

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**MODELAGEM DO SEQUESTRO DE CARBONO EM PLANTAÇÃO
DE EUCALIPTO PARA FINS ENERGÉTICOS NO CERRADO**

JOSÉ DANIEL ECHEVERRI VERGARA

ORIENTADOR: MARIO BENJAMIM BAPTISTA SIQUEIRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS

PUBLICAÇÃO: ENM.DM-185A/2013

BRASILIA DF/ MAIO - 2013

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**MODELAGEM DO SEQUESTRO DE CARBONO EM PLANTAÇÃO DE
EUCALIPTO PARA FINS ENERGÉTICOS NO CERRADO**

JOSÉ DANIEL ECHEVERRI VERGARA

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
MECÂNICA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS MECÂNICAS.**

APROVADA POR:

**Prof. MARIO BENJAMIM BAPTISTA SIQUEIRA, Dr. (ENM-UnB)
(ORIENTADOR)**

**Prof. ARMANDO DE AZEVEDO CALDEIRA-PIRES, Dr. (FGA-UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**Prof. ALBA VALÉRIA REZENDE, Dr^a. (UnB)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

BRASÍLIA/DF, 03 DE MAIO DE 2013.

“A EDUCAÇÃO QUALQUER QUE SEJA ELA, É SEMPRE UMA TEORIA DO
CONHECIMENTO POSTA EM PRÁTICA”

Paulo Freire

*Ao povo brasileiro, que me acolheu
nesse maravilhoso país*

AGRADECIMENTOS

Ao professor Mario pela orientação, compreensão e paciência em todo momento.

Ao professor Mauro, e Armando, pela orientação no entendimento de conceitos novos em florestas.

Ao CNPq pelo apoio financeiro

À minha mãe Berta Cecilia e minha irmã Julieta, que me fazem a vida mais fácil.

Mathilde Tibana e Sandra Regina, com a sua ajuda e jeito de ser, fez minha estadia em Brasília como se estivesse em casa.

RESUMO

MODELAGEM DO SEQUESTRO DE CARBONO EM PLANTAÇÃO DE EUCALIPTO PARA FINS ENERGÉTICOS NO CERRADO

As florestas têm papéis importantes na mudança do clima, pois produzem combustíveis que quando são gerenciados de uma forma sustentável são uma alternativa benigna em substituição dos combustíveis fósseis, já que contribuem com absorção das emissões de CO₂ em sua biomassa, nos solos e nos produtos delas derivadas.

O plantio de novas florestas para fins energéticos pode ajudar a mitigar as mudanças do clima retirando CO₂ da atmosfera. Sob certas condições, essas florestas podem crescer relativamente rápida, absorvendo o CO₂ a taxas mais altas que nas florestas naturais. No caso do eucalipto, espécie estudada neste trabalho, o rápido crescimento fornece boa absorção de CO₂ da atmosfera referente ao emitido durante a queima na geração de energia. Uma alternativa para a quantificação e estimativa da quantidade do CO₂ absorvido pela floresta é a medida do potencial produtivo de florestas de eucalipto (PPL) que, com o emprego de modelos de ecossistemas que variam tanto em seus aspectos biogeoquímicos quanto nas suas resoluções temporais e espaciais pode-se estimar o PPL. Os modelos selecionados para este estudo foram o 3-PG e o Biome-BGC.

A partir dos resultados obtidos na modelagem, foi possível verificar a aplicabilidade dos dois modelos 3-PG e Biome-BGC na estimativa da PPL e outras variáveis de saída para uma floresta energética de eucalipto na região do cerrado. O estudo revelou ainda que tem parâmetros de entrada nos modelos que precisam ser medidos com uma boa precisão, já que em função desses, a variação da PPL é muito grande. Finalmente o estudo revelou a importância de confrontar os dados obtidos pelos modelos 3-PG e Biome-BGC com dados experimentais, para melhorar o desempenho na estimativa baseado na modelagem.

ABSTRACT

Managed Forests have important roles in climate change due to their contribution to CO₂ sequestration stored in their biomass, soils and products therefrom. Terrestrial net primary production (NPP, KgC/m²), equal to gross primary production minus autotrophic respiration, represents the carbon available for plant allocation to leaves, stem, roots, defensive compounds, and reproduction and is the basic measure of biological productivity. Tree growth, food production, fossil fuel production, and atmospheric CO₂ levels are all strongly controlled by NPP. Accurate quantification of NPP at local to global scales is therefore central topic for carbon cycle researchers, foresters, land and resource managers, and politicians. For recent or current NPP estimates, satellite remote sensing can be used but for future climate scenarios, simulation models are required.

There is an increasing trend to displace natural Brazilian Cerrado to Eucalyptus for paper mills and energy conversion from biomass. The objective of this research exercise is to characterize NPP from managed Eucalyptus plantation in the Brazilian Cerrado. The models selected for this study were the 3-PG and Biome-BGC.

Therefore the results obtained in modeling, it was possible to verify the applicability of the two models 3-PG and Biome-BGC in estimate of NPP to eucalyptus energy forest in a Brazilian cerrado region. The study also revealed that have input parameters in models that need to be measured with a good accuracy, because in function of these parameters, the NPP variation is very large. Finally the study revealed the importance of confronting the data obtained by 3-PG and Biome-BGC with experimental data to improve performance modeled-based estimation.

SUMARIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO	3
1.2 OBJETIVOS	5
1.2.1 Objetivo geral.....	5
1.2.2 Objetivos específicos.....	5
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	6
2 REVISÃO DA LITERATURA	7
2.1 MODELOS DE PRODUTIVIDADE DE VEGETAL	7
2.2 IMPORTÂNCIA DOS MODELOS PARA ESTIMAR A PPL	8
2.2.1 Modelos Para Estimar a PPL	9
2.3 TRABALHOS ANTERIORES E APLICAÇÕES DOS MODELOS 3-PG E BIOME- BGC EM FLORESTAS ENERGÉTICAS	11
3 DESCRIÇÃO DOS MODELOS	14
3.1 MODELO 3-PG	14
3.1.1 Modelo 3-PG utilidades e aplicações.....	16
3.1.2 Estrutura do Modelo 3-PG	17
3.1.2.1 A assimilação de carboidratos (PPL e PPB).....	17
3.1.2.2 Alocação de Biomassa/Carbono	19
3.1.2.3 Mortalidade do Número de Árvores	21
3.1.2.4 Balanço de Água no Solo	22
3.2 MODELO BIOME-BGC	23
3.2.1 O Modelo Biome-BGC utilidades e aplicações.....	23
3.2.2 Estrutura do Modelo Biome-BGC.....	25
3.2.2.1 Processos Físicos do Modelo Biome-BGC.....	27
3.2.2.2 Processos Fisiológicos do Modelo Biome-BGC: Ciclos, Reservas e Fluxos de Carbono e Nitrogênio.	29
3.2.2.3 Princípio da Conservação da Energia e Massa:.....	34
3.2.3 Equações para estimar a PPL no Biome-BGC (Fotossíntese).	34
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	40

4.1 DADOS GERAIS ONDE É APLICADO O MODELO 3-PG E BIOME-BGC	40
4.1.1 Localização do estudo.....	Erro! Indicador não definido.
4.1.2 Floresta energética plantada para o estudo.....	41
4.1.2.1 Clonagem do Eucalipto.....	42
4.1.3 Clima e precipitação da FAL.....	43
4.1.4 Tipo de solo da plantação.....	44
4.1.4.1 Latossolo Vermelho-Amarelo	45
4.1.4.2 Textura do solo da FAL	45
4.1.4.3 Quantidade máximo e mínimo de água disponível no solo da FAL.....	46
4.2 ESTRUTURA DO MODELO 3-PG E BIOME-BGC.....	48
4.2.1 Estrutura do modelo 3-PG	48
4.2.1.1 Parâmetros do local, controle e inicialização 3-PG.....	50
4.2.1.2 Dados meteorológicos	51
4.2.2 Análise de sensibilidade para o Modelo 3-PG na FAL.....	53
4.2.2.1 Fertilidade do solo	54
4.2.2.2 Biomassa Inicial.....	54
4.2.2.3 Tipo do solo	54
4.2.2.4 Quantidade de água máxima no solo	55
4.2.2.5 Quantidade de água inicial no solo	55
4.2.2.6 Dados meteorológicos	55
4.2.3 Estrutura e parâmetros do modelo Biome-BGC	56
4.2.3.1 Parâmetros ecofisiológicos do modelo Biome-BGC.....	57
4.2.3.2 Parâmetros do local, controle e inicialização Biome-BGC.....	58
4.2.3.3 Parâmetros meteorológicos do modelo Biome-BGC.....	59
4.2.4 Análise de sensibilidade para o modelo Biome-BGC	60
4.2.4.1 Parâmetros de alocação.....	61
4.2.4.2 Parâmetros de diferentes relações Carbono/Nitrogênio	61
4.2.4.3 Parâmetros de frações de Lignina, Celulose e Lável.....	62
4.2.4.4 Parâmetros morfológicos	62
4.2.4.5 Deposição e fixação de nitrogênio.....	63
4.2.4.6 Biomassa inicial.....	63
4.2.4.7 Tipo de solo	63
4.2.4.8 Saturação de água no solo.....	63
4.2.4.9 Índice de radiação albedo.....	63

4.2.4.10	Variação dos dados meteorológicos	64
5	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	65
5.1	COMPARAÇÃO DA MODELAGEM 3-PG E BIOME-BGC	65
5.2	RESULTADOS DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARA O 3-PG.....	67
5.2.1	Fertilidade do solo e Biomassa inicial	67
5.2.2	Tipo de solo e quantidade de água máxima no solo.....	69
5.2.3	Quantidade de água inicial no solo e variação de dados climáticos por ano.....	70
5.3	RESULTADOS DA ANÁLISE DA SENSIBILIDADE PARA O BIOME-BGC	72
5.3.1	Alocação de carbono e proporção de nitrogênio nas folhas, tronco e raízes.....	72
5.3.2	Frações de lignina, lábil e celulose e Parâmetros morfológicos.....	74
5.3.3	Deposição, fixação de nitrogênio e biomassa inicial da plantação.	75
5.3.4	Tipo de solo e saturação da água no solo.....	77
5.3.5	Índice de radiação albedo e meteorologia.	78
5.4	PARAMETRIZAÇÃO DO 3-PG COM OS DADOS DO BIOME-BGC.	80
5.4.1	Comparação do Biome-BGC e 3-PG parametrizado	81
5.4.2	Análise espectral do Biome-BGC, 3-PG e 3-PG parametrizado.	83
5.5	BALANÇO DE CARBONO DA FLORESTA ENERGÉTICA USADA NA SUDERÚRGICA DE FERRO-GUSA.....	84
5.6	EMISSÕES DE GEE NA CARBONIZAÇÃO	86
5.7	EMISSÕES DE CO ₂ NA PRODUÇÃO DE FERRO-GUSA.....	87
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	89
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
	APÊNDICE A- PARÂMETROS DE ENTRADA E SAÍDA DO 3-PG	95
	APÊNDICE B - PARÂMETROS DE ENTRADA PARA EXECUTAR O BIOME-BGC	97
	APÊNDICE C- PARÂMETROS DE SAÍDA NO BIOME-BGC	99

