Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

Influência dos fatores edafoclimáticos na produtividade e na eficiência do uso dos recursos naturais do *Pinus taeda* L. sob distintos manejos no Sul do Brasil

Juliana Soares Biruel Munhoz

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em Ciências. Programa: Recursos Florestais. Opção em: Silvicultura e Manejo Florestal

Piracicaba
2015

Juliana Soares Biruel Munhoz
Engenheira Florestal

Influência dos fatores edafoclimáticos na produtividade e na eficiência do uso dos recursos naturais do *Pinus taeda* L. sob distintos manejos no Sul do Brasil

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ LUIZ STAPE**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em Ciências. Programa: Recursos Florestais. Opção em: Silvicultura e Manejo Florestal

Piracicaba
2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP

Munhoz, Juliana Soares Biruel
Influência dos fatores edafoclimáticos na produtividade e na eficiência do uso dos recursos naturais do *Pinus taeda* L. sob distintos manejos no Sul do Brasil / Juliana Soares Biruel Munhoz . - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2015.
141 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Pinus 2. Produtividade 3. Eficiência do uso da luz 4. Eficiência do uso do nitrogênio 5. Ecologia da produção 6. Fertilização I. Título

CDD 634.9751
M966i

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

À **Deus**, que cuida de mim a todo instante, que me orientou e me capacitou desde o início até a finalização do meu doutorado.

Ao meu tão amado marido **Wagner**, pela amizade, cumplicidade e por sempre praticar o que está escrito em I Coríntios 13:4-7.

À minha querida filha **Sofia**, por sempre me fazer sorrir e esquecer de todos os problemas quando estou com ela.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. José Luiz Stape, pela oportunidade, confiança e aprendizado ao longo desses anos.

Às amigas Rafaela Lorenzato e Isabel Deliberali pela amizade sincera, por sempre se disporem a me ajudar desde as coletas no campo até serem babás da Sofia.

Aos colegas Clayton Alvares, Otávio Campoe e Eduardo Matos por participarem diretamente no meu aprendizado e por contribuírem na qualidade desta tese.

À secretária do Programa de Pós-Gradução em Recursos Florestais, Giovana Monteiro, pela amizade construída e por sempre estar pronta em ajudar.

Ao Grupo Florestal Monte Olimpo, em especial aos estagiários e ex-estagiários do PPPIB, André Teixeira, Jenifer Miyagawa, Rafael Rodrigues e Guilherme Sinício, pela dedicação e auxílio no campo e no laboratório.

À toda equipe do programa PPPIB, em especial aos engenheiros Rodrigo Coutinho (Arauco do Brasil), Reinaldo Hoinacki e Elias Francio (Juliana Florestal), James Stahl e Bruno Magro (Klabin), Ricardo Paim (Rigesa), Diego Roters e Admir Mora (Renova Floresta) e Felipe Perúcio (Valor Florestal) pelo apoio e oportunidade da realização deste trabalho.

Ao apoio do Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais e de seus funcionários.

À minha querida mãe, Maria Helena, pelas infinitas orações e pelo cuidado comigo e com minha família.

À minha irmã mais nova, Mariana, pelo carinho e por sempre estar perto, mesmo morando longe.

Aos queridos amigos que adquiri durante esta breve caminhada, Matheus e Juliana, Junior e Samira, Oswaldo e Leni, Henrique e Gladys, William e Juliana, João e Lívia, Aninha e Maéli, pelas orações, serviço, amizade e suporte em todo o tempo.

À querida Ilza, por cuidar com tanto amor e carinho da Sofia.

À Capes, pela bolsa de doutorado concedida.

Ao Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, Sistema Meteorológico do Paraná - SIMEPAR e Centro de Informações e Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina – CIRAM pelo fornecimento dos dados meteorológicos.

À todos que participaram direta ou indiretamente deste trabalho, me apoiando, me animando e orando por mim.

Confissões de uma figueira

(Stênio Március)

“Ele veio a mim
Procurando por frutos, veio a mim
Estendeu Sua mão
Percorreu minhas folhas, meus ramos
Nada encontrou
Foi tão triste, mas nada encontrou
Mal podia acreditar
O sol bateu e eu me escondi
A chuva em mim e eu me encolhi
Terra boa nas minhas raízes
Mas eu não frutifiquei
De que me vale tantas folhas
Vistoso verde, inútil e belo
E agora o que é que eu vou dizer
Tive tudo e nada fiz

Ele me falou
Eu retorno na próxima estação
Abandona o egoísmo
Ninguém é o fim de si mesmo
Olha ao teu redor
Tanta gente faminta ao teu redor
Alimenta a multidão
Senhor eu vou me expor ao sol
Às chuvas quero me entregar
Nunca mais assim inutilmente
Ocupar o meu lugar
Eu vou fincar minhas raízes
As águas puras procurar
Quero carregada me encurvar
Com meus frutos Te adorar”

SUMÁRIO

RESUMO....13
ABSTRACT....15
LISTA DE FIGURAS....17
1 INTRODUÇÃO....25
Referências....27
2 RESPOSTA DA PRODUTIVIDADE EM PLANTIOS DE *Pinus taeda* L. À FERTILIZAÇÃO EM UM GRADIENTE EDAFOCLIMÁTICO NO SUL DO BRASIL...31
Resumo....31
Abstract....32
2.1 Introdução....32
2.2 Material e Métodos....36
2.2.1 Descrição da área experimental....36
2.2.2 Variáveis dendrométricas do povoamento....41
2.2.2.1 Índice de uniformidade....41
2.2.3 Fertilização....42
2.2.4 Desbaste....43
2.2.5 Variáveis edáficas....43
2.2.6 Variáveis climáticas....44
2.2.6.1 Déficit de pressão de vapor (DPV)....45
2.2.6.2 Evapotranspiração de referência (ETo)....46
2.2.7 Análise estatística....46
2.3 Resultados....47
2.3.1 Características edáficas....47
2.3.2 Características climáticas....50
2.3.3 Características do povoamento....52

2.3.4 Influência do solo no crescimento do *Pinus taeda* 57

2.3.5 Resposta da produtividade à fertilização 59

2.3.6 Influência dos fatores edáficos, climáticos e do povoamento florestal no efeito da fertilização..... 66

2.4 Discussão 67

2.4.1 Influência da classe de solo e seus atributos físicos e químicos na produtividade do *Pinus taeda* 67

2.4.2 Efeito da fertilização na produtividade do *Pinus taeda* 70

2.5 Conclusão..... 72

Referências..... 73

3 EFICIÊNCIA DO USO DA LUZ E DO NITROGÊNIO EM POVOAMENTOS DE *Pinus taeda* L. EM UM GRADIENTE EDAFOCLIMÁTICO NO SUL DO BRASIL 81

Resumo 81

Abstract..... 82

3.1 Introdução..... 82

3.2 Material e Métodos 86

3.2.1 Área experimental..... 86

3.2.2 Variáveis do povoamento 87

3.2.3 Variáveis edáficas..... 90

3.2.4 Variáveis climáticas 90

3.2.4.1 Radiação fotossinteticamente ativa (PAR)..... 91

3.2.4.2 Balanço hídrico 92

3.2.5 Amostragem destrutiva e área foliar específica (AFE)..... 93

3.2.6 Mensuração direta do índice de área foliar..... 96

3.2.7 Nutrição foliar..... 97

3.2.8 Suprimento, uso e eficiência de uso da luz..... 97

3.2.9 Eficiência de crescimento 98

3.2.10 Análise estatística..... 98

3.3 Resultados 99

3.3.1 Variação da biomassa acima do solo 99

3.3.2 Área foliar específica e índice de área foliar.....101

3.3.3 Eficiência de uso da luz e de crescimento.....105

3.3.4 Uso e eficiência do uso do nitrogênio.....107

3.3.5 Relação da eficiência de crescimento, uso da luz e uso do nitrogênio com as características edafoclimáticas e do povoamento 108

3.4 Discussão.....112

3.4.1 Produção de biomassa acima do solo e características da copa 112

3.4.2 Fatores que controlam a eficiência do uso da luz e do crescimento 115

3.4.3 Uso do nitrogênio e eficiência de uso.....119

3.5 Conclusão 122

Referências 123

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS..... 131

APÊNDICES.....133

RESUMO

Influência dos fatores edafoclimáticos na produtividade e na eficiência do uso dos recursos naturais do *Pinus taeda* L. sob distintos manejos no Sul do Brasil

Devido ao aprimoramento das práticas silviculturais e do melhoramento genético para seleção de genótipos mais produtivos, a produtividade do *Pinus taeda* no Brasil é reconhecida entre as maiores do mundo. Mesmo com alta produtividade em determinados sítios, sua variação é consideravelmente grande. Sabe-se que a disponibilidade de água, luz e nutrientes são fatores essenciais para a produção de madeira, onde a eficiência de uso desses recursos influenciam nesta variação do produtividade. Contudo, a ausência de fertilização em plantios de *Pinus* é majoritária nas áreas comerciais no Brasil, devido ao bom crescimento em solos de baixa fertilidade e por dificilmente apresentarem deficiência visual de nutrientes. Para compreender quais fatores influenciam na produção e partição de biomassa, se faz necessário o estudo da ecologia da produção. Diante disso, o presente trabalho tem como principais objetivos: i) estudar a influência de diferentes classes de solo no crescimento do *Pinus taeda*; ii) estudar a resposta da produtividade da espécie submetida à fertilização e ao desbaste; iii) avaliar a interceptação de luz; e iv) estimar a eficiência do crescimento (EC), uso da luz (EUL) e do nitrogênio (EUN) em povoamentos de *Pinus taeda* no sul do Brasil. Utilizou-se para este estudo parcelas quadrigêmeas da rede experimental do programa de Produtividade Potencial do *Pinus* no Brasil, as quais compõem um gradiente edafoclimático nos estados do Paraná e de Santa Catarina. As parcelas foram submetidas aos seguintes tratamentos: controle (C), fertilizado (F), desbastado (D), desbastado e fertilizado (DF). Foi calculado o índice de sítio, o incremento corrente anual, o incremento médio anual, índice de uniformidade do povoamento, a produtividade primária líquida de madeira e o índice de área foliar (IAF). Realizou-se análises de solo (0-20 cm) e foliar. Os dados das variáveis climáticas calculadas foram obtidos das estações meteorológicas mais próximas aos sítios avaliados. A produtividade mínima e máxima das parcelas controle foi de, respectivamente, 20,3 e 56,9 m^3 ha^{-1} ano^{-1} com idade média de 13 anos. Houve efeito significativo dos tratamentos F e DF, com ganho máximo no estoque de volume por parcela de 33 e 63%, respectivamente. A resposta da fertilização e da fertilização com desbaste ocorreram em áreas menos férteis e com menor teor de matéria orgânica do solo. A uniformidade dos povoamentos correlacionou-se positivamente com as parcelas de maior área basal em 2014 e com a EC, EUL e EUN calculadas em 2013. Os valores médios da EC, EUL e EUN aos 12,4 anos de idade foram de 2,1 Mg ha^{-1} IAF^{-1}, 0,55 g MJ^{-1} e 93 kg lenho kg^{-1} N ano^{-1}, respectivamente. Houve relação linear positiva da EC, EUL e EUN com a produção de biomassa total acima do solo. Ocorreu maior influência das variáveis edáficas na eficiência do uso dos recursos naturais comparado com as variáveis climáticas.

Palavras-chave: *Pinus;* Produtividade; Eficiência do uso da luz; Eficiência do uso do nitrogênio; Ecologia da produção; Fertilização

ABSTRACT

Edaphoclimatic factors influence on productivity and efficiency use of natural resources of loblolly pine under different managements in southern Brazil

Due to the improvement of silviculture practices and breeding for the selection of more productive genotypes, the loblolly pine productivity in Brazil is recognized as one of the biggest in the world. Even with the high productivity at certain sites, its variation is large. It is known that the availability of water, light and nutrients are essential for the wood production, and that the use efficiency of these resources influences the productivity variation. However, the absence of fertilization in pine plantations is majority in the commercial areas in Brazil due to good growth in low fertility soils and it hardly presents visual nutrient deficiency. To understand which factors influence the production and biomass partitioning, it is necessary to study the production ecology. Thus, the present work has as main objectives: i) to study the influence of different soil classes in loblolly pine growth; ii) to study the productivity response submitted to fertilization and thinning; iii) to evaluate the light interception; and iv) to estimate the growth efficiency (GE), use of light (LUE) and nitrogen (NUE) in loblolly pine stands in southern Brazil. For this study, it was used quadriplots from the experimental network of *Pinus* Potential Productivity in Brazil program, which composes an edaphoclimatic gradient in Parana and Santa Catarina states. The plots were submitted to the following treatments: control (C), fertilized (F), thinning (T), thinning and fertilized (TF). It was calculated the site index, the annual increment, the mean annual increment, the stand uniformity index, wood net primary productivity and the leaf area index (LAI). The soil (0-20 cm) and foliar analyzes were held. Data from the calculated climate variables was obtained from the closest weather stations to the evaluated sites. The minimum and maximum productivity of control plots were, respectively, 20.3 and 56.9 m^3 ha^{-1} yr^{-1} with an average age of 13 years. There was a significant effect of F and TF treatments, with maximum gain in volume stock of 33 and 63%, respectively. The response of fertilization and fertilization with thinning occurred in less fertile areas and with lower soil organic matter content. The stands uniformity correlated positively with the basal area in 2014 and the GE, LUE and NUE calculated in 2013. The mean values of GE, LUE and NUE at the average age of 12,4 years were 2.1 Mg ha^{-1} LAI^{-1}, 0.55 g MJ^{-1} and 93 kg wood kg^{-1} N $year^{-1}$, respectively. There was a positive linear relationship of GE, LUE and NUE with the production of total biomass above ground. The soil variables influenced more on the use efficiency of natural resources than climatic variables.

Keywords: *Pinus;* Productivity; Light use efficiency; Nitrogen use efficiency; Production ecology; Fertilization

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização dos sítios distribuídos nos estados do Paraná e Santa Catarina 37
Figura 2 – Variabilidade da soma de cálcio e magnésio (Ca + Mg), potássio (K), fósforo (P), soma de bases, capacidade de troca de cátions a pH 7 (CTC) e matéria orgânica do solo em cada sítio na camada 0 – 20 cm. As linhas cinzas mais espessas representam o valor médio do sítio. AR = Arapoti; CD = Caçador; TL = Telêmaco Borba; OC = Otacílio Costa; TB = Três Barras; RN = Rio Negrinho; JG = Jaguariaíva; PG = Ponta Grossa 48
Figura 3 - Classificação da textura do solo das parcelas gêmeas de cada sítio 49
Figura 4 – Valores máximos (Max), médios (Med) e mínimos (Min) da capacidade de água disponível no solo (CAD) e profundidade do solo das parcelas dentro de cada sítio. AR = Arapoti; CD = Caçador; TL = Telêmaco Borba; OC = Otacílio Costa; TB = Três Barras; RN = Rio Negrinho; JG = Jaguariaíva; PG = Ponta Grossa 50
Figura 5 - Precipitação pluviométrica mensal (PPT), temperatura máxima mensal (Tmax), temperatura mínima mensal (Tmin) e déficit de pressão de vapor (DPV) das cidades localizadas no estado do Paraná (dados provenientes da estação meteorológica do SIMEPAR no período do plantio até a última avaliação – jan/2000 a dez/2014) 51
Figura 6 - Precipitação pluviométrica mensal (PPT), temperatura máxima mensal (Tmax), temperatura mínima mensal (Tmin) e déficit de pressão de vapor (DPV) das cidades localizadas no estado de Santa Catarina (dados provenientes das estações meteorológicas do CIRAM e do INMET no período do plantio até a última avaliação – jan/1999 a dez/2014).....52
Figura 7 – Curvas-guias de índice de sítio para todas as parcelas dos tratamentos controle, fertilizado, desbastado e debastado com fertilização (idade base de 15 anos, Eq. 9). Os pontos representam a altura dominante ao longo dos anos das parcelas estudadas.....53
Figura 8 – Relação do incremento médio anual (IMA) com o índice de sítio (IS) para as parcelas do tratamento controle. AR = Arapoti; CD = Caçador; TL =

Telêmaco Borba; OC = Otacílio Costa; TB = Três Barras; RN = Rio Negrinho; JG = Jaguariaíva; PG = Ponta Grossa..... 54

Figura 9 – Estoque de madeira em volume no início de instalação e efeito da fertilização no volume do fuste do último inventário de cada parcela realizado em 2014 (esquerda). Histograma do ganho percentual do estoque de madeira das parcelas fertilizadas no último inventário (direita). n = quantidade de pares de parcelas; tp = teste t-pareado ... 59

Figura 10 - Estoque de madeira em volume no início de instalação e efeito da fertilização com desbaste no volume do fuste do último inventário de cada parcela realizado em 2014 (esquerda). Histograma do ganho percentual do estoque de madeira das parcelas desbastadas e fertilizadas no último inventário (direita). n = quantidade de pares de parcelas; T = teste pareado de Wilcoxon para dados não-paramétricos 60

Figura 11 – Relação do volume do fuste entre os tratamentos controle (C) vs fertilizado (F) e desbastado (D) vs desbastado + fertilizado (DF) de cada sítio. AR = Arapoti; CD = Caçador; TL = Telêmaco Borba; OC = Otacílio Costa; TB = Três Barras; RN = Rio Negrinho; JG = Jaguariaíva; PG = Ponta Grossa..... 61

Figura 12 – Relação do volume do fuste entre os tratamentos controle (C) vs fertilizado (F) e desbastado (D) vs desbastado + fertilizado (DF) de cada classe de solo. PVAd = Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico; CXbd = Cambissolo Háplico distrófico; CHd = Cambissolo Húmico distrófico; LVAd = Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico; NXe = Nitossolo Háplico eutrófico. * P < 0,10; ** P < 0,05; *** P < 0,01..... 63

Figura 13 – Comparação do índice de uniformidade PV50 em 2014 das parcelas controle (C) com a área basal 64

Figura 14 – Comportamento do PV50 ao longo dos anos (desde a instalação das parcelas até 2014) para os tratamentos fertilizado (F) e controle (C) de cada sítio. AR = Arapoti; CD = Caçador; TL = Telêmaco Borba; OC = Otacílio Costa; TB = Três Barras; RN = Rio Negrinho; JG = Jaguariaíva; PG = Ponta Grossa..... 65

Figura 15 – Variação mensal da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) entre o período de Janeiro de 2012 a dezembro de 2013 para cada sítio. CD = Caçador; TL = Telêmaco Borba; OC = Otacílio Costa; TB = Três Barras; RN = Rio Negrinho; JG = Jaguariaíva 92
Figura 16 – Balanço hídrico entre os períodos de inventário de 2012 e 2013 da parcela com maior déficit hídrico (Telêmaco Borba; capacidade de água disponível no campo de 135 mm) e da parcela com menor déficit hídrico (Três Barras; capacidade de água disponível no campo de 186 mm). PPT = precipitação pluviométrica; ETR = evapotranspiração real; DEF = déficit hídrico; EXC = excedente hídrico 93
Figura 17 – Distribuição das árvores amostradas em classes de diâmetro à altura do peito (cm) 94
Figura 18 - Biomassa seca em função do diâmetro à 1,30 m de altura (DAP) e altura total para o tronco e em função do DAP para galho e acículas 95
Figura 19 – Ajuste do modelo de estimativa da área foliar (AF) em função do diâmetro da árvore à 1,30 m de altura (DAP; P<0,001). AF = área foliar (m² arvore^{-1}); D = diâmetro à altura de 1,30 m (cm).....96
Figura 20 – Variação da biomassa das parcelas de cada sítio para tronco, galho, acícula e biomassa total no ano de 2013, com idade média de 12 anos. As linhas cinzas mais espessas representam os valores médios de cada sítio e as linhas tracejadas representam a média geral de cada componente. CD = Caçador; TL = Telêmaco Borba; OC = Otacílio Costa; TB = Três Barras; RN = Rio Negrinho; JG = Jaguariaíva 100
Figura 21 – Variação da área foliar específica (AFE) das árvores amostradas dentro de cada sítio. As linhas cinzas mais espessas representam os valores médios de cada sítio e a linha tracejada representa a média geral de todos os sítios. CD = Caçador; TL = Telêmaco Borba; OC = Otacílio Costa; TB = Três Barras; RN = Rio Negrinho; JG = Jaguariaíva 102
Figura 22 – Distribuição da área foliar projetada média em função da altura da copa para cada sítio em valores absolutos (A) e relativos (B). I = terço inferior; M = terço médio; S = terço superior. CD = Caçador; TL = Telêmaco Borba; OC = Otacílio Costa; TB = Três Barras; RN = Rio Negrinho; JG = Jaguariaíva 103

Figura 23 – Índice de área foliar (IAF) determinado pelo método direto de 22 parcelas distribuídas em 6 sítios, com idade média de 12 anos. A linha tracejada representa o valor médio do IAF. CD = Caçador; TL = Telêmaco Borba; OC = Otacílio Costa; TB = Três Barras; RN = Rio Negrinho; JG = Jaguariaíva 104

Figura 24 – Variação do incremento corrente anual (ICA) em função do índice de área foliar direto (IAF) aos 12 anos de idade. Os pontos pretos representam as parcelas de alta eficiência de crescimento e os pontos brancos representam as parcelas de baixa eficiência de crescimento 104

Figura 25 – A: relação do incremento de biomassa total acima do solo com a eficiência de uso da luz (EUL). B: relação entre a produtividade primária líquida do lenho (WNPP) e a radiação fotossinteticamente ativa absorvida (APAR) de cada parcela. As linhas da Figura B representam a eficiência de uso da luz (ε), com intervalos de 0,2. CD = Caçador; TL = Telêmaco Borba; OC = Otacílio Costa; TB = Três Barras; RN = Rio Negrinho; JG = Jaguariaíva 105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Localização e descrição climática dos sítios experimentais 38
Tabela 2 – Variações da classe textural, nível de drenagem, grupo e formação geológica e tipos de solos predominantes dentro de cada sítio 39
Tabela 3 – Procedência do material genético plantado, variação da data de plantio, área mensurável, densidade de plantas (N) do ano de instalação das parcelas e idade média no ano em que a fertilização e a adubação foram realizadas em cada sítio 40
Tabela 4 – Quantidade de nutrientes em kg ha^{-1} adicionados via fertilização nas parcelas fertilizadas (F) e desbastadas fertilizadas (DF).....42
Tabela 5 – Equações utilizadas para a estimativa da capacidade de campo (θ_{CC}) e o ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) descritas por Giarola, Silva e Imhoff (2002).....44
Tabela 6 – Localização das estações meteorológicas e intervalo de dados utilizados para as variáveis climáticas de cada região e seus respectivos blocos 44
Tabela 7 – Lista de variáveis do solo, clima e povoamento utilizadas para as correlações de Pearson e Spearman e para a análise multivariada de Stepwise.....47
Tabela 8 – Descrição das médias das variáveis dendrométricas dos sítios para os tratamentos controle (C), fertilizado (F), desbastado (D), desbastado e fertilizado (DF), calculadas a partir do inventário do ano de 2014, com idade média de 13 anos..... (continua) 55
Tabela 9 – Diferenças entre as médias das variáveis do povoamento das parcelas do tratamento controle para as diferentes classes de solos e o coeficiente de variação de cada variável.....57
Tabela 10 – Correlação de Spearman entre as variáveis edáficas independentes e as variáveis dependentes de estoque de madeira (V), incremento entre 2013 e 2014 (ICA) e índice de sítio (IS) do tratamento controle (c) para valor de $P < 0,1$ 58
Tabela 11 – Modelo linear gerado pelo método Stepwise (n = 68) para as variáveis dependentes calculadas para o ano de 2014: volume (V_C), incremento corrente anual (ICA_C) e índice de sítio (IS_C).....58

Tabela 12 – Teste de dados pareados para amostras paramétricas (teste t-Student) e não-paramétricas (teste de Wilcoxon). Comparação do estoque de madeira do fuste em volume entre os tratamentos controle (C) vs fertilizado (F) e desbastado (D) vs desbastado + fertilizado (DF) de cada sítio 62
Tabela 13 – Correlação de Spearman para o efeito da fertilização e da interação entre fertilização e desbaste no estoque de madeira em volume (ΔV_{F-C}, ΔV_{DF-D}) e produtividade (IMA_F, IMA_{DF}) com as variáveis do povoamento, solo e clima. Entre parênteses estão respectivamente os valores da correlação de Spearman e o valor de *P* (< 0,10) 66
Tabela 14 – Modelo linear, calculado pelo método Stepwise, para a resposta das parcelas fertilizadas 'sem desbaste (V_{F-C}) e desbastadas (V_{DF-D}) 67
Tabela 15 – Localização geográfica, descrição do material genético e classificação do solo de cada parcela 88
Tabela 16 – Descrição das médias das variáveis dendrométricas de cada sítio com idade média de 12 anos (baseado nos dados do inventário de 2013)89
Tabela 17 – Média dos atributos químicos e físicos do solo de cada sítio na profundidade de 0 a 20 cm do solo 90
Tabela 18 – Média das variáveis climáticas das parcelas de cada sítio 91
Tabela 19 – Descrição dos períodos utilizados para o cálculo de todas as variáveis climáticas, soma dos meses avaliados, soma da radiação fotossinteticamente ativa (ΣPAR) do período indicado e radiação fotossinteticamente ativa (PAR) média de cada mês avaliado para cada sítio 92
Tabela 20 – Modelos de biomassa seca para os componentes da árvore de *Pinus taeda*. Valor de P < 0,001 para todos os modelos 95
Tabela 21 – Lista de variáveis utilizadas para análise estatística da eficiência de uso da luz (EUL) como variável dependente e as variáveis independentes de solo, clima, copa e povoamento 99
Tabela 22 – Variação dos estoques de biomassa do tronco (Btronco) e biomassa total (Btotal) e dos incrementos de biomassa do tronco entre os sítios com idade média de 12 anos (inventário de 2013) 101
Tabela 23 – Média do índice de área foliar (IAF), eficiência de crescimento (EC), radiação fotossinteticamente ativa absorvida (APAR) e eficiência de

uso da luz (EUL) de cada sítio em 2013, com idade média de 12 anos. Valores entre parênteses representam o erro padrão da média 106

Tabela 24 – Concentração média de nitrogênio foliar (N_f; em g de nitrogênio por kg de massa seca), conteúdo de nitrogênio foliar do povoamento (N; em kg de nitrogênio por hectare), conteúdo médio de nitrogênio por área foliar (N_a; em g de nitrogênio por m² de folha) e média da eficiência de uso do nitrogênio (EUN; em kg de incremento de massa seca do lenho kg^{-1} de nitrogênio ano^{-1}) de cada sítio 107

Tabela 25 – Correlação de Pearson da eficiência de crescimento (EC), eficiência de uso da luz (EUL) e eficiência de uso do nitrogênio (EUN) com as variáveis edáficas, climáticas, do povoamento e atributos da copa (P<0,05) 109

Tabela 26 – Variáveis independentes selecionadas por Stepwise tendo como variáveis dependentes a eficiência de crescimento (EC; Mg^{-1} ha^{-1} ano^{-1} IAF^{-1}), eficiência de uso da luz (EUL; g MJ^{-1}) e de uso do nitrogênio (EUN; kg kg^{-1}). A categoria “Todas” indica que realizou-se apenas uma regressão para todas as variáveis independentes. Todas as variáveis independentes selecionadas foram significativas na regressão (P < 0,05; n = 22) 111

1 INTRODUÇÃO

O *Pinus* é o segundo gênero florestal mais plantado no Brasil, abrangendo uma área de aproximadamente 1,6 milhão de hectares ao longo do país, sendo os estados do Paraná e Santa Catarina os principais produtores, representando 76 % da área total plantada (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ, 2015).

A diversidade de utilização do *Pinus* é muito importante para o setor florestal e econômico mundial, pois sua madeira pode ser destinada para diversas finalidades, como geração de energia em siderurgias, produção de carvão vegetal, madeira serrada, painéis de compensados e principalmente para a produção de celulose e papel (MARTO, 2006).

Devido ao aprimoramento das práticas silviculturais (preparo de solo, fertilização e controle da matocompetição) e do melhoramento genético para seleção de genótipos mais produtivos, o *Pinus* alcançou no Brasil uma produtividade média de 31 m^3 ha^{-1} ano^{-1}, reconhecida entre as maiores produtividades do mundo (BORDERS; BAILEY, 2001; INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2015; SAMUELSON et al., 2010).

O *Pinus taeda*, nativo do sudeste dos Estados Unidos (EUA), é a principal espécie plantada no sul do Brasil devido principalmente à sua excelente adaptação ao clima subtropical e à baixa exigência nutricional comparado ao *Eucalyptus*. A espécie possui rápido crescimento no sul do Brasil, alcançando produtividades de 45 m^3 ha^{-1} ano^{-1} (idade média de 11 anos) sem qualquer tipo de fertilização, em sítios com alto grau de melhoramento genético, localizados na região de Três Barras - SC (MUNHOZ, 2011).

Diferentemente do *Eucalyptus*, o *Pinus taeda* geralmente não apresenta sintomas de deficiência nutricional apesar do seu rápido crescimento, gerando a ideia entre as empresas de que não há necessidade de adubar tais plantios (FERREIRA et al., 2001).

Este pensamento equivocado exclui a manutenção da sustentabilidade da floresta, exaurindo os nutrientes do solo devido às frequentes exportações de biomassa via colheita (BIZON, 2005; SIXEL, 2012).

Atualmente, diversas regiões estão entre a segunda ou terceira rotação sem reposição nutricional, onde problemas de deficiência foram relatados em solos de

baixa fertilidade no segundo planalto paranaense (BATISTA et al., 2015; SCHNEIDER, 2011).

Décadas de estudos no Brasil mostram que as produtividades mais elevadas do *P. taeda* são encontradas em solos com maior teor de argila e mais férteis, destacando-se a capacidade de troca catiônica, fósforo e nitrogênio (BIZON, 2005; BOGNOLA et al., 2010; DEDECEK et al., 2008; LASO GARICOITS, 1990; MORO et al., 2014; MUNHOZ, 2011).

Moro et al. (2014), relata que a adição de macronutrientes aumentou o estoque de madeira em plantios com 5 e 9 anos de idade, sugerindo a adubação em plantios já estabelecidos como uma alternativa de manejo para aumentar a produtividade em solos de baixa fertilidade no sul do Brasil.

A fertilização em plantios de *P. taeda* nos EUA é uma prática rotineiramente utilizada pelas empresas, onde pesquisas relatam baixos níveis crônicos de nitrogênio e fósforo no solo, os quais limitam o crescimento da espécie (ALBAUGH et al, 2004; JOKELA; MARTIN, 2000; SAMPSON; ALLEN, 1998).

A deficiência nutricional é um dos principais fatores que reduz o desenvolvimento da área foliar e a eficiência de crescimento e do uso dos recursos, influenciando negativamente na produtividade dos povoamentos florestais (FOX et al., 2007; SAMUELSON; JOHNSEN; STOKES, 2004).

Portanto, para aumentar a produtividade e sustentabilidade da floresta é necessário compreender os processos que controlam o seu crescimento. A ecologia da produção é uma forma de estudar como a disponibilidade de recursos influencia na partição de carbono na planta, afetando a produtividade florestal (BINKLEY; STAPE; RYAN, 2004).

Monteith (1972; 1977) iniciou a discussão sobre a ecologia da produção em plantas agrícolas, onde o autor afirma que a produção de biomassa é em função do suprimento de recursos, dos recursos disponíveis que foram utilizados e da eficiência com que os recursos foram utilizados para a produção de biomassa.

A partir desta teoria, diversos autores tem explicado os padrões de crescimento de espécies florestais (CAMPOE et al., 2013; CANNEL, 1989; CHRISTINA et al., 2015; GYENGE; FERNANDEZ, 2014; SAMPSON; ALLEN, 1999; STAPE; BINKLEY; RYAN, 2004).

Segundo Landsberg e Sands (2011), a interceptação de radiação e a produção de biomassa de um povoamento florestal são processos fundamentais do ecossistema da planta.

Pesquisas sobre a ecologia da produção relatam que a alta produtividade de um plantio está diretamente relacionada à maior absorção de radiação (alto índice de área foliar - IAF) e à eficiência do uso da luz (ALBAUGH et al., 2004; BINKLEY et al., 2013).

Portanto, o IAF e a eficiência de uso da luz (EUL) tornam-se variáveis essenciais em modelos ecofisiológicos que estimam a produtividade primária líquida em função das condições edáficas e climáticas.

O uso e eficiência de uso dos nutrientes também é um tema abordado na ecologia da produção, sendo o nitrogênio considerado um dos nutrientes mais importantes para o crescimento e desenvolvimento da planta (LI; McKEAND; ALLEN, 1991; MURTHY et al., 1996), devido a sua influência nas características fotossintéticas da folha (LANDSBERG; SANDS, 2011).

A carência de estudos relativos à ecologia da produção do *Pinus* no Brasil motivou o presente trabalho a investigar sobre os seguintes temas:

I. Influência dos fatores edafoclimáticos sobre a fertilização na produtividade do *Pinus taeda*;

II. Eficiência do uso da luz e do nitrogênio em povoamentos de *Pinus taeda* sob diferentes condições edafoclimáticas.

Referências

ALBAUGH, T.J.; ALLEN, H. L.; DOUGHERTY, P.M.; JOHNSEN, K.H. Long term growth responses of loblolly pine to optimal nutrient and water resource availability. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 192, p. 3-19, 2004.

BATISTA, A.H.; MOTTA, A.C.V.; REISSMANN, C.B.; SCHNEIDER, T.; MARTINS, I.L.; HASHIMOTO, M. Liming and fertilization in *Pinus taeda* plantations with severe nutrient deficiency in savanna soils. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 37, n. 1, p. 117-125, 2015.

BINKLEY, D.; CAMPOE, O.C., GSPALTL, M.; FORRESTER, D.I. Light absorption and use efficiency in forests: why patterns differ for trees and stands. **Forest Ecology Management**, Amsterdam, v. 288, p. 5–13, 2013.

BINKLEY, D.; STAPE, J.L.; RYAN, M.G. Thinking about efficiency of resource use in forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, p. 5-16, 2004.

BIZON, J.M.C. **Avaliação da sustentabilidade nutricional de plantio de *Pinus taeda* L. usando um balanço de entrada-saída de nutrientes**. 2005. 95 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

BOGNOLA, I.; DEDECEK, R.; LAVORANTI, O.; HIGA, A.R. Influência de propriedades físico-hídricas do solo no crescimento de *Pinus taeda*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 61, p. 37-49, 2010.

BORDERS, B.E.; BAILEY, R.L. Loblolly Pine - Pushing the Limits of Growth. **Southern Journal of Applied Forestry**, Bethesda, v. 25, n. 2, p. 69-74, 2001.

CAMPOE, O.; STAPE, J.L.; ALBAUGH, T.J.; ALLEN, L.H.; FOX, T.R.; RUBILAR, R.; BINKLEY, D. Fertilization and irrigation effects on tree level aboveground net primary production, light interception and light use efficiency in a loblolly pine plantation. **Forest Ecology Management**, Amsterdam, v. 288, p. 43-48, 2013.

CANNEL, M.G.R. Physiological basis of wood production: a review. **Scandinavian Journal of Forest Research**, London, v.4, p. 459–490, 1989.

CHRISTINA, M.; Le MAIRE, G.; BATTIE-LACLAU, P.; NOUVELLON, Y.; BOUILLET, J.P.; JOURDAN, C.; GONÇALVES, J.L.M.; LACLAU, J.P. Measured and modeled interactive effects of potassium deficiency and water deficit on gross primary productivity and light-use efficiency in *Eucalyptus grandis* plantations. **Global Change Biology**, Oxford, v. 21, n. 5, p. 2022-2039, 2015.

DEDECEK, R.A.; FIER, I.S.N.; SPELTZ, R.; LIMA, L.C.S. Influência do sítio no desenvolvimento do *Pinus taeda* aos 22 anos. 1. Características físico-hídricas e químicas do solo. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 3, p. 507-516, jul./set. 2008.

FERREIRA, C.; SILVA, H.D.; REISSMANN, C.; BELLOTE, A.; MARQUES, R. **Nutrição de pinus no sul do Brasil:** diagnóstico e prioridades de pesquisa. Colombo: Embrapa Florestas, 2001. 23 p.

FOX, T.R.; ALLEN, H.L.; ALBAUGH, T.J.; RUBILAR, R.; CARLSON, C.A. Tree nutrition and forest fertilization of pine plantations in the Southern United States. **Southern Journal Applied Forestry**, Bethesda, v. 31, p. 5–11, 2007.

GYENGE, J.; FERNÁNDEZ, M.E. Patterns of resource use efficiency in relation to intra-specific competition, size of the trees and resource availability in ponderosa pine. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 312, p. 231-238, 2014.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Anuário estatístico da IBÁ 2015 ano base 2014**. Brasília, 2015. 64 p.

JOKELA, E.J.; MARTIN, T.A. Effects of ontogeny and soil nutrient supply on production, allocation, and leaf area efficiency in loblolly and slash pine stands. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 30, n. 10, p. 1511-1524.

LANDSGERG, J.J.; SANDS, P. **Physiological ecology of forest production**: principles, processes and models. Oxford: Elsevier, 2011. 331 p.

LASO GARICOITS, L.S. **Estado nutricional e fatores do solo limitantes do crescimento de *Pinus taeda* L. em Telêmaco Borba**. 1990. 128 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1990.

LI, B.; McKEAND, S.E.; ALLEN, H.L. Genetic variation in nitrogen use efficiency of loblolly pine seedlings. **Forest Science**, Bethesda, v. 37, p. 613–626, 1991.

MARTO, G.B.T. **Indicações para a escolha da espécie de *Pinus*.** Piracicaba: IPEF, 2006. Disponível em: <http://www.ipef.br/silvicultura/escolha_pinus.asp>. Acesso em: 18 nov. 2010.

MONTEITH, J.L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. **Journal Applied Ecology**, Washington, v. 9, p. 747-766, 1972

_____. Climate and the efficiency of crop production in Britain. **Philosophical Transactions of the Royal Society.** Series B: Biological Sciences, London, v. 281, p. 277-296, 1977.

MORO, L.; GATIBONI, L.C.; SIMONETE, M.A.; CEZAR, P. Resposta de *Pinus taeda* com diferentes idades à adubação NPK no planalto Sul Catarinense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 4, p. 1181-1189, 2014.

MUNHOZ, J.S.B. **Caracterização da produtividade florestal e dos padrões de crescimento de *Pinus taeda* L. no sul do Brasil através de análise de tronco**. 2011. 116 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

MURTHY, R.; DOUGHERTY, P.M. Estimating foliage area of loblolly pine shoots. **Forest Science**, Bethesda, v. 42, n. 2, p. 299-303, 1997.

SAMPSON, D.A.; ALLEN, H.L. Light attenuation in a 14-year-old loblolly pine stand as influenced by fertilization and irrigation. **Trees**, Berlin, v. 13, p. 80–87, 1998.

SAMUELSON, L.; JOHNSEN, K.; STOKES, T. Production, allocation, and stemwood growth efficiency of *Pinus taeda* L. stands in response to 6 years of intensive management. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 192, p. 59-70, 2004.

SAMUELSON, L.; EBERHARDT, T.L.; BUTNOR, J.R.; STOKES, T.; JOHNSEN, K. Maximum growth potential in loblolly pine: results from a 47-year-old spacing study in Hawaii. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 40, p. 1914–1929, 2010.

SCHNEIDER, T. **Crescimento e teores de B, Cu, Mn, Fe e Zn em *Pinus taeda* L., como resultado da adubação e calagem sob a técnica da omissão de nutrientes.** 2011. 51 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

SIXEL, R.M.M. **Sustentabilidade da produtividade de madeira de *Pinus taeda* com base no estoque, na exportação e na ciclagem de nutrientes**. 2012. 110 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; RYAN, M.G. Eucalyptus production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, n. 1/2, p. 17-31, May 2004.

2 RESPOSTA DA PRODUTIVIDADE EM PLANTIOS DE *Pinus taeda* L. À FERTILIZAÇÃO EM UM GRADIENTE EDAFOCLIMÁTICO NO SUL DO BRASIL

Resumo

O *Pinus taeda* é uma das espécies produtoras de madeira mais importante e mais plantada no Brasil e no mundo. Apesar de sua baixa exigência nutricional, a espécie é responsiva à maior disponibilidade de nutrientes, água e luz, principalmente em sítios com baixa capacidade produtiva. Portanto, a fertilização e a redução da densidade do povoamento tornam-se práticas relevantes. O solo, o clima e a uniformidade dos plantios podem influenciar na produtividade e crescimento desta espécie. Com o objetivo de estudar a resposta da produtividade do *Pinus taeda* submetido à fertilização no sul do Brasil, utilizou-se uma rede experimental de 266 parcelas quadrigêmeas do programa Produtividade Potencial do *Pinus* no Brasil. As parcelas estão distribuídas em 8 sítios compondo um gradiente edafoclimático no sul do Brasil. Os sítios avaliados, com idade média de 13 anos, estão localizados nas seguintes cidades do Paraná: Arapoti, Jaguariaíva, Ponta Grossa e Telêmaco Borba; e de Santa Catarina: Caçador, Otacílio Costa, Rio Negrinho e Três Barras. Os tratamentos estudados foram: sem fertilização e sem desbaste (controle - C), fertilizado (F), desbastado (D) e fertilizado com desbaste (DF). A fertilização e o desbaste ocorreram com aproximadamente 8 anos de idade. Foram aplicados por hectare: 135 kg de N, 35 kg de P, 125 kg de K, 414 kg de Ca, 190 kg de Mg, mais a adição de micronutrientes. O desbaste foi seletivo por baixo, retirando-se 50% das menores árvores. Para as análises estatísticas utilizou-se resultados de análise química e física do solo na profundidade de 0-20 cm. Foi calculado a capacidade de água disponível no solo e medido a profundidade do solo de cada parcela até 150 cm. Os dados climáticos foram obtidos de estações meteorológicas mais próximas aos sítios. Os solos das parcelas foram classificados como Latossolo Vermelho distrófico (LVd), Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd), Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd), Cambissolo Háplico Tb distrófico (CXbd), Cambissolo Humico distrófico (CHd) e Nitossolo Haplico eutrófico (NXe). A produtividade média dos sítios nos tratamentos C e F variou de 31 a 49 m^3 ha^{-1} ano^{-1} e 33 a 49 m^3 ha^{-1} ano^{-1}, respectivamente. As parcelas mais e menos produtivas foram encontradas nos LVd e PVAd, respetivamente. O estoque de madeira em volume e o índice de sítio se correlacionaram positivamente com a relação Silte/Argila e profundidade do solo. A maior correlação do incremento corrente anual foi com a saturação de bases. Houve efeito significativo dos tratamentos F e DF no volume, com ganho máximo de 33 e 63%, respectivamente. O efeito de F no volume foi significativo apenas em Ponta Grossa e o efeito positivo de DF ocorreu em Arapoti, Caçador, Telêmaco Borba e Rio Negrinho. Os povoamentos com maior área basal e mais produtivos apresentaram-se com maior uniformidade. A resposta da fertilização foi dependente de baixos teores de CTC e matéria orgânica do solo. A resposta positiva da fertilização com desbaste ocorreu em áreas menos férteis, com menor teor de matéria orgânica do solo e climas mais úmidos.

