**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Mapeamento e modelagem edafoclimática da produtividade de
plantações de *Eucalyptus* no sul do Estado de São Paulo**

Clayton Alcarde Alvares

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

**Piracicaba
2011**

Clayton Alcarde Alvares
Engenheiro Florestal

Mapeamento e modelagem edafoclimática da produtividade de plantações de
***Eucalyptus* no sul do Estado de São Paulo**

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ LEONARDO DE MORAES GONÇALVES**

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

Piracicaba
2011

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

Alvares, Clayton Alcarde

Mapeamento e modelagem edafoclimática da produtividade de plantações de *Eucalyptus* no sul do Estado de São Paulo / Clayton Alcarde Alvares. - - Piracicaba, 2011.

279 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2011.

1. Eucalipto - Produtividade 2. Geada 3. Geoestatística 4. Geoprocessamento
5. Sistema de informação geográfica 6. Solo florestal - Propriedades físico-químicas
I. Título

CDD 634.9734
A473m

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

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais, Laydner e Regina,
toda a minha gratidão pela vida, pelos incentivos,
pelo amor e pela confiança nas minhas escolhas.*

Aos meus irmãos, Laydner e William, amigos eternos.

*Ao amor da minha vida, Caroline, agradeço pelo
carinho, amor, incentivo, compreensão e por alegrar
cada dia da minha vida.*

AGRADECIMENTOS

Ao Prof José Leonardo de Moraes Gonçalves, pela amizade, pela oportunidade, pelos ensinamentos e paciência em conduzir a orientação deste e de outros trabalhos.

Ao Prof José Luiz Stape pelo encorajamento na realização deste projeto, pela amizade e oportunidades científicas e profissionais.

À Escola Superior de Agrocultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), à Universidade de São Paulo (USP) e ao Programa de Pós-graduação em Recursos Florestais pela oportunidade na minha formação acadêmica e profissional.

Aos colegas, da Fibria, Claudio Roberto da Silva, José Márcio Bizon, Celina Ferraz do Valle, Cesar Bonine, Walmir Fransicatte, Luciano Aparecido do Nascimento, Borba, dentre outros, pela confiança na realização deste trabalho.

Ao Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF), pela total apoio na realização deste projeto.

Ao pessoal da Martins Florestal, Nilton, Roberto, Eduardo Ademir, Valdir, Emerson, e da ESALQ, José Renato Belotto e Udemilson, pelo apoio nos trabalhos de campo e de laboratório.

Ao pessoal do PTSM, Ana Paula Pulito, José Carlos e Marcos Wichert pelo apoio logístico na realização deste trabalho.

Ao Otávio Campoe pela amizade, pelas discussões científicas e por ter auxiliado na elaboração do “abstract”.

A todos os meus colegas da graduação e da pós graduação pela amizade e convívio.

Aos colegas da NCSU e FNC pelo apoio e amizade: Lee Allen, Barry Goldfarb, Dan Binkley, Omar Carrero, Jose Alvarez, Leandra Blevins, Tim Albaugh, Tori, Ruth, Carolina, Guilherme e Rafaela.

Ao tio Fran Mantelato (in memoriam) pela amizade, por me fazer conhecer a Engenharia Florestal e pelo incentivo a minha vida acadêmica.

Ao vô Toninho (in memoriam) pela amizade, por todas as nossas conversas sobre a natureza e incentivo a minha vida acadêmica.

A Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelas bolsas de Mestrado e Doutorado Direto.

E a todos aqueles que, de alguma forma, colaboraram para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

EPÍGRAFE

É tempo de explicar que quanto aqui se diz ou venha a dizer é verdade pura e pode ser comprovado em qualquer mapa, desde que ele seja bastante minucioso para conter informações aparentemente tão insignificantes, pois a virtude dos mapas é essa, exibem a redutível disponibilidade do espaço, previnem que tudo pode acontecer nele.

E acontece.

José Saramago – A jangada de pedra (1986)

SUMÁRIO

RESUMO.....	13
ABSTRACT	15
LISTA DE FIGURAS	17
LISTA DE TABELAS	39
1 INTRODUÇÃO	41
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	43
3 MATERIAL E MÉTODOS	55
3.1 Caracterização geral da área de estudo	55
3.1.1 Localização	55
3.1.2 Organização territorial	56
3.1.3 Contexto Silvicultural Paulista	59
3.1.4 Geologia	70
3.1.5 Geomorfologia.....	73
3.1.6 Clima	74
3.1.7 Hidrografia.....	77
3.1.8 Vegetação e Fauna Regional	78
3.1.9 Pedologia	80
3.1.9.1 Histórico dos levantamentos pedológicos	80
3.1.9.2 LVd1	84
3.1.9.3 LVd2.....	86
3.1.9.4 LVd3	88
3.1.9.5 LVAd1.....	89
3.1.9.6 LVAd2.....	90
3.1.9.7 LVAd3.....	92
3.1.8.8. PVAd1	93
3.1.9.9 PVAd2	94
3.1.9.10 PVd1.....	96
3.1.9.11 PVd3.....	97

3.1.9.12 CXbd1	98
3.1.9.13 CXbd2	99
3.2 Levantamento de dados – atividades de campo e de laboratório	100
3.2.1 Material Genético	100
3.2.2 Determinação das parcelas amostradas	101
3.2.3 Avaliações edáficas	103
3.2.4 Avaliações dendrométricas	106
3.2.5 Avaliações nutricionais	109
3.2.6 Levantamento de dados climáticos	109
3.2.7 Modelo Digital de Elevação do Terreno	110
3.2.8 Estatística descritiva e geoestatística das amostras de solos	112
3.3.1 O modelo 3-PGIS e a modelagem cartográfica	114
3.3.2 Entrada de dados meteorológicos	116
3.3.2.1 Estimativa da radiação solar	117
3.3.2.2 Estimativa das temperaturas máxima e mínima	121
3.3.2.3 Estimativa de geadas	123
3.3.2.4 Estimativa da umidade relativa	124
3.3.2.5 Estimativa da precipitação	124
3.3.3 Entrada de dados edáficos	125
3.3.3.1 Índice de fertilidade do solo	125
3.3.4.2 Estimativa de água no solo	126
3.3.4 Parâmetros genéticos e fisiológicos	128
3.3.4.1 Variável densidade da madeira	130
3.3.4.2 Variável máxima biomassa de fuste	132
3.3.4.3 Variável fração casca + galho	132
3.3.4.4 Variável da massa lenhosa (Equação DAP)	133
3.3.5 Cálculo da biomassa inicial do modelo	134
3.3.6 Validação do Modelo 3-PGIS	134
3.5 Produtividade e qualidade de sítio de Capão Bonito	135
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	137
4.1 Relevo	137

4.2 Estimativa da Radiação Solar	143
4.3 Estimativa das temperaturas máxima e mínima	150
4.4 Estimativa de geadas	158
4.5 Estimativa da umidade relativa	160
4.6 Estimativa da precipitação	164
4.7 Estimativa e mapeamento dos atributos do solo	167
4.8 Índice de fertilidade do solo	212
4.9 Cálculo de água no solo	215
4.10 Variável densidade da madeira	222
4.11 Variável máxima biomassa de fuste	226
4.12 Variável fração casca + galho	229
4.13 Variável massa lenhosa (Equação DAP)	231
4.14 Biomassa inicial do modelo	232
4.15 Validação do modelo 3-PGIS	235
4.16 Nutrição e estoque foliar	249
4.17 Produtividade do Distrito Florestal de Capão Bonito	254
4.18 Qualidade de sítio de Capão Bonito	255
5 CONCLUSÕES	259
REFERÊNCIAS	261

RESUMO

Mapeamento e modelagem edafoclimática da produtividade de plantações de *Eucalyptus* no sul do Estado de São Paulo

O estudo do potencial biológico do ecossistema florestal torna-se essencial quando o objetivo é o seu manejo racional, visando a maximização da produtividade, e evitando-se a exaustão dos recursos do sítio florestal. Na área florestal é comum a aplicação de modelos que projetam o futuro do povoamento, pois desta forma pode-se tomar as decisões apropriadas a cerca do manejo a ser seguido. Dentre outros modelos, o 3-PG foi testado para inúmeras espécies florestais e em diversas condições edafoclimáticas, e tem sido reportado, por unanimidade, como uma poderosa ferramenta para auxiliar o manejo de povoamentos florestais. O objetivo desse estudo foi: calibrar, validar e simular a produtividade de plantações clonais de *Eucalyptus* com o uso do modelo 3-PG integrado a um sistema de informações geográficas. Foram selecionadas 20 parcelas de inventário que continham o material genético C219H (*Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*) plantados no mesmo espaçamento de 3 x 3m e de mesma idade, com data de plantio no ano 2000, na região de Capão Bonito, sul do estado de São Paulo. Em cada parcela foram realizadas avaliações edáficas, dendrométricas e nutricionais em três árvores médias. A incorporação das características do relevo apresentou diferença no mapeamento da radiação global, principalmente no inverno, onde os efeitos do relevo foram elevados, apresentando diferenças de até 147%, em relação ao relevo plano. O número de geadas mensais foi determinado pela temperatura média mínima mensal, apresentando uma relação linear negativa. A maioria das variáveis de solos analisadas aproximou-se da distribuição lognormal de frequências. Na análise geoestatística, as variáveis relacionadas à fertilidade do solo apresentaram maiores alcances de dependência espacial no horizonte A, indicando que há maior homogeneidade na distribuição dos nutrientes na camada superficial do solo. A CTCefetiva apresentou relação exponencial positiva com o volume de madeira. Paralela a essa curva, foi proposta uma equação relacionando o índice de fertilidade do modelo 3-PGIS e esse atributo do solo. O teor de argila exerceu forte influência sobre os teores de água na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente, por conseguinte, na disponibilidade de água dos solos. A máxima biomassa de fuste, encontrada nos povoamentos florestais manejados com elevado padrão tecnológico, relacionou-se diretamente com o teor argila+silte. Essa mesma propriedade do solo, exerceu influência na densidade da madeira. Sítios de maiores produtividades, por conseguinte, de maior teor de argila+silte, resultaram em árvores de menor densidade básica. Os teores foliares de N, Mg, Cu e Zn, aumentaram exponencialmente com o teor de argila, da mesma forma que o DAP e a biomassa de folhas. Por outro lado, os teores foliares de P, K, Ca, S, B, Fe e Mn apresentaram relação oposta, decresceram exponencialmente nos solos mais argilosos. Foi obtida a calibração, a validação e aplicação do modelo 3-PGIS nas condições edafoclimáticas de Capão Bonito em povoamentos clonais do material genético C219H. No geral, o modelo 3-PGIS, apresentou bom desempenho, principalmente nas estimativas do volume de lenho com casca e da biomassa de fuste. As simulações do DAP e do IMA foram mais dispersas.

Palavras-chave: Modelo 3-PG; Eucalyptus; Produtividade florestal; Solos florestais; Sistema de informações geográficas; Geoprocessamento; Modelagem espacialmente distribuída; Geoestatística; Silvicultura de precisão; Geada; Radiação global

ABSTRACT

Mapping and edaphoclimatic modeling of productivity of *Eucalyptus* plantations at south of São Paulo State

The study of the biological potential of forest ecosystems become essential when the objective is rational management, aiming productivity maximization, and avoiding resource exhaustion of the forest site. Forest sector usually apply models to simulate the future of the stand, aiming make appropriated decisions regarding the management to be followed. Among other models, 3-PG was tested for several forest species across different edaphoclimatic conditions, and has been reported unanimously, as a powerful tool to help on forest stands management. The objective of this study was: calibrate, validate and simulate productivity of clonal *Eucalyptus* plantations using 3-PG model integrated with a geographical information system. Twenty inventory plots were selected containing genetic material C219H (*Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*) planted on spacing 3 x 3m, even aged, with planting date at 2000, Capão Bonito region, south of São Paulo state. On each plot were evaluated edaphic, dendrometric and nutritional variables on three average trees. Incorporation of relief characteristics resulted in differences on global radiation mapping, mainly during winter, where the effects of relief were elevated, showing up to 147% comparing to flat relief. Number of frosts per month was determined by monthly mean minimum temperature, with a negative linear relation. Most of soil variables evaluated showed a log-normal frequency distribution. At geostatistical analysis, variables related to soil fertility presented higher reaches of spatial dependency at A horizon, indicating higher homogeneity on nutrient distribution at superficial soil layer. The effective CEC showed positive exponential relation with wood volume. Parallel to that curve, we proposed an equation relating the fertility index of 3-PGIS and that soil attribute. Clay content showed strong influence on water levels at field capacity and wilting point, and as consequence, on soil water availability. Stem maximum biomass, observed on forest stands, managed with high technological standards, related directly with clay+silt contents. Same soil property affected wood density. High productivity sites, as consequence, with higher clay+silt contents, resulted in trees with lower wood density. Leaf level of N, Mg, Cu and Zn increased exponentially with clay content, like DBH and foliage biomass. Otherwise, leaf level of P, K, Ca, S, B, Fe and Mn showed opposite relation, decreasing exponentially on clayey soils. Calibration, validation and application of 3-PGIS were obtained for Capão Bonito edaphoclimatic conditions, on clonal stands of the genetic material C219H. Overall, 3-PGIS model showed good performance, mainly on estimative of stem plus bark volume and stem biomass. Simulations of DBH and MAI were dispersing.

Keywords: 3-PG model; Eucalyptus; Forest productivity; Forest soils; Geographic information system; Geoprocessing; Spatially Distributed Models; Geostatistic; Precision forestry; Frost; Global radiation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização mundial das principais publicações sobre o modelo 3-PG. 1 = Austrália, <i>Eucalyptus</i> e <i>Pinus</i> , Landsberg e Waring (1997); 2 = Austrália e Nova Zelândia, <i>Eucalyptus pilularis</i> , <i>E. obliqua</i> e <i>Pinus radiata</i> , Coops et al. (1998); 3 = Inglaterra, <i>Picea sitchensis</i> , Waring (2000); 4 = Estados Unidos da América, <i>Pinus taeda</i> , Landsberg et al. (2001); 5 = Austrália, <i>Eucalyptus globulus</i> , Sands e Landsberg (2002); 6 = Estados Unidos da América, <i>Pseudotsuga menziesii</i> , Waring e McDowell (2002); 7 = Brasil, <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>E. urophylla</i> , Stape et al. (2004); 8 = Brasil, <i>Eucalyptus grandis</i> , Almeida et al. (2004); 9 = Brasil, <i>Eucalyptus</i> , Tsukamoto Filho et al. (2004); 10 = África do Sul, <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>E. camaldulensis</i> , Dye et al. (2004); 11 = Chile, <i>Pinus radiata</i> , Flores e Allen (2004); 12 = Portugal, <i>Eucalyptus globulus</i> , Tomé et al. (2004); 13 = Finlândia, <i>Pinus sylvestris</i> , Landsberg et al. (2005); 14 = Estados Unidos da América, <i>Pinus ponderosa</i> , Coops et al. (2005); 15 = Brasil, <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>E. urophylla</i> , Silva (2006); 16 = África do Sul, <i>Pinus patula</i> , Louw e Scholes (2006); 17 = Brasil, <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>E. urophylla</i> , Guimarães et al. (2007); 18 = Canadá, <i>Pseudotsuga menziesii</i> , Coops et al. (2007); 19 = Austrália, <i>Eucalyptus cladocalyx</i> e <i>Eucalyptus maculata</i> , Paul et al. (2007); 20 = Brasil, <i>Tectona grandis</i> , Behling (2009); 21 = Brasil, <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>E. urophylla</i> , Borges (2009); 22 = China, <i>Cunninghamia lanceolata</i> , Zhao et al. (2009); 23 = Portugal, <i>Pinus pinaster</i> , Alexandre (2009); 24 = Brasil, <i>Eucalyptus grandis</i> , Baesso et al. (2010); 25 = Brasil, <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>E. urophylla</i> , Almeida et al. (2010); 26 = Brasil, <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>E. urophylla</i> , presente estudo47	
Figura 2 – Localização regional do Distrito Florestal de Capão Bonito55	
Figura 3 – Localização e organização das regionais, das Áreas de Preservação Permanente e da Reserva Legal do Distrito Florestal de Capão Bonito ...56	
Figura 4 – Localização e organização das regionais e dos projetos no Distrito Florestal de Capão Bonito57	

- Figura 5 – Vista panorâmica parcial do Distrito Florestal de Capão Bonito. Sede e entorno, Regional Santa Inês e Projetos Grupo, Campo de Pousso e Cemiterinho (a). Vista panorâmica do mosaico entre as florestas de eucaliptos e a vegetação natural (b). Projeto Tijuco. Acervo: Instituto Memória Votorantim (2006) 58
- Figura 6 – Vista panorâmica da hidrografia e de uma represa e do mosaico da vegetação nos Projetos Grupo e Cruz de Ferro. Acervo: Instituto Memória Votorantim (2006) 59
- Figura 7 – Distrito Florestal de Capão Bonito no contexto silvicultural paulista 61
- Figura 8 – Mapeamento do histórico dos reflorestamentos no Distrito Florestal de Capão Bonito, organizados para cada projeto, a data (mês e ano) e as espécies implantadas 62
- Figura 9 – Quantidade de madeira produzida (m^3) em Capão Bonito para diversos usos e a proporção (%) produzida em relação ao estado de São Paulo durante os anos de 1990 a 2009 (www.sidra.ibge.gov.br) 63
- Figura 10 – Vista de um típico plantio clonal de híbridos de *E. grandis* x *E. urophylla* do Distrito Florestal de Capão Bonito (a). Vista panorâmica de florestas de eucaliptos, clone C219H na diagonal inferior e C041H na diagonal superior da fotografia (b). Projeto São Roque. Acervo: Instituto Memória Votorantim (2006) 64
- Figura 11 – Sistema de moega para enchimento de saquinhos com terra de subsolo. (1986*) (a). Mesas individuais para o estaqueamento (mini-estacas) do eucalipto (2006**) (b). Casa de vegetação coberta com telha ondulada incolor. Sistema de produção de mudas em saquinhos (1986*) (c). Casa de vegetação na fase de enraizamento (período de 25 dias) com sistema de irrigação por nebulização (2006**) (d). Preparo do terreno para a construção do viveiro florestal de Capão Bonito (1994*) (e). Início da construção (alvenaria) do viveiro florestal de Capão Bonito (1995*) (f). Atual viveiro florestal de Capão Bonito (2006**) (g). Estágios de crescimento (aos 25, 30 e 60 dias) de mudas do material genético C219H (2006**) (h). Acervo: * Almeida, A.R.; ** Alvares, C.A. 66

Figura 12 – Cultivo intensivo do solo. Destoca do eucalipto após a queima dos resíduos da colheita (1985*) (a). Cultivo mínimo, com mínima interferência no solo, usando o coveador mecânico duplo “harvester” (2007**) (b). Baldeio dos tocos e raízes grossas para aproveitamento na fabricação de carvão (1986*) (c). Cultivo mínimo do solo com subsolador “intersoil” + adubação de base (2007**) (d). Área que sofreu queimada dos resíduos para posterior reforma florestal (1981*) (e). Trator auto-carregável redistribuindo os resíduos florestais (galhos, cascas e folhas) oriundo da operação do picador móvel (2005**) (f). Projeto Valinhos. Observar no primeiro plano a intensidade da matocompetição (1985*) (g). Projeto Valinhos. Observar na baixada as linhas de eucalipto incorporadas à APP (2006**) (h). Acervo: * Almeida, A.R.; ** Alvares, C.A.....67

Figura 13 – Paisagem típica de talhões sob manejo de rebrota (carvão) e a condução dos brasões (serraria) (1985*) (a). Sítio florestal de alta produtividade (DAP 30 cm - 7 anos). Projeto Tijuco (2007**) (b). Floresta de origem seminal. Desbaste seletivo por baixo (2000*) (c). Povoamento de origem clonal, sob manejo de alto fuste (2006**) (d). Sítio florestal de baixa produtividade sob sistema talhadia em plantio adensado (1985*) (e). Desbaste sistemático em povoamento de média/alta produtividade (Objetivo: atender serrarias de Capão Bonito) (2006**) (f). Fotografia aérea panorâmica mostrando os talhões em rebrota com os brasões em pleno crescimento (1990***) (g). Área com 60 dias pós colheita (Feller-buncher), com as árvores no chão, orientadas para a praça de estacionamento do picador móvel (fundo da paisagem) (2005**) (h). Acervo: * Almeida, A.R.; ** Alvares, C.A.; *** Fibria68

Figura 14 – Sistema semimecanizado de colheita (1+1; 1 operador de motosserra +1 ajudante) (1981*) (a). Sistema mecanizado de colheita com Harvester, Projeto Deserto (2007**) (b). Extração de lenha utilizando tração animal (1985*) (c). Arraste de madeira (árvores inteiras) dentro do talhão com Clambunk-Skidder para a praça de cavaqueamento (2005**) (d). Transporte de madeira dos carregadores para os fornos (1986*) (e).

Extração de toras curtas, com Forwarder, para a margem dos carregadores (2005**) (f). Bateria de fornos de superfície (Siderúrgica Barra Mansa). Projeto Valinhos (1985*) (g). Praça onde é realizado o cavaqueamento branco (apenas madeira). Clambunk (grua à esquerda) arrastando as árvores ao alcance do picador móvel (grua à direita), no centro, e este lançando os cavacos no semi-reboque furgão cavaqueiro (2005**) (h).
Acervo: * Almeida, A.R.; ** Alvares, C.A..... 69

- Figura 15 – Mapa Geológico do Distrito Florestal de Capão Bonito. Adaptado de Lopes et al. (2004) e Perrota et al. (2004)..... 71
- Figura 16 – Perfil em corte de estrada florestal da unidade PVAd1. Projeto Torre Regional Santa Inês (Fotografia RIZZO, 2001) 71
- Figura 17 – Barranco na rodovia SP127 próximo ao entroncamento de acesso a Buri. Observe a espessura da camada de rocha alterada da formação Itararé, e o recobrimento com um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico textura muito argilosa (Fotografia RIZZO, 2001)..... 72
- Figura 18 – Camada de seixos pleistocênicos no quilômetro 10,5 de Capão Bonito para o Distrito de Gramadinho. Local próximo ao rio das Almas. (Fotografia Prof. Paul Vageler, abril de 1937, in SETZER, 1949)..... 72
- Figura 19 – Mapa Geomorfológico do Distrito Florestal de Capão Bonito. Adaptado de Ross e Moroz (1997) 74
- Figura 20 – Balanço hídrico climatológico de Itapetininga (Latitude 23°54'36"S, Longitude 48°01'48"W, Altitude 636 m e Temperatura média anual de 20,4 °C) 76
- Figura 21 – Balanço hídrico climatológico de Capão Bonito (Latitude 24°01'48"S, Longitude 48°22'12"W, Altitude 702 m e Temperatura média anual de 20,1 °C) 76
- Figura 22 – Balanço hídrico climatológico de Apiaí (Latitude 24°25'48"S, Longitude 48°40'48"W, Altitude 830 m e Temperatura média anual de 18,9 °C)..... 76
- Figura 23 – Mapa hidrográfico do Distrito Florestal de Capão Bonito..... 78
- Figura 24 – Mapa de Vegetação Natural remanescente do Distrito Florestal de Capão Bonito. Adaptado de IF (2005). Legenda simplificada da vegetação..... 79

- Figura 25 – Mapa Pedológico Semidetalhado do Distrito Florestal de Capão Bonito. Modificado de Rizzo (2001).....82
- Figura 26 – Fotografia de uma típica unidade LVd1 com a divisão dos horizontes em profundidades e alguns atributos analíticos. (Fotografia RIZZO, 2001)85
- Figura 27 – Paisagem típica onde ocorre a unidade LVd1 no Projeto Tijuco, Regional Santa Inês, próximo ao cruzamento das linhas de transmissão de energia elétrica. (Fotografia RIZZO, 2001) (a). Padrão de relevo na fotografia aérea (Projeto Vôo Citrus, julho 2000, BASE – Aerofotogrametria e Projetos S/A, escala original 1:30.000) onde ocorre, predominantemente, a unidade taxonômica LVd1. Projeto Grupo, Regional Santa Inês (b)86
- Figura 28 – Fotografia de uma típica unidade LVd2 com a divisão dos horizontes em profundidades e alguns atributos analíticos. Perfil 32, Projeto Deserto, talhão 12. (Fotografia RIZZO, 2001)87
- Figura 29 – Padrão de relevo na fotografia aérea (Projeto Vôo Citrus, julho 2000, BASE – Aerofotogrametria e Projetos S/A, escala original 1:30.000) onde ocorre a unidade taxonômica LVd2. Projetos Valinhos, Inglês e São Roque, Regional Boa Esperança.....87
- Figura 30 – Fotografia de uma típica unidade LVd3 com a divisão dos horizontes em profundidades e alguns atributos analíticos. Perfil no Projeto Rancho (Fotografia RIZZO, 2001)88
- Figura 31 – Padrão de relevo na fotografia aérea (Projeto Vôo Citrus, julho 2000, BASE – Aerofotogrametria e Projetos S/A, escala original 1:30.000) onde ocorre a unidade taxonômica LVd3. Projeto Rancho, Regional Paranapitanga...89
- Figura 32 – Fotografia de uma típica unidade LVAd1 com a divisão dos horizontes em profundidades e alguns atributos analíticos. (Fotografia RIZZO, 2001)90
- Figura 33 – Padrão de relevo na fotografia aérea (Projeto Vôo Citrus, julho 2000, BASE – Aerofotogrametria e Projetos S/A, escala original 1:30.000) onde ocorre a unidade taxonômica LVAd1. Projetos Grupo (Regional Santa Inês) e Tijuco (Regional Boa Esperança).....90
- Figura 34 – Fotografia de uma típica unidade LVAd2 com a divisão dos horizontes em profundidades e alguns atributos analíticos. (Fotografia RIZZO, 2001)91

- Figura 35 – Padrão de relevo na fotografia aérea (Projeto Vôo Citrus, julho 2000, BASE – Aerofotogrametria e Projetos S/A, escala original 1:30.000) onde ocorre a unidade taxonômica LVAd2. Projeto Torre, Regional Santa Inês 91
- Figura 36 – Fotografia de uma típica unidade LVAd3 com a divisão dos horizontes em profundidades e alguns atributos analíticos. Projeto Rancho, Regional Paranapitanga. (Fotografia Alvares, C.A., 2006) 92
- Figura 37 – Padrão de relevo na fotografia aérea (Projeto Vôo Citrus, julho 2000, BASE – Aerofotogrametria e Projetos S/A, escala original 1:30.000) onde ocorre a unidade taxonômica LVAd3. Projeto Rancho, Regional Paranapitanga 93
- Figura 38 – Fotografia de uma típica unidade PVAd1 com a divisão dos horizontes em profundidades e alguns atributos analíticos. Perfil 51, Projeto Paranapanema, talhão 9. (Fotografia RIZZO, 2001) 94
- Figura 39 – Padrão de relevo na fotografia aérea (Projeto Vôo Citrus, julho 2000, BASE – Aerofotogrametria e Projetos S/A, escala original 1:30.000) onde ocorre a unidade taxonômica PVAd1. Projeto Paranapanema, Regional Santa Inês 94
- Figura 40 – Fotografia de uma típica unidade PVAd2 com a divisão dos horizontes em profundidades e alguns atributos analíticos. Perfil 121, Projeto Boa Vista, talhão 30A. (Fotografia RIZZO, 2001) 95
- Figura 41 – a. Paisagem típica das colinas onduladas do projeto Torre onde ocorre a unidade PVAd2. (Fotografia RIZZO, 2001). b. Padrão de relevo, de média a baixa densidade interfluvial, na fotografia aérea (Projeto Vôo Citrus, julho 2000, BASE – Aerofotogrametria e Projetos S/A, escala original 1:30.000) onde ocorre a unidade taxonômica PVAd2. Projeto Torre, Regional Santa Inês 96
- Figura 42 – Padrão de relevo na fotografia aérea (Projeto Vôo Citrus, julho 2000, BASE – Aerofotogrametria e Projetos S/A, escala original 1:30.000) onde ocorre a unidade taxonômica PVd1. Projeto Torre, Regional Santa Inês 97
- Figura 43 – Padrão de relevo na fotografia aérea (Projeto Vôo Citrus, julho 2000, BASE – Aerofotogrametria e Projetos S/A, escala original 1:30.000) onde ocorre a unidade taxonômica PVd3. Projeto Lavrinhas, Regional Santa Fé 97

- Figura 44 – Fotografia de uma típica unidade CXbd1 com a divisão dos horizontes em profundidades e alguns atributos analíticos. Corte em barranco. (Fotografia RIZZO, 2001)98
- Figura 45 – Padrão de relevo na fotografia aérea (Projeto Vôo Citrus, julho 2000, BASE – Aerofotogrametria e Projetos S/A, escala original 1:30.000) onde ocorre a unidade taxonômica CXbd1. Projeto Cruz de Ferro, Regional Santa Inês99
- Figura 46 – Padrão de relevo na fotografia aérea (Projeto Vôo Citrus, julho 2000, BASE – Aerofotogrametria e Projetos S/A, escala original 1:30.000) onde ocorre a unidade taxonômica CXbd2. Observar a reduzida dimensão interfluvial (< 500 m) na área de predomínio do cambissolo. Projeto Açude do Lobo (Regional Paranapitanga) e Projeto Mangueirinha (Regional Boa Esperança)100
- Figura 47 – Fragmento do banco de dados da rede de parcelas do inventário florestal contínuo da Fibria101
- Figura 48 – Localização das parcelas (sítios florestais) selecionadas da rede de inventário florestal contínuo no Distrito Florestal de Capão Bonito102
- Figura 49 – Amostras de solo secando ao ar (Fotografia em Fevereiro/2006, laboratório Fibria-Capão Bonito) (a). Processo de destorroamento, peneiramento (2 mm nº ABNT) e homogeneização do solo (Fotografia em Março/2006, LEAII/ LCF/ESALQ/USP) (b). Amostras preparadas para envio ao laboratório (Fotografia em Março/2006, LEAII/LCF/ESALQ/USP) (c)104
- Figura 50 – Preparo das amostras indeformadas de solo (a, b). Amostras saturadas com água. Observar na foto que aproximadamente após três minutos do início desse processo, os solos mais escuros (LVd1 e LVd2) já se apresentavam completamente saturados enquanto os solos mais amarelos (LVAd2) e (PVAd1) não mostravam ainda sinais de saturação. (Fotografia em Abril/2006, LFS/LEB/ESALQ/USP) (c)105
- Figura 51 – Inventário florestal (mensuração dos diâmetros) na parcela selecionada. (Fotografia em Fevereiro/2006 – Valdir e Ademir. Projeto Tijuco Regional Boa Esperança)107

Figura 52 – Seleção da árvore média e derrubada com motosserra. (Fotografia em Fevereiro/2006 – Valdir e Ademir. Projeto Tijuco Regional Boa Esperança)	108
Figura 53 – Esquema ilustrativo da avaliação dendrométrica e nutricional	108
Figura 54 – Mensuração da massa fresca (lenho + casca) das árvores com balança digital (precisão $\pm 0,5$ kg). (Fotografia em Fevereiro/2006 – Ademir e Luciano. Projeto Tijuco Regional Boa Esperança)	108
Figura 55 – Mensuração da massa fresca do disco (com e sem casca) na posição do DAP (1,3 m) da árvore 2. Talhão 10 Parcela 33. Projeto São Roque Regional Boa Esperança. (Fotografia em Fevereiro/2006 – laboratório Fibria-CB)	109
Figura 56 – Localização das parcelas estações meteorológicas no Distrito Florestal de Capão Bonito	110
Figura 57 – Método de mapeamento da geometria de vertentes em encostas retilínea, convexa e côncava. RR = vertente retilínea nos sentidos vertical e horizontal, RV = vertente retilínea no sentido vertical e convexa no sentido horizontal, RC = vertente retilínea no sentido vertical e côncava no sentido horizontal, VR = vertente convexa no sentido vertical e retilínea no sentido horizontal, VV = vertente convexa nos sentidos vertical e horizontal, VC = vertente convexa no sentido vertical e côncava no sentido horizontal, CR = vertente côncava no sentido vertical e retilínea no sentido horizontal, CV = vertente côncava no sentido vertical e convexa no sentido horizontal, CC = vertente côncava nos sentidos vertical e horizontal	111
Figura 58 – Esquema do processo de análise de dados espacialmente distribuídos	112
Figura 59 – Modelos teóricos de semivariogramas omnidirecionais. As curvas são os semivariogramas teóricos e os pontos são os semivariogramas experimentais (observados). Modelo Esférico (a). Modelo Exponencial (b). Modelo Gaussiano (c). Modelo Linear (d)	114
Figura 60 – Diagrama do modelo ecofisiológico 3-PGIS (modificado de SANDS 2001)	115

Figura 61 – Sistema de divisão e organização em células do Distrito Florestal de Capão Bonito. Observar no quadro de ampliação o arranjo das células quadradas de 100 m de lado e o sistema destinatário alfanumérico de localização.	116
Figura 62 – Valores de níveis críticos de manutenção de Ca, Mg, P e K no solo para o crescimento de eucalipto (NOVAIS et al., 1986)	126
Figura 63 – Relações entre a razão de água no solo (θ/θ_x – solo seco = 1 até solo saturado) e a variação do modificador fisiológico de água no solo em diferentes texturas.....	127
Figura 64 – Modelo digital de elevação do terreno do Distrito Florestal de Capão Bonito	138
Figura 65 – Distribuição de frequência da altitude (a), da declividade (b) do aspecto (orientação da vertente) (c).....	138
Figura 66 – Ocorrência do atributo topográfico altitude para os projetos do Distrito Florestal de Capão Bonito.....	139
Figura 67 – Mapa da declividade do Distrito Florestal de Capão Bonito	140
Figura 68 – Ocorrência, em porcentagem, do atributo topográfico declividade (em grau) para os projetos do Distrito Florestal de Capão Bonito	140
Figura 69 – Mapa de orientação das vertentes do Distrito Florestal de Capão Bonito.	142
Figura 70 – Ocorrência, em porcentagem, do atributo topográfico orientação das vertentes para os projetos do Distrito Florestal de Capão Bonito	142
Figura 71 – Geometria das vertentes do Distrito Florestal de Capão Bonito.....	143
Figura 72 – Mapas de radiação solar e os efeitos do relevo da época do ano. Radiação solar extraterrestre sem o efeito do relevo (Resultados da eq. 8) (a). Radiação solar extraterrestre com o efeito do relevo (Resultados da eq. 10) (b). Efeito (porcentagem) da correção do relevo para o mês de Dezembro (c). Efeito (porcentagem) da correção do relevo para o mês de Junho (d).....	145
Figura 73 – Estimativa da distribuição horária ($\text{MJ m}^2 \text{ h}^{-1}$) e integral diária ($\text{MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$), para um dia normal e sem nebulosidade, da radiação solar global sobre pontos da superfície de 4 talhões da Regional Paranapitanga do Distrito Florestal de Capão Bonito em 4 datas meteorológicas importantes:	

Equinócios de Outono (a) e de Primavera (c) e os Solstícios de Inverno (b) e de Verão (d). Norte = Talhão 18 Projeto Rancho (aspecto = 359, declividade = 14,5°, longitude = 48,38 W e latitude = 23,83 S), Sul = Talhão 44 Projeto Açude do Lobo (aspecto = 182, declividade = 13,5°, longitude = 48,39 W e latitude = 23,86 S), Leste = Talhão 3 Projeto Lageado (aspecto = 93, declividade = 17,7°, longitude = 48,42 W e latitude = 23,85 S) e Oeste = Talhão 5 Projeto Lageado (aspecto = 273, declividade = 20,5°, longitude = 48,42 W e latitude = 23,86 S) 147

Figura 74 – Mapas de distribuição da radiação solar global diária ($\text{MJ m}^2 \text{dia}^{-1}$) para os meses do ano de 2003 em todo Distrito Florestal de Capão Bonito (eq. (11) corrigida pela radiação global observada na estação meteorológica) 149

Figura 75 – Distribuição de frequência da média da radiação solar global diária ($\text{MJ m}^2 \text{dia}^{-1}$) (eq. 11) para os meses de dezembro (a) e de junho (b)..... 150

Figura 76 – Ocorrência da média, da mínima e da máxima absoluta radiação solar global diária potencial ($\text{MJ m}^2 \text{dia}^{-1}$) para os meses de dezembro (a) e de junho (b) nos projetos do Distrito Florestal de Capão Bonito..... 150

Figura 77 – Valores médios mensais de temperatura máxima, média e mínima nas estações meteorológicas de Boa Esperança (a), Santa Inês (b), Santa Fé (c) e Capão Bonito CIIAGRO/IAC (d) 152

Figura 78 – Mapas de distribuição da temperatura média máxima mensal para o ano de 2003 em todo o Distrito Florestal de Capão Bonito (eq. (17), corrigida pela temperatura observada nas estações meteorológicas) 154

Figura 79 – Distribuição de frequência da temperatura média máxima potencial para os meses de janeiro (a) e de junho (b). Resultados apenas das equações de Pedro Júnior et al. (1991) 155

Figura 80 – Ocorrência da média, mínima e máxima absoluta temperatura máxima potencial para os meses de janeiro (a) e de junho (b) nos projetos do Distrito Florestal de Capão Bonito 155

Figura 81 – Mapas de distribuição da temperatura média mínima mensal para o ano de 2003 em todo o Distrito Florestal de Capão Bonito (eq. (17) corrigida pela temperatura observada nas estações meteorológicas).....	156
Figura 82 – Distribuição de frequência da temperatura média mínima potencial para os meses de janeiro (a) e de junho (b)	157
Figura 83 – Ocorrência da média, mínima e máxima absoluta temperatura mínima potencial para os meses de janeiro (a) e junho (b) nos projetos do Distrito Florestal de Capão Bonito.....	157
Figura 84 – Relação entre a temperatura média mínima mensal e a ocorrência de dias com geadas no mês para o Distrito Florestal de Capão Bonito (Estações meteorológicas de Boa Esperança, Santa Inês, Santa Fé e de Capão Bonito/CIIAGRO/IAC).....	159
Figura 85 – Mapas de distribuição mensal do número de dias com geada para o ano de 2003 em todo o Distrito Florestal de Capão Bonito (Aplicação da equação da Figura 72).....	159
Figura 86 – Distribuição de frequência do número de dias com geada no ano de 2003	160
Figura 87 – Ocorrência do mínimo e máximo número de dias com geada no ano de 2003 nos projetos do Distrito Florestal de Capão Bonito	160
Figura 88 – Valores médios mensais observados de umidade relativa nas estações meteorológicas de Boa Esperança, Santa Inês e Santa Fé do Distrito Florestal de Capão Bonito.....	161
Figura 89 – Mapas de distribuição da umidade relativa média mensal para o ano de 2003 em todo o Distrito Florestal de Capão Bonito (eq. (22), corrigida pela umidade relativa observada nas estações meteorológicas).....	162
Figura 90 – Distribuição de frequência da umidade relativa potencial (eq. 22) para os meses de janeiro (a) e de junho (b)	163
Figura 91 – Ocorrência da média, mínima e máxima absoluta umidade relativa potencial (eq. 22) para os meses de janeiro (a) e junho (b) nos projetos do Distrito Florestal de Capão Bonito.....	163

Figura 92 – Valores totais mensais de precipitação nas estações meteorológicas de Boa Esperança, Santa Inês e Santa Fé do Distrito Florestal de Capão Bonito	165
Figura 93 – Mapas de distribuição da precipitação total mensal para o ano de 2003 em todo o Distrito Florestal de Capão Bonito	166
Figura 94 – Mapa identificando a distribuição da coleção pedológica de perfis e tradagens, a quantidade de registro de pontos e o tipo de solo ao longo do Distrito Florestal de Capão Bonito	168
Figura 95 – Triângulo de agrupamento textural (EMBRAPA, 2006), limites granulométricos e ocorrência das classes de textura para as amostras de solos do horizonte A (a) e horizonte B (b) da coleção pedológica do Distrito Florestal de Capão Bonito	169
Figura 96 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo areia muito fina (g kg^{-1}), histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito...	183
Figura 97 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo areia fina (g kg^{-1}), histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito...	184
Figura 98 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo areia média (g kg^{-1}), histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito...	185
Figura 99 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo areia grossa (g kg^{-1}), histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito...	186
Figura 100 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo areia muito grossa (g kg^{-1}), histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no	

- horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito ... 187
- Figura 101 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo areia total (g kg^{-1}), histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito ... 188
- Figura 102 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo silte (g kg^{-1}), histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito..... 189
- Figura 103 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo argila (g kg^{-1}), histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito..... 190
- Figura 104 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo relação silte/argila, histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito ... 191
- Figura 105 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo grau de floculação da argila (%), histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito ... 192
- Figura 106 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo matéria orgânica (g kg^{-1}), histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito ... 193
- Figura 107 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo fósforo (mg kg^{-1}), histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito ... 194

- Figura 108 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo potássio ($\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$), histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito... 195
- Figura 109 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo cálcio ($\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$), histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito... 196
- Figura 110 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo magnésio ($\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$), histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito... 197
- Figura 111 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo sódio ($\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$), histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito... 198
- Figura 112 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo alumínio ($\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$), histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito... 199
- Figura 113 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo alumínio+alumínio ($\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$), histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito... 200
- Figura 114 - Distribuição espacial dos pontos para o atributo pH H_2O , histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito 201
- Figura 115 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo pH KCl, histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial

(respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito.....	202
Figura 116 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo delta pH, histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito.....	203
Figura 117 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo soma de bases ($\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$), histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito ...	204
Figura 118 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo CTC efetiva ($\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$), histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito ...	205
Figura 119 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo CTC pH7 ($\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$), histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito ...	206
Figura 120 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo saturação por bases (%), histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito ...	207
Figura 121 - Distribuição espacial dos pontos para o atributo saturação por alumínio (%), histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito ...	208
Figura 122 – Mapas dos atributos pedológicos argila (a), silte (b) e CTCefetiva (c) utilizados no modelo 3-PGIS.....	210
Figura 123 – Distribuição de frequência dos atributos edáficos teor de argila (a), teor de silte (b) e CTC efetiva (c)	211

- Figura 124 – Ocorrência dos atributos edáficos argila (a), silte (b), matéria-orgânica (c) e CTC efetiva (d) nos projetos do Distrito Florestal de Capão Bonito 212
- Figura 125 – Relação entre a CTCefetiva ($\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$) e o volume total com casca (eixo y_1 , $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$) e a equação do Índice de Fertilidade (y_2). A única curva representa as duas relações, modificando apenas os coeficientes A e B das equações 215
- Figura 126 – Mapa do Índice de Fertilidade do Distrito Florestal de Capão Bonito 215
- Figura 127 – Influência do teor de argila na retenção de água no solo na condição de Capacidade de Campo (CC) e no Ponto de Murcha Permanente (PMP) em solos do Distrito Florestal de Capão Bonito 217
- Figura 128 – Influência do teor de argila na capacidade de água disponível (CAD) nos solos do Distrito Florestal de Capão Bonito. Classes de interpretação de disponibilidade de água conforme Oliveira e Paula (1988) 217
- Figura 129 – Mapa de Capacidade de Água Disponível do Distrito Florestal de Capão Bonito 218
- Figura 130 – Ocorrência da média, mínima e máxima capacidade de água disponível (mm) nos projetos do Distrito Florestal de Capão Bonito 219
- Figura 131 – Relação teórica entre a potência do déficit de razão de umidade (n_θ) e o teor de argila (g kg^{-1}) (a). Relação estimada entre o déficit de razão de umidade para $f_\theta=0,5$ (c_θ) e o teor de argila (g kg^{-1}) (b) 220
- Figura 132 – Distribuição do total de água disponível no solo mensal para o ano de 2003 no Distrito Florestal de Capão Bonito 221
- Figura 133 – Relação entre a soma do teor de argila e silte (g kg^{-1}) e a densidade básica ponderada da madeira aos seis anos (g cm^{-3}) 223
- Figura 134 – Mapa de densidade básica da madeira do Distrito Florestal de Capão Bonito 224
- Figura 135 – Ocorrência da média, mínima e máxima densidade básica da madeira nos projetos do Distrito Florestal de Capão Bonito 224
- Figura 136 – Elevada suscetibilidade de quebra pelo vento do material genético C219H. Evento em 25/01/2006 (22,2 mm de precipitação e $5,5 \text{ m s}^{-1}$ de velocidade máxima do vento) (Fotografia tirada na mesma data) (a, b). Evento em

09/02/2006 (19,2 mm de precipitação e $3,4 \text{ m s}^{-1}$ de velocidade máxima do vento) (Fotografia tirada na mesma data). Registros climáticos da estação meteorológica automática do Viveiro (Boa Esperança). (Fotografias Projeto Paranapanema Regional Santa Inês) (c). Aspecto de uma linha de rebrota, na altura do ponto de ruptura (2 a 3 m), do material genético C219H. (Fotografia em Setembro/2008. Projeto Paranapanema Regional Santa Inês) (d)	225
Figura 137 – Relação entre a soma do teor de argila e silte (g kg^{-1}) e a biomassa de fuste (kg árvore^{-1}) aos seis anos	227
Figura 138 – Mapa de biomassa de fuste (kg árvore^{-1}) aos seis anos do Distrito Florestal de Capão Bonito	228
Figura 139 – Ocorrência da média, mínima e máxima biomassa do fuste (kg árvore^{-1}) nos projetos do Distrito Florestal de Capão Bonito	228
Figura 140 – a. Influência da CTC efetiva no fracionamento casca + galho na idade inicial. b. idade considerada madura (b).....	230
Figura 141 – Mapa de fração galho+casca na idade inicial (a) e idade madura (b) do material genético C219H do Distrito Florestal de Capão Bonito	231
Figura 142 – Influência do teor de argila no crescimento inicial, expressado pelo DAP aos dois anos em solos do Distrito Florestal de Capão Bonito	233
Figura 143 – Mapa de DAP aos dois anos do Distrito Florestal de Capão Bonito.....	234
Figura 144 – Ocorrência do médio, mínimo e máximo DAP aos dois anos nos projetos do Distrito Florestal de Capão Bonito.....	234
Figura 145 – Relação entre o DAP (cm) e a altura (m), entre dois e seis anos de idade no Distrito Florestal de Capão Bonito.....	235
Figura 146 – DAP (a), VTCC (b), IMA (c) e MS (d) observados (pontos) e simulados (linhas) no modelo 3-PGIS no sítio florestal LV1-SR-10.33. O erro (%) entre o observado e simulado aparece no ponto. Teste de hipóteses pelo Qui-quadrado (χ^2 , $\alpha=0,05$), coeficiente de correlação de Pearson (R) e índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997).....	239
Figura 147 – DAP (a), VTCC (b), IMA (c) e MS (d) observados (pontos) e simulados (linhas) no modelo 3-PGIS no sítio florestal LV1-SR-11.36. O erro (%)	

entre o observado e simulado aparece no ponto. Teste de hipóteses pelo Qui-quadrado (X^2 , $\alpha=0,05$), coeficiente de correlação de Pearson (R) e índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997).....	239
Figura 148 – DAP (a), VTCC (b), IMA (c) e MS (d) observados (pontos) e simulados (linhas) no modelo 3-PGIS no sítio florestal LV1-SR-17.43. O erro (%) entre o observado e simulado aparece no ponto. Teste de hipóteses pelo Qui-quadrado (X^2 , $\alpha=0,05$), coeficiente de correlação de Pearson (R) e índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997).....	240
Figura 149 – DAP (a), VTCC (b), IMA (c) e MS (d) observados (pontos) e simulados (linhas) no modelo 3-PGIS no sítio florestal LV1-SR-31.75. O erro (%) entre o observado e simulado aparece no ponto. Teste de hipóteses pelo Qui-quadrado (X^2 , $\alpha=0,05$), coeficiente de correlação de Pearson (R) e índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997).....	240
Figura 150 – DAP (a), VTCC (b), IMA (c) e MS (d) observados (pontos) e simulados (linhas) no modelo 3-PGIS no sítio florestal LV1-SR-39.96. O erro (%) entre o observado e simulado aparece no ponto. Teste de hipóteses pelo Qui-quadrado (X^2 , $\alpha=0,05$), coeficiente de correlação de Pearson (R) e índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997).....	241
Figura 151 – DAP (a), VTCC (b), IMA (c) e MS (d) observados (pontos) e simulados (linhas) no modelo 3-PGIS no sítio florestal LV2-BV-18.58. O erro (%) entre o observado e simulado aparece no ponto. Teste de hipóteses pelo Qui-quadrado (X^2 , $\alpha=0,05$), coeficiente de correlação de Pearson (R) e índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997).....	241
Figura 152 – DAP (a), VTCC (b), IMA (c) e MS (d) observados (pontos) e simulados (linhas) no modelo 3-PGIS no sítio florestal LV2-BV-21.67. O erro (%) entre o observado e simulado aparece no ponto. Teste de hipóteses pelo Qui-quadrado (X^2 , $\alpha=0,05$), coeficiente de correlação de Pearson (R) e índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997).....	242
Figura 153 – DAP (a), VTCC (b), IMA (c) e MS (d) observados (pontos) e simulados (linhas) no modelo 3-PGIS no sítio florestal LV2-CT-27A.125. O erro (%) entre o observado e simulado aparece no ponto. Teste de hipóteses pelo	

Qui-quadrado (X^2 , $\alpha=0,05$), coeficiente de correlação de Pearson (R) e índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997).....	242
Figura 154 – DAP (a), VTCC (b), IMA (c) e MS (d) observados (pontos) e simulados (linhas) no modelo 3-PGIS no sítio florestal LV2-PR-11.85. O erro (%) entre o observado e simulado aparece no ponto. Teste de hipóteses pelo Qui-quadrado (X^2 , $\alpha=0,05$), coeficiente de correlação de Pearson (R) e índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997).....	243
Figura 155 – DAP (a), VTCC (b), IMA (c) e MS (d) observados (pontos) e simulados (linhas) no modelo 3-PGIS no sítio florestal LV2-TO-13A.29. O erro (%) entre o observado e simulado aparece no ponto. Teste de hipóteses pelo Qui-quadrado (X^2 , $\alpha=0,05$), coeficiente de correlação de Pearson (R) e índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997).....	243
Figura 156 – DAP (a), VTCC (b), IMA (c) e MS (d) observados (pontos) e simulados (linhas) no modelo 3-PGIS no sítio florestal LVA2-TJ-7.67. O erro (%) entre o observado e simulado aparece no ponto. Teste de hipóteses pelo Qui-quadrado (X^2 , $\alpha=0,05$), coeficiente de correlação de Pearson (R) e índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997).....	244
Figura 157 – DAP (a), VTCC (b), IMA (c) e MS (d) observados (pontos) e simulados (linhas) no modelo 3-PGIS no sítio florestal LVA2-TO-4.9. O erro (%) entre o observado e simulado aparece no ponto. Teste de hipóteses pelo Qui-quadrado (X^2 , $\alpha=0,05$), coeficiente de correlação de Pearson (R) e índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997).....	244
Figura 158 – DAP (a), VTCC (b), IMA (c) e MS (d) observados (pontos) e simulados (linhas) no modelo 3-PGIS no sítio florestal LVA2-TO-17.37. O erro (%) entre o observado e simulado aparece no ponto. Teste de hipóteses pelo Qui-quadrado (X^2 , $\alpha=0,05$), coeficiente de correlação de Pearson (R) e índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997).....	245
Figura 159 – DAP (a), VTCC (b), IMA (c) e MS (d) observados (pontos) e simulados (linhas) no modelo 3-PGIS no sítio florestal LVA2-TO-18.39. O erro (%) entre o observado e simulado aparece no ponto. Teste de hipóteses pelo	