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Estrutura básica de 3-PG e as influências causais de suas variáveis e processos. modificado, Sands (2004).....	22
Figura 3.2. Diagrama conceitual que mostra a estrutura geral do modelo Biome-BGC, modificado de Thornton 1998.	26
Figura 3.3. Atenuação da radiação no Biome-BGC, modificado de Thornton 1998.	28
Figura 3.4. Fluxos e reservas de água no Biome-BGC, modificado de Thornton 1998. ...	29
Figura 3.5. Reservatórios de carbono e nitrogênio no modelo Biome-BGC, modificado de Thornton 1998.	30
Figura 3.6. Fluxos de carbono e nitrogênio no modelo Biome-BGC modificado de Thornton 1998.	32
Figura 3.7. Curva de representação da fotossíntese a 25°C (linha sólida) calculada com valores de v_{cMAX} e j_{MAX} de 100 e 140 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ respectivamente, a parte mais baixa da relação é limitada pela capacidade de carboxilação (A(C)) e a parte mais acima representa a capacidade de transporte de elétrons (A(J)), a taxa de transporte do elétron ($j/4$) é mostrada também.....	36
Figura 4.1. Localização da Fazenda Água Limpa	41
Figura 4.2. Classificação climática do mundo Köppen-Geiger (modificado da universidade de Melbourne, 2007).	43
Figura 4.3. Estação de dados meteorológicos da FAL	44
Figura 4.4. Mapa dos solos do Df e FAL (modificado- Embrapa, 1995).....	45
Figura 4.5. Diagrama triangular para grupamento de classes de textura (modificado, Souza, 1995).	46
Figura 4.6. Representação gráfica dos valores médios de disponibilidade máxima de água nos solos arenosos, argilosos e barrentos a diferentes profundidades e expressos em mm de chuva. (modificado, Medina e Grohmann 1966).....	47
Figura 4.7. Dados meteorológicos da FAL coletados para o ano 2006 até 2010.....	52
Figura 4.8. Dados meteorológicos usados pelo modelo Biome-BGC da Fal ano 2010.....	60
Figura 5.1. Comparação de resultados dos modelos Biome-BGC e 3-PG, para PPL, evapotranspiração (ET), IAF e biomassa total da vegetação.....	67
Figura 5.2 -Estimativa da PPL com variação da fertilidade do solo e variação da biomassa inicial plantada no 3-PG	68
Figura 5.3. Variação da PPL com o índice de fertilidade no 3-PG	69

Figura 5.4. Estimativa da PPL, variação do tipo de solo e variação do teor máximo de água disponível no solo do modelo 3-PG.....	70
Figura 5.5. Estimativa da PPL, variação do teor inicial de água no solo e variação de dados climáticos de 2006-2010 no 3-PG.....	71
Figura 5.6. Estimativa da PPL em relação à proporção de carbono e relação carbono-nitrogênio em folhas, tronco, e raízes Biome-BGC.....	73
Figura 5.7. Estimativa da PPL, com variações de parâmetros morfológicos, como área específica foliar, índice de área foliar, relação de folhas sombreadas e iluminadas Biome-BGC.....	75
Figura 5.8. Estimativa da PPL, para diferentes valores de deposição e fixação de nitrogênio no ecossistema no Biome-BGC.	77
Figura 5.9. Estimativa da PPL, para diferente teor de biomassa inicial na vegetação e quantidade de água inicial no solo modelo Biome-BGC.	78
Figura 5.10. Variação do índice de radiação albedo do local e variação do clima no Biome-BGC, na estimativa da PPL.	79
Figura 5.11. PPL, evapotranspiração (ET), IAF, biomassa total da vegetação modelado com Biome-bGC e com 3-PG parametrizado (parâmetros utilizados no Biome-BGC).....	82
Figura 5.12. Representação esquemática do ecossistema modelado.....	83
Figura 5.13. Análise espectral da PPL e ET para o 3-PG, Biome-BGC e 3-PG parametrizado	84
Figura 5.14. Representação do processo de CO_2 da floresta energética a ferro-gusa	86
Figura 5.15. TEor de carvão vegetal para produzir 1 ton de ferro-gusa, adaptado de Sinifer, 2007	87
Figura 5.16. BALANÇO energético de carbono de acordo às estimativas da PPL pelos modelos Biome-BGC e 3-PG, por árvore e por hectare.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1. Produtividade média anual e no final da rotação para plantios de eucalipto em alguns estados do Brasil, modificado de Piketty et al, 2009.	3
Tabela 2.1. Caracterização dos diversos modelos de ecossistemas (entre eles 3-PG e Biome-BGC Modificado 2006).	8
Tabela 4.1. Variáveis climatológicas obtidas da estação meteorológica da FAL com uma frequência de 1 hora	44
Tabela 4.2. Tipos de solo correspondente a sua composição granulométrica	46
Tabela 4.3. Porcentagens máximas e mínimas da textura do solo da FAL.	46
Tabela 4.4. Valores médios de capacidade de campo, umidade de murchamento, e disponibilidade máxima de água em milímetros de chuva em solos sub cerrado (modificado-Medina & Grohmann 1966).	47
Tabela 4.5. Resumo das variáveis chave para executar o modelo 3-PG	48
Tabela 4.6. Valores dos parâmetros de sítio, controle e inicialização para FAL.	50
Tabela 4.7. Valores dos principais parâmetros de diferentes parametrizações do modelo 3-PG (Sands & Landsberg (2002), e Borges (2009)), cujos desempenhos são utilizados neste trabalho.	52
Tabela 4.8. Classes de sensibilidade que podem ser atribuídas aos parâmetros.	54
Tabela 4.9. Parâmetros ecofisiológicos para executar o Modelo Biome-BGC	57
Tabela 4.10. Parâmetros físicos do sítio para executar o modelo Biome-BGC	59
Tabela 4.11. Porcentagem padrão de lábil, celulose e lignina no eucalipto.	62
Tabela 5.1. Valores de índice de fertilidade do solo para cada simulação no modelo 3-PG	68
Tabela 5.2. Valores de biomassa inicial de folhas, tronco e raízes para cada simulação no 3-PG.	68
Tabela 5.3. Tipos de solo simulados na sensibilidade no 3-PG	69
Tabela 5.4. Resumo da análise de sensibilidade da PPL para diferentes parâmetros de entrada no modelo 3-PG.	71
Tabela 5.5. Alocação de carbono nas folhas, tronco, raízes para cada simulação no Biome-BGC.	72
Tabela 5.6. Frações C/N em folhas, serapilheira, madeira morta e raízes finas usadas em cada simulação no Biome-BGC.	73

Tabela 5.7. Porcentagens de frações de Lável, Celulose e Lignina para cada simulação do Biome-BGC.....	74
Tabela 5.8. Valores morfológicos para cada simulação (área específica da folha, fração índice de área foliar, fração de área folhas sombreadas / iluminadas no Biome-BGC).....	75
Tabela 5.9. Quantidade de deposição e fixação de nitrogênio no local da plantação, para cada simulação no Biome-BGC.	76
Tabela 5.10. Quantidade de Biomassa inicial na plantação para folhas e troncos para cada simulação no Biome-BGC.....	76
Tabela 5.11. Porcentagens de areia, silte, arena para cada tipo de solo simulado no modelo Biome-BGC.....	77
Tabela 5.12. Resumo da análise de sensibilidade da PPL no modelo Biome-BGC, para diferentes parâmetros (inicialização e ecofisiológicos).....	79
Tabela 5.13. Parâmetros do Biome-BGC utilizados para executar 3-PG parametrizado....	80
Tabela 5.14. Resultados da PPL e ET para os últimos 3 anos com o 3-PG, Biome-BGC e 3-PG parametrizado.....	84
Tabela 5.15. Emissões de GEE do processo de produção de ferro-gusa adaptado de Ferreira 2000	87

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

- ACV – Análise de Ciclo de Vida
- AFE – Área foliar específica
- ASW – Teor Disponível de água no solo
- C – Carbono
- CE – Fluxo *Eddy Covariance*
- CV – Carvão Vegetal
- DAP – Diâmetro do tronco à de 1,3 metros
- DPV – Déficit de Pressão de Vapor
- EDP – Declaração Ambiental de Produto
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
- EPC – Dados ecofisiológicos do modelo Biome-BGC
- FAL – Fazenda Águas Limpas Universidade de Brasília
- FAO – *Food and Agriculture Organization*
- FBN – Fixação Biológica de Nitrogênio
- FR – Índice de Fertilidade
- GEE – Gases de Efeito Estufa
- GWP – Potencial de Aquecimento Global (Sigla em inglês)
- IAF – Índice de área foliar
- IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*
- INI – Dados físicos do modelo Biome-BGC
- IPEA – Instituto de Economia Agrícola de São Paulo
- I_z – intensidade da radiação a uma determinada altura dentro da cobertura vegetal;
- I_0 – intensidade da radiação no topo da cobertura vegetal, representa a RFA;
- k – coeficiente de extinção ou atenuação
- LA – Área Foliar Equivalente
- MAPA – Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento.
- MET – Dados meteorológicos do modelo Biome-BGC
- MG – Minas Gerais
- MODIS – *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*
- N – Nitrogênio
- Ndep – Deposição úmida e seca de nitrogênio a partir da atmosfera

NEE – *Net Ecosystem Exchange*

Nfix – Fixação de nitrogênio a partir do solo

NTSG – *Numerical Terradynamic Simulation Group*

PBMs – Modelos Baseados em Processos

PD&I – Pesquisa Desenvolvimento e Inovação

PFT – Tipo de Vegetação Funcional

PNA – Plano Nacional de Agroenergia

PPB – Produtividade Primária Bruta.

PPL – Produtividade Primária Líquida

Q_{10} – Coeficiente de temperatura é usado para descrever o efeito da temperatura sobre a respiração.

RFAA – Radiação fotossintética ativamente absorvida

RM – Respiração de Manutenção

RMG – Resíduos de Madeira Grossa

RuBP – Substrato de Carboxilação

SIG: Sistemas de informações geográficas

SMO – Matéria orgânica no Solo

α_c – Eficiência quântica do copado

α_{cx} – Eficiência quântica máxima do dossel

n_R – Coeficiente de alocação para raízes;

n_F – Coeficiente de alocação de carbono para folhas.

n_S – Coeficiente de alocação de carbono para tronco “tronco”

pFS – Biomassa entre folhas e tronco

W_{Sx} – Biomassa do tronco da árvore

g_{Cx} – Condutância da copa da árvore

Ψ_{solo} – Potencial Hídrico no Solo mátrico.

1 INTRODUÇÃO

As florestas mundiais cobrem aproximadamente um terço da superfície terrestre, sendo responsáveis por cerca da metade do reservatório de carbono terrestre, segundo estudos da *Food and Agriculture Organization* (FAO, 2010). Portanto, as florestas desempenham um importante papel na regulação do clima global, através da absorção de Gases de Efeito Estufa – GEE.

Especificamente, as florestas energéticas vêm ganhando grande importância no Brasil, pois possuem a capacidade de substituir, pelo menos em parte, as energias de origem fóssil, diminuindo, de certa forma, a dependência do petróleo. Vislumbrando os benefícios de passar de uma matriz energética brasileira com maior participação da energia renovável, o Governo Federal, a partir de 2005, começou a empenhar esforços para a ascensão internacional dos biocombustíveis, como uma contribuição brasileira para a diminuição das emissões de GEE (OBERLING, 2008).

No Brasil, com o apoio da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), busca constituir uma direção nas ações públicas e privadas que forneçam conhecimento científico e tecnológico que ajudem na produção e uso sustentável da agricultura de energia renovável. Para isso tem-se como meta, tornar o agronegócio nacional competitivo, dando suporte a determinadas políticas públicas, como a inclusão social, a regionalização, e a sustentabilidade ambiental (EMBRAPA, 2009).