Palavras-chave: Densidade do povoamento; Desbaste; Uniformidade; Manejo de *Pinus*; Fertilidade do solo; Silvicultura

Abstract

Productivity response of the loblolly pine plantations to fertilization in an edaphoclimatic gradient in southern Brazil

The loblolly pine is one of the most important species of wood producing and the most planted in Brazil and in the world. Despite its low nutritional requirements, the species is responsive to the greater availability of nutrients, water and light, especially in sites with low production capacity. Therefore, fertilization and reducing stocking density become relevant practices. The soil, the climate and the uniformity of the stands can influence the productivity and growth of this species. With the aim to study the loblolly pine productivity response submitted to fertilization in southern Brazil, we used an experimental network of 266 quadriplots from the program *Pinus* Potential Productivity in Brazil. The plots are distributed in 8 sites composing an edaphoclimatic gradient in southern Brazil. The evaluated sites, with an average age of 13 years, are located in the following cities of Paraná: Arapoti, Jaguariaíva, Ponta Grossa and Telemaco Borba; and Santa Catarina: Caçador, Otacílio Costa, Negrinho Rio and Três Barras. The studied treatments were: no fertilization and no thinning (control - C), fertilized (F), thinning (T) and fertilized with thinning (TF). Fertilization and thinning occurred at approximately 8 years of age. They were applied per hectare 135 kg of N, 35 kg of P, 125 kg of K, 414 kg of Ca and 190 kg of Mg, plus the addition of micronutrients. Thinning was selective, removing 50% of the smaller trees. For statistical analyses, we used results from chemical and physical soil analysis, which was collected at 0-20 cm.depth. It calculated the available water capacity in the soil and measured the soil depths of each plot up to 150 cm. Climatic data were obtained from the closest weather stations to the sites. The soils of the plots were classified as dystrophic Red Oxisol (LVd), dystrophic Red-Yellow Oxisol (LVAd), dystrophic Red-Yellow Ultisols (PVAd), dystrophic Cambisol Tb (CXbd), dystrophic Humic Cambisol (CHd) and eutrophic Alfisol (NXe). The average productivity of the sites in treatments C and F ranged 31-49 m^3 ha^{-1} yr^{-1} and 33-49 m^3 ha^{-1} yr^{-1}, respectively. The most and less productive plots were in LVd and PVAd, respectively. The stock of stem volume and the site index were positively correlated with the ratio silt / clay and soil depth. The highest correlation of current annual increment was with the base saturation. There was a significant effect of F and TF treatments in stem volume, with a maximum gain of 33 and 63%, respectively. The effect of F in volume was significant only in Ponta Grossa and the positive effect of DF occurred in Arapoti, Caçador, Telemaco Borba and Rio Negrinho. The stands with higher basal area and productivity were more uniform. The response of fertilization was dependent on low levels of cation exchange capacity and soil organic matter. The positive response to fertilization with thinning occurred in less fertile areas, with lower content of soil organic matter and more humid climates.

Keywords: Stocking density; Thinning; Uniformity; *Pinus taeda* Management; Soil Fertility; Silviculture

2.1 Introdução

Um dos principais fatores que direciona o tipo de manejo adotado para os plantios florestais é o retorno financeiro. A busca para encontrar o “manejo ideal” das

áreas florestais, o qual considera não somente o ganho em produção de madeira mas também o custo-benefício do investimento em melhoramento genético e das atividades silviculturais, é tema de diversos estudos no manejo do *Pinus taeda* (CARTER; FORSTER, 2006; CARDOSO et al., 2013; CUBBAGE et al., 2007; GOMES; MAESTRI; SANQUETTA, 1998).

Dentre as práticas silviculturais mais importantes para os plantios florestais está a fertilização. Sabe-se que a função da fertilização em plantios de curta rotação não é apenas do ganho em produção de madeira, mas sim de manter a sustentabilidade do sistema florestal, já que este, por sua vez, possui grande quantidade de nutrientes exportados periodicamente (SIXEL, 2012).

Estudo sobre a sustentabilidade nutricional em plantios de *Pinus taeda* na região de Itararé (SP) e Jaguariaíva (PR) realizado por Bizon (2005), comprovou que os sítios com maior produtividade tendem a exaurir o solo mais rapidamente que o sítios de baixa produção de madeira, concluindo que a reposição nutricional através da fertilização com práticas conservacionistas são essenciais na manutenção da sustentabilidade do sistema.

Ao longo de décadas, diversas pesquisas foram realizadas para determinar os fatores do solo limitantes ao crescimento e o efeito da fertilização na produtividade e nutrição do *Pinus* no Brasil (BATISTA et al., 2015; CARVALHO et al., 1999; DEDECEK et al., 2008; LASO GARICOITS, 1990; MORO et al., 2014; SCHNEIDER, 2011).

Entretanto, grande parte das empresas florestais de *Pinus* ainda optam por não acrescentar a adubação como uma de suas práticas silviculturais, com a justificativa de ser um gênero de baixa exigência nutricional e de tal prática não ser economicamente viável (BATISTA et al., 2015; FERREIRA et al.,2001).

Apesar do bom desenvolvimento do *Pinus taeda* em regiões de baixa fertilidade no sul do Brasil, sintomas visuais de deficiência de nutrientes foram observados por Martins (2011) em áreas do cerrado no Segundo Planalto Paranaense.

Pesquisas relatam que a maior produtividade da espécie está associada a solos mais argilosos, com maior quantidade de água disponível e maior disponibilidade de nutrientes, em especial o nitrogênio mineralizável e fósforo disponível (BIZON, 2005; BOGNOLA et al., 2010; CARVALHO et al., 1999; DEDECEK et al., 2008; MARTINS, 2011; MORO et al., 2014; MUNHOZ, 2011).

Além disso, Reissmann e Zottl (1987) e Santos Filho et al. (1993), observaram o Zn, Cu e B como micronutrientes limitantes do crescimento do *Pinus taeda*.

No sudeste dos Estados Unidos, a fertilização do *Pinus taeda* é uma prática constante nos plantios comerciais devido principalmente ao ganho significativo em produção de madeira (FOX et al., 2007). Albaugh et al. (1998), incorporando macronutrientes e Boro, observaram aumento de 56% do incremento corrente anual (ICA) em plantios de *P. taeda* localizados em solos pobres e arenosos na Carolina do Norte.

Sabe-se que a disponibilidade nutricional e hídrica afetam diretamente o *Pinus taeda* na produção e longevidade das acículas, na taxa de fotossíntese e consequentemente na produção e partição de carbono (ALBAUGH et al., 1998, 2004). Murthy et al. (1996), concluíram que a maior disponibilidade de nutrientes no solo aumentou a taxa fotossintética do *Pinus*.

Na ausência de estresse hídrico, a nutrição torna-se um fator determinante na eficiência de conversão da radiação em biomassa, aumentando a taxa de crescimento da planta (RODRIGUEZ; ALVAREZ, 2010). Este cenário é típico das áreas com povoamentos florestais no sul do Brasil.

Visando aumentar a disponibilidade de recursos para as árvores, o desbaste pode ser uma importante prática. Apesar da finalidade do desbaste em plantios comerciais ser em acelerar o crescimento do diâmetro das árvores, concentrando-os em um menor número de indivíduos, este crescimento é consequência de uma redução significativa da competição por água, luz e nutrientes.

O aumento do crescimento em diâmetro das árvores remanescentes com a prática do desbaste pode levar até quatro anos dependendo da espécie, afirma Schneider (1993). Segundo o autor, este período é devido a necessidade de primeiramente ocorrer um acréscimo da área foliar e radicular, aumentando consequentemente a absorção de radiação e nutrientes.

Will et al. (2001) afirmaram que a interação entre a densidade do plantio com a taxa de crescimento é dependente da idade do povoamento, da qualidade do sítio e das características do ambiente, sendo que os sítios mais produtivos aceleram o crescimento do povoamento e a convergência do volume total do sítio entre as diferentes densidades.

O Serviço Florestal do Canadá afirma que os impactos dos desbastes podem ser modificados pela adubação nitrogenada, aumentando a eficiência fotossintética do povoamento (CANADÁ, 1999).

A concentração de nitrogênio foliar em *Pinus taeda* reduziu com o aumento da densidade das árvores nos EUA indicando competição pelo nutriente, porém, não houve correlação entre a concentração de nitrogênio e a taxa de fotossíntese, o qual pode ser explicada quando a concentração de nitrogênio está acima do limiar crítico (WILL et al., 2001).

Estes estudos mostram a influência do sítio e da fertilização no crescimento dos povoamentos submetidos ao desbaste, onde locais distintos com as mesmas práticas silviculturais podem resultar em diferentes comportamentos do povoamento da mesma espécie.

No Brasil, pesquisas sobre a resposta da produtividade do *Pinus* submetido à fertilização e à diferentes densidades do povoamento ainda são escassos, predominando pesquisas de densidade de plantio e desbaste em áreas não fertilizadas (CARDOSO et al., 2013; GOMES; MAESTRI; SANQUETTA, 1997; SCHINEIDER, 2008).

O programa cooperativo de Produtividade Potencial do *Pinus* no Brasil - PPPIB (INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS, 2013) possui estudos pioneiros no país, abrangendo áreas de *Pinus* desde Minas Gerais até Santa Catarina, onde dois dos três delineamentos experimentais do programa abordam estudos sobre fertilização e desbaste em conjunto.

Um outro fator a ser considerado é a uniformidade dos povoamentos. Estudos com *P. taeda* evidenciam que povoamentos mais uniformes influenciam positivamente no crescimento, desenvolvimento e produtividade da espécie devido sua maior eficiência de uso dos recursos (ASPINWALL et al., 2011; CAMPOE et al., 2013; MUNHOZ, 2011).

Tal afirmação possui impacto direto nas práticas de manejo, pois além da escolha de materiais genéticos com alto grau de melhoramento, da qualidade do plantio, do controle da matocompetição e de pragas e doenças, outra opção seria a eliminação das árvores menos produtivas.

A eliminação das árvores suprimidas visa aumentar a uniformidade do plantio e disponibilizar mais recursos para as árvores mais eficientes, resultando em maior produtividade (FORRESTER et al., 2012).

Desta forma, compreender e identificar os fatores edáficos, climáticos e do povoamento que limitam o crescimento da floresta são essenciais para a adoção de estratégias de manejo que irão manipular os recursos para aumentar a taxa de crescimento do plantio.

O objetivo geral deste capítulo é estudar a resposta da produtividade do *Pinus taeda* submetido à fertilização em um gradiente edafoclimático no sul do Brasil. As seguintes hipóteses foram propostas:

I. Há diferença de produtividade do *Pinus taeda* entre as classes de solo;
II. O crescimento do *Pinus taeda* está relacionado aos atributos físicos e químicos do solo;
III. As áreas menos produtivas são responsivas à fertilização enquanto as mais produtivas não respondem;
IV. Os sítios mais produtivos de *Pinus taeda* possuem maior uniformidade do povoamento.

Diante das hipóteses formuladas, o presente trabalho possui os seguintes objetivos específicos:

I. Caracterizar o efeito dos atributos do solo no crescimento do *Pinus taeda* no sul Brasil;
II. Determinar os efeitos da fertilização com e sem desbaste na produção de madeira;
III. Avaliar a influência dos atributos do solo, clima e povoamento na resposta da produtividade do *Pinus taeda* em plantios fertilizados e fertilizados com desbaste.

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Descrição da área experimental

O presente estudo faz parte da rede experimental do programa cooperativo Produtividade Potencial do *Pinus* no Brasil – PPPIB (INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS – IPEF), financiado por 9 empresas florestais, em parceria com a Universidade de São Paulo – USP e coordenado pelo IPEF. O principal objetivo do projeto PPPIB é estudar o balanço e a alocação de carbono em plantações de *Pinus* no Brasil sob diferentes métodos de manejo.

A partir do banco de dados de inventário da rede experimental de parcelas quadrigêmeas do PPPIB, selecionou-se 266 parcelas de *Pinus taeda* plantadas entre 1999 e 2003 e instaladas entre 2007 e 2008. As 266 parcelas estão distribuídas em 67 blocos (Figura 1), os quais são formados por quatro parcelas submetidas à um delineamento fatorial 2^2 - dois níveis de fertilização e dois níveis de desbaste.

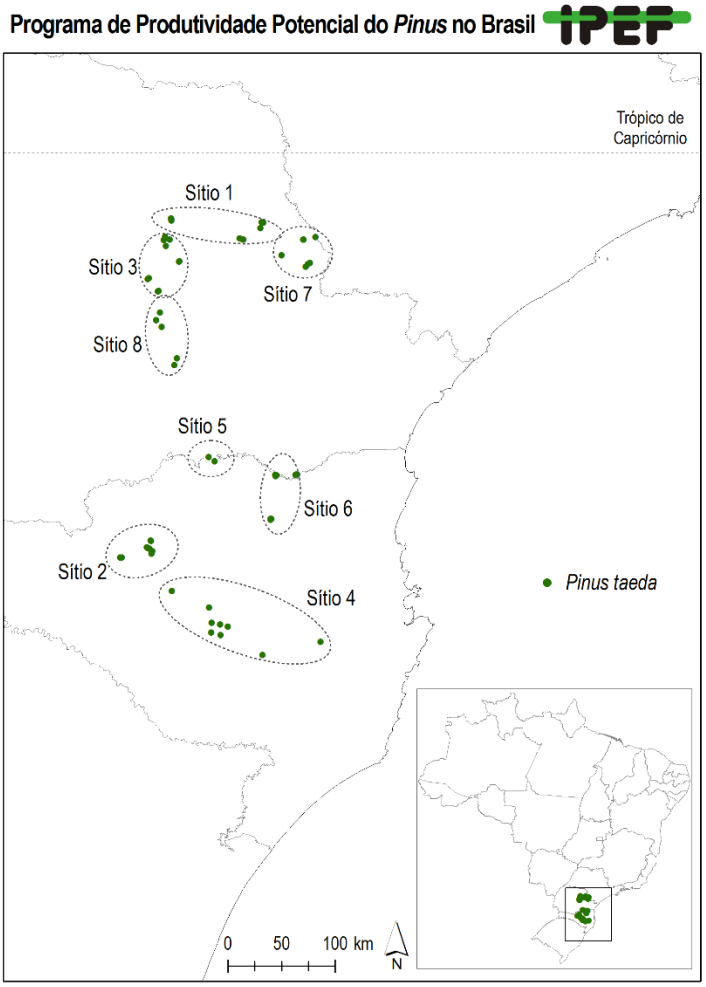

Figura 1 – Localização dos sítios distribuídos nos estados do Paraná e Santa Catarina

O delineamento experimental deste trabalho consiste nos seguintes tratamentos: sem desbaste não fertilizado (controle - **C**), sem desbaste fertilizado (**F**), desbastado não fertilizado (**D**) e desbastado fertilizado (**DF**) (detalhamento dos tratamentos nos itens 2.2.3 e 2.2.4).

No início da instalação do projeto, todos os sítios foram compostos por 9 blocos, totalizando 36 parcelas. Porém, algumas parcelas foram excluídas nos sítios 3, 5, 7 e 8 (Tabela 1) devido à diversos motivos.

Os blocos estão localizados nos talhões comerciais das empresas participantes do projeto PPPIB (Arauco do Brasil, Florestal Vale do Corisco, Juliana Florestal, Klabin S.A., Masisa, Renova Floresta e Rigesa), distribuídos em 8 diferentes cidades nos estados do Paraná e de Santa Catarina (Figura 1), possuindo variabilidade climática e edáfica (Tabelas 1 e 2).

Tabela 1 – Localização e descrição climática dos sítios experimentais

Sitio	COD	Região	UF	N.Blocos	N.Parcelas	Latitude	Longitude	Altitude	Clima
#	-	-	-	#	#	(°)	(°)	(m)	-
1	AR	Arapoti	PR	11	44	-24,20	-50,23	765	Cfa/Cfb
2	CD	Caçador	SC	9	36	-26,82	-50,79	1166	Cfb
3	TL	Telêmaco Borba	PR	8	32	-24,41	-50,60	830	Cfa/Cfb
4	OC	Otacílio Costa	SC	9	36	-27,46	-50,08	907	Cfb
5	TB	Três Barras	SC	6	22	-26,06	-50,22	788	Cfb
6	RN	Rio Negrinho	SC	8	32	-26,28	-49,62	861	Cfb
7	JG	Jaguariaíva	PR	8	32	-24,34	-49,51	1030	Cfb
8	PG	Ponta Grossa	PR	8	32	-24,95	-50,44	871	Cfb

COD = código; N. Blocos = quantidade de blocos por sítio; N. Parcelas = quantidade total de parcelas por sítio; Clima = classificação de Koppen

Conforme a Tabela 1, o clima de todos os sítios é classificado como subtropical úmido com verão temperado (Cfb), sendo que os sítios 1 e 3 também possuem parcelas com verão quente (Cfa), ou seja, com temperatura média do ar no mês mais quente maior que 22 °C (ALVARES et al., 2013).

Na Tabela 2 podemos observar a variação da textura, drenagem, formação e classe de solos dentro de cada sítio e entre eles. A textura das parcelas variou de muito argilosa a média arenosa com drenagem moderada a boa.

O detalhamento da classificação, profundidade e textura dos solos de cada bloco estão descritos no Apêndice A.

Tabela 2 – Variações da classe textural, nível de drenagem, grupo e formação geológica e tipos de solos predominantes dentro de cada sítio

Sitio	COD	Classe Textural	Drenagem	Grupo/ Formação	Solos predominantes
1	AR	muito argilosa a média	moderada a boa	Grupo Paraná (Devoniano) / Formação Furnas e Ponta Grossa[1]	Cambissolo, Latossolo e Argissolo
2	CD	muito argilosa a argilosa	moderada a boa	Grupo São Bento/ Formação Serra Geral[2]	Cambissolo e Nitossolo
3	TL	muito argilosa a média	moderada a boa	Grupo Itararé/ Formação Campo do Tenente[3]	Cambissolo e Latossolo
4	OC	muito argilosa a média	moderada a boa	Super-grupo Tubarão e Grupo Passa Dois/ Formação Rio do Rastro, Serra Alta e Teresina[2]	Cambissolo e Nitossolo
5	TB	muito argilosa a média argilosa	moderada a boa	Super-grupo Tubarão e Grupo Passa Dois/ Formação Rio do Rastro, Irati e Serra Alta[2]	Latossolo
6	RN	argilosa a média arenosa	boa	Grupo Itararé/ Formação Mafra e Rio do Sul[2, 4]	Cambissolo e Argissolo
7	JG	argilosa a média arenosa	boa	Grupo Castro e Paraná/ Suítes Graníticas e Furnas[3, 5]	Cambissolo e Latossolo
8	PG	muito argilosa a argilosa	moderada a boa	Grupo Paraná (Devoniano) / Formação Furnas e Ponta Grossa[1,3]	Cambissolo e Latossolo

Fonte: [1] Schneider et al. (1974); [2] DNPM (1986); [3] PARANÀ (2006); [4] Bognola (2007), [5] Fuck (1967)
AR = Arapoti; CD = Caçador; TL = Telêmaco Borba; OC = Otacílio Costa; TB = Três Barras; RN = Rio Negrinho; JG = Jaguariaíva; PG = Ponta Grossa

A Bacia Sedimentar do Paraná, segundo o Atlas Geomorfológico do Paraná (PARANÁ, 2006), é constituída principalmente de rochas cristalinas pré-Cambrianas e por rochas eo-paleozóicas afossilíferas, a qual encontra-se preenchida por depósitos marinhos e continentais. Esta Bacia engloba os grupos Paraná, Itararé, Passa Dois e São Bento, os quais possuem os sítios do presente estudo (Tabela 2).

Segundo o Serviço Geológico do Brasil (COMPANHIA DE PESQUISA E RECURSOS MINERAIS - CPRM, 2010), o domínio e unidade geológica do sítio de Caçador é de vulcanismo fissural Mesozóico do tipo plateau com predomínio de basaltos, enquanto que os demais sítios de Santa Catarina (Rio Negrinho, Três Barras e Otacílio Costa) predominam as coberturas sedimentares e vulcanos sedimentares Mesozóicas e Paleozóicas pouco a moderadamente consolidadas.

A classificação de solos utilizadas neste estudo (Tabela 2) são provenientes do levantamento de solos realizados pelas empresas e do levantamento de solos da

EMBRAPA (2011). Em 36 dos 69 blocos estudados predominam os Cambissolos, seguido dos Latossolos, que representam, respectivamente, 52% e 36% dos sítios.

Foi realizado o levantamento da procedência do material genético utilizado nas áreas de estudo detalhado na Tabela 3.

Tabela 3 – Procedência do material genético plantado, variação da data de plantio, área mensurável, densidade de plantas (N) do ano de instalação das parcelas e idade média no ano em que a fertilização e a adubação foram realizadas em cada sítio

Sitio	COD	Procedência	Plantio	Área	N	Idade Fert/Desb
(#)	-	-	(Mês/ Ano)	(m² parcela^{-1})	(arv ha^{-1})	(ano)
1	AR	APS Barra Mansa, APS Georgia - USA, PSC Barra Mansa 2000	Maio/2000 - Dez/2002	720 - 1000	690 - 1330	8,2
2	CD	PCS 2ª Geração - Georgia EUA	Jul/2002 - Nov/2003	510 - 630	1460 - 1790	5,9
3	TL	PCS Klabin PR - EUA, PCS Rigesa - EUA	Nov/2000 - Set/2001	535 - 760	1100 - 1750	7,5
4	OC	APS e PSC Klabin SC - EUA	Jun/2000 - Out/2001	480 - 620	1010 - 1830	7,5
5	TB	PSC Rigesa - Brasil	Jun/1999 - Jun/2001	550 - 670	1390 - 1690	9,1
6	RN	APS Santa Vera A, PSC Mobasa Lages, Indefinida	Jun/2000 - Jan/2003	520 - 810	1100 - 1780	7,9
7	JG	APS e PSC Pouso Alto, Indefinida	Jan/2000 - Mai/2001	510 - 815	1070 - 1880	8,4
8	PG	Indefinida	Jun/2000 - Jun/2001	750 - 790	990 - 1280	8,5

AR = Arapoti; CD = Caçador; TL = Telêmaco Borba; OC = Otacílio Costa; TB = Três Barras; RN = Rio Negrinho; JG = Jaguariaíva; PG = Ponta Grossa

A parcela mensurável é formada de 12 plantas por 8 linhas com total de 96 árvores e sua área variou de 500 a 1000 m² (Tabela 3). A bordadura de cada parcela é composta por duas linhas, totalizando 192 árvores (área total).

O inventário da área mensurável de todas as parcelas ocorreu anualmente, no segundo semestre, desde o ano de instalação do ensaio (entre 2006 e 2008), onde foram medidos o diâmetro à altura do peito (DAP) de todas as árvores da área mensurável e a altura total das três primeiras linhas do plantio e das 8 árvores dominantes (com maior DAP) da parcela.

2.2.2 Variáveis dendrométricas do povoamento

A partir dos inventários anuais foram calculados para cada parcela a densidade de árvores por hectare, altura dominante (m) e a área basal (AB, m^2 ha^{-1}).

O estoque do volume de madeira das parcelas (V, m^3 ha^{-1}) foi calculado com base nas equações volumétricas fornecidas pelas empresas do PPPIB, as quais foram geradas em função da idade, por dos modelos de Schumacher e Hall (1993 apud CAMPOS; LEITE, 2006) ou de Spurr (1952).

Através da determinação do estoque foi possível calcular o incremento médio anual (IMA, m^3 ha^{-1} ano^{-1}) e o incremento corrente anual (ICA, m^3 ha^{-1} ano^{-1}) para cada parcela.

Utilizando as medidas de altura dominante, calculou-se o índice de sítio na idade base de 15 anos através do modelo de Schumacher (CAMPOS; LEITE, 2006). Sendo que o banco de dados dos inventários realizados em cada sítio ao longo dos anos, permitiu calcular os coeficientes para a equação de índice de sítio (Eq. 1).

$$\ln(\mathrm{IS}) = \ln(\mathrm{Hd}) - 6.13025 \left(\frac{1}{15^{0.3}} - \frac{1}{\mathrm{I}^{0.3}}\right) \quad (1)$$

onde, IS = índice de sítio (m); Hd = altura dominante (m); I = idade da parcela (anos).

Para determinar o IS de cada parcela, calculou-se a média do IS das duas últimas medições (2013 e 2014), conforme descrito por Campos e Leite (2006).

2.2.2.1 Índice de uniformidade

Utilizou-se o percentual acumulado do volume em 50% das menores árvores plantadas em relação ao total da parcela (PV50) para comparar o efeito da fertilização na uniformidade dos povoamentos sem desbaste.

O PV50, descrito na Equação 2, foi proposto por Stape, Rocha e Donatti (2006) como um índice da determinação da uniformidade, o qual necessita ordenar as árvores de cada parcela do menor volume para o maior. Quanto maior o PV50, mais uniforme será a parcela.

$$PV50 = \frac{\sum V50ji}{\sum VTji} \quad (2)$$

onde, PV50 = percentual do volume de 50% das menores árvores da parcela (%); $V50_{ji}$ = Volume (m³) de 50% das árvores menores (considerando-se as falhas) na idade i da parcela j; VT_{ji} = Volume total da parcela j (m³) na idade i.

2.2.3 Fertilização

O objetivo da fertilização foi suprir nutricionalmente as plantas para que não ocorresse deficiência, eliminando o estresse por falta de macro e micronutrientes do povoamento.

A adubação foi realizada a lanço e por árvore nas parcelas dos tratamentos F e DF com as quantidades descritas na Tabela 4. A recomendação de adubação baseou-se na parcela de menor fertilidade e foi a mesma para todas as parcelas do projeto, indiferente de sua fertilidade do solo. A adubação ocorreu uma única vez entre julho de 2008 e julho de 2009 até a data de estudo.

Vale ressaltar que desde o plantio até a instalação das parcelas deste estudo, não houve entrada de nutrientes via fertilização e o controle de plantas daninhas foi realizado, sempre que necessário, para todos os tratamentos para evitar a competição interespecífica por recursos.

Tabela 4 – Quantidade de nutrientes em kg ha^{-1} adicionados via fertilização nas parcelas fertilizadas (F) e desbastadas fertilizadas (DF)

Adubo	Quantidade (kg ha^{-1})	Nutriente	Quantidade (kg ha^{-1})
		Macronutrientes	
Uréia	300	N	135
Super Fostato Simples	400	P	35
Cloreto de Pótássio	250	K	125
Calcário Dolomítico	2000	Ca	414
		Mg	190
		Micronutrientes	
Micro FTEBr12	200	B	3,6
		Cu	1,6
		Mn	4,0
		Mo	0,2
		Fe	6,0
		S	11,4
		Zn	18,0

2.2.4 Desbaste

O período de desbaste variou de acordo com o planejamento de cada empresa, o qual foi realizado entre julho de 2008 a julho de 2009, com idade média de aproximadamente 8 anos (Tabela 3).

O desbaste foi seletivo por baixo na área total de cada parcela dos tratamentos D e DF, onde retirou-se 50% das árvores mais finas da parcela (incluindo as falhas e árvores mortas), representando cerca de 20% a 30% do volume do povoamento.

Para que ocorresse uma melhor distribuição do corte das árvores dentro da parcela, esta intervenção foi realizada a cada 6 árvores aproximadamente, retirando-se as menores árvores e removendo a parte aérea destas árvores cortadas para fora da parcela.

2.2.5 Variáveis edáficas

As informações edáficas, pertencentes ao banco de dados do projeto PPPIB, foram obtidas por meio da coleta de solos de 0 a 20 cm de profundidade realizada em todas as parcelas no ano de 2008, antes do desbaste e da fertilização. Tais amostras foram submetidas à análise química (P_2O_5, K_2O, Ca, Mg, porcentagem de matéria orgânica, pH e Al^{3+}) conforme metodologia descrita por Raji et al. (2001) e análise física com dispersante para determinara o teor de areia total, silte e argila.

Apesar da fração silte/argila ser utilizada para indicar baixos teores de silte no horizonte B (EMBRAPA, 2014), esta foi calculada no presente trabalho (0 a 20 cm de profundidade) para fins comparativos entre as parcelas e não para classificar um tipo de solo.

Além das análises química e física, foi medida a profundidade do solo, amostrando um ponto no centro de cada parcela com um trado até atingir a camada de rocha do solo ou até a profundidade máxima do trado que foi de 1,50 metro.

Para posterior cálculo da capacidade de água disponível no solo, estimou-se a capacidade de campo (θ_{CC}) e o ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) de acordo com equações desenvolvidas por Giarola, Silva e Imhoff (2002) para os solos da região sul do Brasil (Tabela 6).

Tabela 5 – Equações utilizadas para a estimativa da capacidade de campo (θ_{CC}) e o ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) descritas por Giarola, Silva e Imhoff (2002)

Variável	Equação	R^2	p-value
θ_{PMP} ($cm^3\ cm^{-3}$)	θ_{PMP} = - 0,031 + 0,005 Silte + 0,003 Argila	0,81	<0,0001
θ_{CC} ($cm^3\ cm^{-3}$)	θ_{CC} = 0,081 + 0,005 Silte + 0,004 Argila	0,79	<0,0001

Assim, multiplicando a profundidade do solo com a diferença entre a capacidade de campo (θ_{CC}) e o ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), foi possível estimar a capacidade de água disponível no solo (CAD) em milímetros (mm) para cada parcela (Eq. 3).

$$CAD = 1000\ (\theta_{CC} - \theta_{PMP})\ p \qquad (3)$$

onde, CAD = capacidade de água disponível no solo (mm), θ_{CC} = capacidade de campo (cm^3 água cm^{-3} solo), θ_{PMP} = ponto de murcha permanente (cm^3 água cm^{-3} solo) e p = profundidade do solo (m).

2.2.6 Variáveis climáticas

Os dados mensais de precipitação pluviométrica, temperatura máxima, média e mínima, umidade relativa do ar, radiação global, insolação e velocidade do vento dos sítios, desde o plantio até dezembro de 2014, foram fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, Sistema Meteorológico do Paraná - SIMEPAR e Centro de Informações e Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina - CIRAM.

Tabela 6 – Localização das estações meteorológicas e intervalo de dados utilizados para as variáveis climáticas de cada região e seus respectivos blocos

Sítio	Blocos	Estação	Local da estação	Altitude (m)	Latitude (°)	Longitude (°)	Período dos dados
1 - AR	1 a 9	SIMEPAR	Jaguariaíva - PR	900	-24,23	-49,68	2000 a 2014
1 - AR	10 e 11	SIMEPAR	Telêmaco Borba - PR	768	-24,33	-50,62	2000 a 2014
2 - CD	1 a 9	CIRAM	Caçador - SC	945	-26,82	-50,99	2002 a 2014
3 - TL	1 a 8	SIMEPAR	Telêmaco Borba - PR	768	-24,33	-50,62	2000 a 2014
4 - OC	1 a 9	INMET	Lages - SC	937	-27,81	-50,33	2000 a 2014
5 - TB	1 a 6	CIRAM	Major Vieira - SC	780	-26,37	-50,34	1999 a 2014
6 - RN	1 a 8	CIRAM	Rio Negrinho - SC	862	-26,25	-49,58	2000 a 2010
6 - RN	1 a 8	INMET	Rio Negrinho - SC	869	-26,23	-49,57	2011 a 2014
7 - JG	1 a 8	SIMEPAR	Jaguariaíva - PR	900	-24,23	-49,68	2000 a 2014
8 - PG	1 a 8	SIMEPAR	Ponta Grossa - PR	888	-24,33	-50,62	2000 a 2014

AR = Arapoti; CD = Caçador; TL = Telêmaco Borba; OC = Otacílio Costa; TB = Três Barras; RN = Rio Negrinho; JG = Jaguariaíva; PG = Ponta Grossa

Todos os dados climáticos utilizados neste estudo foram consistidos e verificados quanto aos valores discrepantes, os quais foram excluídos do banco de dados e os seus valores faltantes estimados por regressão linear com a variável que mais se correlacionou ou, como o caso da precipitação e velocidade do vento, os dados faltantes foram substituídos por dados da estação meteorológica mais próxima e com altitude semelhante.

2.2.6.1 Déficit de pressão de vapor (DPV)

Segundo metodologia descrita no boletim da FAO 56 por Allen et al. (1998), foi calculado o déficit de pressão de vapor para indicar a demanda atmosférica por água (Eq.4).

$$DPV = es - ea \tag{4}$$

onde, DPV = déficit de pressão de vapor (kPa); es = pressão de saturação de vapor diária (kPa); ea = pressão atual de vapor diária (kPa).

Sendo que a pressão de saturação de vapor e a pressão atual de vapor foram calculadas conforme descrito nas equações 5, 6 e 7.

$$\boldsymbol{es} = \frac{\left(\mathbf{0{,}6108}\ e^{\frac{\mathbf{17{,}27}\ \boldsymbol{Tmax}}{\boldsymbol{Tmax}+\mathbf{237{,}3}}}\right)+\left(\mathbf{0{,}6108}\ e^{\frac{\mathbf{17{,}27}\ \boldsymbol{Tmin}}{\boldsymbol{Tminx}+\mathbf{237{,}3}}}\right)}{\mathbf{2}} \tag{5}$$

onde, es = pressão de saturação de vapor diária (kPa); Tmax = temperatura máxima diária (°C); Tmin = temperatura mínima diária (°C).

$$ea = es\ \left(\frac{UR}{100}\right) \tag{6}$$

onde, ea = pressão atual de vapor (kPa), es = pressão de saturação de vapor (kPa) e UR = umidade relativa do ar diária (%).

Quando a umidade relativa do ar (UR) não foi medida ou os dados estavam inconsistentes, a pressão atual de vapor foi calculada segundo metodologia descrita por Allen et al. (1998).

$$ea' = 0{,}611 \exp\left(\frac{17{,}27\, Tmin}{Tmin+237{,}3}\right) \quad (7)$$

onde: ea'= pressão atual de vapor, Tmin = temperatura mínima diária (°C).

2.2.6.2 Evapotranspiração de referência (ETo)

A evapotranspiração de referência diária foi calculada por meio da equação de Penman-Monteith parametrizada pela FAO (ALLEN et al., 1998) descrita pela equação (8). Para esta equação, as variáveis foram calculadas através dos dados meteorológicos das estações de cada sítio, sendo que para o cálculo da densidade de fluxo de calor no solo (G) foi calculado mensalmente, conforme metodologia descrita por Allen et al. (1998).

$$\boldsymbol{ET_o} = \frac{\mathbf{0{,}408\Delta(Rn-G)+\gamma\left(\frac{900U_2}{T+273}\right)(DPV)}}{\mathbf{\Delta+\gamma(1+0{,}34U_2)}} \quad (8)$$

onde:

ET_o = evapotranspiração de referência (mm d^{-1}); Rn = saldo de radiação (MJ m^{-2} d^{-1}); G = densidade de fluxo de calor no solo (MJ m^{-2} d^{-1}); Δ = declinação da curva de saturação do vapor da água (kPa $^oC^{-1}$); U_2 = velocidade do vento (média diária) a 2 m acima da superfície do solo (m s^{-1}); T = temperatura média diária do ar (°C); DPV = déficit de pressão de vapor (kPa); γ = constante psicométrica (kPa $^oC^{-1}$).

2.2.7 Análise estatística

As análises estatísticas foram realizadas no software R (versão 3.2.0). Onde a homogeneidade das variâncias e a normalidade dos dados foram verificadas para posteriores análises.

O teste t-Student foi utilizado para comparar dados pareados do estoque de volume. Quando os dados não apresentaram distribuição normal aplicou-se o teste de Wilcoxon, o qual é utilizado para dados não paramétricos.

Aplicou-se o teste de Tukey a 5% de significância para comparar a diferença das variáveis do povoamento com as classes de solo.

Para correlacionar duas variávies, realizou-se a correlação de Spearman para os dados não paramétricos e correlação de Pearson para os dados paramétricos, utilizando as variávies descritas na Tabela 7.

A transformação dos dados foi realizada para aplicar a análise de Stepwise, a qual requer distribuição normal. Através da análise multivariada de Stepwise, considerou-se a diferença do estoque de madeira entre os tratamentos fertilizado e controle (V_F – V_C) e debastado e fertilizado e somente desbastado (V_{DF} – V_D) como variáveis dependentes e as variáveis climáticas, edáficas e de povoamento como variáveis independentes (Tabela 7).

Tabela 7 – Lista de variáveis do solo, clima e povoamento utilizadas para as correlações de Pearson e Spearman e para a análise multivariada de Stepwise

Categoria	Variáveis
Solo	MOS, pH, P, K, Ca, Mg, Al + H, CTC, S, V, Argila, Silte, Areia, Silte/Argila, CAD, Profundidade
Clima	Precipitação, Temperaturas máxima e mínima, UR, DPV, ETo
Povoamento	Densidade de árvores, Idade, Área Basal, Índice de Sítio, Altitude, PV50, IMA, ICA

MOS = matéria orgânica do solo; Al+H = acidez potencial; CTC = capacidade de troca catiônica a pH 7; S = soma de bases, V = saturação de bases; CAD = capacidade de água disponível no solo; UR = umidade relativa do ar; DPV = déficit de pressão de vapor; ETo = evapotranspiração de referência; PV50 = índice de uniformidade do povoamento; IMA = incremento médio anual; ICA = incremento corrente anual.

O melhor modelo foi selecionado segundo o Critério de Informação de Akaike – AIC (AKAIKE, 1974). Assim, foi possível avaliar a interação entre as variáveis independentes (Tabela 7) com a resposta positiva da fertilização e do desbaste no estoque de volume das parcelas.

2.3 Resultados

2.3.1 Características edáficas

Através da análise química do solo foi possível observar a variação da fertilidade e matéria orgânica dentro de cada sítio e entre eles (a análise completa por bloco encontra-se no Apêndice B).

Vale ressaltar, que tais análises foram realizadas no ano de instalação do projeto, ou seja, sem qualquer diferenciação nas práticas silviculturais entre as parcelas, conforme descrito anteriormente.

Na Figura 2 observa-se o valor médio (linha cinza) e a amplitude de variação entre os atributos químicos do solo para cada sítio, os quais são apresentados em cada gráfico por ordem de sítio (1 a 8; Tabela 1).

