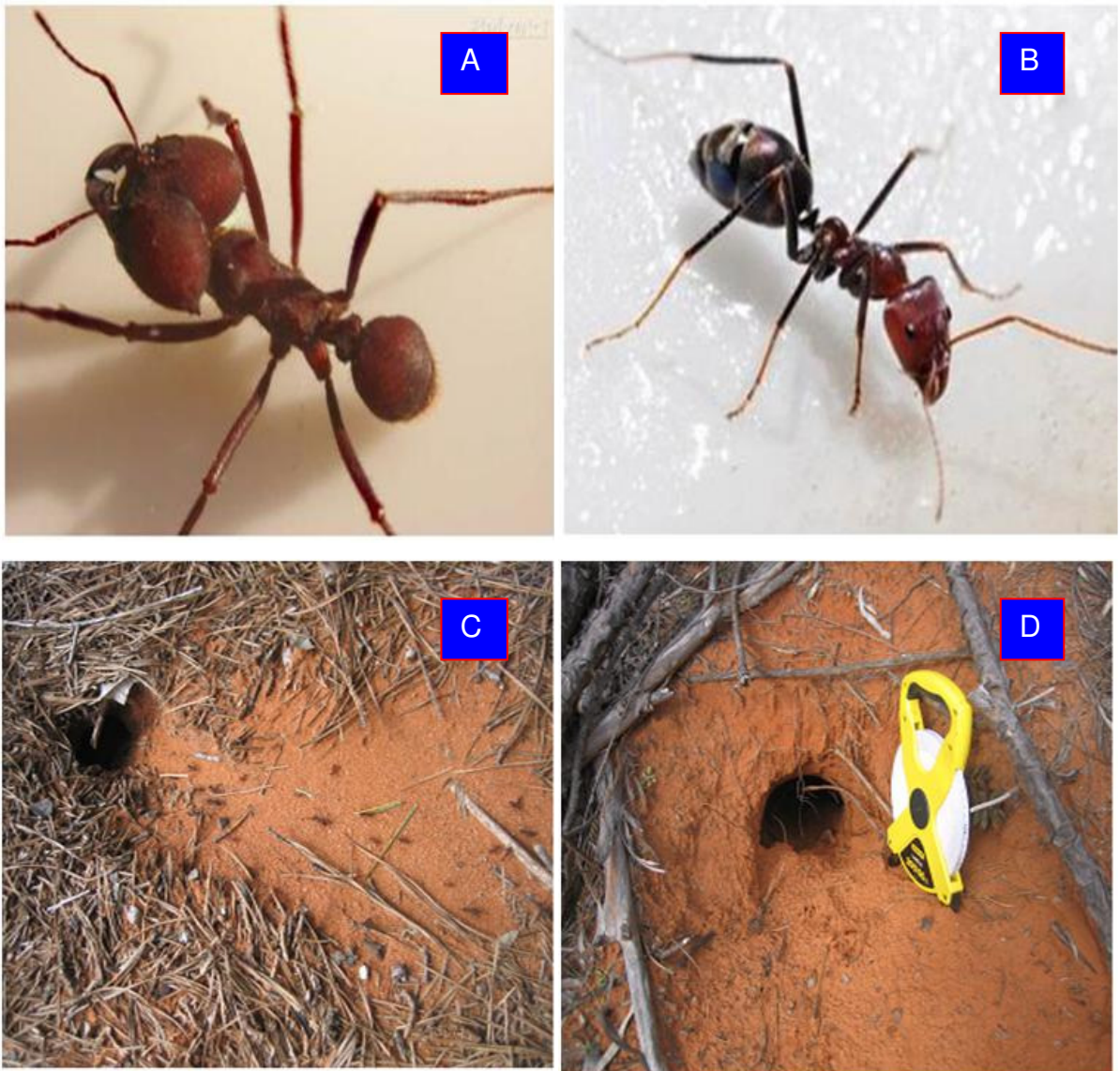


Figura 11 – Imagens mostrando a presença de formigueiro e toca de tatu nas áreas amostradas

Foto: Schneider (2010).

Atualmente, esses povoamentos de *Pinus* encontram-se em diferentes estágios de desenvolvimento, a maioria com um grande percentual de mortalidade natural, promovida pela ausência de condução adequada da densidade populacional, pois não foram realizados desbastes e desramas, tendo diminuído a qualidade da madeira das árvores remanescentes.

3.7 Coleta de dados

Inicialmente, foi feita a localização dos povoamentos de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* nos municípios de São Francisco de Assis, Alegrete e Manoel Viana, em áreas arenizadas por ação antrópica, como mostra a Figura 12 A, B, C, D.

Essas áreas foram estratificadas por espécie e graus de degradação ambiental: alta, média e baixa. Sobre os povoamentos, foram lançadas unidades amostrais, com distribuição aleatória, sendo mensuradas todas as árvores, em relação ao diâmetro, à altura e à altura dominante, e feita a caracterização da posição sociológica.

3.7.1 Amostragem do solo

A coleta de solo foi realizada com auxílio de uma pá de corte, amostrando a profundidade de 0 a 30 cm, distribuída de forma equidistante sobre a projeção da copa da árvore, sendo homogeneizada e retirada uma amostra composta junto a nove árvores, totalizando quatro amostras de solo para cada local.

Essas amostras foram enviadas para o Laboratório de Análise de Solos do Centro de Ciências Rurais da UFSM, tendo sido determinado os teores de fósforo, potássio, cálcio, magnésio, alumínio, zinco, cobre, manganês, além do teor de matéria orgânica e do índice de pH, segundo metodologia descrita por Tedesco et al. (1995).

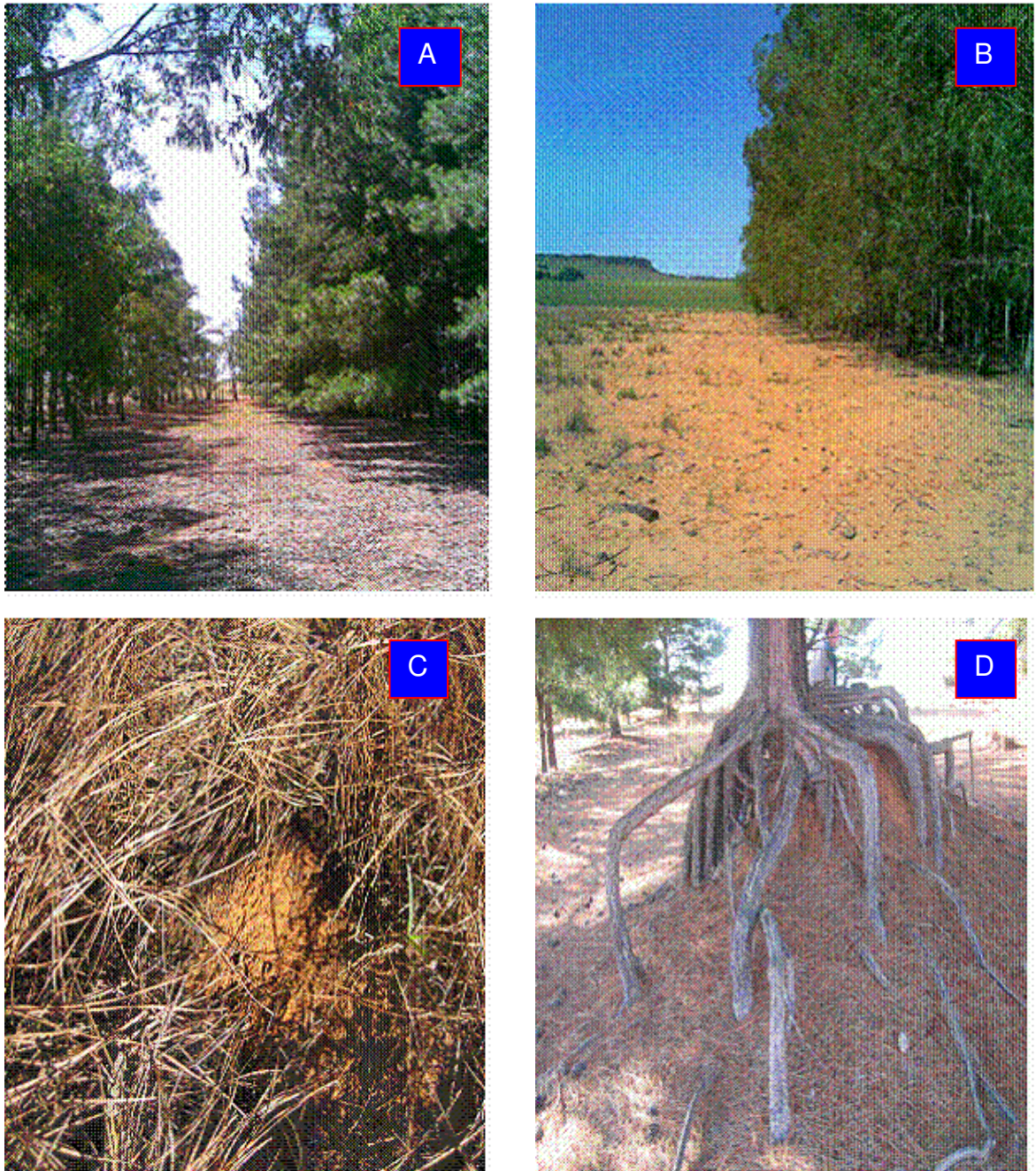


Figura 12 – Imagens de áreas amostradas neste estudo.
Foto: Schneider (2010).

3.7.2 Amostragem das árvores

Para o estudo do crescimento do *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, foram selecionadas árvores representativas da população em seu estrato médio, as quais

passaram por análise de tronco completa. Essas árvores amostradas pertenciam à classe sociológica intermediária, que forma a parte principal do povoamento, e apresentavam copas medianamente desenvolvidas, segundo a classificação de Kraft (ASSMANN, 1970). Na área de estudo, foram abatidas seis árvores médias por espécie de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, para a análise de tronco completa, respeitando-se o princípio da aleatoriedade da distribuição diamétrica.

3.8 Análise de tronco

Para a reconstituição do crescimento do diâmetro, da altura e do volume no tempo, foram tomados os dados dendrométricos obtidos na análise de tronco realizada sobre as árvores-amostras abatidas para o estudo. Para isso, foi tomada uma árvore de diâmetro médio de todas as parcelas que compunham a amostragem, em todos os nove locais de estudo de várias áreas de solos degradados.

Na coleta de dados foram utilizadas as normas para coleta de informações dendrométricas descritas por Schneider, Brena e Finger (1988). As árvores amostradas foram seccionadas em toras no comprimento fixo. De cada árvore, foram extraídos discos na altura de 0,1; 1,3; 3,3; 5,3 m, e os demais, de 2 em 2 metros, até o ápice da árvore. Estes discos tinham cerca de 5 cm de espessura e foram utilizados para medições da análise de tronco. Os discos foram secos em estufa e, posteriormente, preparados pelo lixamento, com lixas de várias gramaturas, até a visualização integral de todos os anéis de crescimento (Figura 13 A e B).

Em cada disco, foram tomadas medidas em quatro raios, sendo o primeiro num ângulo de 45° a partir do maior raio da fatia, e os demais, a 90° um do outro. Os anéis de crescimento foram identificados com auxílio de lupa, e suas espessuras, medidas com auxílio de mesa de medição micrométrica acoplada a um computador.

A identificação dos anéis de crescimento foi realizada de acordo com a orientação de Schweingruber (1996), que descreveu os problemas na identificação de anéis de crescimento anual em *Pinus*, afirmando que podem existir anéis muito tênues próximos à medula, de difícil identificação visual, e falsos anéis, causados

por estresse, relacionando os fatores que influem na sua formação e algumas técnicas utilizadas para identificar anéis verdadeiros.

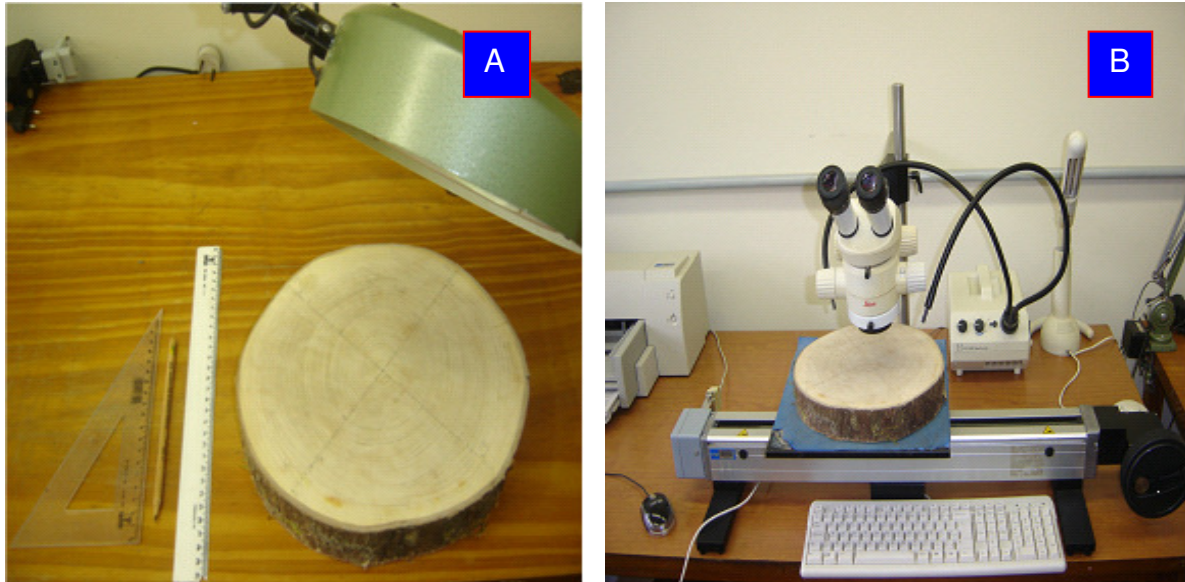


Figura 13 – Material e equipamento Lintab II acoplado em computador utilizado para determinação e medição dos anéis de crescimento, Laboratório de Manejo Florestal – UFSM.

Foto: Milani (2010).

A medição dos anéis de crescimento foi realizada no Lintab II (Figura 13), sendo os dados processados no programa ANATRO (Análise de Tronco). Da medição dos raios das fatias no aparelho Lintab II, foi gerado um arquivo de dados com informações de controle das árvores e das dimensões dos raios. Posteriormente, este arquivo de dados foi transformado, através do programa Anarc.exe, num arquivo do tipo Nome.dat. Esse arquivo de dados transformado foi lido no programa Anatron.exe, para realizar os cálculos dendrométricos por idade, sendo gerados: diâmetro, altura, área basal, volume e os seus incrementos, além do fator de forma comum.

3.9 Estimativa do volume por diâmetro e altura

O volume total das árvores, distribuídas em diferentes idades, sítios e classes de diâmetros, foi determinado em função da cubagem rigorosa do tronco. Também foram utilizados dados oriundos da análise de tronco, cujo volume foi determinado em função da cubagem rigorosa do tronco, gerando pares de dados das variáveis volume, diâmetro e altura, distribuídos por idade. No cálculo do volume rigoroso, foi utilizado o método de Smalian, aplicando-se a seguinte equação geral:

$$v = v_0 \cdot l_0 + \sum \frac{g_i + g_{i+1}}{2} \cdot l_i + g_n \cdot l_n \cdot \frac{1}{3}$$

Sendo v o volume total do tronco, g_i a área basal da seção “ i ” e l_i o comprimento da seção “ i ”.

Na Tabela 1, são apresentadas as equações de volume testadas para o ajuste do volume total em função do diâmetro e altura das árvores.

Tabela 1 – Equações para o ajuste do volume total das árvores.

Equação	Modelo	Autor
1	$v = b_0 + b_1 * d^2 h$	Spurr
2	$v = b_0 + b_1 * d + b_2 * h$	Schumacher-Hall
3	$\ln v = b_0 + b_1 \ln * d^2 h$	Spurr Logarítmica
4	$\ln v = b_0 + b_1 * \ln d + b_2 * \ln h$	Schumacher-Hall Log.
5	$\ln v = b_0 + b_1 * \ln d + b_2 * \ln^2 d + b_3 * \ln h + b_4 * \ln^2 h$	I.B.W. Alemanha

Sendo: v = volume em m^3 ; d = diâmetro à altura do peito em cm; h = altura total em m; b_0, b_1, \dots = parâmetros; e \ln = logaritmo neperiano. Fonte: Prodan, Peters e Cox (1997), Schneider (1984) e Loetsch, Zorher e Haller (1973).

3.10 Crescimento no tempo

Para o estudo da evolução do crescimento, o diâmetro, a altura e o volume foram ajustados em função da idade, com dados discriminados por espécie, apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Equações testadas para o ajuste do crescimento das variáveis estudadas.

Equação	Modelo	Autor
1	$\ln y = b_0 + b_1 \cdot (1/t)$	Schumacher
2	$\ln y = b_0 + b_1 \cdot \ln t + b_2 \cdot \ln^2 t$	Backman
3	$\ln y = b_1 \cdot \ln t + b_2 \cdot \ln^2 t$	Backman modificada
4	$\ln y = t^2 / (b_0 + b_1 \cdot t + b_2 \cdot t^2)$	Prodan
5	$y = b_0 \cdot (1 - e^{(-b_1 \cdot t)})$	Richards

Sendo: y = variável dependente; t = idade em anos; b_0 , b_1 , b_2 = parâmetros; e ln = logaritmo neperiano.

Fonte: Prodan, Peters e Cox (1997), Schneider (1984), Loetsch, Zorhere Haller (1973), Kiviste et al. (2002), Cellini et al. (2002) e Richards (1959).

3.11 Crescimento da altura em função do diâmetro

Para o estudo do desenvolvimento da altura em função do diâmetro, foram testadas as equações apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Equações testadas para ajuste da altura em função do diâmetro.

Equação	Modelo matemático	Autor
1	$h = b_0 + b_1.d + b_2.d^2$	Modelo Parabólico
2	$\ln h = b_0 + b_1.\ln d$	Stofells
3	$\ln h = b_0 + b_1.(1/d)$	Curtis
4	$h = b_0 + b_1.(1/d)$	Curtis
5	$h = b_0 + b_1.d + b_2.(1/d)$	-
6	$h = b_0 + b_1.(1/d) + b_2.d^2$	-
7	$h = b_0 + b_1.d + b_2.(1/d) + b_3.d^2$	-

Sendo: h= altura em metros; d= diâmetro à altura do peito em centímetros; ln= logaritmo natural; e b_0, b_1, b_2, b_3 = coeficientes das equações.

Fonte: Schneider e Schneider (2008).

3.12 Classificação do sítio

A classificação dos sítios foi efetuada tomando por base a altura dominante em função do tempo, tomando-se os dados de análise de tronco das árvores das parcelas amostrais. As funções que foram testadas encontram-se discriminadas na Tabela 2.

Na classificação, foi utilizado o método de curvas monomórficas, para uma idade de referência arbitrada em 18 anos, com intervalo de índice de sítios de 2 m, para a altura dominante tomada na idade de referência.

3.13 Critérios de seleção dos modelos matemáticos

A seleção dos modelos de regressão foi feita através do ajuste de cada equação comparativamente, observando os critérios estatísticos definidos pelo coeficiente de determinação ajustado, erro padrão da estimativa, coeficiente de

variação, Índice de Furnival, distribuição gráfica dos resíduos, validação do modelo, valor de F e valor ponderado dos escores estatísticos.

O Índice de Furnival permite a comparação entre modelos com variáveis dependentes transformadas para logaritmo neperiano, onde se tem que a derivada primeira da variável dependente transformada $(Y')^{-1}$ é igual a Y. Neste caso, o Índice de Furnival absoluto foi calculado através da equação (FURNIVAL, 1961):

$$IF = [f'(y)]^{-1} \cdot S_{yx}$$

$$IF = \left[\text{antiln} \frac{\sum \ln Y}{N} \right] \cdot S_{yx}$$

Porém, segundo Aleixo da Silva e Bailey (1991), para o caso da variável dependente ser ou não da mesma natureza, há necessidade de fazer a correção do Índice de Furnival pela expressão: $\exp[(N-P)/2N]$, resultando, então, na equação redefinida:

$$IF = [f'(Y)]^{-1} \cdot S_{yx} \cdot \exp[(N - P)/2N]$$

Neste caso, essa equação passa a ser expressa por:

$$IF = \left[\text{antiln} \frac{\sum \ln Y}{N} \right] \cdot S_{yx} \cdot \exp[(N - P)/2N]$$

Sendo: IF = Índice de Furnival; Y = variável dependente; N = número de observações; \bar{Y} = média da variável dependente; P = número de parâmetros da equação; S_{yx} = erro padrão da estimativa; ln = logaritmo neperiano.

No caso de outras transformações da variável dependente Y, a primeira derivada desta transformação, para o cálculo do Índice de Furnival, encontra-se mencionada em Alder (1980).

3.14 Validação das equações de regressão

Os testes utilizados para validação das equações de regressão foram realizados utilizando-se o pacote estatístico SAS System, conforme procedimentos descritos em SAS (2004).

A seleção dos modelos de regressão foi realizada pelo coeficiente de determinação ajustado, erro padrão da estimativa, coeficiente de variação e valor de F. Ainda, foi determinado o valor ponderado dos escores estatísticos das equações ajustadas.

3.15 Análise de covariância

Para avaliar as diferenças de inclinação e o nível entre as curvas de crescimento em diâmetro, altura e volume entre as árvores médias de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, utilizou-se a análise de covariância.

Segundo Steel e Torrie (1960), a análise de covariância utiliza, conjuntamente, os conceitos de análise de variância e regressão e relaciona duas ou mais variáveis medidas, chamadas de variáveis independentes, em que não se exerceu um controle exato sobre as mesmas. Para isso, Freund e Littell (1981) têm uma definição prática para a análise de covariância, que pode ser entendida como um modelo contendo variáveis contínuas e indicadores de grupo (variáveis Class), em que o modelo mais simples é escrito como:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta(x_{ij} - x_{..}) + \varepsilon_{ij}$$

Uma covariável independente x_{ij} , associada a um parâmetro β , é combinada à estrutura de tratamentos com parâmetros τ_i , resultando no modelo equivalente:

$$Y_{ij} = \beta_0 + \tau_i + \beta x_{ij} + \varepsilon_{ij}$$

Sendo: $\beta_0 = (\mu - \beta \bar{x})$, revela se as estimativas representam um grupo de linhas paralelas; a inclinação comum é identificada por B, e o intercepto, por $(\beta_0 + t_i)$.

A análise de covariância permite a comparação de curvas de crescimento em relação ao seu paralelismo, podendo indicar a existência de diferentes padrões de crescimento. A hipótese de igualdade de inclinação e nível das curvas de crescimento foi verificada através do teste F, para 1% de erro, sendo os dados processados no programa de computador Statistical Analysis System (SAS).

3.16 Análise do crescimento diamétrico em relação aos fatores do clima e solo

A análise do crescimento diamétrico com os fatores do clima foi inicialmente feita por correlação de Pearson, e após foi determinada a correlação em série. Para isso, foi escolhida uma árvore dominante próxima da estação meteorológica, para a análise de relação com o clima, que foi testada pela correlação de Pearson entre a série de dados de incremento diamétrico transformados e várias combinações de precipitação.

A datação dos incrementos diamétricos não correspondeu ao ano do calendário civil e sim ao início de crescimento da árvore. Portanto, isso significa que o incremento correspondente ao ano de 2008 teve seu início neste ano e término no ano de 2009.

Os incrementos anuais em diâmetro foram estandarizados para a retirada da tendência de crescimento. Para tal, foi feita uma análise de regressão linear, e os valores dos dados de incremento diamétrico foram divididos pelos valores correspondentes da linha de regressão (SPATHELF et al., 2000; KAENNEL; SCHWEINGRUBER, 1995).

A análise do incremento periódico anual do diâmetro, dos últimos cinco anos, com os fatores do solo foi feita, unicamente, por correlação de Pearson, num total de nove árvores-amostras.

3.17 Processamento dos dados

As regressões e a análise de variância do crescimento foram realizadas pelos procedimentos GLM, para análise de regressões e análise de variância, respectivamente, com o auxílio do pacote Statistical Analysis System (SAS, 2004).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Crescimento em diâmetro em função de variáveis ambientais

Neste estudo, foi analisado o crescimento em diâmetro em relação às variáveis de solo, determinadas por análise química e física e do clima, definidas pela temperatura média e precipitação anual, disponível para as regiões avaliadas.

Num primeiro momento, foi feito um estudo para conhecer quais os fatores e que intensidade afeta o crescimento das espécies de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*. Para isso, foram realizados testes estatísticos, para saber como as variáveis climáticas e edáficas interagem isoladamente ou de forma interativa com o crescimento em diâmetro, pois é muito difícil afirmar a contribuição de cada um dos elementos químicos do solo de forma individual, sem considerar as suas interações.

Mesmo admitindo-se essa dificuldade, esse estudo preliminar foi estabelecido para se ter uma aproximação das relações dos fatores ambientais com o crescimento em diâmetro das espécies estudadas, podendo, no futuro, servir de base para outros estudos mais intensivos e específicos sobre essas relações.