	Qui-quadrado (X^2 , $\alpha=0,05$), coeficiente de correlação de Pearson (R) e índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997)	245
Figura 160 – DAP (a), VTCC (b), IMA (c) e MS (d) observados (pontos) e simulados (linhas) no modelo 3-PGIS no sítio florestal LVA2-TO-18.40. O erro (%) entre o observado e simulado aparece no ponto. Teste de hipóteses pelo Qui-quadrado (X^2 , $\alpha=0,05$), coeficiente de correlação de Pearson (R) e índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997)		246
Figura 161 – DAP (a), VTCC (b), IMA (c) e MS (d) observados (pontos) e simulados (linhas) no modelo 3-PGIS no sítio florestal PVA1-PR-8.69. O erro (%) entre o observado e simulado aparece no ponto. Teste de hipóteses pelo Qui-quadrado (X^2 , $\alpha=0,05$), coeficiente de correlação de Pearson (R) e índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997)		246
Figura 162 – DAP (a), VTCC (b), IMA (c) e MS (d) observados (pontos) e simulados (linhas) no modelo 3-PGIS no sítio florestal PVA1-PR-9.70. O erro (%) entre o observado e simulado aparece no ponto. Teste de hipóteses pelo Qui-quadrado (X^2 , $\alpha=0,05$), coeficiente de correlação de Pearson (R) e índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997)		247
Figura 163 – DAP (a), VTCC (b), IMA (c) e MS (d) observados (pontos) e simulados (linhas) no modelo 3-PGIS no sítio florestal PVA1-PR-18.73. O erro (%) entre o observado e simulado aparece no ponto. Teste de hipóteses pelo Qui-quadrado (X^2 , $\alpha=0,05$), coeficiente de correlação de Pearson (R) e índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997)		247
Figura 164 – DAP (a), VTCC (b), IMA (c) e MS (d) observados (pontos) e simulados (linhas) no modelo 3-PGIS no sítio florestal PVA1-PR-18.75. O erro (%) entre o observado e simulado aparece no ponto. Teste de hipóteses pelo Qui-quadrado (X^2 , $\alpha=0,05$), coeficiente de correlação de Pearson (R) e índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997)		248
Figura 165 – DAP (a), VTCC (b), IMA (c) e MS (d) observados (pontos) e simulados (linhas) no modelo 3-PGIS no sítio florestal PVA1-PR-19.62. O erro (%) entre o observado e simulado aparece no ponto. Teste de hipóteses pelo		

Qui-quadrado (X^2 , $\alpha=0,05$), coeficiente de correlação de Pearson (R) e índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997).....	248
Figura 166 – DAP (a), VTCC (b), IMA (c) e MS (d) observados e simulados no modelo 3-PGIS em todos os sítios florestais. Equação de regressão, coeficiente de determinação e índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997).....	249
Figura 167 – Relações entre os teores foliares dos macronutrientes de N (a), P (b), K (c), Ca (d), Mg (e) e S (f), o DAP médio e o teor de argila nos sítios florestais do Distrito Florestal de Capão Bonito (camada 0 a 20 cm).....	251
Figura 168 – Relações entre os teores foliares dos micronutrientes de B (a), Cu (b), Fe (c), Mn (d) e Zn (e), o DAP médio e o teor de argila nos sítios florestais do Distrito Florestal de Capão Bonito (camada 0 a 20 cm)	252
Figura 169 – Relações entre a biomassa de folhas, o DAP médio e o teor de argila (camada 0 a 20 cm) nos diferentes sítios florestais do Distrito Florestal de Capão Bonito	253
Figura 170 – Mapas de biomassa foliar (a) e de estoque foliar do macronutriente potássio (b) no Distrito Florestal de Capão Bonito	253
Figura 171 – Mapas do incremento corrente anual ($m^3 \text{ ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$), considerado nos meses de janeiro de 2003 (a) e de junho de 2003 (b), do Distrito Florestal de Capão Bonito	255
Figura 172 – Ocorrência da média, mínima e máxima produtividade ($m^3 \text{ ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$), em janeiro de 2003 (a) e em junho de 2003 (b), nos projetos do Distrito Florestal de Capão Bonito.....	255
Figura 173 – Mapa de produtividade normalizada pela média do Distrito Florestal de Capão Bonito	257
Figura 174 – Ocorrência da média, mínima e máxima porcentagem da normalização da produção pela média nos projetos do Distrito Florestal de Capão Bonito	257
Figura 175 – Mapa de qualidade de sítio, segundo a produtividade, do Distrito Florestal de Capão Bonito	258
Figura 176 – Ocorrência, em porcentagem, das classes de qualidade de sítio dos projetos do Distrito Florestal de Capão Bonito	258

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Número de fragmentos por classe de superfície (ha) e porcentagem em relação aos valores estaduais.....	80
Tabela 2 – Unidades pedológicas taxonômicas ocorrentes no Distrito Florestal de Capão Bonito e sua representatividade	84
Tabela 3 – Atributos físicos dos diferentes solos estudados de Capão Bonito (camada 0 a 20 cm)	105
Tabela 4 - Atributos químicos dos diferentes solos estudados de Capão Bonito (camada 0 a 20 cm)	105
Tabela 5 – Variáveis meteorológicas de entrada no modelo 3-PGIS para o Distrito Florestal de Capão Bonito.....	117
Tabela 6 – Coeficientes dos modelos de regressão utilizados para a estimativa das médias mensais de temperatura máxima e mínima para o Distrito Florestal de Capão Bonito	122
Tabela 7 – Parâmetros e variáveis de estado referente ao solo do Distrito Florestal de Capão Bonito	125
Tabela 8 – Profundidade efetiva de cada tipo de solo do Distrito Florestal de Capão Bonito	127
Tabela 9 – Parâmetros e variáveis de estado referente ao fuste e a copa do modelo 3-PGIS.....	129
Tabela 10 - Parâmetros referentes ao folheto do modelo 3-PGIS.....	129
Tabela 11 - Parâmetros alométricos do modelo 3-PGIS	129
Tabela 12 - Parâmetros do efeito da temperatura do modelo 3-PGIS	130
Tabela 13 - Parâmetros referentes ao efeito da idade do modelo 3-PGIS.....	130
Tabela 14 – Sítios (parcelas) amostrados organizados segundo o seu teor de argila no solo e o número de árvores abatidas	133
Tabela 15 – Critério de interpretação do desempenho do modelo 3-PGIS pelo índice de confiança “c”	135
Tabela 16 – Resultados da análise estatística descritiva dos atributos do solo estudados na profundidade de 0 - 30 cm (horizonte A) e de 30 - 80 cm (horizonte B)	172

Tabela 17 - Modelos e parâmetros dos semivariogramas ajustados aos dados dos atributos do solo na profundidade de 0 - 30 cm (horizonte A) e de 30 - 80 cm (horizonte B)	176
Tabela 18 – Coeficientes e estatística dos modelos de regressão para determinação da biomassa dos compartimentos do material genético C219H, segundo a textura dos solos de Capão Bonito	229
Tabela 19 – Coeficientes e estatística dos modelos de regressão (eq. 38) para a determinação da biomassa lenhosa do material genético C219H, segundo a textura dos solos de Capão Bonito	232

1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui características edafoclimáticas que lhe confere uma elevada e natural vocação florestal. O clima e o solo brasileiro e a abundância de terras criam condições ideais para o reflorestamento (GOLFARI et al., 1978; GONÇALVES, 2002). Ab'Saber et al. (1990) identificaram no Brasil um total de 20.100.000 ha potencialmente acolhedores de atividades florestais. Além disso, o Brasil é reconhecido internacionalmente pela tecnologia desenvolvida na formação de florestas de rápido crescimento (BARRICHELO, 1990), pois tem se apoiado historicamente na silvicultura intensiva que visa atender a demanda das indústrias de base madeireira, aliviando a pressão sobre as florestas naturais (FERREIRA, 1989; EVANS; TURNBULL, 2004).

Em 2009 a área total de florestas plantadas de eucalipto e pinus no Brasil atingiu 6.310.450 ha, apresentando um crescimento de 2,5 % em relação ao total de 2008 e média de 7,1% ao ano entre 2004 e 2009 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF, 2010).

O estado de São Paulo somou, em 2009, mais de 1.000.000 ha de plantios de eucaliptos. Enquanto a produtividade média do eucalipto no Brasil cresceu aproximadamente 10% nos últimos 6 anos, entre 2005 e 2009 (ABRAF, 2010), o preço da terra tem subido à taxas muito superiores, cerca de 67% neste mesmo período, e mais de 350% nos últimos 10 anos (INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA - IEA, 2011). O elevado preço da terra nos estados brasileiros com tradição na silvicultura tem exigido do setor florestal maior aproveitamento dos recursos dos sítios disponíveis. Ao mesmo tempo as florestas plantadas expandam-se nos estados em outros estados sem tradição florestal. Essas condições exigem conhecimentos específicos das empresas, engenheiros e técnicos para atender a necessidade pelo aumento da produtividade das áreas já instaladas, quanto da exploração de novas terras para os projetos a serem implantados.

Porém, no Brasil milhões de hectares de eucaliptos são intensivamente manejados para produção de madeira, e pouco se sabe sobre os processos fisiológicos que controlam o crescimento (STAPE, 2002). Além disso, o setor florestal brasileiro vive uma fase de forte expansão nas chamadas novas fronteiras da silvicultura. O sucesso

da compra, quanto a produtividade, destas novas terras é baseado em métodos empíricos de determinação da qualidade de sítio. Desta forma, são necessárias aplicações de modelos baseados em processos para avaliar a produtividade e as restrições ecológicas das plantações florestais em diferentes escalas espaciais e temporais (STAPE, 2002). O 3-PG (*Physiological Processes Predicting Growth*) (LANDSBERG; WARING, 1997) é um modelo baseado em processos reconhecidamente recomendado para estes objetivos. Landsberg e Waring (1997), na publicação do modelo 3-PG não espacial, encorajaram os próximos pesquisadores usuários do modelo a fazerem o seu uso espacial, integrando-o com as características da paisagem. Ao mesmo tempo, Landsberg e Gower (1997), ilustraram uma metodologia de obtenção das variáveis ambientais e de modelagem integrada com sistema de informações geográficas.

Desta forma, usando diversas informações de topografia, solos e clima, este estudo representa um caso de calibração, validação e aplicação do modelo 3-PG espacialmente distribuído em amplas plantações comerciais de híbridos clonais de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* na região de Capão Bonito, sul do estado de São Paulo.

Neste contexto, foi testada a seguinte hipótese: a produtividade de plantações clonais de *Eucalyptus* pode ser simulada com precisão pelo modelo 3-PG quando associado a sistemas de informações geográficas.

Assim, o objetivo geral do estudo foi: calibrar, validar e aplicar o modelo 3-PGIS nos plantios comerciais de Capão Bonito.

O estudo teve os seguintes objetivos específicos: 1) incorporar as características do relevo no mapeamento da radiação global; 2) equacionar e elaborar mapas mensais de geadas da região de estudo; 3) caracterizar a variabilidade e a dependência espacial dos atributos químicos e físicos dos solos florestais da região; 4) propor e calibrar uma equação entre o índice de fertilidade do modelo 3-PG e os atributos do solo. 5) avaliar a relação entre disponibilidade de água nos solos e o teor de argila dos solos; 6) avaliar a relação entre a biomassa de fuste e a textura dos solos; 7) avaliar a relação entre a densidade da madeira e a textura dos solos; 8) caracterizar a nutrição das árvores e avaliar a sua relação com o teor de argila dos solos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O estudo do potencial biológico do ecossistema florestal torna-se essencial quando o objetivo é o seu manejo racional, visando a maximização da produtividade, e evitando-se a exaustão dos recursos do sítio florestal. Na área florestal é comum a aplicação de modelos que projetam o futuro do povoamento, pois desta forma pode-se tomar as decisões apropriadas a cerca do manejo a ser seguido.

De modo geral, a modelagem pode ser entendida como a construção de uma representação matemática de sistemas biológicos, que incorporam conhecimentos sobre mecanismos fisiológicos e ecológicos por meio de algoritmos preditivos (JOHNSEN et al., 2001; GOMES; VARRIALE, 2004). Na área de produção de culturas agrícolas, Passioura (1996) fez uma análise sobre os modelos de simulação e os dividiu em dois grupos básicos: (i) aqueles que aspiram em melhorar a nossa compreensão da fisiologia e as interações ambientais das culturas, o qual chamou de modelos baseados em processos (científicos), (ii) e aqueles que aspiram a aconselhar uma boa gestão dos produtores rurais ou de previsões para os gestores políticos, dito também de modelos empíricos (engenharia). Estas aspirações bem diferentes requerem também modelos bastante diferentes.

A modelagem da produção de bens madeireiros tem se apoiado tradicionalmente nos chamados modelos empíricos, ou determinísticos. Estes métodos buscam relações lineares ou não-lineares entre a variável dependente de interesse e as variáveis independentes. Essas variáveis de interesse são geralmente a produção ou produtividade madeireira. No Brasil, as variáveis independentes relacionadas têm sido geralmente os atributos do solo (BARROS, 1974; GONÇALVES et al., 1990; CORRÊA; MARCOLIN, 1993; MEIO et al., 1995; STAPE et al., 1997; MENEZES, 2005; BELLOTE; DEDECEK, 2006; GAVA; GONÇALVES, 2008; CASTRO et al., 2010), do relevo (FERREIRA; COUTO, 1981; GONÇALVES, 2003; ORTIZ et al., 2006), do clima (FERREIRA; COUTO, 1981; FERRAZ, 1993; STAPE et al., 1997; SOARES et al., 1998; TEMPS, 2005; ZANON; FINGER, 2010) e da vegetação natural (CORRÊA; MARCOLIN, 1993). Estes modelos empíricos, ajustados para as condições locais, são sítio-específicos, impossibilitando extrapolações ou simulações para outras condições

diferentes das utilizadas no estabelecimento do modelo. Desta forma, não há necessariamente o estabelecimento de relações de causa-efeito. Assim, questões relacionadas à sustentabilidade florestal, considerando a ampliação temporal, ou os impactos regionais das práticas de manejo, vista numa ampliação espacial, não podem ser abordadas.

Neste sentido, Stape (2002) aponta que os modelos clássicos de crescimento e rendimento para a estimativa da produção florestal apresentam as seguintes limitações: (i) não podem ser utilizados para estimar a produtividade em paisagens não-florestal, (ii) a curto prazo, esses modelos são insensíveis às variações climáticas interanuais, o que pode afetar dramaticamente a produção final das florestas de rotação de curta duração devido a um ou mais anos terem baixas condições de crescimento, e (iii) as mudanças nas práticas de manejo entre rotações podem alterar as relações empíricas.

Por outro lado, os modelos baseados em processos possuem capacidade preditiva espacial e temporal, e se devidamente calibrados e validados, podem fornecer estimativas confiáveis. No setor florestal brasileiro o uso de modelos baseados em processos está em plena fase de expansão. Stape (2002) aponta que os principais objetivos no uso desses modelos são o de (i) avaliar os riscos da variação e mudanças climáticas na produção florestal, (ii) estimar a produtividade potencial e atingível, (iii) identificar fatores ambientais limitantes ao crescimento, (iv) criar programas de manejo florestal e (v) avaliar a produtividade florestal ao longo prazo.

Assim, objetivando de fato entender os processos que governam o crescimento das plantas, faz-se necessário o uso dos chamados modelos ecofisiológicos. Esses modelos pressupõem a existência de um sistema cujos compartimentos são relacionados através de processos físicos ou biológicos, os quais são alicerçados em teorias físicas e ecológicas (LANDSBERG, 1986). Os modelos baseados em processos descrevem a produtividade florestal e são fundamentados nos processos fisiológicos que controlam o crescimento, como a fotossíntese, a alocação, a respiração, a transpiração, a nutrição e serapilheira (LANDSBERG; GOWER, 1997).

Os principais modelos ecofisiológicos que visam predizer a produtividade florestal têm sido desenvolvidos dentro dos últimos 25 anos. Em ampla revisão destes modelos, Landsberg e Gower (1997) apontam que os modelos mais expressivos são:

LINKAGES (PASTOR; POST, 1986), CENTURY (PARTON et al., 1987), MAESTRO (WANG; JARVIS, 1990), BEX (BONAN, 1990), BIOMASS (McMURTRIE et al., 1990), FOREST-BGC (RUNNING; GOWER, 1991), TREGROW (WEINSTEIN et al., 1991) e PnET (ABER; FEDERER, 1992). Contudo, todos esses modelos são essencialmente ferramentas de pesquisa e ainda têm de ser simplificado o suficiente para garantir o interesse de uso pelos pesquisadores florestais. Pois, esses modelos apresentam obstáculos para uma devida utilização prática, em virtude da complexidade dos processos fisiológicos envolvidos, e, conseqüentemente, da grande quantidade de informações e parametrização cuidadosa para que eles possam ser executados (LANDSBERG; WARING, 1997).

Neste sentido, é que surge o modelo ecofisiológico 3-PG (*Physiological Processes Predicting Growth*), com o intuito de preencher a lacuna existente entre os modelos empíricos e os modelos muito detalhados de base fisiológica. O modelo é fundamentado numa série de princípios bem estabelecidos e algumas recentes constantes que facilitam os cálculos (LANDSBERG; WARING, 1997). É basicamente um modelo de bioconversão de energia solar. Estima a produtividade primária bruta baseada na radiação fotossinteticamente ativa mensal e na teórica máxima eficiência do dossel, reduzida pelos modificadores fisiológicos (idade, déficit de pressão de vapor e água no solo) e ambientais (temperatura, fertilidade do solo e geadas) (STAPE et al., 2004).

O modelo 3-PG foi desenvolvido inicialmente para uma espécie genérica (LANDSBERG; WARING, 1997), mas parâmetros específicos foram calibrados para *Eucalyptus globulus* (SANDS; LANDSBERG, 2002), *Eucalyptus grandis* (ALMEIDA et al., 2003, 2004), *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* (STAPE et al., 2004), *Eucalyptus grandis* x *E. camaldulensis* (DYE et al., 2004), *Eucalyptus cladocalyx* (PAUL, et al., 2007), *Eucalyptus maculata* (PAUL et al., 2007), *Pinus taeda* (LANDSBERG et al., 2000), *Pinus radiata* (FLORES; ALLEN, 2004), *Pinus ponderosa* (COOPS et al., 2005), *Pinus sylvestris* (LANDSBERG et al., 2005), *Pinus patula* (LOUW; SCHOLLES, 2006), *Pinus pinaster* (ALEXANDRE, 2009), *Picea sitchensis*, (WARING, 2000), *Pseudotsuga menziesii* (WARING; McDOWELL, 2002), *Dacrydium cupressinum* (WHITEHEAD et al.

2002), *Cunninghamia lanceolata* (ZHAO et al., 2009) e *Tectona grandis* (BEHLING, 2009).

De maneira geral, os trabalhos citados acima destacam o potencial do 3-PG como ferramenta fundamental para auxiliar o manejo de florestais comerciais, possibilitando prever o impacto dos fatores determinantes da produtividade (radiação solar, temperatura, água e nutrientes) sobre o potencial produtivo da espécie florestal e, consequentemente, sobre a sustentabilidade de florestas plantadas. O modelo 3-PG é amigável e gratuito. Foi implementado em linguagem “*Visual Basic for Applications*” e utiliza o programa Excel como interface e ferramenta básica. Foi elaborado pensando no usuário final, ou seja, o pesquisador e o manejador florestal. Apresenta ainda uma estrutura simples e transparente, é de fácil operação, tem como entrada dados facilmente disponíveis e os seus parâmetros são facilmente determinados, o que realça o seu valor e interesse de ser utilizado no contexto do manejo florestal (ESPREY et al. (2004).

Desta forma, o modelo foi amplamente difundido e tem-se obtido resultados satisfatórios quanto à estimativa da produtividade de florestas equiâneas, com aplicações em condições edafoclimáticas na Austrália, Nova Zelândia, Inglaterra, Estados Unidos da América, África do Sul, Brasil, Chile, Portugal, Finlândia, Canadá e China (Figura 1).

Coops et al. (1998), utilizando o modelo 3-PG, avaliaram os efeitos das variações edafoclimáticas na produtividade de madeira de florestas de *Eucalyptus pilulares*, *E. maculata*, *E. obliqua*, *E. regnans* e *Pinus radiata* na Austrália e Nova Zelândia. Os autores obtiveram uma relação linear satisfatória ($R^2 = 0,82$) entre a produtividade primária líquida observada e a estimada pelo modelo.

Figura 1 – Localização mundial das principais publicações sobre o modelo 3-PG. 1 = Austrália, *Eucalyptus* e *Pinus*, Landsberg e Waring (1997); 2 = Austrália e Nova Zelândia, *Eucalyptus pilularis*, *E. obliqua* e *Pinus radiata*, Coops et al. (1998); 3 = Inglaterra, *Picea sitchensis*, Waring (2000); 4 = Estados Unidos da América, *Pinus taeda*, Landsberg et al. (2001); 5 = Austrália, *Eucalyptus globulus*, Sands e Landsberg (2002); 6 = Estados Unidos da América, *Pseudotsuga menziesii*, Waring e McDowell (2002); 7 = Brasil, *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*, Stape et al. (2004); 8 = Brasil, *Eucalyptus grandis*, Almeida et al. (2004); 9 = Brasil, *Eucalyptus*, Tsukamoto Filho et al. (2004); 10 = África do Sul, *Eucalyptus grandis* x *E. camaldulensis*, Dye et al. (2004); 11 = Chile, *Pinus radiata*, Flores e Allen (2004); 12 = Portugal, *Eucalyptus globulus*, Tomé et al. (2004); 13 = Finlândia, *Pinus sylvestris*, Landsberg et al. (2005); 14 = Estados Unidos da América, *Pinus ponderosa*, Coops et al. (2005); 15 = Brasil, *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*, Silva (2006); 16 = África do Sul, *Pinus patula*, Louw e Scholes (2006); 17 = Brasil, *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*, Guimarães et al. (2007); 18 = Canadá, *Pseudotsuga menziesii*, Coops et al. (2007); 19 = Austrália, *Eucalyptus cladocalyx* e *Eucalyptus maculata*, Paul et al. (2007); 20 = Brasil, *Tectona grandis*, Behling (2009); 21 = Brasil, *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*, Borges (2009); 22 = China, *Cunninghamia lanceolata*, Zhao et al. (2009); 23 = Portugal, *Pinus pinaster*, Alexandre (2009); 24 = Brasil, *Eucalyptus grandis*, Baesso et al. (2010); 25 = Brasil, *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*, Almeida et al. (2010); 26 = Brasil, *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*, presente estudo

Sands e Landsberg (2002) parametrizaram o modelo 3-PG para o *E. globulus* em nove sítios florestais intensamente manejados e fertilizados na região oeste australiana e na Tasmânia. Os autores ajustaram o modelo 3-PG usando dados de biomassa do lenho e índice de área foliar mensurados em campo e obtiveram uma boa descrição do crescimento das árvores na maioria dos sítios florestais estudados. Nestas condições, o modelo 3-PG estimou adequadamente o incremento médio anual (IMA) nos sítios de melhor qualidade. Por outro lado, o modelo superestimou o IMA nos piores sítios florestais e naqueles de baixa altitude.

Em ampla região de baixa precipitação da Austrália, Paul et al. (2007) calibraram o modelo 3-PG para duas importantes espécies de alto potencial de produção de madeira serrada: *Eucalyptus cladocalyx* e *E. maculata*. Os autores concluíram que mesmo usando apenas informações básicas no modelo, como precipitação, temperatura, radiação solar, geadas e relações alométricas das espécies, o modelo 3-PG estimou o DAP de ambas as espécies com 80% de eficiência.

Na Inglaterra, avaliando as limitações ambientais na produtividade de *Picea sitchensis* (Abeto) com o uso do 3-PG, Waring (2000) verificou que a radiação solar associada ao relevo representou quase a metade das diferenças observadas no crescimento das plantações, e a variabilidade das temperaturas no inverno reduziram o crescimento dos povoamentos entre 10 a 15%. Na Finlândia, Landsberg et al. (2005) avaliando o acúmulo e a produção de biomassa de povoamentos de *Pinus sylvestris* com 90 anos de idade, relataram que os resultados apresentados pelo 3-PG, como a área basal, o volume de madeira e o DAP foram muito próximos dos mensurados em campo. Em Portugal, Tomé et al. (2004) concluíram que o modelo 3-PG foi robusto o suficiente para extrapolações da produtividade do *E. globulus*. No mesmo país, o modelo apresentou resultados razoáveis na predição da biomassa aérea de *Pinus pinaster* (ALEXANDRE, 2009).

Dye et al. (2004) relataram que o modelo 3-PG simulou realisticamente a produtividade florestal e o uso da água em uma ampla gama de condições de idade e de potencial de crescimento. Os autores aplicaram o modelo para clones híbridos de *Eucalyptus grandis* x *E. camaldulensis* na África do Sul, na região da Zululândia, e obtiveram estimativas satisfatórias do incremento anual de matéria seca de lenho para

a maioria dos sítios florestais estudados. No norte da África do Sul, Louw e Scholes (2006) simularam o crescimento do *Pinus patula* e compararam com dados de campo e de outros modelos empíricos. Os autores constataram que os resultados do modelo 3-PG para IMA foram substancialmente tendenciosos, pois superestimaram e subestimaram os sítios de baixa e alta produtividade, respectivamente.

Zhao et al. (2009) utilizaram o modelo 3-PG para estudar a alocação e o estoque de carbono em plantios florestais de *Cunninghamia lanceolata* segundo as condições edafoclimáticas de uma região no sudeste da China. Uma vez parametrizado, o modelo apresentou bom desempenho na simulação do índice de área foliar, produtividade primária líquida e biomassa do lenho. Estes mesmos autores simularam dois cenários de mudanças climáticas: (i) aumentos futuros na temperatura devido ao aquecimento global (aproximadamente de 0-2°C) podem aumentar a produtividade da *Cunninghamia lanceolata* e reduzir o tempo necessário para completar a rotação, porém, (ii) aumentando ainda mais a temperatura (entre 2-6°C) a produtividade pode ser reduzida assim como prolongada a idade da rotação.

No estado da Carolina do Norte (EUA), Landsberg et al. (2001) avaliaram a eficiência do modelo 3-PG em diversas condições experimentais do *Pinus taeda*. Os autores mostraram que houve excelente correspondência entre os valores simulados e observados de biomassa de lenho e boa correspondência para o DAP e o índice de área foliar. Concluíram ainda que o modelo 3-PG pode simular com precisão o comportamento e as respostas do *Pinus taeda* aos fatores ambientais, e que tem elevado potencial de aplicabilidade como ferramenta de manejo florestal, para análise de cenários e como ferramenta de pesquisa.

Na costa oeste norte-americana, no estado de Washington, o modelo 3-PG demonstrou sensibilidade no estudo do balanço de carbono em povoamentos de 20 a 150 anos de *Pseudotsuga menziesii* (WARING; MCDOWELL, 2002). Numa região vizinha, na Ilha Vancouver (Canadá), o modelo 3-PG foi calibrado para conhecer e interpretar as limitações ambientais da produtividade do *Pseudotsuga menziesii* (COOPS et al., 2007). Os autores relataram que a modelagem complementa as tradicionais classificações ecológicas e oferece ainda o potencial de identificar os locais mais favoráveis para o manejo de outras espécies florestais nas atuais e futuras

condições climáticas. Mais ao sul, no estado do Oregon (EUA), Coops et al. (2005) usaram o modelo 3-PG para avaliar a distribuição e a produtividade passada e futura do *Pinus ponderosa* na região (entre os anos de 1900 a 2100), usando para isso uma base de sistema de informações geográficas, com resolução espacial de 0,5°. Os autores concluíram que o modelo 3-PG foi eficiente em predizer a variação anual do índice de área foliar.

No Chile, Flores e Allen (2004) utilizaram o modelo 3-PG para mapear a produtividade do *Pinus radiata*. Os autores relataram que o modelo foi sensível para explorar os efeitos do clima e da capacidade de armazenamento de água do solo na produtividade potencial de madeira dos povoamentos estudados, possibilitado desta forma, o desenvolvimento de manejo e de tratamentos silviculturais para melhorarem significativamente as limitações edafoclimáticas mapeadas.

No Brasil, o modelo 3-PG foi aplicado em diversas condições ambientais nos estados da Bahia, Espírito Santo, Minas Gerais e Mato Grosso.

Stape et al. (2004) utilizaram o modelo 3-PG para avaliar as respostas de um clone híbrido *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* quanto às mudanças de suprimento de água e da fertilidade do solo na região de Entre Rios, litoral norte da Bahia, no experimento BEPP, Brasil Eucalyptus Produtividade Potencial (www.ipef.br/bepp). Os autores relataram que o modelo respondeu bem quanto à variação das condições edafoclimáticas durante a calibração e foi particularmente sensível para estimar o índice de área foliar. Comparando os resultados do modelo 3-PG com outro modelo de base empírica, os autores verificaram boas estimativas de produção de madeira de ambos os modelos, porém o modelo 3-PG foi capaz de representar com sucesso as diferenças na produtividade em anos secos e úmidos. Os autores concluíram que a sensibilidade ao clima do modelo 3-PG pode ser muito útil para predizer a produção de madeira dos povoamentos de rotações curtas, onde um ou mais anos de climas atípicos podem influenciar fortemente a produtividade.

Na região de Aracruz, no litoral norte do Espírito Santo, o modelo 3-PG, parametrizado para cinco genótipos de *Eucalyptus grandis*, descreveu com precisão os padrões de crescimento em termos do incremento médio anual, volume total, área basal, DAP, índice de área foliar e água disponível no solo (ALMEIDA et al., 2004).

Assim, com o uso desta parametrização, estes pesquisadores indicaram o potencial do modelo para estimar a produtividade do *Eucalyptus grandis* nos 181.000 ha da região de estudo.

Tsukamoto Filho et al. (2004) utilizando o modelo 3-PG para estimar a produção de biomassa de eucalipto e avaliar a fixação de carbono num sistema agrossilvopastoril, na região de Paracatu, oeste de Minas Gerais, encontraram boa correlação entre o volume de madeira simulado e os valores medidos no experimento.

Silva (2006) parametrizou do modelo 3-PG para o *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*, na região de Santana do Paraíso, no centro-leste de Minas Gerais. Utilizando dados de um experimento fertirrigado, a biomassa de folhas, o índice de área foliar, a biomassa de lenho, o DAP e o IMA, nos três primeiros anos de simulação, foram estimadas com precisão pelo modelo 3-PG.

No ano seguinte, Guimarães et al. (2007) utilizaram a parametrização obtido por Silva (2006) para o *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* e realizaram o zoneamento do potencial produtivo no estado de Minas Gerais, a partir de estimativas do modelo 3-PG. Para isso, os autores utilizaram as normais climatológicas e o tipo de solo de cada município mineiro e simularam a produtividade com o modelo 3-PG para cada polígono. Após isso, realizaram uma interpolação dos dados municípios e produziram os mapas finais da produtividade, transformando a distribuição dos dados de discretos a contínuos. Desta forma, os autores deram uma aparência de modelagem espacialmente distribuída aos resultados de produtividade do 3-PG, quando de fato, utilizaram a chamada modelagem “*lumped-model*”, ou seja, um modelo de elementos aglomerados (de distribuição discreta) que simplifica e ignora a descrição do comportamento dos sistemas biofísicos espacialmente distribuídos (TUCCI, 1998). Por outro lado, foi interessante a proposta dos autores em produzir mapas de produtividade potencial do eucalipto considerando o uso de médio e alto nível tecnológico de silvicultura e manejo. Assim, os autores identificaram que a maioria dos municípios mineiros apresenta potencial produtivo superior aos limites mínimos estabelecidos como critério de recomendação de cultivo.

Ainda em Minas Gerais, na região de Curvelo e Itacambira, Borges (2009) parametrizou o modelo 3-PG para dois materiais genéticos híbridos clonais de

Eucalyptus grandis x *E. urophylla*. O autor obteve bons ajustes para a predição do DAP, área basal, volume de madeira e IMA, concluindo que o modelo 3-PG ajustado para o Cerrado de Minas Gerais foi eficiente em simular o crescimento de florestas de eucalipto na região. Borges (2009) também observou que as parametrizações do 3-PG realizadas por Sands e Landsberg (2002), Stape et al. (2004), Almeida et al. (2004) e Silva (2006), não se aplicaram à região de Cerrado de Minas Gerais. O autor concluiu que a parametrização e a calibração do modelo 3-PG em nível local promoveram melhorias no desempenho do modelo e resultaram em estimativas mais acuradas do crescimento de plantios de eucalipto, demonstrando também, a necessidade de cautela ao se utilizar parametrizações realizadas em condições diferentes daquelas de onde se deseja aplicá-las.

Baesso et al. (2010) avaliaram o impacto das mudanças climáticas na produtividade do *Eucalyptus grandis* numa ampla região entre o norte do Espírito Santo e o sul da Bahia, utilizando a parametrização de Almeida et al. (2004). Os resultados apontaram que as mudanças futuras (entre os anos 2071-2100) no clima provocaram decréscimos na produtividade do *E. grandis*, chegando a apresentar uma redução de até 40%, mostrando a vulnerabilidade dos sistemas florestais à variação climática. Os autores concluíram que o modelo de crescimento 3-PG associado aos dados de mudanças climáticas mostrou-se útil na projeção da produtividade futura de eucalipto. Tais projeções são importantes para que se possam mitigar os impactos no setor florestal causados pelas mudanças no clima.

Behling (2009) parametrizou o modelo 3-PG para plantios de *Tectona grandis* na região de Tangará da Serra, sudoeste de Mato Grosso. O autor relata que o modelo 3-PG proporcionou boas estimativas para biomassa de folhas, índice da área foliar, biomassa de fuste, DAP, volume de lenho e IMA, variáveis que refletem o crescimento da floresta. No entanto as prognoses obtidas foram limitadas ao período de 90 meses do ciclo da *Tectona grandis*, devendo o modelo ser aprimorado de modo a ser parametrizado e validado com dados que contemplem um ciclo completo (± 25 anos) de um mesmo sítio.

Almeida et al. (2004), em ampla área no norte do Espírito Santo, na região de Aracruz, usaram o modelo 3-PG para mapear as variações temporais e espaciais dos

efeitos edafoclimáticos em povoamentos de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*. Os resultados apontaram que as previsões do modelo foram melhores para o DAP e o volume de madeira, porém a simulação do IMA foi menos confiável. Os autores concluíram que o déficit de pressão de vapor e a água disponível no solo foram as principais responsáveis pela variação da produtividade. Este tipo de abordagem da modelagem espacial oferece uma alternativa para levantamentos da produtividade de extensas áreas, especialmente quando a variação climática se estende além da média histórica da região (ALMEIDA et al., 2010).

Os principais usos do modelo 3-PG foram resumidos por Almeida et al. (2004), que são: (i) análise da produção florestal, estudando a causa e efeito do crescimento das florestas; (ii) elaboração de cenários estratégicos, para planejamento a longo prazo do suprimento de madeira e (iii) estimativa da produtividade potencial, para a análise de áreas já plantadas e a tomada de decisão na compra de novas terras. No Brasil, o uso do modelo 3-PG pelas companhias florestais para a avaliação de compra de novas terras já é uma realidade, com exemplos nas novas fronteiras da silvicultura, nos estados da Bahia, Tocantins e Mato Grosso do Sul.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização geral da área de estudo

3.1.1 Localização

A área de estudo, denominada Distrito Florestal de Capão Bonito, é composta por plantios comerciais de eucaliptos da Fibria Celulose S.A. Abrange os municípios de Capão Bonito (84,84%, do efetivo plantio) e Buri (15,16%), localizando-se na região sul do estado de São Paulo (Figura 2). Coordenadas geográficas centrais indicam latitude $23^{\circ}55'44''\text{S}$ e longitude $48^{\circ}18'02''\text{W}$. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2005) a área pertence à mesorregião de Itapetininga e para o governo paulista insere-se na região administrativa de Sorocaba (INSTITUTO GEOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO - IGC, 2003). O local dista 220 km da capital paulista, pela rodovia SP270. De Piracicaba, a via de acesso se dá pela SP127 e a distância rodoviária é de 180 km.

Figura 2 – Localização regional do Distrito Florestal de Capão Bonito

3.1.2 Organização territorial

O Distrito Florestal de Capão Bonito é organizado e dividido em quatro regionais administrativas (Figura 3). São elas: Regional de Paranapitanga, Boa Esperança, Santa Inês e Santa Fé. Estas regionais subdividem-se em vinte e cinco projetos (fazendas) (Figura 4).

Figura 3 – Localização e organização das regionais, das Áreas de Preservação Permanente e da Reserva Legal do Distrito Florestal de Capão Bonito

Figura 4 – Localização e organização das regionais e dos projetos no Distrito Florestal de Capão Bonito

O local apresenta área total de 32.205 hectares. A área de efetivo plantio abrange 21.883 ha (67,95%) (Figura 5a). As Áreas de Preservação Permanente e Reserva Legal somam 9.437 ha, e isso representa 29,3% da área total ou 43,12% em relação ao efetivo plantio (Figura 5b). Os corpos d'água, representados pelas represas e rios cobrem 33 ha (0,1%) (Figura 6). As estradas, somando as primárias e secundárias e os aceiros, abrangem 852 ha (2,65%). A densidade média de estradas é de 52,9 m ha⁻¹, cujo valor é considerado baixo em relação à média nacional que é próxima de 90 m ha⁻¹ (MACHADO; MALINOVSKI, 1987) e próxima à densidade ideal, entre 20 a 50 m ha⁻¹, sugerida por Becker (1994).

Figura 5 – Vista panorâmica parcial do Distrito Florestal de Capão Bonito. Sede e entorno, Regional Santa Inês e Projetos Grupo, Campo de Pouso e Cemiterinho (a). Vista panorâmica do mosaico entre as florestas de eucaliptos e a vegetação natural (b). Projeto Tijuco. Acervo: Instituto Memória Votorantim (2006)

Figura 6 – Vista panorâmica da hidrografia e de uma represa e do mosaico da vegetação nos Projetos Grupo e Cruz de Ferro. Acervo: Instituto Memória Votorantim (2006)

3.1.3 Contexto Silvicultural Paulista

A evolução das áreas reflorestadas no estado de São Paulo foi registrada por trabalhos inicialmente publicados pelo Instituto Agrônomo de Campinas. A partir da década de 1970 o Instituto Florestal conduziu os inventários. O histórico mostra que os inventários são organizados em levantamentos por regiões administrativas paulistas, bacias hidrográficas e mais recentemente por “Pólos de Reflorestamento” (INSTITUTO FLORESTAL - IF, 2002). Esses pólos são delimitados por um perímetro circular representando as concentrações mais expressivas de reflorestamento.

Em um dos primeiros trabalhos publicados sobre o tema, Chiarini e Coelho (1969) registraram um total de 69.480 ha entre *Eucalyptus* e *Pinus* na região administrativa de Sorocaba. Em aproximadamente 25 anos, esse número saltou para 355.239 ha para a mesma região, com 66,3% de eucalipto (IF, 1993). No final da década de 1990, com a redução da área de *Pinus*, a área plantada demarcou 326.070 ha, com presença de 71,6% de eucalipto (IF, 2002).

Conforme aponta o inventário florestal (IF, 2002), a área do Distrito Florestal insere-se nos pólos florestais de Itapeva e de Itapetininga (Figura 7). Esses dois pólos abrangem aproximadamente 29% da área de reflorestamento do estado, sendo 16,2% no pólo florestal 1 (Itapeva/Capão Bonito/Buri) e 12,8% no pólo florestal 2 (Itapetininga/Pilar do Sul/Capão Bonito). No início da última década, o cenário florestal do município de Capão Bonito apresentava aproximadamente 27.340 ha de reflorestamento, sendo 81,7% de *Eucalyptus* (principalmente *E. saligna* Sm. e *E. grandis* Hill ex Maiden) e 18,3% de *Pinus* (principalmente *P. elliottii* Engelm, *P. taeda* L. e *P. oocarpa* Schiede ex Schltdl), com total de 16,9% da área do município (IF, 2002).

A história da silvicultura de Capão Bonito é pouco mencionada na literatura, tanto na científica quanto na jornalística. A prefeitura, a biblioteca municipal e os jornais da cidade não possuem registros importantes sobre a cultura florestal na região. O trabalho mais antigo da literatura florestal disponível que versa sobre a silvicultura em Capão Bonito, talvez, seja o de Krug (1964), onde fez observações sobre o crescimento de *P. elliottii*, estes implantados entre 1949 e 1957. O autor relata que a floresta mostrou altas taxas de incremento, atingindo aos 15 anos, o volume de 525 m³ ha⁻¹, e produtividade de 35 m³ ha⁻¹ ano⁻¹. Quase na mesma época, Heinsdijk e Campos (1967) apresentam um programa de manejo para as florestas de produção estadual em Capão Bonito, para a *Araucaria angustifolia* (Bert) O. Ktze, *Pinus*, *Eucalyptus* e outras espécies nativas. Manieri et al. (1974) estudaram as características da madeira de árvores de pinheiro-do-paraná, na Floresta Nacional de Capão Bonito. Os autores indicaram que o povoamento de araucária foi implantado em 1945.

Figura 7 – Distrito Florestal de Capão Bonito no contexto silvicultural paulista

O projeto de reflorestamento mais antigo, de Capão Bonito, que se tem registro está apresentado na Figura 8. Este mapa, intitulado de histórico dos reflorestamentos no Distrito Florestal de Capão Bonito, é uma adaptação aproximada de um antigo documento (mapa + tabela) elaborado pela Siderúrgica Barra Mansa (SBM), que descreve o progresso dos reflorestamentos, com data, fazenda e espécie, na região de Capão Bonito. O mais antigo reflorestamento, localizável, é o de novembro de 1944, com a implantação de araucária, no Projeto Tijuco, em parte no atual talhão 12B, e a outra maior parte incorporada como florestas nativas, no entorno deste talhão. Nas Figuras 11e, 11f e 11g, que mostram o viveiro florestal do Distrito Florestal de Capão Bonito, é possível observar ao fundo, um antigo talhão de araucária implantado neste período. A mais antiga implantação de eucaliptos está registrada no Projeto Mangueirinha, nas proximidades do atual talhão 18. Há ainda grandes glebas de reflorestamentos sem data de implantação nos registros (mapa e tabela da SBM), as quais foram implantadas na década de 1950. Estas áreas, de eucaliptos, estão localizadas principalmente nos projetos Mangueirinha, Deserto, Inglês e Valinhos, e de

Araucária, nos projetos Prainha e Tijuco. Como se pode observar na Figura 8, os reflorestamentos até década de 1960 foram instalados, preferencialmente, nos projetos no entorno da sede. Esta se localiza no projeto Grupo, divisa com o projeto Campo de Pouso, no centro do Distrito Florestal. O Instituto Memória Votorantim (2006) relata que o Antonio Ermírio de Moraes, entre o final da década de 1940 e meados de 1950, iniciou uma plantação de 80 milhões de árvores na região de Capão Bonito, o que se confere nas suas próprias palavras: “...quando, em 1949, eu ia aos sábados com o meu pai plantar pinheiros e eucaliptos em Capão Bonito...” (VOTORANTIM, 2003).

Figura 8 – Mapeamento do histórico dos reflorestamentos no Distrito Florestal de Capão Bonito, organizados para cada projeto, a data (mês e ano) e as espécies implantadas

Pode-se dividir a história da silvicultura de Capão Bonito em três períodos distintos. O primeiro compreende as décadas de 1920 até o final de 1940, onde a região de Capão Bonito produzia principalmente madeira de araucária que era matéria-prima para a produção de palitos de fósforo, em São Paulo, pela empresa S.A. Comercial de Fósforos. Pode-se definir essa fase como o período pré incentivos fiscais (Lei nº 5.106

de 02/09/66). O segundo período ocorre em meados de 1950 e vai até final dos anos 1980. É nessa época que se iniciaram os grandes reflorestamentos de eucaliptos em Capão Bonito, para a produção de carvão vegetal, com a empresa Comercial Agrícola Santa Helena. A partir de maio de 1971 a Siderúrgica Barra Mansa assume, daquela empresa, os plantios de eucaliptos e intensifica o processo de produção de carvão vegetal. Esse período ocorre durante os incentivos fiscais para o reflorestamento. Essa situação pode ser verificada na Figura 8, na expansão da área plantada a partir de 1970. A principal espécie plantada no segundo período foi o *E. saligna*. O atual e terceiro período começa em 1998 quando a Votorantim Celulose e Papel (criada em 1988, e a partir de 2009, Fibria Celulose S.A.) inicia suas atividades em Capão Bonito, esta que é o seu berço. Assim, o foco passa a ser a produção de madeira para celulose e papel (Figura 9). Esta é considerada a fase do pós incentivos fiscais (Lei nº 7.714 de 29/12/88). Neste período iniciam-se os plantios clonais (final da década de 90), respondendo praticamente pela totalidade dos plantios mais recentes. As espécies híbridas *E. grandis* x *E. urophylla* são as mais plantadas (Figura 10). Os plantios comerciais com essas espécies têm objetivo de suprir de madeira as fábricas de celulose, além de estimular o uso da madeira de eucaliptos para outras atividades agrícolas e a indústria de madeira serrada. A produção de madeira sólida para atender as serrarias da cidade e região sempre esteve presente em todos os períodos da silvicultura.

Figura 9 – Quantidade de madeira produzida (m^3) em Capão Bonito para diversos usos e a proporção (%) produzida em relação ao estado de São Paulo durante os anos de 1990 a 2009 (www.sidra.ibge.gov.br)

Figura 10 – Vista de um típico plantio clonal de híbridos de *E. grandis* x *E. urophylla* do Distrito Florestal de Capão Bonito (a). Vista panorâmica de florestas de eucaliptos, clone C219H na diagonal inferior e C041H na diagonal superior da fotografia (b). Projeto São Roque. Acervo: Instituto Memória Votorantim (2006)

O período recente do processo evolutivo da silvicultura na região de Capão Bonito pode ser acompanhado nas Figuras 11 a 14. Têm-se registros fotográficos a partir apenas do segundo período da silvicultura na região, quando o foco já era a produção de carvão vegetal. Podem-se observar grandes mudanças ao longo dos anos como, o melhoramento genético, o sistema de produção de mudas (Figura 11), o manejo dos resíduos florestais (Figuras 12c, 12e e 12f), a adubação (Figura 12d), as

técnicas de implantação florestal (Figuras 12a, 12b, 12d, 12g e 12h), o manejo (manutenção, Figuras 13a, 13b, 13c, 13d, 13e e 13f), e a mecanização da silvicultura (Figuras 12b e 12d) e da colheita (Figuras 13g, 13h, 14a, 14b, 14c, 14d, 14e e 14f). Desta forma, faz-se menção de destaque da importância de Capão Bonito como antigo pólo florestal do país, pelo pioneirismo conquistado em várias técnicas de cultivo mínimo, servindo de referência para a silvicultura brasileira. Os métodos das atividades divergem entre períodos, pois seguem o processo evolutivo da ciência florestal (nível científico/tecnológico), próprio da concepção vigente, e também pelos custos operacionais segundo o uso final da matéria prima (Figuras 14g e 14h).

Figura 11 – Sistema de moega para enchimento de saquinhos com terra de subsolo. (1986*) (a). Mesas individuais para o estaqueamento (mini-estacas) do eucalipto (2006**) (b). Casa de vegetação coberta com telha ondulada incolor. Sistema de produção de mudas em saquinhos (1986*) (c). Casa de vegetação na fase de enraizamento (período de 25 dias) com sistema de irrigação por nebulização (2006**) (d). Preparo do terreno para a construção do viveiro florestal de Capão Bonito (1994*) (e). Início da construção (alvenaria) do viveiro florestal de Capão Bonito (1995*) (f). Atual viveiro florestal de Capão Bonito (2006**) (g). Estágios de crescimento (aos 25, 30 e 60 dias) de mudas do material genético C219H (2006**) (h). Acervo: * Almeida, A.R.; ** Alvares, C.A.

Figura 12 – Cultivo intensivo do solo. Destoca do eucalipto após a queima dos resíduos da colheita (1985*) (a). Cultivo mínimo, com mínima interferência no solo, usando o coveador mecânico duplo “harvester” (2007**) (b). Baldeio dos tocos e raízes grossas para aproveitamento na fabricação de carvão (1986*) (c). Cultivo mínimo do solo com subsolador “intersoil” + adubação de base (2007**) (d). Área que sofreu queimada dos resíduos para posterior reforma florestal (1981*) (e). Trator auto-carregável re-distribuindo os resíduos florestais (galhos, cascas e folhas) oriundo da operação do picador móvel (2005**) (f). Projeto Valinhos. Observar no primeiro plano a intensidade da matocompetição (1985*) (g). Projeto Valinhos. Observar na baixada as linhas de eucalipto incorporadas à APP (2006**) (h). Acervo: * Almeida, A.R.; ** Alvares, C.A.