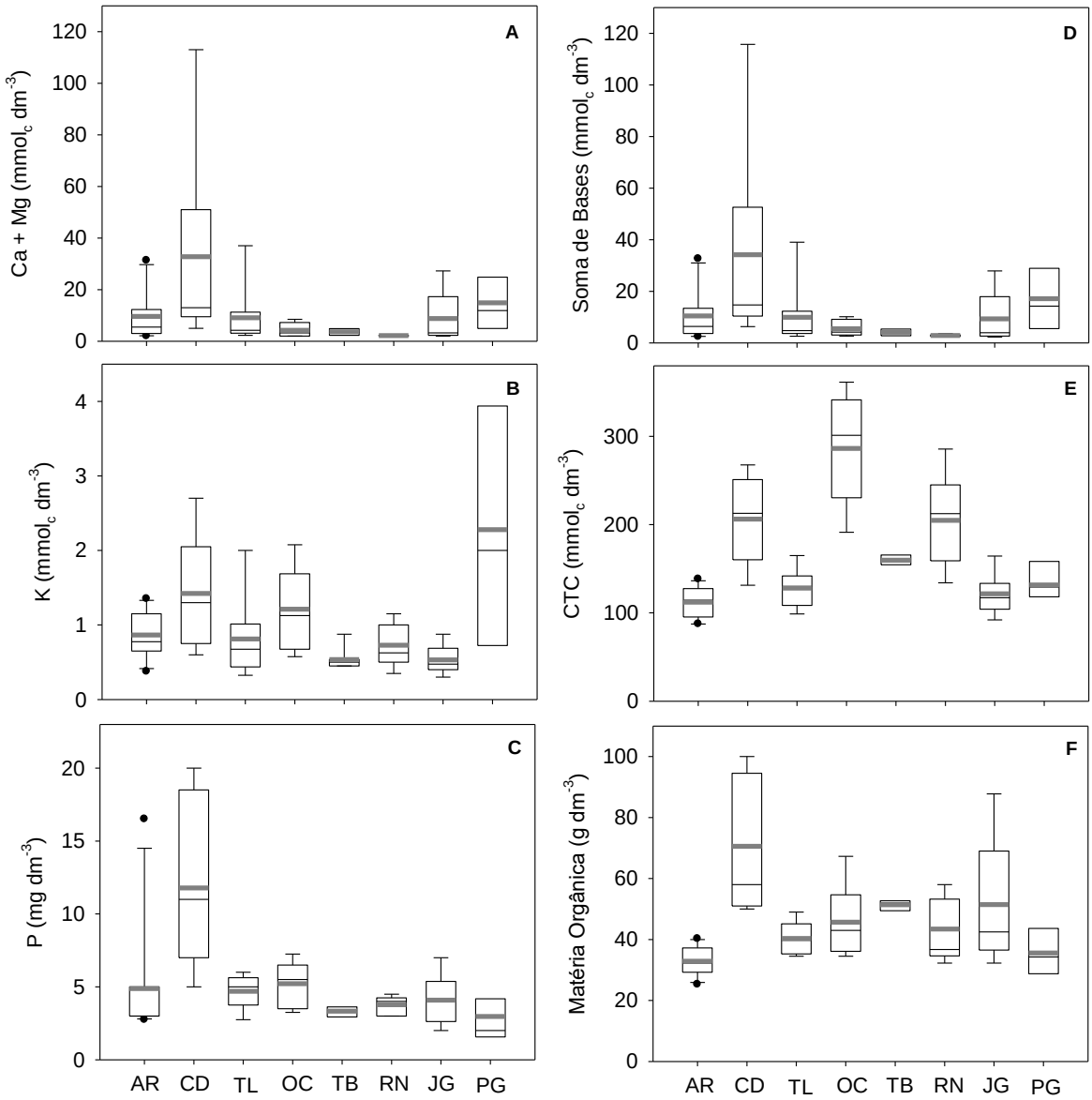

Figura 2 – Variabilidade da soma de cálcio e magnésio (Ca + Mg), potássio (K), fósforo (P), soma de bases, capacidade de troca de cátions a pH 7 (CTC) e matéria orgânica do solo em cada sítio na camada 0 – 20 cm. As linhas cinzas mais espessas representam o valor médio do sítio. AR = Arapoti; CD = Caçador; TL = Telêmaco Borba; OC = Otacílio Costa; TB = Três Barras; RN = Rio Negrinho; JG = Jaguariaíva; PG = Ponta Grossa

O potássio, a CTC e a matéria orgânica do solo foram os fatores com maior variação entre os sítios e entre as parcelas do mesmo sítio. Sendo que todos os sítios apresentaram altos teores de matéria orgânica no solo (MOS).

Utilizando o teor de argila, silte e areia provenientes da análise física do solo na camada 0 - 20 cm foi possível classificar a textura do solo de cada parcela, sendo que a análise física completa e a classificação textural por blocos encontram-se no Apêndice A.

A abrangência da textura do solo das parcelas foi desde a classe muito argilosa até a arenosa, como observa-se na Figura 3. Sendo que o sítio de Arapoti foi a região com maior variação no teor de argila, e Jaguariaíva foi o único a conter parcela arenosa, representando o sítio com os menores teores de argila.

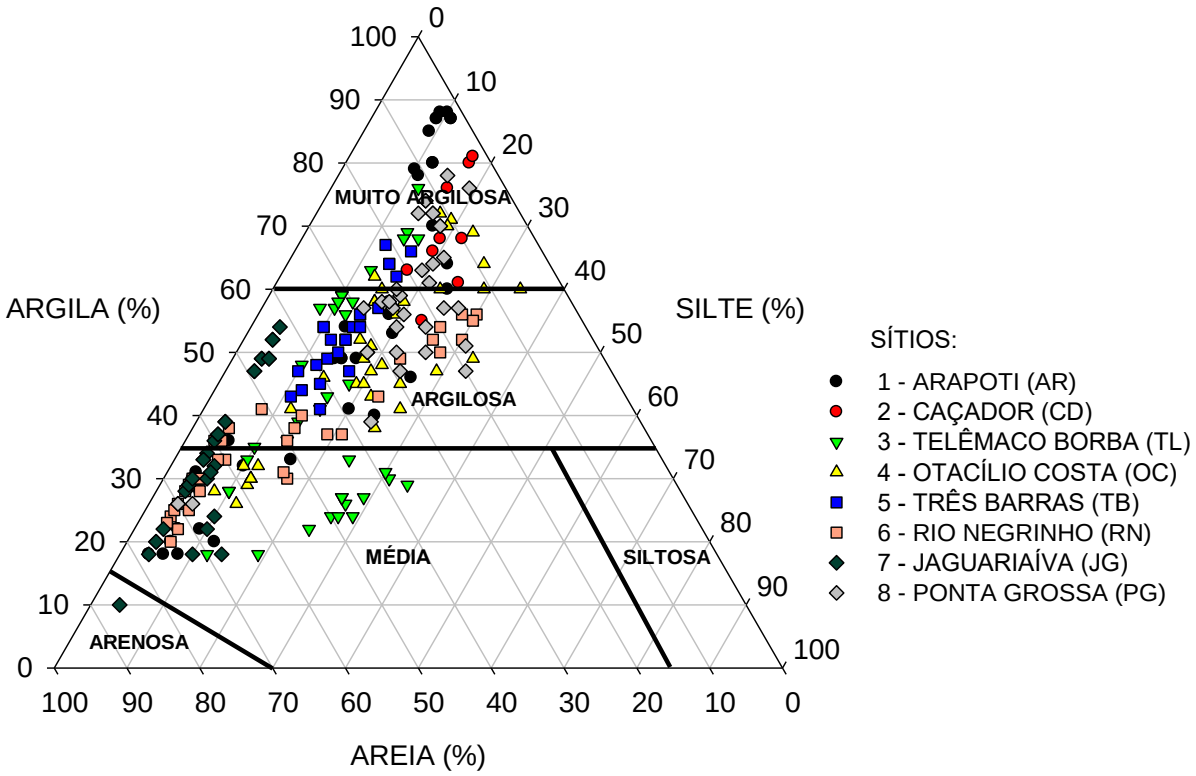

Figura 3 - Classificação da textura do solo das parcelas gêmeas de cada sítio

Os sítios de Rio Negrinho e Otacílio Costa possuem solos mais rasos (com 30 e 40 cm de profundidade mínima, respectivamente) e foram os locais com maior variação da água no solo dentro do sítio, os quais estão fortemente relacionados com a profundidade do solo (Figura 4).

Em Telêmaco Borba e Três Barras, apesar da variação do CAD dentro desses sítios, a profundidade das parcelas até 1,50 m não variou, mostrando a dependência e variação da textura do solo no armazenamento de água nestes sítios.

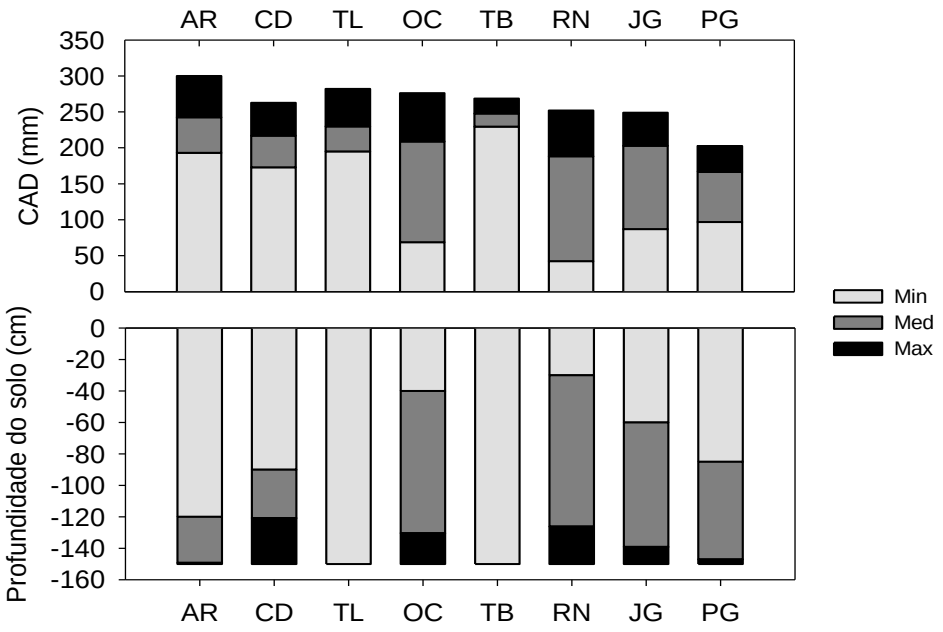

Figura 4 – Valores máximos (Max), médios (Med) e mínimos (Min) da capacidade de água disponível no solo (CAD) e profundidade do solo das parcelas dentro de cada sítio. AR = Arapoti; CD = Caçador; TL = Telêmaco Borba; OC = Otacílio Costa; TB = Três Barras; RN = Rio Negrinho; JG = Jaguariaíva; PG = Ponta Grossa

2.3.2 Características climáticas

A variação climática ao longo dos anos das cidades do Paraná e Santa Catarina, as quais abrigam as estações meteorológicas utilizadas neste estudo, estão representadas nas Figuras 5 e 6.

Dentre os locais estudados, observarmos que em Telêmaco Borba houve maior amplitude térmica (média do período avaliado variando de 26,4 a 13,5 °C) e em Jaguariaíva foi a cidade com menor quantidade de chuvas distribuídas ao longo dos anos estudados (em média 1435 mm).

Ao avaliar a precipitação anual entre 2000 a 2014, podemos afirmar que em 2006 foi o ano mais seco na região Sul, onde houve uma redução de 27% de chuva comparado com a média dos demais anos para os 8 sítios. Neste ano, Jaguariaíva foi o local com menor precipitação, recebendo apenas 963 mm de chuva, o que representou 33% de redução comparado à sua média histórica. Em 2011, ano com maior volume de chuva em todas as cidades, a precipitação mínima variou de 1600 mm em Ponta Grossa a 2250 mm em Lages.

Em consequência à estiagem de 2006, houve redução da umidade relativa do ar e aumento do DPV nesse período. As cidades de Telêmaco Borba e Caçador foram

os locais que atingiram maiores valores de DPV no período estudado: 2,1 kPa e 1,9 kPa, respectivamente.

As temperaturas mínimas mensais das estações meteorológicas variaram de 4,2 °C a 18,2 °C e as máximas variaram de 17,1 °C a 29,8 °C.

Assim, observa-se que todas as cidades estudadas estão entre a faixa adequada para o crescimento do *P. taeda*. Segundo o zoneamento climático realizado para a espécie, em áreas de ocorrência natural nos EUA, a precipitação média anual varia de 1020 a 1520 mm, enquanto que a temperatura média do mês mais quente (julho) é de 27 °C e do mês mais frio (janeiro) varia de 4 °C a 16 °C (BAKER; LANGDON, 1990).

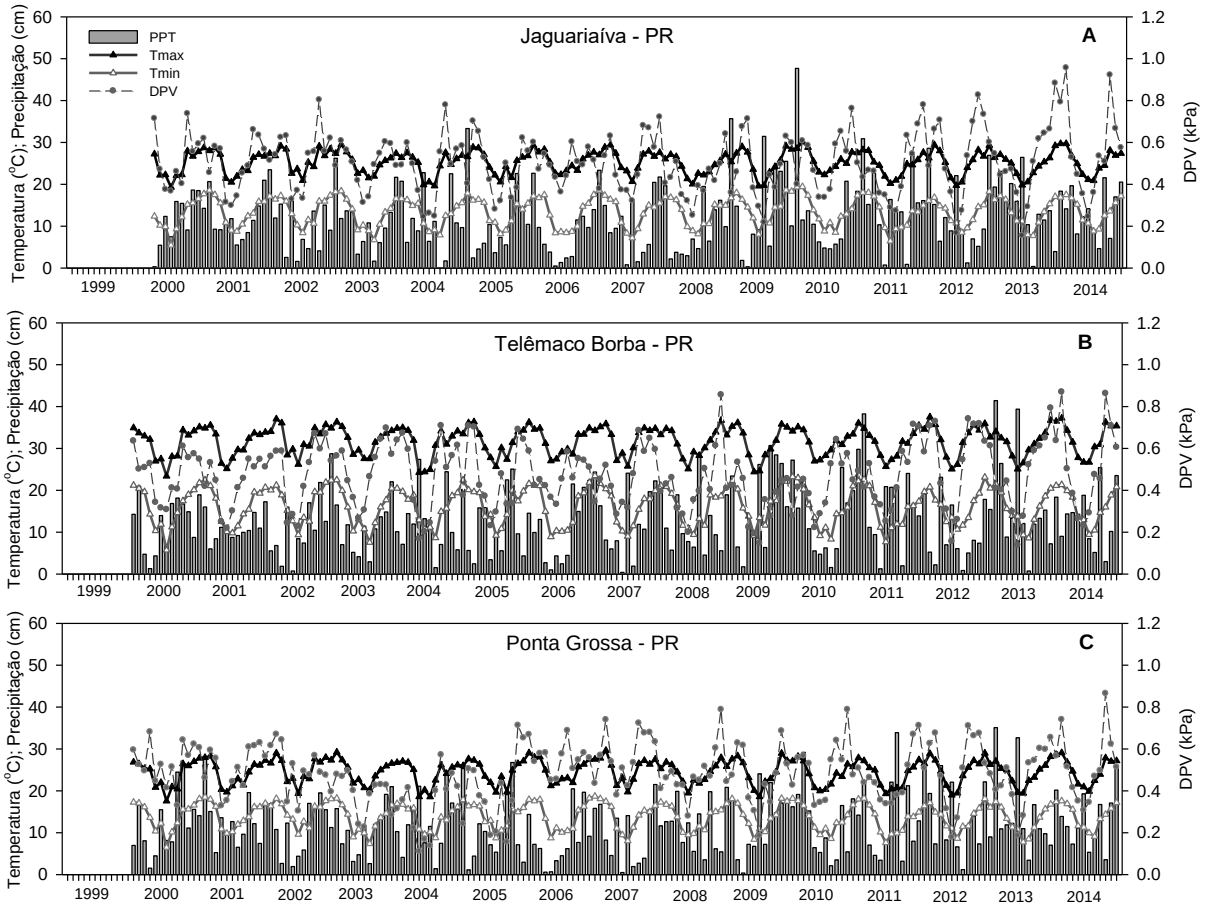

Figura 5 - Precipitação pluviométrica mensal (PPT), temperatura máxima mensal (Tmax), temperatura mínima mensal (Tmin) e déficit de pressão de vapor (DPV) das cidades localizadas no estado do Paraná (dados provenientes da estação meteorológica do SIMEPAR no período do plantio até a última avaliação – jan/2000 a dez/2014)

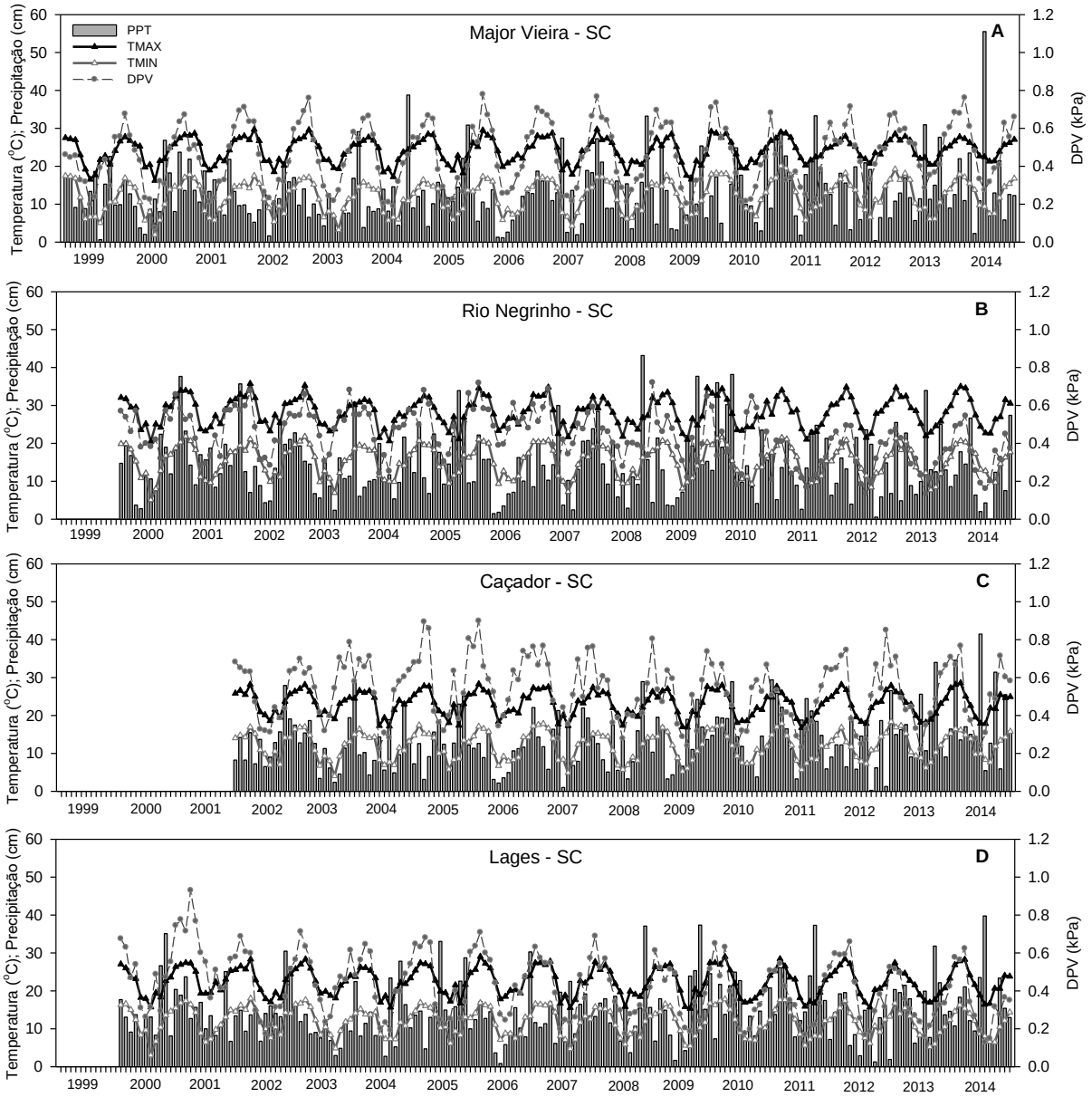

Figura 6 - Precipitação pluviométrica mensal (PPT), temperatura máxima mensal (Tmax), temperatura mínima mensal (Tmin) e déficit de pressão de vapor (DPV) das cidades localizadas no estado de Santa Catarina (dados provenientes das estações meteorológicas do CIRAM e do INMET no período do plantio até a última avaliação – jan/1999 a dez/2014)

2.3.3 Características do povoamento

Utilizando a equação de IS, foram calculadas as curvas guias para todos os sítios, as quais pode-se visualizar a ampla variação da altura dominante e consequentemente do índice de sítio de cada parcela (Figura 8).

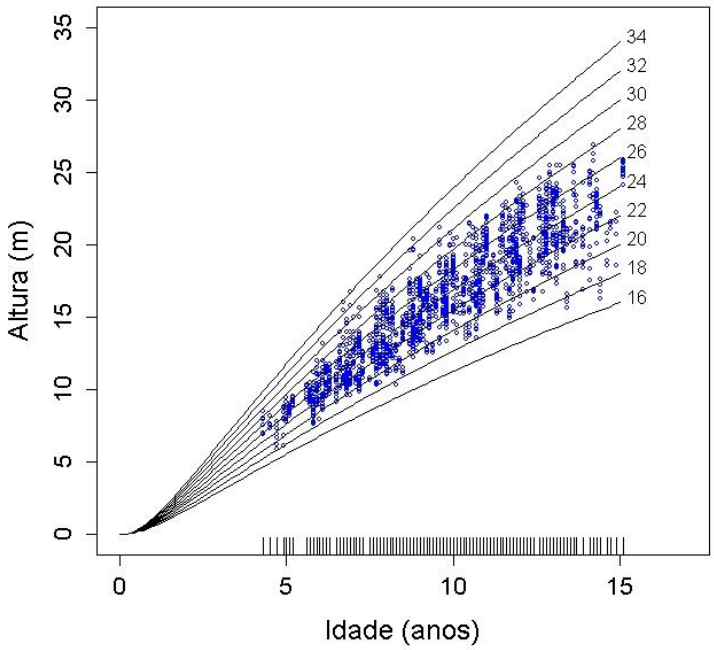

Figura 7 – Curvas-guias de índice de sítio para todas as parcelas dos tratamentos controle, fertilizado, desbastado e debastado com fertilização (idade base de 15 anos, Eq. 9). Os pontos representam a altura dominante ao longo dos anos das parcelas estudadas

Em 2014, onde as parcelas variaram entre 11 a 15 anos, a amplitude do IS foi de 16 a 30 metros (Figura 7). Tal amplitude mostra a heterogeneidade do conjunto de parcelas estudadas, as quais sofrem influência de diversos fatores ambientais, genéticos e silviculturais.

Houve uma boa relação do índice de sítio com o incremento médio anual para as parcelas (R^2 = 60%; P<0,001), mostrando que a produtividade das áreas estudadas podem ser expressas tanto em IMA quanto em IS (Figura 8).

No tratamento controle, as parcelas de Três Barras e Telêmaco Borba possuíram os maiores valores de IMA e IS, enquanto que em Jaguariaíva e Rio Negrinho ocorreram os menores valores para ambas as variáveis (Figura 8).

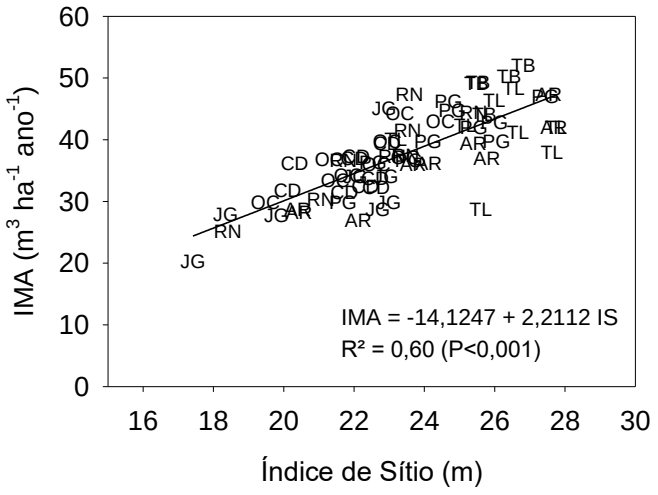

Figura 8 – Relação do incremento médio anual (IMA) com o índice de sítio (IS) para as parcelas do tratamento controle. AR = Arapoti; CD = Caçador; TL = Telêmaco Borba; OC = Otacílio Costa; TB = Três Barras; RN = Rio Negrinho; JG = Jaguariaíva; PG = Ponta Grossa

Os maiores valores de IS foram encontrados em Telêmaco Borba e Três Barras, destacando-se o tratamento desbastado e fertilizado (DF) com valores de 26,5 m e 26,2 m, respectivamente (Tabela 8).

O IMA médio dos sítios nos tratamentos C e F variou, respectivamente, de 31 a 49 m³ ha^{-1} ano^{-1} e 33 a 49 m³ ha^{-1} ano^{-1} (Tabela 8). A fertilização aumentou o valor do IMA no sítio menos produtivo, de 31 para 32,7 m³ ha^{-1} ano^{-1} (sítio 7 - Jaguariaíva). Tal comportamento também ocorreu para as variáveis DAP, altura, IS e volume em Jaguariaíva.

O sítio de Três Barras, com maior produtividade média (49 m³ ha^{-1} ano^{-1}), não foi responsivo à fertilização em nenhuma das variáveis avaliadas (Tabela 8). Em Ponta Grossa houve a maior resposta da fertilização no estoque médio de madeira, com um ganho de 8% no volume médio das parcelas, seguido de Jaguariaíva com 6%.

O desbaste nas parcelas fertilizadas (DF) aumentou os valores das variáveis DAP, altura, AB, IS e volume em todos os sítios estudados quando comparado com o tratamento desbastado (D), com exceção da altura média no sítio 8 - Ponta Grossa.

O sítio que mais respondeu positivamente à fertilização com desbaste no volume médio foi em Telêmaco Borba, com aumento de 23%. Enquanto que em Jaguariaíva e em Três Barras o ganho em volume médio do tratamento DF, comparado com D, foi de apenas 5 e 2 %, respectivamente.

Tabela 8 – Descrição das médias das variáveis dendrométricas dos sítios para os tratamentos controle (C), fertilizado (F), desbastado (D), desbastado e fertilizado (DF), calculadas a partir do inventário do ano de 2014, com idade média de 13 anos (continua)

	C	F	D	DF
Sítios				
1 - AR				
Número de parcelas (#)	11	11	11	11
Idade (ano)	13 (0,26)	13 (0,26)	13 (0,26)	13 (0,26)
Densidade (arv ha^{-1})	984 (47,4)	956 (54,2)	630 (19,9)	619 (19,1)
DAP (m)	24,4 (0,74)	24,5 (0,67)	27 (0,53)	27,6 (0,6)
Altura (m)	20,6 (0,66)	21,2 (0,76)	20,8 (0,71)	21,5 (0,79)
AB (m² ha^{-1})	46,5 (1,4)	45,9 (1,56)	36,7 (1,29)	37,7 (1,21)
IS (m)	24,4 (0,78)	25,3 (0,84)	24,5 (0,74)	25,3 (0,79)
Volume (m³ ha^{-1})	462,9 (21,8)	473,2 (25,6)	361,8 (20,3)	386,5 (23,8)
IMA (m³ ha^{-1} ano^{-1})	35,8 (1,84)	36,5 (1,98)	-	-
2 - CD				
Número de parcelas (#)	9	9	9	9
Idade (ano)	11,9 (0,23)	11,9 (0,23)	11,9 (0,23)	11,9 (0,23)
Densidade (arv ha^{-1})	1633 (36)	1605 (27,2)	824 (18,8)	826 (14,1)
DAP (m)	21,3 (0,26)	22,0 (0,25)	27,1 (0,23)	27,6 (0,39)
Altura (m)	17,4 (0,4)	17,5 (0,41)	17,9 (0,46)	18,2 (0,47)
AB (m² ha^{-1})	60,9 (1,63)	63,6 (1,92)	48,5 (1,48)	50,2 (1,47)
IS (m)	21,9 (0,33)	21,9 (0,38)	22,1 (0,33)	22,4 (0,34)
Volume (m³ ha^{-1})	413,4 (15,2)	429,3 (18)	313,1 (13,2)	326,9 (13,9)
IMA (m³ ha^{-1} ano^{-1})	34,6 (0,96)	35,9 (1,28)	-	-
3 - TL				
Número de parcelas (#)	8	8	8	8
Idade (ano)	13,1 (0,12)	13,1 (0,12)	13,1 (0,14)	13,1 (0,12)
Densidade (arv ha^{-1})	1412 (47,4)	1463 (69,2)	808 (26,3)	796 (31,9)
DAP (m)	21,9 (0,56)	21,7 (0,5)	25,6 (0,69)	26,9 (0,69)
Altura (m)	20,1 (0,5)	20,2 (0,42)	19,8 (0,57)	21,6 (0,37)
AB (m² ha^{-1})	56,1 (1,83)	56,6 (1,12)	42,2 (1,53)	46,2 (1,94)
IS (m)	26,1 (0,52)	26,0 (0,53)	25,9 (0,51)	26,5 (0,32)
Volume (m³ ha^{-1})	535,1 (28,4)	537,1 (16,0)	390,7 (27,5)	481,2 (26,8)
IMA (m³ ha^{-1} ano^{-1})	40,9 (2,1)	41,1 (1,41)	-	-
4 - OC				
Número de parcelas (#)	9	9	9	9
Idade (ano)	13,3 (0,17)	13,4 (0,16)	13,3 (0,17)	13,3 (0,17)
Densidade (arv ha^{-1})	1340 (61,3)	1269 (67)	842 (44,1)	796 (50)
DAP (m)	24,3 (0,63)	24,7 (0,53)	28,7 (0,78)	29,8 (0,63)
Altura (m)	18,4 (0,31)	18,9 (0,19)	18,9 (0,4)	19,5 (0,16)
AB (m² ha^{-1})	64,5 (1,53)	63,7 (1,41)	55,4 (2,33)	56,1 (1,44)
IS (m)	22,3 (0,49)	22,8 (0,34)	22,2 (0,57)	22,9 (0,3)
Volume (m³ ha^{-1})	493,9 (15,7)	504,0 (12,6)	444,9 (26,5)	465,4 (10,1)
IMA (m³ ha^{-1} ano^{-1})	37,2 (1,52)	37,7 (1,03)	-	-
5 - TB				
Número de parcelas (#)	5	5	6	6
Idade (ano)	13,9 (0,49)	13,9 (0,49)	14,1 (0,45)	14,1 (0,45)
Densidade (arv ha^{-1})	1479 (6,6)	1451 (39,2)	916 (17,8)	915 (11,8)
DAP (m)	23,8 (0,3)	23,8 (0,15)	26,2 (0,17)	26,4 (0,16)
Altura (m)	23,0 (0,65)	23,3 (0,53)	23,5 (0,48)	23,8 (0,48)
AB (m² ha^{-1})	67,3 (1,67)	66,4 (1,77)	50,3 (0,75)	50,8 (0,5)
IS (m)	26,0 (0,27)	26,0 (0,23)	25,9 (0,25)	26,2 (0,23)
Volume (m³ ha^{-1})	680,1 (30,5)	678,0 (32,1)	515,4 (12,1)	526,9 (9,7)
IMA (m³ ha^{-1} ano^{-1})	49,0 (1,31)	48,8 (0,82)	-	-

Tabela 8 – Descrição das médias das variáveis dendrométricas dos sítios para os tratamentos controle (C), fertilizado (F), desbastado (D), desbastado e fertilizado (DF), calculadas a partir do inventário do ano de 2014, com idade média de 13 anos

(conclusão)

	C	F	D	DF
6 - RN				
Número de parcelas (#)	8	8	8	8
Idade (ano)	13,6 (0,43)	13,6 (0,43)	13,6 (0,43)	13,6 (0,43)
Densidade (arv ha^{-1})	1431 (60)	1343 (54,7)	740 (6,7)	746 (6,8)
DAP (m)	22,9 (0,43)	23,5 (0,26)	28 (0,33)	28,7 (0,4)
Altura (m)	18,2 (0,95)	18,4 (0,96)	19,3 (1,03)	20,1 (1,14)
AB (m^2 ha^{-1})	61,2 (3,16)	61,1 (2,12)	46,3 (1,24)	49,4 (1,43)
IS (m)	22,4 (0,7)	22,7 (0,72)	21,9 (0,67)	22,8 (0,72)
Volume (m^3 ha^{-1})	519,9 (47,4)	519,7 (38)	403,0 (28,9)	444,9 (33,1)
IMA (m^3 ha^{-1} ano^{-1})	37,6 (2,61)	37,8 (1,87)	-	-
7 - JG				
Número de parcelas (#)	8	8	8	8
Idade (ano)	14,3 (0,18)	14,3 (0,18)	14,3 (0,18)	14,3 (0,18)
Densidade (arv ha^{-1})	1263 (87,4)	1209 (58,2)	755 (4,2)	726 (5)
DAP (m)	22,9 (0,59)	23,5 (0,45)	26,2 (0,54)	26,7 (0,44)
Altura (m)	18,6 (0,65)	19,3 (0,42)	18,6 (0,6)	19,2 (0,55)
AB (m^2 ha^{-1})	53,4 (3,13)	54,7 (3,08)	42,1 (1,73)	42,1 (1,47)
IS (m)	21,1 (0,8)	21,6 (0,6)	21,0 (0,71)	21,5 (0,56)
Volume (m^3 ha^{-1})	440,8 (33,1)	466,7 (31,8)	338,3 (23,8)	355,2 (20,4)
IMA (m^3 ha^{-1} ano^{-1})	31,0 (2,52)	32,7 (2,24)	-	-
8 - PG				
Número de parcelas (#)	11	11	5	5
Idade (ano)	13,8 (0,15)	13,8 (0,15)	13,7 (0,24)	13,7 (0,24)
Densidade (arv ha^{-1})	1124 (23,8)	1168 (16,3)	696 (79,6)	696 (54,7)
DAP (m)	24,1 (0,4)	24,2 (0,29)	26,8 (0,55)	27,4 (0,54)
Altura (m)	22,5 (0,47)	22,5 (0,49)	22 (0,4)	21,9 (0,48)
AB (m^2 ha^{-1})	53,1 (1,38)	56,3 (1,66)	39,5 (3,06)	41,8 (2,55)
IS (m)	24,9 (0,55)	25,0 (0,62)	23,6 (0,46)	23,8 (0,68)
Volume (m^3 ha^{-1})	576,9 (27,2)	622,2 (30)	415,0 (35,4)	440,6 (32,2)
IMA (m^3 ha^{-1} ano^{-1})	42,0 (2,11)	45,3 (2,44)	-	-

Nota: AR = Arapoti; CD = Caçador; TL = Telêmaco Borba; OC = Otacílio Costa; TB = Três Barras; RN = Rio Negrinho; JG = Jaguariaíva; PG = Ponta Grossa.
Erro padrão da média entre parênteses.

Através de uma descrição geral dos tratamentos em cada sítio (Tabela 8), verifica-se o efeito positivo da fertilização com e sem desbaste no crescimento e produtividade dos povoamentos de *P. taeda*.

Para aprofundar a discussão deste tema, as variáveis dendrométricas e de produção foram avaliadas em cada sítio individualmente por tratamento para observarmos o efeito da fertilização e do desbaste dentro dos sítios.

Estas diferenças de respostas da fertilização e da fertilização associado ao desbaste ao longo do crescimento, demonstram a importância de estudar os fatores que influenciam o crescimento dos povoamentos para compreender e explicar tais comportamentos.

2.3.4 Influência do solo no crescimento do *Pinus taeda*

Foi comparado o crescimento do povoamento nos diferentes tipos de solos das parcelas controle (sem fertilização e sem desbaste) utilizando o teste de comparação de médias de Tukey a 5 % de significância (Tabela 9).

Observa-se na Tabela 9 que houve diferença significativa entre as características do povoamento das parcelas e os tipos de solo. Os Latossolos Vermelhos distróficos e os Cambissolos Háplicos obtiveram os maiores valores de IS, V, ICA e IMA (25,6 m e 23,5 m, 577 m^3 ha^{-1} e 518 m^3 ha^{-1}, 62 m^3 ha^{-1} ano^{-1} e 62 m^3 ha^{-1} ano^{-1}, 43 m^3 ha^{-1} ano^{-1} e 38 m^3 ha^{-1} ano^{-1}, respectivamente).

As parcelas menos produtivas estão nos Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos, resultando em menores valores de IS, V e IMA (21,2 m, 361,4 m^3 ha^{-1}, 27,8 m^3 ha^{-1} ano^{-1}, respectivamente).

Tabela 9 – Diferenças entre as médias das variáveis do povoamento das parcelas do tratamento controle para as diferentes classes de solos e o coeficiente de variação de cada variável

Classe de solos	Parcelas	IS	V	ICA	IMA
Latossolos Vermelhos Distróficos (LVd)	22	25,6 a	576,7 a	62,2 a	43,2 a
Cambissolos Haplicos Tb Distróficos (CXbd)	18	23,5 b	518,3 ab	61,9 a	37,7 ab
Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos (LVAd)	3	22,9 bc	434,0 bc	35,3 b	30,9 cd
Nitossolos Haplicos Eutróficos (NXe)	4	22,5 bc	448,5 bc	32,4 b	36,7 bc
Cambissolos Humicos Distróficos (CHd)	18	21,6 bc	454,1 bc	23,9 b	34,7 bc
Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos (PVAd)	3	21,3 c	361,4 c	33,6 b	27,8 d
Coeficiente de variação (%)	-	8,3	17,9	14,8	16,4

IS = índice de sítio (m); V = volume (m^3 ha^{-1}); ICA = incremento corrente anual (m^3 ha^{-1} ano^{-1}); IMA = incremento médio anual (m^3 ha^{-1} ano^{-1}). Médias seguidas nas colunas por letras distintas diferem entre si ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey.

Para avaliar a dependência do crescimento do *P. taeda* em relação às características físicas e químicas do solo, foi realizada a correlação de Spearman para as variáveis V, ICA e IS do tratamento controle (Tabela 10).

O volume acumulado e o IS correlacionaram-se apenas com as variáveis físicas do solo, sendo que as maiores correlações foram a relação Silte/Argila (30%) para o estoque de lenho e profundidade do solo (36%) para o IS (Tabela 10).

O crescimento da floresta (ICA) foi influenciado tanto pelos atributos químicos quanto físicos do solo, sendo que a maior correlação foi da saturação de bases (33%, P = 0,01).

Tabela 10 – Correlação de Spearman entre as variáveis edáficas independentes e as variáveis dependentes de estoque de madeira (V), incremento entre 2013 e 2014 (ICA) e índice de sítio (IS) do tratamento controle (c) para valor de P < 0,1

Índice	Correlação positiva	Correlação negativa
V_C (n = 68)	Silte/Argila (0,30; 0,02); Profundidade (0,24; 0,05)	-
ICA_C (n = 68)	K (0,22; 0,07); Ca + Mg (0,24; 0,05); S (0,24; 0,05); V (0,33; 0,01); Silte (0,23; 0,06); Profundidade (0,21; 0,09); CAD (0,23; 0,06)	H (0,29; 0,02); CTC (0,29; 0,02)
IS_C (n = 68)	Silte (0,24; 0,05); Silte/Argila (0,26; 0,04); Profundidade (0,36; 0,01); CAD (0,26; 0,04)	CTC (0,21; 0,10)

V_C = volume do tratamento controle; ICA_C = incremento corrente anual do tratamento controle; IS_C = índice de sítio do tratamento controle; [K] = potássio; [Ca+Mg] = cálcio + magnésio; S = soma de bases; V = saturação de bases; H = acidez potencial do solo [H^+ + Al^{3+}]; CTC = capacidade de troca de cátions a pH 7; CAD = capacidade de água disponível no solo.

A partir das correlações realizou-se a análise multivariada de Stepwise para separar as principais variáveis que influenciaram o crescimento da floresta (V, ICA e IS) sem qualquer tratamento de fertilização e desbaste.

O modelo considerando o volume como variável dependente obteve o pior ajuste entre os três (R^2 = 0,11), enquanto que o modelo para o ICA foi o melhor modelo ajustado, com coeficiente de determinação de 0,46 (Tabela 11).

Houve relação positiva da quantidade de silte nos três modelos gerados. No modelo do volume houve relação apenas com as variáveis físicas do solo (silte e profundidade), enquanto que para os demais modelos também houve influência dos atributos químicos (saturação por bases, acidez potencial e CTC).

Tabela 11 – Modelo linear gerado pelo método Stepwise (n = 68) para as variáveis dependentes calculadas para o ano de 2014: volume (V_C), incremento corrente anual (ICA_C) e índice de sítio (IS_C)

Variável dependente	Modelo	Estatística
V_C	$V_C = 307.5079 + 0.3664\ \text{Silte} + 1.0310\ \text{Prof}$	R^2 = 0,11 (P = 0,03)
ICA_C	$\ln(ICA_C) = 4.237379 - 0.021211\ \text{V} + 0.005644\ \text{Silte} - 0.007797\ \text{H}$	R^2 = 0,46 (P = 0,001)
IS_C	$IS_C = 23.655138 + 0.018086\ Silte - 0.017140\ CTC$	R^2 = 0,27 (P < 0,001)

V = volume ($m^3\ ha^{-1}$); ICA = incremento corrente anual ($m^3\ ha^{-1}\ ano^{-1}$); IS = índice de sítio (m); Silte = g de Silte por kg de solo; Prof = profundidade do solo em cm; V = saturação por bases (%); H = acidez trocável do solo [H^+ + Al^{3+}] ($mmol_c\ dm^{-3}$); CTC = capacidade de troca de cátions a pH 7 ($mmol_c\ dm^{-3}$).

2.3.5 Resposta da produtividade à fertilização

Com o objetivo de avaliar o efeito geral da fertilização e a relação da fertilização com o desbaste, realizou-se a comparação pareada entre as parcelas controle com as parcelas fertilizadas e não desbastadas (C vs F; Figura 9) e, entre as parcelas desbastadas com as parcelas desbastadas e fertilizadas (D vs DF; Figura 10) de todos os sítios.