A biomassa de madeira, produzida de forma renovável, pode ser utilizada para substituição da biomassa não renovável ou de fontes de carbono fóssil na geração de eletricidade, assim como no uso direto de calor pela combustão e como agente na redução das emissões de GEE na fundição de ferro-gusa para a indústria siderúrgica. O carvão vegetal tem maior qualidade, por conter reduzido teor de enxofre, comparativamente ao ferro produzido com carvão mineral.

O Brasil é um dos poucos países onde se tem realizado pesquisas durante décadas para produção em grande escala de energia derivada da madeira, investindo em plantios florestais de crescimento rápido, majoritariamente de Eucalipto, dedicados à produção de madeira para obtenção de carvão destinado a indústria do aço. Também, tem-se

estabelecido plantações florestais que produzem biomassa, para geração de calor e eletricidade, e que é utilizada na indústria alimentícia, de bebidas e outras (FAO, 2008).

Quando o seu objetivo primordial é o aumento na produtividade, a primeira medida que se toma é a regularização do espaço entre as árvores, fazendo caber dentro da área estabelecida o número mais conveniente de mudas, dentro de um plano de manejo previamente determinado. O desenvolvimento uniforme de espécies de rápido crescimento durante um período de 7 a 8 anos possibilita a obtenção da mesma área basal observada na floresta natural tropical (POGGIANI, 1989). Essa elevada produtividade pode ser obtida, basicamente, por meio da seleção de árvores apropriadas para o reflorestamento (seleção genética), espaçamento adequado das árvores para evitar ou retardar a competição das copas e dos sistemas radiculares e a aplicação de outros tratamentos silviculturais.

No Brasil, através de programas de melhoramento florestal, tem-se logrado aumentar consideravelmente a produtividade dos plantios, principalmente com o aspecto relativo às características genéticas das espécies/clones (ABRAF, 2009). O setor das florestas plantadas no Brasil vem se beneficiando desse tipo de pesquisa por anos, que envolve o desenvolvimento do material genético, espaçamento entre árvores, fertilização, técnicas de plantio, controle de pragas e doenças, manejo florestal entre outros.

A produtividade média dos plantios de Eucalipto passou de 14 m³/ha/ano nos anos 70 para 38 m³/ha/ano até meados dos anos 90. Na atualidade, a produtividade média dos plantios comerciais de Eucalipto é de 40 m³/ha/ano (PIKETTY et al, 2009). Dados do IPEA-Instituto de Economia Agrícola de São Paulo, revelaram que a produtividade média estadual do eucalipto é de 39 m³/ha/ano. Segundo Fonseca (2009), os plantios de eucalipto poderiam chegar a uma produtividade média anual de 55 m³ por hectare a partir de 2010 em algumas regiões do país. Na Tabela 1.1 são apresentadas as produtividades máximas e mínimas anuais e por rotação (6 anos), dos plantios de eucaliptos para alguns estados brasileiros, segundo (PIKETTY et al, 2009).

Tabela 1.1. Produtividade média anual e no final da rotação para plantios de eucalipto em alguns Estados do Brasil, Modificado de PIKETTY et al, 2009.

Estado	Produtividade mínima (m ³ /ha/ano)	Produtividade máxima (m ³ /ha/ano)	Máxima produtividade no final da rotação (m ³ /ha)
Mato Grosso	25	35	210
Tocantins	30	35	210
Maranhão	25	30	180
Piauí	25	35	210
Goiás	30	40	240
Minas Gerais	35	40	240
Pará	25	30	180
Bahia	35	40	240
Mato Grosso do Sul	40	50	300

A produtividade varia em função do sítio, entre 25m³/ha/ano e 50m³/ha/ano para diferentes regiões do Brasil. Portanto é necessário o desenvolvimento de modelos que forneçam estimativas precisas de Produtividade Primária Líquida (PPL), relacionadas com a absorção de Dioxido de Carbono (CO₂). O estoque de carbono ou absorção de CO₂ é um dos principais componentes de avaliação do ciclo de vida, o qual é um processo objetivo para avaliar os impactos ambientais e a saúde associado a um produto, processo, serviço ou outras atividades econômicas em todo seu ciclo de vida (Caldeira Pires et al., 2005). É a metodologia estabelecida para a obtenção de rótulos ambientais Tipo III (Declaração Ambiental de Produto, EDP). É por isso que se poderia aproveitar e aplicar de forma adequada o conhecimento que se tem nas estimativas da PPL para diferentes causas, como a Análise de Ciclo de Vida -ACV para florestas energéticas, como leis que permitam maior inclusão de agricultura sustentável, no nível social, ambiental e econômico.

1.1 MOTIVAÇÃO

Os modelos de produtividade vegetal contemplam com precisão científica específica os processos ambientais típicos dos países desenvolvidos onde os mesmos foram elaborados. A extrapolação desses dados para países em desenvolvimento é comprometida devido às enormes diferenças existentes, em termos das tecnologias, tecnoestruturas, geologia, clima, densidade de população, biomassa, tipos de produtos, etc. No que tange a bioenergia, tanto como produto final como insumo na cadeia produtiva de um bem ou produto, essa situação ainda se agrava, como no caso, por exemplo, do carvão vegetal,

devido à forte influência das condições meteorológicas e edáficas locais na produtividade das florestas plantadas para esse fim. Apesar das relações relativamente bem estabelecidas entre biomassa e poder calorífico, a estimativa de relações de sequestro de carbono, componente relevante de uma ACV, e a produtividade local ainda carrega incertezas relevantes. Por outro lado, as medições de fluxo de carbono por meios diretos pelo método de correlação de vórtices tem se popularizado no meio científico. No entanto, essas medidas, apesar de uma boa resolução temporal (em torno de 30 min), ainda não atende às necessidades de abrangência espacial e temporal de interesse em uma ACV de floresta energética.

A modelagem então se apresenta como uma alternativa mais apropriada para estudos metodológicos, para uma estimativa da PPL o qual servira no futuro como um componente fundamental na ACV e até mesmo para geração de dados para complementação de bancos de dados locais mais representativos. Existem diversos modelos de ecossistemas, modelos esses que diferenciam tanto na sua resolução temporal e espacial quanto no seu detalhamento fenomenológico. Esses modelos, para serem aplicados em forma metodológica precisam ser parametrizados e validados e só assim passam a ser uma ferramenta poderosa para aplicação prognóstica da PPL. Este processo de parametrização-validação faz uso então de medidas de fluxo de carbono, e os modelos são então instrumentos de interpolação e extrapolação de resultados experimentais, para as situações de interesse.

Neste trabalho, pretende-se modelar a produtividade com dois modelos diferentes de crescimento vegetativo para uma plantação de eucalipto no cerrado. Utilizando dados meteorológicos locais, os modelos serão executados e comparados para se avaliar os parâmetros mais relevantes de cada um. Os modelos escolhidos para o estudo são o *Physiological Principles in Predicting Growth* (3-PG) e o modelo *Biome-BioGeoChemistry* (Biome-BGC). Esses modelos tem a vantagem sobre modelos de correlação, pois produzem resultados mais confiáveis em simulações para estudo de respostas da vegetação em relação a perturbações climáticas. Tais modelos são disponíveis sem custo e englobam dois extremos em termos de complexidade e resolução temporal e espacial. O 3-PG é um modelo destinado exclusivamente à estimativa de produtividade e a sua caracterização dos processos é bem elementar. Já o modelo Biome-BGC tem um forte componente biogeoquímico. Essas características individuais posicionam esses dois

modelos nos extremos opostos em termos de facilidade de uso e modelagem mecânica dos processos e, por isso, a escolha destes para o presente estudo. Os resultados das simulações devido à utilização dos dois modelos de forma sinérgica serão incorporados às bases de dados existentes, para melhor caracterização da PPL, diminuindo assim as incertezas das análises.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho é modelar o sequestro de carbono em uma plantação de eucalipto para fins energéticos no cerrado brasileiro.

1.2.2 Objetivos específicos

- Identificar os valores das variáveis de entrada dos modelos de produtividade vegetal
- Estimar a PPL numa plantação de eucalipto para fins energéticos na Fazenda Água Limpa - FAL, da Universidade de Brasília, mediante o uso dos modelos 3-PG e Biome-BGC.
- Realizar a análise de sensibilidade das variáveis de entrada nos modelos que apresentam maior variação na produtividade.
- Realizar o balanço de carbono absorvido durante o crescimento da plantação de eucalipto e as emissões causadas no processo de transformação da madeira em carvão vegetal (CV) e na transformação do CV na produção de minério (óxidos de ferro) em ligas de ferro com carbono (ferro-gusa).

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação está dividida pelos seguintes capítulos:

No capítulo 1 apresenta-se: a introdução, indicando a natureza do texto; os motivos que levaram à pesquisa; a importância; o caráter; a natureza do problema, seus limites e o que estabeleceu os objetivos da pesquisa.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, onde são descritos os diferentes tipos de modelos de fluxo de carbono, a teoria, a descrição, e os conceitos.

O capítulo 3 se apresenta a descrição, estrutura e formulação matemática dos modelos usados neste estudo.

O capítulo 4 descreve a metodologia que foi utilizada para o uso dos modelos na estimativa da PPL, tanto em relação à parametrização dos modelos quanto para o seu uso no crescimento em uma floresta energética de eucalipto no cerrado brasileiro e uma análise de sensibilidade com os parâmetros que fazem obter grandes variações na estimativa da PPL.

O capítulo 5 refere-se aos resultados obtidos durante a modelagem (Modelo 3-PG e Biome-BGC). Neste capítulo são discutidas as diferenças nas estimativas da PPL nos dois modelos e também é realizada a discussão referente às comparações da estimativa da PPL, baseado nos modelos como a PPL obtida na literatura atual.

O capítulo 6 menciona as conclusões e recomendações a partir dos resultados obtidos e discussões para pesquisas futuras.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 MODELOS DE PRODUTIVIDADE DE VEGETAL

De um modo geral, os modelos de simulação podem ser divididos em dois grupos básicos (PASSIOURA, 1996): modelos empíricos (“modelos de engenharia”) e modelos mecanísticos (“modelos científicos”, baseados em processos). Os modelos empíricos são representados por equações, cujos coeficientes das variáveis não derivam necessariamente de interpretação física ou biológica e se baseiam em “correlações” entre variáveis de um sistema, sem que, necessariamente, exista uma relação de causa-efeito entre as mesmas, e só são válidos para condições específicas em que foram estabelecidos. Já os modelos mecanísticos são definidos ou caracterizados por uma representação matemática de sistemas biológicos, que incorporam conhecimentos sobre mecanismos fisiológicos e ecológicos por meio de algoritmos preditivos, o que lhes confere maior capacidade de extrapolação, embora muitas vezes com menor acurácia (JOHNSEN et al., 2001).

Há um crescente interesse mundial no uso dos modelos mecanísticos, como ferramentas para a gestão florestal. Na Austrália, estes modelos são amplamente utilizados como complemento às ferramentas tradicionais de gestão florestal por vários órgãos (pesquisa, governo, comercial e consultores privados), para serviços de diagnóstico, tomada de decisão e análise econômica, (Battaglia et al, 2004).

É por isso que os modelos mecanísticos constituem-se em uma ferramenta importante na análise dos efeitos de diferentes cenários em um determinado conjunto de condições de clima, solo, material genético e nível de manejo, permitindo assim a otimização de alguns dos fatores de produção, tanto do ponto de vista da produção física como econômica, além de permitirem expectativas de alguns dos impactos ambientais do processo produtivo. Estes modelos possuem capacidade preditiva espacial e temporal, e, após devidamente parametrizados, calibrados e validados, podem fornecer estimativas confiáveis nos parâmetros estudados.