4.1.1 Crescimento em diâmetro em função de variáveis do clima

O clima é sempre considerado um fator primário determinante da adaptação de espécies numa região específica, servindo para a classificação de sítios em larga escala (SPURR; BARNES, 1980; SCHONAU, 1987). Por outro lado, os estudos de áreas menores, a vegetação, a fisiografia e os elementos químicos do solo tornam-se mais importantes. Em regiões onde a vegetação nativa foi muito alterada e espécies exóticas foram introduzidas, a fisiografia e o solo assumem prioridade.

Os elementos do clima definidos pela temperatura média anual tomada no período de 1980 a 2009, obtidos na estação meteorológica de São Borja, RS, estão discriminados no Anexo I e representados nas Figuras 14 e 15. Nelas se observam

os valores das médias de temperatura média anual e mensal, respectivamente, utilizadas na determinação da correlação de Pearson com o incremento periódico anual em diâmetro.

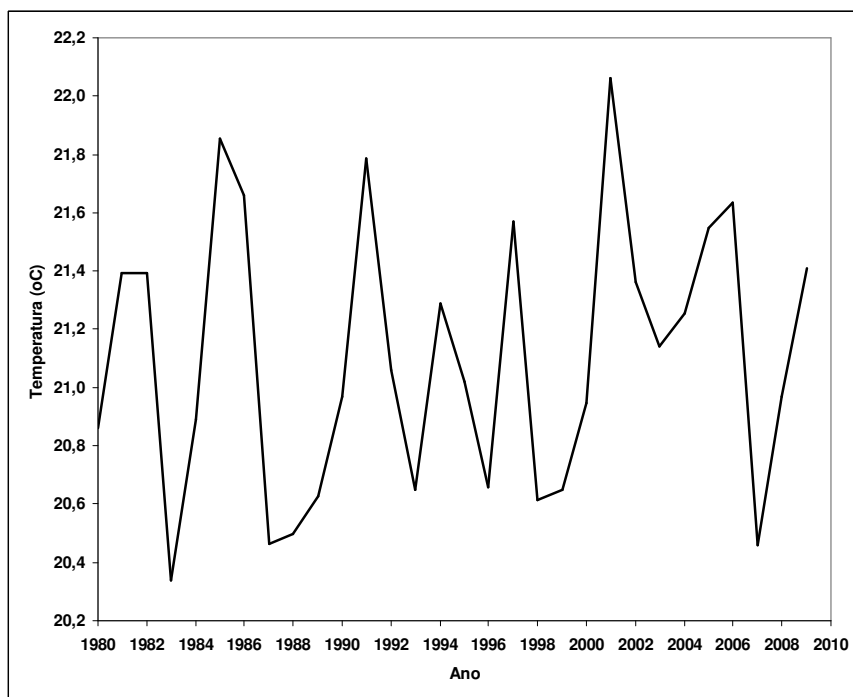


Figura 14 – Temperatura média anual no período de 1980 a 2009, com dados obtidos na estação meteorológica de São Borja, RS.

Da mesma forma, os dados de precipitação anual e mensal coletados no período compreendido entre 1980 a 2009 na Estância São João, distrito de São João, Alegrete, RS, localizada ao lado da área de pesquisa, o deserto de São João, encontram-se discriminados no Anexo II, e as médias de precipitação, representadas nas figuras 16 e 17.

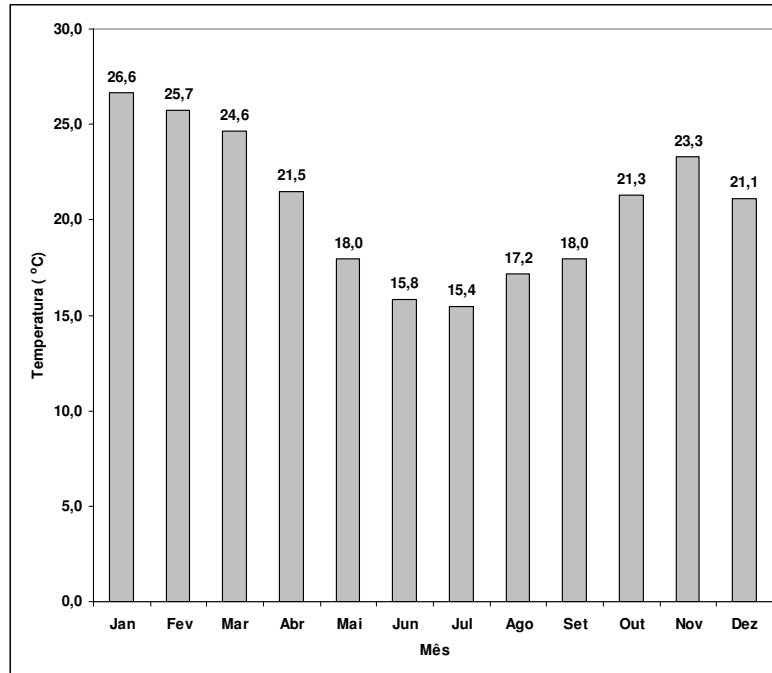


Figura15 – Temperatura média mensal no período de 1980 a 2009, com dados obtidos na estação meteorológica de São Borja, RS.

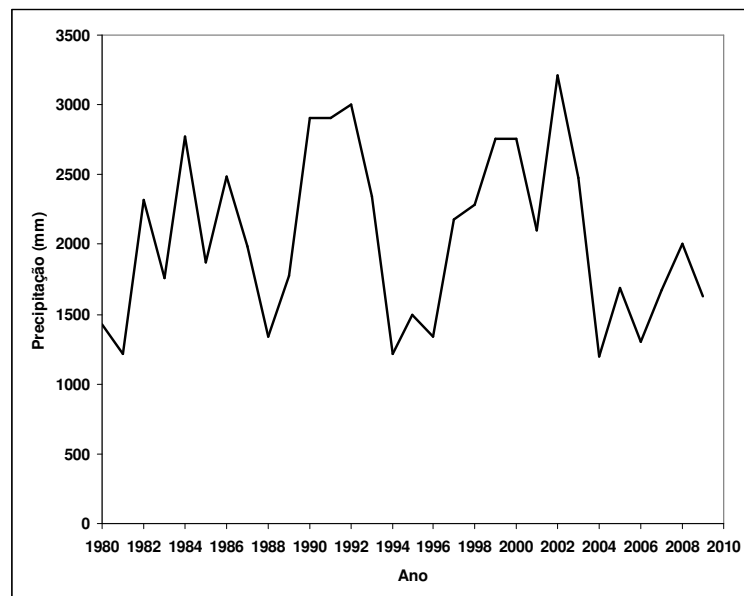


Figura16 – Precipitação anual no período de 1980 a 2009, coletada na Estância São João, local próximo da área da pesquisa, o Distrito de São João, Alegrete, RS.

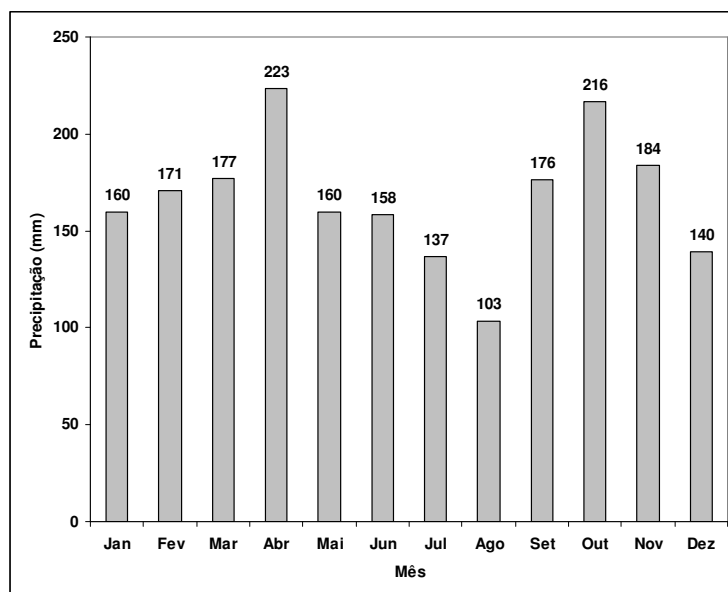


Figura 17 – Precipitação média mensal no período de 1980 a 2009, coletada na Estância São João, local próximo da área da pesquisa, o distrito de São João, Alegrete, RS.

Na Tabela 4, são apresentados os dados médios das variáveis climáticas, expressas pela temperatura média e precipitação anuais, com o crescimento, em diâmetro, das árvores e respectiva idade. Esses dados correspondem à média do crescimento diamétrico dos últimos 29 anos, correlacionados às correspondentes variáveis climáticas.

Tabela 4 – Estatísticas das variáveis climáticas e diâmetro utilizadas para correlação de Pearson para *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*

Variáveis	N	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo
IDADE	113	16,9	8,4	1	34
DAP	113	7,5	4,3	0,2	16,7
ANO	113	1994	8,2	1980	2008
TEMP	113	21,1	0,4	20,3	22,1
PREC	113	2.081	606	1.202	3.215

Sendo: IDADE = idade em ano; DAP = diâmetro à altura do peito em cm; TEMP = temperatura em °C; e PREC = precipitação em mm; N = número de observações.

Nos últimos 30 anos, as temperaturas médias anuais variaram muito pouco, entre 20,3 e 22,1 °C, com média de 21,1 °C. Porém, as precipitações anuais tiveram maior variação, entre 1.202 e 3.215 mm, com média de 2.081 mm por ano. O diâmetro máximo das árvores, aos 34 anos, foi de 16,7 cm.

Na Tabela 5, é apresentada uma matriz diagonal simétrica de correlação do crescimento em diâmetro com as variáveis do clima, definidas pela temperatura média e precipitação anual.

Tabela 5 – Matriz diagonal simétrica de correlação de Pearson, probabilidade de significância do crescimento em diâmetro e fatores de clima para *Pinus elliottii*.

VARIÁVEIS	IDADE	DAP	ANO	TEMP	PREC
IDADE	-	0,9196 <,0001	0,9619 <,0001	0,0945 0,3196	-0,0440 0,6456
DAP	0,9196 <,0001	-	0,8478 <,0001	0,0939 0,3224	-0,0410 0,6660
ANO	0,9619 <,0001	0,8478 <,0001	-	0,0980 0,3017	-0,0380 0,6896
TEMP	0,0945 0,3196	0,0939 0,3224	0,0980 0,3017	-	0,0944 0,3201
PREC	-0,0440 0,6456	-0,0410 0,6660	-0,0380 0,6896	0,0944 0,3201	-

Sendo: DAP = diâmetro à altura do peito em cm; TEMP = temperatura; e PREC = precipitação.

Normalmente, para o caso de dados médios de variáveis climáticas, com temperaturas menores e precipitação maior, a luminosidade é um dos fatores climáticos que mais influencia o crescimento das plantas, devido aos aspectos relacionados à sua qualidade e amplitude, intensidade, duração e periodicidade.

Para áreas de grande distribuição geográfica, ocorre uma influência da temperatura e precipitação sobre a distribuição e o crescimento das florestas, sendo normalmente demonstrada pela alta correlação existente entre estes aspectos e as

classificações climáticas, como as feitas por Merriam, Köppen e Thornthwaite (SPURR; BARNES, 1980).

Neste caso, as variáveis do clima analisadas não apresentaram correlação significativa com o crescimento em diâmetro, a não ser quando o nível de significância foi tomado para uma probabilidade muito elevada.

O crescimento em diâmetro em relação à precipitação anual apresentou correlação negativa de -0,041, e não significativa (Prob.=0,666), com a temperatura média anual de apenas 0,0939 e não significativa (Prob.= 0,3224). Em ambos os casos, a probabilidade de significância é muito pequena, não podendo ser considerada significativa, indicando que não se tem condições de explicar a influência destas variáveis climáticas sobre o crescimento das plantas, especificamente nesse ambiente reduzido e de pouca variabilidade. O fato mais importante para essa explicação reduz-se à pouca variação sazonal das temperaturas médias, mas com maior frequência nas precipitações anuais, porém sem manter uma relação positiva com o ritmo de crescimento em diâmetro das plantas, o que se verificou ao longo dos 34 anos analisados.

Sobre esses aspectos, Oliver e Larson (1996) afirmam que, devido ao clima integrar várias influências ambientais sobre a planta, parece não haver uma condição climática ótima para todas as espécies. Assim, seria esperado que qualquer índice climático ou ambiental mostrasse uma alta correlação com as medidas de crescimento somente para materiais genéticos relativamente homogêneos, como uma única espécie ou grupo de espécies, pois diferentes espécies podem diferir largamente em sua taxa de crescimento em um mesmo sítio (SPURR; BARNES, 1980).

Além desses resultados obtidos, foi realizada a análise de correlação em série para um indivíduo médio localizado bem mais próximo da estação meteorológica. Os períodos de precipitação analisados foram relacionados com os dados de crescimento diamétrico, ao nível de 0,01 de significância, nos meses de novembro a abril ($r=0,488$) e dezembro a abril ($r=0,505$) (Figura 18).

A relação entre crescimento e precipitação do período de dezembro a abril também foi verificada para a espécie cedro (PEREIRA, 2011; RAUBER, 2010), indicando que talvez este período seja influente para mais espécies. Apesar da correlação significativa entre a precipitação e o crescimento diamétrico, vários anos

de crescimento se comportaram de maneira díspar e da série de precipitação (Figura 18).

Esse comportamento mostra que existem outras influências que afetam o crescimento. Além disso, essas variações podem ter ocorrido devido ao fato de que, no período de verão, as chuvas ocorrem com distribuição mais disforme, podendo a precipitação verificada na estação meteorológica não corresponder com a precipitação do local de coleta de dados dendrométricos. Sobre isso, Britto, Barletta e Mendonça (2008) lembram a importância dos fatores geográficos, principalmente a altitude, na distribuição das chuvas, tendo verificado grande variação da precipitação no estado devido às variações do relevo. Também, as variações intra-regionais podem influenciar a distribuição das precipitações.

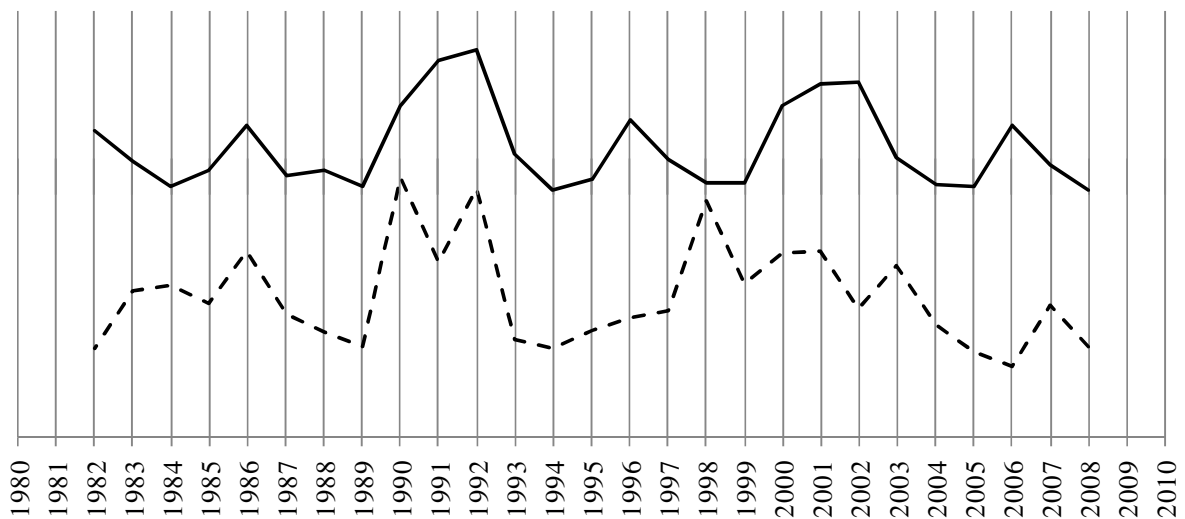


Figura 18 – Relação do crescimento em diâmetro de *Pinus elliottii* (linha sólida) e índice de precipitação do período de dezembro a abril (linha pontilhada).

4.1.2 Crescimento em diâmetro em função de variáveis químicas do solo

Muitos são os fatores que afetam o crescimento de árvores, como o excesso ou a deficiência de umidade, a adaptação genética da espécie, a aeração inadequada do solo, o ataque de insetos e patógenos e a nutrição.

Os efeitos desses fatores ambientais sobre o crescimento dos povoamentos florestais agem inter-relacionados e, raramente, podem ser analisados isoladamente. Um dos fatores mais importantes no crescimento das árvores é a disponibilidade dos elementos essenciais, em que, na sua falta, reduz drasticamente o ritmo de crescimento (SIMÕES, 1972).

Por outro lado, as características fisiográficas do ambiente podem ser mais determinantes da produtividade do que as da fertilidade do solo, ou seja, quando uma unidade amostral ocupa uma posição adequada em termos de exposição, posição na toposequência, declividade, etc., a fertilidade do solo tem efeito pouco expressivo. Entretanto, ao sair daquelas situações fisiográficas ideais, a fertilidade do solo passa a ser importante na definição da capacidade produtiva, o que também foi constatado por Braga (1997).

Na Tabela 6, podem-se observar os valores das médias, o desvio padrão, os valores mínimos e máximos das variáveis químicas do solo e o incremento periódico anual em diâmetro dos últimos cinco anos. Os incrementos periódicos anuais em diâmetro das árvores amostradas foram correlacionados com os elementos químicos do solo, através da correlação de Pearson.

Tabela 6 – Estatística das médias, desvio padrão, limites mínimos e máximos dos fatores de solo e incremento periódico anual, em diâmetro, para *Pinus elliottii*

Variável	N	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
IPAd	9	0,256	0,11	0,08	0,49
MO	9	0,81	0,65	0,20	2,30
pH	9	4,65	0,48	3,90	5,50
Ca	9	1,86	3,44	0,01	10,90
Mg	9	0,33	0,30	0,10	1,00
Al	9	0,61	0,44	0,01	1,20
S	9	9,17	3,96	4,70	18,00
P	9	25,52	25,86	6,00	76,00
K	9	0,10	0,09	0,02	0,31
Cu	9	1,55	1,92	0,30	6,50
Zn	9	1,29	1,15	0,20	3,80
B	9	0,33	0,66	0,10	2,10
Mn	9	22,94	20,87	3,10	56,30

Sendo: IPAd = incremento periódico anual em diâmetro (cm/ano); P = fósforo (mg/dm^3); K = potássio, Ca = cálcio ($\text{cmol}_c/\text{dm}^3$); Mg = magnésio ($\text{cmol}_c/\text{dm}^3$); Al = alumínio ($\text{cmol}_c/\text{dm}^3$); pH = potencial de hidrogênio no solo; MO = matéria orgânica do solo (%); Cu = cobre (mg/dm^3); Zn = zinco (mg/dm^3); Mn = manganês (mg/dm^3); S = enxofre (mg/dm^3); e B = boro (mg/dm^3).

Ao analisar os resultados apresentados na Tabela 7, percebe-se que a maioria dos elementos químicos do solo tem baixo índice de significância com o incremento periódico anual em diâmetro (IPA_d).

Tabela 7 – Matriz diagonal simétrica de correlação de Pearson e probabilidade de significância entre o incremento periódico anual em diâmetro (IPA_d) e fatores do solo para *Pinus elliottii*

Pearson Correlation Coefficients, N = 9 Prob > r under H0: Rho=0													
	IPA _d	MO	pH	Ca	Mg	Al	S	P	K	Cu	Zn	B	Mn
IPA _d	1,00000	-0,33663	-0,34145	-0,29572	-0,67320	0,20293	-0,20025	0,03668	-0,45524	0,18643	-0,48855	-0,17670	-0,13637
		0,3757	0,3685	0,4398	0,0469	0,6005	0,6054	0,9254	0,2182	0,6310	0,1821	0,6493	0,7265
MO	0,33663	1,00000	0,12511	-0,21652	0,47502	-0,08224	0,97858	0,74783	0,88043	0,24702	0,82278	-0,34061	0,64480
	0,3757	-	0,7484	0,5758	0,1963	0,8334	<,0001	0,0205	0,0017	0,5217	0,0065	0,3697	0,0608
pH	-0,34145	0,12511	1,00000	0,16716	0,75655	-0,93709	0,04934	-0,06397	0,41882	-0,17739	0,44970	0,02487	-0,07428
	0,3685	0,7484		0,6673	0,0183	0,0002	0,8997	0,8701	0,2619	0,6480	0,2246	0,9494	0,8494
Ca	0,29572	-0,21652	0,16716	1,00000	-0,13018	-0,03808	-0,30695	-0,14955	-0,19389	-0,18660	-0,05626	0,98018	-0,26006
	0,4398	0,5758	0,6673	-	0,7385	0,9225	0,4217	0,7010	0,6172	0,6307	0,8857	<,0001	0,4992
Mg	-0,67320	0,47502	0,75655	-0,13018	1,00000	-0,61718	0,37177	0,07697	0,62503	0,07776	0,58787	-0,29121	0,26396
	0,0469	0,1963	0,0183	0,7385	-	0,0766	0,3245	0,8440	0,0719	0,8424	0,0960	0,4471	0,4925
Al	0,20293	-0,08224	-0,93709	-0,03808	-0,61718	1,00000	-0,03547	0,05599	-0,41163	0,42430	-0,43304	0,09522	0,24011
	0,6005	0,8334	0,0002	0,9225	0,0766	-	0,9278	0,8862	0,2710	0,2550	0,2443	0,8075	0,5338
S	-0,20025	0,97858	0,04934	-0,30695	0,37177	-0,03547	1,00000	0,81283	0,86191	0,25792	0,77232	-0,41316	0,69231
	0,6054	<,0001	0,8997	0,4217	0,3245	0,9278	-	0,0077	0,0028	0,5028	0,0147	0,2690	0,0388
P	0,03668	0,74783	-0,06397	-0,14955	0,07697	0,05599	0,81283	1,00000	0,55272	0,25173	0,50394	-0,19408	0,44077
	0,9254	0,0205	0,8701	0,7010	0,8440	0,8862	0,0077	-	0,1227	0,5135	0,1666	0,6168	0,2350
K	-0,45524	0,88043	0,41882	-0,19389	0,62503	-0,41163	0,86191	0,55272	1,00000	0,00404	0,95475	-0,34457	0,60555
	0,2182	0,0017	0,2619	0,6172	0,0719	0,2710	0,0028	0,1227	-	0,9918	<,0001	0,3638	0,0840

Tabela 7 – Matriz diagonal simétrica de correlação de Pearson e probabilidade de significância entre o incremento periódico anual em diâmetro (IPA_d) e fatores do solo para *Pinus elliottii*. *Continuação...*

Pearson Correlation Coefficients, N = 9 Prob > r under H0: Rho=0													
	IPA _d	MO	pH	Ca	Mg	Al	S	P	K	Cu	Zn	B	Mn
Cu	0,18643	0,24702	-	-	0,07776	0,42430	0,25792	0,25173	0,00404	1,00000	0,00820	-	0,65230
	0,6310	0,5217	0,17739	0,18660	0,8424	0,2550	0,5028	0,5135	0,9918		0,9833	0,13902	0,0569
			0,6480	0,6307								0,7213	
Zn	-	0,82278	0,44970	-	0,58787	-	0,77232	0,50394	0,95475	0,00820	1,00000	-	0,52061
	0,48855	0,0065	0,2246	0,05626	0,0960	0,43304	0,0147	0,1666	<,0001	0,9833		0,19346	0,1507
	0,1821			0,8857		0,2443						0,6180	
B	-	-	0,02487	0,98018	-	0,09522	-	-	-	-	-	1,00000	-0,29514
	0,17670	0,34061	0,9494	<,0001	0,29121	0,8075	0,41316	0,19408	0,34457	0,13902	0,19346		0,4407
	0,6493	0,3697			0,4471		0,2690	0,6168	0,3638	0,7213	0,6180		
Mn	-	0,64480	-	-	0,26396	0,24011	0,69231	0,44077	0,60555	0,65230	0,52061	-	1,00000
	0,13637	0,0608	0,07428	0,26006	0,4925	0,5338	0,0388	0,2350	0,0840	0,0569	0,1507	0,29514	
	0,7265		0,8494	0,4992								0,4407	

Sendo: IPA_d = incremento periódico anual em diâmetro; P = fósforo (mg/dm³); K = potássio, Ca = cálcio (cmol_c/dm³); Mg = magnésio (cmol_c/dm³); Al = alumínio (cmol_c/dm³); pH = potencial de hidrogênio no solo; MO = matéria orgânica do solo (%); Cu = cobre (mg/dm³); Zn = zinco (mg/dm³); Mn = manganês (mg/dm³); S = enxofre (mg/dm³); e B = boro (mg/dm³).

O único elemento químico do solo que apresentou correlação significativa como incremento periódico anual, em diâmetro, foi o Mg, com valor de $-0,6732$, significativo (Prob.= $0,0469$). Entre os demais elementos químicos do solo, alguns apresentaram correlação positiva, e outros, negativa, com o incremento periódico anual em diâmetro. Isso indica que, nos locais estudados, a sua disponibilidade é mais ou menos importante para o crescimento das plantas; em outro caso, o seu excesso pode inibir o crescimento, por se tornarem limitantes ou, em certos casos, tóxicos. Além disso, muitos desses fatores agem inter-relacionados e, raramente, podem ser tomados isoladamente, atribuindo que podem reduzir o ritmo de crescimento da espécie.