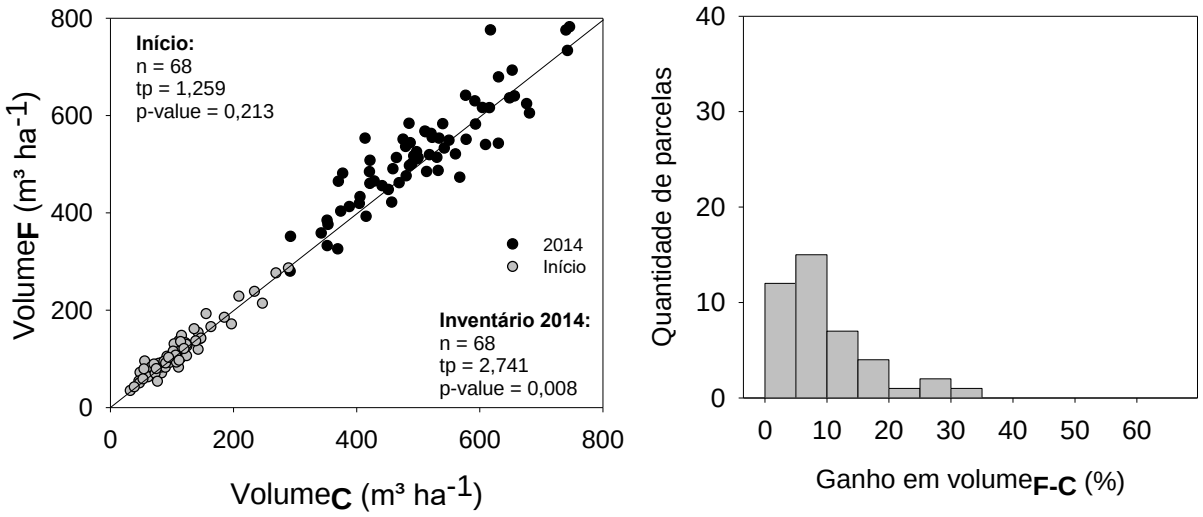

Figura 9 – Estoque de madeira em volume no início de instalação e efeito da fertilização no volume do fuste do último inventário de cada parcela realizado em 2014 (esquerda). Histograma do ganho percentual do estoque de madeira das parcelas fertilizadas no último inventário (direita). n = quantidade de pares de parcelas; tp = teste t-pareado

Incialmente, no ano de instalação das parcelas, não houve diferença significativa do estoque em volume entre elas. Mostrando que as parcelas eram “gêmeas”, ou seja, iguais em termos de produção de madeira e crescimento (Figuras 9 e 10).

Em 2014, após aproximadamente 5 anos da fertilização, 62% das parcelas F responderam positivamente em relação às suas parcelas gêmeas (tratamento controle - C). O ganho em volume das parcelas fertilizadas variou de 2 a 33 % (Figura 9), representando uma variação no aumento do volume do fuste de 10 a 138 $m^3\ ha^{-1}$.

Ao fertilizar as parcelas com o desbaste, o efeito no aumento da produção de madeira no fuste foi maior que o tratamento fertilizado (Figura 10). Sendo que em 82% das parcelas desbastadas e fertilizadas (DF) houve acréscimo do volume em comparação às áreas que foram apenas desbastadas (D).

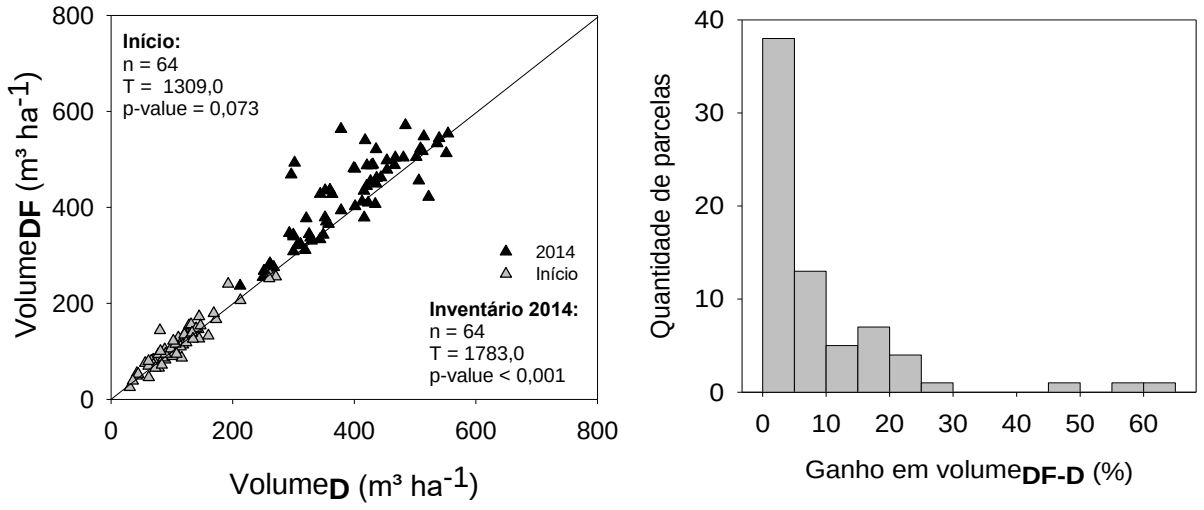

Figura 10 - Estoque de madeira em volume no início de instalação e efeito da fertilização com desbaste no volume do fuste do último inventário de cada parcela realizado em 2014 (esquerda). Histograma do ganho percentual do estoque de madeira das parcelas desbastadas e fertilizadas no último inventário (direita). n = quantidade de pares de parcelas; T = teste pareado de Wilcoxon para dados não-paramétricos

O ganho em volume das parcelas desbastadas e fertilizadas variou de 0,2 a 63 % (Figura 10), representando uma variação no aumento do volume do fuste de 0,8 a 191 m³ ha^{-1}.

Devido aos resultados significativos da fertilização nas parcelas com e sem desbaste, analisou-se o efeito dos tratamentos por sítio (Figura 11; Tabela 12). Assim, foi possível observar as diferenças dentro de cada sítio.

Para o tratamento fertilizado, apenas o sítio em Ponta Grossa obteve diferença positiva e significativa em relação ao controle (Tabela 12). Em todas as parcelas deste sítio ocorreu aumento do volume do fuste decorrente da fertilização (Figura 11).

Apesar dos demais sítios não resultarem em aumento significativo do ganho em volume pela fertilização, podemos observar que o volume da maioria das parcelas fertilizadas dos sítios 1, 2, 4 e 7 (Arapoti, Caçador, Otacílio Costa e Jaguariaíva, respectivamente) foram maiores comparadas com as parcelas controle.

O efeito positivo da fertilização nas parcelas desbastadas foi significativo em 4 dos 8 sítios estudados, sendo estes: Arapoti, Caçador, Telêmaco Borba e Rio Negrinho (Tabela 12).

Três Barras foi o local com menor diferença entre os tratamentos, menor variação do volume entre as parcelas e possui parcelas com os maiores estoques de madeira do fuste e produtividade quando comparado com os demais sítios.

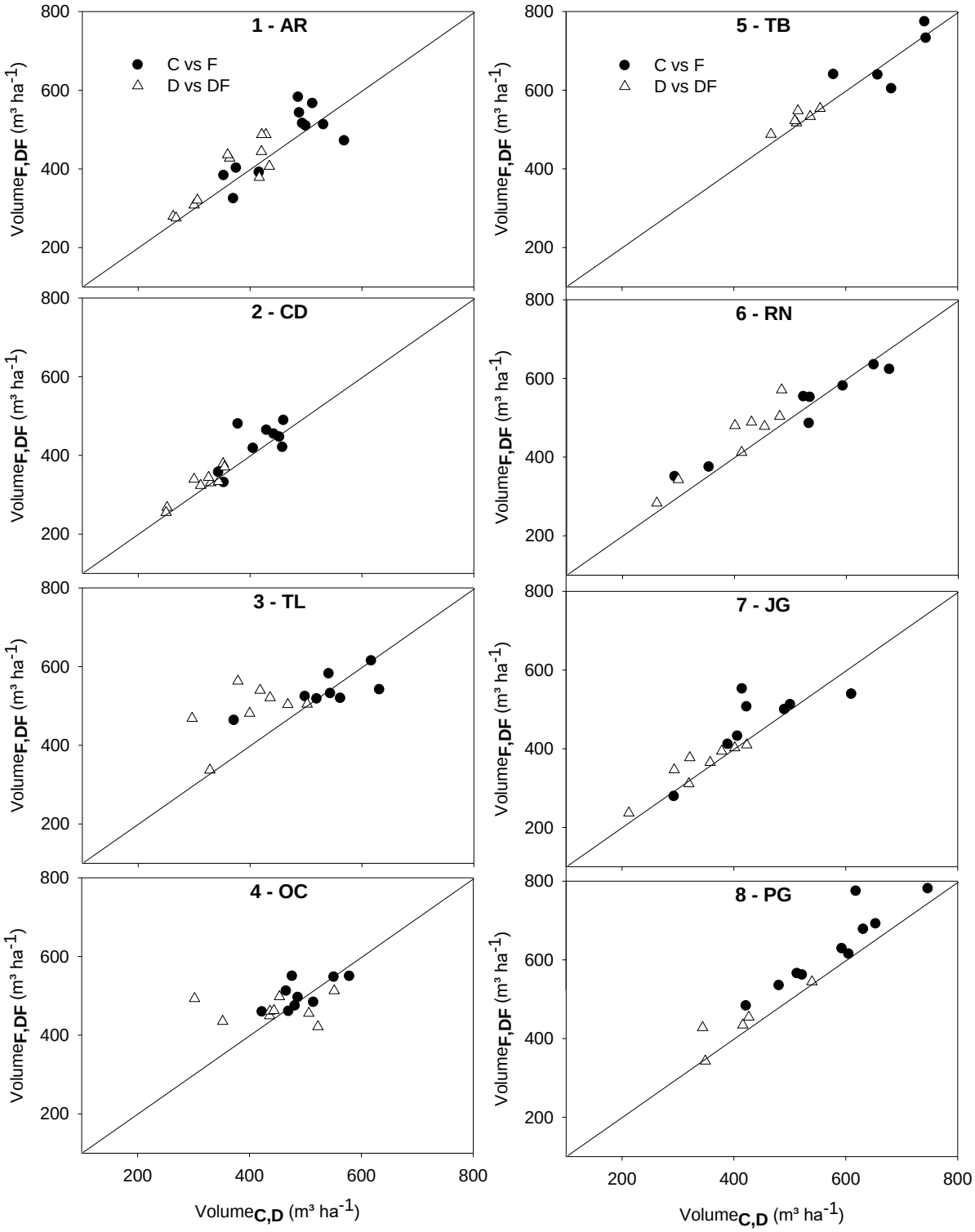

Figura 11 – Relação do volume do fuste entre os tratamentos controle (C) vs fertilizado (F) e desbastado (D) vs desbastado + fertilizado (DF) de cada sítio. AR = Arapoti; CD = Caçador; TL = Telêmaco Borba; OC = Otacílio Costa; TB = Três Barras; RN = Rio Negrinho; JG = Jaguariaíva; PG = Ponta Grossa

Tabela 12 – Teste de dados pareados para amostras paramétricas (teste t-Student) e não-paramétricas (teste de Wilcoxon). Comparação do estoque de madeira do fuste em volume entre os tratamentos controle (C) vs fertilizado (F) e desbastado (D) vs desbastado + fertilizado (DF) de cada sítio

Sitio	Tratamentos	Análise Estatística	n	Valor	P-value	Significância
1 - AR	C vs F	t-Student pareado	11	0,642	0,54	ns
2 - CD	C vs F	t-Student pareado	9	1,196	0,27	ns
3 - TL	C vs F	t-Student pareado	8	0,101	0,92	ns
4 - OC	C vs F	t-Student pareado	9	0,847	0,42	ns
5 - TB	C vs F	t-Student pareado	5	-0,085	0,94	ns
6 - RN	C vs F	t-Student pareado	8	0,013	0,99	ns
7 - JG	C vs F	t-Student pareado	8	1,173	0,28	ns
8 - PG	C vs F	Wilcoxon	10	55,000	0,02	*P* < 0,05
1 - AR	D vs DF	t-Student pareado	11	2,153	0,06	*P* < 0,10
2 - CD	D vs DF	t-Student pareado	9	2,853	0,02	*P* < 0,05
3 - TL	D vs DF	t-Student pareado	8	3,524	0,01	*P* < 0,01
4 - OC	D vs DF	t-Student pareado	9	0,728	0,49	ns
5 - TB	D vs DF	t-Student pareado	6	2,015	0,10	ns
6 - RN	D vs DF	t-Student pareado	8	3,866	0,01	*P* < 0,01
7 - JG	D vs DF	t-Student pareado	8	1,831	0,11	ns
8 - PG	D vs DF	t-Student pareado	5	1,637	0,18	ns

Nota: * significativo para P < 0,10; ** P < 0,05; *** P < 0,01; ns = não significativos. AR = Arapoti; CD = Caçador; TL = Telêmaco Borba; OC = Otacílio Costa; TB = Três Barras; RN = Rio Negrinho; JG = Jaguariaíva; PG = Ponta Grossa.

Também foi avaliado o efeito dos tratamentos nas diferentes classes de solos (Figura 12), sendo que apenas as parcelas do Latossolo Vermelho distrófico responderam significativamente à fertilização (F).

Os sítio de Ponta Grossa e Arapoti representaram, respectivamente, 47% e 29% das parcelas que responderam positivamente à fertilização dentro da classe dos LVd.

Enquanto que no tratamento DF apenas os Latossolos Vermelho-Amarelos e o Nitossolos não responderem significativamente. Os Cambissolos Háplicos e os Latossolos Vermelhos foram altamente significativos ao efeito do desbaste e da fertilização (Figura 12).

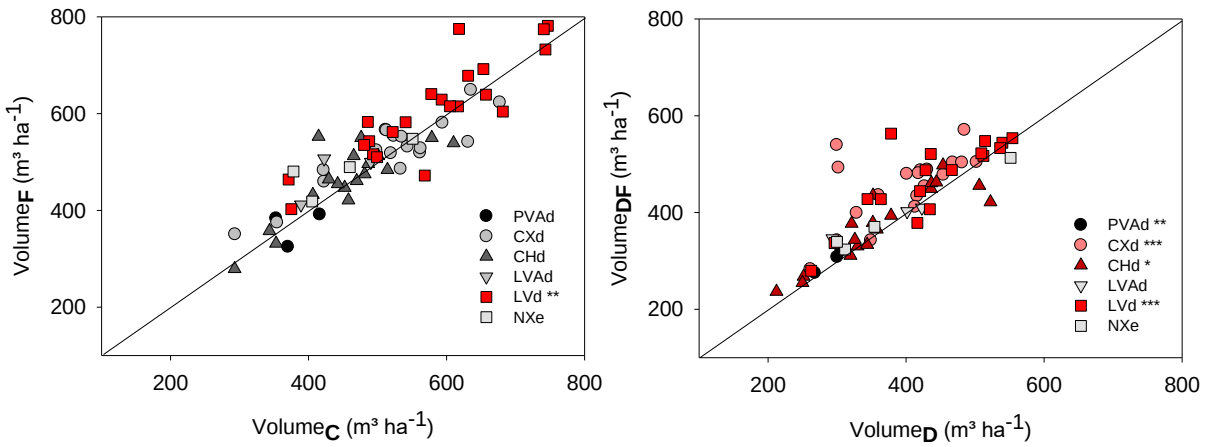

Figura 12 – Relação do volume do fuste entre os tratamentos controle (C) vs fertilizado (F) e desbastado (D) vs desbastado + fertilizado (DF) de cada classe de solo. PVAd = Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico; CXbd = Cambissolo Háplico distrófico; CHd = Cambissolo Húmico distrófico; LVAd = Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico; NXe = Nitossolo Háplico eutrófico. * P < 0,10; ** P < 0,05; *** P < 0,01

Ao analisar a uniformidade dos povoamentos através do índice PV50, verificamos que não houve correlação significativa (para P<0,05) entre as parcelas do tratamento controle com o estoque em volume, ICA e IMA. Porém, houve correlação positiva significativa do índice de uniformidade com a área basal das parcelas (Figura 13).

Apesar da não significância com as demais variáveis de produção de volume, podemos observar na Figura 14 os diferentes comportamentos do PV50 em cada sítio através dos valores médios do índice ao longo dos anos para as parcelas com os mesmos tratamentos.

Verifica-se uma tendência em todos os sítios na redução da uniformidade a medida que a floresta fica mais velha, independente do tratamento. Entretanto, Caçador foi o sítio com menor variação da uniformidade ao longo dos anos, variando aproximadamente 8,4 % e 6,8 % nos tratamentos C e F, respectivamente. Enquanto nos sítios Arapoti e Jaguariaíva houve variação, respectivamente, de 21,1 % e 26,3 % para o tratamento controle e de 30 % e 27,6 % para o fertilizado.

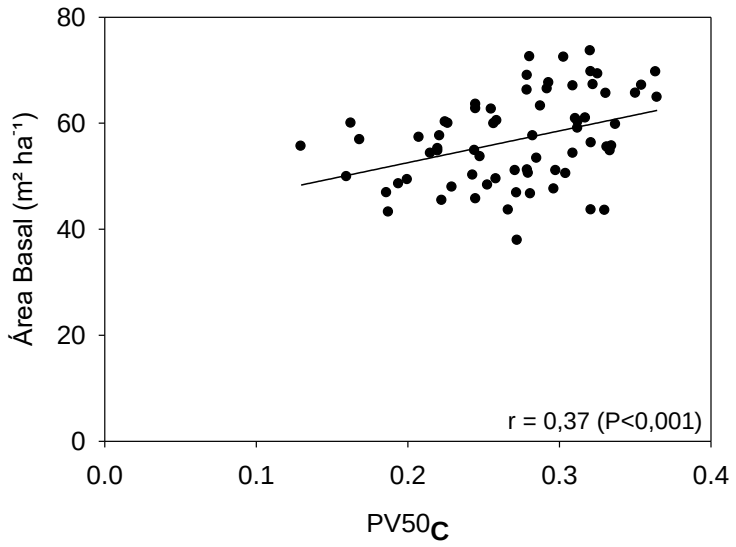

Figura 13 – Comparação do índice de uniformidade PV50 em 2014 das parcelas controle (C) com a área basal

Os maiores valores do PV50, ou seja, as áreas mais uniformes ocorreram em Três Barras e Caçador, sendo que aos 12 anos as menores árvores de ambos os sítios representaram 34 % do volume total no tratamento C (Figura 14). Para o mesmo tratamento, as menores árvores do sítio de baixa produtividade (sítio 7 - Jaguariaíva) representaram 29 % do volume total.

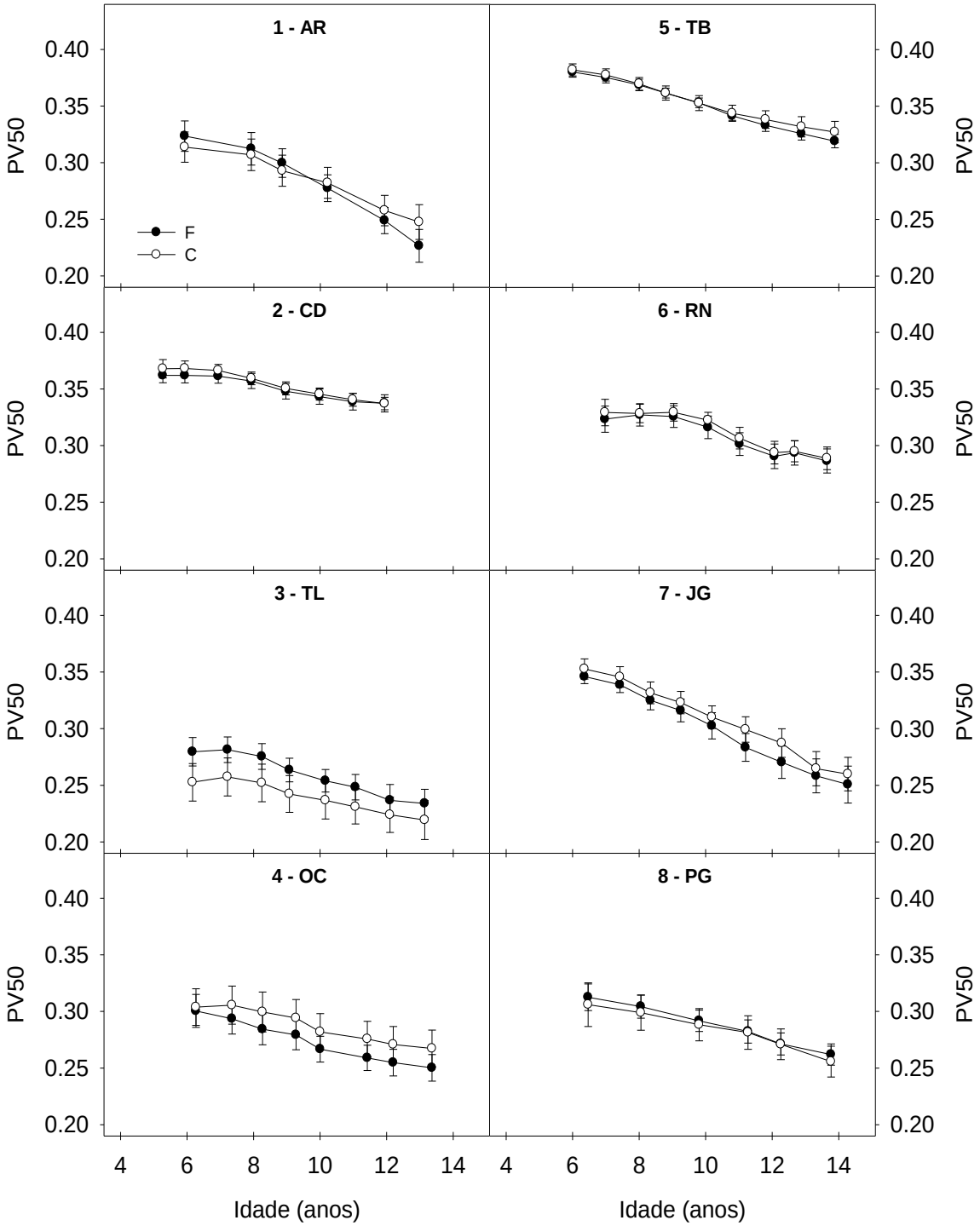

Figura 14 – Comportamento do PV50 ao longo dos anos (desde a instalação das parcelas até 2014) para os tratamentos fertilizado (F) e controle (C) de cada sítio. AR = Arapoti; CD = Caçador; TL = Telêmaco Borba; OC = Otacílio Costa; TB = Três Barras; RN = Rio Negrinho; JG = Jaguariaíva; PG = Ponta Grossa

2.3.6 Influência dos fatores edáficos, climáticos e do povoamento florestal no efeito da fertilização

Para investigar quais fatores podem ter influenciado na resposta à fertilização com e sem desbaste, realizou-se a correlação de Spearman da diferença positiva entre o volume das parcelas fertilizadas e não fertilizadas com os fatores edafoclimáticos e do povoamento (Tabela 13).

Tabela 13 – Correlação de Spearman para o efeito da fertilização e da interação entre fertilização e desbaste no estoque de madeira em volume ($\Delta V_{F\text{-}C}$, $\Delta V_{DF\text{-}D}$) com as variáveis do povoamento, solo e clima. Entre parênteses estão respectivamente os valores da correlação de Spearman e o valor de *P* (< 0,10)

Índice	Categoria	Correlação positiva	Correlação negativa
$\Delta V_{F\text{-}C}$ (n = 43)	Povoamento	IMA (0,26; 0,09); IS (0,26; 0,09)	-
	Solo	-	MOS (0,34; 0,03); CTC (0,34; 0,03);
	Clima	-	-
$\Delta V_{DF\text{-}D}$ (n = 52)	Povoamento	ICA (0,42; 0,003); IMA (0,33; 0,02)	Altitude (0,33; 0,02)
	Solo	-	MOS (0,35; 0,02); [P] (0,33; 0,02); [Ca] (0,41; 0,003); [Mg] (0,41; 0,003); S (0,42; 0,002); V (0,32; 0,02)
	Clima	UR (0,53; < 0,001)	DPV (0,38; 0,01)

IMA = Incremento médio anual; IS = índice de sítio; ICA = incremento corrente anual; MOS = matéria orgânica do solo; CTC = capacidade de troca de cátions a PH 7; [P] = fósforo; [Ca] = cálcio; [Mg] = magnésio; S = soma de bases; V = saturação de bases; UR = umidade relativa do ar; DPV = déficit de pressão de vapor.

O efeito da fertilização nas parcelas sem desbaste ocorreu em solos mais pobres em matéria orgânica e com menor capacidade de troca de cátions, ou seja, menos férteis (Tabela 13). O clima não influenciou no efeito da fertilização nas parcelas não desbastadas.

Com o desbaste, a característica das parcelas responsivas ao tratamento (DF) diferenciou-se de F. A fertilização com desbaste favoreceu o aumento da produtividade (IMA) e do incremento em volume (ICA) em locais de menores altitudes, maior umidade, com menores teores de MOS e baixa concentração de fósforo, cálcio e magnésio e baixa saturação de bases (Tabela 13).

Dentre todas as variáveis com correlação significativa, destaca-se a umidade relativa do ar, a qual foi a variável que mais se correlacionou com o efeito de DF no estoque de madeira e obteve o maior nível de significância (53% e P < 0,001).

Assim, podemos interpretar através das correlações realizadas que as maiores respostas à fertilização com desbaste ocorrerão em regiões mais úmidas e solos de baixa fertilidade.

As características físicas do solo também foram avaliadas (Tabela 7), porém, não houve correlação significativa com a fertilização e desbaste em nenhum dos tratamentos.

Apesar da diferença entre as datas de plantio das parcelas deste estudo (Tabela 3), vale ressaltar que a resposta positiva no estoque de madeira à ambos os tratamentos (F e DF) não se correlacionaram com a idade.

A partir das correlações, foram testadas as variáveis significativas na análise multivariada de Stepwise. Gerou-se um modelo linear para cada tratamento (F e DF), utilizando as variáveis de melhor ajuste no modelo, conforme descrito na Tabela 14.

Tabela 14 – Modelo linear, calculado pelo método Stepwise, para a resposta das parcelas fertilizadas 'sem desbaste ($V_{F\text{-}C}$) e desbastadas ($V_{DF\text{-}D}$)

Variável dependente	Modelo	Estatística
$\Delta V_{F\text{-}C}$	$\ln(\Delta V_{F-C}) = 3{,}300350 + 0{,}022735\ (\mathrm{IMA}) - 0{,}014774\ (\mathrm{MOS})$	$R^2 = 0{,}22$; $P = 0{,}007$; n = 43
$\Delta V_{DF\text{-}D}$	$\Delta V_{DF-D} = [-34.95035 + 0.05395\ (\mathrm{ICA}) + 0.45334\ (\mathrm{UR})]^{2.5}$	$R^2 = 0{,}26$; $P = 0{,}001$; n = 52

Nota: IMA = incremento médio anual ($m^3\ ha^{-1}\ ano^{-1}$); MOS = matéria orgânica do solo ($g\ dm^{-3}$); ICA = incremento corrente anual ($m^3\ ha^{-1}\ ano^{-1}$); UR = umidade relativa (%)

Os resultados da Tabela 14 mostram a dependência do efeito da fertilização com a matéria orgânica do solo em áreas não desbastadas e do clima úmido em áreas desbastadas.

2.4 Discussão

2.4.1 Influência da classe de solo e seus atributos físicos e químicos na produtividade do *Pinus taeda*

A ampla variação edáfica das parcelas estudadas foi importante para relacioná-las com a produtividade dos povoamentos e o efeito dos tratamentos. Diversos

trabalhos de *P. taeda,* realizados em áreas no sul do Brasil, mostram a dependência nutricional da espécie, apesar de sua baixa exigência por nutrientes.

Carvalho et al. (1999), Dedecek et al. (2008) e Gomes, Menegol e Demattê (2007) comprovaram que as características físicas e químicas do solo influenciaram a produtividade do *Pinus taeda* no Brasil, sendo a concentração de potássio e o teor de argila as variáveis altamente correlacionadas com a produtividade.

Observa-se que a variação da quantidade de potássio em Ponta Grossa foi notavelmente maior que os demais sítios, sendo considerado como um valor alto (TOMÉ JÚNIOR, 1997). Tal variação deve-se à alta quantidade do nutriente em dois blocos especificamente (blocos 3 e 7, Apêndice B), os quais são classificados como Latossolo Vermelho distrófico.

Para o potássio, os valores médios dos demais sítios foram considerados como baixo (≤1,0 $mmol_c$ dm^{-3}), com exceção de Caçador e Otacílio Costa que possuem teores médios, segundo Tomé Júnior (1997).

Caçador se destacou dos demais em relação à quantidade de Ca + Mg, fósforo, matéria orgânica no solo e soma de bases (Figuras 2 A, C, D e F, respectivamente).

Estas características marcantes em Caçador (sítio 2 - CD) podem ser explicadas pela formação geológica Serra Geral (Tabela 2), a qual possui como material de origem rochas máficas, ricas em basalto, caracterizado por conter maior reserva de minerais primários e consequentemente alta fertilidade do solo.

Além disso, a textura do solo desta região variou de argilosa a muito argilosa (550 a 810 g kg^{-1}), a qual favorece o acúmulo de matéria orgânica no solo podendo aumentar suas taxas de mineralização.

Rigatto, Dedecek e Mattos (2005) concluíram que os solos argilosos proporcionaram maiores produtividades para o *P. taeda* em Telêmaco Borba - PR, indiferente da classe de solos. Ao contrário dos autores, a produção de madeira e a qualidade do sítio foram dependentes do tipo de solo (Tabela 9). Esta divergência, é provavelmente devida à ampla variação de solos avaliadas no presente estudo comparado com o trabalho citado.

A variação do índice de sítio entre as parcelas aos 15 anos variou de 16 a 28 m aproximadamente (Figura 7). Intervalo semelhante foi encontrado por David (2014) em estudo recente de IS para *P. taeda* no Paraná e Santa Catarina, onde os sítios variaram de 12 m a 30 m na idade base de 15 anos. No Centro Sul do Paraná, o índice de sítio na mesma idade base variou de 13 m a 25 m (WOLFF II, 2012).

A relação direta do IS com o IMA das parcelas controle mostrou que o IS pode ser empregado para avaliarmos a produtividade dos sítios de *P. taeda*, além disso, observa-se na Figura 8 o gradiente de produtividade das parcelas avaliadas.

Os sítios mais produtivos estão localizados nos Latossolos Vermelhos distróficos e nos Cambissolos Háplicos Tb distróficos, onde a textura das parcelas para ambos os solos variou de média a muito argilosa (Tabela 9). Tais resultados conferem com trabalho realizado em Arapoti - PR por Carvalho et al. (1999), onde a classe de alta e baixa produtividade compreendem respectivamente, os Latossolos Vermelhos e os Argissolos Vermelho-Amarelos.

As maiores correlações entre as variáveis IS, ICA e V e os atributos do solo foram: profundidade do solo (36%), saturação por bases (33%) e relação Silte/ Argila (30%), respectivamente (Tabela 10). Assim, pode-se afirmar que os sítios mais produtivos estão em solos mais profundos, mais férteis e com maior quantidade de silte em relação à argila no horizonte A.

Nas parcelas estudadas, os LVd, os quais estão entre os solos mais produtivos, estão abaixo de 0,6 desta relação no horizonte A (Apêndice A), apesar da correlação positiva do volume e índice de sítio com a relação silte/argila (30 % e 26 %, respectivamente).

Esta correlação pode ser explicada pelo alto teor de silte dos CXbd, os quais atingiram valores de 1,13 da relação silte/argila, indicando a presença de minerais menos intemperizados no horizonte A.

Nem todo solo com altos teores de argila e silte são necessariamente produtivos, podendo haver compactação e redução da porosidade do solo, o que favorece o acúmulo de água em regiões com altas pluviosidades, ausentes de deficiência hídrica.

Bognola et al. (2010) afirmam que o excesso de água no solo prejudicou o desenvolvimento do *P. taeda*, encontrando maior crescimento em solos com teor de areia e argila semelhantes, com dominância da fração argila.

A análise multivariada permitiu selecionar as variáveis que mais influenciaram o crescimento da floresta. O ICA foi a variável dependente com o melhor modelo ajustado, onde a saturação por bases, a quantidade de silte e a acidez potencial do solo explicaram 46% das variações do incremento em volume dos sítios (Tabela 11).

Segundo Tomé e Junior (1997), apesar de não existir classificação para a acidez potencial (H+Al), geralmente locais com maiores teores de H+Al possuem maior

quantidade de matéria orgânica no solo, principalmente em solos muito ácidos com pH abaixo de 5,0.

Pode-se interpretar que a dependência do crescimento das florestas avaliadas foi em função de solos com maior teor de silte, menor acidez potencial e distróficos (Tabela 11), ou seja, com baixa proporção de cátions básicos trocáveis em relação à CTC.

Bellote, Dedecek e Tomazello Filho (2005) encontraram correlação negativa da soma de bases e teor de silte com o DAP, altura e volume das árvores avaliadas. Os autores também constataram baixos teores da soma de bases, saturação por bases e CTC na produtividade dos sítios.

Correlações positivas entre o pH, K e Ca+Mg e o crescimento do *P. taeda* em Cambissolos e Latossolos foram reportadas por Rigatto, Dedecek e Mattos (2005), além da baixa CTC (valores menores que 136 $mmol_c$ dm^{-3}) em todos os sítios. Semelhantemente ocorreu no presente estudo com exceção da CTC nos Cambissolos, a qual alcançou valores de 391 $mmol_c$ dm^{-3}.

Pode-se dizer que todas as correlações significativas (Tabela 10) foram relativamente mais baixas quando comparadas aos resultados de outros autores (BOGNOLA et al., 2010; CARVALHO et al., 1999; RIGATTO; DEDECEK; MATTOS, 2005).

Tal diferença pode ser atribuída devido à distribuição dos sítios avaliados pertencerem a um amplo gradiente geográfico no sul do país, com diferentes classes de solos, favorecendo maior variabilidade em todos os atributos aqui estudados.

2.4.2 Efeito da fertilização na produtividade do *Pinus taeda*

O estudo do efeito da fertilização com e sem desbaste podem ser ferramentas para indicar quais sítios há mais necessidade de aumentar a disponibilidade de nutrientes para as plantas.

Apesar do maior crescimento volumétrico das parcelas fertilizadas, quando analisou-se separadamente cada sítio e cada classe de solos, apenas o sítio em Ponta Grossa – PR (Tabela 12) e a classe dos Latossolos Vermelhos distróficos foram significativamente responsivos ao tratamento F (Figura 12).

Observa-se que Ponta Grossa foi o segundo sítio mais produtivo, nos tratamentos C e F (Tabela 8), e o LVd foi a classe mais produtiva (Tabela 9). Ao

contrário do esperado, podemos concluir que a resposta à fertilização ocorreu em áreas com boa produtividade.

Diferentemente do tratamento F, o efeito do desbaste associado à fertilização em conjunto foi significativo em 4 dos 8 sítios e em 4 das 6 classes de solos avaliadas (Tabela 12). Porém, o sítio e a classe menos produtivas (Jaguariaíva e LVAd, respectivamente) não responderam ao tratamento DF.

No sítio de Jaguariaíva predominam os solos da classe CHd, os quais são conhecidos como solos de baixa fertilidade com saturação por bases menor que 65%, encontrado em solos de altitude elevada (FASSOLO et al., 2002).

Três Barras foi o local mais produtivo para todos os tratamentos mas não houve respostas significativas aos efeitos dos tratamentos F e DF (Tabela 12). Comportamento semelhante foi relatado por Paim (2007) em plantios de *P. taeda* na mesma região, onde não observou diferenças significativas entre o crescimento da floresta e a adubação com lama de cal e potássio.

A resposta nula de Três Barras aos efeitos dos tratamentos mesmo com os solos classificados como LVd, sugerem a qualidade elevada das práticas silviculturais e maior qualidade dos materiais genéticos.

Como era esperado, a uniformidade do plantio não foi afetada pela maior disponibilidade de nutrientes via adubação. No entanto, as áreas mais produtivas foram mais uniformes e mais constantes ao longo dos anos (Figuras 13 e 14).

O PV50 máximo aos 12 anos de idade foi de 34% nos sítios de Três Barras e Caçador. Hakamada (2012) estudando o PV50 para plantios de *Eucalyptus*, encontrou um intervalo ótimo de uniformidade de 34 % a 50 %, onde os povoamentos dentro de tal intervalo podem ser considerados satisfatoriamente uniformes.

Munhoz (2011) relatou valores semelhantes ao do presente estudo para a mesma espécie e mesmas regiões, onde o sítio mais produtivo em Três Barras foi mais uniforme comparado com o menos produtivo em Jaguariaíva, sendo que a uniformidade para todos os sítios reduziu com a idade.

Trabalhos realizados com clones de *Eucalyptus* mostram o mesmo comportamento em áreas de alta e baixa produtividade (RYAN et al., 2010; STAPE et al., 2010).

Foi avaliado a influência do solo, clima e de algumas características do povoamento no efeito dos tratamentos, onde as correlações encontradas indicaram

que o aumento da produtividade no tratamento F ocorreu em solos com menor quantidade de MOS e CTC e sem influência do clima (Tabela 13).

Para o tratamento DF, as parcelas responsivas se correlacionaram com as áreas de menor altitude, alta umidade relativa do ar e com baixa fertilidade e MOS (Tabela 13).

Em sítios de alta produtividade no Havaí, Samuelson et al. (2013) observaram que temperaturas amenas com baixa demanda evaporativa proporcionaram maiores produtividades do *P. taeda*.

Apesar da baixa relação dos modelos gerados para a fertilização e a fertilização com desbaste (R^2 de 22 % e 26 %, respectivamente), os modelos mostram que o efeito da fertilização está relacionado à solos com menor teor de matéria orgânica no solo, e o efeito da fertilização e desbaste está atrelado à sítios com maior umidade relativa do ar (Tabela 14).

Sayer et al. (2004) afirmam que a fertilização e a fertilização com o desbaste aumentaram o tamanho da copa e o índice de área foliar, e consequentemente houve acréscimo significativo da produtividade nos tratamentos fertilizados.

Assim, mesmo uma floresta que possua produtividade média a alta, esta pode aumentar expressivamente sua produção de madeira em função da maior disponibilidade de nutrientes, água e radiação. Indicando que a maioria das florestas de *Pinus* no sul do Brasil estão aquém do seu potencial produtivo.

Todas as variações estudadas no presente trabalho permitiram observar o comportamento da espécie quando há aumento na disponibilidade de recursos para os diferentes locais, contribuindo para parametrizar o fator de fertilidade do solo em modelos ecofisiológicos como o 3-PG (LANDSBERG, 2003).

2.5 Conclusão

Houve diferença entre a produtividade média dos diferentes tipos de solos estudados. Sendo que os Latossolos Vermelhos distróficos foram os mais produtivos e os Argissolos Vermelho-Amarelos distróficos foram os menos produtivos.

As variáveis que mais se correlacionaram positivamente com a produtividade do *Pinus taeda* foram: profundidade do solo, saturação por bases, relação Silte/Argila, Ca + Mg e soma de bases.

A acidez potencial, saturação por bases e o teor de silte explicaram a variação do incremento em volume do *Pinus taeda* com idade média de 13 anos.

Tanto o sítio mais produtivo quanto o menos produtivo não responderam à nenhum dos tratamentos avaliados.

A resposta da fertilização foi dependente de baixos teores de CTC e matéria orgânica do solo.

O efeito do tratamento fertilizado com desbaste foi positivo em metade dos sítios estudados, sendo que a resposta a este tratamento foi correlacionada com áreas menos férteis, com menor teor de matéria orgânica do solo e climas mais úmidos.

Além disso, os resultados obtidos permitem realizar um detalhado zoneamento edafoclimático do *Pinus taeda* no Brasil e a tomada de decisão do manejador para que o povoamento alcance maior produtividade, com menor custo e possua uma produção sustentável de acordo com a disponibilidade de recursos de cada sítio.

Retornando às hipóteses do presente trabalho, verifica-se que:

I. Há diferença de produtividade do *Pinus taeda* entre as classes de solo: **Corroborada**;
II. O crescimento do *Pinus taeda* está relacionado com os atributos físicos e químicos do solo: **Corroborada**;
III. As áreas menos produtivas são responsivas à fertilização enquanto que as mais produtivas não respondem: **Não corroborada**;
IV. Os sítios mais produtivos de *Pinus taeda* possuem maior uniformidade do povoamento: **Corroborada**.

Referências

AKAIKE, H. A new look at the statistical model identification. **IEEE Transactions on Automatic Control**, New York, v. 19, n. 6, p. 716–723, 1974.

ALBAUGH, T.J.; ALLEN, H. L.; DOUGHERTY, P.M.; JOHNSEN, K.H. Long term growth responses of loblolly pine to optimal nutrient and water resource availability. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 192, p. 3-19, 2004.

ALBAUGH, T.J.; ALLEN, H.; DOUGHERTY, P.; KRESS, L.; KING, J. Leaf area and above- and belowground growth responses of loblolly pine to nutrient and water additions. **Forest Science**, Bethesda, v. 44, n. 2, p. 317-328, 1998.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration:** guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1999. 300 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M. Modeling monthly mean air temperature for Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, Hamburg, v. 113, n. 3/4, p. 407-427, 2013.

ASPINWALL, M.J.; KING, J.S.; McKEAND, S.E.; BULLOCK, B.P. Genetic effects on stand-level uniformity and above- and belowground dry mass production in juvenile loblolly pine. **Forest Ecology and Management,** Amsterdam, v. 262, n. 4, p. 609-619, 2011.

BAKER, J.B.; LANGDON, O.G. *Pinus taeda* (L.) Loblolly Pine. In: BURNS, R.M.; HONKALA, B.H. **Silvics of North America**. Washington: USDA, Forest Service, 1990. chap. 2, p. 198-204.

BATISTA, A.H.; MOTTA, A.C.V.; REISSMANN, C.B.; SCHNEIDER, T.; MARTINS, I.L.; HASHIMOTO, M. Liming and fertilization in *Pinus taeda* plantations with severe nutrient deficiency in savanna soils. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 37, n. 1, p. 117-125, 2015.