Figura 13 – Paisagem típica de talhões sob manejo de rebrota (carvão) e a condução dos brasões (serraria) (1985*) (a). Sítio florestal de alta produtividade (DAP 30 cm - 7 anos). Projeto Tijuco (2007**) (b). Floresta de origem seminal. Desbaste seletivo por baixo (2000*) (c). Povoamento de origem clonal, sob manejo de alto fuste (2006**) (d). Sítio florestal de baixa produtividade sob sistema talhadia em plantio adensado (1985*) (e). Desbaste sistemático em povoamento de média/alta produtividade (Objetivo: atender serrarias de Capão Bonito) (2006**) (f). Fotografia aérea panorâmica mostrando os talhões em rebrota com os brasões em pleno crescimento (1990***) (g). Área com 60 dias pós colheita (Feller-buncher), com as árvores no chão, orientadas para a praça de estacionamento do picador móvel (fundo da paisagem) (2005**) (h). Acervo: * Almeida, A.R.; ** Alvares, C.A.; *** Fibria

Figura 14 – Sistema semimecanizado de colheita (1+1; 1 operador de motosserra +1 ajudante) (1981*) (a). Sistema mecanizado de colheita com Harvester, Projeto Deserto (2007**) (b). Extração de lenha utilizando tração animal (1985*) (c). Arraste de madeira (árvores inteiras) dentro do talhão com Clambunk-Skidder para a praça de cavaqueamento (2005**) (d). Transporte de madeira dos carregadores para os fornos (1986*) (e). Extração de toras curtas, com Forwarder, para a margem dos carregadores (2005**) (f). Bateria de fornos de superfície (Siderúrgica Barra Mansa). Projeto Valinhos (1985*) (g). Praça onde é realizado o cavaqueamento branco (apenas madeira). Clambunk (grua à esquerda) arrastando as árvores ao alcance do picador móvel (grua à direita), no centro, e este lançando os cavacos no semi-reboque furgão cavaqueiro (2005**) (h). Acervo: * Almeida, A.R.; ** Alvares, C.A.

3.1.4 Geologia

A região do Distrito Florestal de Capão Bonito repousa-se sobre o recortado das duas principais feições tectônicas do Estado de São Paulo, a Bacia Sedimentar do Paraná e o Embasamento Cristalino, abrangendo as eras Mesoproterozóica (Período Camiliano – 1.500 m.a.) e Fanerozóica (Período Carbonífero Superior ao Permiano Médio – 300 m.a.).

Aproximadamente 98,5% da área de estudo (Figura 15) localizam-se sobre a entidade tectônica Bacia Sedimentar do Paraná, aqui representada pelo Grupo Itararé (LOPES et al., 2004) ou Formação Itararé (IPT, 1981a). Esta formação é a principal responsável na gênese dos solos que recobrem as regionais Paranapitanga, Boa Esperança, Santa Inês e Santa Fé (Figura 3).

Segundo Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT (1981a) em São Paulo esta formação apresenta-se como uma complexa associação de variadas litofacies, quase todas detríticas, que se sucedem vertical e horizontalmente, de maneira mais ou menos rápida. As litologias predominantes são arenitos (Figura 16) de granulação heterogênea, conglomerados, siltitos, argilitos (Figura 17), folhelhos, calcários e raras camadas de carvão. Esse comportamento variegado e casual das rochas sedimentares da fase Itararé revela-se como de importância fundamental na ocorrência dos diversos tipos de solos na área de estudo, destacando-se principalmente pela composição granulométrica das rochas e a textura dos solos atuais.

O restante da área (1,5%) encontra-se no Embasamento Cristalino, representada pela Formação Furnas (PERROTTA et al., 2004) ou Grupo Canastra (IPT, 1981a) abrangendo 0,9% no extremo sul da área, apresentando rochas metamórficas como filitos, metarenitos, metaconglomerados e metassiltitos e o Grupo Votuverava (PERROTTA et al., 2004) ou Grupo Açungui – Complexo Pilar (IPT, 1981a) compreendendo 0,3% da área, de litologia como filitos, xistos, quartzitos e metassiltitos. Essas rochas no extremo sul da área dão origem a solos pedologicamente pouco desenvolvidos.

Há ainda registros de ocorrência de sedimentos fluviais do período Pleistoceno (Figura 18 e 30), com ocorrência na margem esquerda do Rio Paranapanema (RIZZO,

2001) e também próximo ao Rio das Almas (SETZER, 1949), influenciando na pedogênese dos solos locais, principalmente os Latossolos, conforme apontado por Rizzo (2001).

Figura 15 – Mapa Geológico do Distrito Florestal de Capão Bonito. Adaptado de Lopes et al. (2004) e Perrota et al. (2004)

Figura 16 – Perfil em corte de estrada florestal da unidade PVAd1. Projeto Torre Regional Santa Inês (Fotografia RIZZO, 2001)

Figura 17 – Barranco na rodovia SP127 próximo ao entroncamento de acesso a Buri. Observe a espessura da camada de rocha alterada da formação Itararé, e o recobrimento com um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico textura muito argilosa (Fotografia RIZZO, 2001)

Figura 18 – Camada de seixos pleistocênicos no quilômetro 10,5 de Capão Bonito para o Distrito de Gramadinho. Local próximo ao rio das Almas. (Fotografia Prof. Paul Vageler, abril de 1937, in SETZER, 1949)

A extração de recursos minerais na região é também abundante, a argila, a água mineral, a areia, o cascalho e o calcário destacam-se como principais recursos minerais explorados no entorno do distrito florestal. Ao sul da área explora-se ainda minério de ferro, filito, argilito, folhelho, siltito, quartzito e granito (IPT, 1981b; DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL - DNPM, 2007), dentre este se destaca o Granito Capão Bonito (*Rubi Red Granite*) (SOUZA JÚNIOR; PORSANI, 2002).

3.1.5 Geomorfologia

Segundo o Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo (ROSS; MOROZ, 1997) a área está localizada em duas Unidades Morfoestruturais, sendo a porção centro-norte na Bacia Sedimentar do Paraná (B.S.P.) e a parte sul no Cinturão Orogênico do Atlântico (C.O.A.) (Figura 19).

Aproximadamente 97% da área situam-se na Unidade Morfoescultural da Depressão Paranapanema (B.S.P.), com as formas de relevo Dt23 e Dt22 (Dtij; D = relevo de Denudação; t = topos Tabulares; i = 2 = Fraco grau de entalhamento dos vales, de 20 a 40 m; j = 2 e 3 = dimensão interfluvial grande (1.750 a 3.750 m) e média (750 a 1.750 m). O relevo Dt22 apresenta baixo potencial erosivo, devido às formas com dissecação baixa, vales poucos entalhados e densidade de drenagem baixa, com planícies aluviais restritas e presença eventual de lagoas perenes ou intermitentes (IPT, 1981c), enquanto que o relevo Dt23 apresenta áreas sujeitas a fortes atividades erosivas, pois apresenta formas de dissecação média a alta, com vales entalhados e densidade de drenagem média a alta (ROSS; MOROZ, 1997).

O sul da área (3%) situa-se na Unidade Morfoescultural do Planalto Guapiara (C.O.A.) (Figura 19), com formas de relevo Dc24 (Dtij; D = relevo de Denudação; t = topos Aguçados; i = 2 = Fraco grau de entalhamento dos vales, de 20 a 40 m; j = 4 = dimensão interfluvial pequena (250 a 750 m). O relevo Dc24 apresenta áreas sujeitas a processos erosivos agressivos, devido às formas muito dissecadas baixa, com vales entalhados associados a vales pouco entalhados, com alta densidade de drenagem (ROSS; MOROZ, 1997), padrão treliça a localmente subdendrítica, com planícies aluvionares interiores restritas (IPT, 1981c).

Figura 19 – Mapa Geomorfológico do Distrito Florestal de Capão Bonito. Adaptado de Ross e Moroz (1997)

3.1.6 Clima

De acordo com o método do sistema internacional de classificação climática de Koppen-Geiger (KOPPEN, 1936), Setzer (1946) elaborou um mapa de divisão climática do estado de São Paulo. Segundo este autor, a área de estudo foi classificada como o tipo climático Cfa (C = clima úmido de temperatura branda; f = *feucht* (úmido, em alemão); a = verão quente). Este tipo representa um clima quente úmido sem estiagem, sendo a temperatura média do mês menos quente é inferior a 18° C, ao passo que a do mês mais quente ultrapassa 22°C. A altura pluviométrica do mês mais seco passa os 30 mm. Essa zona climática representa 15% do estado de São Paulo. Alvares et al.¹ (em fase de elaboração) realizaram um mapeamento detalhado da classificação climática de Koppen para o Brasil, na escala de 1 ha, e neste caso encontraram o tipo climático Cfb

¹ ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; GONÇALVES, J.L.M. Detalhamento da classificação climática de Köppen para o Brasil.

em altitudes mais elevadas do Distrito Florestal de Capão Bonito, isto é, com verão temperado e média do mês mais quente abaixo dos 22°C.

Outros dois estudos que abrangeram o estado de São Paulo, (SETZER, 1966) e (NIMER, 1979), apontam para uma diferenciação climática entre a parte norte (Paranapitanga, Boa Esperança e Santa Inês) e sul (Santa Fé) do Distrito Florestal de Capão Bonito.

Setzer (1966) elaborou um mapa paulista dividido em seis regiões ecológicas, sendo que a parte norte da área de estudo foi classificada como DPf (DP = Depressão Paleozóica; f = mais fria), onde descreveu que é a região dos menores totais de chuva da estação chuvosa e anuais, apresentando estação seca branda, sem deficiência de água. A parte sul está na região CCf (Complexo Cristalino; f = mais fria), sendo o verão menos quente e mais úmido do Estado. O inverno também é o mais frio, porém não o mais úmido.

Nimer (1979) publicou um mapa da região sudeste subdividido em regiões climáticas. Neste mapa é possível observar que a parte norte da área de estudo apresenta clima classificado como subquente, superúmido e com subseca e a parte sul como mesotérmico brando, superúmido e com subseca. A diferença principal destas duas regiões é a temperatura do mês mais frio, que na região parte sul apresenta pelo menos um mês com temperatura média inferior a 15°C. Nimer (1979) também ressalta que nesta última região o fenômeno da geada é muito comum, corroborando o mapa de número de dias com geada do estado de São Paulo (SETZER, 1966).

As Figuras 20, 21 e 22 apresentam o balanço hídrico climatológico para os municípios de Itapetininga, Capão Bonito e Apiaí, respectivamente. Os dados normais de temperatura média e de precipitação total mensal foram extraídos do banco de dados climáticos do Brasil (EMBRAPA, 2007). O cálculo do balanço hídrico seguiu método de Thornthwaite e Mather (1955) através do programa BHnorm (ESALQ, 2005) elaborado em planilha eletrônica por Rolim et al. (1998).

Figura 20 – Balanço hídrico climatológico de Itapetininga (Latitude 23°54'36"S, Longitude 48°01'48"W, Altitude 636 m e Temperatura média anual de 20,4 °C)

Figura 21 – Balanço hídrico climatológico de Capão Bonito (Latitude 24°01'48"S, Longitude 48°22'12"W, Altitude 702 m e Temperatura média anual de 20,1 °C)

Figura 22 – Balanço hídrico climatológico de Apiaí (Latitude 24°25'48"S, Longitude 48°40'48"W, Altitude 830 m e Temperatura média anual de 18,9 °C)

Observam-se na sequência das Figuras 20, 21 e 22 as características climáticas no segmento latitudinal ($23^{\circ}54'36''\text{S}$ a $24^{\circ}25'48''\text{S}$) compreendido pelo extremo Itapetininga e Apiaí (norte-sul). O abrandamento do déficit hídrico e da evapotranspiração potencial e o acréscimo da precipitação no sentido norte-sul, vêm confirmar a regionalização obtida por Setzer (1946, 1966) e Nimer (1979). Os gráficos do balanço hídrico climatológico indicam excedente hídrico praticamente ao longo de todo o ano, contudo deve-se atentar quanto às variações na capacidade de água no solo, resultado principalmente da textura, estrutura e espessura do solum, além do fluxo lateral subsuperficial.

Outro importante trabalho e de referência silvicultural, é o mapa de regiões bioclimáticas para reflorestamento publicado por Golfari (1978). Neste mapa a área de estudo localiza-se na região quatro, isto é, submontano, úmido, chuvas uniformes, com presença de florestas e campos. Com base nas características climáticas, nesta região, por exemplo, o autor indicou espécies como o *Eucalyptus dunni*, *E. grandis*, *E. saligna* e *E. pilularis* e, *Pinus elliottii* e *P. taeda*.

3.1.7 Hidrografia

A área de estudo está localizada na cabeceira da bacia hidrográfica do Rio Paranapanema, distando apenas 30 km da nascente do rio homônimo (Figura 23). De acordo com o Plano Estadual de Recursos Hídricos (Lei nº 7.663 de 1991 e Lei nº 9.034 de 1994) a área foi definida como integrante da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Alto Paranapanema (UGRHI 18). Os rios Paranapanema, das Almas e Paranapitanga, apresentam já nesta região a classificação (STRAHLER, 1957) de 5ª a 6ª ordem. Outros canais de drenagem que correm no Distrito Florestal são os ribeirões do Lajeado do Pinheiro Seco, do Lajeado de Santa Isabel, do Lajeado da Pedra Chata, do Tijuco Preto, do Poço, Santa Fé, da Uva, e os córregos Perdiz, do Crescêncio, Boçoroca, da Formiga, da Serrinha, do Horto, duas Irmãs, da Lavrinha, dos Veados, do Capão Alto e da Lagoa. Dentro do perímetro do Distrito Florestal de Capão Bonito os canais de drenagem somam, aproximadamente, 580 km de comprimento.

Figura 23 – Mapa hidrográfico do Distrito Florestal de Capão Bonito

3.1.8 Vegetação e Fauna Regional

Conforme o inventário da vegetação natural do estado de São Paulo (IF, 2005), a área de estudo situa-se numa região de transição de florestas. No norte da área há presença de Floresta Estacional Semidecidual. O sul e o oeste da área são cobertos pela Floresta Ombrófila Mista (florestas de araucárias) e no extremo sul da área existe a Floresta Ombrófila Densa (Figura 24).

A Floresta Estacional Semidecidual se caracteriza pela dupla estacionalidade climática, sendo uma tropical com período de intensas chuvas de verão, seguida por estiagens acentuadas; outra subtropical sem período seco, e com seca fisiológica provocada pelo inverno, com temperaturas médias inferiores a 15 °C. As Florestas Ombrófilas Densa e Mista são formações características de regiões tropicais com temperaturas elevadas (média 25 °C) e com alta precipitação pluviométrica bem distribuída durante o ano, sem período biologicamente seco (IF, 2005). Este comportamento da distribuição da vegetação na paisagem ocorre em termos regionais

pelas diferenças climáticas (Figuras 20, 21 e 22) entre as regiões norte e sul da área (SETZER, 1966) e, em termos locais, pela diversidade de solos (RODRIGUES, 1999).

Figura 24 – Mapa de Vegetação Natural remanescente do Distrito Florestal de Capão Bonito. Adaptado de IF (2005). Legenda simplificada da vegetação

O inventário florestal (IF, 2005) registrou dentro da UGRHI 14 (Alto Paranapanema) uma área de 297.910 ha de vegetação em estágio primário e secundário. Deste total, 49.579 ha encontram-se dentro do perímetro do município de Capão Bonito, ou seja, 30,6% de sua superfície, fazendo de Capão Bonito o município com maior área de vegetação remanescente da UGRHI 14. Dentro do perímetro do Distrito Florestal de Capão Bonito há 29,3% (9.437 ha) de áreas de preservação permanente e reserva legal.

Além da iniciativa privada atuando na proteção da vegetação nativa, há também Unidades de Conservação de jurisdição federal como a Floresta Nacional de Capão Bonito (1,4% de Capão Bonito) e a Área de Proteção Ambiental da Serra do Mar (13,4% de Capão Bonito), e de jurisdição estadual como o Parque Estadual de Carlos Botelho

(4,1% de Capão Bonito), P.E. Intervalles, Estação Experimental de Buri e E.E. de Itapetininga.

A Tabela 1 apresenta uma análise qualitativa dos fragmentos do Distrito Florestal de Capão Bonito em relação aos totais encontrados no estado. O município apresenta a maior quantidade de fragmentos importantes, isto é, acima de 100 hectares na UGRHI 14. Dos fragmentos maiores que 200 ha dentro de Capão Bonito, 50% encontram-se protegidos no Distrito Florestal. Nota-se que na última linha da Tabela 1 a quantidade de fragmentos é maior, pois se trata de dados levantados com maior nível de detalhe, efetuado pela equipe da Fibria.

Tabela 1 – Número de fragmentos por classe de superfície (ha) e porcentagem em relação aos valores estaduais

	<10	%	10-20	%	20-50	%	50-100	%	100-200	%	>200	%	Total
SP ¹	77.023	-	17.237	-	12.670	-	4.550	-	2.216	-	1.701	-	115.397
ALPA ²	9.095	11,8	1.873	10,9	1.446	11,4	507	11,1	245	11,1	160	11,6	13.326
CB ³	433	0,6	148	0,86	110	0,87	45	0,99	25	1,13	18	0,68	779
DF-IF ⁴	29	0,04	12	0,07	19	0,15	11	0,24	10	0,45	9	0,08	90
DF-Fibria ⁵	412	0,53	34	0,20	36	0,28	23	0,51	12	0,54	8	0,45	525

¹ Estado de São Paulo; ² UGRHI Alto Paranapanema; ³ Município de Capão Bonito; ⁴ Distrito Florestal de Capão Bonito - Dados derivados de IF (2005); ⁵ Distrito Florestal de Capão Bonito - Dados Fibria

Quanto à fauna, Scholoemp e Couto (1998) realizando inventário no Distrito Florestal de Capão Bonito, na época propriedade da Siderúrgica Barra Mansa, levantaram 48 espécies de mamíferos não-voadores, distribuídos em 17 famílias, sendo que 6 espécies se encontram ameaçadas de extinção, dentre elas está o lobo-guará e a onça-parda. Entre as 255 espécies de aves encontradas, distribuídas em 48 famílias, 6 espécies também são ameaçadas, entre elas estão o pavó e o gavião-pato.

3.1.9 Pedologia

3.1.9.1 Histórico dos levantamentos pedológicos

A evolução dos mapeamentos pedológicos e sua devida interpretação permitem uma perfeita identificação das unidades de manejo florestal (GONÇALVES, 1988). Para as empresas agrícolas o ideal é contar com o levantamento pedológico no mínimo

semidetalhado, com informações necessárias para avaliar o potencial e as limitações do uso e manejo agrônômico (FRANÇA, 1983).

Na área de estudo o progresso dos mapeamentos de solos, partindo-se do nível de reconhecimento até o nível semidetalhado ocorreu em, aproximadamente, quatro décadas. O primeiro mapa publicado, o qual representa o primeiro levantamento realmente pedológico efetuado (OLIVEIRA, 1999), foi a carta de solos do estado de São Paulo (BRASIL, 1960), que registrou na região de Capão Bonito duas unidades de solo, o PVIs (Podzólico Vermelho Amarelo Variação Laras) e o LE (Latosol Vermelho Escuro-Orto).

Algumas décadas depois, com o início das primeiras coberturas aerofotogramétricas do estado (ver detalhes nas Figuras 27, 29, 31, 33, 35, 37, 39, 41, 42, 43, 45 e 46), avanços nos estudos dos solos tropicais, trabalhos de institutos de pesquisas e o projeto RADAMBRASIL (DNPM, 1982), Oliveira et al. (1999) compilaram e publicaram o mapa pedológico do estado de São Paulo. Na região do Distrito Florestal de Capão Bonito foram registradas quatro unidades de solo, sendo o Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico A moderado text. arenosa/média e média/argilosa rel. ondulado e forte ondulado, Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico text. arenosa/media e media/argilosa rel. ondulado + Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico abruptico text. arenosa/argilosa e arenosa/media rel. ondulado e forte ondulado ambos A moderado, Latossolo Vermelho Distrófico text. argilosa rel. suave ondulado + Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico abruptico ou nao text. media/argilosa e arenosa/media rel. ondulado ambos A moderado e Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico text. argilosa rel. ondulado + Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico text. media/argilosa rel. ondulado e forte ondulado ambos A moderado.

Trabalhos nesse nível de detalhe servem apenas para grandes regiões, pois para uso prático local, um mapa mais detalhado é necessário, baseado em unidades menores de solo e desenhado numa escala muito maior, sendo que “estes mapas de solo devem ser parte do plano de manejo de um distrito florestal” (VAN GOOR, 1965).

Em meados da década de 1990 iniciaram-se no Distrito Florestal de Capão Bonito os primeiros trabalhos de levantamento pedológico de nível semidetalhado por Gonçalves (1997), abrangendo aproximadamente 5.000 hectares. Com o início dos

trabalhos da Fibria Celulose S. A. em Capão Bonito e sua intensificação na modernização no nível do manejo na área, culminou com a conclusão do mapeamento pedológico em nível semidetalhado por Rizzo (2001). Com o início do presente projeto, o mapa pedológico foi totalmente revisado entre os anos de 2006 e 2008. A revisão seguiu a coordenação dos pedólogos Luiz Toledo B. Rizzo e Rafael David dos Santos.

O mapa pedológico semidetalhado apresenta 12 tipos de solos (Figura 25). Os Latossolos Vermelhos representam 82,5% da área mapeada, os Latossolos Vermelho-Amarelos cobrem 5,3%, os Argissolos Vermelho representam 0,4%, os Argissolos Vermelho-Amarelos somam 1,4% e os Cambissolos Háplicos os 10,4% restantes (Tabela 2).

Figura 25 – Mapa Pedológico Semidetalhado do Distrito Florestal de Capão Bonito. Modificado de Rizzo (2001)

Os Latossolos são constituídos por material mineral, apresentando horizonte B latossólico (Bw, w = *weak*, cor ou estrutura fraca), imediatamente abaixo de qualquer tipo de horizonte A, dentro de 200 cm da superfície do solo ou dentro de 300 cm, caso o

horizonte A apresente mais que 150 cm de espessura. São solos desprovidos de minerais primários, baixa CTC, fortemente ácidos e variam de fortemente a bem drenados (EMBRAPA, 2006).

Os Argissolos compreendem solos constituídos por material mineral, que têm como características diferenciais argila de atividade baixa e horizonte B textural (Bt), imediatamente abaixo de qualquer tipo de horizonte superficial, exceto o hístico. Parte dos solos desta classe apresenta um evidente incremento no teor de argila, com ou sem decréscimo, do horizonte B para baixo no perfil. A transição entre os horizontes A e Bt é usualmente clara, abrupta ou gradual. São de profundidade variável, desde forte a imperfeitamente drenados, de cores avermelhadas ou amareladas, e mais raramente, brunadas ou acinzentadas. A textura varia de arenosa a argilosa no horizonte A e de média a muito argilosa no horizonte Bt, sempre havendo aumento de argila daquele para este (EMBRAPA, 2006).

Os Cambissolos são constituídos por material mineral, que apresentam horizonte A ou hístico com espessura menor que 40 cm seguido de horizonte Bi (incipiente), C (saprolito) com ou sem o R (rocha). Devido à heterogeneidade do material de origem, das formas de relevo e das condições climáticas, as características destes solos variam muito de um local para outro, variando assim desde solos fortemente até imperfeitamente drenados, de rasos a profundos, de cor bruna ou bruno-amarelada até vermelho escuro, e de alta a baixa saturação por bases e atividade química da fração coloidal (EMBRAPA, 2006).

Tabela 2 – Unidades pedológicas taxonômicas ocorrentes no Distrito Florestal de Capão Bonito e sua representatividade

Símbolo	Solo	Representatividade
		%
LVd1	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico, A moderado, textura muito argilosa, relevo plano a suavemente ondulado	27,1
LVd2	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico, A moderado, textura argilosa, relevo plano a suavemente ondulado	47,2
LVd3	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico, A moderado, textura média, relevo plano a suavemente ondulado	8,2
LVAAd1	LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico, A moderado, textura argilosa, relevo suavemente ondulado a ondulado	0,1
LVAAd2	LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico, A moderado, textura média, relevo suavemente ondulado a ondulado	1,8
LVAAd3	LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico psamítico, A moderado, textura média, relevo suavemente ondulado a ondulado	3,4
PVAd1	ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, A moderado, textura arenosa/média, relevo ondulado a fortemente ondulado	0,4
PVAd2	ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, A moderado, textura média/argilosa, relevo ondulado a fortemente ondulado	1,0
PVd1	ARGISSOLO VERMELHO Distrófico, A moderado, textura média / argilosa, relevo ondulado a fortemente ondulado	0,2
PVd3	ARGISSOLO VERMELHO Distrófico, A moderado, textura arenosa / média, relevo suave ondulado	0,2
CXbd1	CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico, latossólico, A moderado, textura argilosa, relevo ondulado a fortemente ondulado	3,0
CXbd2	CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico, latossólico, A moderado, textura média, relevo ondulado a fortemente ondulado	7,4

3.1.9.2 LVd1

A subdivisão desta classe (LV) de solos considerou os atributos cor e textura do horizonte Bw para a diferenciação das unidades taxonômicas. Os Latossolos Vermelhos são solos com matiz 2,5 YR ou mais vermelho na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (inclusive BA) (EMBRAPA, 2001).

O LVd1 (Figura 26) distribui-se em relevo plano das colinas e espigões nas cotas mais elevadas da área, concentrando-se nos projetos São Roque, Grupo, Suinã, Tijuco e Grupo. Estende-se ainda na maior parte da área da Regional Santa Fé, com exceção do projeto Lavrinhas, devido sua formação geológica (Figura 15).

Prof. cm	Perfil – LVd1	Horizonte	Argila g kg ⁻¹	CTC _{pH7} mmol _c kg ⁻¹
0-11		Ap1	530	138,1
11-41		Ap2	530	58,5
41-83		Bw1	550	43,5
83-115		Bw2	570	37,5
115-170		Bw3	590	17,4

Figura 26 – Fotografia de uma típica unidade LVd1 com a divisão dos horizontes em profundidades e alguns atributos analíticos. (Fotografia RIZZO, 2001)

Na Figura 27a nota-se o relevo plano dos espigões e a cor vermelha do solo tanto na estrada quanto ao fundo da paisagem, na operação de destoca do eucalipto. Observa-se na Figura 27b que os amplos interflúvios, as curvas de nível amplamente espaçadas e de silhuetas suaves e ainda a textura da fotografia aérea com o padrão aveludado e contínuo do povoamento de eucalipto indicam, nesta região, cobertura pedológica com Latossolo.

Essa unidade de solo caracteriza-se principalmente pela cor vermelha e elevado teor de argila em todo perfil, com média de 606 g kg⁻¹ no horizonte A e de 659 g kg⁻¹ no horizonte Bw, consistência molhada muito plástica e muito pegajosa, sub-horizontes Bw de transição difusa, microagregados fortemente desenvolvidos, com pH 4 na média dos horizontes e um solo pobre em nutrientes. Por estar em relevo plano, e esta ser uma superfície geomorfologicamente muito estável, este tipo de solo apresenta-se muito evoluído do ponto de vista morfológico, mineralógico e químico.

Figura 27 – Paisagem típica onde ocorre a unidade LVd1 no Projeto Tijuco, Regional Santa Inês, próximo ao cruzamento das linhas de transmissão de energia elétrica. (Fotografia RIZZO, 2001) (a). Padrão de relevo na fotografia aérea (Projeto Vão Citrus, julho 2000, BASE – Aerofotogrametria e Projetos S/A, escala original 1:30.000) onde ocorre, predominantemente, a unidade taxonômica LVd1. Projeto Grupo, Regional Santa Inês (b)

3.1.9.3 LVd2

Esta unidade de solo difere sutilmente do LVd1. No campo distingui-se apenas pela consistência molhada ser apenas plástica e pegajosa. Assim, é a análise granulométrica que determina com segurança o enquadramento da unidade taxonômica LVd2 (Figura 28).

A diferença do teor de argila desta unidade ocorre devido a composição lateral do pacote de sedimentos da Formação Itararé (RIZZO, 2001). Esta unidade distribui-se

principalmente nos projetos Inglês, Valinhos, Campo de Pouso, Paranapanema, Deserto, Prainha e São Roque (Figura 29).

A unidade LVd2 apresenta teor médio de argila no horizonte A de 410 g kg^{-1} e de 461 g kg^{-1} no Bw, o pH em água médio de 4,1, alta saturação por alumínio e baixa saturação por bases.

Prof. cm	Perfil – LVd2	Horizonte	Argila g kg^{-1}	$\text{CTC}_{\text{pH}7}$ $\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$
0-15		Ap1	320	64,6
15-46		Ap2	340	56,6
46-110		Bw1	380	45,4
110-155		Bw2	420	39,4

Figura 28 – Fotografia de uma típica unidade LVd2 com a divisão dos horizontes em profundidades e alguns atributos analíticos. Perfil 32, Projeto Deserto, talhão 12. (Fotografia RIZZO, 2001)

Figura 29 – Padrão de relevo na fotografia aérea (Projeto Vão Citrus, julho 2000, BASE – Aerofotogrametria e Projetos S/A, escala original 1:30.000) onde ocorre a unidade taxonômica LVd2. Projetos Valinhos, Inglês e São Roque, Regional Boa Esperança

3.1.9.4 LVd3

Esta unidade é caracterizada pela textura menos leve que as unidades LVd1 e LVd2, apresentando-se ligeiramente plástico e não pegajoso a ligeiramente pegajoso no Bw. A cor do perfil é vermelha, porém muitas vezes esta unidade pode apresentar coloração levemente amarelada nos horizontes superficiais (Figura 30).

O LVd3 distribui-se principalmente nos projetos Lageado e Rancho em amplas superfícies de topos planos (Figura 31). Ocorre ainda ao longo da margem esquerda do rio Paranapanema, no projeto Rancho, provavelmente gerada a partir da pedogênese de sedimentos fluviais (RIZZO, 2001). Gonçalves (1997) encontrou esta unidade nos projetos Cruz de Ferro, Silo e Correias.

A unidade LVd3 apresenta teor de argila no horizonte A na média de 260 g kg^{-1} e de 310 g kg^{-1} no Bw, influenciando assim os baixos teores de matéria orgânica do solo, CTC e a soma de bases. Apresenta alta saturação por alumínio e pH em água extremamente baixo.

Prof. cm	Perfil – LVd3	Horizonte	Argila g kg^{-1}	CTC _{pH7} $\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$
0-10		A1	280	83,0
20-30		A2	260	65,6
30-80		Bw1	340	48,4
80-110		Bw2	280	49,4
110-140		C	Seixos rolados de origem fluvial na base do perfil, terraço do rio Paranapanema.	

Figura 30 – Fotografia de uma típica unidade LVd3 com a divisão dos horizontes em profundidades e alguns atributos analíticos. Perfil no Projeto Rancho (Fotografia RIZZO, 2001)

Figura 31 – Padrão de relevo na fotografia aérea (Projeto Vão Citrus, julho 2000, BASE – Aerofotogrametria e Projetos S/A, escala original 1:30.000) onde ocorre a unidade taxonômica LVd3. Projeto Rancho, Regional Paranaipitanga

3.1.9.5 LVAd1

A subdivisão da classe LVAd considerou os atributos cor e textura do horizonte Bw para a diferenciação das unidades taxonômicas. Os Latossolos Vermelho-Amarelos são solos com matiz 5 YR ou mais vermelhos e mais amarelos que 2,5 YR na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (inclusive BA) (EMBRAPA, 2006).

Esta unidade difere-se pelas características no horizonte Bw, como a textura argilosa ($> 350 \text{ g kg}^{-1}$) e a cor vermelha amarela, indicando condições mais acentuadas de hidratação dos óxidos de ferro do solo (Figura 32). Isso sugere que a drenagem interna do perfil apresenta-se entre bem e moderadamente drenado. Com exceção da cor, os atributos morfológicos desse solo assemelham-se com o LVd2 (RIZZO, 2001).

A ocorrência deste solo está associada aos locais de baixa declividade das cabeceiras de drenagem, quando a cobertura pedológica é predominantemente de textura fina (RIZZO, 2001). Esta unidade foi mapeada somente nos projetos Grupo, Tijuco e Capão Alto (Figura 33).

Prof. cm	Perfil – LVAd1	Horizonte	Argila g kg ⁻¹	CTC _{pH7} mmol _c kg ⁻¹
0-22		A1	410	88,3
22-60		Bw1	450	64,5
60-100		Bw2	460	49,5
100-150		Bw3	460	38,4

Figura 32 – Fotografia de uma típica unidade LVAd1 com a divisão dos horizontes em profundidades e alguns atributos analíticos. (Fotografia RIZZO, 2001)

Figura 33 – Padrão de relevo na fotografia aérea (Projeto Vôo Citrus, julho 2000, BASE – Aerofotogrametria e Projetos S/A, escala original 1:30.000) onde ocorre a unidade taxonômica LVAd1. Projetos Grupo (Regional Santa Inês) e Tijuco (Regional Boa Esperança)

3.1.9.6 LVAd2

Esta unidade taxonômica reúne os solos LVAd no grupamento textura média, ou seja, tendo na composição granulométrica menos de 350 g kg⁻¹ de argila e mais de 150 g kg⁻¹ de areia no horizonte Bw (Figura 34). Apresenta cor amarelada do perfil, tendo

consistência ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa. Este solo apresenta pH em água geralmente abaixo de 4, baixa saturação de bases e elevado teor de alumínio.

Sua distribuição é esparsa, sempre associada às cotas elevadas, aparentemente remanescentes de alteração de rochas mais arenosas. Ocorre ainda ao longo da rede de drenagem de primeira ordem, havendo efeito da circulação hídrica de sub-superfície hidratando os óxidos de ferro (RIZZO, 2001). Distribuem-se principalmente nos projetos Torre, Campo de Pouso, Prainha e Deserto (Figura 35).

Prof. cm	Perfil – LVAd2	Horizonte	Argila g kg ⁻¹	CTC _{pH7} mmol _c kg ⁻¹
0-16		A1	150	68,8
16-40		A/B	200	57,8
40-112		Bw1	240	39,8
112-140		Bw2	280	32,4

Figura 34 – Fotografia de uma típica unidade LVAd2 com a divisão dos horizontes em profundidades e alguns atributos analíticos. (Fotografia RIZZO, 2001)

Figura 35 – Padrão de relevo na fotografia aérea (Projeto Vão Citrus, julho 2000, BASE – Aerofotogrametria e Projetos S/A, escala original 1:30.000) onde ocorre a unidade taxonômica LVAd2. Projeto Torre, Regional Santa Inês

3.1.9.7 LVAd3

Este solo difere dos demais LVA por apresentar comportamento psamítico, ou seja, textura arenosa na maior parte dos horizontes dentro de uma profundidade menor que 150 cm da superfície do solo (Figura 36). No horizonte Bw apresenta textura média ($150 < \text{argila} < 350 \text{ g kg}^{-1}$).

A unidade LVAd3 ocorre principalmente nas cabeceiras da rede de drenagem dos Projetos Rancho, Açude do Lobo, Cruz de Ferro e Cemiterinho (Figura 37).

Prof. cm	Perfil – LVAd2	Horizonte	Argila g kg^{-1}	CTC _{pH7} $\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$
0-10		A1	140	82,9
20-40		A2	120	52,5
60-80		Bw1	140	38,4
80-120		Bw2	220	32,4

Figura 36 – Fotografia de uma típica unidade LVAd3 com a divisão dos horizontes em profundidades e alguns atributos analíticos. Projeto Rancho, Regional Paranaipitanga. (Fotografia Alvares, C.A., 2006)

Figura 37 – Padrão de relevo na fotografia aérea (Projeto Vão Citrus, julho 2000, BASE – Aerofotogrametria e Projetos S/A, escala original 1:30.000) onde ocorre a unidade taxonômica LVAd3. Projeto Rancho, Regional Paranaipitanga

3.1.8.8. PVAd1

Os Argissolos Vermelho-Amarelos são solos com matiz 5 YR ou mais vermelhos na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (inclusive BA) (EMBRAPA, 2006).

O PVAd1 (Figura 38) apresenta sequência de horizontes A-Bt-C, ou A-E-Bt-C, com transição abrupta ou não entre os horizontes A-Bt ou E-Bt. O horizonte Bt apresenta, geralmente, textura média, possuindo fraco desenvolvimento estrutural em função do teor relativamente pequeno de argila, sendo em prisma e blocos sub-angulares médios. O horizonte A apresenta tonalidade clara devido ao elevado teor de areia e fraca pigmentação dos óxidos de ferro, apresentando, deste modo, fraca estrutura, muitas vezes com tons azulados ou ocre, indicando longa permanência de água nesta posição no perfil do solo, assim, adquire eventualmente caráter epiáquico (RIZZO, 2001).

O relevo onde se distribui é colinoso, de vertentes convexas e ravinas frequentes (RIZZO, 2001). Ocorre junto à rede drenagem do Projeto Paranaipitanga (Figura 39).

Prof. cm	Perfil – PVAd1	Horizonte	Argila g kg ⁻¹	CTC _{pH7} mmol _c kg ⁻¹
0-20		A1	200	116,9
20-44		A2	220	64,4
44-76		Bt1	240	46,2
76-170		Bt2	260	31,6

Figura 38 – Fotografia de uma típica unidade PVAd1 com a divisão dos horizontes em profundidades e alguns atributos analíticos. Perfil 51, Projeto Paranapanema, talhão 9. (Fotografia RIZZO, 2001)

Figura 39 – Padrão de relevo na fotografia aérea (Projeto Vão Citrus, julho 2000, BASE – Aerofotogrametria e Projetos S/A, escala original 1:30.000) onde ocorre a unidade taxonômica PVAd1. Projeto Paranapanema, Regional Santa Inês

3.1.9.9 PVAd2

A unidade PVAd2 (Figura 40) apresenta características próximas de um PVAd latossólico, isto porque, o Bt possui estrutura em blocos sub-angulares e prismas fracos, que se desfaz em agregados pequenos e com tendência de microestruturas. Às

vezes, não é observado o comportamento do incremento textural de A para o Bt (RIZZO, 2001).

Neste solo destaca-se a cor no matiz 10 YR ou 7,5 YR com cores brunadas no horizonte A, enquanto no Bt manifesta principalmente vermelho amarelo (5 YR), uma vez ou outra variações de vermelho claro (2,5 YR 4/8). Apresenta pH extremamente ácido ($< 4,3$), pobre em nutrientes e alto teor de alumínio.

Distribui-se sempre na posição do terço médio ou inferior da vertente (Projeto Açude do Lobo), e ainda cobrindo a área de regiões interfluviais de pequena dimensão (Projetos Torre e Paranapanema) (Figura 41).

Prof. cm	Perfil – PVAd2	Horizonte	Argila g kg^{-1}	$\text{CTC}_{\text{pH}7}$ $\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$
0-15		A1	390	87,3
15-42		A/B	420	60,9
42-85		Bt1	450	38,6
85-110		Bt2	440	32,9

Figura 40 – Fotografia de uma típica unidade PVAd2 com a divisão dos horizontes em profundidades e alguns atributos analíticos. Perfil 121, Projeto Boa Vista, talhão 30A. (Fotografia RIZZO, 2001)

Figura 41 – a. Paisagem típica das colinas onduladas do projeto Torre onde ocorre a unidade PVAd2. (Fotografia RIZZO, 2001). b. Padrão de relevo, de média a baixa densidade interfluvial, na fotografia aérea (Projeto Vão Citrus, julho 2000, BASE – Aerofotogrametria e Projetos S/A, escala original 1:30.000) onde ocorre a unidade taxonômica PVAd2. Projeto Torre, Regional Santa Inês

3.1.9.10 PVd1

A unidade PVd1 apresenta características intermediárias para o Latossolo, ou seja, com horizonte Bt (B textural) ou horizonte Bw intermediário para Bt, com estrutura em blocos, fraca ou moderada e/ou cerosidade pouca e moderada, ambos abaixo do Bw e dentro de 200 cm da superfície do solo (EMBRAPA, 2006). Apresenta horizonte A moderado, com teor de argila variando de 215 a 350 g kg⁻¹.

Ocorre no Projeto Torre, no terço médio ou inferior de vertentes fortemente onduladas (Figura 42). No projeto Açude do Lobo ocorre nas cabeceiras de drenagem de terrenos pouco movimentados.

Figura 42 – Padrão de relevo na fotografia aérea (Projeto Vão Citrus, julho 2000, BASE – Aerofotogrametria e Projetos S/A, escala original 1:30.000) onde ocorre a unidade taxonômica PVd1. Projeto Torre, Regional Santa Inês

3.1.9.11 PVd3

A unidade PVd3 apresenta horizonte A de textura arenosa (teor de argila de 100 g kg^{-1}) e um horizonte Bt de textura média (teor de argila de 340 g kg^{-1}). Seu horizonte E é bem definido e apresenta baixo teor de argila (60 g kg^{-1}) (RIZZO, 2001). Ocorre apenas no projeto Lavrinhas em terreno suave ondulado (Figura 43).

Figura 43 – Padrão de relevo na fotografia aérea (Projeto Vão Citrus, julho 2000, BASE – Aerofotogrametria e Projetos S/A, escala original 1:30.000) onde ocorre a unidade taxonômica PVd3. Projeto Lavrinhas, Regional Santa Fé

3.1.9.12 CXbd1

A unidade CXbd1 apresenta os valores médios de argila de 340 g Kg^{-1} no horizonte A e de 330 g Kg^{-1} no Bi. O pH H_2O é ácido no A e Bi, com média de 4,7 (Figura 44). Em função dos teores elevados de partículas finas, a superfície específica possibilita a existência de elevado teor de matéria orgânica.

Este solo ocorre de forma concentrada nos projetos Cruz de Ferro, Mangueirinha, Torre e Suinã (Figura 45). É resultado da pedogênese de rochas sedimentares com matriz siltosa, herdando alto teor de silte a partir da alteração da rocha rica nessa fração granulométrica (RIZZO, 2001). Ocorre ainda no projeto Lavrinhas, sendo derivado da alteração de rochas metamórficas (Complexo Cristalino), principalmente do Grupo Votuverava ou Açungui (Figura 15).

Prof. cm	Perfil – CXbd1	Horizonte	Argila g kg^{-1}	$\text{CTC}_{\text{pH}7}$ $\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$
0-20		A1	271	39,0
20-80		Bi	253	89,0
80-120		Rocha		

Figura 44 – Fotografia de uma típica unidade CXbd1 com a divisão dos horizontes em profundidades e alguns atributos analíticos. Corte em barranco. (Fotografia RIZZO, 2001)

Figura 45 – Padrão de relevo na fotografia aérea (Projeto Vão Citrus, julho 2000, BASE – Aerofotogrametria e Projetos S/A, escala original 1:30.000) onde ocorre a unidade taxonômica CXbd1. Projeto Cruz de Ferro, Regional Santa Inês

3.1.9.13 CXbd2

Esta unidade pedológica é uma variação do solo CXbd1, com menor concentração de argila nos horizontes A e Bi. O horizonte latossólico Bw apresenta textura média (teor de argila de 250 g kg^{-1}). Esta unidade de solo ocorre em amplas áreas do Distrito Florestal. Nos projetos Açude do Lobo, Lageado, Deserto, Cruz de Ferro e Correias este solo ocorre principalmente nas cabeceiras de drenagem de vertentes onduladas a fortemente onduladas (Figura 46). No projeto Açude do Lobo ocorre em extensa área contínua onde há reduzida dimensão interfluvial ($< 500 \text{ m}$).

Figura 46 – Padrão de relevo na fotografia aérea (Projeto Vão Citrus, julho 2000, BASE – Aerofotogrametria e Projetos S/A, escala original 1:30.000) onde ocorre a unidade taxonômica CXbd2. Observar a reduzida dimensão interfluvial (< 500 m) na área de predomínio do cambissolo. Projeto Açude do Lobo (Regional Paranaipitanga) e Projeto Mangueirinha (Regional Boa Esperança)

3.2 Levantamento de dados – atividades de campo e de laboratório

3.2.1 Material Genético

O material genético estudado é um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* (Hill ex Maiden) x *Eucalyptus urophylla* (S.T. Blake) desenvolvido pela Fibria Celulose S.A. e denominado C219H. Foi testado e recomendado para as condições edafoclimáticas da região de Capão Bonito. O motivo da escolha desse material genético para avaliação nesse estudo é sua ampla distribuição nos plantios de Capão Bonito abrangendo diversos tipos de solos e pelo interesse da empresa em seu alto rendimento em celulose. Além disso, é um material genético vastamente recomendado por extensionistas dos estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul.

O material genético C219H é adequado ao percevejo bronzeado do eucalipto (*Thaumastocoris peregrinus*), quanto ao desenvolvimento e a oviposição (WILCKEN et al., 2009). Barja et al. (2001) aponta que o clone C0219H e o C041H (outro clone da linhagem C) apresentam elevada atividade fotossintética.

A principal deficiência desse material genético é a sua suscetibilidade de quebra pelo vento em virtude das características da madeira. Na empresa existem registros de

quebra deste material genético em outras regiões do estado de São Paulo. Esse fato é amplamente discutido por Silva (2005).

3.2.2 Determinação das parcelas amostradas

A empresa possui um programa de inventário florestal contínuo instalado em toda área plantada de Capão Bonito. A intensidade de amostragem é de 0,5% e as parcelas são retangulares tendo em média 500 m², resultando em aproximadamente 1 parcela para cada 10 hectares de floresta. As parcelas são instaladas no segundo ano do povoamento e mantidas até o inventário pré-corte. As informações são levantadas e analisadas. Em seguida, os dados são compilados e armazenados num banco de dados relacional disponível via acesso remoto para toda empresa.

Foram selecionadas do banco de dados as parcelas de inventário que continham o material genético C219H plantados no mesmo espaçamento de 3 x 3m e de mesma idade, com data de plantio no ano 2000 (Figura 47). Entre as parcelas a produtividade apresentava ampla variação, excedendo 220% em alguns sítios. Desse rol foram eliminadas as parcelas com número excessivo de árvores mortas ou quebradas, permanecendo apenas parcelas que apresentavam homogeneidade na lotação, aproximadamente 1.100 árvores ha⁻¹. Deste grupo seletivo foi elaborado um mapa para verificar sua distribuição na área de estudo.

V913															
1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
UNIDADE	PROJETO	DESC PROJETO	GLEBA	TALHAO	AREA	ESPAÇAMENTO	ESPECIE	ROTACAO	DATA PLANTIO	DATA MEDICAO	IDADE	PARCELA	TIPO PARCELA	MEDICAO	
326	CB	F654	BOA VISTA	F65408	24	33,76	3030 C219H	1	21/12/2000	25/9/2002	1,760438	76	Permanente		
330	CB	F654	BOA VISTA	F65408	24	33,76	3030 C219H	1	21/12/2000	25/9/2002	1,760438	77	Permanente		
497	CB	F660	TIJUCO	F66003	7	16,23	3030 C219H	1	17/8/2000	31/8/2002	2,03696	66	Permanente		
501	CB	F660	TIJUCO	F66003	7	16,23	3030 C219H	1	17/8/2000	31/8/2002	2,03696	67	Permanente		
621	CB	F660	TIJUCO	F66008	01A	2,16	3030 C219H	1	17/8/2000	31/8/2002	2,03696	65	Permanente		
753	CB	F660	TIJUCO	F66014	23A	6,17	3030 C219H	1	20/3/2000	31/8/2002	2,447638	83	Permanente		
897	CB	F663	SÃO ROQUE	F66303	02A	10,92	3030 C219H	1	15/2/2000	14/6/2002	2,327173	26	Permanente		
909	CB	F663	SÃO ROQUE	F66303	07A	12,21	3030 C219H	1	10/2/2000	14/6/2002	2,340862	32	Permanente		
913	CB	F663	SÃO ROQUE	F66303	10	14,86	3030 C219H	1	3/2/2000	14/6/2002	2,360027	33	Permanente		
917	CB	F663	SÃO ROQUE	F66303	10	14,86	3030 C219H	1	3/2/2000	14/6/2002	2,360027	34	Permanente		
921	CB	F663	SÃO ROQUE	F66303	11	33,42	3030 C219H	1	1/2/2000	14/6/2002	2,365503	35	Permanente		
925	CB	F663	SÃO ROQUE	F66303	11	33,42	3030 C219H	1	1/2/2000	14/6/2002	2,365503	36	Permanente		
929	CB	F663	SÃO ROQUE	F66303	11	33,42	3030 C219H	1	1/2/2000	14/6/2002	2,365503	37	Permanente		
933	CB	F663	SÃO ROQUE	F66303	12	14,4	3030 C219H	1	23/3/2000	14/6/2002	2,225872	38	Permanente		
937	CB	F663	SÃO ROQUE	F66303	12	14,4	3030 C219H	1	23/3/2000	14/6/2002	2,225872	39	Permanente		
968	CB	F663	SÃO ROQUE	F66305	16A	14,38	3030 C219H	1	2/5/2000	14/6/2002	2,116358	40	Permanente		
972	CB	F663	SÃO ROQUE	F66305	16A	14,38	3030 C219H	1	2/5/2000	14/6/2002	2,116358	41	Permanente		

Figura 47 – Fragmento do banco de dados da rede de parcelas do inventário florestal contínuo da Fibria

Em seguida, realizando inúmeras visitas de campo em todos os projetos de Capão Bonito, e de posse dos mapas pedológicos e do mapa do grupo de parcelas pré-selecionadas, foram eleitas 20 parcelas da rede de inventário florestal contínuo em

quatro tipos de solos predominantes de Capão Bonito. As parcelas foram distribuídas igualmente nos tipos de solos predominantes (Figura 48). Os tipos de solos são: LVd1 (textura muito argilosa: > 60% de argila), LVd2 (textura argilosa: 35 a 60% de argila), LVAd2 (textura média: 15 a 35% de argila) e PVAd1 (textura arenosa: < 15% de argila). Esses solos abrangem mais de 75% da área de estudo. Embora tenha havido consideráveis mudanças no mapa de solos do Distrito Florestal (entre 2006 e 2008), os nomes dos sítios florestais (parcelas amostradas) estabelecidos no início deste projeto não foram alterados.

Figura 48 – Localização das parcelas (sítios florestais) selecionadas da rede de inventário florestal contínuo no Distrito Florestal de Capão Bonito

Foram extraídos do banco de dados valores de idade, número de árvores vivas, número de árvores quebradas, altura (m); DAP (cm), área basal ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$), volume total com casca ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) e incremento médio anual ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$), para cada uma das parcelas selecionadas e ao longo dos anos de medição (2002 a 2006).