O pH em relação ao incremento periódico anual em diâmetro apresentou uma correlação de Pearson negativa, igual a $-0,3414$, não significativo (Prob.= $0,3685$). Isso indica que o *Pinus elliottii* apresenta limitação de crescimento a solos de maior Ph, necessitando, portanto, de uma boa relação Ca:Mg trocáveis no solo, como ocorre na localidade. Porém, ressalta-se que essa espécie apresenta uma grande capacidade de crescimento em ambientes mais ácidos, que, normalmente, já são produzidos pela própria decomposição da serapilheira.

O teor de matéria orgânica no solo apresentou correlação não significativa, com o crescimento em diâmetro igual a $0,3366$ (Prob.= $0,3757$), o que pode ser atribuído a efeito aleatório. Embora se tenha obtido um valor de correlação muito pequeno, isso indica que o crescimento em diâmetro processa-se numa média, independentemente da variação do teor de matéria orgânica. No entanto, é importante destacar que esse resultado não permite uma conclusão plena dessa relação, necessitando de mais observações. Isso porque essa ocorrência pode ser atribuída a efeito de sazonalidade, devido à época da coleta dos dados, com grande variação de deposição de serapilheira na área do estudo.

A relação do crescimento em diâmetro com o teor de fósforo apresentou uma correlação igual a $0,03668$, não significativa a uma probabilidade de significância igual a $0,9254$, o que pode ser explicado pelo baixo nível deste elemento nos solos. O baixo conteúdo de fósforo disponível no solo pode estar relacionado com o pH, pois, em solos muito ácidos, sua disponibilidade torna-se baixa (SOUSA; MIRANDA; OLIVEIRA, 2007). Isso também foi verificado por Zaia e Gama-Rodriguez (2004), que constataram que solos sob florestas de três espécies de eucaliptos apresentaram acidez elevada e baixa fertilidade.

Também, um adequado fornecimento de micronutrientes (ferro, manganês, zinco, boro, cobre, molibdênio e cloro) às plantas constitui fator de maior relevância para que ocorra um adequado aproveitamento dos macronutrientes e para se obter sucesso e eficácia no crescimento das plantas.

4.2 Atributos químicos dos solos arenizados degradados antes e depois do reflorestamento com *Pinus elliottii* e no campo nativo

Na Tabela 8, são apresentados os resultados das análises químicas das amostras de solo coletadas em 2 locais distintos, a uma profundidade de 30 cm, em solos arenizados e degradados denominados São João 1 e 2, sem e com plantio de *Pinus elliottii*, com idade atual de 29 anos, monitorados durante este período. Também, foram incorporados os resultados das análises químicas de solo realizadas em campo nativo próximo das áreas estudadas.

Para cada amostra coletada de solo, antes e depois dos plantios com *Pinus elliottii*, foram determinados os elementos químicos de interesse: teor de matéria orgânica, pH, cálcio, manganês, alumínio, enxofre, fósforo, potássio, cobre, zinco, boro e manganês.

Para facilitar a comparação dos resultados médios do teor dos elementos químicos do solo, resultantes das análises laboratoriais das amostras de solo coletadas nas áreas com e sem atividade de reflorestamento com *Pinus elliottii* e campo nativo, foram elaboradas as Figuras 19, 20 e 21, como uma síntese dos dados da Tabela 8. Isso permitiu melhor visualizar as alterações ocorridas nos teores dos elementos químicos do solo nesse período de tempo de 29 anos, após o plantio de *Pinus elliottii*.

Tabela 8 – Alteração nos elementos químicos dos solos arenizados em três locais degradados após o plantio com *Pinus elliottii* e em campo nativo.

Local	MO	pH	Ca	Mg	Al	S	P	K	Cu	Zn	B	Mn
	%		cmol _c /dm ³			mg/dm ³						
Antes do reflorestamento com <i>Pinus</i> :												
São João 1	0,2	5,1	0,3	0,1	0,2	4,6	6,8	12	0,8	0,7	0,2	5,7
São João 2	0,3	4,5	0,1	0,1	0,7	6,6	6	8	0,8	0,2	0,2	12,6
Média	0,25	4,8	0,2	0,1	0,45	5,6	6,4	10	0,8	0,45	0,2	9,15
Depois do reflorestamento com <i>Pinus</i> , 29 anos:												
São João 1	0,8	4,6	0,5	0,2	0,7	10,6	14,4	16	0,5	0,3	0,2	19,7
São João 2	1,2	4,4	0,6	0,3	0,1	11,8	51,6	36	1,1	1,2	0,2	52,9
Média	1	4,5	0,55	0,25	0,4	11,2	33	26	0,8	0,75	0,2	36,3
Campo nativo:												
São João 1	0,8	4,5	0,6	0,3	1,1	11,8	51,6	0,09	1,1	1,2	0,2	52,9
São João 2	1	4,5	0,7	0,3	1	11	14,4	0,15	1,9	1,5	0,1	56,3
Média	0,9	4,5	0,65	0,3	1,05	11,4	33	0,12	1,5	1,35	0,15	54,6

Sendo: pH = acidez do solo; Ca = cálcio; Mg = magnésio; Al = alumínio; MO = matéria orgânica; S = enxofre; P = fósforo; K = potássio; Cu = cobre; Zn = zinco; B = boro; e Mn = manganês.

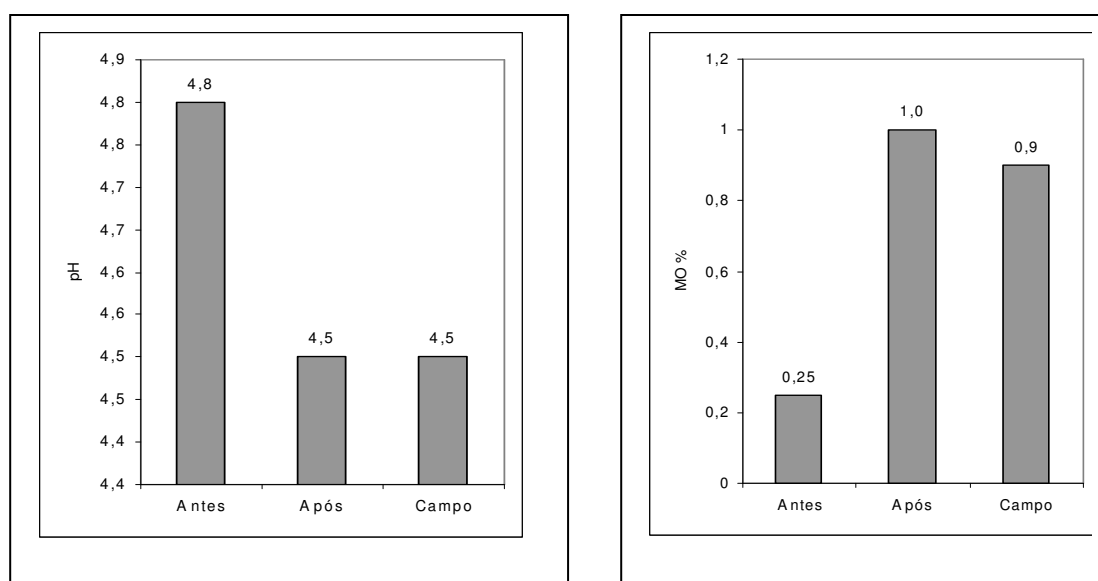


Figura 19 – Alteração do pH e teor de matéria orgânica no solo antes e após o plantio de *Pinus elliottii* e no campo nativo.

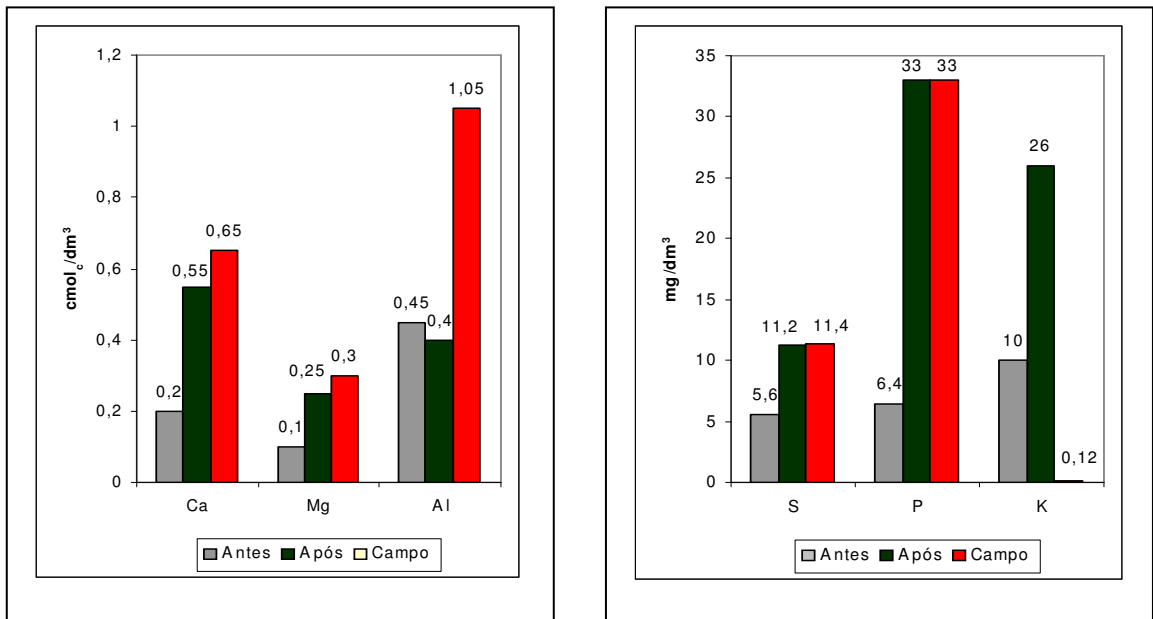


Figura 20 – Alteração dos teores dos elementos químicos cálcio, magnésio, alumínio, enxofre, potássio e fósforo ao solo antes e após o plantio de *Pinus elliottii* e no campo nativo

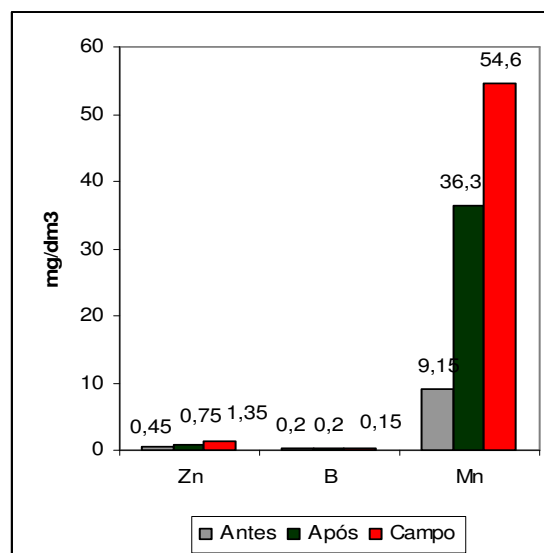


Figura 21 – Alteração dos teores dos elementos químicos zinco, boro e manganês do solo antes e após o plantio de *Pinus elliottii* e no campo nativo.

Considerando as médias obtidas dos elementos químicos nas análises de solo, constata-se que, com a introdução do *Pinus elliottii* em atividade de

reflorestamento, aumentaram consideravelmente os teores dos elementos químicos do solo – pH, matéria orgânica, cálcio, magnésio, enxofre, fósforo, potássio, zinco e manganês –, em quase todos os elementos, o que permitiu um aumento da capacidade produtiva do solo. Disso, pode-se aludir que essa espécie apresenta uma grande capacidade para promover a resiliência dos solos arenizados e degradados pela ação antrópica.

Outros elementos químicos do solo, como pH e alumínio, tiveram uma redução. O pH passou de 4,8 para 4,5, e o alumínio, de $0,45 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ para $0,4 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$. Por outro lado, cobre e boro manteve-se com o mesmo teor, $0,8 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ e $0,2 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$, respectivamente.

O teor médio de matéria orgânica, nos solos com reflorestamento de *Pinus elliottii*, foi igual a 1,0%, enquanto que, nos solos não reflorestados que serviram de testemunhas, permaneceu numa média de 0,25% (Figura 19). Esses dados indicam que a deposição de serapilheira sobre o solo melhora suas características químicas. Isso porque o teor de matéria orgânica do solo aumentou com o plantio de *Pinus elliottii*, tendo passado de 0,25 para 1,0% após 29 anos do plantio.

Disso se pode deduzir que, embora a espécie tenha promovido um aumento de litter no solo, a decomposição desta matéria orgânica provocou uma acidificação do solo, o que também é relatado, para a mesma espécie, por Andrae (1978).

Sobre isso, Rheinheimer et al. (2000) afirmam que o decréscimo do pH no solo pode tornar-se limitante à produção vegetal, em função da toxidez de alumínio e/ou manganês e do desequilíbrio na disponibilidade de nutrientes às plantas. Por outro lado, solos sob florestas naturais e reflorestamentos com acácia em Bangladesh revelaram-se solos mais ácidos que os solos sob pastagem e cultivados, evidenciando a contribuição de determinadas espécies florestais de rápido crescimento na acidificação do solo (ISLAM; WEIL, 2000).

No entanto, caso o solo permaneça sendo ocupado com a atividade de reflorestamento com *Pinus elliottii*, isso não se traduz em maior problema, pois esta espécie adapta-se bem a solos ácidos e de baixa fertilidade.

Através do plantio de *Pinus elliottii* nas áreas de solos arenizados e degradados por ação antrópica, os elementos químicos cálcio e magnésio foram incrementados significativamente, tendo passado de teores de 0,2 para $0,55 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ e 0,1 para $0,25 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$, respectivamente. Por outro lado, o teor de

alumínio sofreu uma redução com o plantio de *Pinus elliottii* nas áreas, tendo passado de 0,45 para 0,4 cmol_c/dm³.

Quanto aos elementos químicos enxofre, fósforo e potássio, a atividade de reflorestamento com *Pinus elliottii* produziu um efeito positivo considerável, tendo o fósforo passado de 6,4 para 33mg/dm³, o potássio de 10 para 26 mg/dm³ e o enxofre de 5,6 para 11,2mg/dm³, em áreas sem e com plantio de *Pinus elliottii*, respectivamente. Também, houve uma considerável contribuição do plantio de *Pinus elliottii* na resiliência do solo para esses elementos químicos (Figura 20).

Os micronutrientes definidos pelos elementos manganês e zinco aumentaram, tendo passado de teores de 9,15 para 36,3 mg/dm³ e de 0,45 para 0,75mg/dm³, respectivamente, com a introdução do *Pinus elliottii*. Porém, o teor do elemento químico boro manteve-se inalterado, com 0,2 mg/dm³ na área (Figura 21). Para o elemento químico manganês, houve uma resposta significativa, tendo passado de teores de 0,1 para 0,25 cmol_c/dm³ com a introdução do *Pinus elliottii* nas áreas.

4.3 Análise do crescimento em diâmetro em função da espécie de *Pinus* e níveis de degradação do solo

Na Tabela 9, são apresentados os valores estatísticos referentes à análise de covariância simples que testou a diferença entre o crescimento em diâmetro no tempo das espécies de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* em locais com níveis de degradação do solo muito alto e alto a médio.

Os resultados da análise de covariância do crescimento em diâmetro em função da idade tiveram como covariáveis a espécie e o nível de degradação do solo. Observa-se que as espécies de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* apresentaram comportamento de crescimento diamétrico diferente, com um valor de F igual a 40,17, significativo (Prob. < 0,0001), indicando a existência de níveis diferenciados de crescimento em diâmetro por idade. Da mesma forma, o crescimento em diâmetro em função da idade em relação aos níveis de degradação do solo apresentou um valor de F igual a 27,63, significativo (Prob. < 0,0001), o que indica haver diferença na velocidade de crescimento em diâmetro por idade das árvores, sendo influenciado direta e fortemente pelos níveis de degradação do solo.

Tabela 9 – Análise de covariância do crescimento em diâmetro das espécies de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* e nível de degradação do solo.

FV	GL	SQ	QM	F	Prob.>F
Modelo	4	35,6973	8,9243	79,96	<,0001
Espécie	1	4,4832	4,4832	40,17	<,0001
Degradação	1	3,0842	3,0842	27,63	<,0001
ln t	1	27,9635	27,9635	250,53	<,0001
ln ² t	1	0,1662	0,1662	1,49	0,0247
Erro	119	13,2823	0,1116	-	-
Total	123	48,9796	-	-	-

Sendo: FV = fonte de variação; GL = graus de liberdade; SQ = soma de quadrados; QM = quadrado médio; F = valor de F; Prob.>F = probabilidade de significância para o valor de F; Ln = logaritmo natural; t = idade.

Esses resultados da análise de covariância do diâmetro em função da idade, considerando as relações de espécie e o nível de degradação do solo, indicam claramente que esta variável deve ser estimada por espécie, considerando a variação da capacidade produtiva do solo, não permitindo o agrupamento de dados dendrométricos para o ajuste de funções de crescimento do diâmetro em função da idade. Por consequência, pode-se trabalhar por espécie isoladamente, sendo necessário considerar, no modelo, a influência da capacidade produtiva do solo.

4.4 Análise do crescimento em altura em função da espécie de *Pinus* e níveis de degradação do solo

Na Tabela 10, são apresentados os valores estatísticos da análise de covariância que testou as diferenças entre o crescimento em altura em função da idade para as espécies de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* em relação aos níveis de degradação do solo em muito alto e alto a médio. Observa-se que essas espécies apresentaram um comportamento de crescimento em altura diferente, com um valor

de F igual a 6,69, significativo (Prob.<0,0103), indicando a existência de níveis diferenciados de crescimento em altura por idade. Da mesma forma, o crescimento em altura em função da idade sofreu influência dos níveis de degradação do solo, apresentando um valor de F igual a 57,41, significativo (Prob.<0,0001), indicando haver diferença no comportamento do crescimento em altura por idade das árvores, variando, diretamente, com o nível de degradação do solo.

Tabela 10 – Análise de covariância do crescimento em altura das espécies de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* e nível de degradação do solo.

FV	GL	SQ	QM	F	Prob.>F
Modelo	4	113,1562	28,2890	324,56	<,0001
Espécie	1	0,5826	0,5826	6,69	0,0103
Degradação	1	5,0034	5,0034	57,41	<,0001
ln t	1	107,5006	107,5006	1233,37	<,0001
ln ² t	1	0,0694	0,0694	0,80	0,0729
Erro	267	23,2717	0,0871	-	-
Total	271	136,4279	-	-	-

Sendo: FV= fonte de variação; GL= graus de liberdade; SQ= soma de quadrados; QM= quadrado médio; F= valor de F; Prob.>F= probabilidade de significância para o valor de F; Ln= logaritmo natural; e t= idade.

Igualmente, como no caso do diâmetro, os resultados da análise de covariância da altura em função da idade, considerando as relações de espécie e o nível de degradação do solo, indicam que esta variável deve ser estimada por espécie considerando a influência da capacidade produtiva do solo. Por isso, não foi possível efetuar o agrupamento de dados de espécies diferentes para o ajuste de funções de crescimento da altura em função da idade. Isso determina que se deve trabalhar com a espécie isoladamente, devendo-se considerar, no modelo, a influência da capacidade produtiva do solo, o que, na prática, é contemplado pelas curvas de índice de sítios do local.

4.5 Análise do crescimento em volume em função da espécie de *Pinus* e nível de degradação do solo

Na Tabela 11, são apresentados os resultados estatísticos da análise de covariância para o crescimento em volume em função da idade para as espécies de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* em relação aos níveis de degradação do solo em muito alto e alto a médio.

Tabela 11 – Análise de covariância do crescimento em volume das espécies de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* e nível de degradação do solo.

FV	GL	SQ	QM	F	Prob.>F
Modelo	4	723,3103	180,8275	434,69	<,0001
Espécie	1	30,1759	30,1759	72,54	<,0001
Degradação	1	51,5453	51,5453	123,91	<,0001
ln t	1	626,2880	626,2880	1505,53	<,0001
ln ² t	1	15,3009	15,3009	36,78	<,0001
Erro	251	104,4142	0,4159	-	-
Total	255	827,7245	-	-	-

Sendo: FV = fonte de variação; GL = graus de liberdade; SQ = soma de quadrados; QM = quadrado médio; F = valor de F; Prob. > F = probabilidade de significância para o valor de F; ln = logaritmo natural; t = idade.

Observa-se que as espécies de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* apresentaram comportamento diferente do crescimento em volume, com um valor de F igual a 72,54, significativo (Prob.<0,0001), indicando a existência de níveis diferenciados de crescimento em volume por idade. Da mesma forma, o nível de degradação do solo apresentou um valor de F igual a 123,91, significativo (Prob.<0,0001), indicando haver diferença na velocidade de crescimento em diâmetro por idade das árvores, sendo influenciado direta e fortemente pelos nível de degradação do solo.

Como nos casos do diâmetro e altura, os resultados da análise de covariância do volume em função da idade, considerando as relações de espécie e o nível de degradação do solo, indicam claramente que a variável volume deve ser estimada por espécie, porém considerando a variação da capacidade produtiva do solo, não permitindo o agrupamento de dados dendrométricos de espécies diferentes para o ajuste de funções de crescimento do volume em função da idade. Conseqüentemente, isto determina que se deva trabalhar por espécie isoladamente, sendo, porém, necessário considerar, no modelo, uma variável que expresse a influência da capacidade produtiva do solo.

4.6 Crescimento de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*

Para o estudo do crescimento de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* na região da fronteira oeste do estado do Rio Grande do Sul, em áreas arenizadas e degradadas por ação antrópica, foram testados diversos modelos matemáticos, utilizando, como variável dependente, o diâmetro, a altura e o volume, de forma independente, como uma função da variável independente à idade. Num segundo momento, foi introduzida, no modelo selecionado, uma variável dummy, para expressar a influência da espécie na variação do crescimento em diâmetro, altura e volume, cuja influência foi detectada na análise de covariância. Através dessas análises, foram obtidos o ajuste, os coeficientes e os parâmetros estatísticos das equações.

4.6.1 Crescimento do diâmetro em função da idade

As análises dos dados de crescimento em diâmetro permitiram o ajuste dos modelos e a determinação da precisão estatística de cada equação testada. Foram determinados, para cada equação ajustada, os coeficientes e os parâmetros estatísticos, para posterior comparação da precisão e ajuste. Os valores estimados são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Parâmetros estatísticos das equações testadas para ajustar o crescimento de diâmetro em função da idade de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*.

Eq.	Coeficientes			R ² _{Aj.}	S _{yx}	CV%	F
	b ₀	b ₁	b ₂				
1	2,7156	-7,9629	-	0,63	0,3764	18,45	441,13**
2	-0,9686	1,4485	-0,1136	0,69	0,3484	17,08	278,66**
3	-	0,6525	0,0419	0,97	0,3537	17,34	4422,51**
4	23,0175	1,5967	0,2941	0,85	39,8998	26,94	718,14**
5	29,1305	0,0232	-	0,94	2,3298	25,94	2148,71**

Sendo: R²_{Aj.}= coeficiente de determinação ajustado; S_{yx}= erro padrão da estimativa; ** = significativo a 95% de probabilidade; CV%= coeficiente de variação em %; F= valor de F da análise de variância; e b₀, b₁, b₂, b₃= coeficientes.

Analisando esses valores, nota-se que, em geral, as equações apresentaram valores de coeficiente de determinação ajustado entre 0,63 e 0,97, e coeficientes de variação entre 17,08 e 26,94%, variando com o modelo testado. Os valores de coeficiente de determinação discrepantes indicam que algumas equações têm maior capacidade de explicar a variação total que outras, porém seu uso isolado pode provocar erros, já que a inclusão de uma única variável pode aumentar seu valor, favorecendo sua escolha.

Ao analisar as equações através dos parâmetros estatísticos, destacam-se: a equação de número 4, definida pelo modelo de crescimento de Prodan, que apresentou o 3º maior valor de coeficiente de determinação ajustado, de 0,85, e coeficiente de variação de 26,94%; o modelo de Chapman-Richards, representado pela equação 5, com coeficiente de determinação ajustado de 0,94 e coeficiente de variação de 25,94%; e o modelo de Backman modificado, correspondente à equação 3, que apresentou o maior coeficiente de determinação ajustado, de 0,97, e coeficiente de variação de 17,34%.

A escolha da equação pelo coeficiente de determinação ajustado mais elevado resulta no modelo de Backmann modificado (equação 3), porém esta equação apresentou coeficiente de variação elevado. Devido a isso, foi determinado o Valor Ponderado dos Escores Estatísticos (VP), para confirmar a seleção. Este

procedimento estatístico visa sistematizar os resultados, auxiliando na seleção do modelo, para descrever o crescimento do diâmetro em função da idade, conforme mostrado na Tabela 13, sendo a equação selecionada a que apresenta o menor VP.

Tabela 13 – Valor ponderado dos escores dos parâmetros estatísticos das equações testadas.