A Tabela 2.1, apresenta exemplos de modelos mecanísticos usados para modelagem de produtividade vegetal incluindo a caracterização dos processos ecofisiológicos de cada um. Tais modelos baseados em processos ecofisiológicos como o Secrets-3-PG; (Sampson

et al., 2001), Canveg (Baldochi e Meyers,1998), 3-PG (Landsberg e Waring, 1997), Biome-BGC (Thornton 2002), PnET (Alber e Federer, 1992), têm sido idealizados para estimar a produtividade de povoamentos florestais. Contudo, em virtude da complexidade dos processos fisiológicos envolvidos, e do tratamento a eles dado, o número e o tipo de variáveis de entrada para operação desses modelos é elevado, fato que se constitui em obstáculo na sua utilização prática.

Tabela 2.1. Modelos mecanísticos de ecossistemas

Características	Modelos				
	3-PG	PnET	Biome-BGC	Secrets-3-PG	Canveg-A
Escala de tempo	Mês/Ano	Mês	Dia	Hora/Dia	Hora/Dia
Nº compartimento	3	5	28	5	4
Discreti. Vertical	Adimen.	Adimen.	Adimen	1 dimensão	1 dimensão
Fotossínteses	Eficiência de luz	Concentração folhar de N	Biogeoquímica	Biogeoquímica	Biogeoquímica
Respiração de manutenção	Fração da PPB	Fração da PPB	Função de teor do N. Taxa metabólica.	Taxa metabólica	Taxa metabólica
Respiração de crescimento		Fração de alocação	Fração de alocação	Fração de alocação	Fração de alocação
Alocação	Alometria	Crescimento diário	Par. Aloca.	Alometria	Alometria
Serapilheira	Fração de folhas em pé	Tempo de retenção de folhas	Fração de folhas em pé		Fração de folhas em pé
Balanco de água	Penman-Monteith	Eficiência no uso de água	Penman-Monteith	Modelo de condutância	Modelo de condutância

2.2 IMPORTÂNCIA DOS MODELOS PARA ESTIMAR A PPL

A Produtividade Primária Líquida, que é igual à Produção Primária Bruta (PPB) menos a respiração autotrófica ou respiração de manutenção de uma árvore ou ecossistema, representa o carbono disponível alocado nas plantas em forma de biomassa (folhas, troncos, raízes). É a medida básica da produtividade biológica. O crescimento da árvore, forragem para o pastorejo, produção de alimentos, produção de biocombustíveis são todos profundamente controlados pela PPL. Os níveis de CO₂ na atmosfera são também influenciados pela PPL devido ao sequestro de carbono por ela representada.

Obter uma boa aproximação para quantificar a PPL ao nível global e local é muito relevante e um tópico central para pesquisadores do ciclo de carbono, silvicultores, pesquisadores do solo e políticos. As estimativas diagnosticadas atuais da PPL são realizadas por um satélite de sensoriamento remoto (Potter et al., 1993), mas, para pesquisas e investigações anteriores aos anos 1970 ou cenários e projeções do clima para o futuro, modelos de simulação são necessários.

Os modelos de fluxo têm sido usados para simular ciclos de água e carbono baseados em dados históricos e atuais do clima (Nemani et al., 1993), dinâmica de carbono no solo, efeitos de saturação de nitrogênio e localização de fontes e reservatórios globais de carbono. Modelos de fluxo também podem ser usados para desenvolver entendimentos teóricos básicos da função do ecossistema que não podem ser testados com os métodos de campo (Churkina e Running, 1998; Schimel et al., 1996). Mais importante ainda, os modelos são usados para abordar a necessidade de políticas e gestão de estimativas das respostas do ecossistema às mudanças climáticas (Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima, 1995), em particular, como a utilização de combustíveis fósseis promove o aumento do CO₂ na atmosfera. Há uma crescente necessidade de fornecer estimativas críveis de armazenamento ou liberação de carbono em um ecossistema para modelar diferentes concentrações futuras de CO₂ (Hunt et al., 1996; Schimel et al. 2000). É por essas razões que a modelagem da PPL de florestas, plantações ou ecossistemas é atualmente um tópico central na pesquisa de mudança do clima, hidrologia e ecologia.

2.2.1 Modelos Para Estimar a PPL

Os modelos representam o estado atual da compreensão dos processos do ecossistema e continuam sendo uma ferramenta central para prever a resposta dos ecossistemas aos distúrbios e às mudanças climáticas (Hanson et al., 2004). As medições de campo e a modelagem são abordagens complementares, necessárias no estudo da dinâmica do ecossistema. Isto é devido à incompatibilidade entre a taxa de alterações de um ecossistema, que é lenta, e a curta duração da maioria dos projetos de pesquisa. Os principais parâmetros de florestas e outros ecossistemas como a PPL podem ser difíceis de medir. Modelos de processos ecofisiológicos estimam a PPL simulando processos tais como fotossíntese, respiração, nutrientes, ciclos de água, crescimento, mortalidade e decomposição. Tais modelos permitem estimativas desses processos até uma escala global,

no qual o campo da amostragem é impraticável, também podendo simular respostas do ecossistema às mudanças climáticas futuras.

Os modelos de ecossistemas que estimam, entre outras coisas, a PPL, podem ter formulações com diferentes escalas espaciais e temporais, e, por conseguinte, diferentes complexidades (Jarvis, 1995). Nas escalas temporais, a PPL é influenciada por processos rápidos como a mecânica de transporte turbulento (medidos em segundos) e processos lentos como o crescimento das florestas (medido em anos ou décadas). Nas escalas espaciais, a fotossíntese, mecanismo gerador da PPL, varia na escala de folha (medida em milímetros), contudo, variáveis tais como densidade muitas vezes variam ao longo de centenas de metros (Baldocchi et al., 2000; Katul et al., 2001). Essa diferença de larga escala no tempo e no espaço é complementada com uma ampla gama de MBPs que surgiram para simular diferentes aspectos em função do carbono no ecossistema. Alguns modelos, como por exemplo, o 3-PG (Landsberg e Waring, 1997) simula processos lentos, usando uma taxa de crescimento em uma espécie específica de floresta sem limitações de recursos, em seguida, diminui-se essa taxa por um conjunto de funções de redução impostas pelo clima, hidrologia e recursos de restrição de água de forma empírica. Este modelo usa um período de tempo de integração amplo (mensal) para calcular os componentes individuais da PPL. Embora esta escala de tempo seja demasiado ampla para a resolução de ciclos diurnos de luz, temperatura, déficit de pressão de vapor (DPV), ou frentes de umidade no ar e em solos, pode ser suficiente para avaliar o impacto de longo prazo do manejo na produção florestal.

Outros modelos como o CANVEG (Baldocchi, 1992; Baldocchi e Meyers, 1998), que, ao contrário do 3-PG, é no outro extremo do espectro, com escalas de tempos muito rápidas, considera os processos de transferência de radiação e fisiológica dentro do dossel a partir de equações desde nível foliar e integra esses processos usando teorias de dispersão turbulenta. Esses modelos têm uma estrutura vertical explícita, estimando fluxos de carbono e energia, além das concentrações e temperatura, dentro e fora do dossel ao longo do dia. Para tal, define explicitamente todas as interações não lineares entre processos de transferência da radiação dentro do dossel, permitindo o cálculo da fotossíntese e balanço de energia.

O modelo Biome-BGC, que é um modelo zero-dimensional, portanto não têm estrutura espacial, representa a biosfera como se fosse uma grande folha para estimativas

de PPL. O modelo usa uma abordagem de reservatórios de carbono estabelecendo as trocas entre os reservatórios mecanisticamente, ou seja, incorporando princípios biogeoquímicos na formulação, em uma escala de tempo diária.

A comparação de modelos com diferentes teorias e simplificações em sua formulação ajuda a compreender as influências sobre produtividade do ecossistema, e ajuda a identificar brechas no nosso conhecimento. A comparação de modelos também é oportuna por dois motivos relacionados aos dados: primeiro, torres de medição têm sido instaladas em uma vasta gama de biomas e tem acumulado uma quantidade grande de dados da PPL (mais de 4 anos), associados a medições climáticas e ecológicas; e segundo, o sensoriamento remoto por satélite está agora fornecendo cobertura global de variáveis ecológicas em uma resolução espacial comparável para a pegada de medições de fluxo da PPL. Os modelos são as principais ferramentas para combinar informações desses conjuntos de dados e comparar o desempenho do modelo com fluxos entre a atmosfera e biosfera, ajudando a avaliar a nossa capacidade para estimar a produtividade em um ecossistema.

2.3 APLICAÇÕES DOS MODELOS 3-PG e BIOME-BGC EM FLORESTAS ENERGÉTICAS

Os modelos para estimativa da PPL ou troca de carbono entre biosfera e atmosfera, tem sido estudados no mundo todo, visando basicamente, o implemento de regulamentações que priorizem o uso de fontes de energia renováveis para diminuir as emissões de CO₂ na atmosfera. Muitos trabalhos deste tipo no Brasil, buscam calibrar os modelos para serem implementados nas florestas e clima específicos do lugar de estudo. Kneipp (2011) calibrou o modelo 3-PG na região de Guaíba, RS, sendo utilizados plantios clonais de *Eucalyptus saligna*. As equações alométricas e as não-lineares ajustadas para fração galho/casca, densidade básica da madeira e área foliar específica, não tiveram bons ajustes nas equações, pois houve variabilidade nos dados utilizados. Esse autor comenta também que apesar dos valores estimados serem diferentes dos valores observados, o desempenho do modelo, em termos de ajuste, superou outras parametrizações disponíveis na literatura. Sendo assim, os seus dados podem ser utilizados como fonte de estimativa para as variáveis estudadas, evidenciando o potencial do seu uso, com a ressalva da necessidade de estudos adicionais para melhor compreensão desta espécie para esta região.

Stape (2002), utilizando o 3-PG e um modelo de crescimento e produção (Sullivan e Clutter, 1972) de uso comum na área florestal, simulou o crescimento do eucalipto nas parcelas de controle em um experimento de fertilização realizado na Bahia, durante dois anos, de forte oscilação climática principalmente com relação à precipitação. Nesse trabalho, o autor concluiu que as estimativas de produtividade obtidas pelo modelo 3-PG para esses dois anos de crescimento, foram consistentemente melhores do que as obtidas pelo outro modelo idealizado por (Sullivan e Clutter, 1972), e apresentaram correlação estreita, estatisticamente significativa, com os dados observados nas medições de campo. Dessa forma, foi demonstrada a sensibilidade do modelo 3-PG a variações nos fatores ambientais determinantes da produtividade (radiação solar, temperatura, água e nutrientes).

Landsberg et al. (2003), ao avaliar a capacidade do modelo 3-PG de ajustar a uma ampla variação de dados de crescimento florestal, de plantios experimentais e comerciais, na África, Austrália e norte da Europa, concluíram que em todos os casos foi possível simular com boa acurácia os dados observados. Os resultados mostraram que o 3-PG é robusto e confiável e pode ser usado com confiança para prever o crescimento florestal em áreas ainda não exploradas comercialmente e para determinar a produtividade de sítios já plantados.

Para Almeida et al. (2004), o modelo 3-PG pode ser utilizado com bons resultados na pesquisa e como ferramenta analítica como parte de sistemas de manejo florestal. Segundo os autores, o modelo vem sendo utilizado com bons resultados, para prever o potencial produtivo em termos de volume de madeira, para florestas plantadas e em novas áreas ainda não exploradas com fins comerciais, por empresas florestais no Brasil e no mundo. O modelo tem possibilitado prever o impacto dos fatores ambientais determinantes da produtividade (radiação solar, temperatura, água e nutrientes) e das ações de manejo sobre o potencial produtivo da espécie florestal, e, conseqüentemente, sobre a sustentabilidade das florestas plantadas, permitindo a quantificação dos riscos associados à produção e aumentando assim a qualidade do processo de tomada de decisão.