As parcelas de inventário selecionadas são provenientes de povoamentos de eucalipto implantados e manejados com alto padrão tecnológico. No momento da amostragem, as árvores não apresentavam sinais de incidência de doenças, pragas e distúrbios fisiológicos. As práticas silviculturais adotadas em todas as parcelas selecionadas foram semelhantes (SILVA et al., 2001). O solo foi preparado com subsolador florestal. O histórico da recomendação de adubação de plantio indicou uma dosagem média de 290 kg ha^{-1} da formulação NPK 04.28.06 + 0,3% de B +0,7% de Zn, aplicada em filete contínuo. A calagem foi realizada em área total em período pós-plantio com aplicação média de 1 Mg ha^{-1} de calcário dolomítico. Foram realizadas duas adubações de cobertura. A primeira adubação de cobertura, aos três meses, constou de dosagem média de 50 kg ha^{-1} de KCl. Na segunda adubação de cobertura, aos nove meses, foram utilizados em média 150 kg ha^{-1} KCl + 0,5% de B +1 % de Zn. Ocasionalmente, dos 18 aos 24 meses, ocorria uma terceira adubação de cobertura com dosagem média de 100 kg ha^{-1} de KCl + 0,5% de B +1% de Zn. As adubações de cobertura, primeira e segunda, foram aplicadas em coroa na projeção da copa ou a lanço em duas faixas contínuas e ruas alternadas, esta última apenas para a terceira adubação.

3.2.3 Avaliações edáficas

Para determinação dos atributos químicos e físicos do solo foram coletadas, com trado tipo holandês, dez amostras simples de solo na camada de 0-20 cm, por parcela, na diagonal à área útil da parcela, nas entrelinhas de plantio (amostragem 10/1). No campo, essas amostras foram homogeneizadas e deram origem a uma amostra composta, sendo em seguida seca ao ar, destorroada, peneirada (2 mm nº ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas), novamente homogeneizada e encaminhada para análise no Laboratório de Ecologia Aplicada do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ (LEA/LCF/ESALQ/USP) (Figura 49).

Os métodos de análise química usados foram descritos por Raji et al. (2001). Foram avaliados os atributos químicos pH em CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$, o Al trocável foi extraído com solução de KCl 1N e titulado com NaOH $0,05 \text{ mol L}^{-1}$, em presença de azul

de bromotimol; a acidez potencial ($H+Al$) foi determinada em tampão SMP. O C orgânico foi quantificado por meio da oxidação da matéria orgânica com solução de dicromato de K em meio ácido. O K, o Ca, o Mg e o P foram extraídos com resina trocadora de íons e a leitura feita em espectrofotômetro de absorção atômica (Ca e Mg), fotômetro de chama (K). O P foi quantificado colorimetricamente. O B foi extraído com água quente e analisado segundo o método descrito por Abreu et al. (1994). O Cu, o Fe, o Mn e o Zn foram extraídos com DTPA (Ácido Dietilenotriaminopentacético) e analisados segundo os métodos descritos por Lindsay e Norvell (1978).

Foram avaliados os atributos físicos argila, silte, areia grossa, areia média, areia fina, densidade do solo, densidade de partículas e capacidade de retenção de água. A granulometria foi avaliada após dispersão química, empregando-se o método do densímetro (EMBRAPA, 1997). A porosidade total foi determinada pelo método indireto, com base na relação entre a densidade de partículas e a densidade do solo (KIEHL, 1979).

Figura 49 – Amostras de solo secando ao ar (Fotografia em Fevereiro/2006, laboratório Fibria-Capão Bonito) (a). Processo de destorroamento, peneiramento (2 mm nº ABNT) e homogeneização do solo (Fotografia em Março/2006, LEAII/ LCF/ESALQ/USP) (b). Amostras preparadas para envio ao laboratório (Fotografia em Março/2006, LEAII/LCF/ESALQ/USP) (c)

Para determinar a capacidade de retenção de água dos solos, foram utilizados anéis de Kopecky com dimensões de 50 mm de diâmetro por 50 mm de altura, coletando-se três amostras na camada de 20-25 cm na diagonal da parcela e entrelinhas das árvores. Essas amostras indeformadas de solo contidos nos anéis de Kopecky, depois de saturadas com água (Figura 50), foram submetidas aos potenciais de -0,01, -0,03, -0,06 e -1,5 MPa, utilizando pressões aplicadas em câmaras com placas porosas, conforme Klute (1986). Cessada a drenagem e atingindo o equilíbrio hidráulico aparente, as amostras foram pesadas e, em seguida, secas em estufa a $\pm$

105°C, até massa constante, para determinar a densidade do solo conforme Blake e Hartge (1986). Essas análises foram realizadas no Laboratório de Física do Solo do Departamento de Engenharia de Biossistemas da ESALQ (LFS/LEB/ESALQ/USP). Nas Tabelas 3 e 4 estão relacionados alguns atributos físicos e químicos desses solos.

Figura 50 – Preparo das amostras indeformadas de solo (a, b). Amostras saturadas com água. Observar na foto que aproximadamente após três minutos do início desse processo, os solos mais escuros (LVd1 e LVd2) já se apresentavam completamente saturados enquanto os solos mais amarelos (LVAd2) e (PVAd1) não mostravam ainda sinais de saturação. (Fotografia em Abril/2006, LFS/LEB/ESALQ/USP) (c)

Tabela 3 – Atributos físicos dos diferentes solos estudados de Capão Bonito (camada 0 a 20 cm)

Solo	Argila	Silte	Areia	Densidade		Porosidade total	CAD ¹
				partícula	solo		
		g kg ⁻¹		g cm ⁻³		%	mm m ⁻¹
LVd1	408	208	384	2,38	1,44	43,3	114,8
LVd2	384	243	373	2,28	1,39	39,0	111,2
LVAd2	318	217	465	2,35	1,51	36,2	105,7
PVAd1	212	231	557	2,42	1,54	34,3	86,5

⁽¹⁾ Intervalo entre a capacidade de campo (-0,01 MPa) e o ponto de murcha permanente (-1,5 MPa).

Tabela 4 - Atributos químicos dos diferentes solos estudados de Capão Bonito (camada 0 a 20 cm)

Solo	pH CaCl2	M.O.	P-resina	K	Ca	Mg	Al	SB	CTC _{pH7}
		g kg ⁻¹	mg dm ⁻³						
							mmol _c dm ⁻³		
LVd1	4,0	24,0	4,8	0,6	3,8	2,4	15,4	6,8	71,2
LVd2	4,0	28,4	5,6	1,0	8,8	3,5	16,0	13,3	90,9
LVAd2	3,8	27,7	5,9	0,7	3,4	1,4	21,3	5,5	94,6
PVAd1	3,8	21,2	5,8	0,7	3,4	1,6	21,9	5,6	86,2

Para a realização o mapeamento dos atributos dos solos do Distrito Florestal de Capão Bonito, foram utilizados os 183 pontos amostrados por Gonçalves (1997) e Rizzo (2001), sendo 139 perfis pedológicos e 44 tradagens. Esses pontos foram resgatados dos relatórios impressos e então georreferenciados e compilados num banco de dados de solos da área de estudo. Nos anos seguintes, de 2006 a 2008, foram realizadas mais 244 tradagens em toda a área de efetivo plantio, com o objetivo de revisar o mapeamento pedológico além de intensificar a amostragem pontual, somando 427 pontos de solo. O banco de dados de solos do Distrito Florestal de Capão Bonito apresenta informações de localização de cada amostra, do tipo de solo, do tipo de horizonte pedológico, da profundidade de cada horizonte, do método e do ano da coleta, e dos valores dos atributos físicos e químicos do solo. Todos os pontos localizam-se em áreas de plantio florestal.

Foram aplicados modelos estocásticos e determinísticos para elaborar mapas dos atributos físicos e químicos do solo. Os dados foram agrupados em arquivos XYZ. O valores XY representam, respectivamente, a longitude e a latitude do ponto (perfil ou trado) coletado no campo, e Z representa os parâmetros areia muito fina (g kg^{-1}), areia fina (g kg^{-1}), areia média (g kg^{-1}), areia grossa (g kg^{-1}), areia muito grossa (g kg^{-1}), areia total (g kg^{-1}), silte (g kg^{-1}), argila (g kg^{-1}), relação silte/argila (adimensional), grau de floculação da argila (%), matéria orgânica (g kg^{-1}), fósforo (mg kg^{-1}), potássio ($\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$), cálcio ($\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$), magnésio ($\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$), sódio ($\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$), alumínio ($\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$), alumínio+hidrogênio ($\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$), pH H_2O (adimensional), pH KCl (adimensional), delta pH (adimensional), soma de bases ($\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$), CTC efetiva ($\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$), CTC pH7 ($\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$), saturação por bases (%) e saturação por alumínio (%). O estudo dos atributos do solo foi conduzido para os horizontes pedológicos A e B.

3.2.4 Avaliações dendrométricas

Em cada uma das 20 parcelas foi realizado um inventário para determinar o seu diâmetro médio (Figura 51). Foi calculado o intervalo de confiança ($t = 5\%$ de probabilidade) e então derrubadas três árvores médias em cada parcela (Figura 52). Em todas as 60 árvores selecionadas foram realizadas avaliações dendrométricas em

campo (Figura 53) como: altura total do fuste, altura comercial (desponte de 6 cm) e as massas verdes totais de folhas, galhos, casca + lenho (Figura 54). Foram coletadas amostras para determinação do teor de umidade dos compartimentos folhas, galhos e casca + lenho (Figura 55). A massa seca de cada amostra foi obtido após secagem em estufa a temperatura aproximada de 60°C, até massa constante. A partir da relação entre a massa fresca total e a massa seca das amostras, determinou-se a biomassa de cada componente, em kg árvore^{-1} e em Mg ha^{-1} .

De cada seis árvores foram cortados discos com espessura aproximada de 5 cm, distribuídos no fuste como se segue: dois discos obtidos nas extremidades (base – 0% e topo do fuste – 100%), um disco na altura do DAP (1,3 m), e os outros três discos localizados a 25, 50 e 75% da altura comercial da árvore.

No laboratório da Fibria em Capão Bonito, em cada disco ainda fresco, fizeram-se medições do diâmetro e circunferência (com e sem casca), além da medição de sua massa fresca (com e sem casca) (Figura 54). A relação de biomassa entre casca e lenho foi obtida das amostras dos discos de cada árvore. No Laboratório de Química, Celulose e Energia do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ (LQCE/LCF/ESALQ/USP) determinou-se a densidade básica pelo método da balança hidrostática (ABTCP, 1973).

Figura 51 – Inventário florestal (mensuração dos diâmetros) na parcela selecionada. (Fotografia em Fevereiro/2006 – Valdir e Ademir. Projeto Tijuco Regional Boa Esperança)

Figura 52 – Seleção da árvore média e derrubada com motosserra. (Fotografia em Fevereiro/2006 – Valdir e Ademir. Projeto Tijuco Regional Boa Esperança)

Figura 53 – Esquema ilustrativo da avaliação dendrométrica e nutricional

Figura 54 – Mensuração da massa fresca (lenho + casca) das árvores com balança digital (precisão $\pm 0,5$ kg). (Fotografia em Fevereiro/2006 – Ademir e Luciano. Projeto Tijuco Regional Boa Esperança)

Figura 55 – Mensuração da massa fresca do disco (com e sem casca) na posição do DAP (1,3 m) da árvore 2. Talhão 10 Parcela 33. Projeto São Roque Regional Boa Esperança. (Fotografia em Fevereiro/2006 – laboratório Fibria-CB)

3.2.5 Avaliações nutricionais

Para cada árvore derrubada foi realizada uma amostragem foliar para avaliação nutricional. Foram coletadas 100 folhas maduras localizadas no terço superior da copa de cada árvore (SILVEIRA et al., 2000), acondicionando-as em sacos de papel e secadas em estufa a 65°C até massa constante. Em seguida as amostras foram encaminhadas para análise no Laboratório de Ecologia Aplicada do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ (LEA/LCF/ESALQ/USP). Foram determinados os teores de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Zn, Mn e Fe, conforme métodos descritos por Malavolta et al. (1997).

3.2.6 Levantamento de dados climáticos

Foram utilizados dados de cinco estações meteorológicas de superfície. A área de estudo apresenta três estações meteorológicas convencionais de segunda classe, isto é, possuem o pluviômetro e o abrigo meteorológico, com termômetros de máxima, de mínima, de bulbo seco e de bulbo úmido (PEREIRA et al., 2002). Há registro pluviométrico desde 1978 e histórico de temperatura desde 2001. O Distrito Florestal de Capão Bonito apresenta também uma estação meteorológica automática que entrou em operação em junho de 2004, registrando informações de precipitação, temperatura,

umidade relativa, radiação solar e insolação, velocidade e direção do vento. A estação meteorológica automática tem a mesma localização de umas das estações convencionais.

Para a complementação do banco de dados foram utilizados dados meteorológicos da estação automática de Capão Bonito administrada pelo Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas do Instituto Agrônomo de Campinas (CIIAGRO/IAC). Esta estação localiza-se adjacente a área de estudo (Figura 56). Os dados diários foram organizados e compilados em médias (temperatura, umidade relativa, radiação solar e insolação) ou totais mensais (precipitação e geada) para o período de janeiro de 2002 a dezembro de 2006.

Figura 56 – Localização das parcelas estações meteorológicas no Distrito Florestal de Capão Bonito

3.2.7 Modelo Digital de Elevação do Terreno

O modelo digital de elevação do terreno foi elaborado a partir de curvas de nível com equidistância vertical de 5 m (escala: 1:10.000). As curvas de nível são

provenientes dos projetos de levantamentos pedológicos da área de estudo. Para a construção do modelo digital de elevação do terreno foi utilizado o método de interpolação “*Topo to raster*” do programa ArcGIS 9.3 (ESRI, 2008), pois é um método especificamente desenvolvido para criar modelos de elevação hidrologicamente corretos. Neste método são usados as curvas de nível, os pontos cotados, a hidrografia e o perímetro da área a ser interpolada. O algoritmo “*Topo to raster*” é baseado no modelo desenvolvido por Hutchinson (1989). A resolução espacial do modelo digital de elevação do terreno é de 10 m. Os valores de declividade, orientação e geometria das vertentes foram derivados do modelo digital de elevação do terreno, usando ferramentas do programa ArcGIS 9.3 (ESRI, 2008).

A declividade e a orientação das vertentes foram elaboradas usando as ferramenta “*Slope*” e “*Aspect*”, respectivamente. O mapeamento da geometria das vertentes seguiu o método proposto por Estados Unidos Department of Agriculture - USDA (2008). Este método utiliza a ferramenta “*Curvature*”, a qual resulta em dois mapas: i) “*profile*” que é a curvatura do terreno na direção da declividade; ii) “*plan*” que é a curvatura do terreno na perpendicular da direção da declividade (Figura 57). Os mapas “*profile*” e “*plan*” foram classificados, interpretados e combinados no mapa final dos tipos de geometria das vertentes (SILVA et al., 2003).

Figura 57 – Método de mapeamento da geometria de vertentes em encostas retilínea, convexa e côncava. RR = vertente retilínea nos sentidos vertical e horizontal, RV = vertente retilínea no sentido vertical e convexa no sentido horizontal, RC = vertente retilínea no sentido vertical e côncava no sentido horizontal, VR = vertente convexa no sentido vertical e retilínea no sentido horizontal, VV = vertente convexa nos sentidos vertical e horizontal, VC = vertente convexa no sentido vertical e côncava no sentido horizontal, CR = vertente côncava no sentido vertical e retilínea no sentido horizontal, CV = vertente côncava no sentido vertical e convexa no sentido horizontal, CC = vertente côncava nos sentidos vertical e horizontal

3.2.8 Estatística descritiva e geoestatística das amostras de solos

Os dados de solos foram analisados segundo a estatística descritiva e a estatística espacial (Figura 58). A análise exploratória dos dados de solos foi realizada com o programa estatístico SYSTAT v.11 (WILKINSON, 2004). A etapa exploratória é de fundamental importância, pois possibilita a identificação de possíveis valores discrepantes e forma da distribuição da variável. Foram realizadas medidas de posição (média, mediana e moda), de dispersão (mínimo, máximo e desvio padrão) e de distribuição (coeficientes de variação, simetria e de curtose) dos dados. A hipótese de normalidade dos dados foi checada segundo o teste W a 5% (SHAPIRO; WILK, 1965), onde se verificou a tendência da distribuição normal ou logarítmica dos dados. Na elaboração dos gráficos foi empregado o programa estatístico SIGMAPLOT v.10 (STATISTICAL PACKAGE FOR THE SOCIAL SCIENCES - SPSS, 2006).

Figura 58 – Esquema do processo de análise de dados espacialmente distribuídos

Os semivariogramas omnidirecionais experimentais foram ajustados utilizando-se o programa geoestatístico GS+ v.9, que segundo Robertson (2008), a seleção dos modelos (semivariogramas) teóricos é realizada com base na menor soma de quadrados do resíduo (SQR) e no maior coeficiente de determinação (R^2). Partindo-se do ajuste automático do programa GS+ v.9, os semivariogramas foram aferidos de

forma manual ou “a sentimento” obtendo-se resultados mais realistas e satisfatórios (RIBEIRO JR., 1995).

Os semivariogramas experimentais foram calculados até aproximadamente 50% do campo geométrico, pois após esse valor o semivariograma perde o significado (GUERRA, 1988), isto é, a precisão é reduzida devido ao menor número de pares possíveis. Foi considerado um campo geométrico de 12.000 m, com classes (*lags*) de separação de 1.200m, visto que estes *lags* são os estimadores dos semivariogramas experimentais (DEUTSCH; JOURNAL, 1998). Os modelos teóricos considerados, como o esférico, o exponencial, o gaussiano e o linear são detalhadamente descritos por Guerra (1988), Vieira (2000) Lamparelli et al. (2001) e Andriotti (2003) (Figura 59). Ficou-se limitado a este conjunto de semivariogramas teóricos, pois são os que normalmente cobrem a generalidade das situações de dispersão de fenômenos espaciais da ciência do solo (SOARES, 2006). Utilizando o GS+ v.9 foi obtido o coeficiente de correlação da validação cruzada dos modelos selecionados. Os semivariogramas experimentais foram escalonados, dividindo-se cada um de seus valores pela variância dos dados, conforme Vieira et al. (1997), obtendo-se semivariogramas com patamar próximo de 1,0. Dessa forma, foi possível plotar vários atributos num mesmo gráfico, e a proximidade entre eles, quando escalonados, indica a semelhança na maneira como as propriedades variam espacialmente (VIEIRA et al., 1997). Foi utilizado o conceito Índice de Dependência Espacial (IDE), conforme Zimback (2001), que mensura o efeito da variância estrutural sobre a variância total (patamar) da amostra. O IDE apresenta os seguintes intervalos de interpretação: fraco IDE, $\leq 25\%$, moderado IDE, entre 25% e 75%; forte IDE, $\geq 75\%$. Esse índice é um complemento do método tradicional proposto por Cambardella et al. (1994), pois neste método é avaliado o peso do efeito pepita (aleatoriedade) sobre a variância total.

Utilizando-se os parâmetros estruturais obtidos dos semivariogramas experimentais foram construídos mapas de alguns atributos edáficos com o uso do programa de sistemas de informação geográfica ArcMap v.9.3 (ESRI, 2008), utilizando-se o estimador pontual de krigagem ordinária para a interpolação geoestatística. Para facilitar a interpretação dos mapas, as legendas foram compostas em quantidades

equivalentes (quantis), isto é, dividindo-se a distribuição em quatro classes, as quais contêm a mesma área de ocorrência.

Figura 59 – Modelos teóricos de semivariogramas omnidirecionais. As curvas são os semivariogramas teóricos e os pontos são os semivariogramas experimentais (observados). Modelo Esférico (a). Modelo Exponencial (b). Modelo Gaussiano (c). Modelo Linear (d)

3.3.1 O modelo 3-PGIS e a modelagem cartográfica

O modelo ecofisiológico intitulado neste projeto de 3-PGIS, acrônimo da expressão *Physiological Processes Predicting Growth in Geographical Information System* (Figura 60), apresenta dimensão temporal e espacial. É um modelo espacialmente distribuído, isto é a principal diferença em relação ao modelo original 3-PG (*Physiological Processes Predicting Growth*) (LANDSBERG; WARING, 1997).

Foi programado em linguagem computacional do tipo VBA (*Visual Basic for Applications*), associado aos programas Microsoft Excel® e ao ArcGIS 9.3 (ESRI, 2008). Foram utilizadas vários conceitos e ferramentas do software ArcGIS 9.3 com base nos trabalhos de Theobald (2007) e Ormsby et al. (2010).

Figura 60 – Diagrama do modelo ecofisiológico 3-PGIS (modificado de SANDS 2001)

Os vinte e cinco projetos que integram o Distrito Florestal de Capão Bonito (Figura 4) foram divididos e organizados em células (*grid*) quadradas com lado de 100 m. Cada célula ocupa uma área igual ou menor que 1 ha. As células das bordas foram recortadas para apresentar contorno real do perímetro do talhão. Foram necessárias 28.060 células úteis para cobrir toda a área de efetivo plantio, arranjadas em 311 linhas e 303 colunas (Figura 61).

Para cada célula foi criado e associado um ponto localizado no centro geométrico do polígono (ponto centróide). Esse ponto é o representante da célula. É a feição cartográfica que carrega todos os dados pertinentes a esse local indiviso, dentro ou fora do modelo. A célula tem apenas função visual, isto é, na forma de mapas.

Além das coordenadas UTM do ponto centróide, foi estabelecido um sistema destinatário alfanumérico para as células. As colunas (eixo x) apresentam índice alfabético sequencial e as linhas (eixo y) são representadas por série ordinal (Figura 61).

Todas variáveis de entrada, de saída e os parâmetros do modelo foram dimensionados de acordo com o requerimento do modelo ecofisiológico, estruturados da seguinte forma: x_{ats} (sendo a =adimensional; t = variação temporal; s = variação espacial).

Figura 61 – Sistema de divisão e organização em células do Distrito Florestal de Capão Bonito. Observar no quadro de ampliação o arranjo das células quadradas de 100 m de lado e o sistema destinatário alfanumérico de localização

Todas as informações geográficas desse projeto foram geradas ou modificadas, quando já existentes, no sistema de coordenadas projetadas UTM (Universal Transversa de Mercator). A área de estudo está localizada na zona UTM 22 sul. O datum de referência foi atualizado para o SIRGAS 2.000 (Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul), com elipsóide GRS 1.980 (*Geodetic Reference System*), conforme orientação do IBGE (2007).

3.3.2 Entrada de dados meteorológicos

As variáveis meteorológicas empregadas no modelo 3-PGIS são apresentadas na Tabela 5. A coluna determinação significa que todas elas, com exceção da insolação e precipitação, foram calculadas com base nas equações utilizadas. A coluna método mostra quais as variáveis foram estimadas, observadas ou ambos os casos

(combinadas). A coluna dimensão apresenta a idéia central da variação do modelo 3-PGIS, onde as variáveis assumem dimensão espacial e/ou temporal ou adimensional.

Tabela 5 – Variáveis meteorológicas de entrada no modelo 3-PGIS para o Distrito Florestal de Capão Bonito

Variável	Determinação	Unidade	Método		Dimensão		
			Estimado	Observado	A	T	S
Radiação global	eq 1 a 11	$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$	x	x		x	x
Radiação líquida	eq. 1 a 16	$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$	x			x	x
Fotoperíodo	eq. 1 a 5	h	x			x	x
Insolação	Estação meteorológica	h		x		x	x
Temperatura máxima	eq. 17	$^{\circ}\text{C}$	x	x		x	x
Temperatura mínima	eq. 17	$^{\circ}\text{C}$	x	x		x	x
Temperatura média	eq. 17	$^{\circ}\text{C}$	x	x		x	x
Número de dias geada por mês	eq. 18 e 19	n	x	x		x	x
Umidade relativa	eq. 20 a 22	%	x	x		x	x
Precipitação	Estação meteorológica	mm		x		x	x

A = adimensional, T = temporal, S = espacial

3.3.2.1 Estimativa da radiação solar

Para o estudo e o mapeamento da radiação solar foram programados a sequência de cálculos de Pereira et al. (2002). Apenas as variáveis latitude, altitude, declividade e orientação da vertente são previamente requeridas para rodar esse sub-modelo.

O passo do modelo é mensal, para isso, então, calcularam-se as variáveis envolvidas com a radiação solar somente para o 15º dia de cada mês, interpretando-as como a média do mês. Dessa forma, primeiramente é necessário o cálculo do dia Juliano para cada 15º dia de cada mês, conforme a equação abaixo:

$$\text{Dia Juliano}_t = \text{número inteiro}[(30,42 \times \text{mês})] - 15,23 \quad (1)$$

em que: Dia Juliano = número de dia do ano (Janeiro 1 = 1; Junho 1 = 181); número inteiro = número natural (1, 2, 3, ...); mês = número do mês (1 a 12).

Em seguida, o modelo calcula a declinação solar, variável que expressa a época do ano em ângulo:

$$\delta_{ts} = 23,45 \times \sin[0,9863 \times (0,284 + \text{Dia Juliano}_t)] \quad (2)$$

em que: δ = declinação solar (radiano). No hemisfério sul, a declinação solar é positiva na primavera e no verão, negativa no outono e no inverno, e zero nos equinócios.

A duração do dia, em horas, ou o fotoperíodo é o intervalo entre o nascer e o pôr do sol num dado dia e é calculado conforme as eq. (3, 4 e 5). Varia de acordo com a latitude e a época do ano. A duração do dia é utilizado também na equação da evapotranspiração de Penman-Monteith.

$$\text{Nascer do sol (hn)}_{ts} = 12 - \frac{\cos^{-1}(-\tan(\delta_{ts}) \times \tan(\varphi_s))}{15} \quad (3)$$

em que: hn = hora do nascer do sol (horas); φ = latitude do local (grau).

$$\text{Pôr do sol (hp)}_{ts} = 12 + \frac{\cos^{-1}(-\tan(\delta_{ts}) \times \tan(\varphi_s))}{15} \quad (4)$$

em que: hp = hora do pôr do sol (horas).

$$N(h)_{ts} = \text{Pôr do sol (hp)}_{ts} - \text{Nascer do sol (hn)}_{ts} \quad (5)$$

em que: $N(h)$ = duração do dia (horas).

O ângulo horário ao nascer do sol é calculado conforme a eq. (6). Apresenta valor de 90° nos equinócios, quando $N(h) = 12$ horas.

$$hn_{ts} = \cos^{-1}(-\tan(\delta_{ts}) \times \tan(\varphi_s)) \quad (6)$$

em que: hn = ângulo horário na hora do nascer do sol (grau).

A correção da irradiância solar em função da distância Terra-Sol é calculada na sequência para obter com que intensidade a radiação solar extraterrestre atinge o topo da atmosfera em função do dia do ano, sendo menor no afélio e maior no periélio.

$$\left(\frac{d}{D}\right)_{ts}^2 = 1 + 0,033 \times \cos\left[\left(\frac{360}{365}\right) \times \text{Dia Juliano}_t\right] \quad (7)$$

em que: $(d/D)^2$ = fator de correção para a distância média Terra-Sol.

Assim obtém-se que a radiação solar extraterrestre (no topo da atmosfera) é função apenas da latitude e da época do ano, visto que as outras variáveis também são funções dessas anteriores.

$$Q_{o_{ts}} = 37,586 \times \left(\frac{d}{D}\right)_{ts}^2 \times [\text{hn}_{ts} \times \sin(\varphi_s) \times \sin(\delta_{ts}) + \cos(\varphi_s) \times \cos(\delta_{ts}) \times \sin(\text{hn}_{ts})] \quad (8)$$

em que: Q_o = Radiação solar extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

A eq. (9) foi utilizada para corrigir a radiação solar extraterrestre, levando-se em consideração as nuances topográficas declividade e orientação das vertentes, que como a latitude e a época do ano afetam a incidência dos raios solares, condicionando ambientes diferentes num mesmo local e época do ano. Os valores de declividade e orientação das vertentes foram derivados do modelo digital de elevação do terreno. A eq. (10) é a radiação solar extraterrestre corrigida pelo efeito do relevo.

$$\cos(i)_{ts} = \cos(s_s) \times \cos(Zs_{ts}) + \sin(s_s) \times \sin(Zs_{ts}) \times \cos(\psi_{ts} - \psi_{s_s}) \quad (9)$$

em que: $\cos(i)$ = Cosseno do ângulo de correção do relevo; s = é a declividade da vertente (grau); Zs = ângulo zenital (grau); ψ = azimuth solar (grau); ψ_s = orientação da vertente (aspecto, em grau).

$$Q_{oc_{ts}} = Q_{o_{ts}} \times \cos(i)_{ts} \quad (10)$$

em que: Q_{oc} = Radiação solar extraterrestre corrigida ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

Para o cálculo da radiação solar global aplicou-se a equação geral abaixo, com n (média mensal) obtido na estação meteorológica automática do Distrito Florestal de Capão Bonito.

$$Q_{g_{ts}} = \left[(0,29 \times \cos(\varphi_s)) + \left(0,52 \times \frac{n_t}{N(h)_{ts}} \right) \right] \times Q_{oc_{ts}} \quad (11)$$

em que: Q_g = Radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); n = insolação (horas de brilho solar); $N(h)$ = duração do dia (horas).

Nesse momento o valor de Q_g (estimado na eq. 11) é corrigido pelo valor de Q_g mensal observado na estação meteorológica.

Qualitativamente, a radiação fotossinteticamente ativa (RFA) foi considerada como sendo 50% da radiação global:

$$RFA_{ts} = 0,5 \times Q_{g_{ts}} \quad (12)$$

em que: RFA = Radiação fotossinteticamente ativa ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

A densidade de fluxo de fótons fotossintéticos (DFFF) mensal foi calculada utilizando a equação abaixo:

$$DFFF_{ts} = 4,6 \times RFA_{ts} \times ndm_t \quad (13)$$

em que: DFFF = Densidade de fluxo de fótons fotossintéticos ($\text{mol m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$); ndm = número de dias no mês.

O balanço de radiação foi calculado com base nas eq. (12, 13 e 14). A Radiação líquida (R_n) ou o saldo de radiação foi determinado para estimar a evapotranspiração pela equação de Penman-Monteith.

$$BOC_{ts} = (1 - r_a) \times Q_{g_{ts}} \quad (14)$$

em que: BOC = Radiação de ondas curtas ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); r = albedo da superfície.

$$BOL_{ts} = -\left\{\sigma_a \times (T_{med_{ts}} + 273,15)^4 \times (0,56 - 0,25\sqrt{ea_{ts}}) \times \left[0,1 + \left(0,9 \times \frac{n_t}{N(h)_{ts}}\right)\right]\right\} \quad (15)$$

em que: BOL = Radiação de ondas longas ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$); σ = constante de Stefan-Boltzmann ($4,903 \times 10^{-9}\ MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}\ K^{-4}$); T_{med} = temperatura média do ar ($^{\circ}C$); ea = pressão parcial de vapor de água no ar (kPa).

$$Rn_{ts} = BOC_{ts} + BOL_{ts} \quad (16)$$

em que: Rn = Radiação líquida ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$).

3.3.2.2 Estimativa das temperaturas máxima e mínima

Foram elaborados mapas mensais das médias de temperatura máxima e mínima para o Distrito Florestal de Capão Bonito. Esses mapas resultaram da integração e combinação de valores de temperatura estimada e observada. A idéia foi criar mapas empíricos de temperatura e corrigi-los com base em valores observados em estações meteorológicas.

Para isso foram espacializados os modelos mensais de regressão linear múltipla desenvolvidos por Pedro Júnior et al. (1991) do tipo:

$$y_{ts} = a_t + b_tx_s + c_tx_2s \quad (17)$$

em que: y = temperatura média mensal máxima ou mínima ($^{\circ}C$); x = altitude do local (m); x_2 = latitude em minutos (valores positivos); a , b e c são os coeficientes estatísticos do modelo.

Os valores de altitude foram extraídos do modelo digital de elevação do terreno. A latitude é a coordenada y de cada ponto centróide. Os coeficientes angulares e o intercepto dos modelos de regressão múltipla estão apresentados na Tabela 5. Durante os meses de dezembro a março a temperatura é mais dependente do coeficiente angular da altitude e nos outros meses o coeficiente da latitude é quem intensifica o

resultado da temperatura. Informações mais detalhadas sobre modelos estimadores de temperatura do estado de São Paulo podem ser encontradas em Valeriano e Picini (2000) e Rodríguez-Lado et al. (2007).

Tabela 6 – Coeficientes dos modelos de regressão utilizados para a estimativa das médias mensais de temperatura máxima e mínima para o Distrito Florestal de Capão Bonito

Mês	Constante (a)		Coeficiente angular da altitude (b)		Coeficiente angular da latitude (c)	
	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin
Janeiro	38,47	26,82	-0,0075	-0,0058	-0,0030	-0,0035
Fevereiro	38,65	26,37	-0,0079	-0,0058	-0,0029	-0,0030
Março	41,30	27,29	-0,0077	-0,0059	-0,0052	-0,0042
Abril	47,63	26,42	-0,0075	-0,0057	-0,0112	-0,0056
Maio	48,76	24,88	-0,0070	-0,0058	-0,0137	-0,0064
Junho	49,81	26,19	-0,0068	-0,0059	-0,0154	-0,0084
Julho	51,51	26,05	-0,0070	-0,0057	-0,0164	-0,0088
Agosto	59,57	30,24	-0,0076	-0,0061	-0,0205	-0,0107
Setembro	63,40	33,93	-0,0067	-0,0062	-0,0230	-0,0119
Outubro	57,36	35,32	-0,0073	-0,0057	-0,0179	-0,0119
Novembro	48,68	32,21	-0,0078	-0,0058	-0,0109	-0,0089
Dezembro	43,83	29,21	-0,0077	-0,0059	-0,0074	-0,0057

Fonte: Pedro Júnior et al. (1991).

Com estes modelos obtiveram-se 12 mapas de temperatura máxima e 12 de temperatura mínima. Estes mapas foram chamados de temperaturas máximas ou mínimas potenciais. Foram aplicados também os mesmos modelos para a localidade de cada estação meteorológica.

Em seguida, foi calculada a razão entre os valores de temperatura potencial e os observados de cada mês (01/2002 - 12/2006) para cada estação meteorológica. Esta razão resultou em fatores de correção mensais de temperatura máxima e mínima para cada estação meteorológica. No ArcMap v.9.3 (ESRI, 2008) estes índices foram interpolados pelo método global de superfícies de tendência de terceira ordem. Este método aplica-se a atributos que apresentam variação suave e continua na paisagem (BURROUGH; MCDONNELL, 1998).

Foram aplicados os fatores de correção para cada mês das temperaturas potenciais máximas e mínimas, obtendo-se, por fim, os mapas finais de temperatura mensais.

3.3.2.3 Estimativa de geadas

Com base nos valores de temperatura mínima de cada local e da relação entre esta e a temperatura mínima de relva foram construídos mapas de dias de geadas mensais para o Distrito Florestal de Capão Bonito, conforme metodologia de Nicholas Coops (CSIRO, Melbourne, Austrália) de contabilizar o número de dias de geada por mês (eq. 18) (WARING; MCDOWELL, 2002).

$$N_g = 11,6 + (-2 \times T_{min}) \rightarrow R^2 = 0,83 \quad (18)$$

em que: N_g = número de dias de geadas no mês; T_{min} = média das temperaturas mínimas do mês ($^{\circ}\text{C}$).

O primeiro passo foi aplicar uma equação linear (eq. 19) que relaciona a temperatura mínima registrada no abrigo meteorológico e a temperatura observada na relva em noites de geada. Esta equação foi obtida por Sentelhas et al. (1995) na região de Manduri (SP), a mais próxima da área de estudo. Considerou-se, desta forma, noite de geada, a noite com temperatura mínima registrada no abrigo meteorológico menor que $3,5^{\circ}\text{C}$.

$$T_{relva_{ts}} = -4,42 + (1,27 \times T_{min_{ts}}) \rightarrow n = 17; R^2 = 0,68 \quad (19)$$

em que: T_{relva} = temperatura estimada na relva ($^{\circ}\text{C}$); T_{min} = temperatura mínima registrada no abrigo meteorológico ($^{\circ}\text{C}$).

Desse modo, elaborou-se um banco de dados de dias de geadas e a média da temperatura mínima mensal em todas as estações meteorológicas utilizada no presente trabalho. Com o uso do banco de dados construiu-se uma equação, semelhante a eq. (18), para contabilizar os dias de geadas por mês para a área de estudo, possibilitando assim elaborar mapas mensais de geadas.

3.3.2.4 Estimativa da umidade relativa

O método para espacializar a umidade relativa mensal foi semelhante ao método da temperatura, isto é, elaboraram-se mapas empíricos de umidade relativa (eq. 20, 21 e 22) corrigindo-os posteriormente pelos fatores obtidos entre os valores potenciais e os observados das estações meteorológicas, e em seguida interpolados e aplicados aos valores potenciais para gerar a variabilidade mensal real em toda a superfície. Seguiu-se a metodologia de estimativa da umidade relativa proposta por Allen et al. (1998):

$$e_{a_{ts}} = 0,6108 \times e^{\left[\frac{(17,27 \times T_{min_{ts}})}{(T_{min_{ts}} + 237,3)}\right]} \quad (20)$$

em que: e_a = pressão parcial de vapor de água no ar (kPa); T_{min} = temperatura mínima do ar ($^{\circ}\text{C}$).

$$e_{s_{ts}} = \frac{\left(0,6108 \times e^{\left[\frac{(17,27 \times T_{max_{ts}})}{(T_{max_{ts}} + 237,3)}\right]}\right) + \left(0,6108 \times e^{\left[\frac{(17,27 \times T_{min_{ts}})}{(T_{min_{ts}} + 237,3)}\right]}\right)}{2} \quad (21)$$

em que: e_s = pressão de saturação de vapor de água no ar (kPa); T_{max} = temperatura máxima do ar ($^{\circ}\text{C}$); T_{min} = temperatura mínima do ar ($^{\circ}\text{C}$).

$$UR_{ts} = \left(\frac{e_{a_{ts}}}{e_{s_{ts}}}\right) \times 100 \quad (22)$$

em que: UR = umidade relativa do ar (%).

3.3.2.5 Estimativa da precipitação

Os valores de precipitação mensais observados nas estações meteorológicas utilizadas nesse estudo foram interpolados no ArcMap v.9.3 (ESRI, 2008), pelo método

global de superfícies de tendência de terceira ordem, para elaboração de mapas de precipitação.

3.3.3 Entrada de dados edáficos

As variáveis edáficas estudadas e computadas no modelo 3-PGIS estão apresentadas na Tabela 7. Os valores do índice de fertilidade do solo e capacidade de água disponível foram observados e estimados, com dimensão apenas espacial. Os coeficientes da equação do modificador fisiológico de água no solo (déficit de razão de umidade do solo e sua potência) foram estimados com base na textura do solo (SANDS, 2001), apresentando variação espacial. Os parâmetros de fertilidade foram utilizados conforme literatura (SANDS, 2002).

Tabela 7 – Parâmetros e variáveis de estado referente ao solo do Distrito Florestal de Capão Bonito

Variável/parâmetro	Valor	Unidade	Ref.	Método		Dimensão		
				Est	Obs	A	T	S
Índice de fertilidade do solo (I.F.)	eq. 23	-		x	x			x
Capacidade de água disponível	eq. 24 e 25	mm/m		x	x			x
Déficit de razão de umidade para $f\theta=0,5$	eq. 27	-		x				x
Potência do déficit de razão de umidade	eq. 27	-		x				x
Valor de m quando I.F. = 0	0	-	C1	x		x		
Valor de f_{nut} quando I.F. = 0	1	-	C1	x		x		

Est = Estimado; Obs = Observado. C1 = Sands (2002)

3.3.3.1 Índice de fertilidade do solo

Este índice é considerado um modificador ambiental no modelo 3-PG e expressa a fertilidade do solo local. Seu valor varia de 0 a 1, representando, respectivamente, solos nutricionalmente limitantes até os não limitantes. Seu valor na literatura é muito subjetivo (SILVA, 2006). Desta forma foi elaborado um método para estimar o índice de fertilidade dos solos do Distrito Florestal de Capão Bonito.

Novais et al. (1986) propuseram uma tabela (aqui transformados em gráficos, Figura 62) de interpretação de análise do solo para o eucalipto. Os valores dos níveis críticos de manutenção referem-se aos teores necessários para manter certa

produtividade durante a rotação. Observa-se que os valores críticos de Ca, Mg, P e K aumentam linearmente com o aumento da produtividade esperada.

Figura 62 – Valores de níveis críticos de manutenção de Ca, Mg, P e K no solo para o crescimento de eucalipto (NOVAIS et al., 1986)

Seguindo essa linha de análise foi elaborada uma regressão entre a CTC efetiva e o volume de madeira com casca (VCC, m³ ha⁻¹) para as parcelas amostradas e então uma nova regressão estimando o valor do índice de fertilidade do solo com base na CTC, conforme o modelo abaixo:

$$(23)$$

em que: $y_{1s} = VCC$ (m³ ha⁻¹); $x_{1s} = CTC$ efetiva (mmol_c kg⁻¹); y_{1s} = índice de fertilidade do modelo; a e b são os coeficientes do modelo.

3.3.4.2 Estimativa de água no solo

A capacidade de retenção de água dos solos foi calculada conforme a eq. (24). Os valores de capacidade de campo e ponto de murcha permanente de cada solo foram obtidos com os resultados das análises laboratoriais relatada acima. A profundidade efetiva dos solos (Tabela 8) foi estimada de acordo com observações nos perfis de solos e dados dos relatórios pedológicos (GONÇALVES, 1997; RIZZO, 2001). As figuras 26 a 44 apresentam uma idéia da profundidade efetiva dos solos do Distrito Florestal de Capão Bonito.

$$CAD_s = (Cc_s - Pm_s) \times 1000 \times p_s \quad (24)$$

em que: CAD = capacidade de água disponível (mm); Cc = Capacidade de campo (cm^{-3} água cm^{-3} solo, potencial -0,01 MPa); Pm = Ponto de murcha permanente (cm^{-3} água cm^{-3} solo, potencial -1,5 MPa); p = profundidade do solo (m).

Tabela 8 – Profundidade efetiva de cada tipo de solo do Distrito Florestal de Capão Bonito

Solo	Profundidade efetiva (m)
LVd1; LVd2	3
LVAd1, LVAd2, LVAd3	2,5
LVd3	2
PVAd1, PVAd2, PVd1, PVd3	1,5
CXbd1, CXbd2	1

O modificador fisiológico de água no solo ($f\theta$) é apresentado na eq. (25) e a sua variação nos diferentes tipos de solos é apresentada na Figura 63 (SANDS, 2001).

$$f(\theta)_{ts} = \frac{1}{1 + \left[\frac{\left(1 - \frac{\theta_{ts}}{\theta_{xs}}\right)^{n\theta_s}}{c\theta_s} \right]} \quad (25)$$

em que: f_θ = modificador de água no solo; θ = quantidade de água atual no solo (mm); θ_x = CAD (mm); n_θ = Potência do déficit de razão de umidade; c_θ = Déficit de razão de umidade para $f_\theta=0,5$.

Figura 63 – Relações entre a razão de água no solo (θ/θ_x – solo seco = 1 até solo saturado) e a variação do modificador fisiológico de água no solo em diferentes texturas

Os parâmetros n_θ e c_θ foram estimados para toda a área do Distrito Florestal com base em regressão exponencial onde o teor de argila (g kg^{-1}) é a variável independente (eq. 26). Esta extrapolação baseou-se em dados obtidos em Sands (2001).

$$y_s = a \times e^{\left[\frac{b}{(x_s+c)}\right]} \quad (26)$$

em que: $y = n_\theta$ ou c_θ ; $x = \text{teor de argila } (\text{g kg}^{-1})$; a b e c são os coeficientes do modelo.

3.3.4 Parâmetros genéticos e fisiológicos

Os parâmetros genéticos e fisiológicos computados no modelo 3-PGIS são apresentados nas Tabelas 9 a 13. As variáveis densidade da madeira, máxima biomassa do fuste, fração galho+casca para idade inicial e madura, e o coeficiente e potência da equação do DAP para massa lenhosa foram equacionadas e calibradas para as condições estudadas. Os outros parâmetros foram obtidos em literatura (SANDS, 2002; SANDS; LANDSBERG, 2002; STAPE, 2002; ALMEIDA et al., 2004; SILVA, 2006).

Tabela 9 – Parâmetros e variáveis de estado referente ao fuste e a copa do modelo 3-PGIS

Variável/parâmetro	Valor	Unidade	Ref.	Método		Dimensão		
				Est.	Obs.	A	T	S
PPL/PPB	0,5	-	C1	x		x		
Densidade da madeira	Eq. 28 a 34	kg m ⁻³		x	x			x
Máx. biomassa fuste para 1.000 fustes ha ⁻¹	Eq. 35	kg arv ⁻¹		x	x			x
Eficiência quântica do dossel	0,07	C PAR ⁻¹	C2	x		x		
Condutância estomática máxima	0,01	m s ⁻¹	C1	x		x		
Condutância máxima dossel	0,02	m s ⁻¹	C3	x		x		
Coeficiente resposta do estômato ao DPV	0,50	1 kPa ⁻¹	C3	x		x		
Camada delimitação condutância dossel	0,20	m s ⁻¹	C3	x		x		
Fração casca + galho para idade inicial	Eq. 36	-			x			x
Fração casca + galho para idade madura	Eq. 36	-			x			x
Idade intermediária fração casca + galho	2	ano	C1	x				x
Área foliar específica idade inicial	11	m ² kg ⁻¹	C1	x		x		
Área foliar específica idade madura	8	m ² kg ⁻¹	C1	x		x		
Idade intermediária área foliar específica	2,5	ano	C1	x		x		
Coeficiente de extinção de luz	0,50	-	C3	x		x		
Idade fechamento dossel	0	ano	C3	x		x		
Proporção chuva intercepta e evaporada	0,15	-	C1	x		x		
Albedo do dossel	0,20	-	C1	x		x		

Est = Estimado; Obs = Observado. C1 = Stape (2002); C2 = Almeida et al. (2004); C3 = Sands e Landsberg (2002)

Tabela 10 - Parâmetros referentes ao folheto do modelo 3-PGIS

Variável/parâmetro	Valor	Unidade	Ref.	Método		Dimensão		
				Est.	Obs.	A	T	S
Taxa máxima folheto	0,10	1 mês ⁻¹	C1	x		x		
Taxa de folheto para idade inicial	0,001	1 mês ⁻¹	C2	x		x		
Idade intermediária taxa de folheto	4	ano	C2	x		x		
Taxa de renovação radicular mensal	0,015	1 mês ⁻¹	C3	x		x		

Est = Estimado; Obs = Observado. C1 = Silva (2006); C2 = Stape (2002); C3 = Sands e Landsberg (2002)

Tabela 11 - Parâmetros alométricos do modelo 3-PGIS

Parâmetro	Valor	Unidade	Ref.	Método		Dimensão		
				Est.	Obs.	A	T	S
Fração máxima de PPL para raízes	0,5	-	C1	x		x		
Fração mínima de PPL para raízes	0,1	-	C1	x		x		
Partição folhas e fustes DAP=2	1	-	C2	x		x		
Partição folhas e fustes DAP=20	0,18	-	C2	x		x		
Coeficiente massa lenhosa / Eq. DAP	eq. 41	-		x	x			x
Potência massa lenhosa / Eq. DAP	eq. 41	-		x	x			x

Est = Estimado; Obs = Observado. C1 = Silva (2006); C2 = Sands e Landsberg (2002)

Tabela 12 - Parâmetros do efeito da temperatura do modelo 3-PGIS

Parâmetro	Valor	Unidade	Ref.	Método		Dimensão		
				Est.	Obs.	A	T	S
Máxima temperatura para crescimento	40	°C	C1	x		x		
Ótima temperatura para crescimento	25	°C	C1	x		x		
Mínima temperatura para crescimento	8	°C	C1	x		x		
Dias perdidos por dia de geada	0	n	C2	x		x		

Est = Estimado; Obs = Observado. C1 = Stape (2002); C2 = Sands e Landsberg (2002)

Tabela 13 - Parâmetros referentes ao efeito da idade do modelo 3-PGIS

Parâmetro	Valor	Unidade	Ref.	Método		Dimensão		
				Est.	Obs.	A	T	S
Idade máxima do talhão	50	ano	C1	x		x		
Coeficiente do modificador da idade	4	-	C1	x		x		
Divisor do efeito da idade para fage=0,5	0,95	-	C1	x		x		

Est = Estimado; Obs = Observado. C1 = Stape (2002)

3.3.4.1 Variável densidade da madeira

O volume de lenho com casca e sem casca e o volume de casca das árvores abatidas foram estimados utilizando-se a equação de Smalian, conforme as eq. (27, 28, 29 e 30).

$$g_{xx} = \frac{[\pi \times d_{xx}^2]}{40.000} \quad (27)$$

em que: g_{xx} = área transversal na base do torete com ou sem casca (m^2); d_{xx} = diâmetro do torete com ou sem casca (cm).

$$v_p = \frac{[g_{100\%} \times (h_t - h_c)]}{3} \quad (28)$$

em que: v_p = volume da ponta da árvore (m^3); $g_{100\%}$ = área transversal na base do torete com ou sem casca (m^2); h_t = altura total (m); h_c = altura comercial (m).

$$v_{xx} = 1,3 \times \frac{(g_{0\%} + g_{DAP})}{2} + (1 - 1,3) \times \frac{(g_{DAP} + g_{25\%})}{2} + 1 \times \left[\left(\frac{g_{25\%} + g_{100\%}}{2} \right) + g_{50\%} + g_{75\%} \right] + v_p \quad (29)$$

em que: v_{xx} = volume com ou sem casca (m^3); g_{xx} = área transversal na base do torete com ou sem casca (m^2); l = comprimento do torete (m).

$$V_c = V_{cc} - V_{sc} \quad (30)$$

em que: v_c = volume de casca (m^3); v_{cc} = volume com casca (m^3); v_{sc} = volume sem casca (m^3).

A densidade básica das amostras (cunhas) nas diferentes posições (xx) do fuste foi determinada em balança hidrostática e utilizada a seguinte equação:

$$D_{Bxx} = \frac{P_s}{\frac{P_U - P_I}{\rho_{H_2O}}} \quad (31)$$

em que: D_B = densidade básica na posição xx ($g\ cm^{-3}$); P_s = massa seca (g); P_U = massa úmida (g); P_I = massa submersa (g); ρ_{H_2O} = densidade da água ($g\ cm^{-3}$).

A densidade básica ponderada por árvore foi estimada pela equação abaixo:

$$D_B = \frac{\sum_{0\%}^{100\%} (v_{scxx} \times D_{Bxx})}{\sum_{0\%}^{100\%} v_{sc}} \quad (32)$$

em que: D_B = densidade básica da árvore ($g\ cm^{-3}$); v_{scxx} = volume sem casca do torete xx (m^3); v_{sc} = volume sem casca da árvore (m^3).

Em seguida elaborou-se uma relação (eq. 33) entre a densidade básica da árvore e o teor de argila + silte (%), para possibilitar a construção de um mapa de densidade básica para este material genético em todo Distrito Florestal.

$$y_s = a + b \times e^{(-c \times X_s)} \quad (33)$$

em que: y = densidade básica ($g\ cm^{-3}$); x = teor de argila + silte (%); a , b e c são os coeficientes do modelo.