Equação	Escore dos parâmetros estatísticos				Valor dos escores
	R ² _{Aj.}	S _{yx}	CV%	F	
1	5	4	3	4	16
2	4	2	1	5	12
3	1	3	2	1	7
4	3	5	5	3	16
5	2	1	4	2	9

Sendo: R²_{Aj.}= coeficiente de determinação ajustado; S_{yx} = erro padrão da estimativa; CV%= coeficiente de variação em %; e F= valor de F da análise de variância.

O método do Valor dos Escores estatísticos levou em consideração todas as variáveis estatísticas anteriormente descritas, determinando, assim, a equação de número 3, correspondente ao modelo de Backmann modificado, como o mais adequado para determinar o crescimento em diâmetro de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, com o menor valor dos Escores, igual a 7. Esta equação de Backmann modificada apresentou uma boa distribuição dos valores residuais, como mostra a Figura 22.

Esta equação de Backmann modificada ajustada ficou sendo expressa por:

$$\ln d = 0,6525 \cdot \ln t + 0,0419 \cdot \ln^2 t$$

Sendo d o diâmetro à altura do peito e t a idade em anos.

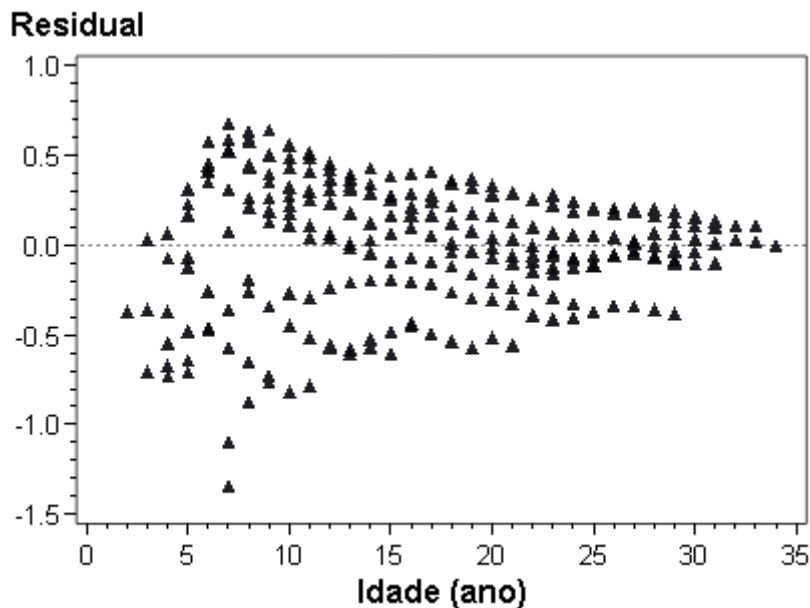


Figura 22 – Distribuição dos resíduos de diâmetro por idade para os dados de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* agrupados e ajustados pela função de Backmann modificada.

Com objetivo de completar a análise do crescimento, foi estimado o diâmetro por idade através do modelo de Backmann modificado, o que permitiu determinar os incrementos médios anuais (IMA) e os incrementos correntes anuais (ICA) em diâmetro de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, apresentados na Tabela 14.

Aos 30 anos, o diâmetro médio para essas espécies foi de 14,94 cm, com um incremento médio anual de 0,47 cm/ano, podendo ser considerado um valor pequeno, compatível com as características edafoclimáticas dos solos arenizados e degradados da fronteira oeste do estado do Rio Grande do Sul.

Com a equação de Backmann modificada, determinou-se o crescimento em diâmetro em função da idade de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* (Figura 23).

Tabela 14 – Estimativa do crescimento em diâmetro por idade de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* pelo modelo de Backmann modificado.

Idade (anos)	DAP (cm)	ICA (cm/ano)	IMA (cm/ano)
5	3,19	0,51	0,64
6	3,68	0,50	0,61
7	4,17	0,49	0,60
8	4,66	0,48	0,58
9	5,13	0,48	0,57
10	5,61	0,48	0,56
11	6,08	0,47	0,55
12	6,55	0,47	0,55
13	7,02	0,47	0,54
14	7,49	0,47	0,54
15	7,96	0,47	0,53
16	8,43	0,47	0,53
17	8,89	0,47	0,52
18	9,36	0,47	0,52
19	9,82	0,46	0,52
20	10,29	0,46	0,51
21	10,75	0,46	0,51
22	11,21	0,46	0,51
23	11,68	0,46	0,51
24	12,14	0,46	0,51
25	12,61	0,47	0,50
26	13,07	0,47	0,50
27	13,54	0,47	0,50
28	14,01	0,47	0,50
29	14,47	0,47	0,50
30	14,94	0,47	0,50

Sendo: DAP= diâmetro à altura do peito em centímetros; IMA= incremento médio anual em centímetros por ano; e ICA= incremento corrente anual em centímetros por ano.

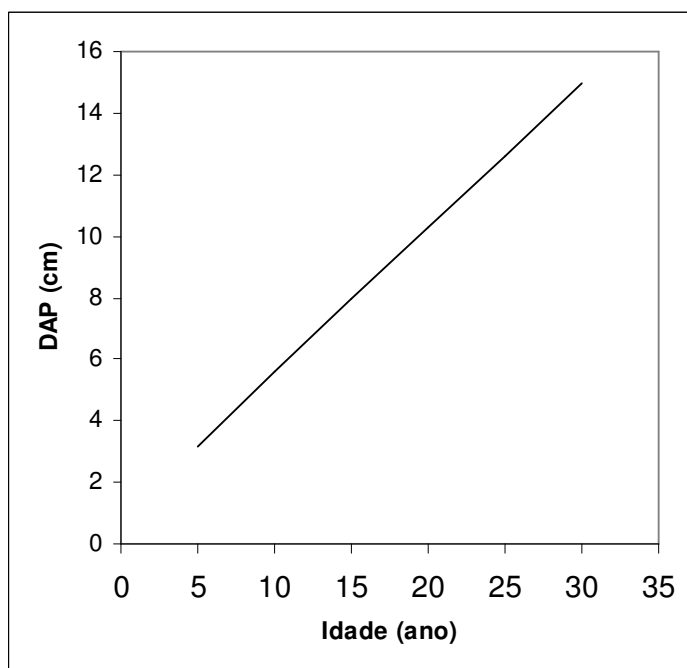


Figura 23 – Crescimento em diâmetro em função da idade de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* pelo modelo de Backmann modificado.

4.6.2 Modelo de crescimento em diâmetro sob o efeito da espécie com variável dummy

Para estimar o diâmetro em função da idade para as espécies de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* de forma individualizada, cultivadas em solos arenizados e degradados da fronteira oeste do Rio Grande do Sul, foi introduzida, no modelo, uma variável dummy (du), cuja análise de variância por soma de quadrados do Tipo I é apresentada na Tabela 15.

Tabela 15 – Análise de variância do diâmetro com inclusão de variável dummy para as espécies de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*.

FV	GL	SQ	QM	F	Prob. > F
ln t	1	1106,0706	1106,0706	10005,2	<,0001
ln ² t	1	0,7024	0,7024	6,35	0,0123
Dummy	1	3,8130	3,8130	34,49	<,0001
ln t . Dummy	1	0,0240	0,0240	0,22	0,6415

Nessa Tabela 15, observa-se que todos os parâmetros do modelo apresentaram um valor de t significativo, justificando a sua permanência no modelo original, para a estimativa do volume, de forma simultânea, dessas duas espécies, com exceção da interação da idade com a variável dummy (ln t . Dummy), que foi não significativa, pois apresentou um valor de F igual a 0,22 (Prob.=0,6415), tendo sido excluída do modelo geral.

Assim, o modelo de crescimento em diâmetro ficou sendo representado por:

$$\ln d = 0,8003 \cdot \ln t + 0,0061 \cdot \ln^2 t - 0,2491 \cdot du$$

Esse modelo de crescimento em diâmetro (d), expresso pela equação de Backmann modificada, é uma função da idade (t), com inclusão da variável dummy (du) representando as espécies, que assume 0 na presença de *Pinus elliottii* e 1 na presença de *Pinus taeda*. Tal modelo apresentou um excelente ajuste, com coeficiente de determinação igual a 0,9760, baixo erro padrão da estimativa, igual a 0,3319, e alta significância, com valor de F igual a 3.359,34. A equação apresentou uma boa distribuição dos valores residuais de diâmetro em relação à idade, como mostra a Figura 24.

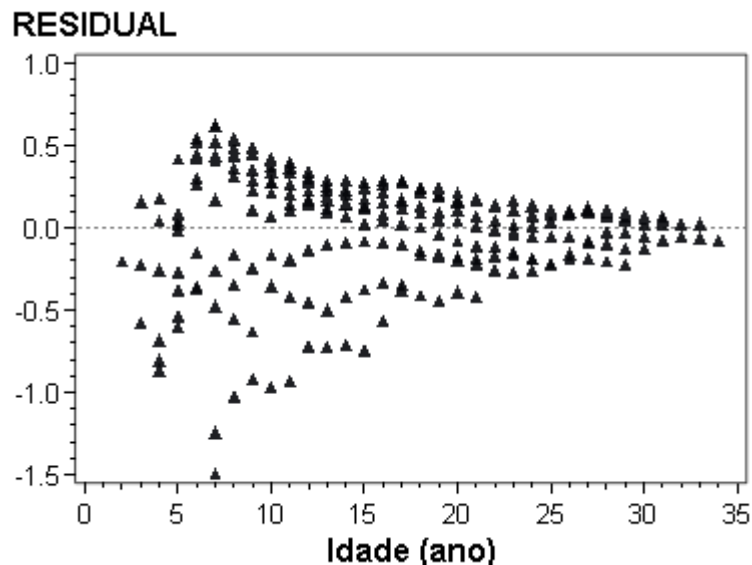


Figura 24 – Distribuição dos resíduos de diâmetro por idade para os dados de *Pinus elliotii* e *Pinus taeda* agrupados e ajustados pela função de Backmann modificada com variável dummy.

Com a equação de Backmann modificada, ajustada com variável dummy, estimaram-se os diâmetros por idade para *Pinus elliotii* (dummy = 0) e *Pinus taeda* (dummy = 1), que se encontram representados na Tabela 16, com os respectivos incrementos correntes e médios anuais em diâmetro.

Esses dados de crescimento em diâmetro por idade, estimados para *Pinus elliotii* e *Pinus taeda*, que se encontram relacionados na Tabela 16, estão representados na Figura 25. Nesta, observa-se o desenvolvimento do diâmetro no tempo e percebe-se, claramente, que o *Pinus elliotii* apresenta uma melhor performance do que o *Pinus taeda*, considerando os mesmos tipos de solos arenizados e degradados.

Tabela 16 – Estimativa dos diâmetros por idade e respectivos incrementos corrente e médio anual para *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, representados por variável dummy.

Idade (ano)	Pinus elliottii			Pinus taeda		
	DAP (cm)	ICA (cm/ano)	IMA (cm/ano)	DAP (cm)	ICA (cm/ano)	IMA (cm/ano)
5	3,68	0,62	0,74	2,87	0,48	0,57
6	4,28	0,60	0,71	3,34	0,46	0,56
7	4,86	0,58	0,69	3,79	0,45	0,54
8	5,42	0,57	0,68	4,23	0,44	0,53
9	5,98	0,55	0,66	4,66	0,43	0,52
10	6,52	0,54	0,65	5,08	0,42	0,51
11	7,06	0,54	0,64	5,50	0,42	0,50
12	7,59	0,53	0,63	5,92	0,41	0,49
13	8,11	0,52	0,62	6,32	0,41	0,49
14	8,63	0,52	0,62	6,72	0,40	0,48
15	9,14	0,51	0,61	7,12	0,40	0,47
16	9,64	0,51	0,60	7,52	0,39	0,47
17	10,14	0,50	0,60	7,91	0,39	0,47
18	10,64	0,50	0,59	8,29	0,39	0,46
19	11,13	0,49	0,59	8,68	0,38	0,46
20	11,62	0,49	0,58	9,06	0,38	0,45
21	12,10	0,48	0,58	9,43	0,38	0,45
22	12,58	0,48	0,57	9,81	0,38	0,45
23	13,06	0,48	0,57	10,18	0,37	0,44
24	13,54	0,47	0,56	10,55	0,37	0,44
25	14,01	0,47	0,56	10,92	0,37	0,44
26	14,48	0,47	0,56	11,29	0,37	0,43
27	14,95	0,47	0,55	11,65	0,36	0,43
28	15,41	0,46	0,55	12,01	0,36	0,43
29	15,87	0,46	0,55	12,37	0,36	0,43
30	16,33	0,46	0,54	12,73	0,36	0,42

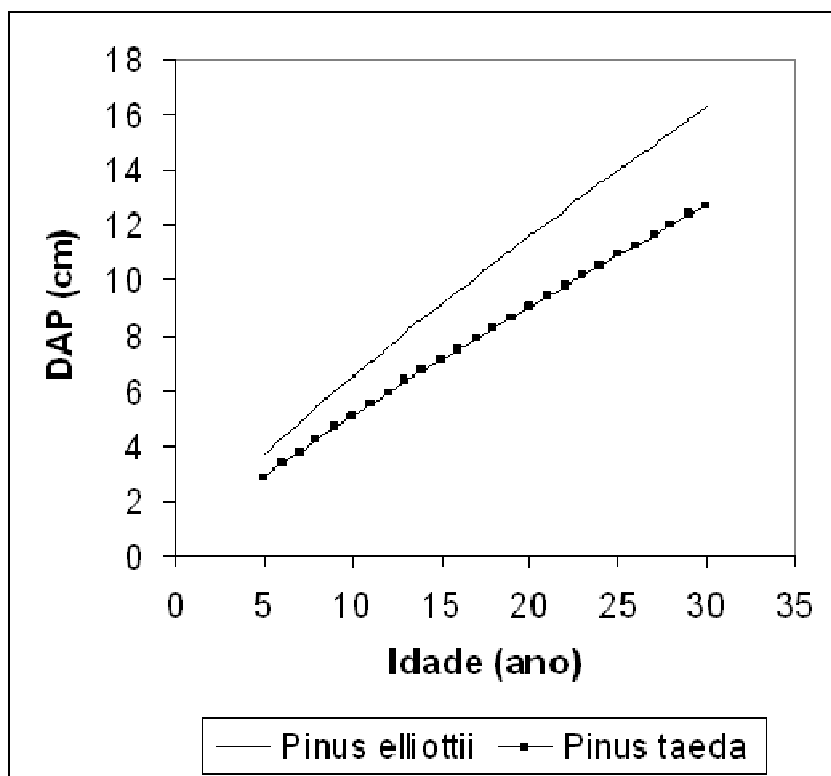


Figura 25 – Comparação do crescimento em diâmetro do *Pinus elliottii* versus *Pinus taeda*, em solos arenizados e degradados da fronteira oeste do Rio Grande do Sul.

4.6.3 Crescimento da altura em função da idade

As análises dos dados de crescimento em altura permitiram o ajuste dos modelos e a determinação da precisão estatística de cada equação testada. Foram determinados, para cada equação ajustada e os coeficientes, os parâmetros estatísticos, para posterior comparação da precisão e ajuste. Os valores estimados são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Parâmetros estatísticos das equações testadas para ajustar o crescimento da altura em função da idade de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*

Eq.	Coeficientes			$R^2_{Aj.}$	S_{yx}	CV%	F
	b_0	b_1	b_2				
1	3,24956	-7,4101	-	0,70	0,2979	11,36	609,75 **
2	-0,2148	1,37332	-0,1099	0,77	0,2614	9,97	433,56**
3	-	1,19677	-0,0754	0,99	0,2612	9,97	13006,80**
4	5,35034	0,91106	0,2826	0,99	8,2699	7,17	13839,10**
5	33,9070	0,0405	-	0,96	3,1445	20,20	3498,09**

Sendo: $R^2_{Aj.}$ = coeficiente de determinação ajustado; S_{yx} = erro padrão da estimativa; ** = significativo a 99 % de probabilidade; CV% = coeficiente de variação em %; F = valor de F da análise de variância; e b_0 , b_1 , b_2 , b_3 = coeficientes.

Analisando os valores apresentados nessa tabela, nota-se que, em geral, as equações apresentaram valores de coeficiente de determinação ajustado entre 0,70 e 0,99, e coeficientes de variação entre 7,17 e 20,20%, variando com o modelo testado. Os valores de coeficiente de determinação discrepantes indicam que algumas equações têm maior capacidade de explicar a variação da altura no tempo do que outras, porém seu uso isolado pode provocar erros, já que a inclusão de uma única variável independente pode aumentar seu valor, favorecendo sua escolha.

Ao analisar as equações através dos parâmetros estatísticos, destacam-se: a equação de número 4, definida pelo modelo de crescimento de Prodan, que apresentou o 3º maior valor de coeficiente de determinação ajustado, de 0,99, e coeficiente de variação de 7,17%; o modelo de Chapman-Richards, representado pela equação 5, com coeficiente de determinação ajustado de 0,96 e coeficiente de variação de 20,20%; e o modelo de Backmann modificado, correspondente à equação 3, que apresentou o maior coeficiente de determinação ajustado, de 0,99, e coeficiente de variação de 9,97%. A escolha da equação pelo coeficiente de determinação ajustado mais elevado resulta no modelo de Backmann modificado (equação 3), tendo apresentado um coeficiente de variação baixo, menor que 10%.

Essa indicação do modelo de Backmann modificado como o melhor modelo ocorreu na determinação do Valor Ponderado dos Escores Estatísticos (VP) para a

seleção da equação. Este procedimento estatístico visa sistematizar os resultados, auxiliando na seleção do modelo, e descrever o crescimento da altura em função da idade, conforme mostrado na Tabela 18, sendo a equação selecionada a que apresenta o menor VP.

Tabela 18 – Valor ponderado dos escores dos parâmetros estatísticos das equações testadas.

Equação	Escore dos parâmetros estatísticos				Valor dos escores
	$R^2_{Aj.}$	S_{yx}	Cv%	F	
1	4	3	3	4	14
2	3	2	2	5	12
3	1	1	2	2	6
4	1	5	1	1	8
5	2	4	4	3	13

Sendo: $R^2_{Aj.}$ = coeficiente de determinação ajustado; S_{yx} = erro padrão da estimativa; CV% = coeficiente de variação em %; e F = valor de F da análise de variância.

O método do Valor dos Escores estatísticos levou em consideração todas as variáveis estatísticas anteriormente descritas, determinando, assim, equação de número 3, correspondente ao modelo de Backmann modificado, como a mais adequada para determinar o crescimento em diâmetro de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, com o menor valor dos escores, igual a 6. Essa equação de Backmann modificada apresentou uma boa distribuição dos valores residuais, como mostra a Figura 26.

Com o objetivo de completar a análise do crescimento, foi estimada a altura por idade pelo modelo de Backmann modificado, e determinados os incrementos médios anuais (IMA) e os incrementos correntes anuais (ICA) em altura para as espécies de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, apresentados na Tabela 19. Aos 30 anos, a altura média para estas espécies foi de 24,49 m, com um incremento médio anual em altura de 0,82 m, podendo ser considerado um valor normal, compatível com as

características físicas e químicas dos solos arenizados e degradados da fronteira oeste do estado do Rio Grande do Sul.

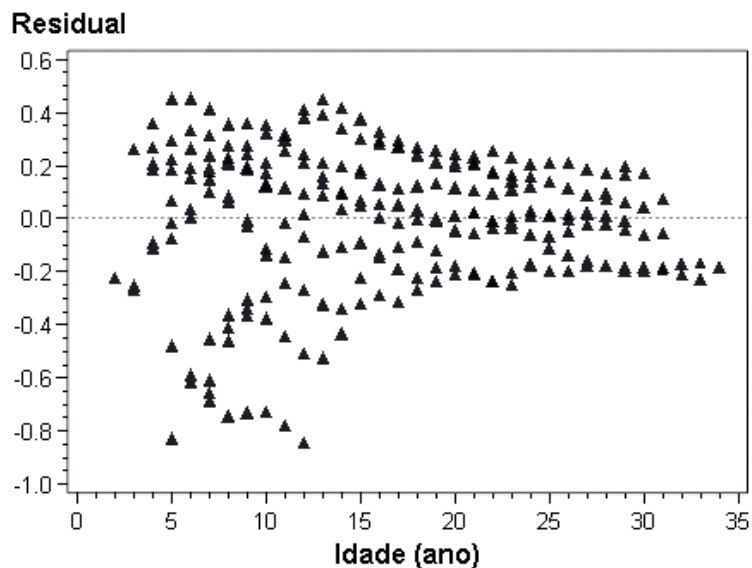


Figura 26 – Distribuição dos resíduos da altura por idade para os dados de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* agrupados e ajustados pela função de Backmann modificada

Com a equação de Backmann modificada, determinou-se, graficamente, o crescimento em altura em função da idade de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* (Figura 27).

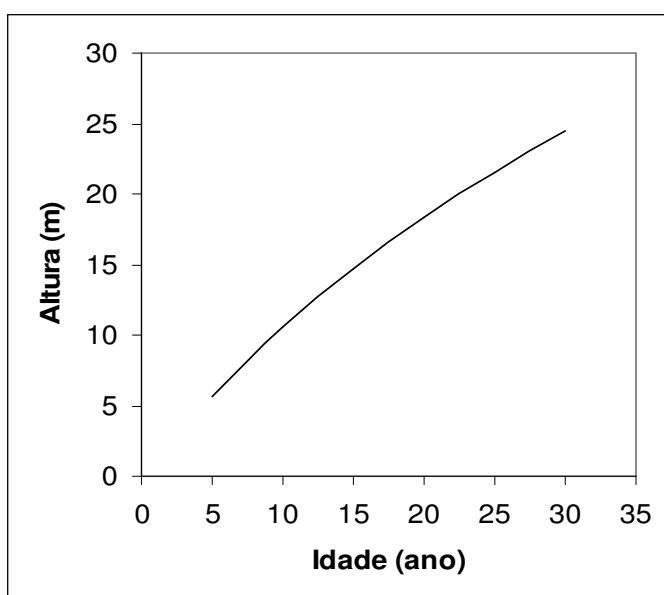


Figura 27 – Crescimento em altura em função da idade de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* pelo modelo de Backmann modificado.

4.6.4 Modelo de crescimento em altura sob o efeito da espécie com variável dummy

Para estimar a altura em função da idade para as espécies de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* de forma individualizada, cultivados em solos arenizados e degradados da fronteira oeste do Rio Grande do Sul, foi introduzida, no modelo, uma variável dummy (du), cuja análise de variância por soma de quadrados do Tipo I (SS1) encontra-se discriminada na tabela 20.

Tabela 19 – Estimativa do crescimento em altura por idade de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* pelo modelo de Backmann modificado

Idade (anos)	Altura (m)	ICA (m/ano)	IMA (m/ano)
5	5,65	1,10	1,13
6	6,70	1,06	1,12
7	7,72	1,02	1,10
8	8,69	0,98	1,09
9	9,64	0,94	1,07
10	10,55	0,91	1,05
11	11,43	0,88	1,04
12	12,28	0,85	1,02
13	13,11	0,83	1,01
14	13,92	0,81	0,99
15	14,70	0,78	0,98
16	15,46	0,76	0,97
17	16,21	0,74	0,95
18	16,93	0,72	0,94
19	17,64	0,71	0,93
20	18,33	0,69	0,92
21	19,00	0,68	0,91
22	19,67	0,66	0,89
23	20,31	0,65	0,88
24	20,94	0,63	0,87
25	21,56	0,62	0,86
26	22,17	0,61	0,85
27	22,77	0,60	0,84
28	23,35	0,58	0,83
29	23,93	0,57	0,83
30	24,49	0,56	0,82

Sendo: h = altura em metros; IMA= incremento médio anual em metros por ano; e ICA= incremento corrente anual em metros por ano.

Tabela 20 – Análise de variância da altura com inclusão de variável dummy para as espécies de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*.

FV	GL	SQ	QM	F	Prob. > F
ln t	1	1773,7818	1773,7818	26570,5	<,0001
ln ² t	1	2,2726	2,2726	34,04	<,0001
Dummy	1	0,0145	0,0145	0,22	0,6412
ln t . Dummy	1	0,4950	0,4950	7,42	0,0069

Sendo: FV = fonte de variação; GL = graus de liberdade; SQ = soma de quadrados; QM = quadrado médio; F = valor de F; Prob. > F = probabilidade de significância para o valor de F; ln = logaritmo natural; t = idade.

Nessa Tabela 20, observa-se que todos os parâmetros do modelo apresentaram um valor de F significativo, justificando a sua permanência no modelo original para a estimativa da altura, de forma simultânea, dessas duas espécies, com exceção da variável dummy, que não foi significativa, apresentando um valor de F igual a 0,22 (Prob. = 0,6412), tendo sido excluída do modelo geral. Por outro lado, a interação da variável dummy com a idade foi significativa, com valor de F igual a 7,42 (Prob. = 0,0069), indicando que o *Pinus elliottii* difere do *Pinus taeda* na forma da inclinação, mas não no nível de crescimento em altura.