Borges (2009) publicou resultados de um trabalho em que realizou a parametrização, calibração e validação do modelo 3-PG para plantios de eucalipto na região do cerrado de MG. O estudo revelou que o desempenho do modelo, foi satisfatório, ao simular o crescimento de florestas de eucalipto para os híbridos clonais de *E. grandis* x *E. urophylla*,

em uma região do cerrado. As estimativas obtidas pelo modelo geral desenvolvido para a região do cerrado também apresentaram correlação significativa, com os dados observados, tanto na etapa de calibração, quanto na de validação. Dessa forma, conclui-se que o modelo 3-PG ajustado para o Cerrado de Minas Gerais foi eficiente em simular o crescimento de florestas de eucalipto na região, sendo o desempenho do mesmo, superior ao de outras parametrizações do modelo disponíveis. Esses dados estimados foram o ponto de partida para a calibração tanto do modelo 3-PG quanto do modelo Biome-BGC no trabalho aqui apresentado.

Lange (2010) modelou as dinâmicas de carbono e produtividade na floresta no sudoeste da Noruega com o modelo Biome-BGC. Na calibração o autor utilizou estoques de biomassa no ecossistema e medições de índice de área foliar. O resultado da modelagem revelou que a PPL desenvolveu valores negativos para uma idade jovem (30 anos) e valores claramente positivos da PPL para uma idade média (60 anos) e novamente valores negativos para idades muito velhas e decadentes (120 anos).

Um estudo que ajuda a evidenciar os parâmetros com maior sensibilidade quando o modelo é executado foi o de Tatarinov e Cienciala (2006). O principal objetivo desse trabalho foi realizar uma análise de sensibilidade executado pelo modelo Biome-BGC. Especificamente foram analisados os efeitos locais como variáveis climáticas e do solo e parâmetros eco-fisiológicos. A análise revelou uma alta sensibilidade de todas as variáveis testadas para os parâmetros locais seguintes: precipitação total (mm), profundidade da zona de raízes, textura do solo, e parâmetros da relação carbono/nitrogênio.

Lamberty, Gower, Douglas e Thornton (2005), desenvolveram um modelo modificado do Biome-BGC que integrou tipos de vegetação múltiplos para modelar, avaliando o seu desempenho e limitações. Depois de comparados, os resultados modelados foram publicados a partir de uma floresta (*Picea mariana*) de 150 anos de idade, em Manitoba, Canadá. A nova versão do Bioma-BGC, se ajustou melhor simulando as mudanças na área foliar, a PPL e estoques de carbono, e deve ser útil para modelar a dinâmica de espécies e tipos de vegetação mista.

O estudo do modelo Biome-BGC é de caráter inédito aqui no Brasil. Ainda não foram obtidos dados a partir das simulações desse modelo.

3 DESCRIÇÃO DOS MODELOS

3.1 MODELO 3-PG

A proposta de utilização de 3-PG como uma ferramenta para a gestão florestal baseia-se na sua capacidade de atribuir valores para os parâmetros que caracterizam novas espécies (Sands, 2004). A proliferação de espécies às quais o 3-PG está sendo aplicado e o potencial de conclusões incorretas quando o modelo é utilizado como uma ferramenta de gestão provoca dúvidas sobre como o modelo será testado ou parametrizado. Essas dúvidas surgem, em parte, por causa de uma falta geral de dados adequados para testar ou parametrizar o modelo, especialmente com dados de biomassa acima e abaixo do solo, e em parte porque o teste de parametrização poderá não ser feito dentro de uma compreensão adequada do mesmo. Raros são os casos em que existem parâmetros que caracterizam rigorosamente uma determinada espécie. As principais espécies de eucaliptos plantadas atualmente no Brasil são: *E. grandis*, *E. camaldulensis*, *E. saligna* e *E. urophylla*. Foram desenvolvidos, também, cruzamentos entre as espécies, resultando em híbridos, como é o caso do *Eucalyptus urograndis* (*E grandis e E urophylla*). Em grande parte dos casos em que o modelo foi aplicado, os parâmetros são ajustados por um processo de tentativa e erro, por exemplo, para *eucalyptus globulus* por (Sands e Landsberg, 2002), se ajustam parâmetros para outras espécies de eucaliptos.

Como primeira regra geral, os parâmetros para novas espécies devem ser sempre atribuídos por medida direta e independente ou por analogia com outras espécies, como foi o caso da maior parte dos estudos (Battaglia et al., e Cabala, 2004). Na falta desses parâmetros, os seus valores podem ser ajustados para aperfeiçoar o ajuste das saídas selecionadas correspondentes aos valores observados.

Um protocolo sistemático para atribuição de parâmetros específicos de espécies pode ser facilitado através do uso de uma compreensão mais profunda do modelo 3-PG. O significado dos seus parâmetros e um entendimento sobre a sensibilidade das saídas do 3-PG com relação a esses parâmetros (Sands e Landsberg, 2002). Em particular, a compreensão é essencial para apoiar a utilização das ferramentas de software para estimativa dos parâmetros, otimizando o acesso de saída para os dados observados.

A complexidade dos modelos fisiológicos envolvidos, e do tratamento a eles dado, o número e o tipo de variáveis de entrada para operação desses modelos que é elevado, constitui às vezes um obstáculo na sua utilização prática. Nesse sentido, o surgimento do modelo 3-PG em essência, um modelo de eficiência de uso de radiação solar e de água, e de partição de carbono foi engenhoso. Esse modelo, desenvolvido para estimar a produtividade de povoamentos florestais homogêneos, se baseia em processos fisiológicos, utilizados em modelos de balanço de carbono, mas, incorpora, também, relacionamentos empíricos, obtidos a partir de medições experimentais, o que diminui o teor de variáveis de entrada, por simplificar o tratamento de processos fisiológicos complexos, facilitando a utilização do mesmo como uma ferramenta de manejo (LANDSBERG e WARING, 1997).

Além disso, o 3-PG requer poucas variáveis de inicialização para caracterizar a estação, e variáveis climáticas fáceis de serem obtidas. Prevê o desenvolvimento de um povoamento, o uso da água e a sua disponibilidade no solo ao longo do tempo. Como variáveis primárias de resposta obtiveram-se: a produtividade primária líquida (PPL), a alocação de carbono para folhas, tronco e raízes, número de árvores por hectare, a água disponível no solo e a transpiração com uma periodicidade mensal. Calcula também variáveis de interesse para a gestão florestal, tais como o índice de área foliar, a área basal, diâmetro quadrático médio, volume e o acréscimo médio anual.

Em termos de dados meteorológicos, o 3-PG necessita de valores médios mensais de radiação solar; temperatura do ar média mensal; déficit de saturação de pressão de vapor mensal, precipitação total mensal, e número de dias por mês com geada. O modelo pode ser executado com qualquer número de anos e devem ser utilizados dados climáticos da estação meteorológica mais próxima do povoamento em estudo, podendo, no entanto, recorrer-se às normas climatológicas da região. Do povoamento, necessita-se de valores iniciais de biomassa de folhas, tronco, galhos e raízes. Outros tipos de dados iniciais necessários são: a latitude; o índice de fertilidade; a textura do solo e o teor máximo de água que o solo pode conter. Alguns dos parâmetros são genéricos, isto é, são valores conhecidos da ecologia das espécies e relativamente constantes (p.e. resposta dos estômatos às alterações da pressão de vapor). Outros podem ser obtidos da literatura, ou através de valores observados nos dados disponíveis, como é o caso da densidade da madeira. No apêndice A é apresentada as variáveis de saída e de entrada necessárias para executar para o modelo 3-PG.

3.1.1 Modelo 3-PG utilidades e aplicações

Segundo Esprey et al. (2004), o modelo 3-PG é uma ferramenta importante para o manejador florestal. Tem uma estrutura simples e transparente, e é de fácil operação. Os dados de entrada são frequentemente disponíveis e seus parâmetros são facilmente determinados, o que realça a probabilidade dele ser utilizado no contexto do manejo florestal. Para os autores, o 3-PG foi explicitamente desenvolvido para reduzir as diferenças entre os modelos essencialmente empíricos e os modelos de balanço de carbono, baseados em processos.

O desempenho do modelo 3-PG em estimar a produtividade de florestas comerciais de eucaliptos ou pinus tem sido avaliado em diversos países: Austrália (Coops et al., 1998b; Tickle et al., 2001; Sands e Landsberg, 2002;), Nova Zelândia (Coops et al., 1998a, Whitehead et al., 2002), EUA (Coops et al., 2000; Coops e Waring, 2001), e África do Sul (Dye, 2001; Dye, et al., 2004). No Brasil, esse desempenho tem sido avaliado a partir de dados obtidos em plantios de empresas florestais situadas nos Estados da Bahia (Stape, 2002; Stape et al., 2004), Espírito Santo (Almeida et al., 2003; Almeida et al., 2004) e região Centro-Leste de Minas Gerais (Silva, 2006).

Os trabalhos realizados com este modelo no Brasil têm alcançado bons resultados, mas mostram a necessidade de parametrização e calibração do mesmo, por meio de ajustes dos valores dos parâmetros ou relacionamentos, para as condições específicas do sítio florestal trabalhado, para melhorar a acurácia das estimativas de produção. Silva (2006) utilizou diferentes parametrizações para o modelo 3-PG obtidas para a Austrália (Sands e Landsberg, 2002) e para o Brasil (Almeida et al., 2004; Stape et al., 2004; Silva, 2006). Ele comparou estimativas de produtividade obtidas pelo modelo, para um período de simulação de sete anos, com dados de produtividade de plantios florestais independentes. Menores diferenças entre o estimado e o observado (medições de campo), foram obtidas quando a utilização do modelo foi calibrado para as condições específicas da região trabalhada, o que realça a necessidade de calibração do modelo. Em continuidade, o modelo ajustado por Silva (2006) para a região centro-leste de Minas Gerais, foi utilizado para simular o crescimento das florestas de eucalipto em outras regiões de Minas Gerais.

3.1.2 Estrutura do Modelo 3-PG

Uma breve descrição dos principais componentes do modelo 3-PG é dada a seguir. É possível identificar quatro sub-modelos no 3-PG: a assimilação de carboidratos; a alocação de carbono para folhas, tronco e raízes; a evolução do número de árvores; o balanço de água no solo e a conversão da biomassa em variáveis de interesse para a gestão (Sands e Landsberg 2002).

3.1.2.1 A assimilação de carboidratos (PPL e PPB)

O cálculo da produtividade primária bruta (PPB - tonelada de madeira seca por hectare (t_{DM}/ha)) é feito a partir do valor de radiação fotossinteticamente ativa incidente (RFA ou ϕ_p (mol/m^2)) e da eficiência quântica do copado (α_c (mol/mol)). No modelo 3-PG, a RFA, incidente no dossel florestal é determinada considerando que cada 1 MJ de radiação solar (RS) é equivalente a 2,3 mols de RFA. Já a radiação fotossinteticamente ativa absorvida pelo dossel é determinada considerando o índice de área foliar (IAF) e a RFA, mediante a utilização da lei de Beer. A lei de Beer, que tem sido utilizada em vários modelos ecofisiológicos (Century, Cenw, Fullcam, G'day, Gendec, Grazplan, Linkages e Promod) desenvolvidos na Austrália (Wang, 2001), descreve simplificada o decréscimo exponencial da luz, ao percorrer verticalmente toda extensão da cobertura vegetal. Em uma cobertura foliar razoavelmente homogênea, a atenuação da radiação pode ser calculada por meio da equação de extinção de luz (lei de Lambert-Beer), modificada por Monsi e Saeki (1953) (LARCHER, 2004):

$$I_z = I_0 * e^{-k*IAF} \quad (3.1)$$

Onde:

I_z = intensidade da radiação a uma determinada altura dentro da cobertura vegetal;

I_0 = intensidade da radiação no topo da cobertura vegetal, representa a RFA;

k = coeficiente de extinção ou atenuação, representa o grau de diminuição da radiação no interior da cobertura vegetal, seja por absorção ou espalhamento;

IAF = soma total da superfície foliar, de cima para baixo, até a altura z , por unidade de área de solo (IAF acumulado).