3.3.4.2 Variável máxima biomassa de fuste

Esse parâmetro foi obtido relacionando-se os valores médios de biomassa de fuste mensurada nas parcelas e o teor de argila + silte (%). Pois, entende-se que as parcelas de inventário selecionadas são provenientes de povoamentos de eucalipto implantados e manejados com alto padrão tecnológico. Desta forma, assumisse que a biomassa de fuste atual e mensurada nas parcelas é a máxima obtida no sítio florestal. A equação utilizada foi a exponencial do tipo:

$$y_s = a + b \times [1 - e^{(-c \times X_s)}] \quad (34)$$

em que: y = máxima biomassa de fuste (kg árvore^{-1}); x = teor de argila + silte (%); a b e c são os coeficientes do modelo.

3.3.4.3 Variável fração casca + galho

O parâmetro fração casca + galho ($\text{fbf} = \text{branch} + \text{bark fraction}$) na idade inicial (2 anos) e idade considerada madura (6 anos) foram calculados com base nos dados de biomassa de lenho, galho e casca (eq. 35). Além disso, no modelo 3-PG é requisitado a idade da árvore em que o valor da fração é considerado intermediário.

$$\text{fbf}_i = \frac{(B_C + B_G)}{(B_L + B_C + B_G)} \quad (35)$$

em que: fbf_i = fração casca+galho (na idade i); B_C = biomassa de casca (kg árvore^{-1}); B_G = biomassa de galho (kg árvore^{-1}); B_L = biomassa de lenho (kg árvore^{-1}).

A variável calculada para a idade inicial (fbf_1) e a considerada madura (fbf_2), foi então relacionado com a $\text{CTC}_{\text{efetiva}}$ (eq. 36) para compor mapas destes parâmetros nas duas idades requeridas.

$$y_s = a + b \times [1 - e^{(-c \times X_s)}] \quad (36)$$

em que: y = fração casca + galho (fbb); x = $CTC_{efetiva}$ ($mmol_c\ kg^{-1}$); a , b e c são os coeficientes do modelo.

Para a obtenção da biomassa do compartimento lenho, casca, galho e folha foi utilizado o modelo (eq. 37) de Clutter (1980) ajustado para árvores com 6 anos de idade, abatidas e cubicadas, do material genético C219H no Distrito Florestal de Capão Bonito.

$$Bi = a \times DAP^b \times H^c \quad (37)$$

Onde: Bi = biomassa do compartimento i da árvore ($kg\ árvore^{-1}$); DAP = diâmetro à altura do peito (cm); H = altura total (m); a , b e c são os coeficientes do modelo.

3.3.4.4 Variável da massa lenhosa (Equação DAP)

Os parâmetros de massa lenhosa da equação DAP foram calculados conforme a eq. (38), para dados organizados conforme a textura do solo (Tabela 14). Esta tabela organiza os dados de biomassa dos diferentes compartimentos da árvore em função da textura do solo.

$$y = ax^b \quad (38)$$

em que: y = biomassa (lenho + casca + galho); x = DAP (cm); a = (Coeficiente massa lenhosa); b (Potência massa lenhosa).

Tabela 14 – Sítios (parcelas) amostrados organizados segundo o seu teor de argila no solo e o número de árvores abatidas

Sítio (parcela)	Argila ($g\ kg^{-1}$)	Árvores (n)
PVA1-PR-19.62; PVA1-PR-18.75; LV1-SR-11.36; LVA2-TO-18.40; PVA1-PR-9.70; LV1-SR-10.33; LVA2-TO-17.37; LV2-BV-21.67	< 200	24
PVA1-PR-18.73; LVA2-TJ-7.67; LV2-PR-11.85; PVA1-PR-8.69; LVA2-TO-18.39; LV2-BV-18.58; LV2-TO-13A.29	200 < argila < 430	21
LVA2-TO-4.9; LV1-SR-17.43; LV2-CT-27A.125; LV1-SR-39.96; LV1-SR-31.75	> 430	15

3.3.5 Cálculo da biomassa inicial do modelo

O modelo 3-PGIS foi ajustado para iniciar os cálculos em janeiro de 2002, dado que dispomos de informações do inventário a partir dos 2 anos de idade.

Os dados de biomassa iniciais do fuste (lenho + casca + galho) e folha do modelo 3-PGIS foram determinados em campo e laboratório. A biomassa de raiz foi considerada como sendo 25% da biomassa do fuste (SHEPHERD, 1985).

Com as equações de biomassa ajustadas, foram construídos mapas de DAP (cm) e altura (m) média das árvores em toda área de estudo. Para isso ajustou-se duas equações hiperbólicas (eq. 39). Uma relacionando o DAP médio das parcelas amostradas aos dois anos com o teor de argila nos solos das mesmas. Uma segunda equação relacionou o DAP com a altura das parcelas amostradas para todos os anos de medição.

$$y_{1,2} = y_0 + \left(\frac{a \times X_{1,2}}{X_{1,2} - b} \right) \quad (39)$$

em que: y_1 = DAP (cm); y_2 = altura (m); x = DAP médio das parcelas aos dois anos (cm); x_1 = teor de argila (%); x_2 = DAP médio das parcelas para cada ano de medição (cm); a e b são os coeficientes do modelo 1 e 2.

3.3.6 Validação do Modelo 3-PGIS

A demonstração de validação do modelo foi realizada confrontando resultados simulados no modelo 3-PGIS com dados do inventário florestal contínuo. As variáveis de estado DAP (cm), volume total com casca (VTCC, $m^3 \text{ ha}^{-1}$), incremento médio anual (IMA, $m^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e matéria seca da parte aérea (MS, $Mg \text{ ha}^{-1}$) foram utilizadas para realizar essa comparação e julgar o modelo ajustado para as condições do Distrito Florestal de Capão Bonito. Foram utilizados os seguintes indicadores estatísticos: i) erro em porcentagem, para cada ano de medição; ii) coeficiente de correlação de Pearson (r); iii) teste de hipótese de qui-quadrado ($\alpha = 0,05$); iv) índice de confiança “c”. O índice de confiança “c” (CAMARGO; SENTELHAS, 1997) é o produto da multiplicação dos

índices de precisão “r” (coeficiente de correlação de Pearson) e de exatidão “d” (WILLMOTT et al., 1985). A interpretação do índice “c” é apresentada na Tabela 15.

Tabela 15 – Critério de interpretação do desempenho do modelo 3-PGIS pelo índice de confiança “c”

Valor de “c”	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sufrível
0,41 a 0,50	Mau
≤ 0,40	Péssimo

3.5 Produtividade e qualidade de sítio de Capão Bonito

Com o modelo 3-PGIS calibrado para as condições edafoclimáticas de Capão Bonito determinaram-se, entre outras variáveis de estado, os dados mensais (2002 a 2006) da produção de madeira, do incremento médio anual e do incremento corrente anual.

Foi utilizado o conceito de que o mapa de produtividade é a informação mais completa para se visualizar a variabilidade espacial das culturas (MOLIN, 2002). Desta forma, os mapas de produtividade foram usados para compor um mapa de qualidade de sítio de Capão Bonito, uma analogia entre a definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade, termo usado na agricultura de precisão, e o termo qualidado de sítio usado na silvicultura de precisão.

O método basicamente consiste em calcular as produtividades normalizadas para cada tempo (mês) com informação da produção. Para tanto se calculou a produtividade média da área do Distrito Florestal para cada mês e a partir dela a porcentagem de cada célula em relação a esta média. Deste modo, obteve-se para os 60 meses a produtividade normalizada para as 28.060 células. Em seguida, calculou-se a média de todos os meses obtendo-se a produtividade normalizada média para cada célula.

Definiram-se os limites para as clases de qualidade de sítio de Capão Bonito conforme valores da produtividade de cada célula:

- Baixa qualidade de sítio: local com produtividade abaixo de 85% da média do Distrito Florestal;
- Média-baixa qualidade de sítio: local com produtividade entre 85% e 100% da média do Distrito Florestal;
- Média-alta qualidade de sítio: local com produtividade entre 100% e 115% da média do Distrito Florestal;
- Alta qualidade de sítio: local com produtividade acima de 115% da média do Distrito Florestal.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Relevo

A amplitude hipsométrica do Distrito Florestal é de aproximadamente 160 m, variando da cota de 580 à de 740 m (Figura 64). A legenda de cores elaborada permite observar, em verde-claro, os vales dos rios das Almas e do Paranapanema e os seus principais afluentes. As distribuições de frequência dos principais atributos do relevo estão apresentadas na Figura 65. Predominam as classes intermediárias de altitude, entre 620 e 720 m, conforme indica a distribuição normal da Figura 65a, com média, moda e mediana igual a, respectivamente, 670, 678 e 670 m. A Figura 66 apresenta as altitudes média, mínima e máxima absolutas de cada um dos 25 projetos do Distrito Florestal. Observa-se que os projetos da Regional Boa Esperança apresentam a maior altitude. Por outro lado, as Regionais Santa Inês e Paranaquitanga apresentam a menor média hipsométrica. Canavesi e Ponzoni (2010), trabalhando na mesma área de estudo, apontaram a importância da disponibilidade de dados topográficos de boa qualidade. Os autores tiveram que recorrer a outras fontes de dados de altimetria da região, como Valeriano (2004), porém com qualidade inferior à apresentada na Figura 64. Nesse mesmo sentido, Braga et al. (1999) concluíram que as características fisiográficas, como a altitude, a declividade e a orientação de vertentes, que representam, indiretamente, os fatores de ação sobre o crescimento do povoamento, devem ser observadas, prioritariamente, na seleção das áreas para a implantação e a manutenção de florestas comerciais de eucalipto. Dalaqua (2010) também aponta a elaboração de um adequado modelo digital de elevação como fundamental para o planejamento florestal e para o mapeamento de áreas de preservação permanente e de reserva legal.

Figura 64 – Modelo digital de elevação do terreno do Distrito Florestal de Capão Bonito

Figura 65 – Distribuição de frequência da altitude (a), da declividade (b) do aspecto (orientação da vertente) (c)

O mapa da declividade (Figura 67) apresenta um histograma de distribuição assimétrica positiva (moda = $2,8^\circ$, mediana = $3,7^\circ$ e média = $4,4^\circ$) (Figura 65b). Dessa forma, destaca-se que, no Distrito Florestal de Capão Bonito, predominam terrenos com baixa declividade, de topografia pouco movimentada e de relevo suave de ondulado ($< 4,5^\circ$) a ondulado ($4,5 < \text{declive} < 11,3^\circ$). A Figura 68 ilustra que, na Regional Santa Fé, com exceção do projeto Lavrinhas (Embasamento Cristalino), há predomínio de topografia suave ondulada, onde a inclinação do terreno abaixo dos 5° prevalece em 70 a 85 % da área. Observando-se as Figura 67 e 68, conjuntamente com a Figura 25, torna-se evidente que os projetos onde predominam os relevos mais movimentados

(registrados pelas declividades mais elevadas) são aqueles que apresentam solos pedologicamente menos desenvolvidos. Por exemplo, Açude do Lobo (51,8 % em Cambissolo e Argissolo), Lavrinhas (43,5 % em Cambissolo e Argissolo), Lageado (39,3 % de Cambissolo), Correias (29,6 % de Cambissolo), Mangueirinha (26,7 % de Cambissolo) e Torre (23,3 % em Cambissolo e Argissolo). Por outro lado, nos projetos predominantemente planos (Figura 68), prevalecem os solos bem desenvolvidos e pedologicamente estáveis, como Água Branca (100 % de Latossolo), Boa Vista (100 % de Latossolo), Retiro (100 % de Latossolo), Grupo (100 % de Latossolo), Cemiterinho (98,4 % de Latossolo), Capão Alto (98 % de Latossolo), Tijuco (97,8 % de Latossolo) e São Roque (94,2 % de Latossolo). Essas relações também podem ser observadas nas Figuras 27a, 29, 31, 33, 35, 37, 39, 41a, 42, 43, 45, 46, que mostram a evidente influência do relevo na pedogênese. Em pesquisa em parte da área de estudo, no projeto Campo de Pouso, Ferraz et al. (2007) também encontraram grande variação na declividade do terreno, o que resultou no mapeamento de trechos críticos de estradas suscetíveis ao escoamento superficial.

Figura 66 – Ocorrência do atributo topográfico altitude para os projetos do Distrito Florestal de Capão Bonito

Figura 67 – Mapa da declividade do Distrito Florestal de Capão Bonito

Figura 68 – Ocorrência, em porcentagem, do atributo topográfico declividade (em grau) para os projetos do Distrito Florestal de Capão Bonito

A Figura 65c apresenta a distribuição de frequência do atributo topográfico orientação das vertentes. Na região, predominam terrenos com faces voltadas para o norte ($N < 45^\circ$ e $N > 315^\circ$), com aproximadamente 35% de ocorrência. Terrenos com orientação leste ($45^\circ < L < 135^\circ$) e oeste ($315^\circ < W < 225^\circ$) equilibram-se com, respectivamente, 25 e 23% das vertentes. A orientação sul ($225^\circ < S < 135^\circ$) representa os 17% restantes da área. Essa configuração do relevo influencia principalmente a distribuição de energia da radiação solar, tendo efeito direto na produção primária. Os efeitos secundários dessas relações são as variações microclimáticas locais (temperatura, umidade relativa, evapotranspiração, balanço hídrico e geada), exigindo respostas fisiológicas em diferentes graus de estresse. A Figura 70 registra a porcentagem de ocorrência da orientação norte, sul, leste e oeste nos projetos de Capão Bonito. Verifica-se que há predomínio de terrenos com face norte na maioria das áreas, devido ao sentido de orientação dos principais canais de drenagem. Os projetos Deserto, Prainha, Inglês, Mangueirinha, Correias, Paranapanema, Água Branca e Retiro são os que apresentam maior porcentagem do relevo voltado para o sul, acima de 20% de ocorrência. Ortiz (2003), utilizando o mapa de orientação de vertentes para a estimativa da produtividade do *Eucalyptus*, na região de Paraibuna, concluiu que a face sul da área de estudo apresentou a menor produtividade, devido à menor incidência da radiação solar. Da mesma forma, Simões (1989) observou que se deve evitar a instalação de viveiros em vertentes de face sul, onde os terrenos apresentam menos luminosidade e são mais sujeitos a ventos frios. Avaliando os efeitos ambientais sobre o índice de sítio (IS), aos 10 anos, de *Pinus patula* na África do Sul, Louw e Scholes (2006) concluíram que a posição topográfica, como a inclinação e a orientação das vertentes, apresentaram boa correlação como o IS e que tais relações refletem, indiretamente, a influência da umidade e da nutrição do solo.

Figura 69 – Mapa de orientação das vertentes do Distrito Florestal de Capão Bonito

Figura 70 – Ocorrência, em porcentagem, do atributo topográfico orientação das vertentes para os projetos do Distrito Florestal de Capão Bonito

A geometria das vertentes (Figura 71) predominante no Distrito Florestal de Capão Bonito é a retilínea nos sentidos vertical e horizontal, com aproximadamente 42% da área. No geral, o formato retilíneo no sentido horizontal ocorre em 67% dos terrenos da área. As geometrias convexa-côncava e côncava-convexa são as menos expressivas, com apenas 3% de ocorrência. Nas Áreas de Preservação Permanente dos canais de drenagem, as geometrias côncava-côncava e côncava-retilínea somam 50% do formato do relevo. Nas Áreas de Preservação Permanente, no entorno das nascentes, o formato predominante é a côncava no sentido horizontal (55%), somando a geometria côncava-côncava 30% desse tipo de terreno nesses locais, de relevos mais suscetíveis à erosão.

Figura 71 – Geometria das vertentes do Distrito Florestal de Capão Bonito

4.2 Estimativa da Radiação Solar

A Figura 72 apresenta os resultados da radiação solar extraterrestre e os seus efeitos, determinados pelo relevo e pela época do ano. A Figura 72a é composta por resultados da eq. (8), onde o relevo é considerado plano, portanto, sem declividade e

ausência de orientação. Observa-se que há um gradiente de energia solar incidente, relacionado à latitude. Esta é a única fonte de variação da radiação dentro do mesmo passo (mês). Quando o efeito topográfico é computado (eq. 10), a distribuição da radiação solar passa a ser governada, localmente, segundo os atributos do relevo, como a declividade e o aspecto, além do ângulo zenital e do azimute solar. O impacto dessa real consideração está apresentado na Figura 72b (resultados da eq. 10). O mapa aproxima-se muito do modelo digital de elevação do terreno. As faces voltadas para o sul ($225^\circ < S < 135^\circ$) foram as mais afetadas. Os valores da radiação, nesses locais, foram drasticamente reduzidos. Essas áreas podem ser identificadas pela cor mais amarelada no mapa (Figura 72b). O resultado da correção do relevo, para o cálculo da radiação solar, apresenta efeitos diferentes no ciclo anual, reproduzidos em duas épocas do ano, dezembro e junho. Os resultados desses efeitos podem ser observados nas Figuras 72c e 72d. Para o mês de dezembro, o efeito do relevo é reduzido, pois, nessa época, a declinação solar atinge seu mínimo valor, que é de $-23,5^\circ$, aproximando-se do valor da latitude local. Nesse mês, o relevo exerce efeitos abaixo de 1% na maior parte da área. Apenas terrenos com maior declividade é que evidenciam efeitos de até 7,7%. Já no mês de junho, quando a declinação solar atinge seu máximo valor, que é de $23,5^\circ$, as consequências da declividade e da orientação do terreno são elevadas. O mínimo efeito observado na Figura 72d foi de 11,6% para as faces norte. O efeito chega a 147% nas faces sul, isto é, reduzindo-se a radiação solar em 2,47 vezes em relação ao relevo plano do mesmo local. Coops et al. (2007), estudando o crescimento e a produtividade no modelo 3-PG da espécie *Pseudotsuga* (Douglas-fir), na região de Vancouver, no Canadá, também avaliaram o efeito da topografia sobre a radiação solar incidente e verificaram que as encostas mais expostas ao sul apresentaram maiores ganhos de radiação. Na Inglaterra, Waring (2000) também verificou alta sensibilidade do modelo 3-PG, na estimativa do crescimento de *Picea sitchensis*, quando o relevo foi incorporado no cálculo da radiação solar. Os resultados convergem para os obtidos por Fernandes Filho e Firme Sá (2007), os quais estudaram a distribuição da radiação solar em áreas de plantios de eucaliptos na região de Antônio Dias (MG) e concluíram que as faces voltadas para o norte receberam os maiores valores de radiação incidente.

Figura 72 – Mapas de radiação solar e os efeitos do relevo da época do ano. Radiação solar extraterrestre sem o efeito do relevo (Resultados da eq. 8) (a). Radiação solar extraterrestre com o efeito do relevo (Resultados da eq. 10) (b). Efeito (porcentagem) da correção do relevo para o mês de Dezembro (c). Efeito (porcentagem) da correção do relevo para o mês de Junho (d)

A Figura 73 demonstra a diferença entre a incidência horária de radiação solar e a total diária para os solstícios e equinócios, simulando a radiação solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$) em quatro pontos (talhões), ou situações topográficas, na Regional Paranapitanga. Os talhões apresentam praticamente a mesma latitude e longitude, variando apenas a declividade e a sua orientação. A disponibilidade energética para os talhões variou

muito com o local e o período do ano. Nas datas dos equinócios, dia 21 de março (Figura 73a) e 21 de setembro (Figura 73c), isto é, quando a declinação solar é zero, a magnitude da radiação solar, nessas duas datas, é praticamente a mesma. Nessas épocas, o talhão norte apresentou radiação 12% maior do que os talhões leste e oeste. Em relação ao talhão sul, esse valor aproxima-se dos 20%. Isso significa que, nos meses de março e setembro, a radiação incidente no talhão norte é de $18,4 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ($1.270 \text{ mol m}^2 \text{ mês}^{-1}$ de radiação fotossinteticamente ativa - RFA), de $16,5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ($1.139 \text{ mol m}^2 \text{ mês}^{-1}$) no talhão leste e oeste e de $15,4 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ($1.062 \text{ mol m}^2 \text{ mês}^{-1}$) no talhão sul. Em Capão Bonito, o equinócio é o período anual em que o efeito do relevo, sobre a incidência da radiação, é considerado de média intensidade.

Na região estudada, o efeito do relevo sobre a radiação global, nas datas dos solstícios, é considerado extremo. No solstício de inverno, dia 21 de junho (Figura 73b), quando a declinação solar é de $23^\circ 27'$, observa-se que a diferença energética entre os talhões norte e sul é máxima. O primeiro supera em quase 60% a radiação solar do segundo (Figura 73b), o que significa que, no talhão norte, ocorreu em média a incidência de $10,8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ($745 \text{ mol m}^2 \text{ mês}^{-1}$) e de $6,8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ($469 \text{ mol m}^2 \text{ mês}^{-1}$) no talhão sul. No solstício de verão, dia 21 de dezembro (Figura 73d), registrado pela máxima declinação solar, o relevo tem efeito praticamente nulo no total diário de incidência de radiação global. A radiação atinge a sua máxima intensidade nessa época do ano. Da mesma forma, Coops et al. (2007) verificaram que a distribuição horária da radiação solar é fortemente governada pelas características das vertentes. No verão canadense, os autores concluíram que, numa mesma declividade, vertentes orientadas ao sul receberam 57% mais radiação solar que vertentes orientadas ao norte e nordeste da área de estudo.

É interessante notar que a radiação solar nos talhões leste e oeste difere apenas na sua variação horária. O total de radiação solar desses talhões é praticamente o mesmo nas datas observadas. A diferença entre eles é intrínseca ao horário (ângulo zenital). No intervalo de tempo entre o crepúsculo matinal e o meio-dia, o talhão leste recebe mais radiação e, desse instante até o crepúsculo vespertino, o talhão oeste é favorecido. É importante observar também a variação do fotoperíodo ao longo do ano, descrita no eixo x das Figuras 73a, 73b, 73c e 73d.

Figura 73 – Estimativa da distribuição horária ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$) e integral diária ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$), para um dia normal e sem nebulosidade, da radiação solar global sobre pontos da superfície de 4 talhões da Regional Paranaipitanga do Distrito Florestal de Capão Bonito em 4 datas meteorológicas importantes: Equinócios de Outono (a) e de Primavera (c) e os Solstícios de Inverno (b) e de Verão (d). Norte = Talhão 18 Projeto Rancho (aspecto = 359, declividade = 14,5°, longitude = 48,38 W e latitude = 23,83 S), Sul = Talhão 44 Projeto Açude do Lobo (aspecto = 182, declividade = 13,5°, longitude = 48,39 W e latitude = 23,86 S), Leste = Talhão 3 Projeto Lageado (aspecto = 93, declividade = 17,7°, longitude = 48,42 W e latitude = 23,85 S) e Oeste = Talhão 5 Projeto Lageado (aspecto = 273, declividade = 20,5°, longitude = 48,42 W e latitude = 23,86 S)

A Figura 74 apresenta mapas mensais, do ano de 2003, da distribuição da radiação solar na área de estudo. Foi escolhido o ano de 2003 para efeito de publicação dos mapas mensais das variáveis meteorológicas, pois as variáveis meteorológicas foram mais próximas da média histórica. Os dados são resultados da eq. (11), corrigida mensalmente pela radiação solar global observada na estação automática do Distrito Florestal. A radiação solar, média de todo Distrito Florestal, para o mês de dezembro (2003) foi de $17,3 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ e de $11,3 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ para o mês de junho do mesmo ano. O número de horas de brilho solar (n, insolação), para a média dos 60 meses, foi de 4,7 h para os meses de outubro a março e de 5,8 h para os meses de abril a

setembro, evidenciando a maior cobertura de nuvens nos meses considerados chuvosos. Os resultados da distribuição mensal da radiação e da insolação convergem para os estimados por Martin (2007). Observa-se, nas Figuras 74a a 74m, a variação de cores da paleta que compõem a legenda. Essas nuances são nitidamente impostas pela variabilidade do terreno, segundo os efeitos astronômicos dos meses do ano. Essa variação é detectada pela amplitude e pela distribuição de frequência dos valores mensais de radiação. A amplitude da radiação é mínima nos meses de novembro a fevereiro e atinge seu valor máximo nos meses de junho e julho (Figura 75). Os valores de assimetria têm o mesmo comportamento. Durante os meses de outubro a fevereiro, os mapas apresentam forte assimetria negativa, com valor abaixo de -1,5 (Figura 75a). O fato deve-se à menor predominância de valores extremos máximos na área, nesse período do ano. Nos meses de maio a agosto, a distribuição aproxima-se da normal (Figura 75b), porque os valores extremos máximos e mínimos de radiação solar são mais expressivos. Esse comportamento também pode ser observado na Figura 76. Enquanto, no mês de dezembro, (Figura 76a) se observam apenas valores extremos para os valores mínimos de radiação solar, no mês de junho, (Figura 76b) são observados valores extremos máximos e mínimos. Essa variação ocorre principalmente nos projetos Torre, Açude do Lobo, Lageado e Paranapanema, devido às características da declividade e da orientação das vertentes.

Figura 74 – Mapas de distribuição da radiação solar global diária ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$) para os meses do ano de 2003 em todo Distrito Florestal de Capão Bonito (eq. (11) corrigida pela radiação global observada na estação meteorológica)

Figura 75 – Distribuição de frequência da média da radiação solar global diária ($\text{MJ m}^2 \text{dia}^{-1}$) (eq. 11) para os meses de dezembro (a) e de junho (b)

Figura 76 – Ocorrência da média, da mínima e da máxima absoluta radiação solar global diária potencial ($\text{MJ m}^2 \text{dia}^{-1}$) para os meses de dezembro (a) e de junho (b) nos projetos do Distrito Florestal de Capão Bonito

4.3 Estimativa das temperaturas máxima e mínima

Os gráficos mostram que as temperaturas apresentaram a mesma variação mensal para os valores médios das temperaturas máximas, médias e mínimas das estações meteorológicas das Regionais Boa Esperança, Santa Inês e Santa Fé (Figura 77).

Para a Regional Boa Esperança (Figura 77a), os meses com temperatura média máxima acima de 32°C somam 8,3% do período estudado, de 60 meses. A temperatura média mínima mensal abaixo de 10°C somou 11,7% dos meses. O ano de

2002 foi o mais quente, com a maior média de temperatura anual, calculada em 22,8°C, sendo de 31,3°C para a média das máximas e de 14,3°C para a média das mínimas mensais. A temperatura média anual de 2004 foi de 20,4 °C, o ano de temperaturas mais amenas registradas na Regional Boa Esperança. A temperatura média das máximas foi de 26,8°C e das mínimas, de 14°C. O mês de março de 2002, nessa estação meteorológica, foi registrado como o mais quente de todo Distrito Florestal, com a média das máximas de 36°C.

Na Regional Santa Inês (Figura 77b), os meses com temperatura média máxima acima de 32° C somaram 20% do período estudado. Já a temperatura média mínima mensal abaixo de 10°C somou 23,3% dos meses estudados. Essa estação meteorológica registrou as menores médias mensais de temperaturas mínimas, sendo o mês de julho de 2005 o mais frio de toda a área de estudo. A temperatura média das mínimas foi de 6,7°C. O ano de 2002 foi o mais quente, registrando uma temperatura média anual de 22,9°C, e 32,2°C como a média das máximas e 13,5°C, a das mínimas. Nessa regional, o ano de 2004 foi o mais frio, já que registrou média anual de 20,2°C, sendo 26,8°C a média das máximas e 13,7°C a das mínimas.

Na Regional Santa Fé (Figura 77c), 21,7% dos meses estudados apresentaram temperatura média máxima acima de 32° C. A temperatura média mínima mensal abaixo de 10°C somou 11,7% dos meses. O ano mais frio, nesse local foi o de 2004, com 20,3°C de temperatura média anual. O ano mais quente foi 2006, com os surpreendentes 25,5°C de temperatura média anual. Nesse ano, a temperatura média das máximas foi de 33,4°C, enquanto a das mínimas, de 17,6°C.

A estação meteorológica de Capão Bonito CIIAGRO/IAC (Figura 77d) não registrou temperatura média máxima acima de 32° C. A temperatura média mínima mensal abaixo de 10°C somou apenas 1% dos meses, em agosto de 2003. O ano mais frio no local foi 2004, com 19,7°C de temperatura média anual. O ano mais quente foi 2002, com 21,1°C de temperatura média anual. Os resultados da distribuição das temperaturas máximas e mínimas mensais convergem para os obtidos por Martin (2007).

Figura 77 – Valores médios mensais de temperatura máxima, média e mínima nas estações meteorológicas de Boa Esperança (a), Santa Inês (b), Santa Fé (c) e Capão Bonito CIIAGRO/IAC (d)

É possível observar o efeito do relevo na variação da temperatura mensal, o qual pode ser constatado nas temperaturas mais elevadas nos vales dos rios, como bem se destaca nas Figuras 78c, 78e e 78j. Esse efeito sutil é impelido pelos coeficientes altimétricos das equações mensais de Pedro Júnior et al. (1991). Resultados obtidos por Pinto (1972), Valeriano e Picini (2000) e Rodríguez-Lado et al. (2007) indicam os mesmos comportamentos. Além disso, Alvares et al.² (em fase de elaboração) mostram que a interação entre a altitude, a latitude e a longitude explicam grande parte da variabilidade da temperatura no Brasil. Verificou-se que as maiores amplitudes de temperatura são atribuídas aos valores registrados nas estações (chamados de fatores de correção mensais). Para o ano de 2003, a Regional Santa Fé apresentou valores menores de temperatura máxima, exceto nos meses de novembro a janeiro (Figuras 78l, 78m e 78a) e em maio (Figura 78e). Isso também pode ser verificado na Figura 77c, observando-se que no ano de 2003 a temperatura na Regional Santa Fé, naqueles meses, foi a mais baixa.

A distribuição de frequência da temperatura média máxima potencial de janeiro e de junho pode ser observada na Figura 79. O seu registro, em cada projeto do Distrito Florestal, está apresentado na Figura 80. Os projetos que possuem menor altitude (Figuras 64 e 66) e a menor latitude (Açude do lobo, Lageado e Rancho) apresentaram-se com maior valor de temperatura em todos os meses do ano (Figura 80). A temperatura máxima potencial do mês de janeiro (Figura 79a) apresenta média de 29°C e de 23°C, no de junho (Figura 79b). Os histogramas indicam amplitude de aproximadamente 1°C, o que é considerado muita energia disponível, afetando diretamente os processos fisiológicos e físicos do ambiente.

² ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; GONÇALVES, J.L.M. Modelagem das temperaturas do ar mensais e anuais das máximas, mínimas e médias para o Brasil.

Figura 78 – Mapas de distribuição da temperatura média máxima mensal para o ano de 2003 em todo o Distrito Florestal de Capão Bonito (eq. (17), corrigida pela temperatura observada nas estações meteorológicas)

Figura 79 – Distribuição de frequência da temperatura média máxima potencial para os meses de janeiro (a) e de junho (b). Resultados apenas das equações de Pedro Júnior et al. (1991)

Figura 80 – Ocorrência da média, mínima e máxima absoluta temperatura máxima potencial para os meses de janeiro (a) e de junho (b) nos projetos do Distrito Florestal de Capão Bonito

Quanto ao mapeamento da temperatura média mínima, os valores mensais, para o ano de 2003, encontram-se especializados na Figura 81. A maior amplitude verificada ocorreu no mês de junho, quando se registrou, na Regional Santa Fé, temperatura 3°C abaixo da média do restante norte da área (Figura 81f). Predominantemente, essa regional apresentou as menores temperaturas no corrente ano. O mês de agosto (Figura 81h) apresentou a menor temperatura do ano, com 7,5°C na Regional Santa Fé e 9,3°C na Boa Esperança.

Figura 81 – Mapas de distribuição da temperatura média mínima mensal para o ano de 2003 em todo o Distrito Florestal de Capão Bonito (eq. (17) corrigida pela temperatura observada nas estações meteorológicas)

Os histogramas (Figura 82) mostram a distribuição da temperatura média mínima para os meses de janeiro e junho. No Distrito Florestal, o valor médio da temperatura mínima potencial, para o mês de janeiro, é 17,9°C (Figura 82a) e, para o de junho, 10,2°C (Figura 82b). A maior parte dos projetos apresenta-se dentro da média mensal (Figura 83), exceto os que evidenciam as menores classes hipsométricas (Figuras 64 e 66), onde há maior média de temperatura. Os projetos Açude do Lobo, Lageado e Rancho apresentam a maior média de temperatura mínima mensal, pois, neles, predominam terrenos de baixa altitude, além de ocuparem o extremo norte da área de estudo (menor efeito da latitude).

Figura 82 – Distribuição de frequência da temperatura média mínima potencial para os meses de janeiro (a) e de junho (b)

Figura 83 – Ocorrência da média, mínima e máxima absoluta temperatura mínima potencial para os meses de janeiro (a) e junho (b) nos projetos do Distrito Florestal de Capão Bonito

4.4 Estimativa de geadas

Registrou-se a menor temperatura média mínima, 7,8°C, acompanhada de oito eventos de geada no mês, em julho de 2000. A equação linear calibrada para as condições climáticas de Capão Bonito é sensível para valores de temperatura média mínima mensal entre 0 a 12,16°C (observada na relva) e 13,06°C (observada no abrigo meteorológico) (Figura 84). Aplicada a equação de regressão nos mapas de temperatura média mínima mensal de 2003 (Figura 81), geraram-se mapas de dias com geadas para cada mês e do total no mesmo ano (Figura 85). Com exceção do mês de maio de 2003 (Figura 85a), o submodelo de geada aponta que, no sul da área (Regional Santa Fé), as geadas são mais severas. A distribuição mensal da ocorrência de geadas em Capão Bonito é semelhante à obtida por Camargo et al. (1993). O histograma (Figura 86) mostra a distribuição de dias com geada para o ano de 2003. A Regional Santa Fé apresentou pelo menos 20 noites com geadas, contra 15 eventos na Regional Boa Esperança e em torno de 12 nas Regionais Santa Inês e Paranapitanga (Figura 85f). Esses resultados convergem para os obtidos por Astolpho et al. (2005). O zoneamento da ocorrência de geadas aponta que os projetos Sede Velha, Água Branca, Boa Vista, Retiro e Lavrinhas são os mais suscetíveis à ocorrência desse fenômeno (Figura 87). Por outro lado, os projetos localizados mais ao norte da área são os menos afetados pelas geadas, como Açude do Lobo, Lageado e Rancho. Usando o mesmo método, Waring (2000) aplicou uma equação semelhante para a modelagem da produtividade do Abeto (*Picea sitchensis*) na Inglaterra. O autor usou uma equação desenvolvida no estado de Oregon, nos Estados Unidos: $11,62 + (- 1,57 * T_{min})$. Waring e McDowell (2002) usaram uma equação semelhante ($11,6 + (- 2 * T_{min})$), a qual foi calibrada na Austrália, para uso efetivo no estado de Washington, nos Estados Unidos. Alvares e Arthur Junior³ (não publicado), usando o modelo 3-PG para avaliar a produtividade do eucalipto na região de Itatinga (SP), obtiveram o seguinte modelo contador de geadas: $14,75 + (- 1,14 * T_{min})$ e $R^2 = 0.82$.

³ ALVARES, C. A.; ARTHUR JUNIOR, J.C. Aplicação e desenvolvimento do modelo 3-PG (espacial) na bacia do Tinga: fatores que afetam o crescimento florestal, estimativa da produtividade e simulação do deflúvio. Trabalho apresentado na disciplina LCF 5873 – Modelos Hidrológicos Distribuídos Aplicados ao Manejo Florestal (Docente: Silvio F. de B. Ferraz). ESALQ, USP. 2009. 12 p. (não publicado).

Figura 84 – Relação entre a temperatura média mínima mensal e a ocorrência de dias com geadas no mês para o Distrito Florestal de Capão Bonito (Estações meteorológicas de Boa Esperança, Santa Inês, Santa Fé e de Capão Bonito/CIIAGRO/IAC)

Figura 85 – Mapas de distribuição mensal do número de dias com geada para o ano de 2003 em todo o Distrito Florestal de Capão Bonito (Aplicação da equação da Figura 72)

Figura 86 – Distribuição de frequência do número de dias com geada no ano de 2003

Figura 87 – Ocorrência do mínimo e máximo número de dias com geada no ano de 2003 nos projetos do Distrito Florestal de Capão Bonito

4.5 Estimativa da umidade relativa

O histórico da umidade relativa registrado nas estações meteorológicas das Regionais Boa Esperança, Santa Inês, Santa Fé e Capão Bonito CIIAGRO/IAC está apresentado na Figura 88. O primeiro e o último ano do registro (2002 e 2006) apresentaram as menores médias de umidade relativa. As curvas da umidade relativa mostram que, no geral, os locais mantêm o comportamento mensal, embora as

estações Boa Esperança e Santa Inês tenham média de umidade relativa superior, praticamente em todos os meses, em relação a Santa Fé e a Capão Bonito CIIAGRO/IAC. As duas primeiras apresentam média anual (2003) de aproximadamente 79%, enquanto as últimas, 75% e 68% de média anual, respectivamente. Essa peculiaridade da área pode ser percebida nos mapas de umidade relativa do Distrito Florestal, para o ano de 2003, apresentados na Figura 89. Com exceção do mês de setembro (Figura 89i), a Regional Santa Fé apresentou a menor média de umidade relativa para o ano de 2003. Nesses mapas, pode-se verificar que a Regional Boa Esperança apresentou a maior média na maioria dos meses. Nessa regional, 38,3% dos meses estudados apresentaram umidade relativa acima dos 80%, apenas em 8,3% do tempo, a umidade ficou abaixo dos 70% (Figura 88). A Regional Santa Inês teve resultado semelhante, 30% dos 60 meses estudados tiveram umidade relativa acima dos 80%, enquanto apenas em 3,3% desse tempo a umidade baixou para níveis inferiores a 70%. Na Regional Santa Fé, não houve registros, de médias mensais abaixo da umidade de 70%, enquanto apenas 3,3% dos meses tiveram médias acima dos 80% de umidade relativa. A estação de Capão Bonito CIIAGRO/IAC não apresentou nenhuma ocorrência de umidade relativa média mensal superior a 80%, enquanto, aproximadamente na metade dos meses estudados, apresentou umidade relativa abaixo dos 70%.

Figura 88 – Valores médios mensais observados de umidade relativa nas estações meteorológicas de Boa Esperança, Santa Inês e Santa Fé do Distrito Florestal de Capão Bonito

Figura 89 – Mapas de distribuição da umidade relativa média mensal para o ano de 2003 em todo o Distrito Florestal de Capão Bonito (eq. (22), corrigida pela umidade relativa observada nas estações meteorológicas)

Os histogramas apresentados na Figura 90 mostram que a média potencial da umidade relativa (eq. 22), para o mês de janeiro, é 67,4%, enquanto, para o de junho, 61%. Essa característica é muito influenciada pela topografia, pois, nessa regional, predominam terrenos mais elevados. Isso pode ser observado na Figura 90, resultado apenas da eq. (22) (umidade relativa potencial). Em janeiro (Figura 91a) e junho (Figura 91b), os projetos da Regional Boa Esperança apresentaram médias mais elevadas. A amplitude da escala mostra que a variação foi muito sutil, pois os valores têm sua origem apenas na altitude e na latitude do local.

Figura 90 – Distribuição de frequência da umidade relativa potencial (eq. 22) para os meses de janeiro (a) e de junho (b)

Figura 91 – Ocorrência da média, mínima e máxima absoluta umidade relativa potencial (eq. 22) para os meses de janeiro (a) e junho (b) nos projetos do Distrito Florestal de Capão Bonito

4.6 Estimativa da precipitação

Apresenta-se, na Figura 92, o total mensal pluviométrico registrado nos postos meteorológicos do Distrito Florestal. Embora a variação mensal da distribuição das chuvas registradas nas estações seja semelhante, a Regional Santa Inês apresentou a maior pluviosidade, com média de 1649 mm, ao longo dos 5 anos estudados. Nessa regional, os meses com precipitação inferior a 30 mm somaram 13,3% do total, enquanto 58,3% dos meses registraram chuva acima dos 100 mm. Já a sazonalidade das chuvas foi assim distribuída: 29% na primavera, 43% no verão, 16% no outono e 16% no inverno.

A Regional Boa Esperança, ao longo dos cinco anos, registrou precipitação média de 1405 mm; precipitação superior a 100 mm foi registrada para 55% dos meses; já a inferior a 30 mm, para 15% deles. Para essa estação meteorológica, a distribuição das chuvas foi 29% na primavera, 42% no verão, 16% no outono e 14% no inverno.

A regional mais ao sul da área, Santa Fé, registrou, ao longo do estudo, uma precipitação média de 1348 mm. Os meses considerados mais secos, com precipitação inferior a 30 mm, somaram 20%, havendo, na metade do tempo, precipitação acima dos 100 mm. A sazonalidade das chuvas foi semelhante à das outras estações: 29% na primavera, 43% no verão, 15% no outono e 13% no inverno.

A estação de Capão Bonito CIIAGRO/IAC apresentou uma precipitação média de 1225 mm, somando 16,7% do total os meses com precipitação inferior a 30 mm. Já 46,7% dos meses registraram chuva acima dos 100 mm. A sazonalidade das chuvas foi também semelhante à das outras estações estudadas: 31% na primavera, 39% no verão, 14% no outono e 15% no inverno. Os resultados da distribuição da precipitação mensal convergem para os obtidos por Martin (2007).

Figura 92 – Valores totais mensais de precipitação nas estações meteorológicas de Boa Esperança, Santa Inês e Santa Fé do Distrito Florestal de Capão Bonito

A precipitação pluviométrica, no ano de 2003, foi considerada normal, próxima à média histórica dos 1.200 mm (EMBRAPA, 2007). Nesse ano, a Regional Santa Inês apresentou 1.447 mm de precipitação, enquanto a Boa Esperança, 1.233 mm, a Regional Santa Fé, 1.332 mm e a estação de Capão Bonito CIIAGRO/IAC, 1239 mm. A distribuição mensal da precipitação, para o ano de 2003, pode ser observada na Figura 93. Já o ano seguinte foi considerado úmido, com registro de 2860 mm na Regional Santa Inês, contra 2141 mm na Santa Fé, 2279 mm na Boa Esperança e de apenas 1387 mm em Capão Bonito CIIAGRO/IAC. Por outro lado, o ano de 2006 foi considerado seco: o posto meteorológico de Santa Fé registrou somente 791 mm, ao passo que a Santa Inês, 1.326 mm, a Boa Esperança, 1.170 mm, valor próximo da média histórica enquanto Capão Bonito CIIAGRO/IAC, 1004 mm.

Figura 93 – Mapas de distribuição da precipitação total mensal para o ano de 2003 em todo o Distrito Florestal de Capão Bonito

4.7 Estimativa e mapeamento dos atributos do solo

O banco de dados de amostragens georreferenciadas de solos apresenta 139 perfis e 288 tradagens, em áreas de efetivo plantio ($51 \text{ ha amostra}^{-1}$) (Figura 94). Os latossolos apresentam 116 perfis e 229 tradagens; o solo mais representativo (Tabela 2), o LVd2, apresenta 68 perfis pedológicos e 133 tradagens em suas áreas de ocorrência. Os argissolos somam 2 perfis e mais 12 tradagens. Nas áreas de ocorrência dos cambissolos, há 21 perfis pedológicos e 47 tradagens. Comparando-se os mapas da declividade (Figuras 67) e da coleção pedológica (Figura 94), pôde-se observar que a densidade amostral dos solos foi dependente do relevo. Devido ao relevo mais plano da Regional Santa Fé, o esforço amostral foi menor, de apenas 55 amostras ($103 \text{ ha amostra}^{-1}$). Por outro lado, os projetos de relevo ondulado a fortemente ondulado (Figura 68), Torre (43 amostras, sendo $27 \text{ ha amostra}^{-1}$) e Paranapanema (32 amostras, sendo $32 \text{ ha amostra}^{-1}$) apresentaram elevada densidade amostral. No Brasil, a densidade amostral média, para levantamentos pedológicos detalhados, é de aproximadamente $29 \text{ ha amostra}^{-1}$ (RIOS et al., 2008). Nos mapeamentos detalhados e semidetalhados, a densidade amostral apresenta relação com a complexidade da paisagem (RIOS et al., 2008), devendo ser considerada uma premissa no processo de levantamento pedológico (SANTOS et al., 2005).

Figura 94 – Mapa identificando a distribuição da coleção pedológica de perfis e tradagens, a quantidade de registro de pontos e o tipo de solo ao longo do Distrito Florestal de Capão Bonito

A Figura 95 mostra o agrupamento, em classes de textura, dos solos de Capão Bonito, organizado segundo o triângulo textural (EMBRAPA, 2006), para os horizontes A e B. Os pontos distribuem-se ao longo do gráfico, evidenciando ampla faixa textural, com teor de argila variando de 99 a 840 g kg⁻¹, para o horizonte A, e de 62 a 860 g kg⁻¹ para o B. A distribuição dos pontos é concentrada na faixa centro-esquerda dos gráficos, o que confirma o caráter tropical, de elevado estágio de intemperismo, e não siltoso, dos solos de Capão Bonito. O horizonte A registrou 64% das amostras como de textura média, 27% como argilosas, 8% como muito argilosas e apenas 1% como arenosas. No horizonte B, aproximadamente 49 % das amostras foram classificadas como de textura média, 39% como argilosas, 11% como muito argilosas e 1 % como arenosas. A distribuição dos pontos dos horizontes A (Figura 95a) e B (Figura 95b) é semelhante, devido à baixa ocorrência de mudança textural abrupta, característica não diagnosticada em latossolos (EMBRAPA, 2006), os quais predominam na área.

Figura 95 – Triângulo de agrupamento textural (EMBRAPA, 2006), limites granulométricos e ocorrência das classes de textura para as amostras de solos do horizonte A (a) e horizonte B (b) da coleção pedológica do Distrito Florestal de Capão Bonito

Os resultados da análise exploratória dos atributos do solo estão apresentados na Tabela 16. Os solos florestais do Distrito Florestal de Capão Bonito apresentam textura muito variada. Há pontos de 70 a 870 g kg⁻¹ de areia total no horizonte A. A presença de areia média, grossa e muito grossa foi pequena (< 20 g kg⁻¹), porém, em alguns locais, atingiu valores de 441 g kg⁻¹ (areia grossa no horizonte A). Essa característica foi evidenciada pelos altos coeficientes de assimetria e curtose (platicúrtica) e ainda pela tendência mais próxima à distribuição lognormal de areia média, areia grossa e areia muito grossa (Figuras 98, 99 e 100).

Os teores de areia muito fina, areia fina e areia total apresentaram distribuição mais próxima à normal, assimetria positiva e baixo coeficiente de curtose (leptocúrtica) (Figuras 96, 97 e 101). Os solos intemperizados e oxídicos de Capão Bonito apresentaram uma ocorrência média de 115 g kg⁻¹ na camada superficial para o silte, com assimetria positiva e distribuição platicúrtica, tendendo à lognormal (Figura 102). O teor médio da fração argila no horizonte B (310 g kg⁻¹) ocorreu em quantidade pouco superior à do horizonte A (284 g kg⁻¹), devido à presença de Argissolos Vermelhos na região de estudo (Figura 103). Os Latossolos Vermelhos de textura argilosa são predominantes, revelando-se, assim, para o teor de argila, uma assimetria levemente positiva, porém distribuição leptocúrtica e mais próxima à lognormal. Da mesma forma ocorreu com a relação silte/argila de valor médio de 0,4. Essa relação apresentou assimetria positiva, distribuição platicúrtica e próxima à lognormal (Figura 104). A elevada porcentagem do grau de floculação da argila nos solos de Capão Bonito mostra claramente representar áreas com predomínio de latossolos, onde é típica a baixa mobilidade das argilas e a alta resistência à dispersão (EMBRAPA, 2006) (Figura 105).

Quanto aos atributos químicos, a matéria orgânica apresentou um valor médio de 23,5 g kg⁻¹ no horizonte A e de 13 g kg⁻¹ no B. Os dados de matéria orgânica tenderam à distribuição normal e à reduzida assimetria positiva (Figura 106). O fósforo mostrou elevados coeficientes de assimetria e de curtose, com valor médio de 4,4 e 3 mg kg⁻¹ nos horizontes A e B, respectivamente (Figura 107). As bases potássio, cálcio e magnésio apresentaram forte assimetria positiva, elevado coeficiente de curtose (platicúrtica) e distribuição tendendo à lognormal (Figuras 108, 109 e 110). Os valores médios do potássio (0,7 mmol_c kg⁻¹), de cálcio (2,3 mmol_c kg⁻¹) e de magnésio (2 mmol_c

kg⁻¹) no horizonte A estão abaixo do ponto crítico no solo (GONÇALVES, 1995). O teor médio de sódio foi de 0,2 mmol_c kg⁻¹, com distribuição fortemente assimétrica à esquerda, pois, em Capão Bonito, predominam solos de baixa concentração desse elemento (Figura 111). As concentrações de alumínio e alumínio+hidrogênio seguem distribuição tendendo à normal (Figuras 112 e 113). Os dados do horizonte A de pH H₂O e pH KCl apresentaram valor médio de 3,8, com distribuição tendendo à normal (Figuras 114a, 114c, 115a, 115c). Para o horizonte B, a média foi de 3,9 e a distribuição tendeu à lognormal (Figuras 114b, 114d, 115b, 1145). O valor máximo de pH registrado foi 5,0 (pH H₂O) e o mínimo, de 2,6 (pH KCl). Os dados de delta pH apresentaram assimetria negativa e distribuição próxima à normal (Figura 116). Nos locais com valores de delta pH igual a 0,3 (saldo positivo de cargas) foram encontrados os solos mais intemperizados da região, com caráter aniônico (EMBRAPA, 2006). A soma de bases apresentou elevada assimetria positiva e distribuição platicúrtica (alto C.V.) tendendo à lognormal (Figura 117). A média desse atributo foi baixa nos solos de Capão Bonito, apenas de 5,1 e 3 mmol_c kg⁻¹ para os horizontes A e B, respectivamente. Os valores médios da CTC foram de 24,7 mmol_c kg⁻¹ (efetiva) e de 85,7 mmol_c kg⁻¹ (pH7) para o horizonte A. Sua distribuição mostrou comportamento assimétrico negativo apenas para CTC pH7 na camada superficial (Figura 118a e 118c). A maior parte dos atributos, em ambas as camadas do solo, apresentaram distribuição tendendo à lognormal. Cambardella et al. (1994) e Zimback (2001) verificaram que esse foi o melhor ajuste para a maioria dos atributos edáficos. A Tabela 1 mostra ainda as variáveis que necessitaram de transformação, isto é, aquelas em que o teste de normalidade (SHAPIRO; WILK, 1965) resultou em p-valor próximo de zero.