BELLOTE, A.F.J.; TOMAZELLO FILHO, M.; DEDECEK, R.A. **Influência dos nutrientes minerais e do solo sobre a produtividade, a estrutura anatômica e a densidade da madeira de *Pinus taeda***. Colombo: Embrapa Florestas, 2005. 94 p.

BIZON, J.M.C. **Avaliação da sustentabilidade nutricional de plantio de *Pinus taeda* L. usando um balanço de entrada-saída de nutrientes**. 2005. 95 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2005.

BOGNOLA, I.A. **Unidades de manejo para *Pinus taeda* L. no planalto norte catarinense, com base em características do meio físico**. 2007. 180 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

BOGNOLA, I.A.; DEDECEK, R.; LAVORANTI, O.; HIGA, A.R. Influência de propriedades físico-hídricas do solo no crescimento de *Pinus taeda*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 61, p. 37-49, 2010.

CAMPOE, O.; STAPE, J.L.; ALBAUGH, T.J.; ALLEN, L.H.; FOX, T.R.; RUBILAR, R.; BINKLEY, D. Fertilization and irrigation effects on tree level aboveground net primary production, light interception and light use efficiency in a loblolly pine plantation. **Forest Ecology Management**, Amsterdam, v. 288, p. 43-48, 2013.

CAMPOS, J.; LEITE, H. **Mensuração florestal:** perguntas e respostas. 2. ed. Viçosa: Editora UFV, 2006. 470 p.

CANADÁ. Ministry of Forestry. **Guidelines for developing stand density management**. Victoria: British Columbia Forest Service, 1999. 94 p.

CARDOSO, D.J.; LACERDA, A.E.B., ROSOT, M.A.D., GARRASTAZÚ, M.C.; LIMA, R.T. Influence of spacing regimes on the development of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) in Southern Brazil. **Forest Ecology and management**, Amsterdam, v. 310, p. 761-769, 2013.

CARTER, M.; FORSTER, C. Milestones and millstones: a retrospective on 50 years of research to improve productivity in loblolly pine plantations. **Forest Ecology and Management,** Amsterdam,v. 227, p. 137-144, 2006.

CARVALHO, A.P.; MENEGOL, O.; OLIVEIRA, E.B.; MACHADO, S.A.; POTTER, R.; FASOLO, P.J.; FERREIRA, C.A.; BARTOSZECK, A. Efeitos de características do solo sobre a capacidade produtiva de *Pinus taeda*. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 39, p. 51-66, 1999.

COMPANHIA DE PESQUISA E RECURSOS MINERAIS. Serviço Geológico do Brasil. **Mapa de geodiversidade do estado de Santa Catarina.** Rio de Janeiro, 2010. Escala 1:500.00. Disponível em: <www.cprm.gov.br/arquivos/pdf/recmin/pedrainforme6.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2015

CUBBAGE, F.; MAC DONAGH, P.; SAWINSKI JÚNIOR, J.S.; RUBILAR, R.; DONOSO, P.; FERREIRA, A.; HOEflICH, V.; , OLMOS, V.M.; FERREIRA, G.; BALMELLI, G.; SIRY, J.; BÁEZ, M.N.; ÁLVAREZ, J. Timber investment returns for selected plantations and native forests in South America and the Southern United States. **New Forests**, Amsterdam, v. 33, p. 237–255, 2007.

DAVID, H.C. **Avaliação de sítio, relações dendrométricas e otimização de regimes de manejo de *Pinus taeda* L. nos estados do Paraná e de Santa Catarina**. 2014. 152 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

DEDECEK, R.A.; FIER, I.S.N.; SPELTZ, R.; LIMA, L.C.S. Influência do sítio no desenvolvimento do *Pinus taeda* aos 22 anos: 1. Características físico-hídricas e químicas do solo. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 3, p. 507-516, jul./set. 2008.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Atlas Geo:** descrições geomorfológicas do Estado de Santa Catarina. Florianópolis, 1986. Escala: 1:500.000.

EMBRAPA. **O novo mapa de solos do Brasil:** legenda atualizada. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 67 p.

_____. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** 4. ed. Brasília, 2014. 377 p.

FASSOLO, P.J.; BOGNOLA, I.A.; CARVALHO, A.P.; POTTER, R. O.; BHERING, S. B. **Levantamento de reconhecimento dos solos da região sudeste de estado do Paraná.** Colombo: Embrapa, 2002. 142 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 13).

FERREIRA, C.; SILVA, H.D.; REISSMANN, C.; BELLOTE, A.; MARQUES, R. **Nutrição de Pinus no sul do Brasil:** diagnóstico e prioridades de pesquisa. Colombo: Embrapa Florestas, 2001. 23 p.

FORRESTER, D.I.; COLLOPY, J.J.; BEADLE, C.L.; BAKER, T.G. Interactive effects of simultaneously applied thinning, pruning and fertilizer application treatments on growth, biomass production and crown architecture in a young *Eucalyptus nitens* plantation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 267, p. 104-116, 2012.

FOX, T.R.; ALLEN, H.L.; ALBAUGH, T.J.; RUBILAR, R.; CARLSON, C.A. Tree nutrition and forest fertilization of pine plantations in the Southern United States. **Southern Journal Applied Forestry**, Bethesda, v. 31, p. 5–11, 2007.

FUCK, R.A. **Geologia da folha de Abapã**. Curitiba: Instituto de Geologia, 1967. 34 p. (Boletim da Universidade Federal do Paraná, 25).

GIAROLA, N.F.B.; SILVA, A.P.; IMHOFF, S. Relações entre propriedades físicas e características de solos da região sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 885–893, 2002.

GOMES, F.S.; MAESTRI, R.; SANQUETTA, C.R. Análise financeira de regimes de manejo em povoamentos de *Pinus taeda* L. visando a produção de madeira para processo na indústria de papel e celulose. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 22, n. 2, p. 227-243, 1998.

GOMES, F.S.; MENEGOL, O.F.; DEMATTÊ, J.A.M. Soil attributes related to Eucalypt and Pine plantations productivity in the South of Brazil. **Journal of Sustainable Forestry**, New Haven, v. 24, n. 4, p. 61-82, 2007.

GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L; BENEDETTI, V; FESSEL, V.A.G.; GAVA, J.L. Reflexos do cultivo mínimo e intensivo do solo em sua fertilidade e na nutrição das árvores. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2005. cap. 1, p. 3-57.

HAKAMADA, R.E. **Uso do inventário florestal como ferramenta de monitoramento da qualidade silvicultural em povoamentos clonais de *Eucalyptus***. 2012. 114 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2012.

INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS. Disponível em: <www.ipef.br/pppib>. Acesso em: 15 abr. 2013.

LANDSBERG, J.J. Physiology in forest models: history and the future. **Forest Biometry, Modelling and Information Sciences**, London, v. 1, p. 49-63, 2003.

LASO GARICOITS, L.S. **Estado nutricional e fatores do solo limitantes do crescimento de *Pinus taeda* L. em Telêmaco Borba**. 1990. 128 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1990.

MARTINS, I.L. **Análise nutricional do P em um povoamento de *Pinus taeda* L. submetido a um ensaio de omissão de nutrientes**. 2011. 90 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

MORO, L.; GATIBONI, L.C.; SIMONETE, M.A.; CEZAR, P. Resposta de *Pinus taeda* com diferentes idades à adubação NPK no planalto Sul Catarinense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 4, p. 1181-1189, 2014.

MUNHOZ, J.S.B. **Caracterização da produtividade florestal e dos padrões de crescimento de *Pinus taeda* L. no sul do Brasil através de análise de tronco**. 2011. 116 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

MURTHY, R.; DOUGHERTY, P.; ZARNOCH, S.; ALLEN, H. Effects of carbon dioxide, fertilization, and irrigation on photosynthetic capacity of loblolly pine trees. **Tree Physiology**, Victoria, v. 16, p. 537-546, 1996.

PAIM, R.M. **Efeito da aplicação de lama de cal e cloreto de potássio sobre as varáveis químicas e biológicas do solo, estado nutricional e crescimento do Pinus taeda L. sobre latossolo em Três Barras, SC**. 2007. 123 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

PARANÁ. **Atlas geomorfológico do Estado do Paraná**. Curitiba: Minerais do Paraná; Universidade Federal do Paraná, 2006. 63 p. Escala base: 1:250.000 modelos reduzidos.

RAIJ, B. van.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 2001. 285 p.

REISSMANN, C.B.; ZOTTL, H. Problemas nutricionais em povoamentos de Pinus taeda em áreas do arenito da formação Rio Bonito-Grupo Guatá. **Revista do Setor de Ciências Agrárias**, Curitiba, v. 9, n. 1/2, p. 75-80, 1987.

RIGATTO, P.A.; DEDECEK, R.A.; MATTOS, J.L.M. Influência dos atributos do solo sobre a produtividade de *Pinus taeda*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 701-709, 2005.

RODRIGUEZ, J.; ALVAREZ, J. **Nutrición y fertilización de las plantaciones forestales**. Santiago: LOM, 2010. 521 p.

RYAN, M.G.; STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; FONSECA, S.; LOOS, R.A.; TAKAHASHI, E.N.; SILVA, C.R.; SILVA, S.R.; HAKAMADA, R.E.; FERREIRA, J.M.; LIMA, A.M.N.; GAVA, J.L.; LEITE, F.P.; ANDRADE, H.B.; ALVES, J.M.; SILVA, G.G.C. Factors controlling Eucalyptus productivity: how water availability and stand structure alter production and carbon allocation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, n. 9, p. 1695-1703, Apr. 2010.

SAMUELSON, L.J.; EBERHARDT, T.L.; BARTKOWIAK, S.M.; JOHNSON, K.H. Relationships between climate, radial growth and wood properties of mature loblolly pine in Hawaii and a northern and southern site in the southeastern United States. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 310, p. 786–795, 2013.

SANTOS FILHO, A.; LASO, L.; REISSMANN, C.; MACHADO, S. Desenvolvimento do *Pinus taeda* L. em função das características dos solos em Telêmaco Borba - PR. **Revista do Setor de Ciências Agrárias**, Curitiba, v. 12, n. 1/2, p. 13-24, 1993.

SAYER, M.S.; GOELZ, J.C.G.; CHAMBERS, J.L.; TANG, Z.; DEAN, T.J.; HAYWOOD, J.D.; LEDUC, D.J. Long-term trends in loblolly pine productivity and stand characteristics in response to thinning and fertilization in the West Gulf region. **Forest ecology and management**, Amsterdam, v. 192, n. 1, p. 71-96, 2004.

SCHNEIDER, P. **Introdução ao manejo florestal***.* Santa Maria: UFSM, 1993. 566 p.

SCHNEIDER, P.S.P. **Autodesbaste e diagrama de manejo da densidade de povoamentos de *Pinus taeda* L.**. 2008. 97 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

SCHNEIDER, R.L.; MÜHLMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R.D.; DAEMON, R. F.; NOGUEIRA, A.A. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., 1974, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: SBG, 1974. v. 1, p. 41-65.

SCHNEIDER, T. **Crescimento e teores de B, Cu, Mn, Fe e Zn em *Pinus taeda* L., como resultado da adubação e calagem sob a técnica da omissão de nutrientes.** 2011. 51 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

SIXEL, R.M.M. **Sustentabilidade da produtividade de madeira de *Pinus taeda* com base no estoque, na exportação e na ciclagem de nutrientes**. 2012. 110 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

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

STAPE, J.L., ROCHA, J.C.; DONATTI, Z.A. **Indicadores de qualidade silvicultural na Aracruz:** 2000 a 2005: relatório técnico. Piracicaba: IPEF, 2006. 25 p.

STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; RYAN, M.; FONSECA, S.; LOOS, R.A.; TAKAHASHI, E.N.; SILVA, C.R.; SILVA, S.R.; HAKAMADA, R.E.; FERREIRA, J.M.; LIMA, A.M.N.; GAVA, J.L.; LEITE, F.P.; ANDRADE, H.B.; ALVES, J.M.; SILVA, G.G.C; AZEVEDO, M.R. The Brazil *Eucalyptus* potential project: influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest and Ecology Management**, Amsterdam, v. 259, n. 9, p. 1684-1694, Apr. 2010.

TOMÉ JUNIOR, J.B. **Manual para interpretação de análise de solo.** Guaíba: Ed. Agropecuária, 1997. 247 p.

WILL, R.; BARRON, G.; BULKERS, E.; SHIVER, R.; TESKEY, R. Relationship between intercepted radiation, net photosyntesis, respiration, and rate of stem volume growth of *Pinus taeda* and *Pinus elliiottii* stands of different densities. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 154, p. 155–163, 2001.

WOLFF II, N.I. **Modelagem do crescimento e da produção de *Pinus taeda* L**. 2012. 62 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Estadual do Centro Oeste, Irati, 2012.

3 EFICIÊNCIA DO USO DA LUZ E DO NITROGÊNIO EM POVOAMENTOS DE *Pinus taeda* L. EM UM GRADIENTE EDAFOCLIMÁTICO NO SUL DO BRASIL

Resumo

Avanços na silvicultura e no melhoramento genético propiciaram aumentos significativos na produtividade do *Pinus taeda* ao longo dos anos. Porém, sabe-se que sua produtividade está aquém do que a espécie pode alcançar. A eficiência do uso da água, luz e nutrientes podem explicar as diferenças na produção de biomassa das árvores e dos povoamentos, pois permitem identificar os mecanismos que controlam a produtividade. O objetivo do presente estudo foi caracterizar a interceptação de luz e determinar a eficiência do uso dos recursos naturais em povoamentos de *Pinus taeda* no sul do Brasil. Utilizou-se 22 parcelas da rede experimental do programa de Produtividade Potencial do Pinus o Brasil, as quais estão distribuídas em 6 sítios no Paraná (Jaguariaíva e Telêmaco Borba) e em Santa Catarina (Caçador, Otacílio Costa, Rio Negrinho e Três Barras). Quantificou-se a biomassa dos componentes da árvore acima do solo e a produtividade primária líquida do lenho (WNPP). Determinou-se o índice de área foliar (IAF) de forma direta, o qual foi utilizado para calcular a radiação fotossinteticamente ativa absorvida (APAR). Os nutrientes foliares foram determinados para cada parcela. Foi calculado a eficiência de crescimento, do uso da luz e do nitrogênio, correlacionando-os com os fatores de solo, clima e povoamento. O estoque de biomassa do fuste e biomassa total acima do solo variou, respectivamente, de 86 a 212 Mg ha^{-1} e 103 a 242 Mg ha^{-1}. O incremento corrente anual (ICA) e o incremento médio anual (IMA) do fuste variou de 1,8 a 25,3 Mg ha^{-1} ano^{-1} e de 10,7 a 13,8 Mg ha^{-1} ano^{-1}. O sítio de Otacílio Costa foi o mais produtivo em relação ao ICA dos demais sítios com idade média de 12,4 anos. O IAF entre as parcelas variou de 4,4 a 7,0 m^2 m^{-2}, o qual se correlacionou positivamente com o ICA. A eficiência do crescimento (EC), de uso da luz (EUL) e do nitrogênio (EUN) variou de: 0,3 a 3,9 Mg ha^{-1} IAF^{-1}; 0,07 a 1,2 g MJ^{-1}; 15,4 a 179 kg lenho kg^{-1} N ano^{-1}. A eficiência do uso da luz correlacionou-se positivamente com a produção de biomassa total acima do solo, porém não houve relação significativa entre a produção de biomassa do lenho com APAR. As áreas mais uniformes de *Pinus taeda* foram relacionadas com a maior eficiência do crescimento e do uso da luz e do nitrogênio. As maiores correlações para a EC, EUL e EUN foram com temperatura mínima (55%), temperatura mínima e potássio foliar (70%), fósforo no solo (61%), respectivamente. Os modelos gerados foram em função: do fósforo no solo e nitrogênio e cálcio foliar para EC; do fósforo foliar, da temperatura mínima do ar e da idade para EUL; e da concentração de fósforo no solo, cálcio foliar e do IAF para a EUN. Os resultados obtidos apontam para mudanças na partição de carbono entre os componentes da árvore devido à disponibilidade de recursos, favorecendo o aumento na produção de madeira.

Palavras-chave: eficiência do crescimento; eficiência do uso dos recursos; ecologia da produção; produtividade primária líquida do lenho; uniformidade do povoamento

Abstract

Advances in silviculture and genetic improvement have provided significant increases in loblolly pine productivity over the years. Therefore, it is known that their productivity is far from what the species can reach. The use efficiency of water, light and nutrients may explain the differences in biomass production of trees and stands because it is possible to identify the mechanisms that control the productivity. The aim of this study was to characterize the light interception and determine the use efficiency of natural resources in loblolly pine in southern Brazil. We used 22 plots from the experimental network of the program *Pinus* Potential Productivity in Brazil, which are distributed in 6 sites in Paraná (Jaguariaíva and Telemaco Borba) and Santa Catarina (Caçador, Otacílio Costa, Negrinho Rio and Três Barras). We quantified the biomass of tree components above the ground and the wood net primary productivity (WNPP). It was determined the leaf area index (LAI) directly, which was used to calculate the absorbed photosynthetically active radiation (APAR). The foliar nutrients were determined for each plot. It was calculated growth efficiency (GE), the light use efficiency (LUE) and nitrogen use efficiency (NUE), correlating them with the soil, climate and stand factors. The stock of stem biomass and total biomass above ground ranged respectively 86 to 212 Mg ha^{-1} and 103 to 242 Mg ha^{-1}. The current annual increment (CAI) and the mean annual increment (MAI) of the stem ranged from 1.8 to 25.3 Mg ha^{-1} $year^{-1}$ and 10.7 to 13.8 Mg ha^{-1} $year^{-1}$. The Otacílio Costa site was the most productive in relation to the CAI from other sites with average age of 12,4 years. The LAI between plots varied from 4.4 to 7.0 m^2 m^{-2}, which was positively correlated with CAI. The growth efficiency, the use efficiency of light and nitrogen ranged from 0.3 to 3.9 Mg ha^{-1} $year^{-1}$ LAI^{-1}; 0.07 to 1.2 g MJ^{-1}; 15.4 to 179 kg wood kg^{-1} N $year^{-1}$. The LUE was positively correlated with total biomass above ground, but there was no significant relationship between the WNPP with APAR. The most uniform areas of loblolly pine were related to the GE, LUE and NUE. The higher correlation for the GE, LUE and NUE occurred with the minimum temperature (55%); minimum temperature and leaf potassium content (70%) and soil phosphorus content (61%), respectively. The models were generated due to the soil phosphorus content and the leaf nitrogen and calcium content to GE; the leaf phosphorus content, minimum air temperature and age stand for LUE; and soil phosphorus content, leaf calcium content and the LAI for the NUE. The results point to changes in carbon partitioning between tree components due to the availability of resources, contributing for an increase in wood production.

Keywords: Growth efficiency; Resources use efficiency; Ecology production; Wood net primary productivity; Stand uniformity

3.1 Introdução

Ao discutir sobre capacidade produtiva de um povoamento, deve-se primeiramente estudar a ecologia da produção para compreender como as árvores crescem e quais os fatores determinantes de seu crescimento.

O crescimento das árvores e dos povoamentos está relacionado com a quantidade de CO_2 absorvido pelos estômatos e com a taxa fotossintética, ou seja, a capacidade da árvore em assimilar o CO_2 absorvido em biomassa.

A absorção do CO_2 e o rendimento assimilatório são afetados por diversos fatores ambientais, principalmente pela disponibilidade de luz, água e nutrientes (BINKLEY; STAPE; RYAN, 2004; LAMBERS; CHAPIN III; PONS, 2008; LARCHER, 2006). A eficiência do uso destes recursos podem explicar as diferenças de produtividades das árvores e dos povoamentos.

A absorção de luz pelas folhas está diretamente relacionada com a produção de biomassa (CANNELL, 1989). Desta forma, esta produção pode ser determinada pela quantidade de luz interceptada, pela eficiência de uso e também através da partição de carbono para os diferentes compartimentos da planta (BINKLEY; STAPE; RYAN, 2004).

A interceptação de luz através da copa da árvore ou do dossel da floresta e a metodologia de sua mensuração é amplamente estudada tanto para coníferas quanto para folhosas (GHOLZ et al., 1991; GOWER; NORMAN, 1991; LAW; RIITTERS; OHMANN, 1992; FLORES et al., 2006; PANGLE et al., 2009; XAVIER; SOARES; ALMEIDA, 2000).

O índice de área foliar - IAF corresponde à área foliar por unidade de superfície de solo, o qual é considerado uma medida efetiva das folhas. Este índice permite relacionarmos a produtividade com a interceptação de luz da floresta, sendo que a manutenção do IAF é determinada pela genética da espécie e também pela intensidade de restrições edafoclimáticas (RODRIGUEZ; ALVAREZ, 2010).

A razão entre a produção do fuste e o IAF foi definida por Waring, Thies e Muscato (1980) como um índice para avaliar o vigor da árvore, amplamente conhecido como eficiência do crescimento (EC, Mg ha^{-1} ano^{-1} IAF^{-1}). Segundo os autores, utiliza-se este índice para prever o crescimento da floresta em uma ampla variação de sítios submetidos à diferentes manejos.

Outro método para avaliar a eficiência da planta ou da floresta em transformar a luz interceptada em biomassa é a eficiência de uso da luz. O termo eficiência de uso da luz (EUL, g MJ^{-1}) foi proposto por Monteith (1972, 1977), o qual é calculado através da razão da produção de biomassa com a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa absorvida (APAR).

A radiação fotossinteticamente ativa absorvida (APAR) pode ser determinada através da diferença entre a radiação acima do dossel da floresta e abaixo do dossel, conforme descrito por Gower et al. (1999). Uma outra opção para estimar a APAR é aplicar a lei de Beer-Lambert (CANNEL, 1989) quando o IAF é conhecido.

Assim como a eficiência de crescimento, a eficiência de uso da luz varia com a espécie, com as práticas silviculturais adotadas e com os fatores edafoclimáticos (MARTIN; JOKELA, 2004; ROJAS, 2005). Porém, diferenças entre ambos a nível do povoamento são relatadas por Binkley et al. (2013) devido à não linearidade entre o IAF e a APAR.

Allen et al. (2005), relatam que a maior disponibilidade de água e nutrientes não influenciaram na EUL do *Pinus*, enquanto que apenas a irrigação aumentou significativamente a EC das espécies de *Pinus* avaliadas.

Em plantios de *Eucalyptus* com alta produtividade e disponibilidade de água e nutrientes, houve maior absorção de radiação e maior eficiência de uso da luz comparados a povoamentos com menos recursos disponíveis (BINKLEY et al., 2010; CAMPOE et al., 2013b; STAPE et al., 2008).

Segundo Fernandez et al. (2011), o comportamento do *Pinus* difere do *Eucalyptus* quanto à absorção e eficiência de uso da luz devido à baixa plasticidade fisiológica para responder às alterações na disponibilidade de recursos em um determinado sítio.

Campoe et al. (2013a) relatam que plantios jovens de *Pinus taeda* submetidos à silvicultura intensiva (com irrigação e fertilização) tiveram maior interceptação de luz, EUL e produtividade primária líquida. Os autores relatam um comportamento do *Pinus* contrário ao sugerido por Fernandez et al. (2011).

Por ser considerado um modelo simples, a EUL é amplamente utilizada em modelos de grandes escalas espaciais, assim como os modelos de estimativa de balanço de carbono, e em escalas de longo prazo, como os modelos de predição da resposta do ecossistema ao efeito estufa (MEDLYN, 1998).

Em relação ao uso de nutrientes, alguns autores definem o nitrogênio como o principal fator determinante do crescimento das plantas, não descartando a importância dos demais (BERENDSE; AERTS, 1987; LI; McKEAND; ALLEN, 1991; MURTHY et al., 1996).

O nitrogênio está envolvido em importantes processos metabólicos, onde sua deficiência afeta diretamente a síntese de aminoácidos, proteínas e enzimas,

prejudicando o metabolismo da planta e consequentemente seu crescimento e desenvolvimento (LARCHER, 2006; TOMÉ JUNIOR, 1997).

Devido à sua essencialidade, a absorção, uso e eficiência do uso do nitrogênio é um tema estudado há décadas (ALBAUGH; ALLEN; FOX, 2008; BIRK; VITOUSEK, 1986; CHAPIN, 1980; LI; McKEAND; ALLEN, 1991; PALMROTH et al., 2013; PASTOR; BRIDGHAM, 1999; STAPE; BINKLEY; RYAN, 2004), principalmente no sudeste dos EUA, onde encontram-se grandes deficiências de nitrogênio e fósforo em plantios de *Pinus taeda* (DUCEY; ALLEN, 2001; FOX et al., 2007; JOKELA; MARTIN; VOGEL, 2010).

A compreensão da absorção, uso e eficiência do uso dos nutrientes na planta, em especial o nitrogênio, contribuem para aprimorar o manejo de povoamentos florestais, aumentando a fertilidade do solo, reduzindo as perdas do nutriente via colheita e reduzindo os custos (COBB et al., 2008; ALBAUGH et al., 2012).

No Brasil, com o objetivo de aumentar a produtividade das florestas otimizando a utilização de recursos, diversos estudos sobre a eficiência de uso da água, luz e nutrientes em plantios de *Eucalyptus* foram desenvolvidos ao longo dos anos (BINKLEY; STAPE; RYAN, 2004; BINKLEY et al., 2010; CAMPOE et al., 2013b; RYAN et al., 2010; STAPE; BINKLEY; RYAN, 2004, 2008).

Apesar do *Pinus* representar o segundo gênero mais plantado no país (IBÁ, 2015), estudos sobre a ecologia da sua produção ainda são escassos. Onde pesquisas sobre a eficiência de uso dos recursos naturais tanto a nível de árvore quanto de povoamento para o gênero no Brasil não foram encontradas na literatura.

Assim, sob diferentes condições edafoclimáticas, o presente estudo visou caracterizar a interceptação de luz e determinar a eficiência do uso dos recursos naturais em povoamentos de *Pinus taeda* no sul do Brasil, testando-se as seguintes hipóteses:

I. Há relação positiva do índice de área foliar (IAF) e da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (APAR) com a produtividade primária líquida do lenho;
II. A elevada produção de biomassa da árvore acima do solo está associada à maior eficiência do crescimento, do uso da luz e do nitrogênio;
III. As áreas mais uniformes de *Pinus taeda* estão associadas à maior eficiência do crescimento e do uso da luz e do nitrogênio;

IV. Os sítios com maior eficiência do crescimento, do uso da luz e do uso do nitrogênio possuem maior status nutricional da copa comparado aos sítios menos eficientes de *Pinus taeda*.

A partir das hipóteses formuladas, os seguintes objetivos específicos foram propostos:

I. Determinar a eficiência do crescimento, uso da luz e uso do nitrogênio em povoamentos de *Pinus taeda* ao longo de um gradiente geográfico no Brasil;
II. Estudar a variação das eficiências e sua relação com a diversidade edáfica, climática e do povoamento;
III. Desenvolver um modelo para estimar a eficiência do crescimento, uso da luz e uso do nitrogênio do *Pinus taeda* através de variáveis edafoclimáticas e do povoamento.

3.2 Material e Métodos

3.2.1 Área experimental

As áreas utilizadas pertencem à rede experimental de parcelas quadrigêmeas do programa cooperativo PPPIB (INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS). O programa conta com mais de 250 parcelas quadrigêmeas de *Pinus taeda* localizadas em 8 sítios nos estados do Paraná e Santa Catarina.

Para o presente estudo, selecionou-se 6 sítios do programa, sendo que o critério de seleção dos sítios foi em relação à melhor representação da amplitude edáfica, climática e de produtividade, compondo um transecto no sul do Brasil. (Tabela 15).

Todos os sítios são compostos por blocos de 4 parcelas, compondo um fatorial 2^2, com dois níveis de nutrição e dois níveis de desbaste. Para este estudo, foram avaliadas apenas as parcelas do tratamento controle (C), ou seja, sem fertilização e sem desbaste. Estas parcelas possuem o mesmo manejo de plantios comerciais das empresas (ausentes de adubação), as quais foram submetidas apenas ao controle de plantas daninhas quando necessário.

Selecionou-se 4 parcelas do tratamento controle (de diferentes blocos) nos sítios de Caçador, Telêmaco Borba, Otacílio Costa, Três Barras e Jaguariaíva, sendo que para o sítio de Rio Negrinho, selecionou-se apenas 2 parcelas, totalizando 22 parcelas.

Os sítios florestais estudados são classificados como clima subtropical úmido com verão temperado (Cfb), com temperatura média anual entre 15 e 20ºC (Alvares et al. 2013) e precipitação anual entre 1300 e 1800 mm (www.ipef.br/geodatabase). Também há ampla variação entre a procedência do material genético de cada parcela (Tabela 15).

3.2.2 Variáveis do povoamento

As variáveis dendrométricas e do povoamento previamente calculadas no capítulo anterior (item 2.2.2), como a densidade de árvores por hectare, a área basal, altura média, diâmetro médio à altura do peito (DAP), o índice de sítio na idade base de 15 anos (IS), além do estoque de volume do povoamento e PV50, foram utilizados neste estudo com base no inventário do ano de 2013 (Tabela 16).

Tabela 15 – Localização geográfica, descrição do material genético e classificação do solo de cada parcela

Sítio	Código	Região	Parcela	Altitude (m)	Latitude (°)	Longitude (°)	Procedência	Classe de solo
1	CD	Caçador - SC	1	1305	-26,7	-50,7	PCS 2ª Geração - Georgia EUA	CHd
1	CD	Caçador - SC	2	1233	-26,8	-50,8	PCS 2ª Geração - Georgia EUA	CHd
1	CD	Caçador - SC	3	1160	-26,9	-50,7	PCS 2ª Geração - Georgia EUA	NXe
1	CD	Caçador - SC	4	1128	-26,8	-50,7	PCS 2ª Geração - Georgia EUA	CHd
2	TL	Telêmaco Borba - PR	1	749	-24,4	-50,5	PCS Rigesa 1a Geracao - EUA	LVd
2	TL	Telêmaco Borba - PR	2	777	-24,2	-50,6	PCS Klabin 1a Geracao - EUA	CXbd
2	TL	Telêmaco Borba - PR	3	840	-24,2	-50,6	PCS Klabin 1a Geracao - EUA	LVd
2	TL	Telêmaco Borba - PR	4	825	-24,3	-50,6	PCS Klabin 1a Geracao - EUA	CXbd
3	OC	Otacilio Costa - SC	1	1038	-27,2	-50,6	APS Klabin 1a Geracao - EUA	NXe
3	OC	Otacilio Costa - SC	2	905	-27,5	-50,1	APS Klabin 1a Geracao - EUA	CHd
3	OC	Otacilio Costa - SC	3	1065	-27,3	-50,2	APS Klabin 1a Geracao - EUA	CHd
3	OC	Otacilio Costa - SC	4	841	-27,5	-50,1	PCS Klabin 1a Geracao - EUA	CHd
4	TB	Três Barras - SC	1	825	-26,0	-50,2	PSC Rigesa - Familia 4 (Brasil)	LVd
4	TB	Três Barras - SC	2	825	-26,0	-50,2	PSC Rigesa - Familia 4 (Brasil)	LVd
4	TB	Três Barras - SC	3	789	-26,1	-50,2	PSC Rigesa - (Brasil)	LVd
4	TB	Três Barras - SC	4	787	-26,1	-50,2	PSC Rigesa - (Brasil)	LVd
5	RN	Rio Negrinho - SC	1	844	-26,2	-49,5	APS Santa Vera A	CXbd
5	RN	Rio Negrinho – SC	2	850	-26,2	-49,5	APS Santa Vera A	CXbd
6	JG	Jaguariaíva - PR	1	1202	-24,4	-49,8	Indefinida	CHd
6	JG	Jaguariaíva - PR	2	1253	-24,4	-49,8	APS Pouso Alto	CHd
6	JG	Jaguariaíva - PR	3	931	-24,2	-49,4	PSC Pouso Alto	CHd
6	JG	Jaguariaíva - PR	4	1042	-24,2	-49,5	PSC Pouso Alto	CHd

Notas: CD = Caçador; TL = Telêmaco Borba; OC = Otacílio Costa; TB = Três Barras; RN = Rio Negrinho; JG = Jaguariaíva;
PCS = Pomar Clonal de Sementes; APS = Área de Produção de Sementes; PSC = Pomar de Semente Clonal;
CHd = Cambissolo Húmico distrófico; CXbd = Cambissolo Háplico Tb distrófico; Nxe = Nitossolo Húmico eutrófico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico.

Tabela 16 – Descrição das médias das variáveis dendrométricas de cada sítio com idade média de 12,4 anos (baseado nos dados do inventário de 2013)

Sítio	Código	Parcela	Plantio	Inventário	Idade	Estoque	DAP	Altura	IS	PV50	AB	V	ICA	IMA
-	-	-	(mm/aa)	(mm/aa)	(ano)	(arv ha^{-1})	(cm)	(m)	(m)	-	(m^2 ha^{-1})	(m^3 ha^{-1})	(m^3 ha^{-1} ano^{-1})	(m^3 ha^{-1} ano^{-1})
1	CD	1	Nov/03	Out/13	10,0	1612	20,1	14,4	21,7	0,34	53,5	322,1	50,1	32,2
1	CD	2	Jul/02	Out/13	11,3	1608	22,2	16,9	22,1	0,36	64,6	422,0	44,2	37,4
1	CD	3	Jan/02	Out/13	11,8	1755	19,8	16,2	20,1	0,35	56,8	372,7	38,8	31,5
1	CD	4	Jan/02	Out/13	11,8	1663	20,3	17,6	22,6	0,31	57,0	394,8	38,4	33,5
2	TL	1	Set/01	Mai/13	11,7	1479	22,4	18,9	26,5	0,24	61,0	529,2	34,4	45,1
2	TL	2	Jul/01	Mai/13	11,9	1496	20,3	17,7	23,2	0,17	53,3	439,7	62,3	37,0
2	TL	3	Jul/01	Mai/13	11,9	1534	18,3	17,5	25,6	0,25	43,3	336,8	40,5	28,3
2	TL	4	Mai/01	Mai/13	12,1	1503	20,5	17,3	27,6	0,25	52,2	406,6	20,3	33,7
3	OC	1	Out/01	Jun/13	11,7	1361	24,5	18,5	24,5	0,30	66,6	509,0	92,1	43,6
3	OC	2	Set/00	Mai/13	12,7	1647	21,4	17,6	21,5	0,26	63,1	456,0	53,6	35,8
3	OC	3	Jul/01	Jun/13	11,9	1368	25,8	18,4	23,3	0,32	73,7	567,1	98,4	47,6
3	OC	4	Jul/01	Mai/13	11,9	1119	25,0	17,6	22,6	0,26	58,4	435,2	30,6	36,5
4	TB	1	Jun/99	Jul/13	14,1	1459	24,1	24,2	25,5	0,33	68,0	716,3	56,8	50,9
4	TB	2	Jun/99	Jul/13	14,1	1497	23,9	24,2	25,5	0,37	68,3	716,6	67,2	50,9
4	TB	3	Jun/01	Jul/13	12,1	1485	23,7	21,5	26,8	0,32	67,4	641,3	62,0	53,1
4	TB	4	Jun/01	Jul/13	12,1	1485	23,3	21,5	26,4	0,32	64,6	610,5	57,2	50,5
5	RN	1	Jun/00	Set/13	13,3	1476	21,3	18,5	23,5	0,24	55,9	479,4	5,6	36,0
5	RN	2	Jun/00	Set/13	13,3	1777	21,2	18,3	23,5	0,29	65,4	548,3	59,5	41,2
6	JG	1	Abr/01	Dez/13	12,6	1765	22,1	18,4	22,9	0,28	70,7	578,5	46,1	45,9
6	JG	2	Mar/00	Dez/13	13,7	1215	23,7	19,6	22,0	0,22	55,7	478,9	16,6	34,8
6	JG	3	Jun/00	Dez/13	13,4	1378	19,6	14,5	17,4	0,32	42,8	280,0	6,9	20,8
6	JG	4	Jan/00	Dez/13	13,9	1458	20,9	16,6	18,3	0,30	52,2	385,7	15,2	27,7

Nota: CD = Caçador; TL = Telêmaco Borba; OC = Otacílio Costa; TB = Três Barras; RN = Rio Negrinho; JG = Jaguariaíva.

3.2.3 Variáveis edáficas

As variáveis químicas e físicas do solo foram obtidas a partir de amostragem de 0 a 20 cm do solo em cada parcela realizada em 2008, conforme detalhado no capítulo anterior (item 2.2.5). Na Tabela 17 pode-se verificar a variação das características do solo de cada sítio.

Tabela 17 – Média dos atributos químicos e físicos do solo de cada sítio na profundidade de 0 a 20 cm do solo

Variáveis	CD	TL	OC	TB	RN	JG
pH (CaCl2)	4,3	3,8	3,8	3,7	3,6	4,0
MOS (g dm^{-3})	64,5	37,3	39,0	55,8	54,0	58,8
P (mg dm^{-3})	11,3	3,5	5,8	3,5	4,0	4,0
K (mmolc dm^{-3})	1,9	0,4	1,2	0,6	0,9	0,5
Ca (mmolc dm^{-3})	37,0	2,3	2,3	2,5	1,5	8,3
Mg (mmolc dm^{-3})	10,5	1,5	1,8	1,5	1,5	6,5
H + Al (mmolc dm^{-3})	142,0	106,8	275,5	158,0	259,0	103,8
SB (mmolc dm^{-3})	49,4	4,2	5,2	4,6	3,9	15,3
CTC_{pH7} (mmolc dm^{-3})	191,4	110,9	280,7	162,6	262,9	119,0
Areia (g kg^{-1})	160,0	415,0	265,0	322,5	340,0	675,0
Silte (g kg^{-1})	202,5	115,0	192,5	132,5	230,0	55,0
Argila (g kg^{-1})	637,5	470,0	542,5	545,0	430,0	270,0
Profundidade (cm)	140,0	150,0	95,0	150,0	150,0	132,5
CAD (mm)	167,8	156,0	104,1	167,3	150,0	110,9

Nota: CD = Caçador; TL = Telêmaco Borba; OC = Otacílio Costa; TB = Três Barras; RN = Rio Negrinho; JG = Jaguariaíva.

3.2.4 Variáveis climáticas

Os dados climáticos para este estudo foram fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, Sistema Meteorológico do Paraná - SIMEPAR e Centro de Informações e Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina - CIRAM.

Utilizou-se apenas os dados mensais entre os períodos do inventário de 2012 e 2013 de cada parcela (Tabela 18) para calcular a média da temperatura máxima, mínima e média, do déficit de pressão de vapor e umidade relativa do ar. Para a precipitação pluviométrica, somou-se a precipitação mensal do período estudado (Tabela 18).

Tabela 18 – Média das variáveis climáticas das parcelas de cada sítio

Variáveis	CD	TL	OC	TB	RN	JG
Tmax (°C)	22,7	26,2	22,4	24,3	23,4	25,1
Tmin (°C)	12,5	13,6	12,1	12,3	12,2	13,7
T (°C)	16,5	19,0	16,6	17,7	16,5	18,5
PPT (mm)	2166	1741	1413	1799	1697	2099
UR (%)	78,1	81,9	83,8	79,4	86,2	78,9
DPV (kPa)	0,50	0,48	0,36	0,47	0,32	0,53

Notas: CD = Caçador; TL = Telêmaco Borba; OC = Otacílio Costa; TB = Três Barras; RN = Rio Negrinho; JG = Jaguariaíva.
Tmax = temperatura máxima; Tmin = Temperatura mínima; T = Temperatura média; PPT = precipitação pluviométrica; UR = umidade relativa do ar; DPV = déficit de pressão de vapor.
A sazonalidade climática mensal pode ser observada nas Figuras 5 e 6 do Capítulo 1.

Além destes dados, foi calculado a radiação fotossinteticamente ativa (PAR) e o balanço hídrico de cada sítio conforme metodologia descrita nos itens 3.2.4.1 e 3.2.4.2. Todos os dados obtidos foram checados e consistidos.

3.2.4.1 Radiação fotossinteticamente ativa (PAR)

A estimativa diária da densidade de fluxo de fóton fotossintéticos (DFFF, µmol fóton m^{-2} d^{-1}), também amplamente conhecida como radiação fotossinteticamente ativa (do inglês *Photosynthetic Active Radiation - PAR*), é considerada como uma fração da radiação global.

Através dos dados de radiação global medida nas estações meteorológicas, foi calculada a PAR considerando 45% da radiação global (CAMPOE et al., 2013a).

Para o presente estudo, utilizou-se apenas a PAR entre os anos de 2012 e 2013 (Tabela 19), representando o mesmo período dos inventários utilizados para o cálculo da eficiência de uso da luz, detalhado no item 3.2.8.

A variação mensal da radiação fotossinteticamente ativa entre os anos de 2012 e 2013 pode ser observada para cada sítio na Figura 15. Enquanto que a Tabela 19 descreve o período de dados obtidos para o cálculo de todas as variáveis climáticas utilizadas neste estudo e a soma da radiação PAR para esse período.