Assim, o modelo de crescimento em altura ficou sendo representado por:

$$\ln h = 1,1942. \ln t - 0,07504. \ln^2 t + 0,0026. (\ln t. du)$$

Esse modelo de crescimento em altura (h), expresso pela equação de Backmann modificada, é uma função da idade (t) e inclusão da variável dummy (du) com interação com a idade (t), representando as espécies, que assume 0 (zero) na presença de *Pinus elliottii* e 1 (um) na presença de *Pinus taeda*. Tal modelo apresentou um excelente ajuste, com coeficiente de determinação igual a 0,9905, baixo erro padrão da estimativa, igual a 0,2617, e alta significância, com valor de F igual a 8637,86. A equação apresentou uma boa distribuição dos valores residuais da altura em relação à idade, como mostra a Figura 28.

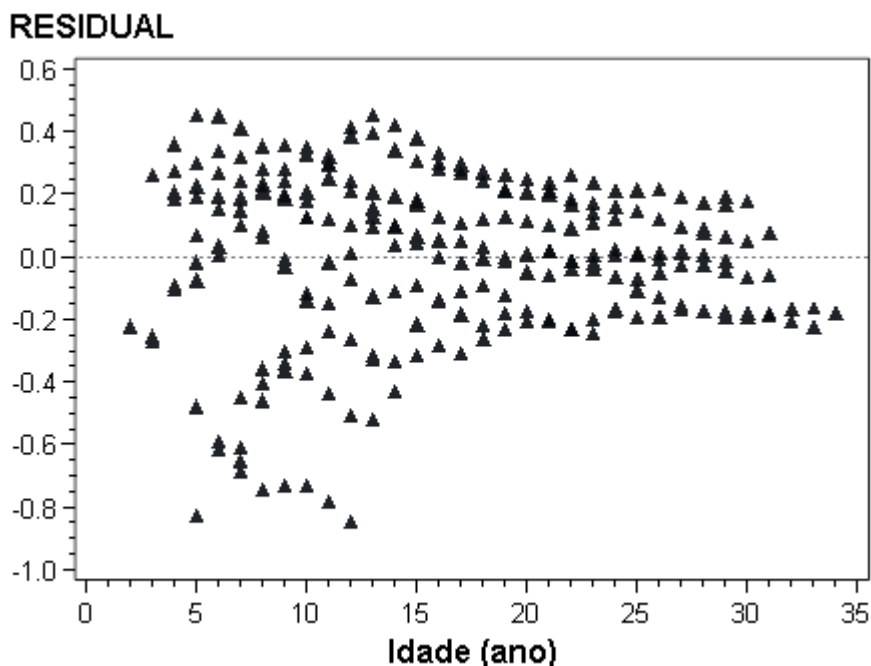


Figura 28 – Distribuição dos resíduos da altura por idade para os dados de *Pinus elliotii* e *Pinus taeda* agrupados e ajustados pela função de Backmann modificada com variável dummy.

Com a equação de Backmann modificada, ajustada com variável dummy, estimaram-se as alturas por idade para *Pinus elliotii* (dummy = 0) e *Pinus taeda* (dummy = 1), que se encontram representadas na Tabela 21, com os respectivos incrementos correntes e médios anuais em altura.

Esses dados de crescimento em altura por idade, estimados para *Pinus elliotii* e *Pinus taeda*, respectivamente, encontram-se representados na Figura 29 e relacionados na Tabela 21. Observando o desenvolvimento da altura no tempo, percebe-se, claramente, que a diferença de altura entre o *Pinus elliotii* e o *Pinus taeda* é muito pequena, porém estatisticamente significativa, devendo ser considerada na avaliação de sítios nessa região de solos arenizados e degradada.

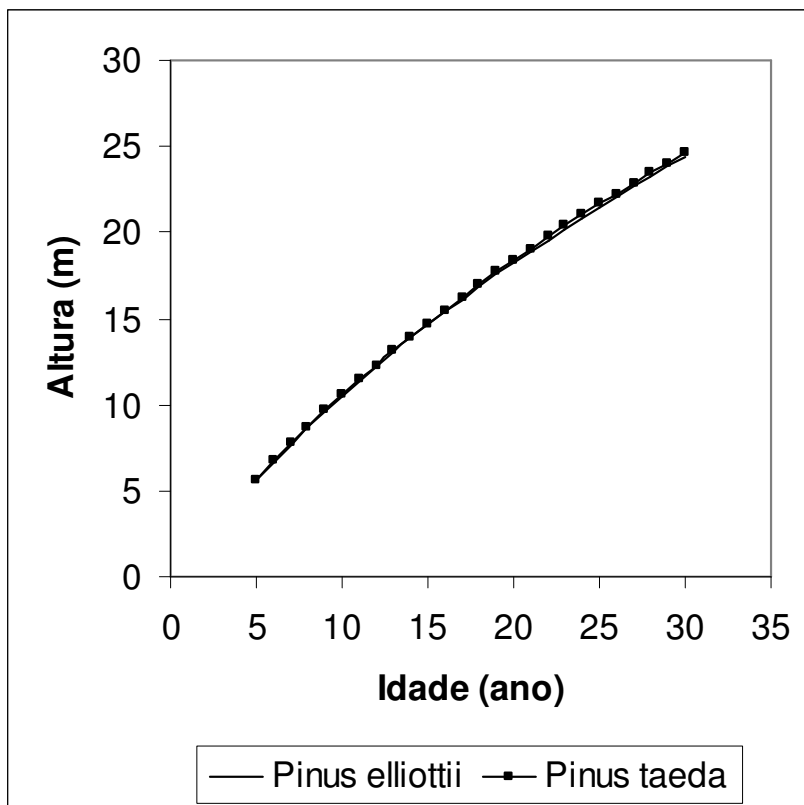


Figura 29 – Comparação do crescimento em altura do *Pinus elliottii* versus *Pinus taeda*, em solos arenizados e degradados da fronteira oeste do Rio Grande do Sul.

Tabela 21 – Estimativa das alturas por idade e respectivos incrementos corrente e médio anual para *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, representados por variável dummy.

Idade (ano)	Pinus elliottii			Pinus taeda		
	Altura (m)	ICA (m/ano)	IMA (m/ano)	Altura (m)	ICA (m/ano)	IMA (m/ano)
5	5,63	1,09	1,13	5,65	1,10	1,13
6	6,68	1,05	1,11	6,71	1,06	1,12
7	7,69	1,01	1,10	7,73	1,02	1,10
8	8,66	0,97	1,08	8,71	0,98	1,09
9	9,60	0,94	1,07	9,65	0,95	1,07
10	10,51	0,91	1,05	10,57	0,91	1,06
11	11,38	0,88	1,03	11,45	0,89	1,04
12	12,23	0,85	1,02	12,31	0,86	1,03
13	13,06	0,82	1,00	13,15	0,83	1,01
14	13,86	0,80	0,99	13,95	0,81	1,00
15	14,64	0,78	0,98	14,74	0,79	0,98
16	15,40	0,76	0,96	15,51	0,77	0,97
17	16,14	0,74	0,95	16,26	0,75	0,96
18	16,86	0,72	0,94	16,98	0,73	0,94
19	17,56	0,70	0,92	17,70	0,71	0,93
20	18,25	0,69	0,91	18,39	0,70	0,92
21	18,92	0,67	0,90	19,07	0,68	0,91
22	19,58	0,66	0,89	19,73	0,66	0,90
23	20,22	0,64	0,88	20,39	0,65	0,89
24	20,85	0,63	0,87	21,02	0,64	0,88
25	21,47	0,62	0,86	21,65	0,62	0,87
26	22,07	0,60	0,85	22,26	0,61	0,86
27	22,66	0,59	0,84	22,86	0,60	0,85
28	23,25	0,58	0,83	23,45	0,59	0,84
29	23,82	0,57	0,82	24,03	0,58	0,83
30	24,38	0,56	0,81	24,59	0,57	0,82

Sendo: h = altura em metros; IMA= incremento médio anual em metros por ano; e ICA= incremento corrente anual em metros por ano.

4.7 Classificação de sítio

A equação de Backmann modificada, com inserção da variável dummy indicando a espécie de *Pinus elliottii* (dummy = 0) e *Pinus taeda* (dummy = 1), selecionada anteriormente, forneceu as estimativas de altura dominante entre 3 e 30 anos, para a obtenção da curva mestre, e a determinação dos valores das alturas no tempo, para cada índice de sítio, conforme consta nas Tabelas 22 e 23, representadas nas Figuras 30 e 31, para *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, respectivamente.

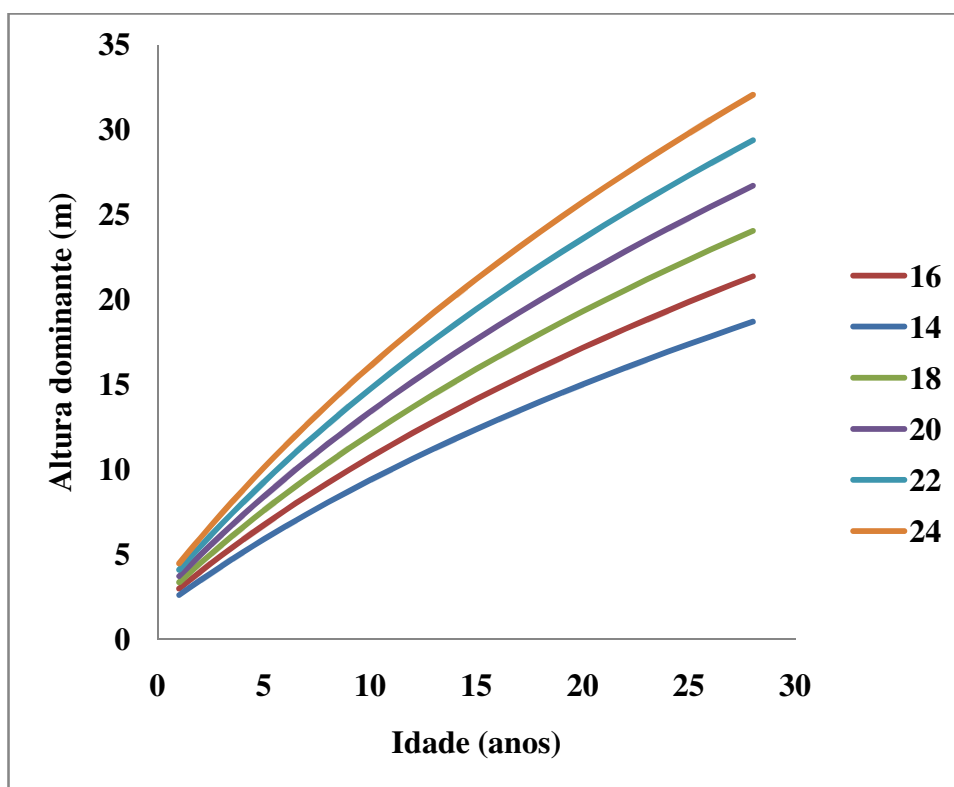


Figura 30 – Classificação de sítio para *Pinus elliottii*.

Tabela 22 – Alturas dominantes por idade dos índices de sítio para *Pinus elliottii*.

Idade (ano)	Índices de sítio					
	14	16	18	20	22	24
3	2,60	2,97	3,35	3,72	3,72	4,09
4	3,48	3,97	4,47	4,97	4,97	5,46
5	4,32	4,93	5,55	6,17	6,17	6,78
6	5,12	5,86	6,59	7,32	7,32	8,05
7	5,90	6,74	7,58	8,43	8,43	9,27
8	6,64	7,59	8,54	9,49	9,49	10,44
9	7,36	8,42	9,47	10,52	10,52	11,57
10	8,06	9,21	10,36	11,51	11,51	12,67
11	8,73	9,98	11,23	12,48	12,48	13,72
12	9,39	10,73	12,07	13,41	13,41	14,75
13	10,02	11,45	12,88	14,31	14,31	15,74
14	10,63	12,15	13,67	15,19	15,19	16,71
15	11,23	12,83	14,44	16,04	16,04	17,65
16	11,81	13,50	15,19	16,88	16,88	18,56
17	12,38	14,15	15,92	17,69	17,69	19,45
18	12,93	14,78	16,63	18,48	18,48	20,32
19	13,47	15,40	17,32	19,25	19,25	21,17
20	14,00	16,00	18,00	20,00	20,00	22,00
21	14,52	16,59	18,66	20,74	20,74	22,81
22	15,02	17,17	19,31	21,46	21,46	23,60
23	15,51	17,73	19,94	22,16	22,16	24,38
24	16,00	18,28	20,57	22,85	22,85	25,14
25	16,47	18,82	21,17	23,53	23,53	25,88
26	16,93	19,35	21,77	24,19	24,19	26,61
27	17,39	19,87	22,36	24,84	24,84	27,32
28	17,83	20,38	22,93	25,48	25,48	28,02
29	18,27	20,88	23,49	26,10	26,10	28,71
30	18,70	21,37	24,05	26,72	26,72	29,39

Para a determinação dos índices de sítio, foi fixada a idade de referência de 20 anos, definindo-se 6 curvas de índices de sítio, com intervalo de 2 metros nesta

idade de referência, para abranger toda a dispersão dos dados de alturas dominantes observados.

Tabela 23 – Alturas dominantes por idade dos índices de sítio para *Pinus taeda*.

Idade (ano)	Índices de sítio					
	14	16	18	20	22	24
3	2,59	2,96	3,33	3,70	3,70	4,07
4	3,46	3,96	4,45	4,95	4,95	5,44
5	4,30	4,92	5,53	6,15	6,15	6,76
6	5,11	5,84	6,57	7,30	7,30	8,03
7	5,88	6,72	7,56	8,40	8,40	9,24
8	6,63	7,58	8,52	9,47	9,47	10,42
9	7,35	8,40	9,45	10,50	10,50	11,55
10	8,05	9,19	10,34	11,49	11,49	12,64
11	8,72	9,96	11,21	12,46	12,46	13,70
12	9,37	10,71	12,05	13,39	13,39	14,73
13	10,01	11,44	12,87	14,30	14,30	15,72
14	10,62	12,14	13,66	15,18	15,18	16,69
15	11,22	12,83	14,43	16,03	16,03	17,63
16	11,81	13,49	15,18	16,87	16,87	18,55
17	12,37	14,14	15,91	17,68	17,68	19,45
18	12,93	14,78	16,62	18,47	18,47	20,32
19	13,47	15,40	17,32	19,24	19,24	21,17
20	14,00	16,00	18,00	20,00	20,00	22,00
21	14,52	16,59	18,66	20,74	20,74	22,81
22	15,02	17,17	19,32	21,46	21,46	23,61
23	15,52	17,74	19,95	22,17	22,17	24,39
24	16,00	18,29	20,58	22,86	22,86	25,15
25	16,48	18,83	21,19	23,54	23,54	25,89
26	16,94	19,36	21,79	24,21	24,21	26,63
27	17,40	19,89	22,37	24,86	24,86	27,34
28	17,85	20,40	22,95	25,50	25,50	28,05
29	18,29	20,90	23,52	26,13	26,13	28,74
30	18,72	21,40	24,07	26,75	26,75	29,42

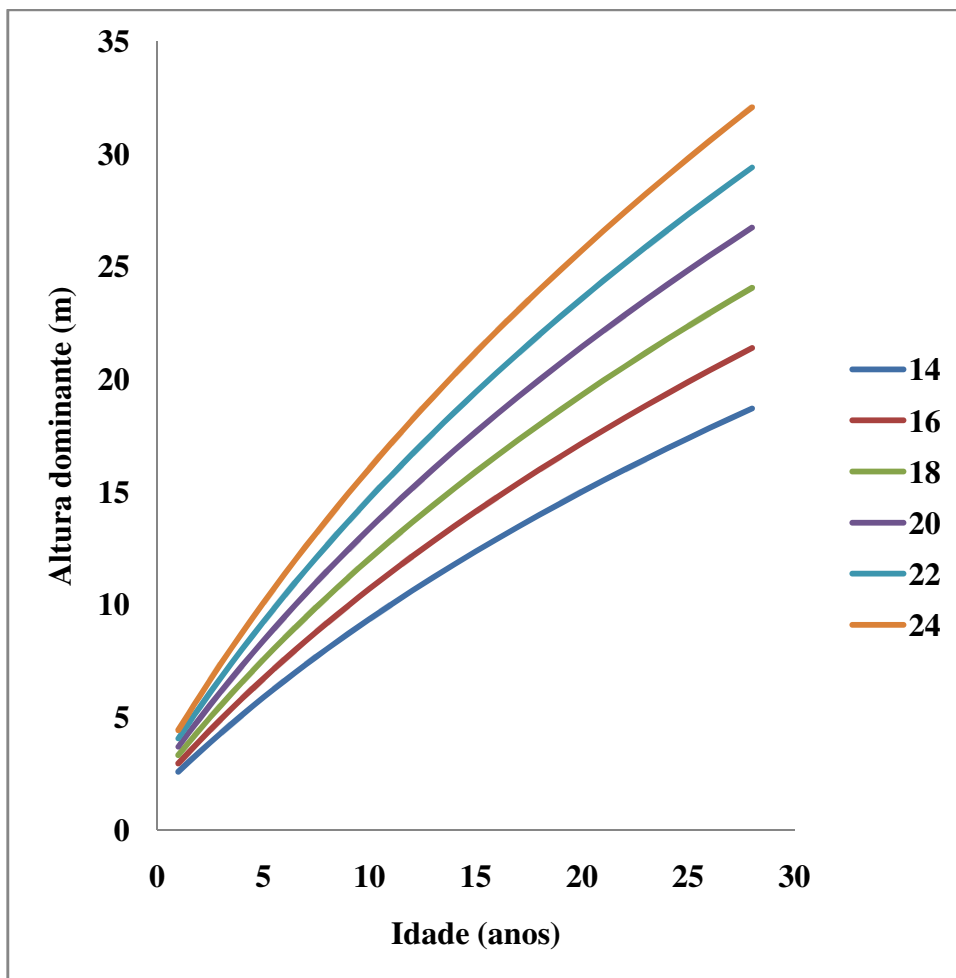


Figura 31 – Classificação de sítio para *Pinus taeda*.

4.8 Crescimento do volume em função da idade

As análises dos dados de crescimento em volume permitiram o ajuste dos modelos e a determinação da precisão estatística de cada equação testada. Foram determinados, para cada equação ajustada, os coeficientes e os parâmetros estatísticos, para posterior comparação da precisão e ajuste. Os valores estimados são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 – Parâmetros estatísticos das equações testadas para ajustar o crescimento em volume em função da idade de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*

Eq.	Coeficientes			R ² _{Aj.}	S _{yx}	CV%	F
	b ₀	b ₁	b ₂				
1	-1,1576	-26,0294		0,66	0,5818	-20,85	418,96**
2	-6,7270	0,68224	0,2342	0,72	0,5309	-19,03	273,01**
3		-4,30408	1,1346	0,96	0,5611	-20,11	2828,29**
4	-150,89	26,1802	-1,3317	0,92	4,5313	-25,73	1352,49**
5	7,5011	0,00047		0,72	0,0611	70,55	296,91**

Sendo: R²_{Aj.}= coeficiente de determinação ajustado; S_{yx} = erro padrão da estimativa; ** = significativo a 99% de probabilidade; CV%= coeficiente de variação em %; F= valor de F da análise de variância; e b₀, b₁, b₂, b₃= coeficientes.

Analisando os valores apresentados nessa tabela, nota-se que, em geral, as equações apresentaram valores de coeficiente de determinação ajustado entre 0,66 e 0,96 e coeficientes de variação entre -25,73 e 70,55%, variando com o modelo testado. Os valores de coeficiente de determinação discrepantes indicam que algumas equações têm maior capacidade de explicar a variação total do que outras, porém seu uso isolado pode gerar erros, já que a inclusão de uma única variável pode aumentar seu valor, favorecendo sua escolha.

Ao analisar as equações através dos parâmetros estatísticos, destaca-se a equação de número 3, definida pelo modelo de Backmann modificada, que apresentou o maior coeficiente de determinação ajustado, de 0,96, e coeficiente de variação de -20,11%. Para certificação da escolha deste modelo, foi determinado o Valor dos Escores estatísticos de todas as equações ajustadas, confirmando a equação selecionada, por apresentar o menor valor, igual 6 pontos, conforme mostrado na Tabela 25.

Tabela 25 – Valor ponderado dos escores dos parâmetros estatísticos das equações testadas

Equação	Escore dos parâmetros estatísticos				Valor dos escores
	$R^2_{Aj.}$	S_{yx}	Cv%	F	
1	4	3	3	3	13
2	3	1	1	5	10
3	1	2	2	1	6
4	2	5	4	2	13
5	3	4	5	4	15

Sendo: $R^2_{Aj.}$ = coeficiente de determinação ajustado; S_{yx} = erro padrão da estimativa; CV% = coeficiente de variação em %; e F = valor de F da análise de variância.

A equação de Backmann modificada apresentou também uma boa distribuição dos valores residuais por idade, como pode ser observado na Figura 32.

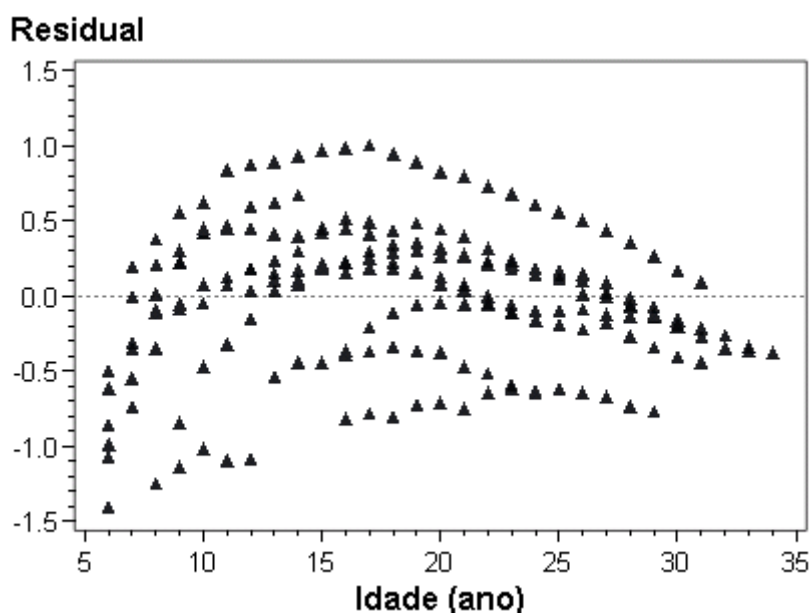


Figura 32 – Distribuição dos resíduos de volume por idade para os dados de *Pinus elliotii* e *Pinus taeda* agrupados e ajustados pela função de Backmann modificada.

Essa equação, resultante do ajuste do volume em metros cúbicos (v) em função da idade (t) em anos, é expressa por:

$$\ln v = -4,30408 \cdot \ln t + 1,1346 \cdot \ln^2 t$$

Com objetivo de completar a análise do crescimento, foi estimado o volume por idade pelo modelo de Backmann modificado, e determinados os incrementos médios anuais (IMA) e os incrementos correntes anuais (ICA) em volume para as espécies de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 – Estimativa do crescimento em volume por idade de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* pelo modelo de Backmann modificado.

Idade (anos)	Volume (m ³)	ICA (m ³ /ano)	IMA (m ³ /ano)
5	0,0185	(0,0042)	0,0037
6	0,0171	(0,0014)	0,0028
7	0,0169	(0,0002)	0,0024
8	0,0175	0,0006	0,0022
9	0,0187	0,0012	0,0021
10	0,0203	0,0016	0,0020
11	0,0224	0,0021	0,0020
12	0,0250	0,0025	0,0021
13	0,0280	0,0030	0,0022
14	0,0315	0,0035	0,0023
15	0,0356	0,0041	0,0024
16	0,0403	0,0047	0,0025
17	0,0456	0,0054	0,0027
18	0,0517	0,0061	0,0029
19	0,0586	0,0069	0,0031
20	0,0664	0,0078	0,0033
21	0,0752	0,0088	0,0036

Idade (anos)	Volume (m ³)	ICA (m ³ /ano)	IMA (m ³ /ano)
22	0,0851	0,0099	0,0039
23	0,0963	0,0111	0,0042
24	0,1087	0,0125	0,0045
25	0,1226	0,0139	0,0049
26	0,1382	0,0156	0,0053
27	0,1555	0,0173	0,0058
28	0,1748	0,0193	0,0062
29	0,1963	0,0214	0,0068
30	0,2201	0,0238	0,0073

Sendo: DAP = diâmetro à altura do peito em centímetros; IMA = incremento médio anual em m³ por ano; e ICA = incremento corrente anual em m³ por ano.

Aos 30 anos, o volume médio para essas espécies foi de 0,2201 m³, com um incremento médio anual de 0,0073 m³, podendo ser considerado um valor razoável, compatível com as características físicas e químicas desses solos arenizados e degradados da fronteira oeste do estado do Rio Grande do Sul.

Com a equação de Backmann modificada, determinou-se o crescimento em volume em função da idade de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* (Figura 33).