Tabela 16 – Resultados da análise estatística descritiva dos atributos do solo estudados na profundidade de 0 - 30 cm (horizonte A) e de 30 - 80 cm (horizonte B)

Atributo	Hor	Posição			Medida de Dispersão			Distribuição			Tipo de Distribuição	
		Média	Mediana	Moda	Min	Max	DP	CV	CS	CC	Tendência	(p-valor)
Areia muito fina (g kg ⁻¹)	A	70	74	70	0	170	37,8	51,1	0,7	0,2	~ N	0,0001
	B	70	79	60	10	220	38,7	48,8	0,9	1,3	~ L	0,0001
Areia fina (g kg ⁻¹)	A	370	379	300	30	747	179,0	47,2	0,1	-0,8	~ N	0,0020
	B	360	367	290	10	739	183,9	50,2	0,1	-0,8	~ N	0,0060
Areia média (g kg ⁻¹)	A	70	90	30	10	320	68,1	75,6	1,1	0,7	~ L	0,0001
	B	50	74	20	10	340	62,8	84,9	1,4	2,2	~ L	0,0001
Areia grossa (g kg ⁻¹)	A	20	47	10	0	441	74,5	157,1	3,1	10,3	~ L	0,0001
	B	20	47	10	0	418	70,4	150,7	2,8	9,5	~ L	0,0001
Areia muito grossa (g kg ⁻¹)	A	0	3	0	0	60	7,0	285,1	5,3	37,7	~ L	0,0001
	B	0	3	0	0	40	7,0	230,0	3,3	12,8	~ L	0,0001
Areia total (g kg ⁻¹)	A	567	540	730	70	870	189,3	35,0	-0,5	-0,7	~ N	0,0001
	B	540	522	410	40	850	188,4	36,1	-0,4	-0,6	~ N	0,0001
Silte (g kg ⁻¹)	A	116	139	100	10	556	83,8	60,1	1,7	4,0	~ L	0,0001
	B	120	141	100	10	555	86,1	61,2	1,8	4,6	~ L	0,0001
Argila (g kg ⁻¹)	A	284	320	160	99	840	164,4	51,4	0,8	0,0	~ L	0,0001
	B	310	338	340	62	860	168,5	49,9	0,8	0,1	~ L	0,0001
Relação silte/argila	A	0,4	0,5	0,3	0,1	2,3	0,4	71,7	1,4	1,9	~ L	0,0001
	B	0,4	0,5	0,3	0,0	3,6	0,4	80,7	2,5	11,9	~ L	0,0001
Floculação argila (%)	A	77,4	78	70	29	100,0	17,1	22,1	-0,5	-0,5	~ L	0,0001
	B	86,4	94	90	31	100,0	15,9	18,4	-1,2	0,8	~ L	0,0001
Matéria orgânica (g kg ⁻¹)	A	23,5	24,7	23,0	1,0	56,0	10,3	41,7	0,5	0,3	~ N	0,0020
	B	13,0	14,9	10,0	0,5	36,0	8,5	56,1	0,6	-0,4	~ N	0,0001
Fósforo (mg kg ⁻¹)	A	4,4	6,0	4,0	1,0	51,3	6,1	103,0	5,0	28,0	~ L	0,0001
	B	3,0	2,9	3,0	0,0	18,0	1,8	58,9	3,6	28,1	~ L	0,0001
Potássio (mmol _c kg ⁻¹)	A	0,7	1,2	0,5	0,1	15,3	1,8	147,5	5,5	36,3	~ L	0,0001
	B	0,4	0,7	0,2	0,1	11,4	1,1	153,3	6,1	49,2	~ L	0,0001
Cálcio (mmol _c kg ⁻¹)	A	2,3	5,1	1,0	0,5	49,0	7,5	148,2	3,3	12,2	~ L	0,0001
	B	1,0	1,9	1,0	0,6	13,0	1,7	90,8	3,6	15,9	~ L	0,0001
Magnésio (mmol _c kg ⁻¹)	A	2,0	2,9	1,0	0,3	25,0	3,2	108,5	3,2	14,4	~ L	0,0001
	B	1,0	1,4	1,0	0,0	14,0	1,5	111,1	5,1	34,2	~ L	0,0001
Sódio (mmol _c kg ⁻¹)	A	0,2	0,8	0,2	0,0	29,0	3,5	440,2	7,6	57,6	~ L	0,0001
	B	0,2	0,6	0,2	0,0	20,0	2,8	409,7	6,3	38,7	~ L	0,0001
Alumínio (mmol _c kg ⁻¹)	A	17,0	17,4	18,0	0,0	55,0	9,0	52,0	0,6	1,1	~ N	0,0001
	B	14,8	14,5	15,0	0,0	41,0	6,4	43,9	0,5	1,5	~ N	0,0030
Alumínio+hidrogênio (mmol _c kg ⁻¹)	A	78,1	74,8	90,0	7,3	182,0	26,5	35,4	-0,1	1,0	~ N	0,0020
	B	51,2	51,3	40,0	2,9	109,0	21,2	41,3	0,0	-0,2	N	0,5980
pH H ₂ O	A	3,8	3,9	3,6	3,4	5,0	0,4	10,0	0,9	0,1	~ N	0,0001
	B	3,9	3,9	3,8	3,4	4,6	0,2	6,3	0,5	0,2	~ L	0,0001
pH KCl	A	3,8	3,9	3,7	2,6	4,8	0,3	7,7	0,0	1,7	~ N	0,0001
	B	3,9	3,9	3,9	3,5	4,9	0,2	4,5	1,8	8,2	~ L	0,0001
Delta pH	A	0,0	-0,1	0,0	-1,1	0,3	0,3	-198,4	-1,2	0,7	~ N	0,0001
	B	0,0	0,0	0,0	-0,9	0,4	0,2	-543,4	-0,9	2,3	~ N	0,0001
Soma de bases (mmol _c kg ⁻¹)	A	5,1	9,5	2,6	1,4	71,4	11,2	117,9	2,9	9,5	~ L	0,0001
	B	3,0	4,5	2,4	0,8	25,7	4,2	92,9	3,1	9,7	~ L	0,0001
CTC efetiva (mmol _c kg ⁻¹)	A	24,7	27,5	29,2	4,4	80,5	12,2	44,5	1,3	2,3	~ L	0,0001
	B	18,4	19,6	17,6	2,7	58,2	8,1	41,6	1,5	4,2	~ N	0,0001
CTC pH7 (mmol _c kg ⁻¹)	A	85,7	84,6	74,2	2,9	189,1	28,7	33,9	-0,1	0,8	~ N	0,0300
	B	56,6	56,4	57,6	12,5	115,0	20,6	36,6	0,1	-0,1	N	0,5900

Notas: Hor = horizonte pedológico; Min = mínimo valor observado; Max = máximo valor observado; DP = Desvio padrão; CV = Coeficiente de variação; CS = Coeficiente de simetria; CC = Coeficiente de curtose; N = Distribuição normal; L = Distribuição lognormal; ~ N = Distribuição mais próxima à normal; ~ L = Distribuição mais próxima à lognormal

Os modelos e os parâmetros geoestatísticos, ajustados aos dados dos atributos do solo, estão organizados na Tabela 17. Os atributos areia muito fina (Figuras 96e e 96f), areia fina (Figuras 97e e 97f), areia grossa (Figuras 99e e 99f), areia muito grossa (Figura 100f, horizonte B) e areia total (Figura 101f, horizonte B) foram ajustados ao

modelo exponencial com R^2 variando de 0,1 a 0,97. Essas variáveis apresentaram moderado a forte GDE. Para o horizonte A das variáveis areia muito grossa (Figura 100e) e areia total (Figura 101e) foi ajustado o modelo esférico com R^2 igual a 0,52 e 0,71, respectivamente. A variável areia média (Figuras 98e e 98f), embora tenha GDE moderado a forte, não apresentou bom ajuste ao modelo exponencial. O atributo silte (Figuras 102e e 102f) não apresentou dependência espacial. O teor de argila (Figuras 103e e 103f) apresentou moderado GDE, com R^2 acima de 0,8, ajustado ao modelo exponencial, para o horizonte A, e ao modelo esférico, para o B. A relação silte / argila (Figuras 104e e 104f) apresentou maior GDE e melhor ajuste ($R^2 = 0,73$) para o horizonte B, no modelo exponencial. Para o atributo pedológico grau de floculação da argila (Figura 105f), no horizonte B, não foi obtido bom ajuste geoestatístico ($R^2 = 0$), porém os valores do horizonte A (Figura 105e) foram ajustados ao modelo esférico ($R^2 = 0,21$ e forte GDE).

Os valores de matéria orgânica da camada superficial (Figura 106e) não apresentaram ajuste geoestatístico, enquanto, no horizonte B (Figura 106f), os dados foram razoavelmente representados pelo modelo exponencial ($R^2 = 0,52$), com estrutura do semivariograma indicando moderado GDE. Com exceção do horizonte A (Figura 107e) dos valores de fósforo (modelo exponencial com $R^2 = 0,59$), seu horizonte B (Figura 107f) e os valores de potássio (Figuras 108e e 107f) não apresentaram dependência espacial (fraco GDE. Os valores do horizonte A dos macronutrientes cálcio (Figura 109e) e magnésio (Figura 110e) foram interpolados pelo modelo exponencial, apresentando forte GDE e R^2 próximo de 0,6. Os atributos pedológicos sódio (Figuras 111e e 111f), alumínio (Figuras 112e e 112f) e alumínio+hidrogênio (Figuras 113e e 113f) foram modelados na função exponencial, com R^2 variando de 0,12 a 0,92, e GDE forte para o sódio e moderado para os demais. Os valores do horizonte A dos atributos pH H₂O (Figura 114e), pH KCl (Figura 115e) e delta pH (Figura 116e) foram ajustados ao modelo esférico, enquanto, para o horizonte B (Figuras 114f, 115f e 116f), a melhor função foi a exponencial. Para essas funções, o coeficiente de determinação variou de 0,11 a 0,54 e o GDE foi de moderado a forte. A soma de bases foi ajustada ao modelo esférico (Figura 117e) e ao exponencial (Figura 117f). Foi obtido melhor ajuste para o horizonte A, com forte GDE e R^2 igual a 0,72. A CTC efetiva foi bem ajustada à função

gaussiana (Figura 118e) e à função esférica (Figura 118e), obtendo forte GDE e coeficiente de determinação acima de 0,8. A CTC pH7 (Figuras 119e e 119f) não apresentou dependência espacial. Por fim, as variáveis saturação por bases (Figura 120e) e saturação por alumínio (Figuras 121e e 121f) foram modeladas segundo a função esférica, com exceção do horizonte B da variável saturação por bases (Figura 120f), que melhor se ajustou ao modelo exponencial. O nível do ajuste (R^2) foi próximo a 0,8 e o GDE, de moderado a forte. Com intensidade amostral superior ao presente trabalho, Rufino et al. (2006) não encontraram dependência espacial para o alumínio trocável, o cálcio, o magnésio, o pH e a soma de bases em solos florestais com eucalipto no município de Luís Antônio (SP). Rahman et al. (1996) encontraram baixa dependência espacial para o pH em solos florestais, ajustando-se ao modelo linear com alcance indeterminado. Em solos florestais com povoamentos comerciais de *Pinus nigra*, Basaran et al. (2006) encontraram efeito pepita puro para o pH e baixo IDE para a matéria orgânica.

Os atributos do solo representados pelo modelo linear (ou potencial, com $\alpha = 1$) e com baixo GDE são considerados tipicamente representativos dos fenômenos não-estacionários (ANDRIOTTI, 2003). Para essas variáveis, há ausência completa de correlação espacial e o fenômeno pode ser interpretado como inteiramente aleatório, nessa intensidade de amostragem. Isso mostra que, para detectar a dependência espacial dessas variáveis, a densidade de amostragem foi insuficiente, isto é, na escala de um levantamento pedológico semidetalhado tradicional. Vettorato (2003), estudando os solos do município de Botucatu (SP), portanto em escala regional, também encontrou efeito pepita puro para as variáveis pH e alumínio, o que chamou de amostragem insuficiente para a realização da análise espacial.

Os atributos do solo apresentaram diversos alcances (A_0) de dependência espacial (Tabela 17). Os alcances para os atributos de textura do solo no horizonte A, com exceção de areia total e silte, foram bem menores que os alcances registrados nos seus horizontes B, registrados nas variáveis areia muito fina (1530), areia fina (10310), areia média (930), areia grossa (55970), areia muito grossa (47700), argila (39930) e relação silte / argila (71100). Esse comportamento mostra que há maior continuidade espacial na distribuição desses atributos texturais na camada subsuperficial (horizonte

B) dos solos, sugerindo que, nessa camada, a variabilidade da distribuição textural seja menor que no horizonte superficial. Por outro lado, em áreas de Latossolos Vermelhos, Corá et al. (2004) e Souza et al. (2004) encontraram maior alcance de dependência espacial para as variáveis texturais do solo na camada superficial (0-20 cm). As variáveis relacionadas à fertilidade do solo apresentaram maiores alcances de dependência espacial no horizonte A, como o fósforo (54180), o cálcio (71100), o magnésio (63240), a soma de bases (71100) e a saturação por bases (71100). Essa maior distância de dependência espacial indica que exista maior homogeneidade na distribuição dos nutrientes na camada superficial do solo. É coerente observar que esse comportamento, de maior correlação espacial da fertilidade na camada superficial, é decorrente do efeito homogeneizador do manejo, principalmente da adubação aplicada na área. Vettorato (2003) encontrou fraca ou nula dependência espacial para o teor de matéria orgânica, no horizonte A. Já na camada subsuperficial, o mesmo autor determinou um moderado GDE com ajuste exponencial. Da mesma forma, Ortiz (2003) não encontrou dependência espacial para a matéria orgânica em solos florestais sob eucalipto, na região de Paraibuna (SP). Boruvka et al. (2005), estudando a variabilidade espacial de solos florestais, encontraram baixa dependência espacial para o carbono orgânico da camada superficial. Regalado e Ritter (2006) também encontraram baixa dependência espacial para a matéria orgânica em solos florestais. Em Angatuba, região vizinha à área de estudo, Sotomayor (2009) encontrou média dependência espacial para o teor de carbono orgânico na camada superficial de solos cultivados com eucalipto.

Os mapas foram produzidos pelo método da interpolação krigagem ordinária pontual. Esse método tende a superestimar as baixas medidas e de subestimar os elevados valores. Quanto maior a dispersão em torno da média calculada, maior será a suavização (SOUZA, 2007). Ortiz (2002) encontrou o mesmo efeito suavizador para variáveis físicas do solo. Comparando um mapa pedológico tradicional com o mapa interpolado do teor de argila do solo, Fonseca et al. (2002) concluíram ainda que a suavização é apropriada, por representar a natural variação gradual, tal como ocorre no terreno.

Tabela 17 - Modelos e parâmetros dos semivariogramas ajustados aos dados dos atributos do solo na profundidade de 0 - 30 cm (horizonte A) e de 30 - 80 cm (horizonte B)

Atributo	Hor	Modelo	Co	Co+C	Ao	Co/(Co+C)	GDE	R ²	SQR
Areia muito fina	A	Exp.	357	1.442	720,0	24,8	forte	0,10	1,15.10 ⁵
	B	Exp.	473	1.539	1.530	30,7	moderada	0,40	8,10.10 ⁴
Areia fina	A	Exp.	10.950	34.520	4.140	31,7	moderada	0,97	6,80.10 ⁶
	B	Exp.	18.480	41.030	10.310	45,0	moderada	0,97	8,18.10 ⁶
Areia média	A	Exp.	1.190	4.553	470,0	26,1	moderada	0,00	1,45.10 ⁶
	B	Exp.	833	3.928	930,0	21,2	forte	0,06	1,64.10 ⁶
Areia grossa	A	Exp.	2.870	12.850	38.060	22,3	forte	0,67	1,12.10 ⁷
	B	Exp.	3.120	12.350	55.970	25,3	moderada	0,55	8,64.10 ⁶
Areia muito grossa	A	Esf.	5,5	50,5	4.400	10,9	forte	0,52	2,46.10 ²
	B	Exp.	24,0	119,0	47.700	20,2	forte	0,53	1,30.10 ³
Areia total	A	Esf.	18.520	37.710	9.550	49,1	moderada	0,71	6,72.10 ⁷
	B	Exp.	20.560	42.930	9.240	47,9	moderada	0,81	6,27.10 ⁷
Silte	A	Lin.	6.830	6.830	25.238	100,0	fraca	0,32	2,48.10 ⁶
	B	Lin.	7.128	7.128	25.778	100,0	fraca	0,64	8,72.10 ⁶
Argila	A	Exp.	12.790	38.160	12.400	33,5	moderada	0,84	6,48.10 ⁷
	B	Esf.	14.670	45.100	39.930	32,5	moderada	0,87	8,87.10 ⁷
Relação silte/argila	A	Exp.	0,0	0,1	590,0	28,9	moderada	0,09	1,08.10 ⁻³
	B	Exp.	0,1	0,5	71.100	22,6	forte	0,73	4,76.10 ⁻³
Grau de floculação da argila	A	Esf.	66,4	293,8	2.700	22,6	forte	0,21	2,02.10 ³
	B	Exp.	70,0	253,1	390	27,7	moderada	0,00	1,63.10 ³
Matéria orgânica	A	Lin.	101,0	101,0	28.661	100,0	fraca	0,00	1,08.10 ³
	B	Exp.	18,6	71,2	1.520	26,1	moderada	0,52	1,74.10 ²
Fósforo	A	Exp.	28,1	87,2	54.180	32,2	moderada	0,59	4,04.10 ²
	B	Lin.	3,0	3,0	25.795	100,0	fraca	0,24	6,90.10 ⁰
Potássio	A	Lin.	2,9	2,9	28.661	100,0	fraca	0,77	2,82.10 ⁰
	B	Lin.	1,2	1,2	25.791	100,0	fraca	0,53	2,20.10 ⁰
Cálcio	A	Exp.	31,9	216,0	71.100	14,8	forte	0,68	1,65.10 ³
	B	Exp.	0,5	2,9	1.340	16,9	forte	0,09	2,51.10 ⁰
Magnésio	A	Exp.	6,3	33,5	63.240	18,8	forte	0,54	8,29.10 ¹
	B	Esf.	0,0	2,2	2.980	0,0	forte	0,02	4,13.10 ⁰
Sódio	A	Exp.	4,8	40,6	49.410	11,8	forte	0,30	7,06.10 ²
	B	Exp.	3,7	28,3	68.140	12,9	forte	0,24	1,93.10 ²
Alumínio	A	Exp.	61,0	122,2	26.270	49,9	moderada	0,92	1,16.10 ²
	B	Exp.	29,5	90,0	56.280	32,8	moderada	0,86	6,65.10 ¹
Alumínio+hidrogênio	A	Exp.	185,0	703,1	980	26,3	moderada	0,12	2,99.10 ⁴
	B	Exp.	127,0	464,0	15.200	27,4	moderada	0,36	9,73.10 ³
pH H ₂ O	A	Esf.	0,0	0,2	3.460	11,7	forte	0,25	2,99.10 ⁻³
	B	Exp.	0,0	0,1	1.260	26,6	moderada	0,16	3,52.10 ⁻⁴
pH KCl	A	Esf.	0,0	0,1	9.750	48,4	moderada	0,54	9,63.10 ⁻⁴
	B	Exp.	0,0	0,1	71.100	25,7	moderada	0,46	3,46.10 ⁻⁴
Delta pH	A	Esf.	0,0	0,1	2.790	10,5	forte	0,11	6,18.10 ⁻⁴
	B	Exp.	0,0	0,0	1.440	26,7	moderada	0,36	1,04.10 ⁻⁴
Soma de bases	A	Esf.	59,8	362,5	71.100	16,5	forte	0,72	1,08.10 ⁴
	B	Exp.	5,7	18,8	2.260	30,2	moderada	0,21	8,21.10 ¹
CTC efetiva	A	Gau.	97,0	504,9	59.680	19,2	forte	0,93	3,74.10 ³
	B	Esf.	34,8	158,6	66.190	21,9	forte	0,80	1,04.10 ³
CTC pH7	A	Lin.	748,3	748,3	28.668	100,0	fraca	0,61	1,88.10 ⁵
	B	Esf.	52,0	414,6	2.740	12,5	forte	0,06	2,10.10 ⁴
Saturação por bases	A	Esf.	84,8	395,7	71.100	21,4	forte	0,82	6,40.10 ³
	B	Exp.	48,8	97,8	27.370	49,9	moderada	0,87	1,05.10 ²
Saturação por alumínio	A	Esf.	370,0	1.260	69.270	29,3	moderada	0,87	3,86.10 ⁴
	B	Esf.	141,0	692,9	67.520	20,3	forte	0,78	2,19.10 ⁴

Notas: Hor: horizonte pedológico; Exp: exponencial; Esf: esférico; Gau: gaussiano; Lin: linear; Co: efeito pepita; C: variância estrutural; Co+C: Patamar; Ao: alcance prático; GDE: grau de dependência espacial; SQR: soma de quadrados do resíduo

A espacialização areia muito fina (Figuras 96g e 96h) mostra que o teor médio nos horizontes A dos projetos Campo de Pouso, São Roque, Mangueirinha e Valinhos ficam acima dos 90 g kg^{-1} . No projeto Paranapanema, esse valor ($> 90 \text{ g kg}^{-1}$) é encontrado apenas na camada subsuperficial. O solo PVd1 é o que apresenta maior teor em média na sua área de ocorrência ($\sim 100 \text{ g kg}^{-1}$). A areia muito fina ($0,1 - 0,02 \text{ mm}$) é a fração de maior ocorrência, da granulometria areia, entre os solos mais argilosos.

A distribuição das frações maiores de areia, a fina, a média, a grossa e a muito grossa, mostra uma situação diferente de ocorrência, com predominância nos projetos de relevo mais movimentado e de solos menos desenvolvidos. A areia fina (Figuras 98g e 98h) ocorre, em elevado teor, ($\sim 500 \text{ g kg}^{-1}$), em ambos os horizontes, nos projetos Açude do Lobo, Correias, Lageado, Rancho e Cruz de Ferro. Ou seja, aproximadamente 50% do corpo desses solos são formados por essa fração granulométrica. Nesses locais, predominam os solos CXbd2, LVAd3, LVd3 e PVAd1. A relação entre a declividade e o teor de areia fina revela um coeficiente de correlação (Pearson) de 0,27. Na granulometria areia ($2 - 0,02 \text{ mm}$), a fração areia fina é a mais representativa (em g kg^{-1}) nos solos de Capão Bonito. A areia média (Figuras 98g e 98h) distribui-se, nos cambissolos (CXBd1 e CXBd2), nos argissolos (PVAd2, PVAd1) e nos latossolos (LVAd2, LVAd3 e LVd3), ocorrendo em baixa concentração ($\sim 100 \text{ g kg}^{-1}$). Os projetos Açude do Lobo, Correias, Rancho e Torre apresentaram teor médio de 120 g kg^{-1} dessa fração areia. Da mesma forma, distribuem-se a areia grossa (Figuras 99g e 99h) e a areia muito grossa (Figuras 100g e 100h), ocorrendo em baixa concentração (média de 70 g kg^{-1} e 7 g kg^{-1} , respectivamente), principalmente nos projetos Lavrinhas, Rancho, Paranapanema e Torre, onde ocorrem os argissolos (PVAd1, PVAd2, PVd1 e PVd3). A relação, em área total, entre a altitude (modelo digital de elevação do terreno) e a distribuição de areia muito grossa (horizonte B), mostrou um coeficiente de correlação (r) igual a $-0,27$, mostrando a maior ocorrência desse atributo nas áreas mais baixas do relevo, terço médio a inferior das vertentes onde ocorrem os argissolos, nos projetos Torre e Paranapanema. Por fim, o zoneamento da fração ganulométrica entre 2 e $0,02 \text{ mm}$, areia total (Figuras 101g e 101h), mostrou que os projetos Correias, Açude do Lobo, Cruz de Ferro, Rancho, Lageado, Deserto e

Prainha, onde predominam o LVAd3, o LVd3, o CXBd2 e o PVAd2, apresentaram, em média, teor maior que 600 g kg⁻¹.

A maior ocorrência da fração silte (Figuras 102g e 102h) foi observada nos projetos Lavrinhas, Mangueirinha, Paranapanema, Torre e Suinã. Nesses locais, a ocorrência média de silte superou os 160 g kg⁻¹. Nessa mesma concentração, em média, a fração silte ocorreu nos solos CXBd1, PVd1, PVd3, PVAd2 e PVAd1. O teor médio de argila acima de 500 g kg⁻¹ (horizontes A e B) foi registrado nos projetos Água Branca, Boa Vista, Retiro e Sede Velha (Figuras 103g e 103h). Nos projetos São Roque, Tijuco, Sede Velha e Capão Alto, a média mapeada foi pouco inferior, próxima dos 450 g kg⁻¹. Nesses locais, há predomínio do LVd1 (teor médio de argila 522 g kg⁻¹) e do LVd2 (teor médio de argila 356 g kg⁻¹). O zoneamento do atributo diagnóstico pedológico relação silte/argila está apresentado nas Figuras 104g e 104h. Aproximadamente em 25% da área do Distrito Florestal, ocorreram valores superiores a 0,7 de relação silte/argila, sugerindo restrições na atual distribuição dos latossolos. O mapeamento mostrou que, nos projetos Açude do Lobo, Paranapanema, Lavrinhas, Lageado, Suinã, Rancho e Torre, o valor médio é próximo de 0,7. Há, nesses projetos, a ocorrências de valores que superam a relação de 1,5. As unidades de solos que registram a maior média da relação silte/argila foram os argissolos e os cambissolos, PVd3 (0,95), PVAd2 (0,78), PVAd1 (0,7), CXBd1 (0,67) e PVd1 (0,65). O grau de floclulação de argila (Figuras 105g e 105h) apresenta valores mais baixos nos projetos Açude do Lobo, Lavrinhas, Torre e Mangueirinha, com valores médios inferiores a 75%. Nesses projetos, há locais com ocorrência na ordem de 30% de floclulação da argila, onde se encontram o PVd1, o PVAd1, o PVAd2, o CXBd1 e o CXBd2. Por outro lado, a média geral do projeto Sede Velha (LVd1) é de aproximadamente 95%, constituindo uma área onde se encontram locais com máximo grau de floclulação. As relações entre os atributos argila, grau de floclulação, silte e relação silte/argila com a declividade mostraram certa tendência na distribuição dessas variáveis na paisagem. O coeficiente de correlação de Pearson entre o mapa de declividade e o teor de silte (horizonte B) foi de 0,2. Para a argila, essa relação foi negativa, com o valor de r igual a -0,28. A relação também foi negativa com o grau de floclulação da argila, com r igual a -0,2. A relação silte/argila teve um coeficiente de correlação com a declividade de 0,29. Já a correlação

entre o teor de silte e o grau de flocculação também apresentou relação negativa, com r igual a -0,38. Essas relações revelam que, quanto maior a declividade da vertente, menor o teor de argila e maior o teor de silte, resultando em maior relação silte/argila e em menor grau de flocculação da argila, o que, de certa forma, revela indícios da localização na paisagem dos horizontes Bw, Bt e Bi.

O mapeamento da matéria do solo (Figuras 106g e 106h) mostrou que os projetos Boa vista, Retiro, Inglês, Lageado, Torre e São Roque apresentaram a maior média no horizonte A, com teor superior a 25 g kg^{-1} . O estoque de carbono orgânico nesses projetos soma aproximadamente 65 Mg ha^{-1} . Em vários locais, a quantidade atingiu os 55 g kg^{-1} . Já os projetos Cruz de Ferro e Campo de Pousos apresentaram as menores concentrações médias de matéria orgânica no horizonte A, inferiores a 18 g kg^{-1} , atingindo, em algumas áreas, apenas 3 g kg^{-1} . O estoque de carbono orgânico nesses projetos é cerca de 40 Mg ha^{-1} . No horizonte B, as médias foram inferiores, próximas a 20 g kg^{-1} para os projetos São Roque, Tijuco e Inglês, e de 10 g kg^{-1} para Cruz de Ferro Correias e Cemiterinho. Entre as unidades de solos, as maiores concentrações foram registradas para o LVd1, o LVAd1 e o PVAd1, enquanto as menores, em áreas do PVd3 e do LVd3. Uma estimativa do total de carbono orgânico no horizonte A dos solos dos projetos do Distrito Florestal de Capão Bonito, apenas em áreas de efetivo plantio, indica um estoque de aproximadamente $1,2 \cdot 10^6 \text{ Mg}$.

O teor médio de fósforo no horizonte A (Figura 107g) apresentou baixos valores nos projetos Prainha, São Roque e Cruz de Ferro, de média 4 mg kg^{-1} , a até elevados valores em Boa Vista, Retiro e Lavrinhas, com valor médio de 10 mg kg^{-1} . A Figura 107g mostra que o teor de fósforo nos solos foi considerado baixo (RAIJ et al., 1996) em aproximadamente 25% da área: em condições naturais, os Latossolos Vermelhos apresentam baixos níveis de fósforo (PRADO, 1995). O horizonte B (Figura 107h) dos solos dos projetos Cruz de Ferro marcou teor de apenas 2 mg kg^{-1} de fósforo. Nessa mesma camada, os projetos Boa Vista e Capão Alto apontaram média de 4 mg kg^{-1} . No mapeamento, foi indicado que os solos PVd3, LVd1 e LVAd1, no horizonte A, apresentaram as maiores médias de fósforo. Para o horizonte B, os solos PVAd2 e CXBd2 tiveram a maior média de fósforo disponível.

Os projetos Retiro, Lavrinhas e Correias apresentaram, na camada de 0-30 cm, elevado valor de potássio (Figura 108g), com média de $2,6 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Os projetos mais pobres em potássio foram Deserto, Cruz de Ferro e Prainha, com média próxima de $0,6 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$. A Figura 108h mostra que mais de 50% dos solos apresentaram teor de potássio abaixo do ponto crítico (GONÇALVES, 1995). Na camada de 30-80 cm (Figura 108h), a maior média foi registrada no projeto Correias ($2,3 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$) e a menor, no projeto Cruz de Ferro ($0,3 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$). Os solos de maior concentração de potássio são o PVd3 ($2,5 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ no horizonte A), o PVd1, o CXBd1 e o PVAd2, enquanto a menor concentração média foi apontada nos solos LVd3 e LVAd3 ($0,7 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$).

Quanto ao zoneamento do cálcio (Figuras 109g e 109h), a concentração média entre os projetos variou de $1,9 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Deserto, Prainha e Rancho) a $8,8 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Torre e Paranapanema) e a até $14,3 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Lavrinhas). Os solos LVAd3, LVd3 e CXBd2 apresentaram média inferiores a $4 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ e os solos PVd1 e PVd3 superaram a marca dos $14 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$. No horizonte B, as concentrações médias e a amplitude foram bem menores, de $1 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Rancho, Prainha e Água Branca) a $3 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Paranapanema, Torre e Cemiterinho).

As concentrações médias de magnésio (Figuras 110g e 110h) nos projetos variaram de $5,5 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Grupo) e $7,6 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Lavrinhas) a $1,5 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Cruz de Ferro, Deserto e Correias). Na camada de 30-80 cm, o teor médio é de $1 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ para os projetos Deserto, Cruz de Ferro e Açude do Lobo, e as maiores concentrações, de 2 a $4 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$, ocorrem nos projetos Sede Velha e Inglês. O solos PVd1 e PVd3 apresentam o maior teor médio em sua área de ocorrência (8 e $2 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$, horizonte A e B, respectivamente).

O mapeamento do atributo sódio (Figura 111g) revelou que as concentrações mais elevadas ocorreram nos projetos Boa Vista ($3,7 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$) e Lavrinhas ($1,7 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$), enquanto os menores teores médios de sódio, abaixo de $0,25 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$, nos projetos Água Branca, Sede Velha, Lageado e Prainha. No horizonte B (Figura 111h), os projetos Capão Alto, Retiro e Boa Vista apresentaram teor médio acima de $2 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$, enquanto Prainha, Cruz de Ferro, Grupo, Tijuco e Lageado apresentaram teores médios inferiores a $0,2 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$. O solo PVd3 apresenta a maior média de teor de sódio no horizonte A e B, respectivamente $6,4$ e $4,5 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$.

Os projetos Inglês, Torre e São Roque apresentam a menor média de alumínio (Figuras 112g e 112h), inferior a $12 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$, nos horizontes A e B. Teores acima de $22 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ foram encontrados no horizonte A, dos projetos Cruz de Ferro, Correias e Água Branca. Estes últimos, mais Suinã e Boa Vista, apresentaram a maior média na camada subsuperficial, entre 16 e $18 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$. O PVd1 apresentou a menor concentração no horizonte A ($14 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$) e B ($11 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$). As médias mais elevadas de concentração de alumínio, para a camada superficial, foram detectadas nos solos LVAd3 ($21 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$), LVd1 ($19 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$) e LVd3 ($18 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$). Esses mesmos solos apresentaram a maior média no horizonte B, aproximadamente $15 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$. O atributo alumínio+hidrogênio (Figuras 113g e 113h) foi localizado com maior média de concentração nos projetos Tijuco e São Roque, nos horizontes A e B, respectivamente 85 e $65 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Os solos predominantes nesses dois projetos, o LVd1 e o LVd2, apresentaram a maior média de alumínio+hidrogênio, respectivamente horizonte A e B, 78 e $58 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Por outro lado, o solo PVd3 apresentou a menor média, de $60 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$, para o horizonte A, e de $40 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$, para o B. A menor média de concentração foi encontrada nos projetos Cruz de Ferro, Correias e Lavrinhas, 55 (A) e 40 (B) $\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Nessa direção, nos projetos Lavrinhas, Boa Vista, Torre, Retiro e São Roque, foi encontrada a menor saturação por alumínio (Figuras 121g e 121h), com média abaixo de 55% ; já valores acima de 80% foram mapeados nos projetos Açude do Lobo, Prainha, Rancho, Deserto e Cruz de Ferro. Nestes, encontraram-se talhões com valores próximos de 90% de participação de alumínio em relação ao total de cátions do complexo de troca. A saturação por alumínio é de 40% para o PVd3 e superior a 80% para o LVAd3.

O zoneamento da variável ΔpH (Figuras 116g e 116h) mostra os projetos Cemiterinho, Lageado, Rancho e Cruz de Ferro apresentando média nula ou ligeiramente positiva ($0,05$), com áreas atingindo valores positivos de ΔpH igual a $0,3$. Nos projetos Rancho e Açude do Lobo, a média de $\text{pH H}_2\text{O}$ (Figuras 114g e 114 h) foi de $3,5$, com áreas registrando valores de $3,3$, enquanto, para o pH KCl (Figuras 115g e 115h), marcaram média de $3,6$, com máxima de $3,9$. Nesses projetos, predominaram cargas positivas, retendo o solo mais ânions. Já os projetos São Roque e Torre apresentaram ΔpH negativo (média $-0,4$), com locais atingindo valores iguais a -1 .

Esses projetos apresentam pH H₂O médio de 4,3, com talhões atingindo valores iguais a 4,8, predominando as cargas negativas, o que resulta em maior retenção de cátions. Os solos PVd1, CXBd1 e PVAd2 apresentaram Δ pH negativo (-0,2), enquanto os solos LVd3, PVAd1 e LVAd3, Δ pH de neutro a ligeiramente positivo.

A soma de bases (Figuras 117g e 117h), a CTC efetiva (Figuras 118g e 118h), a CTC pH7 (Figuras 119g e 119h) e a saturação por bases (Figuras 120g e 120h) são encontradas com maiores médias, respectivamente, nos projetos Lavrinhas (26, 48 e 98 mmol_c kg⁻¹ e 27%), Retiro (16, 37 e 95 mmol_c kg⁻¹ e 17%) e Água Branca (13, 38 e 109 mmol_c kg⁻¹ e 13%). Os solos representativos dessas regiões e que apresentam as maiores médias são o PVd3 (29, 47 e 98 mmol_c kg⁻¹ e 31%) e o LVd1 (13, 32 e 98 mmol_c kg⁻¹ e 31%). As menores soma de bases, CTC efetiva, CTC pH7 e saturação por bases são encontradas nas áreas dos projetos Deserto (3,8, 22 e 86 mmol_c kg⁻¹ e 4%), Cruz de Ferro (4, 26 e 49 mmol_c kg⁻¹ e 8%) e Rancho (3, 26 e 84 mmol_c kg⁻¹ e 6%), onde predominam os solos LVAd3 (5, 25 e 76 mmol_c kg⁻¹ e 6%), LVd3 (7, 26 e 76 mmol_c kg⁻¹ e 10%) e CXBd2 (7, 26 e 72 mmol_c kg⁻¹ e 10%).

O mapeamento dos atributos do solo mostrou uma distribuição variada ao longo do perímetro do Distrito Florestal de Capão Bonito. As variáveis, em sua maioria, apresentaram zonas específicas de ocorrência, isto é, uma distribuição variada ao longo do perímetro do Distrito Florestal de Capão Bonito, sugerindo algumas revisões nos limites das unidades de solos mapeadas na área de estudo (GONÇALVES, 1997; RIZZO, 2001). Os atributos texturais guardaram consideráveis relações com o relevo local. Os zoneamentos desses atributos, de importância edafopedológicas, devem nortear e conduzir o adequado manejo em cada situação. Da mesma forma, Menezes (2005) concluiu que a classe de solo definida nos níveis categóricos mais baixos, pelo menos no 4º nível, aliada às feições topográficas, é forte indicadora da produtividade do eucalipto.

Figura 97 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo areia fina (g kg^{-1}), histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito

Figura 98 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo areia média (g kg^{-1}), histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito

Figura 99 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo areia grossa (g kg^{-1}), histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito

Figura 100 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo areia muito grossa (g kg⁻¹), histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito

Figura 101 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo areia total (g kg^{-1}), histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito

Figura 102 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo *silte* (g kg^{-1}), histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito

Figura 103 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo argila (g kg^{-1}), histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito

Figura 105 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo grau de floculação da argila (%), histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito

Figura 106 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo matéria orgânica (g kg^{-1}), histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito

Figura 107 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo fósforo (mg kg^{-1}), histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito

Figura 108 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo potássio (mmol_c kg⁻¹), histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito

Figura 109 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo cálcio ($\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$), histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito

Figura 110 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo magnésio (mmolc kg⁻¹), histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito

Figura 111 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo sódio ($\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$), histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito

Figura 112 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo alumínio (mmol_c kg⁻¹), histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito

Figura 113 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo alumínio+alumínio ($\text{mmol}_c \text{kg}^{-1}$), histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito

Figura 114 - Distribuição espacial dos pontos para o atributo pH H_2O , histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito

Figura 115 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo pH KCl, histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito

Figura 116 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo delta pH, histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito

Figura 117 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo soma de bases ($\text{mmol}_c \text{kg}^{-1}$), histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito

Figura 118 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo CTC efetiva (mmolc kg⁻¹), histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito

Figura 119 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo CTC pH7 (mmol_c kg⁻¹), histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito

Figura 120 – Distribuição espacial dos pontos para o atributo saturação por bases (%), histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito

Figura 121 - Distribuição espacial dos pontos para o atributo saturação por alumínio (%), histograma, semivariograma omnidirecional e mapa interpolado no horizonte superficial (respectivamente, a, c, e, g) e subsuperficial (respectivamente, b, d, f, h) para o Distrito Florestal de Capão Bonito

Os atributos argila (Figura 103g), silte (Figura 102g) e CTCefetiva (118g) foram correlacionados com alguns parâmetros de entrada do modelo (eq. 23, 24, 26, 33 e 34). Os mapas dos atributos edáficos que se seguem é de propriedade das células do modelo.

O mapa de teor de argila do modelo 3-PGIS (Figura 122a) está classificado conforme o agrupamento textural recomendado (EMBRAPA, 2006). Predominam solos de textura argilosa ($350 - 600 \text{ g kg}^{-1}$) em 49,6% da área de efetivo plantio. Os solos de textura média ($150 - 350 \text{ g kg}^{-1}$) estendem-se por 45,9% da área. Os solos considerados muito argilosos ($> 600 \text{ g kg}^{-1}$) abrangem 4,5% da área dos talhões e os enquadrados como arenosos ($< 150 \text{ g kg}^{-1}$) não são encontrados. A distribuição levemente assimétrica positiva do teor de argila pode ser observada na Figura 123a, com média de 372 g kg^{-1} e mediana igual a 365 g kg^{-1} . Os projetos da Regional Santa Fé apresentam solos argilosos a muito argilosos, sendo que o projeto Água Branca se destaca como o mais argiloso (Figura 124a). Os projetos Suinã, Mangueirinha, Cruz de Ferro, Correias, Paranapanema e a Regional Paranaquitanga possuem solos de textura média.

O mapa de teor de silte (Figura 122b) e sua forte distribuição assimétrica positiva (Figura 123b), com média de 132 g kg^{-1} mediana de 120 g kg^{-1} , indicam que prevalece baixos teores desta fração granulométrica nos solos de Capão Bonito. Aproximadamente 47,7% dos solos contêm teores de silte de até 118 g kg^{-1} . Teores acima de 241 g kg^{-1} ocorre em apenas 2,9% da área de efetivo plantio, ocorrendo principalmente nos projetos Torre e Paranapanema (Figura 124b).

O mapa de CTC efetiva do modelo 3-PGIS (Figura 122c) apresenta distribuição positiva (Figura 123c) com média e mediana, respectivamente, igual a 26,7 e 28,5 $\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Aproximadamente 85% dos solos apresentam CTC efetiva inferiores a 36,8 $\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Os projetos da Regional Santa Fé apresentam maiores concentrações de CTC efetiva (123c).

Figura 122 – Mapas dos atributos pedológicos argila (a), silte (b) e CTCefetiva (c) utilizados no modelo 3-PGIS

Figura 124 – Ocorrência dos atributos edáficos argila (a), silte (b), matéria-orgânica (c) e CTC efetiva (d) nos projetos do Distrito Florestal de Capão Bonito

4.8 Índice de fertilidade do solo

A produtividade florestal, expressa como o volume total com casca aos seis anos (equação y_1) apresenta uma relação exponencial entre a CTC efetiva (Figura 125). Obteve-se uma relação altamente significativa ($R^2 = 0,92$; $p < 0,0001$). Os valores de CTC efetiva nas parcelas amostradas variaram de 8 a $32 \text{ mmol}_c \text{kg}^{-1}$ e a amplitude do volume total com casca foi de $123 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ (286 a $409 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$). A equação mostra que o acréscimo de $1 \text{ mmol}_c \text{kg}^{-1}$ na CTC efetiva reflete num incremento de $4,8 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ no volume total com casca, aos seis anos. Esta relação, adaptada para Capão Bonito,

traduz a idéia, proposta por Novais et al. (1986), do nível crítico de manutenção dos nutrientes para manter a produtividade florestal.

O índice de fertilidade do solo foi relacionado com a CTC efetiva e sua representação está na Figura 125 (eixo y_2). Sua estimativa foi proposta estabelecendo-se a amplitude do índice de 0,57 a 0,89 para os valores limites de CTC efetiva encontrados nas parcelas amostradas. A equação y_2 (Figura 125) é uma relação empírica ajustada do índice de fertilidade. Na Inglaterra, estudando a produtividade do Abeto (*Picea sitchensis*), Waring (2000) utilizou amplitude de valores semelhantes do índice de fertilidade do solo, entre 0,3 e 1, de acordo com a fertilidade do solo e a produtividade da floresta. Na região do estado de Washington, nos Estados Unidos, Waring e McDowell (2002) utilizaram valores mais baixos e numa amplitude restrita, entre 0,42 e 0,5. Numa ampla região no noroeste dos Estados Unidos, no estado de Oregon, Coops et al. (2005) aplicaram o 3-PG numa versão espacial e fixaram o valor do índice de fertilidade em 0,4, desconsiderando, desta forma, a variabilidade dos solos. Numa região temperada da Austrália, Paul et al. (2007) calibrou o modelo 3-PG para as espécies *Eucalyptus cladocalyx* e *E. maculata* utilizando também um paralelo entre a fertilidade do solo e a produtividade do sítio para estabelecer os valores de índice de fertilidade entre 0,1 e 1. Porém os autores fizeram essa relação de forma qualitativa, isto é, para classes DAP e tipos de solos. Na região sul da China, Zhao et al. (2009) calibraram o modelo 3-PG para a espécie *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook, e assumiram um valor fixo de 0,37 para o índice de fertilidade do solo. No Brasil também é comum os pesquisadores adotarem valores fixos do índice de fertilidade, mesmo o estudo abrangendo ampla região, e desta forma, elevada pedodiversidade. Por exemplo, na região sul da Bahia, Almeida et al. (2004) aplicaram o valor de 0,6. Na região de Vazante, Minas Gerais, Tsukamoto Filho et al. (2004) utilizaram índice de fertilidade igual a 0,5. No mesmo estado, na região de Santana do Paraíso, Silva (2006) assumiu o valor de 0,9 para os solos estudados. Em Curvelo e Itacambira, em Minas Gerais, Borges (2009) utilizou três valores de índice de fertilidade do solo, 0,4, 0,9 e 1. Na região norte da Bahia, foi usado o valor igual a 0,6 (STAPE et al., 2004). Behling (2009) calibrou o modelo 3-PG para Teca (*Tectona grandis*) em Tangará da Serra, estado de Mato Grosso, e usou o valor do índice igual a 0,9 para os solos de alta

fertilidade natural da região. Baesso et al. (2010), de forma generalizada, assumiram o índice de sítio igual a 1 para uma ampla região entre o sul da Bahia e o norte de Espírito Santo. Apenas em experimentos fertirrigados é razoável adotar o valor do índice de fertilidade igual a 1, como fizeram Stape et al. (2004) e Silva (2006). Guimarães et al. (2007) estudando a produtividade do eucalipto no estado de Minas Gerais com uso do modelo 3-PG, utilizaram a textura do solo para estimar valores do índice de fertilidade, embora os autores tenham omitido o método e os seus valores do trabalho. Almeida et al. (2010), estudando a produtividade do eucalipto na região sul da Bahia e norte do Espírito Santo, aplicou um método mais elaborado para se obter o índice de fertilidade, utilizando-se para isso os conceitos descritos por Resende et al. (1999) e aplicados por Gomes e Curi (2001) na mesma área de estudo. O índice de fertilidade variou de 0,48 a 0,84, porém os valores foram aplicados aos polígonos de solos, de forma de não contínua na paisagem, diferentemente do presente estudo (Figura 126).

A equação da Figura 125 foi aplicada ao mapa de CTC efetiva (Figura 122d) e o produto gerado está apresentado na Figura 126. O índice de fertilidade médio de todo o Distrito Florestal apresenta valor igual a 0,82. Valores entre 0,82 e 0,86 correspondem a 37% da área. O índice abaixo de 0,81 abrange 26% e acima de 0,86 os 37% restantes da área de efetivo plantio. Os valores mais elevados do índice de fertilidade são registrados em locais de maior concentração de matéria orgânica e de solos mais argilosos (Regional Santa Fé). As menores médias do índice de fertilidade foram mapeadas nos projetos Prainha, Deserto e Silo, onde há presença dos solos de baixa fertilidade natural: CXBd2, LVd3, LVAd2 e LVd2.

Figura 125 – Relação entre a CTC_{efetiva} (mmol_c kg⁻¹) e o volume total com casca (eixo y₁, m³ ha⁻¹) e a equação do Índice de Fertilidade (y₂). A única curva representa as duas relações, modificando apenas os coeficientes A e B das equações

Figura 126 – Mapa do Índice de Fertilidade do Distrito Florestal de Capão Bonito

4.9 Cálculo de água no solo

O potencial da água no solo na capacidade de campo apresenta uma curva crescente com o aumento do teor de argila, cuja assíntota corresponde à textura muito argilosa (> 600 g kg⁻¹) dos solos de Capão Bonito (Figura 127). Observa-se que na

capacidade de campo, quando o solo tem a quantidade máxima de água útil às plantas, a amplitude registrada nas parcelas estudadas é entre 30 a 49% em conteúdo volumétrico. O ponto de murcha permanente aumenta linearmente à medida que a textura torna-se mais fina. Neste potencial, os solos muito argilosos apresentam mais de 40% em conteúdo volumétrico de água retida, porém de forma não disponível às plantas e chamada de água higroscópica (KIEHL, 1979). Beutler et al. (2002) estudando dois latossolos (Latosolo Vermelho distrófico típico textura média/argilosa e Latossolo Vermelho eutroférico, típico, textura argilosa/argilosa) na região de Jaboticabal (SP), concluíram que o teor de argila foi uma das variáveis mais importantes na determinação da retenção de água destes solos, na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente. Klein et al. (2010) obtiveram curva semelhante entre o teor de argila+silte e o ponto de murcha permanente para amostras de Latossolos Vermelhos Distróficos do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. As curvas obtidas na Figura 127 são semelhantes ao modelo teórico de água disponível dos solos apresentado por Brady e Weil (2008). Em Angatuba, Alambari e São Miguel Arcanjo, regiões vizinhas à área de estudo, Gava e Gonçalves (2008) encontraram valores semelhantes de água disponível nos solos, embora a interpretação e o modelo ajustado tenham sido diferentes.

A curva da capacidade de água disponível, que é a subtração das equações da capacidade de campo e do ponto de murcha permanente (Figura 127) para a mesma textura do solo, está apresenta na Figura 128. Desta forma, a relação entre a textura do solo e a capacidade de água disponível é mais nítida. As classes de disponibilidade de água foram interpretadas conforme sugeriram Oliveira e Paula (1988) para os latossolos da região sudeste do Brasil, que se seguem, baixa: $< 0,6 \text{ mm cm}^{-1}$; média $0,61 < \text{CAD} < 1,23 \text{ mm cm}^{-1}$; alta: $> 1,23 \text{ mm cm}^{-1}$. Na região de Piracicaba (SP), Reichardt (1990) encontrou valores semelhantes de água disponível para alguns solos: Latossolo Vermelho Distrófico típico, textura muito argilosa ($0,8 \text{ mm cm}^{-1}$) e Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico, textura média ($1,1 \text{ mm cm}^{-1}$).