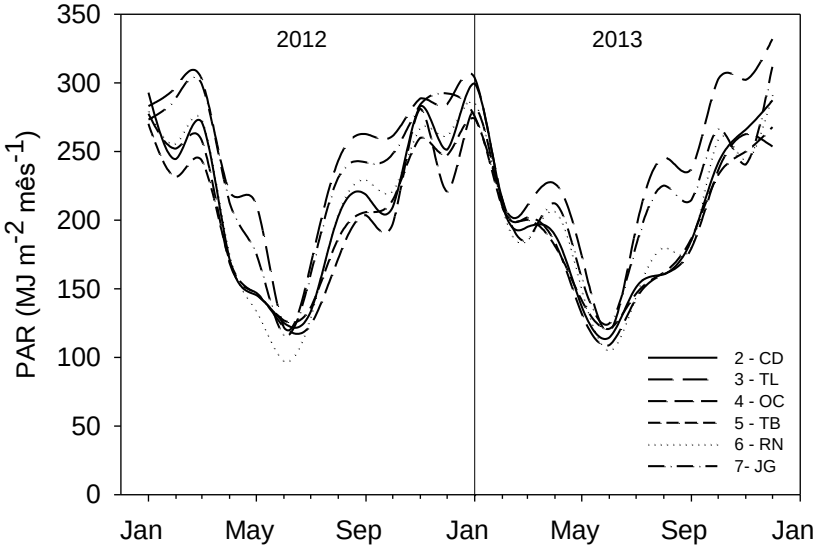

Figura 15 – Variação mensal da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) entre o período de Janeiro de 2012 a dezembro de 2013 para cada sítio. CD = Caçador; TL = Telêmaco Borba; OC = Otacílio Costa; TB = Três Barras; RN = Rio Negrinho; JG = Jaguariaíva

Tabela 19 – Descrição dos períodos utilizados para o cálculo de todas as variáveis climáticas, soma dos meses avaliados, soma da radiação fotossinteticamente ativa (**Σ**PAR) do período indicado e radiação fotossinteticamente ativa (PAR) média de cada mês avaliado para cada sítio

Sítio	Parcela	Inventário 2012	Inventário 2013	Quantidade de meses	ΣPAR (MJ m^{-2})	PAR (MJ m^{-2} mês $^{-1}$)
CD	1,2,3,4	outubro	outubro	13	2629	202,2
TL	1,2,3,4	maio	maio	13	2971	228,6
OC	1,3	agosto	junho	11	2192	199,3
OC	2,4	agosto	maio	10	2084	208,4
TB	1,2,3,4	junho	julho	14	2651	189,3
RN	1,2	novembro	setembro	11	2175	197,7
JG	1,2,3,4	novembro	dezembro	14	3187	227,7

CD = Caçador; TL = Telêmaco Borba; OC = Otacílio Costa; TB = Três Barras; RN = Rio Negrinho; JG = Jaguariaíva.

3.2.4.2 Balanço hídrico

Para avaliar a influência da disponibilidade de água, estimou-se o balanço hídrico mensal pelo método proposto por Rolim, Sentelhas e Barbieri (1998), sendo que para os valores de evapotranspiração potencial (ETP) utilizou-se os dados previamente calculados no capítulo anterior (item 2.2.6.2) pelo método de Penman-Monteith modificado, conforme descrito por Allen et al. (1998).

O balanço hídrico foi calculado em função da capacidade de água disponível no solo (CAD) de cada parcela no período descrito na Tabela 19. Na Figura 16 estão apresentadas o balanço hídrico de duas parcelas: com maior e menor déficit hídrico.

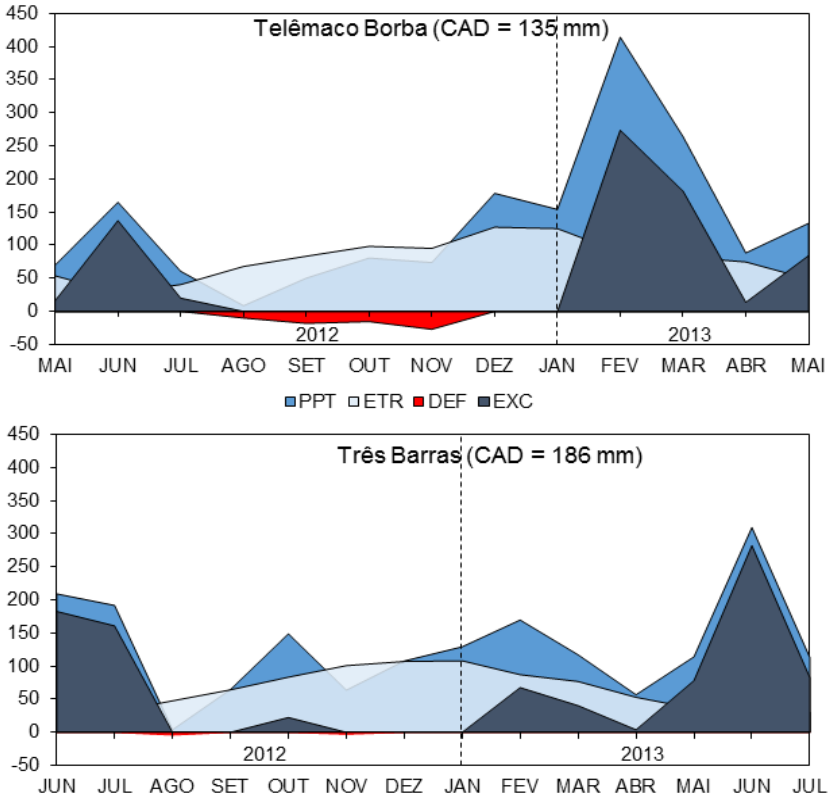

Figura 16 – Balanço hídrico entre os períodos de inventário de 2012 e 2013 da parcela com maior déficit hídrico (Telêmaco Borba; capacidade de água disponível no campo de 135 mm) e da parcela com menor déficit hídrico (Três Barras; capacidade de água disponível no campo de 186 mm). PPT = precipitação pluviométrica; ETR = evapotranspiração real; DEF = déficit hídrico; EXC = excedente hídrico

3.2.5 Amostragem destrutiva e área foliar específica (AFE)

Foram abatidas 86 árvores (4 árvores por parcela, com exceção da parcela 2 do sítio de RN) para determinar a biomassa da árvore acima do solo e gerar um modelo de biomassa para cada componente (tronco, galhos e acículas).

As árvores abatidas foram selecionadas de acordo com a amplitude da área seccional de cada parcela, visando representar todas as classes de diâmetro (Figura 17)

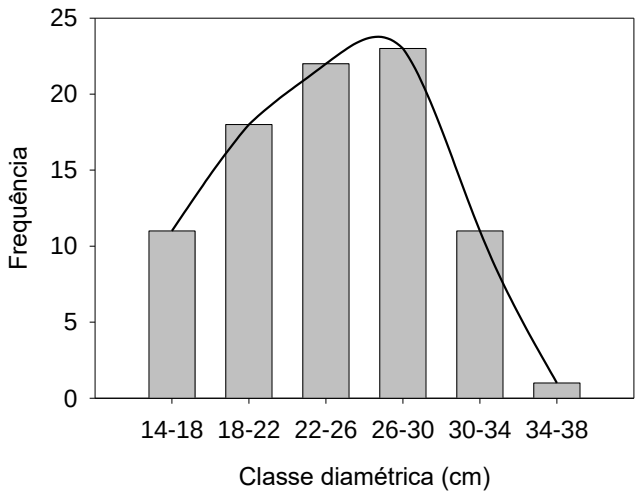

Figura 17 – Distribuição das árvores amostradas em classes de diâmetro à altura do peito (cm)

Foi determinado em campo, para cada árvore abatida, a altura total, o diâmetro do tronco (DAP) e o peso verde dos componentes: tronco (lenho + casca), galho verde e acícula verde. Amostras representativas de cada componente foram coletadas para quantificação dos teores de umidade. As amostras foram secas em estufa a 65 °C até obterem peso constante. Os teores de umidade foram utilizados para posterior cálculo da biomassa seca.

Para determinar a biomassa foliar, dividiu-se a copa em três terços: superior, médio e inferior. Tal divisão ocorreu devido à desuniformidade da distribuição foliar das coníferas, implicando na diferenciação da quantidade de luz interceptada pela copa e na morfologia das acículas mais jovens em relação às mais velhas (LANDSBERG; SANDS, 2011; SAMPSON; ALLEN, 1998). Desta forma, a divisão da copa permite a melhor representação da distribuição da área foliar do *P. taeda*.

As equações alométricas desenvolvidas para cada componente foram baseadas no modelo de Spurr (SPURR, 1952) e selecionadas segundo o critério de informação de Akaike (AIC), que se baseia na teoria da máxima verossilmilhança (AKAIKE, 1974).

A Figura 18 mostra a dispersão dos dados de biomassa de cada componente da árvore para o ajuste dos modelos em função do DAP e da altura ou somente do DAP das árvores abatidas.

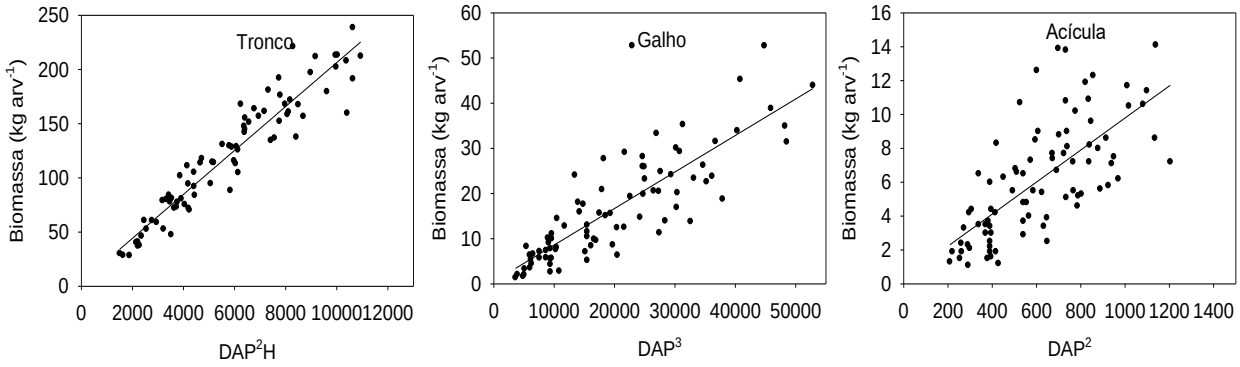

Figura 18 - Biomassa seca em função do diâmetro à 1,30 m de altura (DAP) e altura total para o tronco e em função do DAP para galho e acículas

As equações selecionadas foram as que obteram menor valor de AIC e possuíram menor quantidade de parâmetros. Assim, para cada componente da árvore, foi determinado uma equação alométrica descrita na Tabela 20.

Tabela 20 – Modelos de biomassa seca para os componentes da árvore de *Pinus taeda*. Valor de P < 0,001 para todos os modelos

Componente	modelo	n	R^2	Erro (kg arv^{-1})	Valor médio (kg arv^{-1})
Tronco	$B = 0{,}02082\ D^{1{,}8469}\ H^{0{,}9235}$	86	0,98	18,07	120,8
Galho	$B = 0{,}0008273\ D^{3{,}0663}$	86	0,89	6,8	16,8
Acícula	$B = 0{,}009929\ D^{2}$	86	0,88	2,4	6,2

B = Biomassa seca (kg); D = diâmetro do tronco a 1,30 m de altura (cm); H = Altura total da árvore (m).

Em termos de nomenclatura, a biomassa do tronco produzida no ano foi denominada como produtividade primária líquida da madeira, amplamente conhecida do termo em inglês como *Wood Net primary Production* - *WNPP*.

Para as acículas, além da determinação da biomassa foliar, também foram coletados 10 fascículos desenvolvidos de cada terço da copa (inferior, médio e superior) para o cálculo da área foliar específica projetada – AFE, totalizando 30 fascículos.

Os fascículos coletados no campo foram armazenados em sacos plásticos e colocados em caixa de isopor com gelo para reduzir a perda de água para o ambiente. Em seguida, foi mensurado o comprimento médio dos fascículos e a largura de uma acícula por fascículo utilizando uma lupa milimetrada, conforme metodologia descrita por Murthy e Dougherty (1997). Após as mensurações, todos os fascículos foram secos em estufa à temperatura constante de 65 °C durante 4 dias e pesados.

Através das mensurações realizadas foi possível calcular a área projetada das amostras e, consequentemente, a área foliar específica projetada de cada parcela conforme descrito na Equação 9.

$$\boldsymbol{AFE} = \frac{\boldsymbol{\Sigma_1^{30}(n\,L\,C)}}{\boldsymbol{10\,\Sigma_1^{30}(PS)}} \tag{9}$$

onde, AFE = área foliar específica projetada da parcela (m² de folha por kg de massa seca); n = número de acículas no fascículo; L = largura da acícula (cm); C = comprimento médio do fascículo (cm); PS = peso seco do fascículo (g).

3.2.6 Mensuração direta do índice de área foliar

A mensuração direta do IAF, denominado também como IAF direto, foi realizada por meio do método destrutivo, utilizando as mesmas árvores abatidas para a determinação das equações de biomassa.

Primeiramente, para calcular o IAF direto de cada parcela, fez-se necessário estimar a área foliar das parcelas. Através da AFE (Eq. 9) e da biomassa foliar determinada para cada árvore abatida (Tabela 20), foi possível calcular a área foliar de cada árvore em m².

Para a estimativa da área foliar das demais árvores não amostradas de cada parcelas, selecionou-se o modelo de melhor ajuste segundo o AIC (AKAIKE, 1974) e o que obteve menor valor de AIC e com menor número de parâmetros (Figura 19).

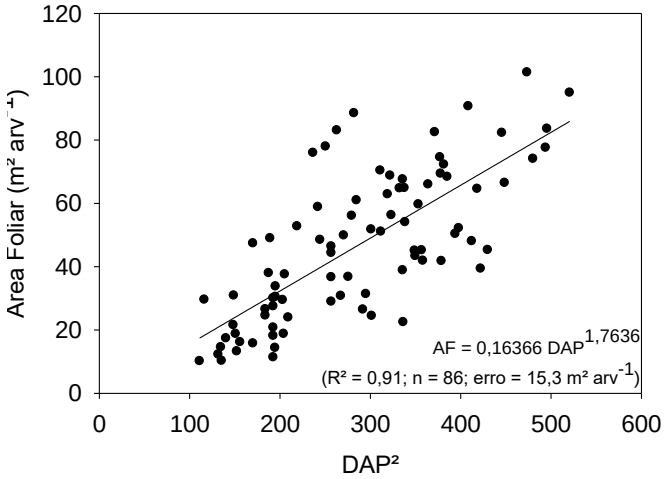

Figura 19 – Ajuste do modelo de estimativa da área foliar (AF) em função do diâmetro da árvore à 1,30 m de altura (DAP; P<0,001). AF = área foliar (m² arvore^{-1}); D = diâmetro à altura de 1,30 m (cm).

Sabendo-se que o IAF é a razão da área foliar da parcela (m²) pela área do solo que a parcela ocupa, calculou-se o IAF direto pela Equação (10).

$$IAF = \frac{AF}{Area} \quad (10)$$

onde: IAF = índice de área foliar (m² folha m^{-2} solo); AF = área foliar da parcela (m² folha); Area = área da parcela (m² solo).

3.2.7 Nutrição foliar

As acículas coletadas no terço médio da copa (nos quatro pontos cardeais) para a determinação da área foliar específica, posteriormente foram utilizadas para a análise de nutriente foliar de macronutrientes e micronutrientes.

A concentração dos nutrientes foliares (g kg^{-1} ou mg kg^{-1}) foram multiplicados pela biomassa foliar (kg ha^{-1}) para calcular a quantidade de nutriente por hectare. Assim, com a quantidade de nitrogênio (kg ha^{-1}) foi possível calcular a eficiência de uso do nitrogênio (Eq. 11)

$$EUN = \frac{WNPP}{N} \quad (11)$$

onde, EUN = eficiência de uso do nitrogênio (kg de biomassa do lenho kg^{-1} de nitrogênio foliar ano^{-1}); WNPP = produtividade primária líquida da madeira (kg ha^{-1} ano^{-1}); N = quantidade de nitrogênio foliar (kg ha^{-1}).

Além de verificar se as parcelas estavam com deficiência nutricional, utilizou-se os resultados dos nutrientes foliares como fatores independentes nas análises de correlação e multivariada em relação à eficiência de crescimento, uso da luz e do nitrogênio.

3.2.8 Suprimento, uso e eficiência de uso da luz

Considerou-se o suprimento de luz como a entrada da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) no sistema, estimada segundo metodologia descrita anteriormente.

Enquanto que a radiação fotossinteticamente ativa absorvida (APAR) foi considerada como a quantidade de radiação utilizada pela floresta, calculada pela Lei de Beer-Lambert (CANNEL, 1989; Eq. 12).

$$\boldsymbol{APAR = PAR\left(1 - e^{-k.IAF}\right)} \quad (12)$$

Onde: APAR = radiação fotossinteticamente ativa absorvida em MJ m^{-2} ano^{-1}; PAR = radiação fotossinteticamente ativa em MJ m^{-2} ano^{-1}; k = coeficiente de extinção de luz (0,5; SAMPSON; ALLEN, 1998); IAF = índice de área foliar (m^2 folha m^{-2} solo).

Calculou-se a eficiência de uso da luz - EUL através da produtividade primária líquida de madeira por unidade de luz absorvida, descrita pela Eq. (13).

$$\boldsymbol{EUL = \frac{WNPP}{\text{APAR}}} \quad (13)$$

em que: EUL = eficiência de uso da luz em g MJ^{-1}; WNPP = produtividade primária líquida de madeira em Mg ha^{-1} ano^{-1}; APAR = radiação fotossinteticamente ativa absorvida em MJ m^{-2} ano^{-1}.

Por meio do cálculo da EUL para as parcelas, foi realizado análise multivariada considerando-a como variável dependente e relacionando-a com as variáveis edafoclimáticas e do povoamento [EUL = f(solo, clima, povoamento)], gerando um modelo de estimativa da EUL.

3.2.9 Eficiência de crescimento

A eficiência de crescimento, definida por Waring, Thies e Muscato (1980), foi calculada devido à facilidade de medir as variáveis que envolvem o seu cálculo (Eq. 14).

$$\boldsymbol{EC = \frac{WNPP}{IAF}} \quad (14)$$

onde, EC = eficiência de crescimento (Mg ha^{-1} ano^{-1} IAF^{-1}); WNPP = produtividade primária líquida de madeira em Mg ha^{-1} ano^{-1}; IAF = índice de área foliar (m^2 m^{-2}).

3.2.10 Análise estatística

Todas as análises estatísticas foram realizadas no software R (versão 3.2.0). Onde a homogeneidade das variâncias e a normalidade dos dados foram verificadas para posteriores análises.

Realizou-se regressões lineares para gerar as equações de biomassa e da área foliar (P<0,05), onde o melhor modelo foi selecionado segundo o Critério de Informação de Akaike (AIC; AKAIKE, 1974) do pacote MASS no software R.

Após o cálculo da biomassa dos diferentes componentes, aplicou-se o teste de Tukey (P<0,05) para comparar a diferença do estoque de biomassa do tronco e total entre os sítios. Além disso, também utilizou-se do teste de Tukey (P<0,05) para comparar o IMA, ICA, IAF, APAR, EUL, EC, EUN e concentrações de nitrogênio foliar entre os sítios.

A correlação de Pearson (P<0,05) foi utilizada para correlacionar a EC, EUL e EUN com as variáveis edáficas, climáticas, do povoamento e da copa, descritos na Tabela 21.

A análise multivariada de Stpewise foi utilizada para gerar os modelos da EC, EUL e EUN em função das variáveis climáticas, edáficas, do povoamento e dos atributos da copa (Tabela 21).

Tabela 21 – Lista de variáveis utilizadas para análise estatística da eficiência de uso da luz (EUL) como variável dependente e as variáveis independentes de solo, clima, copa e povoamento

Categoria	Variáveis
Solo	P, K, Ca, Mg, pH, Al + H, MOS, CTC, S, V, Argila, Silte Areia, CAD, Profundidade
Clima	Precipitação, Temperaturas máxima e mínima, PAR, UR, DPV, ETP, ETR, Déficit hídrico, Excedente
Povoamento	Densidade de árvores, Idade, Área Basal, Índice de Sítio, Altitude, PV50
Copa	IAF, APAR, AFE, N, P, K, Ca, Mg, S, B, Zn, Cu, Fe, Mn, N/K, K/Ca, P/Zn

Al+H = acidez potencial; MOS = matéria orgânica do solo; CTC = capacidade de troca catiônica a pH 7; S = soma de bases, V = saturação de bases; CAD = capacidade de água disponível no solo; PAR = radiação fotossinteticamente ativa; UR = umidade relativa do ar; DPV = déficit de pressão de vapor; ETP = evapotranspiração potencial; ETR = evapotranspiração de referência; PV50 = índice de uniformidade do povoamento; IAF = índice de área foliar; APAR = radiação fotossinteticamente ativa absorvida; AFE = área foliar específica.

3.3 Resultados

3.3.1 Variação da biomassa acima do solo

A produção de biomassa variou dentro de cada sítio e entre eles, mostrando que a partir das parcelas selecionadas houve boa representação dos sítios de alta, média e baixa produtividade (Figura 20).

A variação da biomassa do tronco, galho e acícula entre as parcelas foi de: 86 a 212 Mg ha^{-1}, 14 a 27 Mg ha^{-1} e 5,4 a 9,3 Mg ha^{-1}, respectivamente (Apêndice C).

Três Barras foi o local com maior produção de biomassa do tronco (211,6 Mg ha^{-1}) e consequentemente biomassa total (242,3 Mg ha^{-1}), com pequena amplitude de produção entre as parcelas, principalmente em relação à biomassa foliar (Figura 20; Tabela 22). Já o sítio com menor produção de biomassa foi Telêmaco Borba, com biomassa total média de 151,2 Mg ha^{-1}.

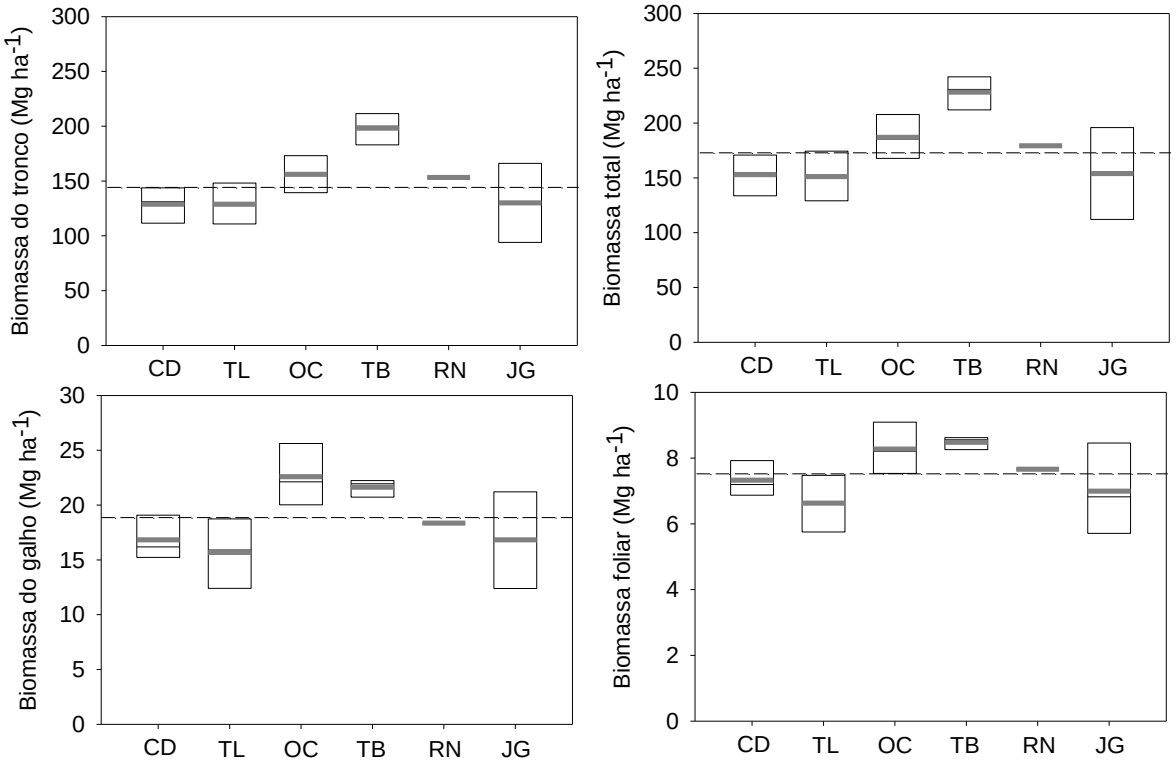

Figura 20 – Variação da biomassa das parcelas de cada sítio para tronco, galho, acícula e biomassa total no ano de 2013, com idade média de 12 anos. As linhas cinzas mais espessas representam os valores médios de cada sítio e as linhas tracejadas representam a média geral de cada componente. CD = Caçador; TL = Telêmaco Borba; OC = Otacílio Costa; TB = Três Barras; RN = Rio Negrinho; JG = Jaguariaíva

A ausência de variação da biomassa no sítio de Rio Negrinho (Figura 20) deve-se ao número reduzido de parcelas (apenas 2) comparando com os demais sítios.

A maior amplitude de biomassa em todos os componentes foi observada no sítio de Jaguariaíva, com biomassa total variando de 103 a 205 Mg ha^{-1}. A maior quantidade de acículas foi encontrada no sítio de Otacílio Costa, onde houve 26% de variação da biomassa desse componente entre suas parcelas (7,4 a 9,3 Mg ha^{-1}).

A partir da biomassa do fuste, calculou-se o incremento corrente anual (ICA) entre os anos de 2012 e 2013 e o incremento médio anual (IMA) no ano de 2013. Houve grande variação do ICA e IMA entre as parcelas (1,8 a 25,3 Mg ha^{-1} ano^{-1} e 6,4 a 15,7 Mg ha^{-1} ano^{-1}, respectivamente) sendo possível observar tal amplitude em cada sítio através do erro padrão da média na Tabela 22, onde a menor variação do ICA e IMA foi no sítio de Três Barras, o qual alcançou o maior IMA e o terceiro maior ICA.

Os sítios mais produtivos, em relação ao ICA, foram os sítios de Otacílio Costa, Caçador e Três Barras, os quais não diferiram entre si estatisticamente (Tabela 22). Enquanto que o sítio de Jaguariaíva obteve o menor ICA (5,8 Mg ha^{-1} ano^{-1}) e o menor IMA (9,8 Mg ha^{-1} ano^{-1}), diferindo-se estatisticamente dos sítios mais produtivos.

Tabela 22 – Variação dos estoques de biomassa do tronco (Btronco) e biomassa total (Btotal) e dos incrementos de biomassa do tronco entre os sítios com idade média de 12 anos (inventário de 2013)

Sítio	Btronco (Mg ha^{-1})	Btotal (Mg ha^{-1})	ICA (Mg ha^{-1} ano^{-1})	IMA (Mg ha^{-1} ano^{-1})
CD	128,8 (8,4) b	153,0 (9,7) b	18,0 (1,0) a	11,5 (0,5) ab
TL	128,9 (9,8) b	151,2 (11,9) b	9,6 (1,9) ab	10,8 (0,9) b
OC	156,1 (8,7) ab	186,9 (10,4) ab	18,3 (4,3) a	13 (0,8) ab
TB	198,2 (7,8) a	228,3 (8,2) a	17,4 (0,7) a	15,2 (0,2) a
RN	153,2 (10,8) ab	179,3 (12,4) ab	9,2 (7,4) ab	11,5 (0,8) ab
JG	130,1 (18,6) b	153,9 (21,6) b	5,8 (2,5) b	9,8 (1,6) b

Médias seguidas nas colunas por letras distintas diferem entre si ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey. Valores entre parênteses representam o erro padrão da média. CD = Caçador; TL = Telêmaco Borba; OC = Otacílio Costa; TB = Três Barras; RN = Rio Negrinho; JG = Jaguariaíva.

3.3.2 Área foliar específica e índice de área foliar

A área foliar específica projetada (AFE) medida nas árvores amostradas variou em 86%, sendo que o menor e maior valor foram, respectivamente, de 5,8 e 10,8 m^2 kg^{-1} (Figura 21). Observa-se que as maiores variações da AFE ocorreram nos sítios de Telêmaco Borba, Otacílio Costa e Três Barras.

Dentro da amostragem realizada, as árvores com menor classe de CAP apresentaram maior AFE que as dominantes.

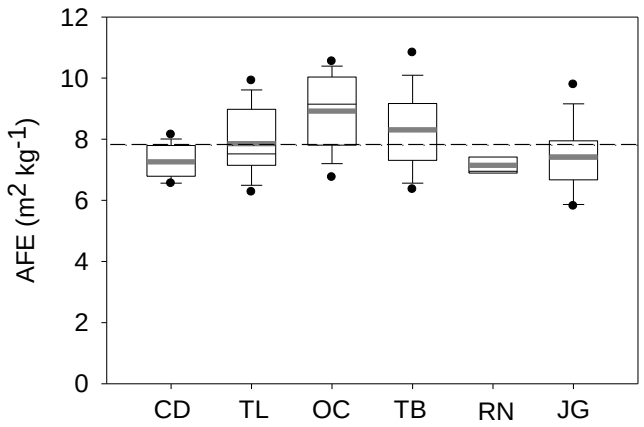

Figura 21 – Variação da área foliar específica (AFE) das árvores amostradas dentro de cada sítio. As linhas cinzas mais espessas representam os valores médios de cada sítio e a linha tracejada representa a média geral de todos os sítios. CD = Caçador; TL = Telêmaco Borba; OC = Otacílio Costa; TB = Três Barras; RN = Rio Negrinho; JG = Jaguariaíva

Observa-se na Figura 22 a diferença da arquitetura da copa em cada sítio, onde Três Barras obteve os menores valores absolutos da área foliar projetada dos terços médio e superior (17 m² e 12 m², respectivamente).

O sítio de Rio Negrinho obteve o menor valor absoluto e relativo do terço inferior (6,7 m² e 14%, respectivamente) e os maiores valores do terço médio e superior, representando 53 % e 33 % da área total da copa.

O sítio de Otacílio Costa (OC) destacou-se primeiramente pela maior área foliar do terço inferior em relação aos demais sítios e também pela semelhança da área foliar entre os terços superior e inferior, havendo uma diferença de apenas 0,74 m², o qual representou em termos relativos em 1,4% (Figura 22). Enquanto que para os demais sítios, a diferença entre o terço superior e inferior variou de 5,5 a 18,5 %.

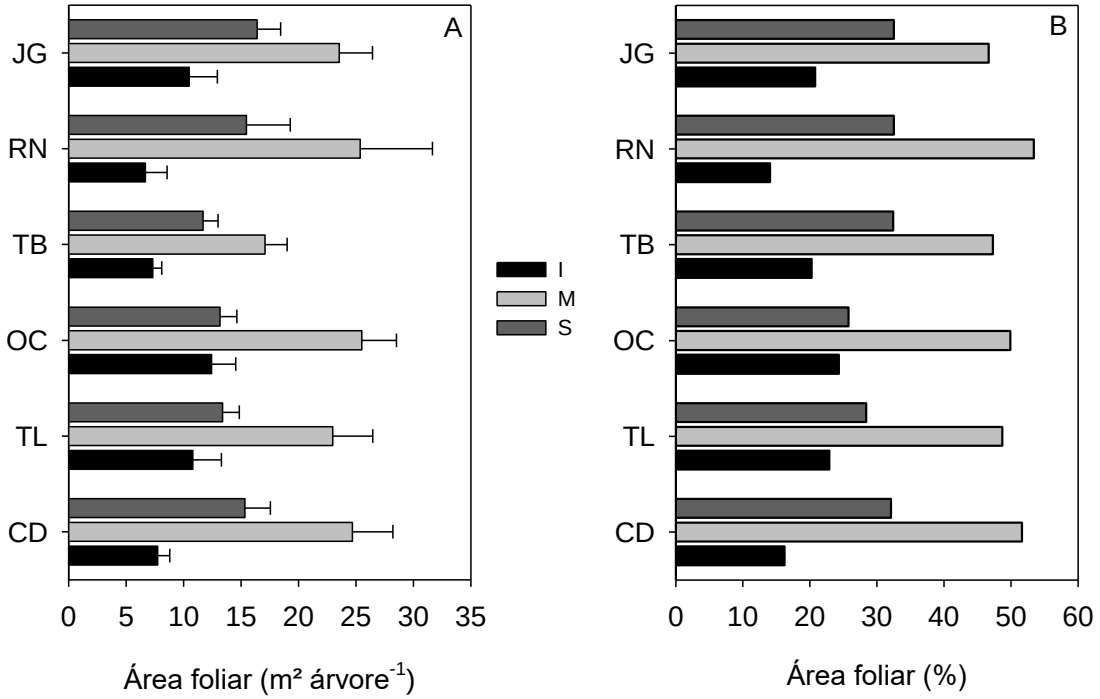

Figura 22 – Distribuição da área foliar projetada média em função da altura da copa para cada sítio em valores absolutos (A) e relativos (B). I = terço inferior; M = terço médio; S = terço superior. CD = Caçador; TL = Telêmaco Borba; OC = Otacílio Costa; TB = Três Barras; RN = Rio Negrinho; JG = Jaguariaíva

A amplitude do IAF entre as parcelas foi de 4,4 a 7,0 m² m^{-2}, representando 59% de variação, onde o sítio de Jaguariaíva obteve a maior emplitude com o maior e menor valor de IAF entre as parcelas dos demais sítios (Figura 23). Três Barras foi o sítio com a menor variação do IAF (6,4 a 6,7 m² m^{-2}) e o único que possui todas as parcelas com o IAF acima da média geral dos sítios, seguido do sítio de Otacílio Costa que possui apenas uma parcela abaixo do valor médio do IAF de 5,9 m² m^{-2} (Figura 23).

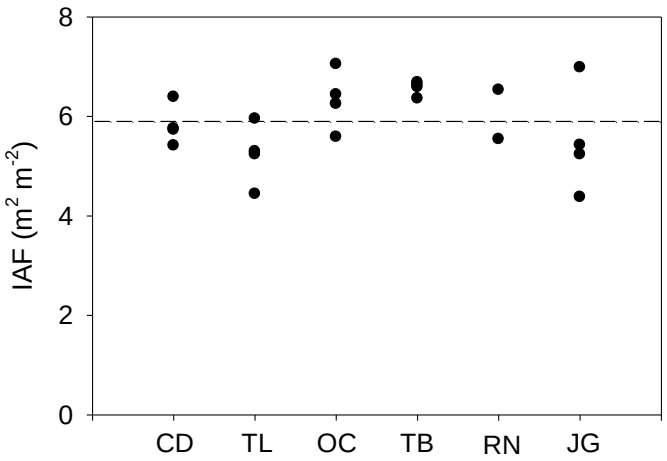

Figura 23 – Índice de área foliar (IAF) determinado pelo método direto de 22 parcelas distribuídas em 6 sítios, com idade média de 12 anos. A linha tracejada representa o valor médio do IAF. CD = Caçador; TL = Telêmaco Borba; OC = Otacílio Costa; TB = Três Barras; RN = Rio Negrinho; JG = Jaguariaíva

Analisando graficamente a distribuição do IAF direto em função do ICA (Figura 24), observou-se dois grupos distintos, um com parcelas de maior incremento e outro de menor incremento.

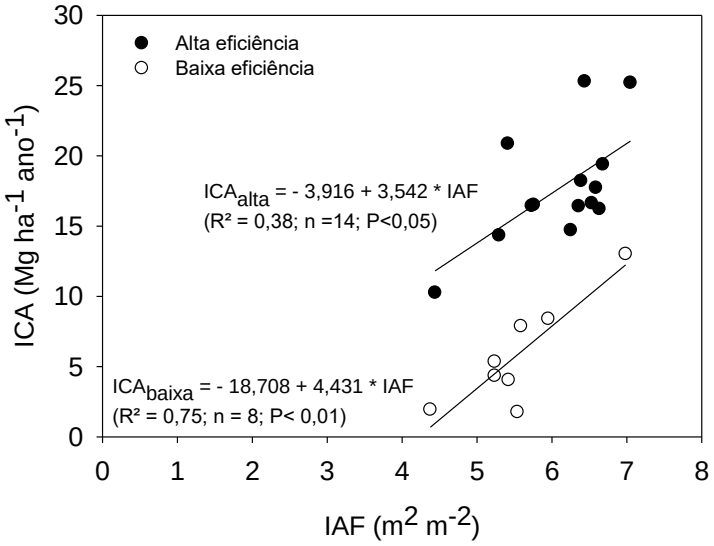

Figura 24 – Variação do incremento corrente anual (ICA) em função do índice de área foliar direto (IAF) aos 12 anos de idade. Os pontos pretos representam as parcelas de alta eficiência de crescimento e os pontos brancos representam as parcelas de baixa eficiência de crescimento

Estes resultados apontam para uma diferença da eficiência de crescimento entre as parcelas estudadas. Assim, as parcelas foram separadas em duas classes: alta e baixa eficiência de crescimento. Na classe de alta eficiência o ICA variou de 10,3 a

25,3 Ma ha^{-1} ano^{-1}, a qual foi composta por parcelas pertencentes aos sítios TB, CD, OC, TL e RN.

Enquanto que na classe de baixa eficiência o ICA variou de 1,8 a 13,0 Ma ha^{-1} ano^{-1}, com parcelas pertencentes aos sítios OC, TL, RN e JG. As curvas geradas foram significativas, onde o IAF explicou 38% e 75% da variação do ICA para a classe mais produtiva e menos produtiva, respectivamente (Figura 24).

3.3.3 Eficiência de uso da luz e de crescimento

A eficiência de uso da luz aumentou com a produtividade, onde as parcelas com maior produção anual de biomassa total foram as mais eficientes em transformar a radiação fotossinteticamente ativa em massa seca (Figura 25-A).

Houve variação de 166 % da EUL entre as 22 parcelas estudadas. As parcelas 1 e 3 de Otacílio Costa (OC) foram as mais eficientes (1,2 g MJ^{-1}) com produtividade primária líquida do lenho de 25 Mg ha^{-1} ano^{-1} e produção de biomassa total acima do solo de 30 e 29 Mg ha^{-1} ano^{-1}, respectivamente. Enquanto que a parcela 3 de Jaguariaíva obteve o menor valor de EUL (0,07 g MJ^{-1}), com produtividade primária líquida do lenho de 1,9 Mg ha^{-1} ano^{-1}.

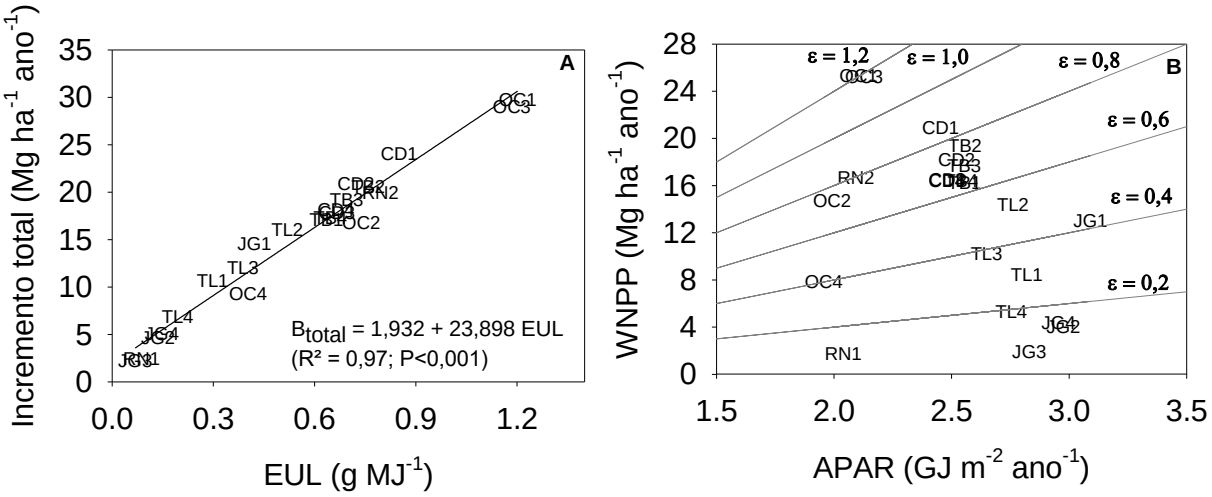

Figura 25 – A: relação do incremento de biomassa total acima do solo com a eficiência de uso da luz (EUL). B: relação entre a produtividade primária líquida do lenho (WNPP) e a radiação fotossinteticamente ativa absorvida (APAR) de cada parcela. As linhas da Figura B representam a eficiência de uso da luz (**ε**), com intervalos de 0,2. CD = Caçador; TL = Telêmaco Borba; OC = Otacílio Costa; TB = Três Barras; RN = Rio Negrinho; JG = Jaguariaíva

Entre a média dos sítios, a EUL diferiu significativamente (P<0,001), sendo que os sítios de Caçador foi o mais eficiente e de Jaguariaíva o menos eficiente (Tabela 23).

Não houve relação significativa entre a produtividade primária líquida do lenho (WNPP) com a fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida, apesar de observarmos diferentes relações entre WNPP e APAR de cada sítio (Figura 25-B). Observa-se que o sítio de Jaguariaíva (JG) além de possuir os maiores valores de APAR (Figura 25-B; Tabela 23), também ocorreu maior variação da APAR e WNPP entre as parcelas, onde a EUL foi abaixo de 0,42 g MJ^{-1}.