Quantificada a radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RFAA) pelo dossel, o 3-PG estima a quantidade de carbono fixado por unidade de energia radiante absorvida

(fótons), que representa a eficiência quântica do dossel (α_c). O valor dessa eficiência de conversão é calculado a partir de um valor de eficiência quântica máxima do dossel (α_{cx}) e considera também, as limitações ambientais impostas pelo déficit de pressão de vapor (f_{DPV}), pela temperatura (f_T), pelas geadas (f_F), pela disponibilidade hídrica (f_A) e nutricional (f_N) e pela idade da população (f_I). Essas limitações ambientais são incorporadas ao 3-PG pela multiplicação de moduladores adimensionais (f_T , f_F , f_N , f_I , f_{DPV} e f_A), apropriadamente calculados, cujos valores variam de 0 (condições de alta limitação) a 1 (condições sem limitação).

$$\alpha_c = \alpha_{cx} * f_T * f_F * f_N * \Phi(f_{DPV}, f_A, f_I) \quad (3.2)$$

Os moduladores que tratam do balanço de água no solo (f_A), déficit de pressão de vapor (f_{DPV}) e idade da população (f_I) compõem o chamado modulador fisiológico (ϕ), definido como:

$$\phi = f_I * \min \{f_{DPV}, f_A\} \quad (3.3)$$

Na composição do modulador fisiológico (ϕ), os moduladores f_{DPV} e f_A não atuam de forma aditiva ou multiplicativa, e sim, considerando a limitação mais restritiva (modulador de menor valor), por exemplo, se a água no solo é mais limitante ao crescimento do que o DPV, então o modulador f_A atuará limitando o crescimento no período de estimativa considerado (Landsberg et al., 2001). Após a consideração de todas essas limitações impostas pelo ambiente, por meio dos moduladores, o 3-PG estima o relacionamento entre a produção primária bruta (PPB) e RFAA:

$$PPB = \alpha_c * RFAA \therefore PPB = \alpha_{cx} * f_T * f_F * f_N * \Phi(f_{DPV}, f_A, f_I) * RFAA \quad (3.4)$$

Na sequência, o modelo considera que, com relação à biomassa vegetal, em cada 1 g de matéria seca existem 0,5 g de carbono, dessa forma para cada 1 mol de carbono fixado são gerados 24 g de matéria seca vegetal, já que a massa molar do carbono é igual a 12 g. Assim, após apropriada aplicação dos fatores de conversão de unidades, a PPB é expressa em t/ha de matéria seca vegetal. A relação entre Produção Primária Líquida e Produção Primária Bruta equivale a um coeficiente de eficiência de uso do carbono (Gifford, 2001). Tem-se demonstrado que essa relação (PPL/PPB) varia pouco, e tem permanecido na faixa

compreendida entre $0,45 \pm 0,05$ para uma ampla variedade de florestas, incluindo angiospermas decíduas e coníferas não decíduas, jovens e adultas (Landsberg e Waring, 1997). Esta faixa de valores foi derivada dos trabalhos (Schulze et al., 1977; Benecke and Evans, 1987; Waring et al., 1995; Ryan et al., 1996a; Willian et al., 1997) citados por Landsberg e Waring (1997). Esse relacionamento adotado pelo modelo facilita os cálculos e elimina algumas das interferências referentes à necessidade de calcular às perdas de carbono por meio da respiração, cujas medições são difíceis de serem feitas. Cabe considerar, contudo, que não há disponibilidade na literatura de dados medidos para a referida variável (PPL/PPB), para florestas plantadas de eucalipto no Brasil. Para Landsberg e Waring (1997), o erro cometido ao adotar esse intervalo de valores para o relacionamento PPL/PPB é certamente menor do que o que resultaria do cálculo da respiração.

3.1.2.2 Alocação de Biomassa/Carbono

A alocação da PPL é realizada primeiramente para as raízes, e é determinada de acordo com as condições de crescimento do sítio, como expresso pela disponibilidade de água no solo, déficit de pressão de vapor e fertilidade do solo. Assim, no modelo, a fertilidade do solo, além de influenciar a eficiência quântica máxima do dossel, também influencia a alocação de carboidratos para o sistema radicular, por meio da variável “m”, que depende, linearmente, da taxa de Fertilidade do Solo (FR):

$$m = m_0 + (1 - m_0) * FR \quad (3.5)$$

Na equação acima, a variável “ m_0 ” corresponde ao valor de “m” em solos de baixa fertilidade (FR = 0), que neste caso seria igual a 0. O valor de FR varia de 0 (condição de alta limitação) a 1 (sem limitação) e é obtido empiricamente, baseando-se em características físicas e químicas do solo, e dados sobre crescimento florestal, além da própria experiência do manejador florestal. O valor de “m” é incluído na equação empírica que calcula a alocação de carboidratos para as raízes:

$$n_R = \frac{n_{Rx} * n_{Rn}}{n_{Rn} + (n_{Rx} - n_{Rn}) * m\phi} \quad (3.6)$$

Onde:

n_R = Coeficiente de alocação para raízes;

n_{Rx} = Valor máximo do coeficiente de alocação para raízes;

n_{Rn} = Valor mínimo do coeficiente de alocação para raízes

Φ = Modulador fisiológico

Quanto maior a limitação hídrica e, ou, nutricional representada por meio dos respectivos moduladores, maior será o coeficiente de alocação de carbono para as raízes (n_R), em acordo com princípios bem estabelecidos por Beets & Whitehead (1996) e Landsberg & Gower (1997) citados por Sands & Landsberg (2002).

Os coeficientes de alocação de carbono para folhas (n_F), e para material lenhoso, (tronco e galhos, doravante referido somente como tronco) (n_S) variam com as condições de crescimento do local, mas também dependem do crescimento da árvore média, de tal maneira que n_F declina e n_S aumenta com a idade das plantas. No 3-PG, a partição da biomassa da parte aérea está baseada em relacionamentos alométricos entre a biomassa de folhas e tronco e o diâmetro a 1,30 m de altura do solo (Diâmetro Altura do Peito (DAP)). Dessa forma, a razão de partição entre a biomassa de folha e tronco ($pFS = n_F/n_S$), é uma função alométrica do DAP.

$$pFS = a_p * dap^{n_p} \quad (3.7)$$

Com relação à equação de partição (equação 3.7) os parâmetros a_p e n_p são obtidos com base nas equações 3.8 e 3.9 abaixo.

$$n_p = \frac{\ln(pFS_{20}/pFS_2)}{\ln(20/2)} \quad (3.8)$$

$$a_p = \frac{pFS_2}{2^{n_p}} \quad (3.9)$$

Onde:

pFS_2 e pFS_{20} : Correspondem ao valor de biomassa entre folhas e tronco para os diâmetros 2 e 20 cm respectivamente.

Na sequência, depois de calculado o valor de partição da biomassa entre folhas e tronco (pFS) para um diâmetro qualquer e também calculado o valor do coeficiente de alocação de carbono para raiz (n_R) calcula-se o coeficiente de alocação de carbono para tronco (n_S) com base na equação 3.10, onde:

$$n_S = \frac{(1 - n_R)}{(1 + pFS)} \quad (3.10)$$

O valor do coeficiente de alocação de biomassa para as folhas (n_F) é obtido indiretamente, subtraindo o valor dos coeficientes de alocação de biomassa para raiz e tronco.

$$n_F = 1 - n_R - n_S \quad (3.11)$$

A partir dessas informações, o modelo estima, em intervalos mensais ou anuais, a biomassa de tronco, folhas e raízes (t/ha), o diâmetro do tronco (cm), a área basal (m²/ha), o volume de lenha (m³/ha), o incremento da lenha médio anual (m³/ha/ano), o IAF (m²/m²), o balanço de água no solo (mm), a queda de “serapilheira” (t/ha) e a ciclagem radicular (t/ha).

3.1.2.3 Evolução do Número de Árvores

As alterações no número de árvores do povoamento no tempo são calculadas utilizando um sub-modelo derivado da lei dos 3/2 e taxas de crescimento de troncos. Recorre à equação que determina a alocação do carbono para as folhas e tronco e as restrições aos padrões de crescimento. Um limite superior (W_{Sx} (kg_{DM}/árvore)) da biomassa de troncos (W_S) é calculado para um determinado valor de densidade do povoamento (N). A lei do auto-desbaste é parametrizada por uma estimativa de W_{Sx} para árvore média em povoamentos em auto-desbaste. Se, num dado momento, a biomassa do tronco da árvore média é maior que W_{Sx} , a população é reduzida até um número consistente com W_{Sx} . Uma vez que a mortalidade altera tanto o número de árvores como a biomassa, pode ser necessário recorrer a uma aplicação iterativa da lei do auto-desbaste para assegurar que a lei é cumprida para o novo estado. Quando há remoção de árvores, assume-se que cada tronco retirado tem aproximadamente 20% da biomassa do tronco médio e que não ocorre

perda de folhas. Isto simula o fato de que as árvores que morrem, são normalmente as mais fracas, menores, e com muito poucas folhas (Sands e Landsberg, 2002).

3.1.2.4 Balanço de Água no Solo

O 3-PG inclui um modelo simples de balanço de água no solo, que trabalha com um ciclo mensal. À precipitação mensal (mais irrigação) contrapõem a evapotranspiração, que é calculada através da equação de Penman-Monteith (Landsberg e Gower, 1997). A interceptação pela copa é uma percentagem fixa da precipitação, podendo também, a partir de determinado valor, ser função do índice de área foliar. A água do solo em excesso é perdida como escoamento superficial. Assume-se que o déficit de pressão de vapor (f_{VPD}), a água disponível no solo (f_{SW}) e a idade do povoamento (f_{AGE}) afetam a condutância dos estomas. A condutância da copa (g_C (m/s)) é determinada a partir de uma condutância dos estomas potencial que é ajustada pelo modificador da idade (f_{age}) e pelo menor dos modificadores ambientais f_{SW} e f_{VPD} , e aumenta com o aumento do IAF até ao máximo da condutância da copa (g_{Cx} (m/s)).

Na Figura 3.1, mostra-se o conceito geral do modelo 3-PG com os seus cinco submodelos simples: a produção de biomassa, a alocação de biomassa entre as folhas, as raízes e o tronco a mortalidade de tronco, o balanço hídrico do solo e a conversão de biomassa de tronco em variáveis de interesse para gestores florestais.