Figura 127 – Influência do teor de argila na retenção de água no solo na condição de Capacidade de Campo (CC) e no Ponto de Murcha Permanente (PMP) em solos do Distrito Florestal de Capão Bonito

Figura 128 – Influência do teor de argila na capacidade de água disponível (CAD) nos solos do Distrito Florestal de Capão Bonito. Classes de interpretação de disponibilidade de água conforme Oliveira e Paula (1988)

O mapa que representa a disponibilidade de água para todo o perfil (CAD total) dos solos de Capão Bonito está na Figura 129. A amplitude da CAD estimada e mapeada é de 372 mm, com limites entre 72 e 444 mm. Estes limites são para os perfis dos solos estudados e apresentados nas Tabelas 2 e 8. A CAD apresenta distribuição

assimétrica com média igual a 320 mm m^{-1} e mediana de 370 mm m^{-1} para todo o Distrito Florestal. Conforme as classes da legenda da Figura 129, valores de CAD menores que 100 mm abrangem apenas 4,2% dos solos de Capão Bonito. Aproximadamente 33,5% dos solos apresentam CAD entre 100 a 350 mm . Os outros 62% da área têm uma CAD acima de 350 mm . Os projetos da Regional Santa Fé, com solos argilosos (LVd2 = 350 mm de CAD) a muito argilosos (LVd1 = 390 mm de CAD), alto teor de matéria orgânica e maior profundidade efetiva (2 a 3m), apresentam elevada capacidade de água disponível (Figura 130). Por outro lado, os projetos Correias, Cruz de Ferro e Açude do Lobo, com textura mais grosseira do solo (LVd3 e LVAd3 = 200 mm de CAD) e menor profundidade efetiva (CXbd1 e CXbd2 = 140 mm de CAD) possuem a menor média de CAD do Distrito Florestal (Figura 130). Na região sul da Bahia e norte do Espírito Santo, Almeida et al. (2010), de forma simplificada, também elaboraram um mapa de CAD para os polígonos dos mapas de solos. A CAD variou de 90 a 192 mm para uma profundidade máxima de 2,5m.

Figura 129 – Mapa de Capacidade de Água Disponível do Distrito Florestal de Capão Bonito

Figura 130 – Ocorrência da média, mínima e máxima capacidade de água disponível (mm) nos projetos do Distrito Florestal de Capão Bonito

As relações entre a textura do solo e os parâmetros do modificador de água no solo (f_{θ}), potência do déficit de razão de umidade (n_{θ}) e déficit de razão de umidade para $f_{\theta}=0,5$ (c_{θ}) (eq. 25), estão apresentadas na Figura 131. O ajuste destas equações exponenciais teóricas é baseado em valores correspondentes aos dados propostos por Sands (2001). Desta forma, foram obtidos mapas destes dois parâmetros em todas as células do Distrito Florestal utilizadas no modelo 3-PGIS, os quais são entradas do sub-modelo do balanço hídrico. De forma qualitativa, Stape et al. (2004), Silva (2006), Guimarães et al. (2007), Behling (2009) e Borges (2009) também utilizaram as classes de textura dos solos e os valores dos parâmetros indicados por Sands (2001).

Figura 131 – Relação teórica entre a potência do déficit de razão de umidade (n_θ) e o teor de argila (g kg^{-1}) (a). Relação estimada entre o déficit de razão de umidade para $f_\theta=0,5$ (C_θ) e o teor de argila (g kg^{-1}) (b)

A Figura 132 apresenta para os meses de 2003 o total de água armazenada nos solos do Distrito Florestal de Capão Bonito. Embora a regional Santa Fé apresente a maior média de CAD (Figura 130) da área de estudo, em alguns meses apresentou baixa quantidade de água disponível (Figuras 132a, 132c, 132e, 132f e 132i) frente aos outros projetos, devido à baixa precipitação registrada nesta regional conforme apresentam as Figuras 93a, 93c, 93e, 93f e 93i. Considerando os meses de janeiro (131a) e outubro (131j) de 2003 o projeto Açude do Lobo apresentou as menores médias de água disponível, 177 e 80 mm, respectivamente, enquanto que o projeto Campo de Pousos apresentou as maiores médias para esses meses (381 e 294 mm). Durante o mês de outubro de 2003 (Figura 132j) o solo CXbd2 apresentou a menor média de água disponível, 40 mm, seguido pelos solos PVAd2 (80 mm), CXbd1 (86 mm) e PVAd1 (90 mm).

Figura 132 – Distribuição do total de água disponível no solo mensal para o ano de 2003 no Distrito Florestal de Capão Bonito

4.10 Variável densidade da madeira

Observou-se uma relação exponencial ($R^2 = 0,71$) entre a soma de argila e silte com a densidade básica ponderada do lenho (aos seis anos), expressando que a densidade básica da madeira é sensível a textura fina do solo (Figura 133). Os valores de argila+silte nas parcelas amostradas variaram de 320 a 860 g kg⁻¹ e a amplitude da densidade básica das árvores amostradas foi de 0,0591 g cm⁻³ (0,4792 a 0,5383 g cm⁻³). A dispersão dos pontos mostra que os solos arenosos, com 320 g kg⁻¹ de argila+silte, apresentam densidade básica de 0,53 g cm⁻³. Os solos muito argilosos, com 780 g kg⁻¹ argila+silte, tendem a produzir árvores com densidade do lenho de 0,48 g cm⁻³. Indiretamente, os sítios de maiores produtividades resultaram em árvores de menor densidade básica. Na África do Sul foram encontradas relações semelhantes para diversas espécies de eucaliptos (CLARKE et al., 1999) e para clones de *Eucalyptus grandis* (MEGOWN et al., 2000), onde a densidade da madeira reduziu com o aumento do índice de sítio. Barreiros et al. (2007) também verificaram que a densidade básica da madeira diminuiu com o aumento da taxa de crescimento de árvores que receberam maiores doses de bio sólido. Naidoo et al. (2007) verificaram que a densidade da madeira de *E. grandis* reduziu em regiões de alta disponibilidade de água, e desta forma elevado índice de sítio. Conclusão similar foi obtida por Tomazello Filho et al. (2007), no Brasil, avaliando o efeito da irrigação na densidade básica de clones de *E. grandis* x *E. urophylla*. Rigatto et al. (2004), na região de Telêmaco Borba (PR), também encontraram que as madeiras de *Pinus taeda* provenientes de sítios com texturas mais argilosas apresentaram menores valores de densidade básica. Conclusão semelhante foi obtida por Tsoumis e Panagiotidis (1980), que estudaram o efeito das condições de crescimento nas características da madeira de *Pinus nigra*, onde observaram que as madeiras provenientes de sítios com textura mais argilosa, de crescimento mais elevado, apresentavam menores valores de densidade básica. Por outro lado, outros trabalhos próximos à área de estudo, sobre as relações entre as características da madeira de *E. grandis* e as características edáficas, concluíram que a densidade básica da madeira não se alterou nas diferentes classes de solo (GONÇALVES, 1987; GAVA; GONÇALVES, 2008).

Figura 133 – Relação entre a soma do teor de argila e silte (g kg⁻¹) e a densidade básica ponderada da madeira aos seis anos (g cm⁻³)

O mapa da densidade básica da madeira (Figura 134) foi obtido aplicando-se a equação da Figura 133 nos mapas de argila (Figura 122a) e silte (Figura 122b). O mapa da densidade básica apresenta distribuição normal com média e mediana igual a 0,51 g cm⁻³. Valores de densidade básica inferiores a 0,502 g cm⁻³ ocorrem em 26,2% da área, em solos de textura mais fina (> 800 g kg⁻¹ de argila+silte), como o LVd1 e LVAd1, que apresentam em suas áreas, densidade básica média de 0,5 g cm⁻³. As árvores de menor densidade básica ocorrem principalmente nos projetos São Roque, Tijuco, Valinhos e Inglês e na Regional Santa Fé (Figura 135). Aproximadamente 56,3% da área apresentam árvores com densidade básica do lenho entre 0,502 a 0,522 g cm⁻³ ocorrendo, principalmente, nos projetos Grupo, Campo de Pouso, Cemiterinho, Prainha e Suinã (Figura 135), onde há predomínio de solos de textura média. Estes solos apresentam em suas áreas de ocorrência, densidade básica de 0,51 g cm⁻³ (LVd2), 0,515 g cm⁻³ (PVAd2), 0,518 g cm⁻³ (LVAd2). Os sítios que produziram árvores de maior densidade básica, acima de 0,523 g cm⁻³, são aqueles localizados em solos de textura mais grosseira (teor de argila menor que 200 g kg⁻¹). Estes sítios desta classe de densidade, com 17,5% de ocorrência, localizam-se predominantemente nos projetos Cruz de Ferro e Correias e na Regional Paranaipitanga (Figura 135), onde predomina os solos CXbd2, LVd3 e LVAd3, com densidade básica média acima de 0,523 em suas áreas de abrangência. O solos LVd3, no projeto Correias, apresenta árvores com densidade básica atingindo 0,54 g cm⁻³.

Figura 134 – Mapa de densidade básica da madeira do Distrito Florestal de Capão Bonito

Figura 135 – Ocorrência da média, mínima e máxima densidade básica da madeira nos projetos do Distrito Florestal de Capão Bonito

Em duas oportunidades de visitas de campo, no projeto Paranapanema, foram flagrados situações críticas dos talhões, após eventos climáticos registrados no Distrito Florestal (Figura 136). Embora mapeado com médio índice de quebra de árvores, com média de 22, mínima de 13 e máxima de 59 árvores ha^{-1} , a área do Projeto

Paranapanema sofreu rajadas de vento muito acima do foi medido pela estação meteorológica da Regional Boa Esperança. Nos dois eventos (Figuras 136a, 136b e 136c) as rajadas de ventos registradas foram inferiores a 6 m s^{-1} . Em situação semelhante ocorrida em Altinópolis, nordeste de São Paulo, Silva (2005) comenta que os ventos atingiram velocidade de 17 m s^{-1} , ocasionando alto índice de quebra de árvores. O resultado do elevado índice de quebra está apresentado na Figura 136d, onde se observa uma linha de árvores quebradas com rebrota a partir do ponto de ruptura, geralmente observado na altura entre 2 e 3 m, em idade de 3 a 4 anos. Ferreira et al. (2010) também observaram essa característica para clones de *E. grandis* x *E. urophylla*, onde a altura média de quebra das árvores foi de 2,5m.

Figura 136 – Elevada suscetibilidade de quebra pelo vento do material genético C219H. Evento em 25/01/2006 (22,2 mm de precipitação e $5,5 \text{ m s}^{-1}$ de velocidade máxima do vento) (Fotografia tirada na mesma data) (a, b). Evento em 09/02/2006 (19,2 mm de precipitação e $3,4 \text{ m s}^{-1}$ de velocidade máxima do vento) (Fotografia tirada na mesma data). Registros climáticos da estação meteorológica automática do Viveiro (Boa Esperança). (Fotografias Projeto Paranapanema Regional Santa Inês) (c). Aspecto de uma linha de rebrota, na altura do ponto de ruptura (2 a 3 m), do material genético C219H. (Fotografia em Setembro/2008. Projeto Paranapanema Regional Santa Inês) (d)

4.11 Variável máxima biomassa de fuste

Foi observada uma relação exponencial positiva ($R^2 = 0,85$) entre a textura fina do solo e a biomassa do lenho das árvores amostradas em Capão Bonito (Figura 137). O gráfico apresenta a máxima biomassa de fuste para os sítios florestais amostrados, segundo a densidade populacional existente, 1.111 árvores ha^{-1} e o nível do manejo adotado. Os valores da textura fina (argila+silte) nas parcelas amostradas variaram de 320 a 860 g kg^{-1} e amplitude da biomassa de fuste aos seis anos foi de 121 kg árvore^{-1} (massa seca, 153 a 274 kg árvore^{-1}). A equação expressa que o acréscimo de 100 g kg^{-1} (de argila+silte), de textura arenosa para média (100 para 200 g kg^{-1}), há um incremento de 36 kg árvore^{-1} . Passando de textura argilosa para muito argilosa (600 para 700 g kg^{-1}) o sítio reflete num incremento de 15 kg árvore^{-1} na biomassa de fuste. Gonçalves et al. (1990), da mesma forma, verificaram que as frações texturais finas (silte e argila) relacionaram-se diretamente com o crescimento das árvores. Essas frações texturais assumem papéis fundamentais na capacidade de retenção de umidade e nutrientes, particularmente nos solos de textura arenosa (GONÇALVES, 1988). Takahashi et al. (2006) observaram na região de Luiz Antônio (SP) que os solos deveriam ter ao menos 100 g kg^{-1} de teor argila para manter uma adequada produtividade do eucalipto, permitindo, neste caso, plantações em Neossolos Quartzarênicos. Em áreas de Latossolos Vermelhos e Vermelho-Amarelos, na região de Itatinga (SP), Gonçalves (2003) encontrou relação positiva entre o teor de argila e silte com a produtividade de madeira de *E. grandis*. Gava e Gonçalves (2008) também observaram relação exponencial positiva entre a textura de Latossolos Vermelho-Amarelos e Neossolos Quartzarênicos e a produtividade de madeira de *E. grandis*. Embora o presente estudo tenha encontrado elevada variabilidade da máxima biomassa de fuste produzida por diferentes sítios florestais, outros estudos usando o modelo 3-PG têm assumido essa variável como valor fixo e padrão, por exemplo, o valor de 300 kg árvore^{-1} adotado por Sands e Landsberg (2002), Dye et al. (2004), Stape et al. (2004), Silva (2006) e Borges (2009).

Figura 137 – Relação entre a soma do teor de argila e silte (g kg⁻¹) e a biomassa de fuste (kg árvore⁻¹) aos seis anos

O mapeamento da máxima biomassa de fuste (Figura 138) foi realizado aplicando-se a equação da Figura 137 nos mapas de argila (Figura 122a) e silte (Figura 122b) do Distrito Florestal. O mapa de biomassa de fuste apresenta distribuição assimétrica negativa com média de 177 kg árvore⁻¹ e mediana igual a 181 kg árvore⁻¹. Locais mapeados com biomassa de fuste inferiores a 147 kg árvore⁻¹ ocorrem em 16% da área, em solos de textura grosseira (< 350 g kg⁻¹ de argila+silte). A biomassa de fuste mapeada nos solos LVAd3, LVd3, CXbd2 e LVAd2 apresentaram as menores médias, abaixo de 160 kg árvore⁻¹, com áreas dos dois primeiros solos chegando a 96 kg árvore⁻¹. Estes sítios menos produtivos localizam-se nos projetos Cruz de Ferro e Correias e na Regional Parapanapitanga (Figura 139). Aproximadamente 59% da área apresentam árvores com biomassa de fuste entre 148 kg e 198 kg ocorrendo, principalmente, nos projetos Grupo, Campo de Pousos, Cemiterinho, Parapanapitanga, Torre e Suinã, (Figura 139), onde há predomínio de solos de textura média, como o PVAd2, LVd2 e CXBd1, com média abaixo de 175 kg árvore⁻¹. Os sítios florestais mais produtivos, com árvores de biomassa de fuste acima de 200 kg, são aqueles localizados em solos de textura fina (teor de argila maior que 500 g kg⁻¹), ocorrendo predominantemente nos projetos São Roque, Inglês, Valinhos e na Regional Santa Fé (Figura 139). Nestes locais predominam os solos LVd1 e LVAd1, com médias de biomassa entre 195 a 205 kg árvore⁻¹, atingindo em alguns talhões a marca de 236 kg

árvore⁻¹. Os sítios desta classe de biomassa de fuste ocorrem em 25% da área de efetivo plantio.

Figura 138 – Mapa de biomassa de fuste (kg árvore^{-1}) aos seis anos do Distrito Florestal de Capão Bonito

Figura 139 – Ocorrência da média, mínima e máxima biomassa do fuste (kg árvore^{-1}) nos projetos do Distrito Florestal de Capão Bonito

4.12 Variável fração casca + galho

A Tabela 18 apresenta os coeficientes dos modelos (eq. 37) de Clutter (1980) para a estimativa da biomassa por árvore e de seus compartimentos aéreos, segundo a textura do solo. Obtiveram-se ajustes satisfatórios para as equações propostas, com R^2 variando de 0,46 (para pequenas amostras) a 0,84 (para grandes amostras). Com o uso destes modelos e levando-se em consideração a textura do solo nas parcelas amostradas, o parâmetro fração casca+galho ($fb_b = \text{branch} + \text{bark fraction}$) (eq. 35), em todas as idades, foi calculado para as árvores selecionadas em Capão Bonito. Na região de Altinópolis (SP), Silva (2005) obteve ajustes semelhantes de equações de biomassa para o material genético C219H.

Tabela 18 – Coeficientes e estatística dos modelos de regressão para determinação da biomassa dos compartimentos do material genético C219H, segundo a textura dos solos de Capão Bonito

Compartimento	Textura do solo	Coeficiente			Estatística	
		a	b	c	R^2	N
Lenho	Total	0,017881	1,524609	1,404198	0,84	60
	Arenosa	0,004632	1,228910	2,064034	0,83	24
	Media	0,031730	1,318704	1,409420	0,82	21
	Argilosa	0,088954	1,929236	0,577981	0,70	15
Casca	Total	0,007068	1,321630	1,120514	0,66	60
	Arenosa	0,039892	1,658627	0,306222	0,67	24
	Media	0,006972	0,506239	1,828205	0,59	21
	Argilosa	0,101331	1,461183	0,221209	0,46	15
Galho	Total	0,000054	2,012696	1,876497	0,84	60
	Arenosa	0,000005	1,702647	2,846813	0,83	24
	Media	0,000126	1,697414	1,893842	0,83	21
	Argilosa	0,000811	2,424850	0,716336	0,70	15
Folha	Total	0,000096	1,811069	1,679971	0,84	60
	Arenosa	0,000014	1,502298	2,512719	0,83	24
	Media	0,000200	1,542224	1,690964	0,83	21
	Argilosa	0,000889	2,225130	0,661561	0,70	15

Os valores estimados do parâmetro fb_b1 (idade inicial) e fb_b2 (idade madura) foram correlacionados com a CTC efetiva das parcelas amostradas, conforme mostra a Figura 140. Os valores da fração fb_b1 variaram de 0,111 a 0,187 enquanto que a fração fb_b2 variou de 0,122 a 0,132. A Figura 140a apresenta que a fração fb_b1 apresenta

relação exponencial negativa com a CTC efetiva. Árvores em solos com CTC efetiva de 10 mmol_c kg⁻¹ apresentam fbb1 igual 0,18, e sítios com CTC efetiva de 35 mmol_c kg⁻¹ apresentam árvores com fbb1 igual a 0,11. A equação indica que árvores, na idade inicial, localizadas em sítios de CTC efetiva, interpretados como de menor fertilidade, alocam mais fotoassimilados para a produção de casca+galho em relação à produção de lenho. A Figura 140b aponta para uma relação exponencial positiva entre a fração fbb2 e a CTC efetiva, indicando que sítios de maior fertilidade tendem a apresentar fração fbb2 pouco superior aos solos de menor fertilidade, na idade madura. Os dados de fbb1, fbb2 e CTC efetiva quando analisados, conjuntamente, em médias de classes expressam as seguintes propriedades: i) solos de baixa CTC de até 9 mmol_c kg⁻¹ apresentam fração fbb1 de 0,178 e fbb2 igual a 0,123; ii) solos considerados de média CTC efetiva, com 18 mmol_c kg⁻¹, possuem árvores de fbb1 igual a 0,142 e fbb2 igual a 0,128; iii) e solos de alta CTC, com 32 mmol_c kg⁻¹, apresentam árvores com fbb1 igual a 0,116 e fbb2 de 0,127. Para o *E. globulus*, Sands e Landsberg (2002), encontrou valores de 0,75 e 0,15, para as idades inicial e madura, respectivamente. Stape et al. (2004) aplicou os mesmos valores para um híbrido de *E. grandis* x *E. urophylla*, na Bahia. Dye et al. (2004), obteve valores ainda mais baixos para árvores híbridas de *E. grandis* x *E. camaldulensis*, obtendo fbb1=0,3 e fbb2 = 0,1. Para o *E. grandis*, no sul da Bahia, Almeida et al. (2004) obteve valores semelhantes, 0,3 (fbb1) e 0,12 (fbb2). Na Austrália, Paul et al. (2007) obteve que os valores do parâmetro fbb decresceu exponencialmente com o aumento da idade de árvores de *E. macaulata* e *E. cladocalyx*.

Figura 140 – a. Influência da CTC efetiva no fracionamento casca + galho na idade inicial. b. idade considerada madura (b)

Aplicando-se as equações obtidas, Figuras 140a e 140b, no mapa de CTC efetiva (Figura 122d) obteve-se os mapas de fbb1 (Figura 141a) e fbb2 (Figura 141b) para o Distrito Florestal. O mapa apresenta fbb1 médio igual a 0,112. Valores de fbb1 inferiores a 0,103 ocorrem em 22,6% da área, principalmente dos projetos da Regional Santa Fé, onde ocorrem os solos LVd1 e PVd3, de elevada CTC efetiva. Valores de fbb1 entre 0,104 a 0,123 ocupam 63,8%, principalmente nos projetos Paranapanema, Grupo, Correias, Torre, Rancho, Inglês, Suinã e Cruz de Ferro. Os solos PVAd2, PVAd1, LVAd3 e LVd3, de média CTC efetiva, predominam nestes locais. Fração de fbb1 acima de 0,123 ocorrem em 13,6% da área de efetivo plantio, nos projetos Silo, Deserto, Prainha e São Roque, onde há predomínio de LVd1, LVd2 e CXBd2. Quanto à fração fbb2, a média geral das células do modelo 3-PGIS é de 0,128.

Figura 141 – Mapa de fração galho+casca na idade inicial (a) e idade madura (b) do material genético C219H do Distrito Florestal de Capão Bonito

4.13 Variável massa lenhosa (Equação DAP)

Os coeficientes dos modelos da equação do DAP (Equação 38) estão apresentados na Tabela 19 conforme a textura dos solos de Capão Bonito. Os coeficientes de determinação (R^2) obtidos, com valores entre 0,57 (para árvores em solos de textura média) a 0,71 (para árvores em solos de textura arenosa), indicam relações adequadas para as equações propostas. Porém, o ajuste destes parâmetros,

“a” (Coeficiente massa lenhosa) e “b” (Potência massa lenhosa), no modelo 3-PGIS, conforme a textura do solo, não foi satisfatório. Desta forma, foi ajustado um valor fixo de “a” e de “b” para todas as células do modelo 3-PGIS em Capão Bonito, sendo $a = 0,23$ e $b = 2,22$.

Tabela 19 – Coeficientes e estatística dos modelos de regressão (eq. 38) para a determinação da biomassa lenhosa do material genético C219H, segundo a textura dos solos de Capão Bonito

	Textura do solo	a	b	R ²	N
eq. (38)	Total	0,39907 ± 0,21025	2,12282 ± 0,18061	0,73	60
	Arenosa	0,29477 ± 0,27594	2,22696 ± 0,32505	0,71	24
	Média	1,01081 ± 1,08889	1,80031 ± 0,36922	0,57	21
	Argilosa	0,62730 ± 0,76236	1,97569 ± 0,41116	0,66	15

4.14 Biomassa inicial do modelo

A relação que explica o potencial dos sítios florestais no ritmo inicial (arranque inicial) de crescimento das árvores está apresentada na Figura 142. A curva hiperbólica ajustada ($R^2=0,80$) denota quão dependente é a produtividade florestal, assinalada pelo DAP aos dois anos, do teor de argila do solo. Os valores de argila relacionados variaram de 143 a 578 g kg⁻¹ e a amplitude do DAP das árvores foi de 3,2 cm (10,7 a 13,9 cm). O gráfico mostra que árvores em parcelas de solos mais arenosos apresentam DAP em torno de 11 cm. Os solos argilosos produzem árvores com DAP médio acima de 13 cm. Segundo a curva de resposta (Figura 142), o ponto crítico da textura do solo é o marco divisor do grupamento textural média / argilosa, ou seja, teor de 350 g kg⁻¹. Acima deste valor, supõe-se que a resposta em potencial de crescimento não será altamente significativa. Fundamentalmente, abaixo do ponto crítico, é onde a relação é intensa. Solos de textura arenosa e média apresentam grandes diferenças. Nesta amplitude granulométrica, pequenas variações positivas no teor de argila expressam em significativos aumentos na produtividade. Relações semelhantes foram encontradas em vários outros trabalhos (GONÇALVES et al., 1990; GONÇALVES, 2003; GAVA; GONÇALVES, 2008).

Figura 142 – Influência do teor de argila no crescimento inicial, expressado pelo DAP aos dois anos em solos do Distrito Florestal de Capão Bonito

A Figura 143 apresenta o mapa de DAP, aos dois anos, do Distrito Florestal para o material genético C219H. O mapeamento do DAP é resultado da aplicação da equação da Figura 142 no mapa de teor de argila (Figura 122a). A frequência dos dados do mapa de DAP mostra uma distribuição assimétrica negativa (moda = 13,1, mediana = 13 e média = 12,8 cm). Os sítios florestais com crescimento inicial inferior a 12,1 cm, aos dois anos, foram registrados em 15,3% da área (Figura 143), em grande parte dos projetos Cruz de Ferro, Correias, Rancho e Açude do Lobo (Figura 144). Nestes locais há grande presença dos solos LVAd3, CXBd2 e LVd3. A classe de DAP entre 12,2 a 13,2 cm ocorre em 56,7% da área de efetivo plantio, nos projetos Torre, Lageado, Deserto, Prainha, Suinã e Silo (Figura 144), onde há predominantemente solos de textura arenosa a média, como o PVAd1, PVAd2 e LVAd2. As regiões de maior crescimento inicial (> 13,3 cm) encontram-se principalmente nos projetos São Roque, Valinhos, Inglês e na Regional Santa Fé (Figura 144). Nestes locais os solos apresentam teor de argila superior ao ponto crítico da textura do solo (LVd1, LVd2 e LVAd1), onde há florestas mais produtivas. Estes sítios ocorrem em 28% da área de efetivo plantio.

Figura 143 – Mapa de DAP aos dois anos do Distrito Florestal de Capão Bonito

Figura 144 – Ocorrência do médio, mínimo e máximo DAP aos dois anos nos projetos do Distrito Florestal de Capão Bonito

A relação entre a altura (m) e o DAP (cm) das árvores do material genético C219H está apresentada na Figura 144. A coleção de dados utilizados é proveniente dos valores médios das parcelas selecionadas (Figura 48) do inventário florestal

contínuo, abrangendo os registros do segundo (2002) ao sexto ano (2006) da data de plantio.

Figura 145 – Relação entre o DAP (cm) e a altura (m), entre dois e seis anos de idade no Distrito Florestal de Capão Bonito

Baseando-se nos valores médios de DAP (Figura 143) e altura (Figura 145) de cada célula (Figura 61) estabelecida no Distrito Florestal, foi calculada a biomassa inicial (aos dois anos) dos compartimentos (eq. 37 e Tabela 18) folha, lenho, casca e galho, por árvore média de cada célula. Estes valores de biomassa foram multiplicados pela densidade populacional, que é de 1.111 árvores ha⁻¹ (espaçamento 3 x 3 m), obtendo-se os valores de biomassa inicial atribuída a cada célula do modelo 3-PGIS. A partir deste ponto, janeiro de 2002, o modelo 3-PGIS assume a floresta do Distrito Florestal de Capão Bonito, modelando, mensalmente, sua produtividade até dezembro de 2006.

4.15 Validação do modelo 3-PGIS

A demonstração de validação do modelo 3-PGIS está apresentada nas Figuras 146 a 166. Os gráficos ilustram a confrontação dos dados do inventário florestal contínuo com os resultados simulados do modelo 3-PGIS, trazendo, inclusive, a dimensão do erro (em %), o coeficiente de correlação de Pearson (r), o teste de

hipóteses de qui-quadrado ($\alpha = 0,05$) e o índice “c” de desempenho do modelo (CAMARGO; SENTELHAS, 1997).

As Figuras 146, 147, 148, 149 e 150 exibem esses resultados para as cinco parcelas amostradas nos sítios LVd1. A média geral do erro nos sítios deste solo para o DAP foi de 5,8%, de 6,9% para o VTCC, de 7% para o IMA e de 7,5% para a MS. Os resultados mostraram elevado coeficiente de correlação (r) com média de 0,97 para o DAP, de 0,99 para o VTCC, de 0,87 para o IMA e de 0,99 para a MS. O teste de hipótese de qui-quadrado, para o DAP e o IMA, mostrou que todas as simulações dos sítios LVd1 foram estatisticamente iguais aos reais valores mensurados na floresta. Quanto ao VTCC (Figuras 146b, 149b e 150b) e MS (Figuras 146d, 148d e 150d), 60% das parcelas LVd1 tiveram a hipótese nula aceita, isto é, valores simulados e observados, foram estatisticamente iguais ao nível de 5% de probabilidade. Para os sítios do LVd1, a parcela melhor ajustada aos dados simulados de DAP, VTCC e IMA foi a LV1-SR-31.75 (Figuras 149a, 149b e 149c), com erro médio de 3,7, 1,5 e 2%, respectivamente. O coeficiente de correlação foi igual a 0,98, 1 e 0,98 para o DAP, VTCC e IMA. A parcela LV1-SR-39.96 (Figura 150d) encerrou o melhor ajuste aos valores de MS, com erro médio 6,1% e r igual a 0,99. Todos os sítios LVd1 apresentaram ótimo (índice “c” $> 0,85$) desempenho na simulação do DAP, VTCC e MS. Considerando os erros (%) em cada idade, a partir do terceiro ano da floresta, a média deles no último ano (6º ano) mostrou ser menor em relação aos anteriores. Isso significa que o modelo 3-PGIS, para as parcelas do LVd1, apresentou melhor ajuste no final da rotação, aos seis anos. A exceção foi o DAP, que apresentou erro médio de 5,9% aos 3 anos e de 11% no último ano. Para o VTCC e o IMA, o erro decresceu de 9,7% e 10% no terceiro ano para 6,7% e 6,6% aos seis anos. O decréscimo foi ainda maior para a MS que no final da modelagem apresentou erro médio de 5,7%.

Os gráficos de validação dos sítios florestais localizados no LVd2 estão apresentados nas Figuras 151, 152, 153, 154 e 155. A simulação do DAP, em todas as parcelas, registrou o menor erro médio, de 6,3%. Em seguida, aparece o IMA com 9,8%, o VTCC com 10% e a MS com 12,3% de erro entre todos os valores observados e simulados. Novamente, como também ocorreu no LVd1, os coeficientes de correlação (r) para o VTCC (0,95) e a MS (0,99) foram maiores em relação ao DAP (0,94) e ao IMA

(0,82). Para o DAP todas as parcelas foram estatisticamente iguais aos valores observados. Na simulação da variável IMA quatro parcelas foram detectadas como estatisticamente iguais aos valores observados (Figuras 151c, 153c, 154c e 155c). As outras duas variáveis tiveram apenas uma parcela com a hipótese nula aceita, o VTCC (Figura 153b) e a MS (Figura 151d). O sítio florestal LV2-TO-13A.29 obteve o melhor ajuste para a simulação do DAP, com 5,1% de erro e r igual a 0,95 (Figura 155a). Quanto à modelagem do VTCC e do IMA, a parcela LV2-CT-27A.125 (Figuras 153b e 153c) apresentou o menor erro médio dentre os sítios LVd2, de 5,4% e 5%, respectivamente, e coeficiente de Pearson de 0,99 e 0,94. A parcela LV2-BV-18.58 (Figura 151d) encerrou o melhor ajuste aos valores de MS, com erro médio 6,6% e r igual a 0,99. Da mesma forma como ocorreu no LVd1, os erros médios (%) foram menores no último ano simulado. O DAP apresentou ligeira redução de 10,6% no terceiro ano para 10% no sexto ano. Para o VTCC e o IMA o erro durante a simulação reduziu de 17,1% e 16,3% para 11% e 10,8%, respectivamente, no final da rotação. A modelagem da MS fechou o último ano com erro médio de 9,3% contra os 24,1% do terceiro ano da floresta. Todos os sítios LVd2 apresentaram desempenho ótimo ou muito bom (índice “c” > 0,76) desempenho na simulação do DAP, VTCC e MS.

Nas Figuras 156, 157, 158, 159 e 160 estão apresentados os gráficos de validação das parcelas instaladas no LVAd2. O erro médio do DAP dos sítios LVAd2 foi de 5,2%, o menor dentre os quatro grupos de solos avaliados. Em relação ao VTCC, IMA e MS o erro médio das parcelas foi mais alto, de 11,5%, 11,7% e 13% respectivamente. A tendência do comportamento dos valores simulados comparados aos observados (r) foi, novamente, mais alta para o VTCC (média de 0,97) e para a MS (média de 0,98). A média do coeficiente de correlação para o DAP foi de 0,95, enquanto que para o IMA esse valor foi de apenas 0,25. O sítio florestal LVA2-TO-4.9 obteve o melhor ajuste para a simulação do DAP e da MS, com 3,4 e 7% de erro, respectivamente (Figuras 157a 157d). Quanto à modelagem do VTCC e do IMA, a parcela LVA2-TO-18.39 (Figuras 159b e 159c) apresentou o menor erro médio dentre os sítios LVd2, de 4,8% e 4,9%, respectivamente, e coeficiente de Pearson de 0,99 e 0,70. Todos os sítios LVAd2 apresentaram desempenho ótimo ou muito bom (índice “c” > 0,76) desempenho na simulação do DAP, VTCC e MS. Por outra lado, nos sítios do

LVA2 o desempenho do modelo para a estimativa do IMA foi interpretado de mediano a péssimo (índice “c” > 0,65).

As Figuras 161, 162, 163, 164 e 165 mostram os resultados da validação para as cinco parcelas amostradas nos sítios PVAd1. A média geral do erro nos sítios deste solo para o DAP foi de 6,3%, de 11,8% para o IMA, de 11,9% para o VTCC e de 15,3% para a MS. Os resultados mostraram razoável coeficiente de correlação (r) com média de 0,94 para o DAP, de 0,98 para o VTCC, de 0,98 para a MS e de apenas 0,38 para o IMA. O teste de hipótese de qui-quadrado mostrou que para o DAP todas as simulações dos sítios PVAd1 foram estatisticamente iguais aos observados. Quanto ao VTCC e a MS, todos os sítios PVAd1 tiveram a hipótese de nulidade rejeitada, isto é, valores simulados e observados, foram estatisticamente diferentes ao nível de 5% de probabilidade. Todos os sítios PVAd1 apresentaram desempenho de bom a ótimo (índice “c” > 0,66) na simulação do DAP, VTCC e MS. A estimativa do IMA apresentou desempenho péssimo, com exceção do sítio PVA1-PR-18.73 (Figura 163d), o qual apresentou desempenho mediano.

A validação geral do modelo está apresentada na Figura 166. Segundo o índice “c”, as estimativas do DAP, do VTCC e da MS apresentaram um ótimo desempenho. Na estimativa do IMA, o modelo apresentou um desempenho mediano (Figura 166b). A equação de regressão apresentada na Figura 166a indica que o modelo tende a subestimar os valores DAP abaixo dos 15 cm e de superestimar os valores de DAP acima desse valor. Paul et al. (2007) obtiveram resultados semelhantes na estimativa do DAP para as espécies *E. cladocalyx* e *E. maculata*. A simulação dos valores de VTCC foi a melhor obtida pelo modelo 3-PGIS (Figura 166b). A estimativa do IMA apresentou também um reduzido coeficiente angular (3%), porém os valores observados e simulados foram mais dispersos, como indica a equação de regressão (Figura 166c). Por outro lado, o modelo apresentou uma tendência de subestimar os valores da MS conforme o aumento da idade e da produtividade dos sítios (Figura 166d). Na região norte do Espírito Santo a calibração do modelo 3-PG para clones de *E. grandis* x *E. urophylla* por Almeida et al. (2010) resultou numa validação semelhante do presente trabalho, obtendo ajuste melhor para o volume do talhão e DAP em relação aos dados de produtividade (IMA).

Figura 146 – DAP (a), VTCC (b), IMA (c) e MS (d) observados (pontos) e simulados (linhas) no modelo 3-PGIS no sítio florestal LV1-SR-10.33. O erro (%) entre o observado e simulado aparece no ponto. Teste de hipóteses pelo Qui-quadrado (X^2 , $\alpha=0,05$), coeficiente de correlação de Pearson (R) e índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997)

Figura 147 – DAP (a), VTCC (b), IMA (c) e MS (d) observados (pontos) e simulados (linhas) no modelo 3-PGIS no sítio florestal LV1-SR-11.36. O erro (%) entre o observado e simulado aparece no ponto. Teste de hipóteses pelo Qui-quadrado (X^2 , $\alpha=0,05$), coeficiente de correlação de Pearson (R) e índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997)

Figura 148 – DAP (a), VTCC (b), IMA (c) e MS (d) observados (pontos) e simulados (linhas) no modelo 3-PGIS no sítio florestal LV1-SR-17.43. O erro (%) entre o observado e simulado aparece no ponto. Teste de hipóteses pelo Qui-quadrado (X^2 , $\alpha=0,05$), coeficiente de correlação de Pearson (R) e índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997)

Figura 149 – DAP (a), VTCC (b), IMA (c) e MS (d) observados (pontos) e simulados (linhas) no modelo 3-PGIS no sítio florestal LV1-SR-31.75. O erro (%) entre o observado e simulado aparece no ponto. Teste de hipóteses pelo Qui-quadrado (X^2 , $\alpha=0,05$), coeficiente de correlação de Pearson (R) e índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997)

Figura 150 – DAP (a), VTCC (b), IMA (c) e MS (d) observados (pontos) e simulados (linhas) no modelo 3-PGIS no sítio florestal LV1-SR-39.96. O erro (%) entre o observado e simulado aparece no ponto. Teste de hipóteses pelo Qui-quadrado (X^2 , $\alpha=0,05$), coeficiente de correlação de Pearson (R) e índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997)

Figura 151 – DAP (a), VTCC (b), IMA (c) e MS (d) observados (pontos) e simulados (linhas) no modelo 3-PGIS no sítio florestal LV2-BV-18.58. O erro (%) entre o observado e simulado aparece no ponto. Teste de hipóteses pelo Qui-quadrado (X^2 , $\alpha=0,05$), coeficiente de correlação de Pearson (R) e índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997)

Figura 152 – DAP (a), VTCC (b), IMA (c) e MS (d) observados (pontos) e simulados (linhas) no modelo 3-PGIS no sítio florestal LV2-BV-21.67. O erro (%) entre o observado e simulado aparece no ponto. Teste de hipóteses pelo Qui-quadrado (X^2 , $\alpha=0,05$), coeficiente de correlação de Pearson (R) e índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997)

Figura 153 – DAP (a), VTCC (b), IMA (c) e MS (d) observados (pontos) e simulados (linhas) no modelo 3-PGIS no sítio florestal LV2-CT-27A.125. O erro (%) entre o observado e simulado aparece no ponto. Teste de hipóteses pelo Qui-quadrado (X^2 , $\alpha=0,05$), coeficiente de correlação de Pearson (R) e índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997)

Figura 154 – DAP (a), VTCC (b), IMA (c) e MS (d) observados (pontos) e simulados (linhas) no modelo 3-PGIS no sítio florestal LV2-PR-11.85. O erro (%) entre o observado e simulado aparece no ponto. Teste de hipóteses pelo Qui-quadrado (X^2 , $\alpha=0,05$), coeficiente de correlação de Pearson (R) e índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997)

Figura 155 – DAP (a), VTCC (b), IMA (c) e MS (d) observados (pontos) e simulados (linhas) no modelo 3-PGIS no sítio florestal LV2-TO-13A.29. O erro (%) entre o observado e simulado aparece no ponto. Teste de hipóteses pelo Qui-quadrado (X^2 , $\alpha=0,05$), coeficiente de correlação de Pearson (R) e índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997)

Figura 156 – DAP (a), VTCC (b), IMA (c) e MS (d) observados (pontos) e simulados (linhas) no modelo 3-PGIS no sítio florestal LVA2-TJ-7.67. O erro (%) entre o observado e simulado aparece no ponto. Teste de hipóteses pelo Qui-quadrado (X^2 , $\alpha=0,05$), coeficiente de correlação de Pearson (R) e índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997)

Figura 157 – DAP (a), VTCC (b), IMA (c) e MS (d) observados (pontos) e simulados (linhas) no modelo 3-PGIS no sítio florestal LVA2-TO-4.9. O erro (%) entre o observado e simulado aparece no ponto. Teste de hipóteses pelo Qui-quadrado (X^2 , $\alpha=0,05$), coeficiente de correlação de Pearson (R) e índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997)

Figura 158 – DAP (a), VTCC (b), IMA (c) e MS (d) observados (pontos) e simulados (linhas) no modelo 3-PGIS no sítio florestal LVA2-TO-17.37. O erro (%) entre o observado e simulado aparece no ponto. Teste de hipóteses pelo Qui-quadrado (X^2 , $\alpha=0,05$), coeficiente de correlação de Pearson (R) e índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997)

Figura 159 – DAP (a), VTCC (b), IMA (c) e MS (d) observados (pontos) e simulados (linhas) no modelo 3-PGIS no sítio florestal LVA2-TO-18.39. O erro (%) entre o observado e simulado aparece no ponto. Teste de hipóteses pelo Qui-quadrado (X^2 , $\alpha=0,05$), coeficiente de correlação de Pearson (R) e índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997)

Figura 160 – DAP (a), VTCC (b), IMA (c) e MS (d) observados (pontos) e simulados (linhas) no modelo 3-PGIS no sítio florestal LVA2-TO-18.40. O erro (%) entre o observado e simulado aparece no ponto. Teste de hipóteses pelo Qui-quadrado (X^2 , $\alpha=0,05$), coeficiente de correlação de Pearson (R) e índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997)

Figura 161 – DAP (a), VTCC (b), IMA (c) e MS (d) observados (pontos) e simulados (linhas) no modelo 3-PGIS no sítio florestal PVA1-PR-8.69. O erro (%) entre o observado e simulado aparece no ponto. Teste de hipóteses pelo Qui-quadrado (X^2 , $\alpha=0,05$), coeficiente de correlação de Pearson (R) e índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997)

Figura 162 – DAP (a), VTCC (b), IMA (c) e MS (d) observados (pontos) e simulados (linhas) no modelo 3-PGIS no sítio florestal PVA1-PR-9.70. O erro (%) entre o observado e simulado aparece no ponto. Teste de hipóteses pelo Qui-quadrado (X^2 , $\alpha=0,05$), coeficiente de correlação de Pearson (R) e índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997)

Figura 163 – DAP (a), VTCC (b), IMA (c) e MS (d) observados (pontos) e simulados (linhas) no modelo 3-PGIS no sítio florestal PVA1-PR-18.73. O erro (%) entre o observado e simulado aparece no ponto. Teste de hipóteses pelo Qui-quadrado (X^2 , $\alpha=0,05$), coeficiente de correlação de Pearson (R) e índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997)

Figura 164 – DAP (a), VTCC (b), IMA (c) e MS (d) observados (pontos) e simulados (linhas) no modelo 3-PGIS no sítio florestal PVA1-PR-18.75. O erro (%) entre o observado e simulado aparece no ponto. Teste de hipóteses pelo Qui-quadrado (X^2 , $\alpha=0,05$), coeficiente de correlação de Pearson (R) e índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997)

Figura 165 – DAP (a), VTCC (b), IMA (c) e MS (d) observados (pontos) e simulados (linhas) no modelo 3-PGIS no sítio florestal PVA1-PR-19.62. O erro (%) entre o observado e simulado aparece no ponto. Teste de hipóteses pelo Qui-quadrado (X^2 , $\alpha=0,05$), coeficiente de correlação de Pearson (R) e índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997)

Figura 166 – DAP (a), VTCC (b), IMA (c) e MS (d) observados e simulados no modelo 3-PGIS em todos os sítios florestais. Equação de regressão, coeficiente de determinação e índice “c” de Camargo e Sentelhas (1997)

4.16 Nutrição e estoque foliar

Os padrões de produtividade de madeira encontrados nos diferentes sítios são considerados altos, com média e erro padrão de incremento médio anual (IMA) de $49 \pm 0,9 m^3 ha^{-1} ano^{-1}$ nos solos de textura média e de $61 \pm 0,9 m^3 ha^{-1} ano^{-1}$ nos solos argilosos. O DAP apresentou alta relação exponencial com o IMA ($R^2 = 0,73$; $P < 0,01$). Sítios com solos de textura média apresentaram DAP médio de 14 a 16 cm e os sítios com solos argilosos, DAP médio de 18 a 20 cm. O DAP (aos 6 anos) apresentou relação exponencial com o teor de argila ($R^2 = 0,83$; $P < 0,01$). O teor de N aumentou exponencialmente como teor de argila, da mesma forma que o DAP (Figura 167a). A

mesma relação ocorreu para o Mg (Figura 167e). Por outro lado, os teores de P, K, Ca e S decresceram exponencialmente com o acréscimo do teor de argila. Em regiões vizinhas, Gava (1997, 2005) encontrou resultados semelhantes para o P, K e Ca. Silva et al. (2008) obtiveram os mesmos resultados para os macronutrientes P e S. Esse tipo de comportamento é relatado como efeito de diluição (JARREL; BEVERLY, 1981) e ocorre em função do elevado crescimento das árvores em sítios de elevada produtividade (SILVA, 1983; GAVA, 1997, 2005; BELLOTE; FERREIRA, 1993; SGARBI, 2002; SILVA et al., 2008). Reforçando esta dedução, tanto a massa foliar como o DAP apresentaram relação exponencial oposta à observada para esses nutrientes (Figura 169), ou seja, quanto maior foi o crescimento do tronco e da área foliar, menor o teor desses nutrientes. Relação semelhante entre produtividade de madeira e biomassa de folhas foi obtida por Gava (2005). O teor de S diminuiu drasticamente nas árvores plantadas nos solos de textura média e argilosa em relação aos de textura arenosa (Figura 167f). As concentrações de Cu e Zn aumentaram com o teor de argila e produtividade das árvores (Figuras 168b e 168e). O B, Fe e Mn apresentaram relação exponencial negativa com o teor de argila no solo. No caso do B (Figura 168a), Bellote e Ferreira (1993) encontraram comportamento semelhante: concentração decrescente em função do aumento da produtividade de madeira. Silva et al. (2008) também obtiveram o mesmo efeito para os elementos Cu e Fe. Segundo as tabelas de interpretação de nutrição florestal (SILVEIRA et al., 2000), esse efeito de diluição induz erroneamente à interpretação de uma possível deficiência nutricional para os elementos P, K, Ca, S, Mn e Zn, nos solos de textura média a argilosa, isto é, nos solos de maior produtividade.

Considerando que as produtividades de madeira dos sítios estudados foram altas, resultado, entre outras práticas silviculturais, das boas condições nutricionais propiciadas às árvores, as faixas nutricionais adequadas às plantas variaram com a textura do solo de 22,3 a 29,5 g kg⁻¹ para o N, de 1,03 a 1,25 g kg⁻¹ para o P, de 5,3 a 8,2 g kg⁻¹ para o K, de 3,6 a 5,3 g kg⁻¹ para o Ca, de 2,0 a 2,8 g kg⁻¹ para o Mg, de 0,51 a 0,85 g kg⁻¹ para o S, de 31 a 56 mg kg⁻¹ para o B, de 7 a 10 mg kg⁻¹ para o Cu, de 79 a 123 mg kg⁻¹ para o Fe, de 119 a 740 mg kg⁻¹ para o Mn e de 13 a 17,5 mg kg⁻¹ para o Zn.

Figura 167 – Relações entre os teores foliares dos macronutrientes de N (a), P (b), K (c), Ca (d), Mg (e) e S (f), o DAP médio e o teor de argila nos sítios florestais do Distrito Florestal de Capão Bonito (camada 0 a 20 cm)

Figura 168 – Relações entre os teores foliares dos micronutrientes de B (a), Cu (b), Fe (c), Mn (d) e Zn (e), o DAP médio e o teor de argila nos sítios florestais do Distrito Florestal de Capão Bonito (camada 0 a 20 cm)

A partir destas relações nutricionais com o teor de argila no solo e da variável de produção de folhagem ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ mês}^{-1}$), foi calculado o estoque foliar do nutrientes K em todo Distrito Florestal, conforme apresenta a Figura 170. O mapa na Figura 170a mostra a distribuição do estoque foliar de potássio para o mês de janeiro de 2003, com amplitude de $2,78 \text{ Mg ha}^{-1}$ de folhas. A média geral de biomassa de folhas para esse

mês e idade das árvores foi de 4,8 Mg ha⁻¹. A quantidade de folhas é determinada principalmente pela produtividade do sítio e o estresse provocado pelo déficit hídrico. O mapa de estoque foliar de K (Figura 170b) apresenta os locais onde o teor do nutriente é considerado crítico ou em abundância. A amplitude mapeada do nutriente K foi de 19,3 kg ha⁻¹ com média geral de 28,9 kg ha⁻¹.

Figura 169 – Relações entre a biomassa de folhas, o DAP médio e o teor de argila (camada 0 a 20 cm) nos diferentes sítios florestais do Distrito Florestal de Capão Bonito

Figura 170 – Mapas de biomassa foliar (a) e de estoque foliar do macronutriente potássio (b) no Distrito Florestal de Capão Bonito

4.17 Produtividade do Distrito Florestal de Capão Bonito

Os mapas de produtividade dos meses de janeiro e junho de 2003 são apresentados na Figura 171. Os mapas refletem as condições edafoclimáticas de Capão Bonito e ecofisiológicas do material genético C219H. A produtividade é aqui representada pelo incremento corrente anual (ICA). Por exemplo, o ICA de janeiro é o resultado de um doze avos do incremento ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$) registrado entre dezembro de 2002 e janeiro 2003. A produtividade em janeiro (Figura 171a) é condicionada principalmente pela fertilidade (Figura 126) e CAD (Figura 129) dos solos. A média geral desse mês foi de $67 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$, porém houve 7% dos sítios com produtividade inferior a $60 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$, e 28% da área com produtividade acima de $70 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$. Os projetos Tijuco, São Roque, Valinhos e Inglês (Figura 171a) apresentaram as maiores médias de produtividade em janeiro de 2003, devido principalmente as condições meteorológicas, como radiação solar (Figura 74), temperatura (Figuras 78 e 81), umidade relativa (Figura 89) e precipitação (Figura 93), favoráveis ao crescimento das árvores.