Tabela 23 – Média do índice de área foliar (IAF), eficiência de crescimento (EC), radiação fotossinteticamente ativa absorvida (APAR) e eficiência de uso da luz (EUL) de cada sítio em 2013, com idade média de 12 anos. Valores entre parênteses representam o erro padrão da média

Sítio	IAF (m^2m^{-2})	APAR (GJ m^{-2} ano^{-1})	EC (Mg ha^{-1} IAF^{-1})	EUL (g MJ^{-1})
CD	5,8 (0,2) a	2,5 (0,01) c	3,1 (0,3) a	0,73 (0,04) ab
TL	5,2 (0,3) a	2,7 (0,04) b	1,9 (0,4) ab	0,35 (0,07) ab
OC	6,3 (0,3) a	2,0 (0,04) d	2,8 (0,6) ab	0,88 (0,19) a
TB	6,6 (0,1) a	2,6 (0,00) c	2,7 (0,1) ab	0,68 (0,03) ab
RN	6,0 (0,5) a	2,1 (0,03) d	1,4 (1,1) ab	0,44 (0,35) ab
JG	5,5 (0,5) a	3,0 (0,05) a	1,0 (0,3) b	0,19 (0,08) b

Médias seguidas nas colunas por letras distintas diferem entre si ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey. CD = Caçador; TL = Telêmaco Borba; OC = Otacílio Costa; TB = Três Barras; RN = Rio Negrinho; JG = Jaguariaíva.

Em Três Barras e Caçador, praticamente não houve variação da APAR porém, a variação do WNPP foi de, respectivamente, 20 e 27 % entre as parcelas de cada sítio. O sítio de Otacílio Costa (OC) foi o local com maior variação da EUL (0,4 a 1,2 g MJ^{-1}) e consequentemente, a variação do WNPP também foi ampla (221%; de 7,9 a 25,3 Mg ha^{-1} ano^{-1}).

Devido às diferentes localizações dos sítios, a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa do período estudado variou e consequentemente parcelas de diferentes sítios com um mesmo IAF possuem diferentes APAR. Assim, utilizando o IAF como denominador, é possível comparar o crescimento dos povoamentos para a mesma área foliar.

O resultado da comparação das médias da eficiência de crescimento (EC) entre os sítios foi semelhante ao da eficiência do uso da luz (EUL), com excessão de Otacílio Costa e Caçador.

Otacílio Costa diferiu estatisticamente dos demais em relação à EC, o qual alcançou o maior valor médio (3,1 Mg ha^{-1} IAF^{-1}). Para a EUL, o mesmo sítio obteve o segundo maior valor médio (0,73 g MJ^{-1}) ficando atrás apenas do sítio de Caçador (0,88 g MJ^{-1}). Jaguariaíva obteve as menores médias da EC e EUL, com 1,0 Mg ha^{-1} IAF^{-1} e 0,19 g MJ^{-1}, respectivamente.

3.3.4 Uso e eficiência do uso do nitrogênio

O conteúdo médio de nitrogênio foliar por hectare foi significativamente ($P<0,01$) maior em Três Barras (162,2 kg de N ha^{-1}) e menor em Jaguariaíva (114,6 kg de N ha^{-1}). Porém, o conteúdo médio de N por área foliar não diferiu estatisticamente entre os sítios.

Entre as parcelas, a variação da EUN foi de 15,4 a 179,1 kg lenho kg^{-1} N ano^{-1}, sendo os valores mínimo e máximo representados pelas parcelas 1 de Rio Negrinho e Caçador, respectivamente.

A EUN média variou 238% entre os sítios ($P<0,001$). O sítio de Caçador mostrou-se o mais eficiente no uso do nitrogênio (155 kg lenho kg^{-1} N ano^{-1}), produzindo maior biomassa do fuste por unidade de nitrogênio foliar (Tabela 24). Enquanto que os sítios com menor EUN foram em Rio Negrinho e Jaguariaíva, os quais produziram 60 e 46 kg de biomassa de fuste por kg de nitrogênio, respectivamente.

Tabela 24 – Concentração média de nitrogênio foliar (N_f; em g de nitrogênio por kg de massa seca), conteúdo de nitrogênio foliar do povoamento (N; em kg de nitrogênio por hectare), conteúdo médio de nitrogênio por área foliar (N_a; em g de nitrogênio por m² de folha) e média da eficiência de uso do nitrogênio (EUN; em kg de incremento de massa seca do lenho kg^{-1} de nitrogênio ano^{-1}) de cada sítio

Sítio	N_f (g N kg^{-1} MS)	N (kg N ha^{-1})	N_a (g N m^{-2} folha)	EUN (kg MS kg^{-1} N ano^{-1})
CD	16,0 b	117,0 ab	2,2 a	154,5 a
TL	19,9 a	131,3 ab	2,5 a	73,6 ab
OC	18,7 ab	154,7 ab	2,1 a	117,3 ab
TB	19,1 ab	162,2 a	2,3 a	107,8 ab
RN	17,9 ab	137,8 ab	2,5 a	59,5 b
JG	16,3 ab	114,6 b	2,2 a	45,9 b

Médias seguidas nas colunas por letras distintas diferem entre si ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey. CD = Caçador; TL = Telêmaco Borba; OC = Otacílio Costa; TB = Três Barras; RN = Rio Negrinho; JG = Jaguariaíva.

3.3.5 Relação da eficiência de crescimento, uso da luz e uso do nitrogênio com as características edafoclimáticas e do povoamento

Através da correlação de Pearson foi possível identificar os fatores edáficos, climáticos, do povoamento e os atributos da copa que mais se correlacionaram com a eficiência de crescimento, de uso da luz e uso do nitrogênio (Tabela 25).

A quantidade de fósforo no solo foi a variável edáfica mais importante para a EC, EUL e EUN, sendo que a maior correlação edáfica foi entre o P e a EUN (61 %; Tabela 25). O teor de argila foi o segundo principal atributo do solo avaliado, o qual também obteve altas correlações positivas com a EC e EUN (41 % e 47 %, respectivamente).

Observa-se que o clima foi o fator que menos se correlacionou com as variáveis dependentes, principalmente com a EC e EUN (Tabela 25). A temperatura mínima foi a mais importante, a qual se correlacionou negativamente com a EC, EUL e EUN (-55 %, -70 % e -53 %, respectivamente).

Ao correlacionar os fatores do povoamento, o PV50 e a área basal foram as únicas variáveis que se correlacionaram com os três índices. A idade foi a variável com maiores correlações para a EC e EUN (-54 % e -56 %) e a área basal foi maior para a EUL (65 %).

Tabela 25 – Correlação de Pearson da eficiência de crescimento (EC), eficiência de uso da luz (EUL) e eficiência de uso do nitrogênio (EUN) com as variáveis edáficas, climáticas, do povoamento e atributos da copa (P<0,05)

Índice	Categoria	Correlação positiva	Correlação negativa
EC	Solo	P (0,52; 0,02); Argila (0,41; 0,05)	-
	Clima	-	Tmin (0,55; <0,01)
	Povoamento	AB (0,48; 0,03); PV50 (0,46; 0,03)	Idade (0,54; 0,01)
	Copa	N (0,46; 0,03); K (0,51; 0,02); Ca (0,51; 0,02); Zn (0,43; <0,05)	P/Zn (0,43; <0,05)
EUL	Solo	P (0,40; 0,05)	-
	Clima	-	Tmin (0,70; <0,001); ETP (0,59; <0,01); DEF (0,53; 0,01)
	Povoamento	AB (0,65; <0,01); PV50 (0,48; 0,03)	-
	Copa	IAF (0,65; <0,01); N (0,58; <0,01); P (0,49; 0,02); K (0,70; <0,01); Ca (0,44; <0,05); Mn (0,51; 0,02); Zn (0,46; 0,03)	-
EUN	Solo	P (0,61; <0,01); Argila (0,47; 0,03); CAD (0,44; <0,05)	Areia (0,45; 0,04)
	Clima	-	Tmin (0,53; 0,01)
	Povoamento	AB (0,42; <0,05); PV50 (0,53; 0,01)	Idade (0,56; <0,01)
	Copa	IAF (0,45; 0,04); K (0,48; 0,02); Ca (0,59; <0,01); Zn (0,49; 0,02)	P/Zn (0,48; 0,03)

CAD = capacidade de água disponível no solo; Tmin = temperatura mínima; ETP = evapotranspiração potencial; DEF = déficit hídrico; AB = área basal; PV50 = índice de uniformidade do povoamento; IAF = índice de área foliar.

Observa-se que a concentração de Ca, K e Zn nas folhas influenciaram na eficiência dos três índices, onde para o Ca foi obtida a maior correlação com a EC e EUN (51 % e 59 %) dentre as variáveis da copa. Enquanto que a maior correlação entre a EUL e as características da copa ocorreu com o K (70 %).

Nota-se que a EUL foi o índice mais sensível aos nutrientes da copa, onde houve correlação positiva com a quantidade de N, P, K, Ca, Mn e Zn. Vale resslatar a correlação negativa entre a relação P/Zn e a EC e EUN (-43 % e -48 %, respectivamente).

Os resultados da Tabela 25 mostram a quantidade de fatores de diferentes categorias (clima, solo, povoamento e copa) que podem influenciar na eficiência de

produção de lenho do *P. taeda* no sul do Brasil. Além disso, é necessário considerar a influência do material genético, o qual não será tema de discussão no presente trabalho.

Através dos modelos de regressão múltipla gerados pela análise multivariada de Stepwise, observa-se que entre as variáveis do solo, a concentração de fósforo e o teor de argila explicaram 35 % e 47 % das variações que ocorreram na EC e na EUN, enquanto que o Mg, P e pH do solo explicaram 36 % da variação da EUL (Tabela 26).

As três variáveis independentes tiveram as mesmas respostas em relação às variáveis climáticas, onde a temperatura mínima e a evapotranspiração potencial explicaram 37 %, 50 % e 43 % das variações da EC, EUL e EUN, respectivamente.

Para as variáveis do povoamento, a EC e EUL foram semelhantes, onde a área basal e a idade do povoamento explicaram 55 % e 60 % das variações. Enquanto que para a EUN as duas variáveis significativas para o modelo foram o PV50 e a idade do povoamento ($R^2 = 0,56$).

Comparando o coeficiente de determinação das quatro categorias (solo, clima, povoamento e copa) dentro de cada variável dependente, o povoamento foi a categoria que obteve os maiores valores para a EC, EUL e EUN.

Tabela 26 – Variáveis independentes selecionadas por Stepwise tendo como variáveis dependentes a eficiência de crescimento (EC; Mg^{-1} ha^{-1} ano^{-1} IAF^{-1}), eficiência de uso da luz (EUL; g MJ^{-1}) e de uso do nitrogênio (EUN; kg kg^{-1}). A categoria "Todas" indica que realizou-se apenas uma regressão para todas as variáveis independentes. Todas as variáveis independentes selecionadas foram significativas na regressão (P < 0,05; n = 22)

Variável dependente	Categoria	Modelo	R^2
EC	Solo	0,6061 + 0,0497 [P_s]+ 0,0020 Argila	0,35 (P<0,05)
	Clima	20,5403 + 0,0041 ETP - 1,7385 Tmin	0,37 (P<0,05)
	Povoamento	5,4223 + 0,0656 AB - 0,5745 Idade	0,55 (P<0,001)
	Copa	-2,079 + 1,959.10^{-5} [N_c] + 8,043.10^{-5} [Ca_c]	0,48 (P<0,01)
	Todas	-2,518 + 5,340.10^{-2} [P_s] + 4,516.10^{-5} [Ca_c] + 2,290.10^{-5} [N_c]	0,64 (P<0,001)
EUL	Solo	-2,4234 - 0,0021 [Mg_s] + 0,7736 pH + 0,0183 [P_s]	0,36 (P<0,05)
	Clima	5,6618 + 0,0005 ETP - 0,4368 Tmin	0,50 (P<0,01)
	Povoamento	0,6683 + 0,0260 AB - 0,1340 Idade	0,60 (P<0,001)
	Copa	-0,4606 + 2,562.10^{-5} [K_c] + 1,393.10^{-5} [Ca_c]	0,58 (P<0,001)
	Todas	4,59 + 5,631.10^{-5} [P_c] - 0,2511 Tmin - 0,1154 Idade	0,72 (P<0,001)
EUN	Solo	12,9423 + 2,6922 [P] + 0,0984 Argila	0,47 (P<0,01)
	Clima	1074,6236 + 0,2758 ETP - 97,0746 Tmin	0,43 (P<0,01)
	Povoamento	260,609 + 477,524 PV50 - 24,40 Idade	0,56 (P<0,001)
	Copa	-119,3 + 3,699.10^{-3} [Ca_c] + 23,88 IAF	0,48 (P<0,01)
	Todas	-1,277.10^2 + 2,333 [P_s] + 25,51 IAF + 2,121.10^{-3} [Ca_c]	0,63 (P<0,001)

[P] = concentração de fósforo no solo (mg dm^{-3}); CAD = capacidade de água disponível no solo (mm); Tmin = temperatura mínima do ar (°C); ETP = evapotranspiração potencial (mm ano^{-1}); PV50 = índice de uniformidade; Idade = Idade da parcela (anos); [N_c] = nitrogênio foliar (kg ha^{-1}); [Ca_c] = cálcio foliar (kg ha^{-1}); Argila = teor de argila no solo (g kg^{-1}); UR = umidade relativa do ar (%); IAF = índice de área foliar (m^2 m^{-2}).

Em relação às características da copa, a quantidade de cálcio encontrada nas acículas foi a variável mais importante, presente nas três regressões.

Testando todas as variáveis independentes significativas nas regressões anteriores, gerou-se um modelo geral para cada variável dependente. O modelo gerado para eficiência de crescimento possui 2 variáveis da copa e 1 do solo para explicar sua variação, sendo estes: concentração de cálcio e nitrogênio da copa e de fósforo no solo (R^2 = 0,64; P<0,001).

A temperatura mínima do ar, idade do povoamento e concentração de fósforo da copa compõem o modelo para a EUL, o qual explicaram 72 % (P<0,001) de sua

variação. Enquanto que o IAF, a concentração de fósforo no solo e de cálcio na copa foram as variáveis que explicaram significativamente as variações da EUN, com o coeficiente de determinação de 63 % (P<0,001).

3.4 Discussão

3.4.1 Produção de biomassa acima do solo e características da copa

O estoque médio de biomassa do tronco nas parcelas estudadas (149 Mg ha^{-1}) aos 12 anos de idade foi abaixo do reportado por Sixel (2012) em plantios de *P. taeda* com 16 anos em Telêmaco Borba - PR, o qual encontrou valores médios de 220 Mg ha^{-1}.

Porém, em Três Barras, a biomassa do tronco foi de 211 Mg ha^{-1} em duas das quatro parcelas amostradas, sendo tais valores próximos ao relatado por Sixel (2012), apesar das áreas destas parcelas serem dois anos mais jovens (14 anos).

Em Arapoti - PR, Oki (2002) encontrou estoque de 278 Mg ha^{-1}, enquanto que a biomassa total foi de 358 Mg ha^{-1} aos 25 anos de idade. No presente estudo, a biomassa total média foi de 175,4 Mg ha^{-1} com idade média de 12 anos.

Em Jaguariaíva, estudo realizado por Bizon (2005) relata que o sítio mais produtivo apresentou estoque do tronco de 321 Mg ha^{-1} em povoamento com 25 anos de idade, com IMA de 12,8 Mg ha^{-1} ano^{-1}, enquanto que para o mesmo sítio, a biomassa de acícula foi de 13 Mg ha^{-1}. O sítio de Jaguariaíva do presente estudo obteve IMA variando de 6,4 a 13,8 Mg ha^{-1} ano^{-1} com idade média de 13 anos, sendo que a média da biomassa de acículas foi de 7 Mg ha^{-1}.

Em plantios de *P. taeda* com 13 anos de idade altamente produtivos na Argentina, a biomassa de acículas, do tronco e total acima do solo foram de 15,8 Mg ha^{-1}, 206 Mg ha^{-1} e 261 Mg ha^{-1}, respectivamente (CALDATO, 2011). Comparando com a parcela 2 do sítio mais produtivo (Três Barras; Apêndice C) a biomassa de acículas e total foram 45 % e 7 % menores e o estoque de biomassa do tronco foi maior 3 % (8,6 Mg ha^{-1}, 242 Mg ha^{-1} e 212 Mg ha^{-1}, respectivamente).

Comparando com trabalho realizado nos Estados Unidos, o estoque de biomassa do fuste foi 2 vezes maior que povoamentos aos 16 anos sob fertilização, irrigação e matocompetição (ALBAUGHT et al., 2004).

Esta diferença na produção de biomassa pode ser devido ao efeito combinado da silvicultura (fertilização, matocompetição e preparo do solo) com o material genético,

além da maior disponibilidade de recursos (luz, água e nutrientes) e à temperaturas mais favoráveis, quando comparado às produtividades do *Pinus* nos EUA (BORDERS; BAILEY, 2001).

Na Georgia, o plantio mais produtivo, submetido à fertilização, matocompetição e preparo do solo mecanizado, alcançou aproximadamente 220 Mg tronco ha^{-1} aos 13 anos de idade (BRYARS et al., 2013).

Tais resultados indicam que as parcelas estudadas estão entre média a alta produtividade comparado com os estudos supracitados (Tabela 22).

A média da área foliar específica das árvores amostradas por sítio variou de 7,1 m^2 kg^{-1} (em Rio Negrinho) a 8,9 m^2 kg^{-1} (em Otacílio Costa; Figura 21). Na literatura, estudos com *Pinus taeda* relatam a área foliar específica projetada variando de aproximadamente 3 a 11 m^2 kg^{-1} para diferentes idades e sítios (DALLA-TEA; JOKELA, 1991; DELUCIA; GEORGE; HAMILTON, 2002; CARNEIRO, 2013; MARTIN; JOKELA, 2004; SAMPSON; ALLEN, 1998).

Segundo Landsberg e Sands (2011), a espécie, idade da árvore, posição da folha, variações nutricionais e hídricas do solo, afetam a área foliar específica. A qual está envolvida na maximização do ganho de carbono, de água e da eficiência de uso dos nutrientes.

O destaque à AFE deve-se à sua utilização para descrever a área de superfície fotossintética a qual pode ser determinada a partir da biomassa seca, tornando-se um importante fator fisiológico (LANDSBERG; GOWER, 1997; NOUVELLON et al, 2010). Tal fator implica diretamente no cálculo da área foliar do povoamento e consequentemente no índice de área foliar.

Em todos os sítios, os padrões de distribuição foliar foram semelhantes, onde o terço médio e superior foram as posições com maior e menor área foliar, respectivamente. Porém, o sitio de Otacílio Costa se diferenciou deste padrão por apresentar valores próximos entre o terço inferior e superior (24 % e 26 % da área foliar total da copa, respectivamente; Figura 22), e praticamente o dobro de área no terço médio. Esta diferença da arquitetura da copa no sítio de Otacílio Costa em relação aos demais sítios pode indicar influência do material genético.

Devido à arquitetura cônica da copa e a distribuição aleatória das acículas ao longo dos galhos do *Pinus taeda*, a distribuição foliar das árvores estudadas está dentro do esperado, com maior área foliar no terço médio e menores valores para o terço inferior. Sendo que todas as parcelas estudadas já alcançaram o fechamento

das copas entre as árvores, ocasionando o auto sombreamento e favorecendo a queda das acículas do terço inferior.

Estudos mostram diferentes opções para determinar o IAF direto. Para o *Pinus*, diversos autores optaram por multiplicar diretamente a biomassa foliar estimada pela AFE média (CAMPOE et al., 2013a; DALLA-TEA; JOKELA,1991; McCRADY; JOKELA, 1998; SAMPSON; ALLEN, 1998; SAMPSON et al., 2003). Enquanto que para *Eucalyptus*, a área foliar foi estimada por meio de equações alométricas, sendo tal valor dividido pela área do povoamento (CAMPOE et al., 2013b; NOUVELLON et al., 2010).

O IAF determinado segundo metodologia descrita anteriormente (Eq. 10) alcançou o valor máximo de 7,0 m^2 m^{-2} (Figura 23), o qual é considerado acima do IAF “ótimo” teórico para a máxima produtividade da espécie, segundo Gholz (1986 apud SAMUELSON; JOHNSEN; STOKES, 2004).

Em delineamento fatorial de irrigação e fertilização com *Pinus taeda* em áreas de baixa fertilidade nos EUA, aos 11 anos de idade, Sampson e Allen (1998) relatam o pico do IAF de 3,42 m^2 m^{-2}, enquanto que para o tratamento controle o pico foi 1,67 m^2 m^{-2}. Aos 6 anos, o IAF da mesma espécie variou de aproximadamente 3,0 a 5,5 m^2 m^{-2} no tratamento controle e no tratamento de manejo intensivo, respectivamente (SAMUELSON; JOHNSEN; STOKES,2004).

O efeito da fertilização e da exclusão de matocompetição no *P. taeda* foi positivo em experimento na Flórida, onde o pico do IAF, entre os 9 e 11 anos de idade, foi de aproximadamente 5 m^2 m^{-2} (MARTIN; JOKELA, 2004).

Os ganhos do IAF em resposta aos tratamentos de manejo intensivo (fertilização, irrigação, matocompetição e preparo de solo), demonstram a grande influência da disponibilidade nutricional e hídrica na área foliar em povoamentos de *P. taeda* localizados em sítios de baixa fertilidade. Segundo Samuelson et al. (2008), a disponibilidade de nutrientes no solo é um fator determinante da área foliar e consequentemente da produtividade da espécie nos EUA.

Rojas (2005), avaliando a resposta à fertilização do *P. taeda* aos 5 anos de idade em sítios na Flórida e na Geórgia, relata que o IAF representou 89% da variação do ICA, obtendo valores máximos de aproximadamente 5,3 m^2 m^{-2} e 45 m^3 ha^{-1} ano^{-1}. Aos 10 anos, sítios da mesma espécie submetidos à fertilização, controle de matocompetição e irrigação atingiram ICA de 25,6 Mg ha^{-1} ano^{-1} e IAF de 5,8 m^2 m^{-2} na Georgia (SAMUELSON et al., 2008).

Os valores encontrados nos trabalhos supracitados, considerados pelos autores como sítios de alta produtividade, apresentam valores próximos do IAF e ICA máximos da curva das parcelas de alta eficiência de crescimento observada na Figura 24.

As duas curvas (Figura 24) mostram que para o mesmo índice de área foliar, ou seja, para a mesma área foliar que intercepta a radiação fotossinteticamente ativa, houve diferentes produções de lenho indicando diferença da eficiência de crescimento e de uso da luz entre as parcelas estudadas.

3.4.2 Fatores que controlam a eficiência do uso da luz e do crescimento

As parcelas mais eficientes no uso da luz alcançaram valores médios entre 1,18 a 1,20 g MJ^{-1}, tais valores são maiores que os encontrados para o *P. taeda* nos EUA entre 6 a 9 anos (ALLEN et al., 2005; DALLA TEA; JOKELA, 1991; CAMPOE et al., 2013a; MARTIN; JOKELA, 2004).

Uma revisão feita por Landsberg e Sands (2011) relata que a EUL de coníferas em regiões de clima temperado varia entre 0,2 a 0,5 g MJ^{-1}, enquanto que para diversas espécies de *Eucalyptus* a variação é de 1,0 a 3,3 g MJ^{-1}.

McCrady e Jokela (1998), em um estudo para comparar diferentes materiais genéticos de *P. taeda*, relatam uma variação da EUL de 1,08 a 1,25 g MJ^{-1} entre os materiais, com incremento de biomassa variando de 27 a 32 Mg ha^{-1} ano^{-1} aos 4 anos de idade.

Para avaliar de forma mais acessível o crescimento do fuste em relação à captura de luz, Waring, Thies e Muscato (1980) defendem a hipótese de que o crescimento do fuste é em função da área foliar, denominando como “eficiência de crescimento”. A eficiência de crescimento tem sido amplamente utilizada em diversos estudos com diferentes espécies florestais.

Entretanto, Binkley et al. (2012) alertam sobre a diferença entre a eficiência de uso da luz e eficiência de crescimento a nível do povoamento. Pois apesar da linearidade entre estes dois índices aplicados individualmente às árvores, quando os compara no povoamento a eficiência de uso da luz e eficiência de crescimento não são equivalentes. Tal diferença, explicam os autores, é devido à não linearidade entre o índice de área foliar e a absorção de luz.

No presente estudo, os resultados estatísticos da EUL e EC foram semelhantes ao comparar as médias dos sítios, porém ao avaliar as parcelas individualmente

nota-se que para as parcelas com eficiência de crescimento de aproximadamente 4 Mg ha^{-1} IAF^{-1}, a eficiência de uso da luz variou em 42 % entre elas (de 0,85 a 1,20 g MJ^{-1}; Apêndice D).

Assim como ocorreu com a EUL, os sítios mais produtivos (Caçador, Otacílio Costa e Três Barras) também foram os mais eficientes no crescimento em relação ao IAF (Tabelas 23 e 24), alcançando valores médios de 2,9 Mg ha^{-1} IAF^{-1} entre as idades de aproximadamente 10 a 14 anos.

Aos 4 anos de idade, a fertilização aumentou a eficiência de crescimento do *P. taeda* de 0,4 para 0,56 Mg ha^{-1} IAF^{-1} (COLBERT et al., 1990). Com 16 anos, Albaugh et al. (2004) relatam que a eficiência de crescimento da mesma espécie em solos de baixa fertilidade na Carolina do Norte atingiu 2,9 Mg ha^{-1} IAF^{-1} quando submetidos ao manejo intensivo (fertilização, irrigação e controle da matocompetição). Na Georgia, a EC variou de 2,6 a 3,7 Mg ha^{-1} IAF^{-1} em povoamentos de *P. taeda* aos 6 anos de idade (SAMUELSON et al., 2004).

Para Albaugh et al. (1998), o aumento da EC em tratamentos com maior disponibilidade de recursos é, em partes, resultante da partição proporcionalmente maior da biomassa das raízes finas para os componentes da planta acima do solo, principalmente para as folhas. Em consequência desta alteração na partição de biomassa, ocorre uma redução da respiração e aumento da fotossíntese, decorrente da diminuição de raízes finas e acréscimo da biomassa foliar.

Campoe et al. (2013a) avaliaram a partição de carbono em um povoamento de *Eucalyptus* e concluíram que o aumento da EUL foi decorrente da alteração da partição de biomassa das raízes para o fuste devido à maior disponibilidade de água e nutrientes no solo.

Segundo estudos realizados por Gower, Isebrands e Sheriff (1995), para aumentar a absorção de nutrientes e água em locais desfavoráveis ao crescimento, as árvores reduzem a alocação de carbono para as folhas e aumentam a produção de raízes finas e micorrizas.

Ryan et al. (2010) afirmam que a disponibilidade de recursos influencia nos mecanismos da planta para a produção de biomassa, podendo ocorrer mudanças na captura e partição de carbono.

O presente trabalho não avaliou a produção da biomassa de raízes, porém, o aumento da EUL nos sítios com maior produção de biomassa total (Figura 25-A) sugere uma alteração na partição de carbono devido ao aumento da disponibilidade

de recursos, já que o aumento da EUL correlacionou-se com a maior disponibilidade de P no solo e com maiores concentrações de macronutrientes e micronutrientes foliares, em destaque a concentração de K e N foliar, os quais obteram as maiores correlações (Tabela 25).

O potássio está envolvido no transporte de elétrons nos tilacóides e no controle estomático das folhas, o qual é de suma importância para a entrada e saída de CO_2 e água na folha, havendo uma alta relação com a fixação de carbono na planta (CARNEIRO, 2013).

A disponibilidade de nitrogênio foliar está intrinsicamente relacionada com a atividade da Rubisco e com as taxas fotossintéticas (LANDSBERG; GOWER, 1997). Consequentemente, o nitrogênio também está associado à fixação de carbono na planta, o qual apresenta uma relação direta com a partição de carbono e a dinâmica das raízes finas (RYAN et al., 1995).

Além disso, a maior disponibilidade de água no solo também é um fator importante para a absorção dos nutrientes pelas raízes e redução da produção de raízes mais profundas, sendo que todos os sítios estudados apresentaram boa distribuição de chuva ao longo dos anos avaliados com reduzido déficit hídrico (Figura 16).

Assim como ocorreu em trabalhos supracitados, os recursos disponíveis nos sítios podem ter alterado a partição de carbono na planta, aumentando as taxas fotossíntéticas e em consequência a fixação de carbono no tronco. Entretanto, deve-se considerar, segundo Gower et al. (1994), que o grau de melhoramento genético também podem influenciar nos processos de captura e partição de carbono.

Apesar das áreas avaliadas no presente estudo não terem recebido nenhum tipo de fertilização, o gradiente geográfico de fertilidade natural dos solos das parcelas permitiu avaliar o efeito edáfico nas eficiências de crescimento e uso da luz.

Os modelos gerados para a EUL e EC em função dos atributos do solo mostram que a concentração de fósforo no solo foi comum em ambos, havendo uma relação positiva. Assim também ocorreu com a concentração de cálcio foliar em ambos os modelos em função das variáveis da copa (Tabela 26).

O fósforo é incorporado à diversos compostos orgânicos, sendo que uma de suas principais funções é a participação no processo de fosforilação resultando na produção de ATP, a qual é responsável pela geração de energia para o crescimento e desenvolvimento da planta (TAIZ; ZEIGER, 2004). Enquanto que o cálcio participa

dos processos de regulação da hidratação, ativador de enzimas e regulador do crescimento em extensão na planta, sendo encontrado principalmente na parede celular das folhas e cascas (LARCHER, 2006).

O IAF também foi uma variável da copa importante para a EUL, onde encontrou-se alta correlação positiva entre ambos (65 %; P<0,01). Tal resultado confere com o relatado por Samuelson et al. (2004) e indicam a importância do IAF na definição de altas produtividades do *P. taeda* submetidos à maior disponibilidade de recursos. Segundo os autores, a disponibilidade de água e nutrientes acelerou o desenvolvimento e produção de biomassa da espécie, ocasionando um significativo impacto no IAF.

Avaliando a influência do clima, os modelos indicaram que os sítios com temperaturas mínimas mais amenas e maior evapotranspiração obteram maior EUL e EC (Tabelas 25 e 26). Munhoz (2011) concluiu que os sítios mais produtivos de *P. taeda* no sul do Brasil estavam localizados em regiões com temperaturas mínimas menores.

As análises realizadas mostraram que a uniformidade do povoamento também é um fator que deve ser considerado, onde a relação da EUL e EC com o PV50 indicou que a uniformidade dos povoamentos influenciaram positivamente na eficiência da árvore e consequentemente na produção de lenho (Tabela 25).

Munhoz (2011) estudando a mesma espécie no sul do Brasil, relata que os plantios mais produtivos também foram os mais uniformes, ou seja, com menor diferença de crescimento entre as árvores.

Campoe et al. (2012) avaliaram a diferença do *P. taeda,* a nível de árvore e sob fertilização, irrigação e matocompetição, na interceptação de radiação, na produtividade primária líquida e na eficiência de uso da luz. Os autores concluíram que as árvores dominantes e os tratamentos com maior disponibilidade de água e nutrientes obteram maior EUL, resultando em maior ganho na produtividade primária líquida comparado às árvores não dominantes submetidas ao mesmo tratamento.

Binkley et al. (2010) também relatam diferença na absorção e eficiência de uso da luz para o *Eucalyptus*, sendo que as árvores dominantes crescem mais rápido devido à maior absorção de luz por árvore e à maior eficiência de uso da luz.

O presente estudo não avaliou o uso e eficiência de uso da luz a nível de árvore. Porém, a relação positiva da EUL, EC e EUN com o índice de uniformidade (Tabela 25) indica a ocorrência de diferentes padrões de dominância nos sítios, contrariando

a hipótese de Fernandéz et al. (2012), onde afirmam que os povoamentos de *P. taeda* com menor dominância de crescimento, ou seja, mais uniformes, não resultaram em maior eficiência de crescimento.

A uniformidade do povoamento é afetada pela qualidade do plantio – com redução da mortalidade e do replantio tardio; e a homogeneidade das práticas silviculturais - como os resíduos da colheita espalhados no campo de forma uniforme, frequente controle da matocompetição e qualidade da adubação e do preparo do solo (Hakamada, 2012).

O modelo geral descrito na Tabela 26, o qual considerou as variáveis de todas as categorias, mostrou que a nutrição do povoamento (solo e copa) foi o fator mais importante para o aumento da EC. Para a EUL, o modelo indicou que os sítios mais jovens, com temperaturas mais amenas e povoamentos com maior concentração de P foliar serão mais eficientes no uso da luz.

3.4.3 Uso do nitrogênio e eficiência de uso

Apesar da diferença significativa do nitrogênio foliar (N_f) entre os sítios ($P<0,01$; Tabela 23), todas as concentrações estão acima do limite crítico de deficiência para o *P. taeda* definido para plantios no Brasil (abaixo de 11,0 g kg^{-1}; GONÇALVES, 1995) e nos EUA abaixo de 12,0 g kg^{-1} (SCHULTZ, 1997). Entre as parcelas, o N_f variou de 14,4 a 21,7 g kg^{-1}, portanto, pode-se considerar que os povoamentos estudados não possuem deficiência de nitrogênio.

Vale ressaltar que altos teores da matéria orgânica do solo contribuem de forma positiva para o aumento da disponibilidade do nitrogênio no solo devido à presença de organismos mineralizadores (GONÇALVES et al., 2005).

Estes resultados conferem com estudos nutricionais em povoamento de *P. taeda* no Brasil em diferentes idades, os quais mostram que concentrações de N foliar acima do limite crítico são frequentemente encontradas (BIZON, 2005; CARNEIRO, 2013; REISSMANN; KOEHLER; SOUZA, 1990; REISSMANN; WISNEWSKI, 2005; SIXEL, 2012; VIEIRA; SCHUMACHER; BONACINA, 2011).

O contrário ocorre em plantios da mesma espécie nos EUA, onde frequentemente há deficiência de nitrogênio, sendo que diversos autores relatam a dificuldade de manter o N foliar em 12,0 g kg^{-1} ao longo dos anos, mesmo com a adição periódica de fertilizantes (ALBAUGH et al., 2008; CARLSON et al., 2014; COBB et al., 2008; FOX et al., 2007; SAYER et al., 2004).

Tal dificuldade na manutenção do N foliar pode ocorrer devido às características edáficas e climáticas, onde grande parte da área plantada de *P. taeda* no sudeste dos EUA está localizada em solos pobres e arenosos, além de períodos com temperaturas muito baixas e presença de neve (ALBAUGH et al., 2008).

Consequentemente, estas condições são desfavoráveis ao acúmulo de microorganismos mineralizadores da matéria orgânica no solo, quando comparado às condições brasileiras, reduzindo as taxas de mineralização do nitrogênio do solo (GONÇALVES et al., 2005; RODRIGUEZ, ALVAREZ, 2010).

Esta diferença nutricional do *P. taeda* entre os povoamentos no Brasil e nos EUA também foi observada por Harms, DeBell e Whitesell (1994) comparando a produção da espécie em Maui – Havaí (EUA) e na Carolina do Sul (EUA). Os autores relatam que a concentração de N no Havaí são tão altas (70% maior; 17,3 g kg^{-1}) como nunca haviam observado em pesquisas realizadas com a espécie nos EUA.

Uma forma de avaliar a capacidade da planta de transformar N em biomassa é a eficiência de uso do nitrogênio. Este termo é definido como a produção de biomassa por unidade de nitrogênio absorvido pela folha.

A EUN foi aproximadamente 3,4 vezes maior no sítio de Caçador (154,5 kg kg^{-1}), comparado com o sítio menos eficiente em Jaguariaíva (45,9 kg kg^{-1}; Tabela 24).

Villacorta et al. (2015) testando três clones de *P. taeda* aos 3 anos de idade na Flórida, encontrou diferença na eficiência do nitrogênio, a qual variou de 53 a 105 kg kg^{-1}. Com 6 anos de idade a EUN da mesma espécie variou de 80 a 115 kg kg^{-1} no sudeste dos EUA (COBB et al., 2008).

Segundo Li, McKeand e Allen (1991) e Villacorta et al. (2015), as características de EUN encontradas em diferentes materiais genéticos de *P. taeda*, apresentaram grande controle genético, principalmente em solos com baixos níveis de N. Portanto, a EUN pode ser uma importante característica de seleção de materiais genéticos mais produtivos.

Em relação aos fatores edáficos, a concentração de fósforo e o teor de argila no solo foram as variáveis que mais se correlacionaram com a EUN (61 % e 47 %, respectivamente), explicando 47 % da variação do índice no modelo gerado para a categoria de solo (Tabelas 25 e 26).

A disponibilidade de fósforo para a planta pode influenciar diretamente no uso do nitrogênio, afetando o crescimento da planta e consequentemente diminuindo a EUN.

As correlações significativas para a EUN foram muito semelhantes com os resultados obtidos para a EC. Sendo a concentração de fósforo no solo e o cálcio foliar as variáveis que mais se correlacionaram com a EUN (61 % e 59 %, respectivemente; Tabela 25).

A EUN obteve a mesma resposta que a EC e EUL para o modelo gerado com as variáveis climáticas, onde a temperatura mínima e a evapotranspiração foram significativas (Tabela 26). Enquanto que para o modelo do povoamento, o resultado diferiu dos demais índices, sendo o PV50 e a idade do povoamento as variáveis mais significativas.

Para a copa, a concentração de cálcio e o IAF foram os mais significativos no modelo gerado. A relação com o Ca pode ser explicada pela alta quantidade desse nutriente absorvido pelas acículas em Caçador, Otacílio Costa e em Três Barras (28 kg ha^{-1}, 23 kg ha^{-1} e 21 kg ha^{-1}, respectivamente), os quais são os sítios mais produtivos, conforme descrito na Tabela 22.

Assim como ocorreu na EUL e EC, o zinco foliar se correlacionou positivamente com a EUN. Segundo Reissman e Wisnewski (2005), este elemento é considerado um dos micronutrientes mais limitantes ao crescimento do *P. taeda* na região do 2º Planalto do Paraná.

O Zn é importante na ativação de diversas enzimas na planta, além de interagir com o nitrogênio na formação de proteínas, como as encontradas nos cloroplastos (MENGEL; KIRKBY, 2001). Através da análise foliar (Apêndice E), observa-se que apenas os sítios de Caçador e Otacílio Costa estão dentro da faixa adequada para a concentração de zinco, entre 30 a 45 mg kg^{-1}, sugerida por Gonçalves (1995).

A correlação negativa da relação P/Zn ocorreu para a EUN e EC (Tabela 24). Reissman e Wisnewski (2005), encontraram correlação negativa de P/Zn com o crescimento do *P. taeda* em locais com altos níveis de fósforo. Segundo Mengel e Kirkby (2001), solos com altos níveis de P induzem a deficiência de Zn devido à uma desordem metabólica, tornando-o ineficaz no metabolismo da planta.

Ao avaliar a influência de todas as variáveis independentes em conjunto, o modelo linear gerado indica que os sítios com maior EUN possuem solos com maior disponibilidade de P, maior concentração de Ca nas acículas e povoamentos com maior IAF (Tabela 26).

3.5 Conclusão

Houve grande variabilidade do estoque de biomassa dos diferentes componentes entre as parcelas, sendo o sítio de Três Barras o mais produtivo quanto ao IMA e o sítio de Otacílio Costa o mais produtivo quanto ao ICA em relação aos demais sítios com idade média de 12,4 anos.

O IAF se correlacionou positivamente com o ICA, porém sua relação diferiu entre as parcelas mais e menos eficientes no crescimento.

A eficiência de uso da luz correlacionou-se positivamente com a produção de biomassa total acima do solo, porém não houve relação significativa entre a produção de biomassa do lenho com a radiação fotossinteticamente ativa absorvida pelo dossel.

Através do modelo gerado para a EUL pode-se concluir que as maiores eficiências serão encontradas em sítios com temperaturas mais amenas, mais jovens e com maior concentração de P foliar.

Pode-se concluir a disponibilidade de nutrientes no solo e absorvido pela planta foi o principal fator que explicou a variação da EC nos povoamentos.

O aumento da EUN está relacionada à maior concentração de fósforo no solo, de cálcio foliar e maior interceptação de luz (alto IAF).

O clima foi o fator de menor relevância e a disponibilidade de nutrientes foi o de maior relevância para explicar, através dos modelos gerados, as variações das eficiências do uso dos recursos naturais em povoamentos de *Pinus taeda* no sul do Brasil.

Dessa forma, modelos baseados em processos podem ser utilizados com o objetivo de predizer a produtividade do *Pinus taeda* no Brasil, tornando-se uma ferramenta importante para o manejo da espécie em face ás mudanças climáticas.

Retornando às hipóteses do presente trabalho, verifica-se que:

I. Há relação positiva do índice de área foliar (IAF) e da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (APAR) com a produtividade primária líquida do lenho: **Corroborada para o IAF e não corroborada para a APAR**;

II. A elevada produção de biomassa do lenho está associada à maior eficiência do crescimento, do uso da luz e do nitrogênio: **Corroborada**;

III. As áreas mais uniformes de *Pinus taeda* estão associadas à maior eficiência do crescimento e do uso da luz e do nitrogênio: **Corroborada**;

IV. Os sítios com maior eficiência do crescimento, do uso da luz e do uso do nitrogênio possuem maior status nutricional da copa comparado aos sítios menos eficientes de *Pinus taeda*: **Corroborada**.

Referências

AKAIKE, H. A new look at the statistical model identification. **IEEE Transactions on Automatic Control**, New York, v. 19, n. 6, p. 716–723, 1974.

ALBAUGH, T.J.; ALLEN, H.L.; FOX, T.R. Nutrient use and uptake in *Pinus taeda*. **Tree physiology**, Oxford, v. 28, n. 7, p. 1083-1098, 2008.

ALBAUGH, T.J.; ALLEN, H. L.; DOUGHERTY, P.M.; JOHNSEN, K.H. Long term growth responses of loblolly pine to optimal nutrient and water resource availability. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 192, p. 3-19, 2004.