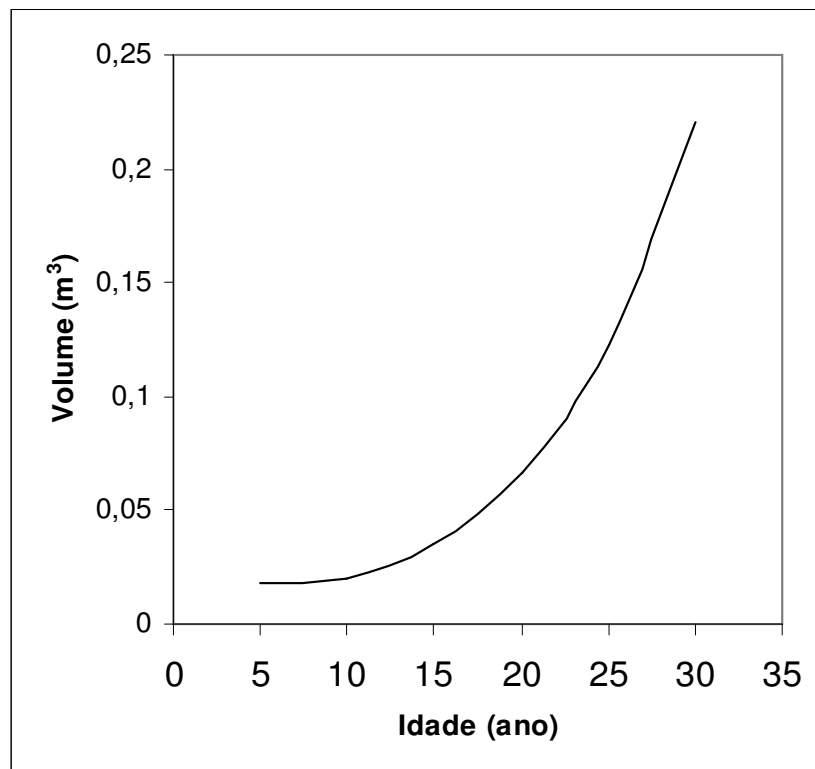


Figura 33 – Crescimento em volume em função da idade de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* pelo modelo de Backmann modificado.

4.8.1 Modelo de crescimento em volume sob o efeito da espécie com variável dummy

Para estimar o volume em função da idade para as espécies de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* de forma individualizada, cultivados em solos arenizados e degradados da fronteira oeste do Rio Grande do Sul, foi introduzida, no modelo, uma variável dummy (du), definida pela espécie, na presença de *Pinus elliottii*, igual a 1 (um), e na ausência deste ou presença de *Pinus taeda*, igual a 0 (zero), cuja análise de variância, por soma de quadrados do Tipo I, encontra-se discriminada na Tabela 27.

Tabela 27 – Análise de variância do volume com inclusão de variável dummy para as espécies de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*.

FV	GL	SQ	QM	F	Prob. > F
In t	1	1327,3089	1327,3089	7336,16	<,0001
In ² t	1	309,4119	309,4119	1710,15	<,0001
Dummy	1	8,2833	8,2833	45,78	<,0001
In t . Dummy	1	0,9297	0,9297	5,14	0,0245

Sendo: FV = fonte de variação; GL = graus de liberdade; SQ = soma de quadrados; QM = quadrado médio; F = valor de F; Prob.>F = probabilidade de significância para o valor de F; ln = logaritmo natural; t = idade.

Assim, o modelo de volume geral ficou sendo representado por:

$$\ln v = -3,8313 \cdot \ln t + 1,0135 \cdot \ln^2 t - 1,2494 \cdot du + 0,2969 (\ln t \cdot du)$$

Esse modelo de crescimento em volume (v), expresso pela equação de Backmann modificada, é uma função da idade (t) e inclusão da variável dummy (du) representando as espécies, que assume 0 (zero) na presença de *Pinus elliottii* e 1 (um) na presença de *Pinus taeda*. Tal modelo apresentou um excelente ajuste, com coeficiente de determinação igual a 0,9786, baixo erro padrão da estimativa, igual a 0,4253, e significância alta, com valor de F igual a 2274,31.

Na Tabela 28, são apresentadas as estatísticas dos parâmetros do modelo de Backmann modificado com inclusão da variável dummy para as espécies de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*. Observa-se que todos os parâmetros do modelo apresentaram um valor de t significativo, justificando a sua permanência no modelo original para estimativa do volume, simultaneamente, dessas duas espécies.

Tabela 28 – Estatísticas dos parâmetros do modelo de crescimento em volume com inclusão da variável dummy para as espécies de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*.

Parâmetro	Estimador	Erro padrão	Valor t	Prob. > t
ln t	-3,8313	0,1079	-35,49	<,0001
ln ² t	1,0135	0,0355	28,50	<,0001
Dummy	-1,2494	0,3757	-3,33	0,0011
ln t . Dummy	0,2969	0,1309	2,27	0,0245

A equação definida apresentou uma boa distribuição dos valores residuais de diâmetro em relação à idade, como mostra a Figura 34.

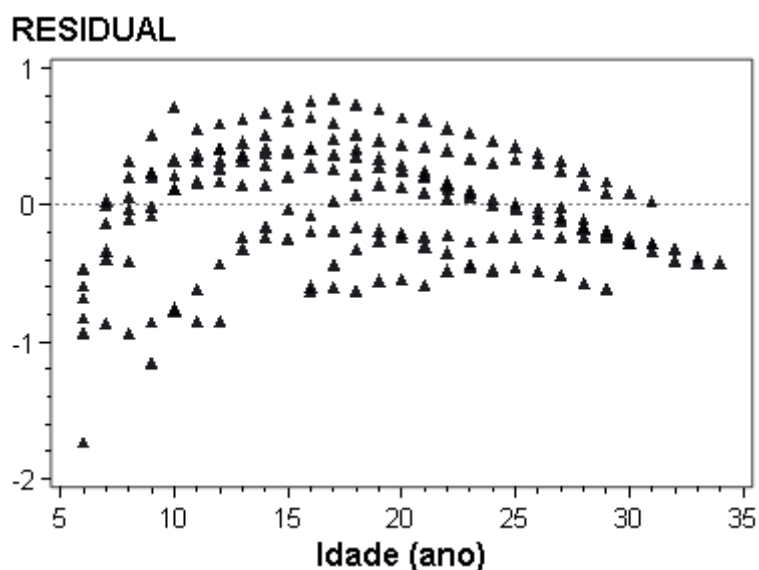


Figura 34 – Distribuição dos resíduos de volume por idade para os dados de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* agrupados e ajustados pela função de Backmann modificada com variável dummy

Com a equação de Backmann ajustada com variável dummy, estimaram-se os volumes por idade para *Pinus elliottii* (dummy=0) e *Pinus taeda* (dummy=1), que se encontram discriminados na Tabela 29, com os respectivos incrementos correntes anuais em volume.

Tabela 29 – Estimativa dos volumes por idade e respectivos incrementos corrente e médio anual para *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, representados por variável dummy

Idade (ano)	Pinus elliottii			Pinus taeda		
	Volume (m ³)	ICA (m ³ /ano)	IMA (m ³ /ano)	Volume (m ³)	ICA (m ³ /ano)	IMA (m ³ /ano)
7	0,0268	0,0268	0,0038	0,0137	0,0137	0,0019
8	0,0277	0,0009	0,0034	0,0147	0,0010	0,0018
9	0,0294	0,0016	0,0032	0,0162	0,0014	0,0018
10	0,0317	0,0023	0,0031	0,0180	0,0018	0,0018
11	0,0347	0,0029	0,0031	0,0203	0,0022	0,0018
12	0,0383	0,0035	0,0031	0,0229	0,0026	0,0019
13	0,0424	0,0041	0,0032	0,0260	0,0031	0,0020
14	0,0472	0,0047	0,0033	0,0296	0,0035	0,0021
15	0,0527	0,0054	0,0035	0,0337	0,0041	0,0022
16	0,0589	0,0062	0,0036	0,0384	0,0047	0,0024
17	0,0659	0,0069	0,0038	0,0438	0,0053	0,0025
18	0,0737	0,0078	0,0040	0,0498	0,0060	0,0027
19	0,0825	0,0087	0,0043	0,0567	0,0068	0,0029
20	0,0923	0,0098	0,0046	0,0644	0,0077	0,0032
21	0,1032	0,0109	0,0049	0,0731	0,0086	0,0034
22	0,1154	0,0121	0,0052	0,0828	0,0097	0,0037
23	0,1288	0,0134	0,0056	0,0937	0,0108	0,0040
24	0,1437	0,0148	0,0059	0,1058	0,0121	0,0044
25	0,1601	0,0164	0,0064	0,1194	0,0135	0,0047
26	0,1783	0,0181	0,0068	0,1344	0,0150	0,0051
27	0,1982	0,0199	0,0073	0,1512	0,0167	0,0056
28	0,2202	0,0219	0,0078	0,1697	0,0185	0,0060
29	0,2442	0,0240	0,0084	0,1903	0,0205	0,0065
30	0,2707	0,0264	0,0090	0,2130	0,0227	0,0071

Sendo: DAP = diâmetro à altura do peito em centímetros; IMA = incremento médio anual em m³ por ano; e ICA = incremento corrente anual em m³ por ano.

Esses dados de crescimento em volume por idade, estimados para *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, que se encontram relacionados na Tabela 29, estão representados na Figura 35. Observando as tendências do desenvolvimento do volume no tempo, percebe-se, claramente, que o *Pinus elliottii* apresenta uma melhor performance do que o *Pinus taeda*, considerando os mesmos tipos de solos arenizados e degradados. Isso era previsível, considerando a própria origem do *Pinus elliottii*, nos Estados Unidos, nativo em solos baixos com alta concentração de areia, como ocorre neste caso. Aliado a isso, deve-se considerar que o *Pinus elliottii* tem uma grande capacidade de deposição de serapilheira de decomposição mais acelerada que o *Pinus taeda*, o que beneficia a ciclagem de nutrientes, em favor das plantas, que são beneficiadas direta e especialmente nesses tipos de solos pobres.

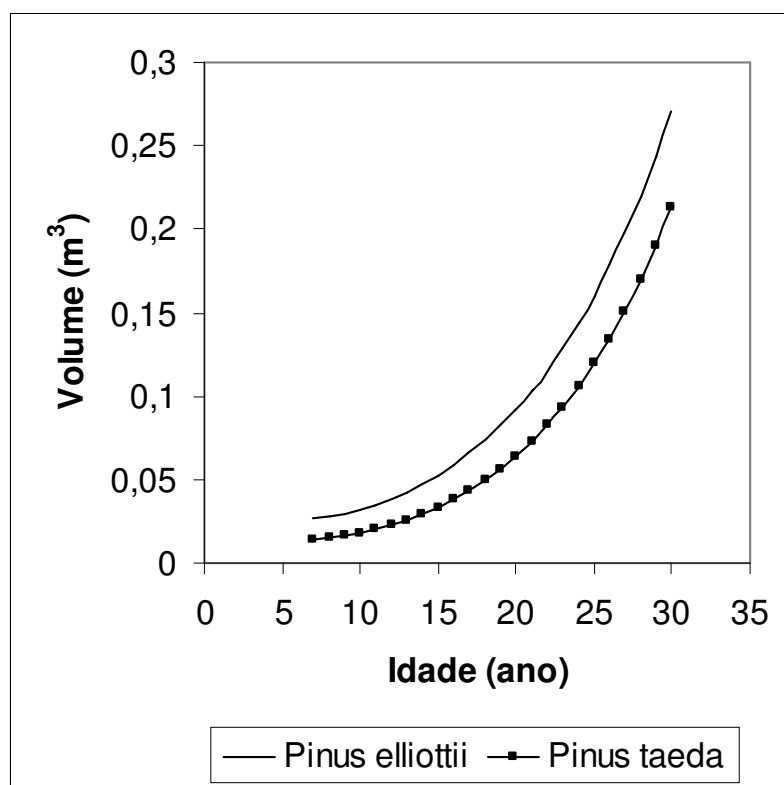


Figura 35 – Comparação do crescimento em volume do *Pinus elliottii* versus *Pinus taeda*, em solos arenizados e degradados da fronteira oeste do Rio Grande do Sul.

4.9 Volumetria

Para a estimativa do volume sem casca de árvores individuais, foram testadas as equações de volume da Tabela 1, sendo apresentados os resultados por espécie de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*.

4.9.1 Equações de volume sem casca para *Pinus elliottii*

Na tabela 30, encontram-se discriminados os parâmetros e os testes estatísticos das equações de volume individual sem casca de *Pinus elliottii*.

Tabela 30 – Equações de volume sem casca testadas para *Pinus elliottii*.

Eq.	Coeficientes				$R^2_{Aj.}$	S_{yx}	IF	CV%	F
	b_0	b_1	b_2	b_3/b_4					
1	0,0045	0,0004	-	-	0,85	0,0199	0,0322	28,14	583,39**
2	-0,107	0,0152	0,0025	-	0,80	0,0217	0,0298	32,64	204,97**
3	-9,973	0,9911	-	-	0,87	0,3171	0,0207	-10,46	656,35**
4	-9,885	1,5925	1,2566	-	0,89	0,3041	0,0198	-10,05	360,10**
5	-7,638	-1,031	0,6202	1,6701 -0,083	0,88	0,3043	0,0221	-10,04	181,01**

Sendo: $R^2_{Aj.}$ = coeficiente de determinação ajustado; S_{yx} = erro padrão da estimativa; ** = significativo a 99% de probabilidade; IF = Índice de Furnival absoluto; CV% = coeficiente de variação em %; F = valor de F da análise de variância; e b_0 , b_1 , b_2 , b_3 = coeficientes.

Todas as equações de volume individual sem casca permitiram um bom ajuste, com coeficiente de determinação superior a 0,80 e baixo erro padrão da estimativa, com valor inferior a 0,3171. Para a seleção do melhor modelo, foi determinado o Valor dos Escores estatísticos, apresentados na Tabela 31. Observa-

se que a equação de volume que apresentou o menor valor ponderado foi o modelo 4, definido por Schumacher-Hall, com 7 pontos, tendo sido selecionada para estimar o volume sem casca de *Pinus elliottii*. Tal equação apresentou um coeficiente de determinação de 0,89, erro padrão da estimativa de 0,3041 e coeficiente de variação igual a -10,05.

Tabela 31 – Valor ponderado dos escores dos parâmetros estatísticos das equações de volume testadas para *Pinus elliottii*.

Equação	Escore dos parâmetros estatísticos					Valor dos escores
	$R^2_{Aj.}$	S_{yx}	IF	CV%	F	
1	4	2	5	4	2	17
2	5	3	4	5	4	21
3	3	4	2	2	1	12
4	1	1	1	1	3	7
5	2	5	3	3	5	18

Sendo: $R^2_{Aj.}$ = coeficiente de determinação ajustado; S_{yx} = erro padrão da estimativa; IF = Índice de Furnival absoluto e relativo; CV% = coeficiente de variação em %; e F = valor de F da análise de variância.

Essa equação de volume sem casca para *Pinus elliottii*, além da boa precisão, apresentou uma boa distribuição dos valores residuais de volume sem casca estimado pelo valor do volume real, como pode ser observado na Figura 36.

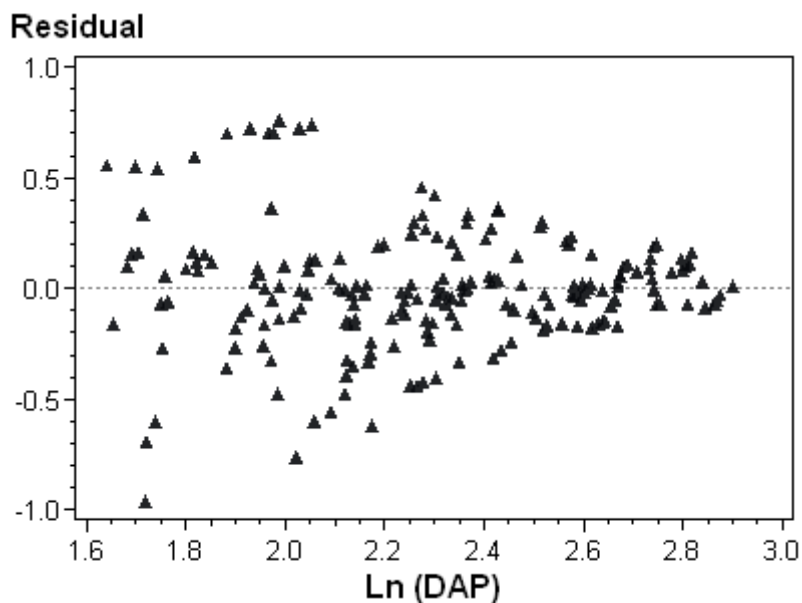


Figura 36 – Distribuição dos resíduos de volume de *Pinus elliottii*.

4.9.2 Equações de volume sem casca para *Pinus taeda*

Na Tabela 32, encontram-se os parâmetros e os testes estatísticos das equações de volume individual sem casca de *Pinus taeda*.

Tabela 32 – Equações de volume sem casca testadas para *Pinus taeda*.

Eq.	Coeficientes				$R^2_{Aj.}$	S_{yx}	IF	CV%	F
	b_0	b_1	b_2	b_3/b_4					
1	0,0006	0,0003	-	-	0,90	0,0288	0,0467	20,02	2787,8**
2	-0,138	0,0157	0,0038	-	0,87	0,0256	0,0352	27,24	707,5**
3	-9,881	0,9681	-	-	0,91	0,2801	0,0135	-10,20	2090,6**
4	-9,979	1,6716	1,2195	-	0,92	0,2600	0,0126	-9,86	1142,9**
5	-9,290	0,4168	0,2769	$\frac{1,7801}{-0,108}$	0,92	0,2681	0,0129	-9,83	575,8**

Sendo: $R^2_{Aj.}$ = coeficiente de determinação ajustado; ** = significativo a 99 % de probabilidade; IF = Índice de Furnival absoluto; CV% = coeficiente de variação em %; F = valor de F da análise de variância; e b_0 , b_1 , b_2 , b_3 = coeficientes.

Todas as equações de volume individual sem casca permitiram um bom ajuste, com coeficiente de determinação superior a 0,87 e baixo erro padrão da estimativa, com valor inferior a 0,2801. Para a seleção do melhor modelo, foi determinado o Valor Ponderado dos Escores Estatísticos, apresentados na Tabela 33. Observa-se que a equação de volume que apresentou o menor valor ponderado foi o modelo 4, definido por Schumacher-Hall, com 7 pontos, tendo sido selecionada para estimar o volume sem casca de *Pinus taeda*. Tal equação apresentou um coeficiente de determinação de 0,92, erro padrão da estimativa igual a 0,26 e coeficiente de variação igual a -9,86 %.

Tabela 33 – Valor ponderado dos escores dos parâmetros estatísticos das equações testadas para *Pinus taeda*.

Equação	Escore dos parâmetros estatísticos					Valor dos escores
	$R^2_{Aj.}$	S_{yx}	IF	CV%	F	
1	3	5	5	2	1	16
2	4	4	4	5	4	21
3	2	3	3	3	2	13
4	1	1	1	1	3	7
5	1	2	2	4	5	14

Sendo: $R^2_{Aj.}$ = coeficiente de determinação ajustado; IF = Índice de Furnival absoluto e relativo; CV% = coeficiente de variação em %; e F = valor de F da análise de variância.

Essa equação de volume sem casca para *Pinus taeda*, além da boa precisão, apresentou uma boa distribuição dos valores residuais de volume sem casca estimado pelo valor do volume real, como pode ser observado na Figura 37.

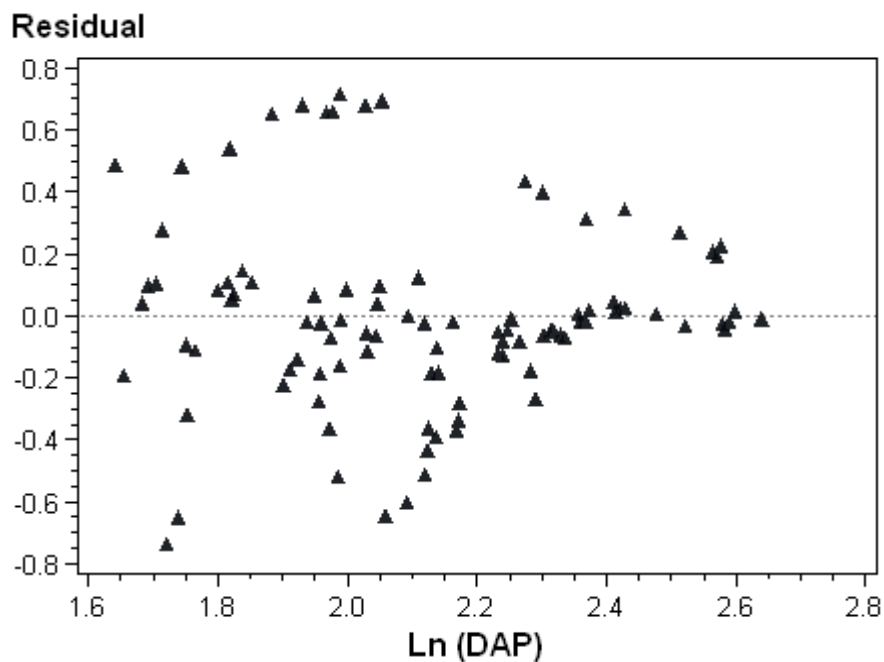


Figura 37 – Distribuição dos resíduos de volume de *Pinus taeda*

4.10 Fator de expansão do volume sem casca para com casca

Devido à determinação de equações de volume sem casca, com dados oriundos da análise de tronco, foi determinado um fator de casca para a expansão do volume sem casca para com casca. Para isso, foi modelada uma equação de fator de expansão de volume com casca (FE), definido pela razão do volume com casca pelo volume sem casca das árvores cubadas, em função do diâmetro (d), tendo resultado na seguinte equação:

$$FE = e^{\{0,09992 + 1,26347 \cdot (1/d)\}}$$

Esse modelo apresentou um bom ajuste, com coeficiente de determinação igual a 0,78 e baixo erro padrão da estimativa, igual a 0,0803. A Figura 38 mostra a tendência do fator de expansão de volume com casca, indicando uma tendência hiperbólica, em que o fator de expansão de volume com casca é maior nas menores árvores do que nas maiores, ou seja, a percentagem de casca tende a diminuir com o aumento do diâmetro das árvores.

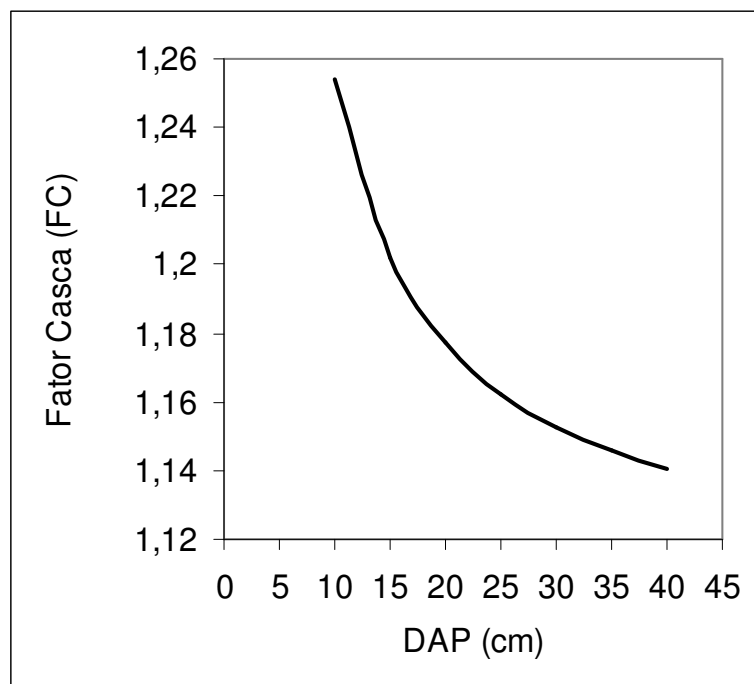


Figura 38 – Tendência do fator expansão do volume sem casca para com casca em relação ao diâmetro.

Então, para se obter o volume com casca, é necessário estimar o volume sem casca na equação selecionada e multiplicar pelo fator de expansão de volume, determinado na equação acima.

4.11 Crescimento em altura em função do diâmetro

Para o estudo da relação hipsométrica da altura em função do diâmetro de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, foram testadas as equações descritas na Tabela 3 e analisados os seus resultados estatísticos, que se encontram discriminados na Tabela 34.

Tabela 34 – Parâmetros estatísticos das equações testadas para ajustar o crescimento em altura em função do diâmetro de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*.