A produtividade do mês de junho (Figura 171b) foi dependente da radiação solar (Figura 71b). A média geral do mês de junho de 2003 foi de $55 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$. Os sítios menos produtivos, com ICA inferior a $47 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$, localizam-se basicamente nos terrenos com face de exposição sul. Por outro lado, os locais mais produtivos são aqueles em terrenos voltados para o norte, com elevada capacidade de armazenamento de água e menor efeito das geadas (Figura 84b). O efeito das geadas na produtividade do mês de junho de 2003 é bem visível na Regional Santa Fé, onde os projetos Capão Alto, Água Branca, Boa Vista e Retiro (Figura 171b) de alta produtividade, apresentaram reduzido valor de ICA nesse mês. Por outro lado, os dos projetos Cruz de Ferro e Correias apresentaram baixa produtividade devido, principalmente, a reduzida capacidade de armazenamento de água de seus solos.

Figura 171 – Mapas do incremento corrente anual ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$), considerado nos meses de janeiro de 2003 (a) e de junho de 2003 (b), do Distrito Florestal de Capão Bonito

Figura 172 – Ocorrência da média, mínima e máxima produtividade ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$), em janeiro de 2003 (a) e em junho de 2003 (b), nos projetos do Distrito Florestal de Capão Bonito

4.18 Qualidade de sítio de Capão Bonito

O mapa apresentado na Figura 173 corresponde à normalização da produtividade pela média de toda a área de estudo. O resultado da interpretação da Figura 173 é o mapa de qualidade de sítio dos povoamentos florestais de Capão Bonito (Figura 176), o qual pode ser interpretado como a adequação do genótipo C219H (*Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*) às condições edafoclimáticas do Distrito Florestal de

Capão Bonito. A distribuição de frequência da Figura 173 revela leve assimetria negativa, onde a mediana apontou em 99% e a média da produtividade normalizada, como era de se esperar, em 100%. Definiram-se zonas de produtividade bem distintas ao longo do Distrito Florestal de Capão Bonito. De toda a área mapeada, aproximadamente 21,6% (4.727 ha) apresentam baixa produtividade florestal, isto é, abaixo de 85% da média do Distrito Florestal (Figuras 173 e 176). Sítios florestais mapeados no projeto Cruz de Ferro atingiram produtividade normalizada abaixo dos 48% da média geral (Figura 174). Quantitativamente, os projetos Açude do Lobo, Rancho, Cruz de Ferro e Correias, apresentam mais de 50% de suas áreas interpretadas como de baixa qualidade de sítio (Figura 176). Inclusive, a totalidade dos projetos Açude-do-Lobo, Deserto, Correias e Cruz de Ferro, não atinge a média de produtividade de toda a área, tornando-se os projetos menos produtivos do Distrito Florestal de Capão Bonito. Os locais considerados de qualidade de sítio média-baixa (85 a 100%) somaram 30,6%, ou seja, 6.696 ha da área de estudo (Figura 173 e 176). Os projetos Lageado, Deserto, Prainha, Campo de Pousos, Paranapanema e Torre, são os principais enquadrados nesta classe de qualidade de sítio. Todos estes possuem mais de 60% de suas áreas com qualidade de sítio considerada média-baixa. Os sítios florestais com qualidade acima da média, entre 100 e 115%, interpretados como média-alta ocorrem em 20,8% (4.551 ha) do efetivo plantio (Figura 173 e 176). Esta classe de qualidade de sítio é a menos representativa, e corresponde a pouco mais de 20% das áreas dos projetos Valinhos, Cemiterinho e Capão Alto. As áreas consideradas alta qualidade de sítio, acima de 115% da média normalizada, abrangem 27% (5.908 ha) do efetivo plantio (Figura 173). Nos projetos Boa Vista, Sede Velha, Retiro, São Roque, Lavrinhas, Água Branca e Tijuco, foram identificadas zonas extremamente produtivas, com produtividade média normalizada superior a 125% (Figura 176). Nos projetos Tijuco, Sede Velha, São Roque, Boa Vista, Inglês, Retiro e Água Branca, os sítios de alta qualidade ocorrem em mais de 55% da área de efetivo plantio.

Figura 173 – Mapa de produtividade normalizada pela média do Distrito Florestal de Capão Bonito

Figura 174 – Ocorrência da média, mínima e máxima porcentagem da normalização da produção pela média nos projetos do Distrito Florestal de Capão Bonito

Figura 175 – Mapa de qualidade de sítio, segundo a produtividade, do Distrito Florestal de Capão Bonito

Figura 176 – Ocorrência, em porcentagem, das classes de qualidade de sítio dos projetos do Distrito Florestal de Capão Bonito

5 CONCLUSÕES

A hipótese foi corroborada: o modelo 3-PG integrado a um sistema de informação geográfica foi eficiente em simular, temporal e espacialmente, os principais indicadores da produtividade florestal nos povoamentos florestais clonais do material genético C219H (*Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*).

- Foi obtida a calibração, a validação e aplicação do modelo 3-PGIS nas condições edafoclimáticas de Capão Bonito em povoamentos clonais do material genético C219H (*Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*). No geral, o modelo 3-PGIS, apresentou bom desempenho, principalmente nas estimativas do volume de lenho com casca e da biomassa de fuste. As simulações do DAP e do IMA foram mais dispersas.

- A incorporação das características do relevo apresentou diferença no mapeamento da radiação global, exercendo maiores efeitos nos meses de inverno.

- Foi possível elaborar uma equação que contabiliza dias de geadas em função da média mínima mensal;

- A maioria das variáveis de solos analisadas aproximou-se da distribuição lognormal de freqüências. As variáveis relacionadas à fertilidade do solo apresentaram maiores alcances de dependência espacial no horizonte A, indicando que há maior homogeneidade na distribuição dos nutrientes na camada superficial do solo;

- Pararela à relação exponencial positiva entre a CTCefetiva e o volume de madeira, foi proposta uma equação que relaciona o índice de fertilidade do modelo 3-PGIS e esse atributo do solo;

- O teor de argila exerceu forte influência sobre os teores de água na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente, por conseguinte, na disponibilidade de água dos solos;

- A máxima biomassa de fuste, encontrada nos povoamentos florestais manejados com elevado padrão tecnológico, relacionou-se diretamente com o teor argila+silte;

- A densidade básica sofreu influência da textura fina do solo (argila+silte). Sítios de maiores produtividades, por conseguinte, de maior teor de argila+silte, resultaram em árvores de menor densidade básica;

- Os teores foliares de N, Mg, Cu e Zn, aumentaram exponencialmente com o teor de argila, da mesma forma que o DAP e a biomassa de folhas. Por outro lado, os teores foliares de P, K, Ca, S, B, Fe e Mn apresentaram relação oposta, decresceram exponencialmente nos solos mais argilosos.

REFERÊNCIAS

- ABER, J.D.; FEDERER, C.A. A generalized, lumped-parameter model of photosynthesis, evapotranspiration and net primary production in temperate and boreal forest ecosystems. **Oecologia**, Berlin, v. 92, p. 463-474, 1992.
- ABREU, C.A.; ABREU, M.F.; RAIJ, B.; BATAGLIA, O.C.; ANDRADE, J.C. Extraction of boron from soil by microwave heating for ICP-AES determination. **Communications in Soil Science and Plant Analysis, Philadelphia**, v. 25, n. 19/20, p. 3321-3333, 1994.
- AB'SABER, A.; GOLDEMBERG, J.; RODES, L.; ZULAUF, W. Identificação de áreas para o florestamento no espaço total do Brasil. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 4, n. 9, p. 63-119, 1990.
- ALEXANDRE, P.M.M. **Calibração do modelo 3-PG para povoamentos de pinheiro-bravo (*Pinus pinaster*) em Portugal**. 2009. 68 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal e Recursos Naturais) - Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2009.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56)
- ALMEIDA, A.C.; LANDSBERG, J.J.; SANDS, P.J. Parameterisation of 3-PG model for fast-growing *Eucalyptus grandis* plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, p. 179-195, 2004.
- ALMEIDA, A.C.; MAESTRI, R.; LANDSBERG, J.J.; SCOLFORO, J.R.S. Linking process-based and empirical forest models in Eucalyptus plantations in Brazil. In: AMARO, A.; REED, D.; SOARES, P. (Ed). **Modelling forest systems**. Wallingford: CABI, 2003. chap. 6, p. 63-74.
- ALMEIDA, A.C.; SIGGINS, A.; BATISTA, T.R.; BEADLE, C.; FONSECA, S.; LOOS, R. Mapping the effect of spatial and temporal variation in climate and soils on Eucalyptus plantation production with 3-PG, a process-based growth model. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1730-1740, 2010.
- ANDRIOTTI, J.L.S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. São Leopoldo: Editora UNISINOS, 2003. 165 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF**: ano base 2009. Brasília, 2010. 140 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA E CELULOSE E PAPEL. **M14-70**: métodos de ensaio. São Paulo, 1974.

ASTOLPHO, F.; CAMARGO, M.B.P.; PEDRO JUNIOR, M.J.; PALLONE FILHO, W.P.; BARDIN, L. Regionalização de riscos de ocorrência de temperaturas mínimas absolutas anuais para o Estado de São Paulo com base em modelos probabilísticos e digitais de elevação. **Bragantia**, Campinas, v. 64, n. 1, p. 139-148, 2005.

BAESSO, R.C.; RIBEIRO, A.; SILVA, M.P. Impacto das mudanças climáticas na produtividade do eucalipto na região norte do Espírito Santo e sul da Bahia. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 2, p. 335-344, 2010.

BARJA, P.R.; MANSANARES, A.M.; SILVA, E.C.; MAGALHÃES, A.C.N; ALVES, P.L.C.A. Photosynthetic induction in *Eucalyptus urograndis* seedlings and cuttings measured by an open photoacoustic cell. **Photosynthetica**, Heidelberg, v. 39, n. 4, p. 489-495, 2001.

BARREIROS, R.M.; GONÇALVES, J.L.M.; SANSÍGOLO, C.A.; POGGIANI, F. Modificações na produtividade e nas características físicas e químicas da madeira de *Eucalyptus grandis* causadas pela adubação com lodo de esgoto tratado. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, n. 1, p. 103-111, 2007.

BARRICHELO, L.E.G. O Floram em discussão. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 4, n. 9, p. 15-16, 1990.

BARROS, N.F. **Contribuição ao relacionamento de características pedológicas e topográficas com altura de *Eucalyptus Alba* na região de Santa Bárbara, MG.** 1974. 88 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1974.

BASARAN, O.M.; OCZAN, A.U.; ERPUL, G.; CANGA, M.R. Spatial variability of organic matter and some soil properties of mineral topsoil in Cankiri Indagi Blackpine (*Pinus nigra*) plantation region. **Journal of Applied Sciences**, v. 6, n. 2, p. 445-452, 2006.

BECKER, G. Optimization of road network and transport systems: a pre-condition for an improved organization and design of labour in forest. In: SEMINÁRIO DE ATUALIZAÇÃO SOBRE SISTEMAS DE COLHEITA DE MADEIRA E TRANSPORTE FLORESTAL, 8, 1994, Curitiba. **Anais...** Curitiba: UFPR, FUPEF, 1994. p. 111-115.

BEHLING, M. **Nutrição, partição de biomassa e crescimento de povoamentos de teca em Tangará da Serra - MT.** 2009. 156 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

BELLOTE, A.F.J.; DEDECEK, R.A. Atributos físicos e químicos do solo e suas relações com o crescimento e a produtividade do *Pinus taeda*. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 53, p. 21-38, 2006.

BELLOTE, A.F.J.; FERREIRA, C.A. Nutrientes minerais e crescimento de árvores adubadas de *Eucalyptus grandis*, na região do cerrado, no Estado de São Paulo. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 26/27, p. 17-28, 1993.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SOUZA, Z.M.; ANDRIOLI, I; ROQUE, C.G. Retenção de água em dois tipos de latossolos sob diferentes usos. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 3, p. 829-834, 2002.

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**: physical and mineralogical methods. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 363-375.

BONAN, G.B. Atmosphere-biosphere exchange of carbon dioxide in boreal forests. **Journal of Geophysical Research**, v. 96, p. 7301-7312, 1991.

BORGES, J.S. **Parametrização, calibração e validação do modelo 3-PG para eucalipto na Região do cerrado de Minas Gerais**. 2009. 77 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **The nature and properties of soils**. 14th ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2008. 975 p.

BRAGA, F.A.; ARROS, N.F.; SOUZA, A.L.; COSTA, L.M. Características ambientais determinantes da capacidade produtiva de sítios cultivados com eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 2, p. 291-298, 1999.

BRASIL. Lei n. 5106, de 2 de setembro de 1966. Dispõe sobre os incentivos fiscais concedidos a empreendimentos florestais. **Diário Oficial**, Brasília, 05 setembro 1966.

_____. Lei n. 7714, de 29 de dezembro de 1988. Altera a legislação dos incentivos fiscais relacionados com o imposto de renda. **Diário Oficial**, Brasília, 31 dezembro 1988.

_____. Ministério da Agricultura. Centro Nacional de Ensino e Pesquisas Agronômicas. Comissão de Solos. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado de São Paulo**: contribuição à carta de solos do Brasil. Rio de Janeiro. Boletim do Serviço Nacional de Pesquisas Agronômicas, 1960. 634 p. (Boletim, 12).

BORUVKA, L.; MLADKOVA, L.; DRABEK, O.; VASAT, R. Factors of spatial distribution of forest floor properties in the Jizerské Mountains. **Plant, Soil and Environment**, Praha, v. 51, n. 10, p. 447-455, 2005.

BURROUGH, P.A.; MCDONNELL, R.A. **Principles of Geographical Information Systems**. New York: Oxford University Press, 1998. 333 p.

CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativas da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CAMARGO, M.B.P.; PEDRO JUNIOR, M.J.; ALFONSI, R.R.; ORTOLANI, A.A.; BRUNINI, O. Probabilidade de ocorrência de temperaturas mínimas absolutas mensais e anual no Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 52, n. 2, p. 161-168, 1993.

CANAVESI, V.; PONZONI, F.J. Caracterização espectral de plantios de Eucalyptus utilizando dados Hyperion EO-1 e SRTM. **Ambiência**, Curitiba, v. 6, p. 127-136, 2010.

CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F.; KONOPKA, A.E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, p. 1501-1511, 1994.

CASTRO, P.P.; CURI, N.; FURTINI NETO, A.E.; RESENDE, A.V.; GUILHERME, L.R.G.; MENEZES, M.D.; ARAÚJO, E.F.; FREITAS, D.A.F.; MELLO, C.R.; SILVA, S.H.G. Química e mineralogia de solos cultivados com Eucalipto (*Eucalyptus* sp.). **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 88, p. 645-657, 2010.

CHIARINI, J.V.; COELHO, A.G.S. **Cobertura vegetal natural e áreas reflorestadas do Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1966. 28 p. (IAC. Boletim, 193).

CLARKE, C.R.E.; SHAW, M.J.P.; WESSELS, A.M.; JONES, W.R. Effect of differences in climate on growth, wood and pulp properties of nine eucalypt species at two sites. **Tappi Journal**, Atlanta, v. 82, n. 7, p. 89-99, 1999.

CLUTTER, J.L. Development of taper functions from variable-top merchantable volume equations. **Forest Science**, Washington, v. 26, n. 1, p. 117-120, 1980.

COOPS, N.C.; COGGINS, S.B.; KURZ, W.A. Mapping the environmental limitations to growth of coastal Douglas-fir stands on Vancouver Island, British Columbia. **Tree Physiology**, Victoria, v. 27, n. 6, p. 805-815, 2007.

COOPS, N.C.; WARING, R.H.; LANDSBERG, J.J. Assessing forest productivity in Australia and New Zealand using a physiologically-based model driven with averaged monthly weather data and satellite-derived estimates of canopy photosynthetic capacity. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 104, p. 113-127, 1998.

COOPS, N.C., WARING, R.H., LAW, B.E. Assessing the past and future distribution and productivity of ponderosa pine in the Pacific Northwest using a process model, 3-PG. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 183, p. 107-124, 2005.

CORÁ, J.E.; ARAUJO, A.V.; PEREIRA, G.T.; BERALDO, J.M.G. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 1013-1021, 2004.

CORRÊA, J.J.L.; MARCOLIN, M. Produtividade florestal de *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis* em função da vegetação primitiva e unidades de solos. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7, 1993, Curitiba. **Anais...** Curitiba: SBS; SBEF, 1993. v. 2, p. 535-538.

DALAUQUA, R.M. Improving sustainability planning in Brazilian eucalyptus forests. In: EREDICS, P. (Ed.). **Mapping forestry**. Reglands: ESRI Press, 2010. chap. 19, p. 73-76.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. Programa de Integração Nacional. **Projeto Radambrasil**: Levantamento de recursos naturais: geologia, geomorfologia, solos, vegetação, uso potencial da terra. Rio de Janeiro. 1982.

_____. **Sistema de Informações Geográficas da mineração**. Disponível em <<http://sigmine.dnrm.gov.br>>. Acesso em: 26 maio 2007.

DEUTSCH, C.V.; JOURNEL, A.G. **GSLIB**: geostatistical software library and user's guide. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 1998. 369 p.

DYE, P.J.; JACOBS, S.; DREW, D. Verification of 3-PG growth and water-use predictions in twelve Eucalyptus plantation stands in Zululand, South Africa. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, p. 197–218, 2004.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

_____. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

_____. Centro Nacional de Pesquisas de Monitoramento por Satélite. **Banco de dados climáticos do Brasil**. Disponível em: <<http://www.bdclima.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 05 nov. 2007.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **ArcGIS 9.3**. Reglands, 2008.

ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA “LUIZ DE QUEIROZ”. **Planilha eletrônica BHnorm**. Disponível em: <<http://www.lce.esalq.usp.br>>. Acesso em: 15 abr. 2006.

ESPREY, L.J.; SANDS, P.J.; SMITH, C.W. Understanding 3-PG using a sensitivity analysis. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, p. 235–250, 2004.

ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. **Creation of slope shape dataset using the curvature function**. Natural Resources Conservation Service. 2008. 7 p. Disponível em: <ftp://ftp.ftw.nrcs.usda.gov/cntsc/GIS/Spatial_Analyst_supplement_materials>. Acesso em: 03 abr. 2010.

EVANS, J.; TURNBULL, J. **Plantation forestry in the tropics: the role, silviculture, and use of planted forests for industrial, social, environmental, and agroforestry purposes.** Oxford: Oxford University Press, 2004. 467 p.

FERNANDES FILHO, E.I.; FIRME SÁ, M.M. Influência das variáveis do terreno na radiação solar. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 5751-5753.

FERRAZ, E.S.B. A influência da precipitação na produção de matéria seca de eucaliptos. **IPEF**, Piracicaba, n. 46, p. 32-42, 1993.

FERRAZ, S.F.B.; MARSON, J.C.; FONTANA, C.R.; LIMA, W.P. Uso de indicadores hidrológicos para classificação de trechos de estradas florestais quanto ao escoamento superficial. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 75, p. 39-49, 2007.

FERREIRA, C.A.; COUTO, H.T.Z. A influência de variáveis ambientais no crescimento de espécies / procedências de *Eucalyptus* spp nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Curitiba, n. 3, p. 9-35, 1981.

FERREIRA, M. A situação florestal brasileira e o papel da silvicultura intensiva. **Documentos Florestais**, Piracicaba, n. 2, p. 1-9, set. 1989.

FERREIRA, S.; LIMA, J.T.; TRUGILHO, P.F.; SILVA, J.R.M.; ROSADO, A.M.; MONTEIRO, T.C. Resistência mecânica de caules de clones de *Eucalyptus* cultivados em diferentes topografias. **Cerne**, Lavras, v. 16, p. 133-140, 2010.

FONSECA, E.L.; RIZZI, R.; BOLFE, E.L.; COSTA, M.S.A. Uso do interpolador Krigagem ordinária para a espacialização das propriedades físicas do solo. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO, 1., 2002, Aracaju. **Anais...** Aracaju, 2002.

FRANÇA, G.V. **Interpretação de levantamentos de solos: classificações técnicas ou interpretativas.** Piracicaba: ESALQ, 1983.

GAVA, J.L. Efeito da adubação potássica em plantios de *E. grandis* conduzidos em segunda rotação em solos com diferentes teores de potássio trocável. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v. 11, n. 30, p. 89-94, 1997.

_____. **Relações entre atributos do solo e qualidade da madeira de clone de *Eucalyptus grandis* para produção de celulose.** 2005. 54 p. Dissertação (Mestrando em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

GAVA, J.L.; GONÇALVES, J.L.M. Soil attributes and wood quality for pulp production in plantations of *Eucalyptus grandis* clone. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 65, n. 3, p. 306-313, 2008.

GOLFARI, L.; CASER, R.L.; MOURA, V.P.G. Zoneamento ecológico esquemático para reflorestamento no Brasil. **Série Técnica PRODEPEF**, Brasília, n. 11, p. 1-66, 1978.

GOMES, A.G.; VARRIALE, M.C. **Modelagem de ecossistemas**: uma introdução. 2. ed. Santa Maria: Ed UFSM, 2004. 503 p.

GOMES, J.B.V.; CURI, N. **Proposição de redefinição das unidades de manejo da Aracruz Celulose S.A.** Lavras: Universidade Federal de Lavras, Depto. de Ciências Florestais, 2001. 12 p.

GONÇALVES, J.C. **Comportamento do *Eucalyptus grandis* em dois solos de baixa fertilidade, em Angatuba, SP.** 1987. 84 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

GONÇALVES, J.L.M. Interpretação de levantamentos de solo para fins silviculturais. **IPEF**, Piracicaba, n. 39, p. 65-72, 1988.

_____. Recomendações de adubação para *Eucalyptus*, *Pinus* e espécies típicas da mata atlântica. **Documentos Florestais**, Piracicaba, n. 15, p. 1-23, 1995.

_____. Principais solos usados para plantações florestais. In: GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L. (Ed.). **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. Piracicaba: IPEF, 2002. p. 1-45.

GONCALVES, J.L.M.; DEMATTE, J.L.I.; COUTO, H.T.Z. Relações entre a produtividade de sítios florestais de *Eucalyptus grandis* e *E. saligna* com as propriedades de alguns solos de textura arenosa e média no estado de São Paulo. **IPEF**, Piracicaba, n. 43/44, p. 24-39, 1990.

GONÇALVES, J.L.M. **Mapeamento pedológico semidetalhado da Fazenda Santa Helena** (Siderúrgica Barra Mansa), 1997.

GONÇALVES, T.D. **Mapeamento de solos e de produtividade em plantações de *Eucalyptus grandis* na Estação Experimental de Itatinga, ESALQ, com uso de geoprocessamento.** 2003. 47 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003

GUERRA, P.A.G. **Geoestatística operacional**. Brasília: DNPM, 1988. 145 p.

GUIMARÃES, D.P.; SILVA, G.G.C.; SANS, L.M.A.; LEITE, F.P. Uso do modelo de crescimento 3-PG para o zoneamento do potencial produtivo do eucalipto no estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 15, n. 2, p. 192-197, 2007.

HEINSDIJK, D.; CAMPOS, J.C.C. Programa de manejo das florestas de produção estaduais. **Silvicultura em São Paulo**, v. 6, p. 365-405, 1967.

HRADETZKY, J. **Analyse und interpretation statistischer abränger keiten. (Biometrische Beiträge zu aktuellem forschungs projekten)**. Baden: Wurttemberg Mitteilungen der FVA. 1976. 146 p.

HUTCHINSON, M.F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. **Journal of Hydrology**, Corvallis, v. 106, p. 211-232, 1989.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Malha municipal digital 2005**. Disponível em: <ftp://geofp.ibge.gov.br/mapas/malhas_digitais/municipio_2005/E500/Proj_Geografica/ArcView_shp/Uf/SP/>. Acesso em: 10 jan. 2007.

_____. **Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul (SIRGAS 2.000)**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/sirgas/principal.htm>>. Acesso em: 15 jan. 2007.

INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA. Disponível em: <<http://www.iea.sp.gov.br>>. Acesso em: 18 dez. 2010.

INSTITUTO FLORESTAL. **Inventário Florestal do Estado de São Paulo**. São Paulo, 1993. 200 p.

_____. **Inventário Florestal das Áreas Reflorestadas no Estado de São Paulo**. São Paulo, 2002. 184 p.

_____. **Inventário Florestal da Vegetação Natural do Estado de São Paulo**. São Paulo, 2005. 200 p.

INSTITUTO GEOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO. **Mapa da Região Administrativa de Sorocaba**. Disponível em: <http://www.igc.sp.gov.br/mapas_sorocaba.htm>. Acesso em: 10 jan. 2007.

INSTITUTO MEMÓRIA VOTORANTIM. **Guia de Acervo 2006 Memória Votorantim – 88 anos de história**. Votorantim, 2006. 40 p.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Mapa geológico do Estado de São Paulo**: nota explicativa. Escala 1:1.000.000. São Paulo, 1981a. v. 1, 126 p.

_____. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo**. Escala 1:1.000.000. São Paulo, 1981b.

_____. **Mapa de jazidas e ocorrências minerais do Estado de São Paulo**. Escala 1:500.000. São Paulo, 1981c.

JARREL, W.M.; BEVERLY, R.B. The dilution effect in plant nutrition studies. **Advances in Agronomy**, Newark, v. 34, n. 1, p. 197-224, 1981

JOHNSEN, K.; SAMUELSON, L.; TESKEY, R.; MCNULTY, S.; FOX, T. Process models as tools in forestry research and management. **Forest Science**, Bethesda, v. 47, n. 1, p. 2-8, 2001.

KIEHL, E.J. **Manual de edafologia**: relações solo-planta. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 264 p.

KLEIN, V.A.; BASEGGIO, M.; MADALOSSO, T.; MARCOLIN, C.D. Textura do solo e a estimativa do teor de água no ponto de murcha permanente com psicrômetro. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 7, p. 1550-1556, 2010.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: _____. (Ed.). **Methods of soil analysis**: physical and mineralogical methods. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 635-660.

KOPPEN, W. Das geographische System der Klimate. In: KOPPEN, W.; GEIGER, G (Ed.). **Handbuch der Klimatologie**, Teil C. Berlin: Gebruder Bornträger, 1936. p. 1-44.

KRUG, H.P. *Pinus elliottii* em Capão Bonito: observações do seu crescimento. **Anuário Brasileiro de Economia Florestal**, Rio de Janeiro, v. 16, p. 116-122, 1964.

LAMPARELLI, R.A.C.; ROCHA, J.V.; BORGHI, E. **Geoprocessamento e agricultura de precisão**: fundamentos e aplicações, Guaíba: Agropecuária, 2001. 118 p.

LANDSBERG, J.J. **Physiological ecology of forest production**. London: Academic Press, 1986. 216 p.

LANDSBERG, J.J.; GOWER, S.T. **Applications of physiological ecology to forest management**. San Diego: 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 partitioning. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 95, p. 209-228, 1997.

LANDSBERG, J.J.; MÄKELÄ, A.; SIEVÄNEN, R.; KUKKOLA, M. Analysis of biomass accumulation and stem size distributions over long periods in managed stands of *Pinus sylvestris* in Finland using the 3-PG model. **Tree Physiology**, Victoria, v. 25, n. 7, p. 781-92, 2005.

LANDSBERG, J.J.; JOHNSEN, K.H.; ALBAUGH, T.J.; ALLEN, H.L.; MCKEAND, S.E. Applying 3-PG, a simple process-based model designed to produce practical results, to data from loblolly pine experiments. **Forest Science**, Bethesda, v. 47, n. 1, p. 43-51, 2001.

LINDSAY, W.L.; NORVELL, W.A. Development of a DPTA soil test for zinc, iron, manganese and copper. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 42, p. 421-428, 1978.

LOPES, R.C.; PERUFFO, N.; SACHS, L.L.B.; SILVA, V.A.; BATISTA, I.H. Folha SF.22-Paranapanema. In: SCHOBENHAUS, C.; GONÇALVES, J.H.; SANTOS, J.O.S.; ABRAM, M.B.; NETO, R.L.; MATOS, G.M.M.; VIDOTTI, R.M.; RAMOS, M.A.B.; JESUS, J.D.A. **Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, Sistema de Informações Geográficas – SIG. 46 folhas na escala 1:1.000.000**. Brasília: CPRM, 2004. Disponível em: <<http://geobank.sa.cprm.gov.br>>. Acesso em: 26 jun. 2007.

LOUW, J.H.; SCHOLLES, M.C. Site index functions using site descriptors for *Pinus patula* plantations in South Africa. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 225, p. 94–103, 2006.

MACHADO, C.C.; MALINOVSKI, J.R. Forest road network planning in afforestation. In: IUFRO MEETING ON HARVESTING, TRANSPORT, ERGONOMICS AND SAFETY IN PLANTATION FORESTRY, 1987, Curitiba. Curitiba: IUFRO; UFPR, 1987. p. 1-13.

MAINIERI, C.; CHIMELO, J.P.; KAJIYA, S. Densidade básica e características anatômicas da madeira do Pino-do-Paraná - *Araucaria angustifolia* O. Kuntze do povoamento artificial da região de Capão Bonito estado de São Paulo. **Publicação IPT**, São Paulo, n. 1016, p. 1-27, 1974.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fósforo, 1997. 319 p.

MARTIN, T.N. **Modelo estocástico para estimação da produtividade de soja no Estado de São Paulo utilizando simulação normal bivariada**. 2007. 208 p. Tese (Doutorado em ????) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

McBRATNEY, A.B.; WEBSTER, R. Choosing functions for semivariograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. **Journal Soil Science**, Madison, v. 37, p. 617-639, 1986.

McMUTRIE, R.E.; ROOK, D.A.; KELLIHER, F.M. Modelling the yield of *Pinus radiata* on a site limited by water and nutrition. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 30, p. 381-413, 1990.

MEGOWN, K.; TURNER, P.; MALE, J.; RETIEF, J. The impact of site index and age on the wood, pulp and pulping properties of *Eucalyptus grandis* clone (Tag5). In: "FOREST GENETICS FOR THE NEXT MILLENNIUM" IUFRO WORKING GROUP, 2000, Durban. **Proceedings...** p. 169-173.

MEIO, V.F.; CRUZ, C.D.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; COSTA, L.M. Utilização de técnicas multivariadas no estudo das relações entre atributos químicos do solo e a produtividade do eucalipto no Rio Grande do Sul. **IPEF**, Piracicaba, v. 48, p. 38-49, 1995.

MENEZES, A.A. **Produtividade da cultura do eucalipto e sua relação com a qualidade e a classe de solo**. 2005. 91 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

MOLIN, J.P. Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 22, n. 1, p. 83-92, 2002.

NAIDOO, S.; ZBONÁK, A.; PAMMENTER, N.W.; AHMED, F. Assessing the effects of water availability and soil characteristics on selected wood properties of *E. grandis* in South Africa. In: "EUCALYPTUS AND DIVERSITY: BALANCING PRODUCTIVITY AND SUSTAINABILITY" IUFRO WORKING GROUP, 2007, Durban. **Proceedings...** p. 1-11.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. Brasília: Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1979. 422 p. (Série Recursos Naturais e Meio Ambiente, 4).

NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L. Interpretação de análise química do solo para o crescimento de *Eucalyptus* spp. – níveis críticos de implantação e de manutenção. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 10, n. 1, p. 105-111, 1986.

OLIVEIRA, J.B. **Solos do Estado de São Paulo**: descrição das classes registradas no mapa pedológico. Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas, 1999. 112 p. (Boletim Científico, 45).

OLIVEIRA, J.B. de; CAMARGO, M.N.; ROSSI, M.; CALDERANO FILHO, B. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo**: legenda expandida. Campinas: Instituto Agrônômico; Rio de Janeiro: EMBRAPA – Solos, 1999. 64 p.

OLIVEIRA, L.B.; PAULA, J.L. de. Retenção e disponibilidade de água em latossolos do Sudeste e Sul do Brasil. In: REUNIÃO DE CLASSIFICAÇÃO, CORRELAÇÃO DE SOLOS E INTERPRETAÇÃO DE APTIDÃO AGRÍCOLA, 3., 1988, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: EMBRAPA, SNLCS, 1988. p. 303-363.

ORMSBY, T., NAPOLEON, E., BURKE, R., GROESSL, C., BOWDEN, L. **Getting to Know ArcGIS Desktop**: updated for ArcGIS 10. 2nd ed. Redlands: ESRI Press. 2010. 604 p.

ORTIZ, G.C. **Aplicação de métodos geoestatísticos para identificar a magnitude e a estrutura da variabilidade espacial de variáveis físicas do solo**. 2002. 75 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

ORTIZ, J.L. **Emprego do geoprocessamento no estudo da relação entre potencial produtivo de um povoamento de eucalipto e atributos do solo e do relevo**. 2003. 205 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

PARTON, W.J.; SCHIMEL, D.S.; COLE, C.V.; OJIMA, D.S. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great plains grasslands. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 51, p. 1173-1179, 1987.

PASSIOURA, J.B. Simulation models: science, snake oil, education or engineering? **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, p. 690-694, 1996.

PASTOR, J.; POST, W.M. Influence of climate, soil moisture, and succession on forest carbon and nitrogen cycles. **Biogeochemistry**, v. 2, p. 3-27, 1986.

PAUL, K.I.; BOOTH, T.H.; JOVANOVIĆ, T.; SANDS, P.J.; MORRIS, J.D. Calibration of the forest growth model 3-PG to eucalypt plantations growing in low rainfall regions of Australia. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 243, p. 237-247, 2007.

PEDRO JR., M. J.; MELLO, M. H. A.; ORTOLANI, A.; ALFONSI, R. R.; SENTELHAS, P. C. **Estimativa das temperaturas médias mensais das máximas e das mínimas para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1991. 11 p. (Boletim Técnico, 142).

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.

PERROTTA, M.M.; SALVADOR, E.D.; LOPES, R.C.; D'AGOSTINO, L.Z.; WILDNER, W.; RAMGRAB, E.; PERUFFO, N.; FREITAS, M.A.; GOMES, S.D.; CHIEREGATI, L.C.; SACHS, L.L.B.; SILVA, V.A.; BATISTA, I.H.; MARCONDES, P.E.P. Folha SG.22- Curitiba. In: SCHOBENHAUS, C.; GONÇALVES, J.H.; SANTOS, J.O.S.; ABRAM, M.B.; NETO, R.L.; MATOS, G.M.M.; VIDOTTI, R.M.; RAMOS, M.A.B.; JESUS, J.D.A. 2004. **Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, Sistema de Informações Geográficas – SIG. 46 folhas na escala 1:1.000.000**. Brasília: CPRM, 2004. Disponível em: <<http://geobank.sa.cprm.gov.br>> Acesso em: 26 jun. 2007.

PINTO, H.S.; ORTOLANI, A.A.; ALFONSI, R.R. Estimativa das temperaturas médias mensais do Estado de São Paulo em função de altitude e latitude. **Caderno de Ciências da Terra**, São Paulo, v. 23, p. 1-20, 1972.

PRADO, H. A pedologia simplificada. **POTAFOS. Arquivo do Agrônomo**, Piracicaba, v. 1, p. 1-16, 1995.

RAHMAN, S.; MUNN, L.C.; ZHANG, R.; VANCE, G.F. Rocky Mountain forest soils: Evaluating spatial variability using conventional geostatistics. **Canadian Journal Soil Science**, Ottawa, v. 76, p. 501-507, 1996.

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

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: IAC, 1996. 285 p. (IAC. Boletim Técnico, 100).

REGALADO, C.M.; RITTER, A. Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of soil water repellency parameters in a laurel forest watershed. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 70, p. 1071-1081, 2006.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1990. 188 p.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. **Pedologia**: base para distinção de ambientes. Viçosa: NEPUT, 1999. 367 p.

RIBEIRO JR., P.J. **Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial de parâmetros do solo**. 1995. 99 p. Dissertação (Mestrado em Estatística e Experimentação Agronômica) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

RIGATTO, P.A.; DEDECEK, R.A.; MATOS, J.L.M. Influência dos atributos do solo sobre a qualidade da madeira de *Pinus taeda* para produção de celulose Kraft. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 267-273, 2004.

RIOS, A.J.W.; KLIEMANN, H.J.; OLIVEIRA, V.A.; JACOMINE, P.K. Densidade de amostragem e complexidade de área em levantamentos pedológicos executados no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 38, n. 1, p. 44-52, 2008.

RIZZO, L.T.B. **Levantamento pedológico semidetalhado – Distrito Capão Bonito**: Boa Esperança, Santa Inês, Santa Helena e Santa Fé (Votorantim Celulose e Papel S.A.). São Paulo: LRM-Projetos e Consultoria Agro Ambiental. 2001. 75 p.

ROBERTSON, G.P. **GS+**: Geostatistics for the Environmental Sciences. Michigan: Gamma Design Software, 2008. 162 p.

RODRIGUES, R.R. A vegetação de Piracicaba e municípios do entorno. **Circular Técnica**, Piracicaba, n. 189, 1999. Disponível em: <www.ipef.br/publicacoes/ctecnica>. Acesso em: 01 maio 2003.

RODRIGUEZ-LADO, L.; SPAROVEK, G.; VIDAL-TORRADO, P.; DOURADO-NETO, D.; MACIÁS-VÁZQUEZ, F. Modelling air temperature for the state of São Paulo, Brazil. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 64, n. 5, p. 460-467, 2007.

ROLIM, G.S.; SENTELHAS, P.C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente EXCEL para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, p. 133-137, 1998.

ROSS, J.L.S.; MOROZ, I.C. **Mapa geomorfológico do estado de São Paulo**. São Paulo: USP, FFLCH, Depto. de Geografia, Laboratório de Geomorfologia; IPT, Laboratório de Cartografia Geotécnica – Geologia Aplicada; FAPESP, 1997. Escala 1: 500.000. v. 1, 64 p.

RUFINO, T.M.C.; THIERSCH, C.R.; FERREIRA, S.O.; KANEGAE JUNIOR, H.; FAIS, D. Uso da geoestatística no estudo da relação entre variáveis dendrométricas de povoamentos de *Eucalyptus* sp. e atributos do solo. **Ambiência**, Curitiba, v. 2, p. 89-93, 2006.

RUNNING, S.W.; GOWER, S.T. FOREST-BGC, a general model of forest ecosystem processes for regional applications, II. Dynamic carbon allocation and nitrogen budgets. **Tree Physiology**, Victoria, v. 9, p. 147-160, 1991.

SANDS, P.J. **3PGpjs—A User-friendly Interface to 3-PG, the Landsberg and Waring Model of Forest Productivity**. Hobart: CRC for Sustainable Production Forestry, 2001. 22 p. (Technical Report, 29).

SANDS, P.J.; LANDSBERG, J.J. Parameterisation of 3-PG for plantation grown *Eucalyptus globulus*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 163, p. 273-292, 2002.

SANTOS, R.D.; LEMOS, R.C.; SANTOS, H.G.; KER, J.C.; ANJOS, L.H.C. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 5. ed. Viçosa: SBCS, 2005. 92 p.

SÃO PAULO. Lei n. 7.663, de 30 de dezembro de 1991. Estabelece normas de orientação à Política Estadual de Recursos Hídricos bem como ao Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos. **Diário Oficial**, São Paulo, v. 101, n. 247, 31 dezembro 1991.

_____. Lei n. 9.034, de 27 de dezembro de 1994. Dispõe sobre o Plano Estadual de Recursos Hídricos - PERH, a ser implantado no período 1994 e 1995, em conformidade com a Lei n. 7.663, de 30 de dezembro de 1991, que instituiu normas de orientação à Política Estadual de Recursos Hídricos. **Diário Oficial**, São Paulo, v. 104, n. 241, 28 dezembro 1994.

SCHLOEMP, E.; COUTO, H. T. Z. Possibilidades de manejo da vida silvestre em reflorestamentos de *Eucalyptus*, no município de Capão Bonito, SP. In: SIMPÓSIO SOBRE ECOLOGIA E MANEJO DE FRAGMENTOS FLORESTAIS, 2., 1998, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: IPEF, 1998. p. 133-148.

SENTELHAS, P.C.; ORTOLAN, A.A.; PEZZOPANE, J.R.M. Estimativa da temperatura mínima de relva e da diferença de temperatura entre o abrigo e a relva em noites de geada. Campinas, **Bragantia**, Campinas, v. 54, n. 2, p. 437-445, 1995.

SETZER, J. **Contribuição para o estudo do clima do Estado de São Paulo**. São Paulo: Escolas Profissionais Salesianas, 1946. 393 p.

_____. **Os solos do Estado de São Paulo**: relatório técnico com considerações práticas. Rio de Janeiro: Serviço Gráfico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1949. 387 p.

_____. **Atlas climático e ecológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: Comissão Interestadual da Bacia Paraná-Uruguaí, 1966. 61p.

SGARBI, F. **Produtividade do Eucalyptus sp. em função do estado nutricional e da fertilidade do solo em diferentes regiões do Estado de São Paulo**. 2002. 101 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

SHAPIRO, S.S.; WILK, M.B. An analysis of variance test for normality: complete samples. **Biometrika**, v. 52, p. 591-611, 1965.

SHEPHERD, K.R. Carbon balance, carbon partitioning and yield of forest crops. In: LANDSBERG, J.J.; PARSONS, W. (Ed.). **Research for forest management**. Melbourne: CSIRO, 1985, p. 36-51.

SILVA, A.M.; SCHULZ, H.E.; CAMARGO, P.B. **Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas**. São Carlos: Editora Rima, 2003, 138 p.

SILVA, C.R. **Efeito do espaçamento e arranjo de plantio na produtividade e uniformidade de clones de Eucalyptus na região nordeste do Estado de São Paulo**. 2005. 50 p. Dissertação (Mestrando em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2005. Disponível em <<http://www.teses.usp.br>>. Acesso em: 20 setembro 2006.

SILVA, C.R.; PATROCÍNIO, D.D.; CAMARGO, F.R.A.; SCATOLINI, F.M.; SILVEIRA, R.L.V.A. **Manejo e nutrição mineral do eucalipto na VCP**. Votorantim: Votorantim Celulose e Papel, Unidade Florestal, 2001. 35 p.

SILVA, G.G.C. **Nutrição, crescimento e sua modelagem em povoamentos de eucalipto em resposta à disponibilidade de água e nutrientes**. 2006. 84 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

SILVA, H.D. **Biomassa e aspectos nutricionais de cinco espécies do gênero *Eucalyptus*, plantadas em solo de baixa fertilidade**. 1983. 105 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. 1983.

SILVA, P.H.M.; POGGIANI, F.; GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L. Volume de madeira e concentração foliar de nutrientes em parcelas experimentais de *Eucalyptus grandis* fertilizadas com lodos de esgoto úmido e seco. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 845-854, 2008.

SILVEIRA, R.L.V.A.; HIGASHI, E.N.; GONÇALVES, A.N.; MOREIRA, A. Avaliação do estado nutricional do *Eucalyptus*: diagnose visual, foliar e suas interpretações. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. cap. 3, p. 79-104.

SIMÕES, J.W. Reflorestamento e manejo de florestas implantadas. **Documentos Florestais**, Piracicaba, n. 4, p. 1-29, 1989.

SOARES, A. **Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente**. 2. ed. Lisboa : IST Press, 2006. 214 p.

SOARES, C.P.B.; LEITE, H.G.; CAMPOS, J.C.C.; SEDIYAMA, G.C. A inclusão da precipitação anual em um modelo de crescimento e produção. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 22, n. 4, p. 475-482, 1998.

SOTOMAYOR, J.F.M. **Métodos de amostragem de solos para a determinação de carbono em três ambientes**. 2009. 101 p. Dissertação (Mestrado em Ecologia Aplicada) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

SOUZA, A.L. **Estudo do efeito de suavização da krigagem ordinária em diferentes distribuições estatísticas**. 2007. 101 p. Dissertação (Mestrando em Recursos Minerais e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2007.

SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T.; BARBIERI, D.B. Variabilidade espacial da textura de um Latossolo Vermelho Eutroférico sob cultivo de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 2, p. 309-319, 2004.

SOUZA JÚNIOR, A.O.; PORSANI, J.L. Localização de fraturas de rochas graníticas, no município de Capão Bonito-SP, Brasil. **Revista Brasileira de Geofísica**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 2, p. 123-128, 2002.

STAPE, J.L. **Production ecology of clonal Eucalyptus plantations in northeastern Brazil**. 2002. 225 p. Tese (PhD) - Colorado State University, Ft. Collins. 2002.

STAPE, J.L.; GOMES, A.N.; ASSIS, T.F. Estimativa da produtividade de povoamentos monoclonais de *Eucalyptus grandis* x *urophylla* no Nordeste do estado da Bahia-Brasil em função das variabilidades pluviométrica e edáfica. In: CONFERÊNCIA IUFRO SOBRE SILVICULTURA E MELHORAMENTO DE EUCALIPTOS, 3., 1997, Salvador. **Anais....** Colombo: EMBRAPA, CNPF; SEAGRI, 1997. p.192-198.

STAPE, J.L.; RYAN, M.G.; BINKLEY, D. Testing the utility of the 3-PG model for growth of *Eucalyptus grandis* x *urophylla* with natural and manipulated supplies of water and nutrients. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.193, p.219-234, 2004.

STATISTICAL PACKAGE FOR THE SOCIAL SCIENCES. **SigmaPlot for Windows**: version 10. Chicago, 2006.

STRAHLER, A.N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Transactions of the American Geophysical Union**, v. 38, p. 913-920, 1957.

TAKAHASHI, E.N.; SILVA, A.C.; RANGEL, T.M.; SAMPAIO, T.F.; BIAGGIONI, B.T. Production of hybrid *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* clones on different soil types. In: REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 6., 2006, Passo Fundo. **Anais...** Passo Fundo: UFSM, 2006.

TEMPS, M. **Adição da precipitação pluviométrica na modelagem do crescimento e da produção florestal em povoamentos não desbastados de *Pinus taeda* L.** 2005. 83 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

THEOBALD, D.M. **GIS Concepts and ArcGIS Methods**. 3rd ed. Fort Collins: Conservation Planning Technologies, 2007. 439 p.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955. 104 p. (Publications in Climatology).

TOMAZELLO FILHO, M.; STAPE, J.L.; BALLARIN, A.W.; BENJAMIN, C.A. Effect of fertilization and irrigation on the wood properties of *Eucalyptus grandis* x *urophylla* clones. In: "EUCALYPTUS AND DIVERSITY: BALANCING PRODUCTIVITY AND SUSTAINABILITY" IUFRO WORKING GROUP, 2007, Durban. **Proceedings...** v. 1, p. 1-9.

TOMÉ, J.; TOMÉ, M.; FONTES, L.; SOARES, P.; PACHECO, C.; ARAÚJO, C. Testing 3PG with irrigated and fertilized plots established in *Eucalyptus globulus* plantations in Portugal. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MODELLING FOREST PRODUCTION, 2004, Vienna. **Proceedings...** p. 382-390.

TSOUMIS, G.; PANAGIOTIDIS, N. Effect of growth condition on quality characteristics of Black Pine (*Pinus nigra* Arn.). **Wood Science and Technology**, New York, v. 14, p. 301-310, 1980.

TSUKAMOTO FILHO, A.A.; COUTO, L.; NEVES, J.C.L.; PASSOS, C.A.M.; SILVA, M.L. Fixação de carbono em um sistema agrossilvipastoril com eucalipto na região do cerrado de Minas Gerais. **Agrossilvicultura**, Viçosa, v. 1, n. 1, p. 29-41, 2004.

TUCCI, C.E.M. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1998. 650 p.

VALERIANO, M.M. **Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul**. São José dos Campos: INPE, 2005. 72 p.

VALERIANO, M.M.; PICINI, A.G. Uso de sistema de informação geográfica para a geração de mapas de médias mensais de temperatura do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 8, n. 2, p. 255-262, 2000.

VAN GOOR, C.P. Classificação da capacidade da terra em relação ao reflorestamento com *Pinus elliottii* Eng. var. *elliottii* e *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze, no Estado de São Paulo. **Silvicultura em São Paulo**, São Paulo, n. 4, p. 349-366, 1965.

VETTORATO, J.A. **Mapeamento da fertilidade do solo utilizando sistema de informação geográfica**. 2003. 84 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2001.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudo da variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F. de; ALVAREZ V., V.H.; CHAEFER, C.E.G.R. (Ed.). **Tópicos ciência do solo** Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 1-54.

VIEIRA, S.R.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W.; TILLOTSON, P.M. The Scaling of semivariograms and the kriging estimation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, p. 525-533, 1997.

VOTORANTIM. **Votorantim 85 anos: uma história de vida e trabalho: 1918-2003**. São Paulo, 2003. v. 1, 143 p.

WANG, Y.P.; JARVIS, P.G. Description and validation of an array model - MAESTRO. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 51, p. 257-280, 1990.

WARING, R.H. A process model analysis of environmental limitations on the growth of Sitka spruce plantations in Great Britain. **Forestry**, v. 73, p. 65-79, 2000.

WARING, R.H.; MCDOWELL, N. Use of a physiological process model with forestry yield tables to set limits on annual carbon balances. **Tree Physiology**, Victoria, v. 22, n. 2/3, p. 179-188, 2002.

WEINSTEIN, D.A.; BELOIN, R.M.; YANAI, R.D. Modeling changes in red spruce carbon balance and allocation in response to interacting ozone and nutrient stresses. **Tree Physiology**, Victoria, v. 9, p. 127-146, 1991.

WHITEHEAD, D.; HALL, G.M.J.; WALCROFT, A.S.; BROWN, K.J.; LANDSBERG, J.J. Analysis of the growth of rimu (*Dacrydium cupressinum*) in South Westland, New Zealand, using process-based simulation models. **International Journal of Biometeorology**, Heidelberg, v. 46, p. 66-75, 2002.

WILCKEN, C.F.; SOLIMAN, E.P.; LIMA, A.C.V.; DAL POGETTO, M.H.F.A.; DIAS, T.K.R. Perspectivas para o manejo do percevejo bronzeado *Thaumastocoris peregrinus*. In: REUNIÃO TÉCNICA DO PROTEF - GERENCIAMENTO DE RISCO E MONITORAMENTO DE PRAGAS EXÓTICAS, 14., 2009, Sete Lagoas. Disponível em: <<http://www.ipef.br/eventos/2009/protef14.asp>>. Acesso em: 20 jun. 2010.

WILKINSON, L. **SYSTAT – systems for statistics**: version 11. Chicago: Systat Inc., 2004.

WILLMOTT, C.J.; ACKLESON, S.G.; DAVIS, R.E.; FEDDEMA, J.J.; KLINK, K.M.; LEGATES, D.R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C.M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.

ZANON, M.L.B.; FINGER, C.A.G. Relação de variáveis meteorológicas com o crescimento das árvores de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze em povoamentos implantados. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 3, p. 467-76, 2010.

ZHAO, M.; XIANG, W.; PENG, C.; TIAN, D. Simulating age-related changes in carbon storage and allocation in a Chinese fir plantation growing in southern China using the 3-PG model. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 257, p. 1520–1531, 2009.

ZIMBACK, C.R.L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade**. 2001. 114 p. Tese (Livre-Docência) – Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2001.