ALBAUGH, T.J.; ALLEN, H.L.; STAPE, J.L.; FOX, T.R.; RUBILAR, R.A.; PRICE, J.W.. Intra-annual nutrient flux in *Pinus taeda*. **Tree Physiology,** Oxford, v. 32, n. 10, p. 1237-1258, Oct. 2012.

ALLEN, C.B.; WILL, R.E.; JACOBSON, M.A. Production efficiency and radiation use efficiency of four tree species receiving irrigation and fertilization. **Forest Science**, Bethesda, v. 51, n. 6, p. 556-569, 2005.

ALLEN, H.L.; ALBAUGH, T.J. Ecophysiological basis for plantation production: A loblolly pine case study. **Bosque**, Valdivia, v. 20, n. 1, p. 3-8, 1999.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration:** guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1999. 300 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M. Modeling monthly mean air temperature for Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, Hamburg, v. 113, n. 3/4, p. 407-427, 2013.

ALVAREZ, J., ALLEN, H.L.; ALBAUGH, T.J.; STAPE, J.L.; BULLOCK, B.P.; SONG, C. Factors influencing the growth of *Pinus radiata* pine plantations in Chile. **Forestry**, Oxford, v. 86, p. 13-26, 2013.

BERENDSE, F.; AERTS, R. Nitrogen-use-efficiency: a biologically meaningful definition? **Functional Ecology**, London, v. 1, n. 3, p. 293-296, 1987.

BINKLEY, D.; STAPE, J.L.; RYAN, M.G. Thinking about efficiency of resource use in forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, p. 5-16, 2004.

BINKLEY, D.; CAMPOE, O.C.; GSPALTL, M.; FORRESTER, D.I. Light absorption and use efficiency in forests: why patterns differ for trees and stands. **Forest ecology and management**, Amsterdam, v. 288, p. 5-13, 2013.

BINKLEY, D.; STAPE, J.L.; BAUERLE, W.L.; RYAN, M.G. Explaining growth of individual trees: light interception and efficiency of light use by Eucalyptus at four sites in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam , v. 259, n. 9, p. 1704-1713, Apr. 2010.

BIRK, E.M.; VITOUSEK, P.M. Nitrogen availability and nitrogen use efficiency in loblolly pine stands. **Ecology**, Berlin, v. 67, n. 1, p. 69-79, 1986.

BORDERS, B.E.; BAILEY, R.L. Loblolly Pine - Pushing the Limits of Growth. **Southern Journal of Applied Forestry**, Bethesda, v. 25, n. 2, p. 69-74, 2001.

BRYARS, C.; MAIER, C.; ZHAO, D.; KANE, M.; BORDERS, B.; WILL, R.; TESKEY, R. Fixed physiological parameters in the 3-PG model produced accurate estimates of loblolly pine growth on sites in different geographic regions. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 289, p. 501-514, 2013.

CALDATO, S.L. **Ciclagem biogeoquímica dos nutrientes em uma plantação de *Pinus taeda* L. no nordeste argentino**. 2011. 105 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

CAMPOE, O.; STAPE, J.L.; NOUVELLON, Y.; LACLAU, J.-P.; BAUERLE, W.L.; BINKLEY, D. Wood production and light use efficiency by Eucalyptus trees across a productivity gradient in Sao Paulo State, Brazil. **Forest Ecology Management**, Amsterdam, v. 288, p. 14–20, 2013a.

CAMPOE, O.; STAPE, J.L.; ALBAUGH, T.J.; ALLEN, L.H.; FOX, T.R.; RUBILAR, R.; BINKLEY, D. Fertilization and irrigation effects on tree level aboveground net primary production, light interception and light use efficiency in a loblolly pine plantation. **Forest Ecology Management**, Amsterdam, v. 288, p. 43-48, 2013b.

CANNEL, M.G.R. Physiological basis of wood production: a review. **Scandinavian Journal of Forest Research**, London, v.4, p. 459–490, 1989.

CARLSON, C.A.; FOX, T.R.; ALLEN, H.L.; ALBAUGH, T.J.; RUBILAR, R.A.; STAPE, J.L. Growth responses of loblolly pine in the Southeast United States to midrotation applications of nitrogen, phosphorus, potassium, and micronutrients. **Forest Science**, Bethesda, v. 60, n. 1, p. 157-169, 2014.

CARNEIRO, R.L. **Caracterização da capacidade fotossintética e da condutância estomática em árvores de *Pinus caribaea var. hondurensis* e de *Pinus taeda* em Itatinga, São Paulo**. 2013. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-10092013-170745/>. Acesso em: 12 ago. 2015.

CHAPIN, F.S. The mineral nutrition of wild plants. **Annual Review of Ecology and Systematics**, Palo Alto, v. 11, p. 233-260, 1980.

CLANCY, K.; WAGNER, M.; REICH, P. Ecophysiology and insect herbivory. In: SMITH, W.; HINCKLEY, T. **Ecophysiology of coniferous forests**. Berkeley: Academic Press, 1995. chap. 6, p. 125-180.

COBB, W.R.; WILL, R.E.; DANIELS, R.F.; JACOBSON, M.A. Aboveground biomass and nitrogen in four short-rotation woody crop species growing with different water and nutrient availabilities. **Forest Ecology and Management,** Amsterdam, v. 255, n. 12, p. 4032-4039, 2008.

COLBERT, S.R.; JOKELA, E.J.; NEARY, D.G. Effects of annual fertilization and sustained weed control on dry matter partitioning, leaf area, and growth efficiency of juvenile loblolly and slash pine. **Forest Science**, Bethesda, v. 36, n. 4, p. 995-1014, 1990.

DALLA-TEA, F.; JOKELA, E.J. Needlefall, canopy light interception, and productivity of young intensively managed slash and loblolly pine stands. **Forest Science**, Bethesda, v. 37, n. 5, p. 1298-1331, 1991.

DELUCIA, E.H.; GEORGE, K.; HAMILTON, J.G. Radiation-use efficiency of a forest exposed to elevated concentrations of atmospheric carbon dioxide. **Tree Physiology**, Oxford, v. 22, n. 14, p. 1003-1010, 2002.

DUCEY, M.; ALLEN, H.L. Nutrient supply and fertilization efficiency in midrotation loblolly pine plantations: a modeling analysis. **Forest Science**, Bethesda, v. 47, p. 96–102, 2001.

DWYER, J.; SCHMIDT, G. The MODIS reprojection tool. In: QU, J.J.; GAO, W.; KAFATOS, M.; MURPHY, R.E.; SALOMONSON, V.V. (Org.). **Earth science satellite remote sensing**. Berlin: Springer, 2006. p. 162-177.

FERNÁNDEZ, E.T.; FERNÁNDEZ, M.E.; SCHLICHTER, T.M.; PINAZO, M.A.; CRECHI, E.H. Influence of growth dominance and individual tree growth efficiency on *Pinus taeda* stand growth: a contribution to the debate about why stands productivity declines. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 277, p. 116-123, 2012.

FERNÁNDEZ, M.E.; TSCHIEDER, E.F.; LETOURNEAU, F.; GYENGE, J.E. Why do Pinus species have a different growth dominance patterns than Eucalyptus species? A hypothesis based on differential physiological plasticity. **Forest Ecology Management,** Amsterdam, v. 261, p. 1061-1068, 2011.

FLORES, F.J.; ALLEN, H.L.; CHESHIRE, H.M.; DAVIS, J.M.; FUENTES, M.; KELTING, D. Using multispectral satellite imagery to estimate leaf area and response to silvicultural treatments in loblolly pine stands. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 36, p. 1587–1596, 2006.

FOX, T.R.; ALLEN, H.L.; ALBAUGH, T.J.; RUBILAR, R.; CARLSON, C.A. Tree nutrition and forest fertilization of pine plantations in the Southern United States. **Southern Journal Applied Forestry**, Bethesda, v. 31, p. 5–11, 2007.

GHOLZ, H.L.; VOGEL, S.A.; CROPPER Jr, W.P.; McKELVEY, K.; EWEL, K.C.; TESKEY, R.O.; CURRAN, P.J. Dynamics of canopy structure and light interception in *Pinus elliottii* stands, North Florida. **Ecological Monographs**, Ithaca, v. 61, n. 1, p. 33-51, 1991.

GONÇALVES, J.L.M. **Recomendações de adubação para *Eucalyptus, Pinus* e espécies típicas da Mata Atlântica**. Piracicaba: IPEF, 1995. 23 p. (Documentos Florestais, 15).

GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L; BENEDETTI, V; FESSEL, V.A.G.; GAVA, J.L. Reflexos do cultivo mínimo e intensivo do solo em sua fertilidade e na nutrição das árvores. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2005. cap. 1, p. 3-57.

GOWER, S.T.; GHOLZ, H.L.; NAKANE, K.; BALDWIN, V.C. Production and carbon allocation patterns of pine forests. **Ecological Bulletins**, Copenhagen, n. 43, p. 115–135, 1994.

GOWER, S.T.; ISEBRANDS, J.G.; SHERIFF, D.W. Carbon allocation and accumulation in conifers. In: SMITH, W.K.; HINCKLEY, T.M. **Resource physiology of conifers:** Acquisition, allocation and utilization. San Diego: Academic Press, 1995. p. 217–254.

GOWER, S.T.; KUCHARIK, C.J.; NORMAN, J.M. Direct and indirect estimation of leaf area index, f APAR, and net primary production of terrestrial ecosystems. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 70, n. 1, p. 29-51, 1999.

GOWER, S.T.; NORMAN, J.M. Rapid estimation of leaf area index in conifer and broad-leaf plantations. **Ecology**, Berlin, v. 72, n. 5, p. 1896-1900, 1991.

HAKAMADA, R.E. **Uso do inventário florestal como ferramenta de monitoramento da qualidade silvicultural em povoamentos clonais de *Eucalyptus***. 2012. 114 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2012.

HARMS, W.R.; DEBELL, D.S.; WHITESELL, C.D. Stand and tree characteristics and stockability in *Pinus taeda* plantations in Hawaii and South Carolina. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 24, n. 3, p. 511-521, 1994.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Anuário estatístico da IBÁ 2015 ano base 2014**. Brasília, 2015. 64 p.

INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS. Disponível em: <www.ipef.br/pppib>. Acesso em: 15 abr. 2013.

JOKELA, E.J.; MARTIN, T.A.; VOGEL, J.G. Twenty-five years of intensive forest management with southern pines: Important lessons learned. **Journal of Forestry**, Bethesda, v. 108, n. 7, p. 338-347, 2010.

LAMBERS, H.; CHAPIN III, F.; PONS, T. **Plant physiological ecology**. 2nd ed. New York: Springer, 2008. 604 p.

LANDSBERG, J.J.; GOWER, S.T. **Applications of physiological ecology to forest management**. London: Academic Press, 1997. 354 p.

LANDSBERG, J.J.; WARING, R.H. A generalized model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partioting. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 95, p. 209-228, 1997.

LANDSGERG, J.J.; SANDS, P. **Physiological ecology of forest production**: principles, processes and models. Oxford: Elsevier. 2011. 331 p.

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

LATORRE, M.L.; SHIMABUKURO, Y.E.; ANDERSON, L.O. Produtos para ecossistemas terrestres (MODLAND). In: RUDORFF, B.F.T.; SHIMABUKURO, Y.E.; CEBALLOS, J.C. (Org.). **O sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil**. São José dos Campos: Ed. Bookimage, 2007. p. 23-36.

LAW, B.E.; RIITTERS, K.H.; OHMANN, L.F. Growth in relation to canopy light interception in a red pine (*Pinus resinosa*) thinning study. **Forest Science**, Bethesda, v. 38, n. 1, p. 199-202, 1992.

LI, B.; McKEAND, S.E.; ALLEN, H.L. Genetic variation in nitrogen use efficiency of loblolly pine seedlings. **Forest Science**, Bethesda, v. 37, p. 613–626, 1991.

MARSDEN, C.; Le MAIRE, G.; STAPE, J.L.; SEEN, D.L.; ROUPSARD, O.; CABRAL; O.; EPRON, D.; LIMA, A.M.N.; NOUVELLON, Y. Relating MODIS vegetation index time-series with structure, light absorption and stem production of fast-growing Eucalyptus plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, p. 1741–1753, 2010.

MARTIN, T.A.; JOKELA, E.J. Developmental patterns and nutrition impact radiation use efficiency components in southern pine stands. **Ecological Applications**, Washington, v. 14, n. 6, p. 1839-1854, 2004.

McCRADY, R.L.; JOKELA, E.J. Canopy dynamics, light interception, and radiation use efficiency of selected loblolly pine families. **Forest Science**, Bethesda, v. 44, n. 1, p. 64-72, 1998.

MEDLYN, B.E. Physiological basis of the light use efficiency model. **Tree Physiology**, Oxford, v. 18, p. 167-176, 1998.

MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. **Principles of plant nutrition**. 5th ed. Berne: International Potash Institute, 2001. 849 p.

MONTEITH, J.L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. **Journal Applied Ecology**, Washington, v. 9, p. 747-766, 1972

_____. Climate and the efficiency of crop production in Britain. **Philosophical Transactions of the Royal Society. Series B: Biological Sciences**, London, v. 281, p. 277-296, 1977.

MURTHY, R.; DOUGHERTY, P.M. Estimating foliage area of loblolly pine shoots. **Forest Science**, Bethesda, v. 42, n. 2, p. 299-303, 1997.

NOUVELLON, Y.; LACLAU, J.P.; EPRON, D.; KINANA, A.; MABIALA, A.; ROUPSARD, O.; BONNEFOND, J.M.; Le MAIRE, G.; MARSDEN, C.; SAINT-ANDRÉ, L. Within-stand and seasonal variations of specific leaf area in a clonal *Eucalyptus* plantation in the Republic of Congo. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, p. 1796–1807, 2010.

OKI, V.K. **Impactos da colheita de *Pinus taeda* sobre o balanço hídrico, a qualidade da água e a ciclagem de nutrientes em microbacias**. 2002. 84 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11142/tde-16082002-150417/>. Acesso em: 12 ago. 2015.

PALMROTH, S.; KATUL, G.G.; MAIER, C.A.; WARD, E.; MANZONI, S.; VICO, G. On the complementary relationship between marginal nitrogen and water-use efficiencies among *Pinus taeda* leaves grown under ambient and CO2-enriched environments. **Annals of Botany**, Oxford, v. 111, n. 3, p. 467-477, 2013.

PANGLE, L.; VOSE, J.M.; TESKEY, R.O. Radiation use efficiency in adjacent hardwood and pine forests in the southern Appalachians. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 257, p. 1034–1042, 2009.

PASTOR, J.; BRIDGHAM, S. D. Nutrient efficiency along nutrient availability gradients. **Oecologia**, Heidelberg, v. 118, n. 1, p. 50-58, 1999.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração.** Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.

REISSMANN, C.B.; KOEHLER, C.W.; SOUZA, M.L.P. **Classificação de sítio para *Araucaria angustifolia*, *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* no 2° Planalto do Paraná**. Subprojeto I. Nutrição. Curitiba: UFPR; FUNPAR; FINEP, 1990. v. 1, 286 p.

REISSMANN, C.B.; WISNEWSKI, C. Aspectos nutricionais de plantios de *Pinus*. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2005. cap. 5, p. 135-165.

RODRIGUEZ, J.; ALVAREZ, J. **Nutrición y fertilización de las plantaciones forestales**. Santiago: LOM, 2010. 521 p.

ROJAS, J.C. **Factors influencing responses of loblolly pine stands to fertilization**. 2005. 162 p. Thesis (PhD in Forestry) - North Carolina State University, Raleigh, 2005.

ROLIM, G.S.; SENTELHAS, P.C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente Excel TM para cálculos de balanços hídricos: normal, seqüencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 133-137, 2002.

RYAN, M.G.; GOWER, S.T.; HUBBARD, R.M.; WARING, R.H.; GHOLZ, H.L.; CROPPER JR., W.P.; RUNNING, S.W. Woody tissue maintenance respiration of four conifers in contrasting climates. **Oecologia**, Heidelberg, n. 101, p. 133–140, 1995.

RYAN, M.G.; STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; FONSECA, S.; LOOS, R. a.; TAKAHASHI, E.N.; SILVA, C.R.; SILVA, S.R.; HAKAMADA, R.E.; FERREIRA, J.M.; LIMA, A.M. N.; GAVA, J.L.; LEITE, F.P.; ANDRADE, H.B.; ALVES, J.M.; SILVA, G.G.C. Factors controlling Eucalyptus productivity: How water availability and stand structure alter production and carbon allocation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, n. 9, p. 1695–1703, 2010.

SAMPSON, D.A.; ALBAUGH, T.J.; JOHNSEN, K.H.; ALLEN, H.L.; ZARNOCH, S.J. Monthly leaf area index estimates from point-in-time measurements and needle phenology for *Pinus taeda*. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 33, n. 12, p. 2477-2490, 2003.

SAMPSON, D.A.; ALLEN, H.L. Light attenuation in a 14-year-old loblolly pine stand as influenced by fertilization and irrigation. **Trees**, Berlin, v. 13, p. 80–87, 1998.

SAMUELSON, L.J.; JOHNSEN, K.; STOKES, T. Production, allocation, and stem wood growth efficiency of *Pinus taeda* L. stands in response to 6 years of intensive management. **Forest Ecology and Management,** Amsterdam, v. 192, n. 1, p. 59-70, 2004.

SAMUELSON, L.J.; BUTNOR, J.; MAIER, C.; STOKES, T.A.; JOHNSEN, K.; KANE, M. Growth and physiology of loblolly pine in response to long-term resource management: defining growth potential in the southern United States. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 38, n. 4, p. 721-732, 2008.

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

SIXEL, R.M.M. **Sustentabilidade da produtividade de madeira de *Pinus taeda* com base no estoque, na exportação e na ciclagem de nutrientes**. 2012. 110 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

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

STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; RYAN, M.G. Eucalyptus production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, n. 1/2, p. 17-31, May 2004.

_____. Production and carbon allocation in a clonal *Eucalyptus* plantation with water and nutrient manipulations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 255, p. 920-930, 2008.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**, 3 ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955. 104 p. (Publications in Climatology, 1).

TOMÉ JUNIOR, J.B. **Manual para interpretação de análise de solo.** Guaíba: Livraria e Editora Agropecuária, 1997. 247 p.

VIERA, M.; SCHUMACHER, M.V.; BONACINA, D.M. Biomassa e nutrientes removidos no primeiro desbaste de um povoamento de *Pinus taeda* L. em cambará do Sul, RS. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 3, p. 371-379, 2011.

VILLACORTA, A.M.G.; MARTIN, T.A.; JOKELA, E.J.; CROPPER, W.P.; GEZAN, S.A. Variation in biomass distribution and nutrient content in loblolly pine (*Pinus taeda* L.) clones having contrasting crown architecture and growth efficiency. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 342, p. 84-92, 2015.

WARING, R.H.; THIES, W.G.; MUSCATO, D. Stem growth per unit of leaf area: a measure of tree vigor. **Forest Science**, Bethesda, v. 26, p. 112–117, 1980.

XAVIER, A.C.; SOARES, J.V.; ALMEIDA, A.C. de. Variação do índice de área foliar em clones de eucalipto ao longo de seu ciclo de crescimento. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 4, p. 421-427, 2002.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados do presente trabalho contribuem para a tomada de decisão dos manejadores de *Pinus taeda* no Brasil, mostrando a importância da escolha de locais que favoreçam o aumento da eficiência do uso dos recursos naturais e a melhoria das práticas silviculturais, como a adição de nutrientes no solo, a redução da densidade de árvores e aumento da qualidade do plantio de forma a reduzir a heterogeneidade do povoamento.

Assim, o agrupamento dos sítios de *Pinus taeda* por classes de solos mostrou-se essencial para avaliar a efetividade da fertilização e da fertilização em conjunto com o desbaste.

Além disso, sem qualquer fertilização e desbaste nos plantios de *P. taeda* no Brasil, ficou evidente que a utilização dos recursos naturais de forma mais eficiente ocorreu em regiões mais frias e com maior fertilidade do solo.

Sugere-se uma avaliação econômica da fertilização e desta em conjunto com o desbaste nas diferentes classes de solos e a condução de mais estudos para compreender quais mecanismos ecofisiológicos ocorrem na árvore, que aumentam a eficiência do uso dos recursos (água, luz e nutrientes), e qual seria a contribuição do fator genético e a sua interação com o ambiente para que esse aumento ocorra.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Variação da profundidade do solo e capacidade de água disponível no solo, teor médio de areia, silte e argila e classificação da textura do solo de cada bloco por sítio (continua)

Sitio	COD	Bloco	Prof. Solo	CAD	Silte	Argila	Textura
	-		(cm)	(mm)	(g kg^{-1})		-
1	AR	1	1,4	224,2	110	830	muito argilosa
1	AR	2	1,5	240,4	130	460	argilosa
1	AR	3	1,5	236,3	140	450	argilosa
1	AR	4	1,5	238,5	140	640	muito argilosa
1	AR	5	1,5	275,3	60	250	média
1	AR	6	1,5	274,9	80	280	média
1	AR	7	1,5	280,5	150	520	argilosa
1	AR	8	1,5	257,3	100	370	média
1	AR	9	1,5	223,9	100	370	média
1	AR	10	1,5	206,6	140	800	muito argilosa
1	AR	11	1,5	210,4	200	580	argilosa
2	CD	1	0,9	172,8	170	800	muito argilosa
2	CD	2	1,1	212,3	170	810	muito argilosa
2	CD	3	1,2	211,5	220	680	muito argilosa
2	CD	4	1,5	250,5	230	550	argilosa
2	CD	5	1,1	206,8	160	760	muito argilosa
2	CD	6	1,0	178,0	190	660	muito argilosa
2	CD	7	1,1	198,0	190	680	muito argilosa
2	CD	8	1,5	262,5	170	630	muito argilosa
2	CD	9	1,5	259,5	250	610	muito argilosa
3	TL	1	1,5	255,0	110	580	argilosa
3	TL	2	1,5	266,6	130	660	muito argilosa
3	TL	3	1,5	255,4	100	580	argilosa
3	TL	4	1,5	241,9	160	490	argilosa
3	TL	5	1,5	217,1	120	330	média
3	TL	6	1,5	212,6	140	300	média
3	TL	7	1,5	207,8	280	270	média
3	TL	8	1,5	205,1	270	250	média
3	TL	9	1,5	207,0	270	260	média
4	OC	1	1,4	257,8	200	710	muito argilosa
4	OC	2	1,5	218,6	120	340	média
4	OC	3	1,3	199,1	180	470	argilosa
4	OC	4	1,5	237,0	210	460	argilosa
4	OC	5	0,9	149,5	190	590	argilosa
4	OC	6	1,5	203,4	110	280	média
4	OC	7	1,5	232,9	250	430	argilosa
4	OC	8	0,8	127,9	310	580	argilosa
4	OC	9	1,5	254,3	150	580	argilosa
5	TB	1	1,5	246,4	120	520	argilosa
5	TB	2	1,5	246,4	140	520	argilosa
5	TB	3	1,5	236,3	110	460	argilosa
5	TB	4	1,5	260,6	150	620	muito argilosa
5	TB	5	1,5	258,4	140	600	muito argilosa
5	TB	6	1,5	239,3	150	480	argilosa
6	RN	1	1,3	201,1	220	440	argilosa
6	RN	2	0,8	114,8	60	270	média
6	RN	3	1,1	154,5	50	250	média
6	RN	4	1,5	245,3	280	520	argilosa
6	RN	5	1,4	230,6	240	500	argilosa
6	RN	6	1,3	184,9	150	340	média

APÊNDICE A – Variação da profundidade do solo e capacidade de água disponível no solo, teor médio de areia, silte e argila e classificação da textura do solo de cada bloco por sítio

(conclusão)

Sitio	COD	Bloco	Prof. Solo	CAD	Silte	Argila	Textura
	-		(cm)	(mm)	(g kg^{-1})		-
6	RN	7	1,4	199,2	50	270	média
6	RN	8	1,5	224,6	60	380	média
6	RN	9	1,0	138,8	50	300	média
7	JG	2	1,5	202,1	40	290	média
7	JG	3	1,5	207,4	110	210	média
7	JG	4	1,2	158,5	40	330	média
7	JG	5	1,1	155,5	60	320	média
7	JG	6	1,4	180,0	40	320	média
7	JG	7	1,5	237,0	40	460	argilosa
7	JG	8	1,5	226,1	40	330	média
7	JG	9	1,5	235,5	40	520	argilosa

Nota: AR = Arapoti; CD = Caçador; TL = Telêmaco Borba; OC = Otacílio Costa; TB = Três Barras; RN = Rio Negrinho; JG = Jaguariaíva; PG = Ponta Grossa.

APÊNDICE B – Descrição da análise química dos solos de cada sítio, na profundidade de 0 – 20 cm. Cada bloco representa o valor médio de suas respectivas parcelas

(continua)

Sítio	COD	Bloco	PH	MO	P	K	Ca	Mg	Al + H	SB	CTC_{PH7}	V
			CaCl2	g dm^{-3}	mg/dm³	mmolc/dm³						%
1	AR	1	4,1	40,3	4,0	0,9	9,5	3,3	101,0	13,7	114,7	11,0
1	AR	2	3,9	30,8	2,8	0,6	1,8	1,3	99,8	3,6	103,4	3,8
1	AR	3	4,1	32,0	16,0	1,4	20,3	8,3	109,5	29,9	139,4	22,5
1	AR	4	4,2	34,5	4,3	1,1	10,3	3,5	82,0	14,8	96,8	15,3
1	AR	5	3,8	26,8	2,8	0,4	1,3	1,0	90,0	2,7	92,7	3,0
1	AR	6	4,1	26,0	3,8	0,4	6,8	1,3	79,8	8,4	88,2	13,3
1	AR	7	3,9	35,8	2,8	0,7	2,8	1,3	118,5	4,7	123,2	4,8
1	AR	8	4,0	29,8	3,5	0,8	6,3	2,0	82,3	9,1	91,3	9,0
1	AR	9	3,9	31,8	3,0	0,6	1,8	1,0	110,3	3,3	113,6	3,5
1	AR	10	3,9	39,8	3,3	0,8	4,5	2,0	127,0	7,3	134,3	5,0
1	AR	11	4,0	34,3	7,8	1,8	11,3	4,5	118,0	17,6	135,6	16,0
2	CD	1	3,9	52,0	5,0	0,6	22,0	8,0	150,0	30,6	180,6	17,0
2	CD	2	4,1	54,0	8,0	0,7	28,0	17,0	121,0	45,7	166,7	27,0
2	CD	3	3,7	95,0	11,0	1,3	3,0	2,0	253,0	6,3	259,3	2,0
2	CD	4	3,7	100,0	20,0	1,6	8,0	5,0	253,0	14,6	267,6	5,0
2	CD	5	3,7	58,0	7,0	0,8	4,0	3,0	205,0	7,8	212,8	4,0
2	CD	6	3,7	82,0	19,0	1,0	8,0	4,0	228,0	13,0	241,0	5,0
2	CD	7	3,8	94,0	18,0	1,7	8,0	5,0	228,0	14,7	242,7	6,0
2	CD	8	4,4	50,0	7,0	2,4	42,0	15,0	72,0	59,4	131,4	45,0
2	CD	9	5,2	50,0	11,0	2,7	94,0	19,0	38,0	115,7	153,7	75,0
3	TL	1	3,7	45,3	4,5	0,7	3,5	2,3	132,3	6,4	138,7	4,5
3	TL	2	3,8	49,0	5,5	0,9	8,8	5,0	129,8	14,6	144,4	10,5
3	TL	3	3,8	40,3	4,5	0,5	2,5	1,8	115,0	4,8	119,8	4,3
3	TL	4	4,3	38,5	6,0	2,0	29,8	7,3	77,0	39,0	116,0	35,8
3	TL	5	3,7	34,5	2,8	0,4	1,8	1,0	95,8	3,1	98,9	3,3
3	TL	6	3,7	35,0	3,0	0,3	1,3	1,0	98,5	2,6	101,1	2,8
3	TL	7	3,5	45,0	5,3	0,8	2,8	1,3	160,3	4,8	165,0	2,8
3	TL	8	3,7	35,5	5,0	0,7	2,5	1,0	125,8	4,2	129,9	3,0
3	TL	9	3,7	39,8	5,8	1,2	6,5	2,3	129,5	9,9	139,4	7,5
4	OC	1	3,9	43,0	7,3	2,1	4,5	3,5	181,3	10,1	191,3	5,3
4	OC	2	3,8	34,5	3,8	0,6	2,8	1,0	200,0	4,3	204,3	2,0
4	OC	3	3,8	45,5	5,5	1,7	6,0	2,5	268,8	10,2	278,9	3,8
4	OC	4	3,7	49,8	5,8	0,9	2,3	1,0	297,0	4,2	301,2	1,5
4	OC	5	3,7	39,3	5,5	1,5	1,0	1,0	358,0	3,5	361,5	1,0
4	OC	6	3,8	67,3	7,3	0,7	1,0	1,0	253,8	2,7	256,5	1,0
4	OC	7	3,5	37,5	3,3	1,1	1,3	1,0	340,3	3,4	343,6	1,0
4	OC	8	3,6	34,8	5,5	1,7	4,8	1,8	331,0	8,2	339,2	2,8
4	OC	9	3,7	59,5	3,3	0,7	1,0	1,0	298,5	2,7	301,2	1,0
5	TB	1	3,7	49,3	3,3	0,5	1,3	1,0	159,0	2,8	161,8	1,5
5	TB	2	3,6	52,5	3,5	0,5	1,5	1,0	166,0	3,0	169,0	1,5
5	TB	3	3,6	49,5	3,5	0,5	1,3	1,0	150,3	2,7	153,0	1,8
5	TB	4	3,7	52,3	3,0	0,5	3,8	2,3	158,0	6,5	164,5	4,0

APÊNDICE B – Descrição da análise química dos solos de cada sítio, na profundidade de 0 – 20 cm. Cada bloco representa o valor médio de suas respectivas parcelas

(conclusão)

Sítio	COD	Bloco	PH	MO	P	K	Ca	Mg	Al + H	SB	CTC_{PH7}	V
			CaCl2	g dm^{-3}	mg/dm^3			mmolc/dm^3				%
5	TB	5	3,7	51,8	2,8	0,5	2,8	1,8	150,0	5,0	155,0	3,3
5	TB	6	3,7	53,3	4,0	0,6	2,5	1,8	150,3	4,8	155,1	3,3
6	RN	1	3,7	35,0	3,0	1,0	1,3	1,0	209,3	3,2	212,5	1,5
6	RN	2	3,7	36,8	3,0	0,4	1,0	1,0	162,8	2,4	165,1	1,5
6	RN	3	3,8	32,3	4,3	0,4	1,0	1,0	131,8	2,4	134,2	2,0
6	RN	4	3,6	54,0	4,0	1,2	1,3	1,3	282,0	3,7	285,7	1,3
6	RN	5	3,6	52,0	4,5	1,1	1,0	1,0	262,0	3,1	265,1	1,0
6	RN	6	3,7	52,5	4,0	0,6	1,3	1,0	222,3	2,8	225,1	1,3
6	RN	7	3,7	34,3	4,3	0,6	1,0	1,0	150,3	2,6	152,9	2,0
6	RN	8	3,6	58,0	4,0	0,6	1,0	1,0	222,3	2,6	224,9	1,0
6	RN	9	3,7	36,3	3,0	0,8	1,3	1,0	175,5	3,1	178,6	1,8
7	JG	2	3,8	54,0	6,0	0,8	2,5	2,3	150,8	5,6	156,3	3,8
7	JG	3	4,6	130,5	9,0	0,6	28,8	20,8	115,8	50,1	165,9	30,5
7	JG	4	3,7	38,3	2,5	0,3	1,0	1,0	98,3	2,3	100,6	2,3
7	JG	5	3,8	34,8	2,3	0,4	1,5	1,0	98,3	2,9	101,1	2,8
7	JG	6	3,7	36,0	3,5	0,3	1,0	1,0	95,0	2,3	97,3	2,5
7	JG	7	3,9	41,8	4,3	0,9	8,3	2,0	103,8	11,1	114,9	9,8
7	JG	8	3,8	35,0	4,5	0,6	3,0	1,0	104,0	4,6	108,6	4,3
7	JG	9	3,7	46,5	2,3	0,4	1,3	1,0	124,5	2,7	127,2	2,3

Nota: AR = Arapoti; CD = Caçador; TL = Telêmaco Borba; OC = Otacílio Costa; TB = Três Barras; RN = Rio Negrinho; JG = Jaguariaíva; PG = Ponta Grossa.

APÊNDICE C - Biomassa das parcelas de cada sítio para tronco, galho, acícula e biomassa total no ano de 2013, com idade média de 12,4 anos

Sitio	Região	Parcela	Idade	B_{tronco} Mg ha^{-1}	B_{galho} Mg ha^{-1}	B_{foliar} Mg ha^{-1}	B_{Total} Mg ha^{-1}	IMA Mg ha^{-1}ano^{-1}	ICA Mg ha^{-1}ano^{-1}
1	CD	1	10,0	106,7	15,0	6,8	128,5	10,7	20,9
1	CD	2	11,3	146,2	19,9	8,2	174,3	13,0	18,2
1	CD	3	11,8	125,9	15,8	7,2	148,9	10,6	16,5
1	CD	4	11,8	136,4	16,5	7,2	160,2	11,6	16,4
2	TL	1	11,7	154,0	19,5	7,7	181,2	13,1	8,4
2	TL	2	11,9	130,7	16,5	6,7	154,0	11,0	14,3
2	TL	3	11,9	106,3	11,5	5,5	123,3	8,9	10,3
2	TL	4	12,1	124,5	15,3	6,6	146,4	10,3	5,4
3	OC	1	11,7	161,3	23,1	8,4	192,8	13,8	25,3
3	OC	2	12,7	150,2	19,6	8,0	177,8	11,8	14,7
3	OC	3	11,9	177,0	26,5	9,3	212,8	14,8	25,2
3	OC	4	11,9	135,8	21,2	7,4	164,4	11,4	7,9
4	TB	1	14,1	211,0	22,3	8,6	241,9	15,0	16,2
4	TB	2	14,1	211,6	22,0	8,6	242,3	15,0	19,4
4	TB	3	12,1	189,1	21,9	8,5	219,5	15,7	17,7
4	TB	4	12,1	181,0	20,3	8,2	209,5	15,0	16,4
5	RN	1	13,3	142,5	17,3	7,1	166,9	10,7	1,8
5	RN	2	13,3	164,0	19,4	8,3	191,7	12,3	16,6
6	JG	1	12,6	173,9	22,1	8,9	205,0	13,8	13,0
6	JG	2	13,7	142,8	18,5	7,0	168,3	10,4	4,1
6	JG	3	13,4	86,2	11,4	5,4	103,1	6,4	1,9
6	JG	4	13,9	117,3	15,3	6,6	139,2	8,4	4,3
	CD	Média	11,2	128,8	16,8	7,3	153,0	11,5	18,0
	TL	Média	11,9	128,9	15,7	6,6	151,2	10,8	9,6
	OC	Média	12,1	156,1	22,6	8,3	186,9	13,0	18,3
	TB	Média	13,1	198,2	21,6	8,5	228,3	15,2	17,4
	RN	Média	13,3	153,2	18,4	7,7	179,3	11,5	9,2
	JG	Média	13,4	130,1	16,8	7,0	153,9	9,8	5,8
	-	MÉDIA	12,4	149,2	18,7	7,6	175,4	11,9	13,1

Nota: CD = Caçador; TL = Telêmaco Borba; OC = Otacílio Costa; TB = Três Barras; RN = Rio Negrinho; JG = Jaguariaíva.

APÊNDICE D – Índice de área foliar (IAF; m² de folha m^{-2} solo), eficiência de crescimento (EC; Mg ha^{-1} ano^{-1} IAF^{-1}), de uso da luz (EUL; g MJ^{-1}) e do nitrogênio (EUN; kg lenho kg^{-1} N ano^{-1}) das parcelas de cada sítio com idade média de 12,4 anos

Sítio	Parcela	IAF	EC	EUL	EUN
CD	1	5,4	3,9	0,85	179,1
CD	2	6,4	2,9	0,72	142,8
CD	3	5,8	2,9	0,67	137,7
CD	4	5,7	2,9	0,66	158,2
TL	1	6,0	1,4	0,30	65,6
TL	2	5,3	2,7	0,52	98,2
TL	3	4,4	2,3	0,39	92,4
TL	4	5,2	1,0	0,19	38,3
OC	1	6,4	3,9	1,20	177,2
OC	2	6,3	2,4	0,74	100,9
OC	3	7,0	3,6	1,18	137,6
OC	4	5,6	1,4	0,40	53,6
TB	1	6,6	2,4	0,63	101,0
TB	2	6,7	2,9	0,76	125,6
TB	3	6,6	2,7	0,69	106,5
TB	4	6,4	2,6	0,65	98,2
RN	1	5,5	0,3	0,09	15,4
RN	2	6,5	2,5	0,79	103,5
JG	1	7,0	1,9	0,42	83,6
JG	2	5,4	0,7	0,14	37,5
JG	3	4,4	0,4	0,07	23,0
JG	4	5,2	0,8	0,15	39,4
CD	Média	5,8	3,1	0,73	154,5
TL	Média	5,2	1,9	0,35	73,6
OC	Média	6,3	2,8	0,88	117,3
TB	Média	6,6	2,7	0,68	107,8
RN	Média	6,0	1,4	0,44	59,5
JG	Média	5,5	1,0	0,19	45,9
-	MÉDIA	5,9	2,1	0,55	93,1

Nota: CD = Caçador; TL = Telêmaco Borba; OC = Otacílio Costa; TB = Três Barras; RN = Rio Negrinho; JG = Jaguariaíva.

APÊNDICE E – Análise de macro e micro nutrientes do tecido foliar das parcelas de cada sítio com idade média de 12,4 anos

Sítio	Parcela	N (g kg^{-1})	P (g kg^{-1})	K (g kg^{-1})	Ca (g kg^{-1})	Mg (g kg^{-1})	S (g kg^{-1})	B (mg kg^{-1})	Cu (mg kg^{-1})	Fe (mg kg^{-1})	Mn (mg kg^{-1})	Zn (mg kg^{-1})
CD	1	17,2	1,1	4,2	3,5	0,7	0,8	41,6	2,4	88,7	190,5	31,9
CD	2	15,6	1,2	4,5	3,2	0,6	0,9	29,8	2,8	72,7	202,7	24,6
CD	3	16,7	1,2	4,5	5,3	1,0	0,7	35,2	2,7	99,7	231,4	61,1
CD	4	14,4	1,3	4,0	3,3	0,9	0,6	30,1	2,7	68,9	165,0	61,8
TL	1	16,6	1,2	2,8	2,5	0,6	0,5	17,8	2,2	55,0	262,7	19,9
TL	2	21,7	1,6	3,4	3,0	0,9	0,7	29,5	2,5	51,0	232,1	29,4
TL	3	20,3	1,4	2,5	2,7	0,7	0,6	27,7	2,5	48,2	195,1	17,0
TL	4	21,2	1,9	2,9	2,6	0,8	0,8	46,8	2,9	71,5	262,3	28,3
OC	1	16,9	1,8	4,3	4,1	1,1	0,7	34,0	2,9	58,3	282,8	37,3
OC	2	18,3	1,4	3,9	2,4	0,7	0,7	28,2	3,6	66,4	145,1	24,8
OC	3	19,7	1,6	4,9	2,0	0,5	0,8	25,8	3,1	61,8	403,7	34,9
OC	4	19,9	1,5	4,7	2,8	0,6	0,9	44,5	7,7	90,5	297,0	50,1
TB	1	18,7	1,5	3,7	2,2	0,7	0,9	39,4	3,5	58,8	274,4	23,6
TB	2	17,9	1,3	3,2	2,0	0,6	0,8	25,2	3,0	60,1	268,5	21,9
TB	3	19,5	1,4	3,6	2,9	1,1	0,8	27,7	3,2	91,8	284,2	37,1
TB	4	20,5	1,5	3,7	2,5	1,2	0,8	34,2	3,5	93,2	335,2	29,4
RN	1	16,3	1,1	4,8	1,7	0,8	1,0	41,2	2,5	89,4	271,6	23,3
RN	2	19,4	1,5	4,8	0,8	0,6	1,1	39,5	2,6	73,8	285,9	23,0
JG	1	17,4	1,5	3,2	1,8	0,8	0,8	34,7	2,6	68,2	123,7	21,9
JG	2	15,4	1,6	3,5	2,7	1,2	0,8	34,8	2,7	60,0	95,7	39,2
JG	3	15,5	1,8	2,6	2,3	0,5	0,7	35,8	2,1	88,5	134,0	13,5
JG	4	16,7	1,3	2,9	2,9	0,7	0,7	41,9	2,3	108,2	230,1	19,1
CD	Média	16,0	1,2	4,3	3,8	0,8	0,7	34,2	2,7	82,5	197,4	44,9
TL	Média	19,9	1,5	2,9	2,7	0,7	0,7	30,4	2,5	56,4	238,1	23,7
OC	Média	18,7	1,6	4,5	2,8	0,7	0,8	33,1	4,3	69,3	282,2	36,8
TB	Média	19,1	1,4	3,6	2,4	0,9	0,8	31,6	3,3	76,0	290,6	28,0
RN	Média	17,9	1,3	4,8	1,2	0,7	1,0	40,3	2,6	81,6	278,8	23,2
JG	Média	16,3	1,5	3,1	2,4	0,8	0,8	36,8	2,4	81,2	145,9	23,4

Nota: CD = Caçador; TL = Telêmaco Borba; OC = Otacílio Costa; TB = Três Barras; RN = Rio Negrinho; JG = Jaguariaíva.