Eq.	Coeficientes				$R^2_{Aj.}$	S_{yx}	IF	CV%	F
	b_0	b_1	b_2	b_3					
Espécie: <i>Pinus elliottii</i>									
1	2,3503	1,4907	-0,0147	-	0,7598	3,5861	5,7665	23,75	225,0
2	1,5638	0,5633	-	-	0,8399	0,2753	3,7836	10,87	703,8
3	2,7013	-0,2972	-	-	0,4710	0,5067	6,9638	19,75	120,2
4	16,4165	-2,3289	-	-	0,2415	6,5097	10,4676	46,12	43,6
5	3,3294	1,2128	-0,0870	-	0,7498	3,6393	4,9951	23,62	197,2
6	8,3979	-0,9357	0,0587	-	0,7647	4,0262	5,5261	26,10	150,0
7	2,3679	1,4849	-0,0095	-0,0145	0,7686	3,5797	4,9133	23,84	148,9
Espécie: <i>Pinus taeda</i>									
1	0,5411	2,4127	-0,0515	-	0,7065	3,6063	17,7188	25,75	191,0
2	1,2532	0,7076	-	-	0,7802	0,3107	3,9401	14,82	385,7
3	2,6214	-0,4446	-	-	0,3566	0,5724	6,8820	13,32	75,8
4	15,2666	-3,1340	-	-	0,1822	6,3004	10,2159	44,74	31,0
5	3,3517	1,2116	-0,1550	-	0,7179	3,813	5,2335	26,95	222,6
6	8,7071	-1,8488	0,1025	-	0,6187	4,4510	6,1092	26,84	107,2
7	-0,3032	2,6195	0,3086	-0,0633	0,7096	3,6242	4,9744	25,72	122,4

Sendo: $R^2_{Aj.}$ = coeficiente de determinação ajustado; S_{yx} = erro padrão da estimativa; IF = Índice de Furnival absoluto; CV% = coeficiente de variação em %; F = valor de F da análise de variância; e b_0 , b_1 , b_2 , b_3 = coeficientes.

As equações de relação hipsométrica testadas apresentaram valores de coeficiente de determinação ajustado bastante variados, entre 0,1822 e 0,8399, e coeficiente de variação entre 10,87 e 46,12%.

Dentre as equações, a de maior destaque é a de número 2, representada por uma função do logarítmico da altura pelo logarítmico do diâmetro, que apresentou, para *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, o maior coeficiente de determinação, igual a 0,8399 e 0,7802, erro padrão da estimativa de 0,2753 e 0,3107 e coeficiente de variação de 10,87 e 14,82%, respectivamente.

A determinação da melhor equação para descrever o crescimento em altura em função do diâmetro foi feita de acordo com os parâmetros estatísticos apresentados na Tabela 34, como o maior coeficiente de determinação ajustado, menor erro padrão da estimativa, menor coeficiente de variação e valor de F mais significativo. Esse critério não deixa dúvidas quanto à melhor equação, destacando-se o modelo logarítmico, expresso pelo modelo 2, pois apresentaram ótimos resultados para os parâmetros estatísticos.

Para auxiliar a definição do melhor modelo, determinou-se o Valor dos Escores estatísticos, que seleciona a melhor equação para descrever o crescimento em altura em função do diâmetro, conforme a Tabela 35.

O Valor dos Escores estatísticos das equações testadas levou em consideração todas as variáveis estatísticas anteriormente descritas, atribuindo-se valores e pesos às estatísticas calculadas. Dentre essas equações, o modelo logarítmico (equação 2) foi confirmado, pois apresentou menor valor, igual a 11 e 10, para *Pinus elliotii* e *Pinus taeda*, respectivamente. Também, ambas as espécies apresentaram uma boa distribuição dos valores residuais, como mostram as Figuras 39 e 40.

Tabela 35 – Valor dos escores dos parâmetros estatísticos das equações testadas.

Equação	Escore dos parâmetros estatísticos					Valor dos escores
	$R^2_{Aj.}$	S_{yx}	IF	CV%	F	
Espécie: Pinus elliottii						
1	5	2	5	2	2	16
2	1	4	1	4	1	11
3	6	7	6	6	6	31
4	7	6	7	7	7	33
5	4	3	3	1	3	14
6	3	5	4	5	4	21
7	2	1	2	3	5	13
Espécie: Pinus taeda						
1	4	1	7	2	2	16
2	1	4	1	3	1	10
3	6	7	5	7	7	32
4	7	6	6	6	6	31
5	2	3	3	5	2	15
6	5	5	4	4	5	23
7	3	2	2	1	4	12

Sendo: $R^2_{Aj.}$ = coeficiente de determinação ajustado; S_{yx} = erro padrão da estimativa; IF = Índice de Furnival absoluto; CV% = coeficiente de variação em %; e F = valor de F da análise de variância.

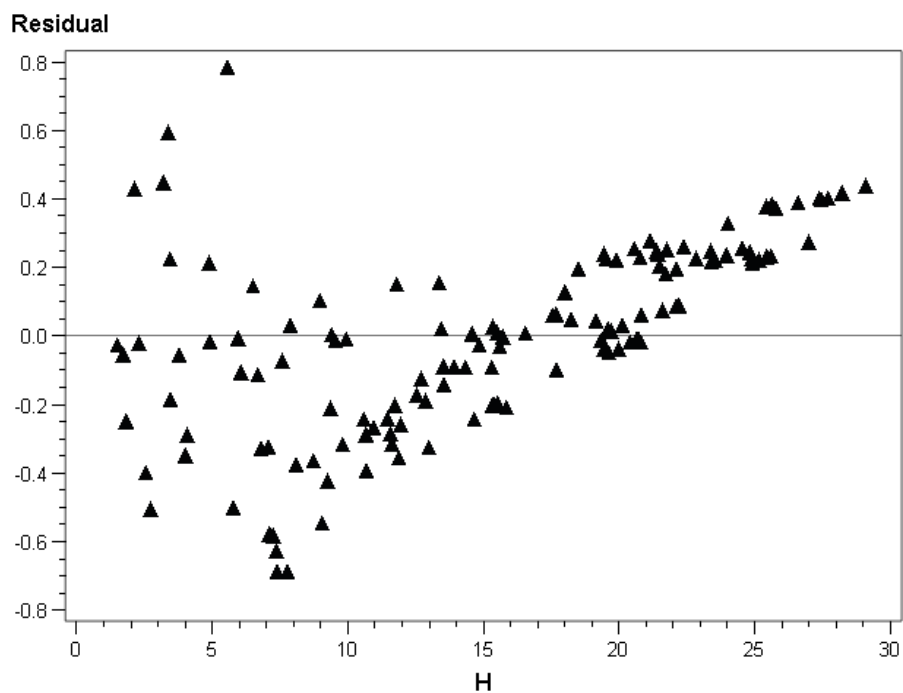


Figura 39 – Distribuição dos resíduos de altura em relação à altura observada para *Pinus elliottii*.

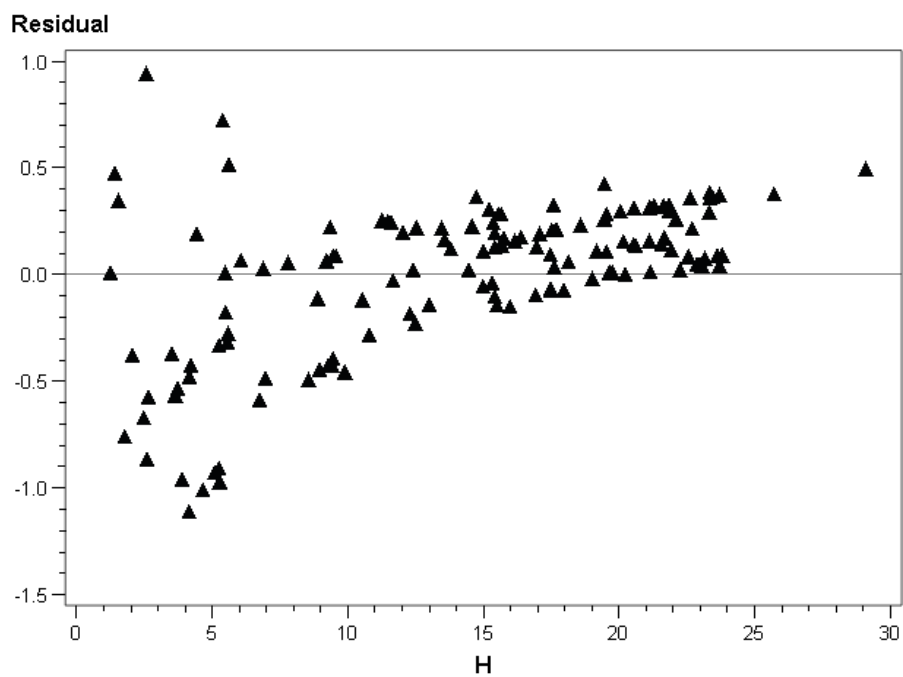


Figura 40 – Distribuição dos resíduos de altura em relação à altura observada para *Pinus taeda*.

4.12 Comparação do crescimento em altura do *Pinus elliottii* da área em estudo com o de outras regiões do Rio Grande do Sul

Para se ter uma idéia do crescimento médio, em altura dominante, do *Pinus elliottii* reflorestado em solos arenizados e degradado pela ação antrópica na Fronteira Oeste, foi tomado, como referência, o crescimento médio da mesma espécie na região do Planalto Médio (SCHNEIDER, 1984) e em Encruzilhada do Sul (TONINI, 2000), no estado Rio Grande do Sul.

Para cada uma dessas três regiões estudadas, foram geradas as alturas dominantes por idade, relacionadas na Figura 41.

Como era esperado, o crescimento em altura dominante do *Pinus elliottii*, por idade, na Fronteira Oeste, é significativamente menor do que o observado nas outras duas regiões, de Encruzilhada do Sul e do Planalto Médio. Porém, o ritmo do crescimento da altura dominante no tempo assemelha-se ao da região de Encruzilhada do Sul, mas em nível de grandeza ligeiramente inferior.

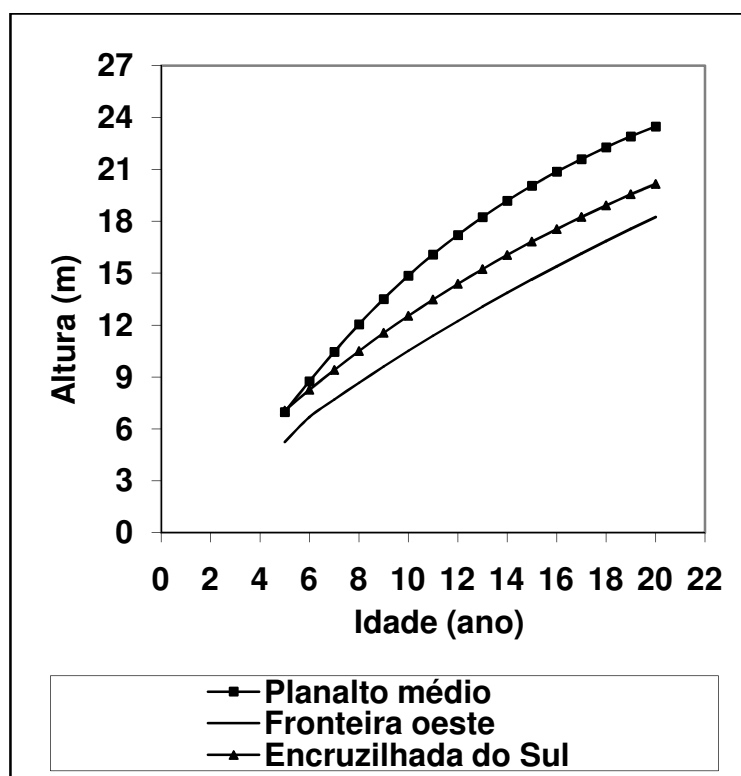


Figura 41 – Comparação do crescimento em altura dominante do *Pinus elliottii* em três regiões do estado do Rio Grande do Sul.

Embora o crescimento em altura dominante seja menor do que o potencial de outras regiões do estado, como já demonstrado anteriormente, ele pode ser considerado, ainda, muito promissor, considerando as condições de baixa fertilidade dos solos arenizados, degradados e erodidos da região abordada neste estudo. Além disso, pode-se considerar que os plantios de *Pinus elliottii* têm demonstrado um grande potencial de recuperação da fertilidade desses solos arenizados pobres. Ao mesmo tempo, podem servir aos produtores como uma importante alternativa e um estímulo ao desenvolvimento econômico e social dessa região empobrecida do estado.

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo, realizado com dados de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, permitiram concluir que:

a) o incremento corrente anual em diâmetro não apresentou correlação significativa em função da precipitação e temperatura média anuais, devido à grande variação destas grandezas e à não ocorrência de déficit hídrico;

b) alguns elementos químicos do solo apresentaram correlação positiva, e outros, negativa quando relacionados com o incremento periódico anual em diâmetro, indicando que o teor disponível no solo pode ser mais ou menos importante para o crescimento da espécie, podendo se tornar limitantes ou até tóxicos;

c) o *Pinus elliottii* apresentou uma grande capacidade de resiliência do solo degradado pela ação antrópica, promovendo, após 29 anos de observação de um reflorestamento realizado em área arenizada, um aumento significativo dos teores médios de quase todos os elementos químicos e da quantidade de matéria orgânica do solo;

d) após a introdução do *Pinus elliottii* nas áreas arenizadas, houve um aumento dos teores dos elementos químicos do solo – pH, matéria orgânica, cálcio, magnésio, enxofre, fósforo, potássio, zinco e manganês –, indicando que a espécie possui uma grande capacidade para promover a resiliência dos solos arenizados e degradados pela ação antrópica;

e) depois de 29 anos do reflorestamento, os elementos químicos do solo, como pH e alumínio, tiveram uma redução, tendo o pH passado de 4,8 para 4,5, e o alumínio, de 0,45 para 0,4 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$. Por outro lado, cobre e boro mantiveram-se com o mesmo teor, de 0,8 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ e 0,2 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$, respectivamente; o teor médio de matéria orgânica, nos solos com reflorestamento com o *Pinus elliottii*, foi igual a 1,0%, enquanto que, nos solos não reflorestados que serviram de testemunhas, permaneceu numa média de 0,25%;

f) as equações de crescimento testadas para ajustar o crescimento em diâmetro, altura e volume em função da idade, nas duas localidades estudadas,

apresentaram um excelente ajuste e uma elevada precisão estatística, permitindo estimar estas variáveis como uma função do tempo;

g) o crescimento em diâmetro do *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, quando comparados, apresentou tendência diferente de desenvolvimento no tempo;

h) o uso de variáveis dummy no modelo de crescimento de Backmann permitiu definir uma equação única para estimar o diâmetro, a altura e o volume em função da idade para ambas as espécies (*Pinus elliottii*: dummy = 0 e *Pinus taeda*: dummy = 1), como uma variável que possibilita estratificar o crescimento da espécie;

i) para a classificação de sítios de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, foi fixada uma idade de referência, 20 anos, tendo sido definidas 6 curvas de índices de sítio, com intervalo de 2 metros nesta idade de referência, o que permitiu abranger toda a dispersão dos dados de alturas dominante por idade observadas.

6 RECOMENDAÇÕES

Considerando os resultados obtidos neste trabalho e as perspectivas futuras para essas áreas arenizadas do Rio Grande do Sul, prescrevem-se as seguintes recomendações gerais:

Desenvolver de um programa para as áreas arenizadas e degradadas na fronteira oeste do Rio Grande do Sul;

Estabelecer de um programa com políticas públicas de financiamento compatível, que promovam uma adicional motivação para o desenvolvimento florestal dessa região de áreas degradadas;

Identificação e mapeamento das áreas degradadas e em processo de degradação na fronteira oeste do estado do Rio Grande do Sul;

Estratégias para reflorestamento e recuperação de áreas degradadas e com déficit nutricional;

Estratégias de restauração ambiental aliadas à oferta de serviços ecológicos e à produção de madeira e biomassa em áreas impróprias para a agricultura;

Valoração dos serviços ambientais de florestas plantadas em áreas impróprias para a produção agrícola;

Análise e estudos de cenários de degradação e da vegetação dos ecossistemas arenizados na fronteira oeste do estado do Rio Grande do Sul e potencial para reflorestamento e reconversão ecológica do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AB'SABER, A. N. A revanche dos ventos: destruição de solos areníticos e formação de areais na Campanha Gaúcha. **Ciência e Ambiente**, Santa Maria, v. 11, p. 7-31, 1995.

ALDER, D. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento. 2.v. Roma, FAO, 1980. 80 p.

ALEIXO DA SILVA, J. A.; BAILEY, R. L. **Considerações teóricas sobre o uso correto do Índice de Furnival na seleção de equações volumétricas**. 1991.p. 323-327.

AMADO, T. J. C. Estratégias de recuperação de áreas arenizadas na fronteira sudoeste do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 28., 2001, Londrina. **Anais...** Brasília: 2001. p. 244.

AMES, R. N. et al. Nitrogen sources and a values for vesicular-arbuscular and non-mycorrhizal sorghum grown at three rates of N-amonium sulphate. **The New Phytologist**, Colorado, v. 97, n. 2, p. 269-276, 1984.

ANDRAE, F. H. **Ecologia florestal**. Santa Maria: Ed. da UFSM, 1978. 230p.

ANDRAE, F. H. Relatório de viagem aos desertos de Alegrete e de São Francisco de Assis. In: OS DESERTOS DO RIO GRANDE DO SUL E A OPINIÃO DA UFSM. **Revista Quero-Quero**, Santa Maria: UFSM, 1973. p. 35-37.

ASSAD, M. L. L. Fauna do solo. In: VARGAS, M.A.T.; HUNGRIA, M. **Biologiadados solos dos cerrados**. Planaltina: EMBRAPA, 1997. p. 363-443.

ASSMANN, E. **The principle of forest yield study**. Oxford: Pergamon Press, 1970. 506 p.

AVÉ-LALLEMANT, R. **Viagem pela província do Rio Grande do Sul (1858)**. São Paulo: Itatiaia/USP, 1980.

AZEVEDO, A. C. de; KAMINSKI, J. Considerações sobre os solos dos campos de areia do no Rio Grande do Sul. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v. 1, n. 1, p. 65-70, 1995.

- BAKER, F. S. **Principles of silviculture**. New York: McGraw Hill, 1950. 414 p.
- BARKER, A. V.; MILLS, H. A. Ammonium and nitrate nutrition of horticultural crops. **Horticultural Review**, Westreport, v. 2, p. 395-423, 1980.
- BARROS, N. F., NOVAIS, R. F. Relação solo-eucalipto. **Folha de Viçosa**, Viçosa, p. 127-181, 1990.
- BELLEI, M.; CARVALHO, M. S. Ectomicorrizas. In: CARDOSO, E. J. B. N.; TSAI, S. M.; NEVES, M. C. P. **Microbilobias do solo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1992. p. 297-318.
- BELLINGER, P. F. Studies of soil fauna with special reference to the collembola. **Bulletin Connecticut Agricultural Experiment Station**, Connecticut, n. 583, p. 1-67, 1954.
- BEZLYUDNYI, N. N.; BELENKEVICH, O. A. Dependence of nitrogen metabolism on conditions of phosphorus nutrition and the form of nitrogen fertilization in winter rye plants. **Soviet plant physiology**, Russian, v. 17, p. 827-831, 1970.
- BINKLEY, D. et al. Explaining growth of individual trees: light interception and efficiency of light use by *Eucalyptus* at four sites in Brazil. **Forest Ecology Management**, Amsterdam, v. 259, n. 9, p. 1704-1713, apr. 2010.
- BRAGA, F. A. **Uso da análise discriminante na identificação de características ambientais determinantes da capacidade produtiva de povoamentos de eucalipto**. 1997. 64f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal)—Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1997.
- BRITTO, F. P.; BARLETTA, R.; MENDONÇA, M. Variabilidade espacial e temporal da precipitação pluvial no Rio Grande do Sul: influência do fenômeno El Niño Oscilação Sul. **Revista Brasileira de Climatologia**, São Paulo, v. 3/4, p. 37-48, 2008.
- CASTILHOS, Z. M. S. et al. Sistema silvipastoril com acácia negra (*Acacia mearnsii*): desempenho dos componentes arbóreo e animal. In: CONGRESSO FLORESTAL ESTADUAL DO RIO GRANDE DO SUL, 9., 2003. **Anais...** Nova Prata: Secretaria da Agricultura do Estado do Rio Grande do Sul, 2003. 1 CD-ROM.
- CELLINI, J. M. et al. Modelos de perfil de tronco en *Nothofagus pumilio* (Polpp. et Endl.) Krasser y su utilización en el cálculo del volumen total. **Invest. Agr.: Sist. Recr. For.**, Madrid, v. 11, n. 2, p. 245-261, 2002.

CHAVES, L. F. C. et al. Crescimento de mudas de Jacarandá-da-Bahia (*Dalbergia nigra* (Vell) Fr. Allem.) em resposta à inoculação com fungos micorrízicos arbusculares em diferentes níveis de fósforo no solo. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 19, n. 1, p. 32-49, 1995.

COELHO, M. C. B.; FINGER, C. A. G. Crescimento em altura para *Pinus elliottii* Engelm. originado por diferentes métodos de regeneração em Canela, RS. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 7, n. 1, p. 139-155, 1997.

COELHO, P. A. Descrição preliminar de *Munida brasiliaen* sp. do Norte e Nordeste do Brasil (Crustacea: Decapoda: Galatheidae). **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 25, n. 6, p. 344-344, 1973.

COREY, R. B. Factores affecting the availability of nutrients to plants. In: WALSH, L. M.; BEATON, J. D. **Soil testing and plant analysis**. Madison: Soil Science, 1973. p. 23-34.

CRUZ, J. L.; PELACANI, C. R.; ARAÚJO, W. L. Efeito do nitrato e amônio sobre o crescimento e eficiência de utilização do nitrogênio em mandioca. **Bragantia**, Campinas, v. 65, n. 3, p. 467-475, 2006.

CUNHA, G. R.; BERGAMASCHI, H. Efeitos da disponibilidade hídrica sobre o rendimento das culturas. In: BERGAMASCHI, H. (Coord.). **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: Ed. da Universidade/UFRGS, 1992. p. 85-97.

DANIEL, T. W.; HELMS, J. A.; BAKER, F. **Principles of silviculture**. New York: Mc Graw-Hill, 1979. 500 p.

DAVIS, K. P. **Forest management, regulation and evaluation**. New York: McGraw Hill, 1966. 519 p.

EMATER/UFRGS. Classificação dos solos do estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: 2001. s.p.

FEE. **O Rio Grande do Sul e sua população**. Porto Alegre: FEE. doc. n. 51, 2005.

FERNANDES, B. et al. Efeito de três sistemas de preparo do solo na densidade aparente, na porosidade total e na distribuição dos poros, em dois solos (Typic Argiaquoll e Typic Hapludalf). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 7, n. 3, p. 329-333, 1983.

FONTES, M. P. F. et al. Disponibilidade do enxofre em três extratores químicos em Latossolo de Minas Gerais. **Revista Brasileira da Ciência do Solo**, Campinas, v. 6, p. 125-130, 1982.

FREITAS, C. A.; GOULART, D. D.; ALVES, F. D. **O processo de arenização no sudoeste do Rio Grande do Sul**: uma alternativa para o seu desenvolvimento sócio-econômico. Disponível em:<<http://www.fee.tche.br/eeg/artigos>>. Acesso em: 15 jul. 2003.

FREUND, R. J.; LITTELL, R. C. **SAS for Linear Models**: A guide to the ANOVA and GLM Procedures. Cary, NC: SAS Institute Inc., 1981.

FURLANI, P. R.; FURLANI, A. M. C. Tolerância a alumínio e eficiência a fósforo em milho e arroz: características independentes. **Bragantia**, Campinas, v. 50, n. 2, p. 331-340, 1991.

FURNIVAL, G. M. An index for comparing equations used in constructing volume tables. **Forest Science**, Bethesda, v. 7, n. 4, p. 337-441, 1961.

GATTO, A. **Manejo do solo em áreas de reforma de floresta de eucalipto e seus reflexos na produtividade**. 2000. 62 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)—Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2000.

GILMAN, E. F.; WATSON, D. G. ***Pinus elliottii***: Fact Sheet ST-463. [Gainesville]: United States Forest Service-Environmental Horticulture Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, Oct. 1994. 4 p.

GOMES, A. M. B.; CARVALHO, C. S.; BARBOSA, V. R. D. **Estudo de geomorfologia de Alegrete - RS**. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 1980.

GONÇALVES, J. L. M. **Interações genótipo-ambiente e relação entre a produtividade de sítios florestais de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* com as propriedades de alguns solos de textura arenosa e média no estado de São Paulo**. 1990. 135f. Tese (Doutorado ESALQ-USP)—Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.

HANNAH, A. Y.; HARLAN, P. W.; LEWIS, D. T. Soil available water as influenced by landscape position and aspect. **Agronomy Journal**, Wisconsin, v.74, p.999-1004, 1982.

HESS, A. F. **Inter-relações no crescimento de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze em diferentes locais do Rio Grande do Sul.** 2006. 177f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

HILEY, W. E. **Conifers:** South African methods of cultivation. London: Faber and Faber, 1959. 123p.

IBGE. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapas temáticos.** Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2005. Disponível em: <ftp://ftp.ibge.gov.br/Cartas_e_Mapas/Mapas_Temáticos/>. Acesso em: 30 abr. 2009.

IMAÑA-ENCINAS, J.; SILVA, G. F.; PINTO, J. R. R. **Idade e crescimento das árvores.** Brasília: UB, Departamento de Engenharia Florestal, 2005. 43 p. (Comunicações Técnicas Florestais, 7)

ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Elsevier, v. 74, n. 1, p. 9-16, jun. 2000.