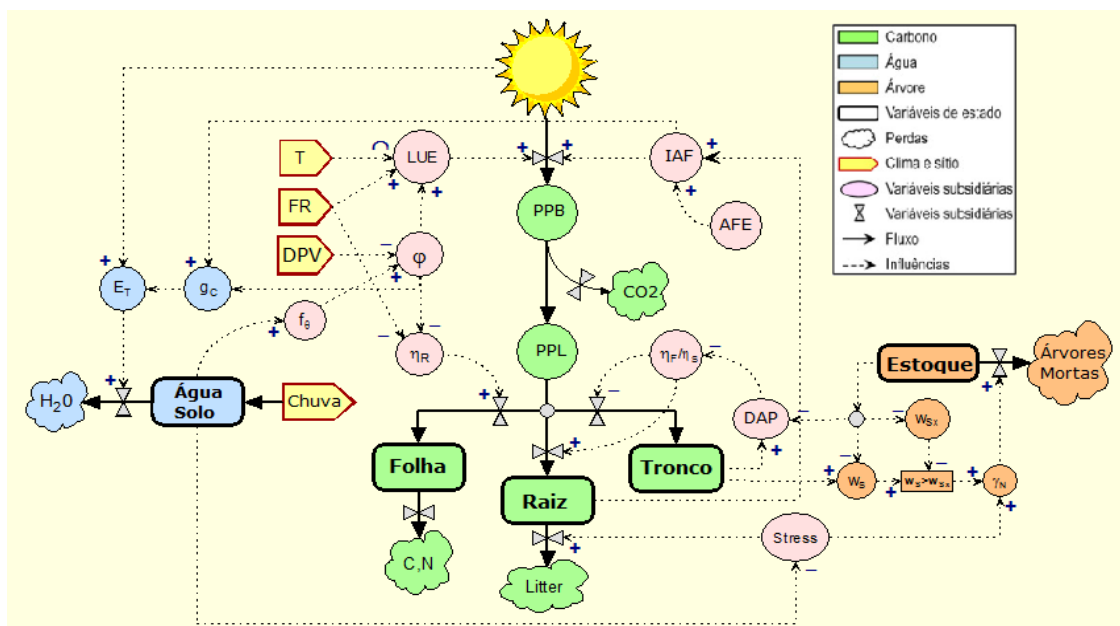


Figura 3.1. Estrutura básica de 3-PG e as influências causais de suas variáveis e processos.

Modificado: Sands (2004)

3.2 MODELO BIOME-BGC

Biome-BGC é um modelo mecanístico que é utilizado para estimar o estado e os fluxos de carbono (CO_2), nitrogênio (N), e água (H_2O) entre biosfera-atmosfera de um ecossistema. O modelo Biome-BGC é usado ativamente em instituições do mundo todo e seu mais recente lançamento é a versão 4.2. Os três principais ciclos biogeoquímicos representados no Biome-BGC são os do carbono, do nitrogênio, e da água. Em conjunto com esses ciclos, os processos físicos do modelo são: a radiação e a disposição da água. O modelo divide a entrada de radiação e precipitação da água e trata as partes em excesso como saídas do modelo. Os processos primários fisiológicos modelados por Biome-BGC são a fotossíntese, a evapotranspiração, a respiração (autotrófica e heterotrófica), a decomposição, a alocação final fotossintética e a mortalidade. Para modelar esses processos, Biome-BGC modela primeiro a fenologia dos sistemas com base na fisiologia da vegetação e nos dados meteorológicos de entrada.

No modelo Biome-BGC a maioria das atividades do ecossistema simulado, ocorre em uma etapa de tempo diário, conduzida por valores diários de temperaturas mínimas e máximas, chuva (precipitação), radiação solar e a umidade do ar. Exemplos destes processos são o equilíbrio da água no solo, fotossíntese, alocação, produção de serapilheira e dinâmica de carbono e nitrogênio no solo (THORNTON, 2010).

3.2.1 O Modelo Biome-BGC utilidades e aplicações

Como um modelo mecanístico, Biome-BGC incorpora a biogeoquímica na modelagem dos processos. No entanto, estes mecanismos são limitados no Biome-BGC a ecossistemas homogêneos ou heterogêneos como pouca dinâmica de variação no ecossistema. Além disso, a abstração “sem-árvores” e “sem-densidade”, que faz o modelo, não permite saber sobre processos concorrenciais na árvore, ou seja, altura da árvore, a densidade da madeira, entre outros, ao contrário do modelo 3-PG, que faz a estimativa mesmo que por uma modelagem mais empírica destes processos. Apesar disso, Biome-BGC tem sido aplicado em muitos sistemas para ajudar a entender o desenvolvimento do crescimento e mortalidade das florestas, já que é um modelo mais fundamental que o 3-PG nos seus processos ecofisiológicos. O modelo 3-PG é mais prático e fácil de modelar com variáveis de entrada relativamente simples de estimar, embora para seu uso comercial

necessita ser parametrizado e validado, sendo indispensáveis as medições em campo para ser validado. Biome-BGC, pelo contrário, com variáveis de entrada mais complicadas de estimar, tem uma análise matemática estruturada para cada processo modelado, o que fornece complicações no seu uso, embora não necessariamente deve ser validado para obter estimativas de variáveis de saída relativamente aceitáveis na modelagem do Biome-BGC. Portanto, um uso sinérgico dos dois modelos fornecerão melhor caracterização da PPL neste estudo (THORNTON, 2010).

Devido ao uso do processo *SpinUp* (execução no modelo para estimar o estado de equilíbrio do ecossistema) do Biome-BGC, o modelo pode ser utilizado para estimar idade de crescimento final (estado de equilíbrio) do ecossistema. O uso do modelo neste estudo não será como processo *SpinUp*, já que que será executado para uma plantação em crescimento e não tentando estimar o estado de equilíbrio da plantação. Com parâmetros realistas de mortalidade por causa de fogo, Biome-BGC pode ajudar a compreender as ações do estado de equilíbrio e também fluxos de sistemas que sofrem perturbações periódicas. Devido a este aspecto Biome-BGC é utilizado nos estudos de variações nos níveis de CO₂ na atmosfera e mudanças no clima. O modelo pode ser usado para prever os estados e os fluxos do ecossistema obtidos por essas variações climáticas (Vetter, Churkina et al. 2008).

Dois fatores que limitam o uso do modelo Biome-BGC são a sua abordagem espacial e sua parametrização. Embora o Biome-BGC tem sido utilizado para executar em espaços de tempo diário, é importante compreender que esse espaço de tempo não pode ser mudado a meses ou anos. Isto não impede que o Biome-BGC avalie parâmetros espaciais em bases mensais ou anuais, mas, limita alguns resultados obtidos a partir dessas execuções do modelo. Em segundo lugar, mesmo que o modelo esteja bem parametrizado e represente com precisão diversos tipos de biomas no mundo, a quantidade de detalhes fisiológicos necessários para inicializar o modelo adequadamente, pode torná-lo de difícil aplicação em alguns casos.

Outra possível aplicação do modelo Biome-BGC é fornecer informações biogeoquímicas para administradores florestais, que muitas vezes tem informações sobre estimativas de estoques florestais comerciais, como o diâmetro ou densidade das árvores ao longo do tempo, mas raramente têm informações sobre a química das folhas ou assimilação de frações de alocação de carbono e nitrogênio. Houve várias tentativas em

grande escala para fornecer fontes de parametrização do Biome-BGC, no entanto, em alguns casos, esses documentos ainda não fornecem informações suficientes para proceder de forma adequada no uso do modelo (WHITE, THORNTON et al 2000; PIETSCH, HASENAUER et al 2005).

Por último, como em qualquer representação de um sistema natural complexo, a lógica interna do Biome-BGC pode ou não ser apropriada para representar um sistema dado. Em alguns casos, isso significa que alguns sistemas requerem variantes específicas do modelo (por exemplo, abordar a captação de água estomática em árvores *Redwood* (da família da sequoia)). Em outros casos, a lógica do modelo não pode ser uma representação correta de como os sistemas realmente funcionam, por exemplo, (Wang et al., 2009) descobriram que o Biome-BGC pode não ter uma boa aproximação estimando a respiração do crescimento da floresta e o modelo deve ser modificado para resolver esse problema.

Apesar dessas dificuldades, o modelo Biome-BGC ainda é atualmente, a melhor alternativa de MBPs por incorporar os mecanismos relevantes à produtividade.

3.2.2 Estrutura do Modelo Biome-BGC

Como se vê na Figura 3.2, uma execução do modelo, exige certo conjunto de entrada de dados. Biome-BGC requer dados meteorológicos (*MET*), dados do sítio (*INI*), e dados ecofisiológicos (*EPC*), que são dados de cada local específico. O *apêndice B* detalha as entradas necessárias para cada uma dessas categorias. Cada vez que o modelo Biome-BGC é executado, produz um conjunto de dados para o usuário analisar. O *apêndice C*, lista as variáveis de saída que os usuários podem solicitar. Essas variáveis incluem todos os fluxos de carbono, nitrogênio e água, como também estoques e variáveis de resumo de cada uma delas. (por exemplo, PPL) em escalas de tempo diária, mensal ou anual. Como foi mencionado anteriormente para este estudo o modelo não foi executado usando *Spin-up*, já que se pretende estimar a PPL em uma plantação em crescimento e não em estado estacionário.

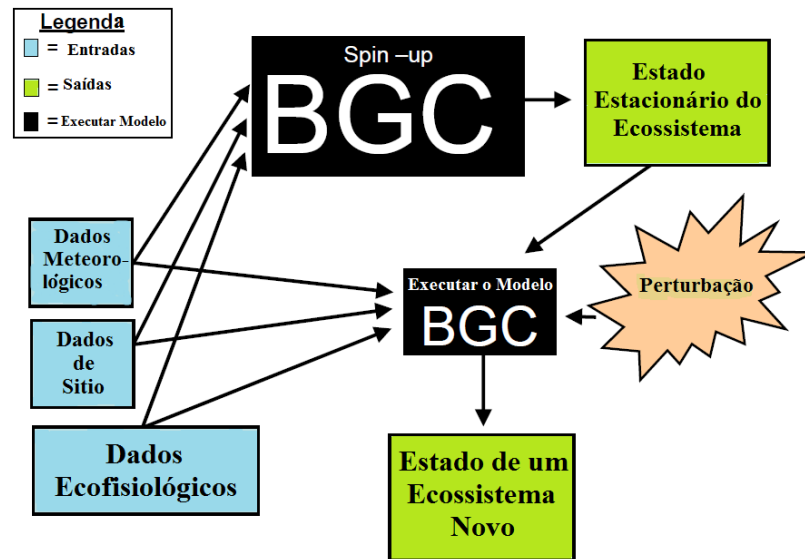


Figura 3.2. Diagrama conceitual que mostra a estrutura geral do modelo Biome-BGC, modificado de Thornton 1998.

O Biome-BGC é um modelo dimensional, isto significa que representa um ponto no espaço, com todos os fluxos e estoques dimensionados por metro quadrado (Thornton, 1998). Partindo dessa perspectiva espacial do Biome-BGC, é útil pensar o modelo como uma estimativa dos processos e fluxos no sítio e que tem sido medido por unidade de área. Essa descrição é uma estrutura apropriada de como o Biome-BGC não tenta representar árvores individuais ou mesmo espécies individuais, mas sim a dinâmica em um ponto de um tipo de vegetação funcional (TVF). Como exemplo pode-se citar, a floresta que perde a totalidade das folhas ao menos uma vez por ano, ou floresta decídua; ou floresta com fotossínteses tipo C3, entre outras (Waring e Running 2007).