KAENNEL, M.; SCHWEINGRUBER, F. H. **Multilingual glossary of dendrochronology:** terms and definitions in English, German, French, Spanish, Italian, Portuguese and Russian. Bern; Stuttgart; Vienna: Haupt, 1995.

KALBASI, M.; RACZ, G. J.; LOEWEN-RUDGERS, L. A. Mechanism of zinc adsorption by iron and aluminium oxides. **Soil Science**, Baltimore, v. 125, p. 146-150, 1978.

KIVISTE, A. et al. **Funciones de crecimiento de aplicación en el ámbito forestal.** Madrid: Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria, 2002. 190p.

KLAMT, E. Solos arenosos da região da campanha do Rio Grande do Sul. In: **Solos altamente suscetíveis à erosão.** Jaboticabal: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1994. p. 19-37.

KLAMT, E.; SCHNEIDER, P. Solos suscetíveis à erosão eólica e hídrica na região da Campanha do Rio Grande do Sul. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria. v. 11, p. 71-80, 1995.

KRAMER, P. J.; KOZLOWSKI, T. **Fisiologia das árvores**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1972. 745 p.

KRONKA, F. J. N. et al. **Inventário florestal da vegetação natural do estado de São Paulo**. São Paulo: Imprensa Oficial, 2005. 200 p.

LAL, R. No-tillage effects on soil properties and maize (*Zea mays* L.) production in Western Nigeria. **Plant and Soil**, Amsterdam, v. 40, p. 321-331, 1974.

LANDSBERG, J. J. **Physiological ecology of forest production**. London: Academic, 1986. 198p.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: RIMA, 2006. 531p.

LEMOS, R. C. et al. **Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Rio Grande do Sul**. Recife: Ministério da Agricultura, Departamento de Pesquisas Agropecuárias, Divisão de Pesquisas Pedológicas, 1973. 431p. (Boletim Técnico, 30)

LENZI, F. F. S. E.; COSTA, A. C. S. Utilização de modelos físico-químicos de adsorção no estudo do comportamento do cobre em solos argilosos. **Química Nova**, São Paulo, v. 24, n. 3, p. 324-330, 2001.

LINDSAY, W. L. Inorganic phase equilibria of micronutrients in soils. In: MORTVEDT, J. J.; GIORDANO, P. M.; LINDSAY, W. L. (Ed.). **Micronutrients in agriculture**. Madison: Soil Science Society of America, 1972. p. 41-57.

LOETSCH, F.; ZORHER, F.; HALLER, K. E. **Forest inventory**. 2.v. Berlim: BLV, 1973.

LOLA DA COSTA, A. C. et al. Effect of 7 yr of experimental drought on vegetation dynamics and biomass storage of an eastern Amazonian rainforest. **New Phytologist**, New Phytologist Trust, n. 187, p. 579-591, 2010.

LU, D., MORAN, E.; MAUSEL, P. Linking amazonian secondary succession forest growth to soil properties. **Land Degradation & Development**, John Wiley & Sons. n. 13, p. 331-343, 2002.

MALHI, Y. et al. The above-ground coarse wood productivity of 104 neotropical forest plots. **Global Change Biology**, n. 10, p. 563-591. 2004.

MARCHIORI, J. **Fitogeografia do Rio grande do Sul**: campos sulinos. Santa Maria: Ed. da UFSM, 2004.

MARCHIORI, J. N. C. Areais do sudoeste do Rio Grande do Sul: elementos para uma história natural. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, n. 5, p. 65-89, jul./dez. 1992.

MARCHIORI, J. N. C. Vegetação e areais no sudoeste rio-grandense. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, n. 11, p. 81-92, jul./dez. 1995.

MARSCHNER, H. Functions of mineral nutrients: macronutrients. In: MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2 ed. London: Academic Press, 1995. p. 231-255.

MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. **Principles of Plant Nutrition**. 3 ed. Bern, Switzerland: International Potash Institute, 1982. 655p.

MILANI, E. **Crescimento de *Podocarpus lambertii* Kotsch ex Endl. em duas regiões fitogeográficas no estado do Rio Grande do Sul**. 2010, 161f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

MOLLER, O. O. et al. **Diagnóstico sobre a presença de manchas de areias na região sudoeste do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Sudesul, 1975.

MONTAGNA, R. G.; YAMAZOC, G. Utilização da madeira de pequenas dimensões. **Silvicultura**, São Paulo, v. 2, n. 14, p. 178-179, 1978.

MOSSOR-PIETRASZEWSKA, T. Effect of aluminium on plant growth and metabolism. **Acta Biochimica Polonica**, Warszawa, v. 48, p. 673-686, 2001.

MULLETTE, K. J.; NOLA, J. H.; ELLIOTT, A. G. L. Insoluble phosphorus usage by *Eucalyptus*. Short communication. **Plant and Soil**, New York, v. 41, p. 199-205, 1974.

MURPHY, P. G.; LUGO, A. E. Ecology of tropical dry forest. **Annual Review of Ecology and Systematics**, Canadá, n. 17, p. 67-88, 1986.

NATH, D. C. et al. Patterns of tree growth in relation to environmental variability in the tropical dry deciduous forest at Mudumalai, southern India. **Journal of Biosciences**, Bangalore, n. 31, p. 651-669, 2006.

NAVES-BARBIERO, C. C. et al. Fluxo de seiva e condutância estomática de duas espécies lenhosas sempre-verdes no campo sujo e cerrado. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Brasília, v. 12, n. 2, p. 119-134, 2000.

NIMER, E. Clima. In: **Geografia do Brasil: Região Sul**. Rio de Janeiro: IBGE, 1990. p. 151-187.

NOBEL, P. S. **Introduction to biophysical plant physiology**. San Francisco: W. H. Freeman, 1974. 488 p.

OLIVER, C. D.; LARSON, B. C. **Forest stand dynamics**. New York: John Wiley & Sons, 1996. 517p.

PEREIRA, L. D. **Dendroecologia de *Cedrela fissilis* (Vell.) na região de Santa Maria, RS**. 2011. 63f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)– Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

PEZZUTTI, R. V. et al. Crescimento e rentabilidade de plantios de *Pinus taeda* L. na margem do rio Uruguay, Argentina. In: SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO SOBRE MANEJO FLORESTAL, 4., 2008, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: UFSM, 2008. p. 480.

PILLAR, V. D. et al. **Estado atual e desafios para a conservação dos campos**. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 2006.

PRIMAVESI, A. **Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais**. São Paulo: Nobel, 2002. 549 p.

PRITCHETT, W. L. **Properties and management of forest soils**. New York: John Wiley, 1979. 500 p.

PRODAN, M.; PETERS, R.; COX, F. **Mensura Forestal**. 1.v. San José: IICA/ Investigacion y educacion en desarrollo sostenible, 1997. 586 p.

RAUBER, R. C. **Dendroecologia de *Cedrela fissilis* Vell. em um ecótono de florestas subtropicais montanas no Brasil**. 2010. 80f. Dissertação (Mestrado em Ecologia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

REEVES, D. W. Soil management under no-tillage: soil physical aspects. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DO SISTEMA PLANTIO DIRETO, 1., 1995, Passo Fundo. **Resumos...** Passo Fundo: Embrapa-CNPT, 1995. p. 123-130.

REINERT, D. J. et al. Qualidade de solos originados de areias quartzosas da fronteira sudoeste do RS: indicadores físicos. In: REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO – MANEJO SUSTENTAVEL DO SOLO, 2., 1998, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: SBCS, 1998. p. 34-37.

REINSTORF, L. O. **The influence of stand density on growth of *Pinus elliottii***. 1970. 62 f. Dissertação (Mestrado)–University of Stellenbosch, Stellenbosch, 1970.

REISSMANN, C. B.; WISNEWSKI, C. Aspectos nutricionais de plantios de Pinus. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2005. p. 135-166.

RHEINHEIMER, D. S. et al. Aplicação superficial de calcário no sistema plantio direto consolidado em solo arenoso. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 2, p. 263-268, 2000.

RIBASKI, J. et al. **Sistemas silvipastoris como estratégia de desenvolvimento sustentável para regiões com solos suscetíveis à erosão**: um estudo de caso na mesorregião da metade sul do estado do Rio Grande do Sul. Curitiba: EMBRAPA-CNPQ, 2005. (EMBRAPA-CNPQ. Comunicado Técnico, n. 150).

RICHARDS, F. J. A flexible growth functions for empirical use. **Jor. Agr. Pres, USDA**, v. 46, n. 7, p. 62-638, 1959.

RIO GRANDE DO SUL. Governo do Estado. Secretaria do Meio Ambiente. **Inventário florestal contínuo do Rio Grande do Sul**. Santa Maria: UFSM/SEMA-RS, 2001. Disponível em: <<http://coralx.ufsm.br/ifcrs>>. Acesso em: 29 jul. 2005.

ROVEDDER, A. P. M.; ELTZ, F. L. F. Desenvolvimento do *Pinus elliottii* e do *Eucalyptus tereticornis* consorciado com plantas de cobertura em solos degradados por arenização. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 1, jan./fev. 2008.

ROVEDDER, A. P. **Revegetação com culturas de cobertura e espécies florestais para a contenção do processo de arenização em solos areníticos no sudoeste do Rio Grande do Sul**. 2003. 120f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) –Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2003.

ROVEDDER, A. P. et al. Análise da composição florística do campo nativo afetado pelo fenômeno da arenização no sudoeste do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 11, n. 4, p. 501-503, out./dez. 2005.

RUSSO, S. E. et al. Soil-related performance variation and distributions of tree species in a Bornean rain forest. **Journal of Ecology**, London, n. 93, p. 879-889, 2005.

SAADI, A. Os sertões que viram desertos. **Boletim Informativo Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.1, p.10-17, 2000.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J. Relações entre sistemas de preparo, temperatura e umidade de um podzólico vermelho-escuro de eldorado do Sul (RS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 19, n. 2, p. 313-319, 1995.

SAS. A simple regression model with correction of heteroscedasticity. Cary: SAS Institute, 2004.

SATTLER, R. A. et al. Caracterização física e química de um argissolo sob campo nativo no estado do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SOLOS. 2002, Cuiabá. **Anais eletrônicos**...Disponível em: <http://w3.ufsm.br/ppgcs/congressos/XIV_Reuni%e3o_Brasileira_Cuiab%e1/48.pdf>.

SCHNEIDER, P. R. Betriebswirtschaftliche **und ertragskundliche grundlagen der forsteinrichtung in sudbrasilien am beispiel von *Pinus elliottii***. 1984. 190f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade de Freiburg, Freiburg, 1984.

SCHNEIDER, P. R.; BRENA, D. A.; FINGER, C. A. G. **Manual para coleta de informações dendrométricas**. Santa Maria: UFSM/CEPER/FATEC, 1988. 28p.

SCHNEIDER, P. R.; SCHNEIDER, P. S. P. **Introdução ao manejo florestal**. Santa Maria: Ed. da FACOS, 2008. 566 p.

SCHONAU, A. P. G. Problems in using vegetation or soil classification in determining site quality. **South African Forestry Journal**, Pretoria, n.141, p.13-18, 1987.

SCHULTZ, R. P. **Loblolly pine**: the ecology and culture of Loblolly pine (*Pinus taeda* L.). New Orleans: USDA, Forest Service, Southern Experiment Station, 1997. 493p.

SCHWEINGRUBER, F. H. **Tree rings and environment dendroecology**. Viena: Haupt, 1996. 609p.

SIDIRAS, N.; DERPSCH, R.; MONDARDO, A. Influência de diferentes sistemas de preparo do solo na variação da umidade e rendimento da soja, em latossolo roxo distrófico (Oxisol). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.7, p.103-106, 1983.

SILVA, R. F.; ANTONIOLLI, Z. I.; ANDREAZZA, R. Produção de mudas de *Pinus elliottii* Engelm. micorrizadas em solo arenoso. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.13, n. 2, p. 57-65, 2005.

SIMÕES, J. W. Efeitos da omissão de nutrientes na alimentação mineral do pinheiro do Paraná, *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze, cultivado em vaso. 1972. 102f. Tese (Doutorado em Agronomia)–Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 1972.

SMITH, D. J.; WOODS. M. E. **Red pine and white pine density management diagrams for Ontario**. Ontario: Ministry of Natural Resources Southcentral Sciences Division, Sault Ste. Marie, 1997. 31p. (Tech. Rep., 48)

SOLLINS, P. Factors influencing species composition in tropical lowlandrain forest: does soil matter. **Ecology**, n. 79, p. 23-30, 1998.

SOUSA, D. M. G. de; MIRANDA, L. N. de; OLIVEIRA, S. A. de. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 205-274.

SOUTO, J. J. P. **Deserto, uma ameaça?** Porto Alegre: DRNR/Secretaria da Agricultura, 1984.

SPARKS, D. L. **Chemistry of soil potassium in Atlantic Coastal Plain Soils: a Review**. New York: Communications Soil Science Plant Analysis, 1980. p. 435-449.

SPATHELF, P. et al. Análise dendroecológica de *Ocotea pulchella* Nees et Mart. ex Nees (canela-lageana) na Serra Geral de Santa Maria, RS, Brasil. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.10, n.1, p.95-108, 2000.

SPIECKER, H. **Análise do crescimento florestal**. Curitiba: FUPEF, 1981. 62p. (Série Técnica, n. 8)

SPURR, S. H. **Forest inventory**. New York: Ronald Press Company, 1952. 476p.

SPURR, S. H.; BARNES, B. V. **Forest ecology**. New York: Ronald Press Company, 1980. 517 p.

STEEL, R. G. D.; TORRIE, J. H. **Principles and procedures of statistics**. New York: McGraw, 1960. 481 p.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Efeitos do sistema de preparo na compactação do solo, disponibilidade hídrica e comportamento do feijoeiro. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v. 34, n. 1, p. 83-91, 1999.

SUERTEGARAY, D. M. A. **A trajetória da natureza**: um estudo geomorfológico sobre os areais de Quaraí, RS. 1987. 243f. Tese (Doutorado em Geografia Física)– Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1987.

SUERTEGARAY, D. M. A. **Deserto grande do sul**: controvérsia. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 1998. 130p.

SUERTEGARAY, D. M. A. O Rio Grande do Sul descobre os seus “desertos”. **Revista Ciência & Ambiente**, Santa Maria, n. 11, p. 33-55, jul./dez. 1995.

TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre: Departamento de Solos, UFRGS, 1995. 174 p. (Boletim Técnico, n. 5)

TOLEDO, M. et al. Climate is a stronger driver of tree and forest growth rates than soil and disturbance. **Journal of Ecology**, London, n. 99, p. 254-264, 2011.

TONINI, H. **Crescimento em altura de *Pinus elliottii* Engelm., em três unidades de mapeamento de solo, nas regiões da Serra do Sudeste e Litoral, no estado do Rio Grande do Sul**. 2000. 113f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)–Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2000.

TROVATI, R. **Resposta da densidade dos anéis de crescimento de *Pinus oocarpa* aos fatores climáticos**. 1982. 107f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiros”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1982.

UNCCD. United Nations Convention to Combat Desertification in Countries Experiencing Serious Drought and/or Desertification, Particularly in Africa Document A/AC. 241/27, 12.09.94 with Annexes, United Nations: New York. 1994.

USDA. **Plants database**. 2010. Disponível em: <<http://plants.usda.gov/java/profile?symbol=PIEL>>. Acesso em:

VIEIRA, M. J. Propriedades físicas do solo. In: IAPAR. **Plantio direto no estado do Paraná**. Londrina: 1981. p. 19-32. (IAPAR. Circular, n. 23).

VIEIRA, R. F.; PERES, J. R. Fungos ectomicorrízicos para *Pinus* sp. cultivados em solos sob vegetação de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, São Paulo, n. 14, p. 33-39, 1990.

VITOUSEK, P. M. Litterfall, nutrient cycling, and nutrient limitation in tropical forests. **Ecology**, Washington, n. 65, p. 285-298, 1984.

VITOUSEK, P. M.; DENSLOW, J. S. Differences in extractable phosphorus among soils of the La Selva Biological Station, Costa Rica. **Biotropica**, Queensland, n. 19, p. 167-170, 1987.

VITOUSEK, P. M.; DENSLOW, J. S. Nitrogen and phosphorus availability in treefall gaps of a lowland tropical forest. **Journal of Ecology**, London, n. 74, p. 1167-1178, 1986.

VOGEL, H. L. M. **Quantificação da biomassa e nutrientes em uma floresta estacional decidual em Itaara - RS, Brasil**. 2005. 94f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

WITSCHORECK, R. **Biomassa e nutrientes no corte raso de um povoamento de *Pinus taeda* L. de 17 anos de idade no município de Cambará do Sul – RS**. 2008. 80f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

ZAIA, F. C.; GAMA-RODRIGUEZ, A. C. Ciclagem e balanço de nutrientes em povoamentos de eucalipto na região norte fluminense. **Revista Brasileira de Solo**, Viçosa, v. 28, n. 5, p. 843-852, set./out., 2004.

ANEXO I – Temperatura média mensal e anual de 1980 a 2009. Estação meteorológica de São Borja, RS.

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
1980	25,8	25,6	26,3	23,5	19,8	14,9	14,1	16,7	15,8	20,3	22,1	25,2	20,9
1981	26,1	26,7	24,0	22,2	21,8	14,2	15,3	18,8	17,7	20,6	24,2	25,1	21,4
1982	26,2	25,3	25,0	22,6	19,1	16,4	16,9	18,2	20,1	20,3	21,6	25,0	21,4
1983	26,7	25,3	22,8	20,7	17,9	13,1	13,1	16,3	16,5	21,3	23,0	27,4	20,3
1984	27,5	27,6	24,8	19,8	19,1	14,4	15,7	14,0	17,1	23,2	23,3	24,1	20,9
1985	27,9	26,2	24,6	21,9	18,6	16,6	15,6	16,3	18,3	22,1	26,1	28,1	21,9
1986	28,9	26,3	23,3	21,9	18,4	18,8	16,2	17,9	18,8	20,6	23,2	25,6	21,7
1987	26,3	24,9	24,5	21,5	14,8	14,5	18,1	16,0	16,6	20,7	23,3	24,4	20,5
1988	26,8	24,4	27,0	19,9	14,5	13,4	14,1	17,8	17,5	20,3	23,2	26,9	20,5
1989	26,0	26,4	23,9	20,9	17,7	15,1	13,5	17,0	16,8	20,5	23,1	26,7	20,6
1990	26,7	26,1	25,1	22,2	17,4	13,9	13,3	18,7	16,6	23,0	24,3	24,4	21,0
1991	26,2	25,8	25,5	21,7	19,9	16,7	15,9	18,4	20,7	21,6	22,9	26,2	21,8
1992	25,6	26,4	24,5	21,6	18,5	19,0	13,4	16,8	18,5	20,9	22,0	25,5	21,1
1993	26,4	23,8	24,1	22,4	18,2	16,1	14,1	16,7	17,1	21,8	22,4	24,7	20,6
1994	26,5	24,0	23,0	20,8	20,0	16,3	16,6	16,7	19,5	21,9	22,5	27,6	21,3
1995	26,2	24,3	23,6	20,1	16,4	16,3	19,4	17,2	18,3	19,6	24,3	26,6	21,0
1996	26,4	24,3	23,8	21,8	18,2	13,4	13,3	18,7	17,8	20,7	23,9	25,6	20,7
1997	27,5	25,6	23,5	20,7	18,8	16,3	18,2	18,7	19,6	20,7	23,7	25,6	21,6
1998	25,4	24,9	22,4	19,7	17,7	15,8	16,9	16,1	17,0	21,2	23,2	27,1	20,6
1999	26,9	25,7	24,3	19,8	16,6	15,1	16,9	16,1	17,0	20,4	22,5	26,6	20,7
2000	27,0	26,1	23,9	22,3	17,4	16,7	12,3	17,2	18,5	22,5	22,3	25,2	20,9
2001	26,1	27,5	26,2	23,0	17,2	16,8	17,2	20,5	18,6	21,9	24,2	25,6	22,1
2002	26,8	25,7	26,7	21,8	19,7	15,2	15,0	18,0	17,4	22,0	23,1	25,0	21,4
2003	26,8	25,9	24,2	20,7	18,6	18,8	15,2	15,4	18,9	22,6	23,1	23,5	21,1
2004	27,1	25,1	25,3	23,7	15,9	17,5	15,4	16,8	19,7	20,7	22,4	25,5	21,3
2005	26,8	26,6	25,8	20,6	19,6	19,5	15,8	18,2	15,9	20,1	24,1	25,7	21,5
2006	28,5	25,6	25,4	21,2	16,3	17,1	18,7	17,0	17,5	22,9	22,7	26,6	21,6
2007	26,3	25,7	25,2	22,6	14,5	15,7	12,0	14,2	20,2	22,2	21,4	25,6	20,5
2008	25,9	26,1	24,8	20,7	16,6	13,5	18,0	16,6	16,8	21,1	24,8	26,6	21,0
2009	26,1	27,2	25,3	23,0	19,7	13,8	12,7	17,8	18,0	21,0	26,1	26,2	21,4
Média	26,6	25,7	24,6	21,5	18,0	15,8	15,4	17,2	18,0	21,3	23,3	25,8	21,1

Sendo: Temperatura média em °C.

ANEXO II – Precipitação média mensal e anual de 1980 a 2009. Dados da Estância São João próxima da área de pesquisa, Local São João, Alegrete, RS.

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
1980	25	98	141	93	94	223	110	49	26	389	115	63	1426
1981	146	147	52	59	74	116	141	33	162	40	90	160	1220
1982	49	271	71	32	306	205	222	210	251	220	390	75	2320
1983	173	354	181	173	324	37	223	31	57	106	79	128	1760
1984	264	131	178	285	525	279	150	256	294	151	172	86	2771
1985	145	200	203	240	109	201	200	122	287	128	21	21	1871
1986	397	170	298	324	364	129	56	122	155	202	329	25	2481
1987	100	101	306	275	87	88	380	146	129	83	92	195	1982
1988	239	83	72	103	24	167	19	58	255	112	123	82	1337
1989	194	0	48	272	10	129	77	283	87	137	169	374	1780
1990	149	221	347	595	130	69	84	32	303	339	346	294	2909
1991	100	56	160	530	100	254	117	17	138	125	88	269	1954
1992	142	325	262	617	383	154	196	61	194	296	316	52	2998
1993	304	55	126	110	263	241	199	0	109	363	427	148	2345
1994	33	226	49	127	76	63	162	59	129	133	114	45	1216
1995	158	203	232	66	76	92	227	90	205	102	15	29	1495
1996	291	97	118	242	9	78	22	89	63	150	72	118	1340
1997	115	372	68	152	100	157	73	62	124	439	185	332	2179
1998	277	296	171	457	66	141	204	187	249	81	97	60	2286
1999	121	326	404	89	310	308	73	78	201	263	331	174	2758
2000	201	326	404	89	310	308	73	78	201	263	331	174	2758
2001	306	111	259	361	104	135	137	67	322	104	167	26	2099
2002	125	8	329	349	226	221	268	228	326	667	218	250	3215
2003	104	270	212	276	108	186	115	108	76	362	198	462	2477
2004	67	67	61	78	76	172	54	60	123	238	166	10	1202
2005	156	52	55	283	197	182	57	159	135	223	84	104	1687
2006	131	21	42	170	24	99	116	67	151	190	161	130	1305
2007	141	242	225	125	46	139	59	118	176	233	94	76	1674
2008	100	185	124	107	153	134	233	116	112	225	30	65	2008
2009	32	108	118	17	116	45	54	105	252	128	494	159	1625
Média	159	170	177	223	159	158	136	103	176	216	183	139	2015

Sendo: Precipitação em mm.

ANEXO III – Elementos químicos médios das amostras de solo das árvores amostras

COD	DEG	MO	PH	Ca	Mg	Al	S	P-M	K	Cu	Zn	B	Mn
		%		cmol _c /dm ³			mg/dm ³		cmol _c /dm ³	mg/dm ³			
PA1	1	0,2	4,7	10,9	0,1	0,7	4,7	10,9	0,02	0,6	0,7	2,1	5,1
ZE1	1	2,3	5	1,9	0,6	0,2	18	76	0,31	0,6	3,8	0,1	37,8
ZE2	1	0,8	5,5	1,7	1	0,01	8	6	0,13	1,5	1,4	0,1	16,5
TI22	2	0,2	4,9	0,5	0,1	0,2	6,3	8,4	0,04	0,6	0,3	0,1	5,2
TI21	2	0,4	4,3	0,01	0,1	0,8	8	47,3	0,04	0,3	0,2	0,1	9,6
TI12	1	0,7	3,9	0,2	0,1	1,2	7,8	9,3	0,02	1	0,3	0,1	3,1
TI11	1	0,1	4,9	0,1	0,1	0,4	7	9,3	0,03	0,6	0,2	0,1	8,1
SJ1	1	0,8	4,6	0,5	0,2	0,7	10,6	14,4	0,04	0,5	0,3	0,2	19,7
SJ2	1	1,2	4,4	0,6	0,3	1,1	11,8	51,6	0,09	6,5	1,2	0,2	52,9
MA1	3	0,5	4,9	0,3	0,4	0,3	7	6,8	0,13	1	2,2	0,1	20
RI1	3	1	4,3	0,7	0,3	1	11	13,4	0,16	1,9	1,5	0,1	56,3