Para modelar o processo da fotossíntese, o Biome-BGC transforma o carbono da folha em uma área foliar equivalente, baseado em parâmetros da área foliar específica (AFE) definida pelo usuário. AFE expressa a razão entre área foliar e massa seca da folha. É considerado um importante fator do ponto de vista fisiológico por descrever a alocação da biomassa da folha por unidade de área. AFE é uma medida da geometria da folha e as unidades são área por unidade de massa (ou seja, m^2/kgC). O modelo Biome-BGC trabalha partições de carbono na folha e área foliar equivalente, separadas entre área foliar iluminada e sombreada, ver Figura 3.3. Todo o processo de fotossínteses, respiração e transpiração, são concretizadas tanto pela parte iluminada quanto pela parte sombreada. Esse modelo de dupla folha é mais preciso do que um modelo simples de “folha grande”, e não perde muita precisão, quando é comparado aos mais complicados modelos de

múltiplas camadas (De Pury e Farquhar, 1997). Essa aproximação da modelagem da dinâmica do dossel também é capaz de capturar algumas das variabilidades conhecidas de AFE através da copa da vegetação (Koch, Sillett et al., 2004; Thornton e Zimmermann, 2007). Por exemplo, tem-se observado que as folhas expostas completamente ao sol, têm, geralmente menor AFE do que as folhas expostas na sombra da mesma árvore. Outra abstração feita na implementação do Biome-BGC é a resolução temporal escolhida. O Biome-BGC usa tanto o período de tempo diário como o anual. A maioria dos processos são aplicados em passos de tempo diários, com algumas variáveis ocorrendo anualmente (Thornton, Law et al., 2002). Apesar dessa escala de tempo do modelo, muitos dos processos reais que ocorrem no interior das plantas, ajustam-se rapidamente às alterações do meio ambiente que ocorrem em uma escala sub-diária (Lambers, Chapin et al., 2008). No entanto, boas aproximações nas medições nessa escala de tempo são muito mais difíceis de obter, e em muitos casos, não estão disponíveis. Portanto, usando um passo de tempo diário, apesar de não ser a verdadeira dinâmica do ecossistema (por exemplo, sombreamento por nuvens, refegas de vento, etc), é um modelo amplamente utilizável.

Duas aproximações do Biome-BGC ainda merecem destaque: O crescimento prognóstico da vegetação e um esquema para evitar que o modelo desenvolva déficit de carbono e nitrogênio. Na primeira, o modelo restringe o início da fase de crescimento e da senescência (para os sistemas de folha senil) e a partir de uma temperatura crítica mínima do solo (White, Thornton et al. 1997). Para a segunda aproximação, Biome-BGC aloca o carbono assimilado recentemente, primeiro a um reservatório de carbono, que pode ser utilizado ao longo de um período de crescimento, quando as condições do crescimento tornam-se estressantes. (THORNTON e ROSENBLOOM, 2005).

3.2.2.1 Processos Físicos do Modelo Biome-BGC

Os processos físicos do modelo Biome-BGC são a radiação e a precipitação, que são explicados a seguir:

Uma vez que a fenologia do modelo é definida, o primeiro passo é saber a disposição da radiação solar recebida pelo dossel. Isso é feito para cada dia que o modelo é executado. Uma estimativa da radiação solar é uma das entradas necessárias diárias nos dados meteorológicos (ver *apêndice B*). A Figura 3.3 mostra um diagrama conceitual, onde se descreve a radiação que é dividida pelo modelo Biome-BGC.

Como mostra a Figura 3.3, a porcentagem de radiação absorvida pelo dossel depende da proporção de folhas iluminadas e sombreadas. Por conseguinte, antes da atenuação da radiação solar, a reserva de carbono na folha ligada com a AFE de folhas iluminadas e sombreadas é usada para determinar a área total da folha e as proporções das folhas iluminadas e sombreadas da vegetação em análise. A radiação solar recebida, convertida primeiro em RFA (400 a 700 nm), é então absorvida pela Lei de Beer (mesma lei utilizada no modelo 3-PG) através do índice de atenuação de radiação no dossel (Nobel, 1991; Jones, 1992). A radiação dividida é uma das entradas usadas para ativar a evapotranspiração no dossel, a fotossíntese, e evaporação no solo.

- Radiação:

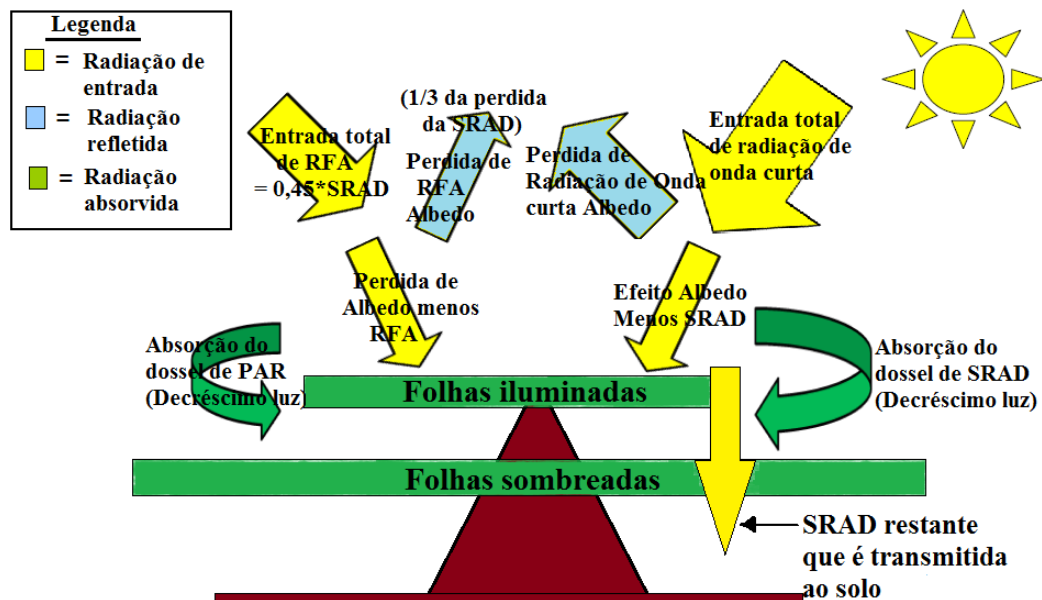


Figura 3.3. Atenuação da radiação no Biome-BGC, modificado de Thornton 1998.

- Precipitação e Ciclo da Água:

Uma vez estimada a radiação diária, as variáveis do estado da água podem ser abordadas. A única entrada de água dentro do sistema ocorre através da precipitação, que cai na forma de chuva ou neve. A precipitação diária é também uma das variáveis meteorológicas de entrada, necessárias para executar o modelo (ver *Apêndice B*). Essa precipitação é então encaminhada para vários tipos de reservas, e descreve os reservatórios e os fluxos de água dentro do ecossistema, como é mostrado na Figura 3.4.

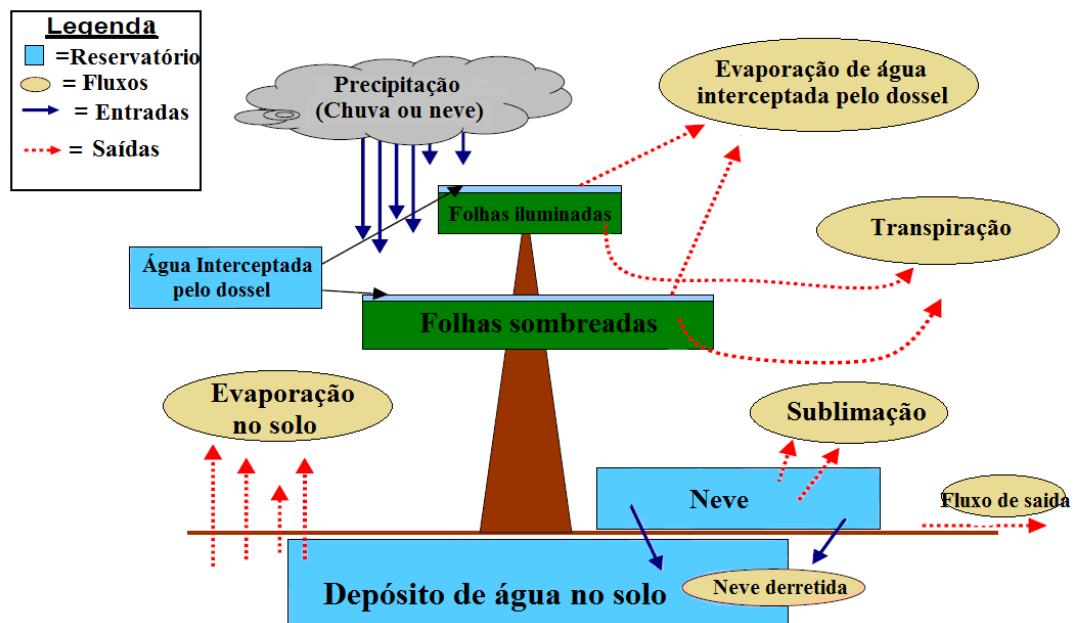


Figura 3.4. Fluxos e reservas de água no Biome-BGC, modificado de Thornton 1998.

A precipitação é alocada primeiramente no reservatório que representa a copa do dossel, que intercepta e forma uma reserva de água pluvial. A quantidade da água de chuva que é interceptada é uma função do coeficiente de interceptação do dossel definido pelo usuário e do IAF. Se houver mais água do que o suficiente para encher a reserva no corpo do dossel, o excedente de água entra na reserva de água no solo. O atual potencial métrico de água no solo (MPa) é uma função da água no solo, em relação à capacidade de retenção de água no solo saturado. Água no solo saturado e a capacidade de campo de retenção de água no solo são definidas, com base na textura do solo e a profundidade das raízes da vegetação (ver Apêndice A – porcentagem de areia, silte, argila, e profundidade das raízes) (Cosby, Hornberger et al., 1984; Saxton, Rawls et al., 1986). O potencial hídrico no solo (Ψ_{solo}) é determinado através do balanço entre a evaporação e a adição de água na reserva do solo a partir da precipitação. Todos os processos de evaporação (evaporação da água interceptada no dossel, transpiração durante a fotossíntese, e evaporação no solo) são calculados utilizando uma equação modificada de Penman-Monteith - PME (Waring e Running, 2007). Esta equação calcula uma taxa de evaporação, que é uma função da RFA, DPV, e as condutâncias associadas com a superfície de evaporação.

3.2.2.2 Processos Fisiológicos do Modelo Biome-BGC: Ciclos, Reservas e Fluxos de Carbono e Nitrogênio.

A discussão geral dos ciclos, reservas e fluxos de carbono e nitrogênio, são apresentadas nas Figura 3.5 e Figura 3.6, como uma representação esquemática das reservas e fluxos no ecossistema. Mais amplamente, o ciclo de carbono consiste em todos os reservatórios que aparecem na Figura 3.5, e a única forma de receber o carbono no ecossistema é através do processo da fotossíntese. O carbono é removido do sistema durante o processo da respiração, autotrófico (manutenção e crescimento) e heterotrófico (decomposição). O carbono também é perdido a partir da vegetação ou ecossistema durante um incêndio ou evento de perturbação na colheita. No caso de incêndio, reservas de carbono são movidos à atmosfera e não são controladas pelo modelo.

Em geral, e como se vê na Figura 3.6, o ciclo de nitrogênio no Biome-BGC consiste em todos os reservatórios vegetativos, como também no reservatório de nitrogênio mineralizado no solo, e o reservatório de nitrogênio retranslocado na árvore. A retranslocação de nitrogênio ocorre baseado na fenologia do sistema no volume dos tecidos durante a estação de crescimento. Quando as árvores perdem suas folhas, uma parte do nitrogênio na folha é reabsorvida para uso futuro da árvore. Isto depende da porcentagem de lignina, celulose e lábil presente na folha. As porcentagens são valores definidos pelo usuário.

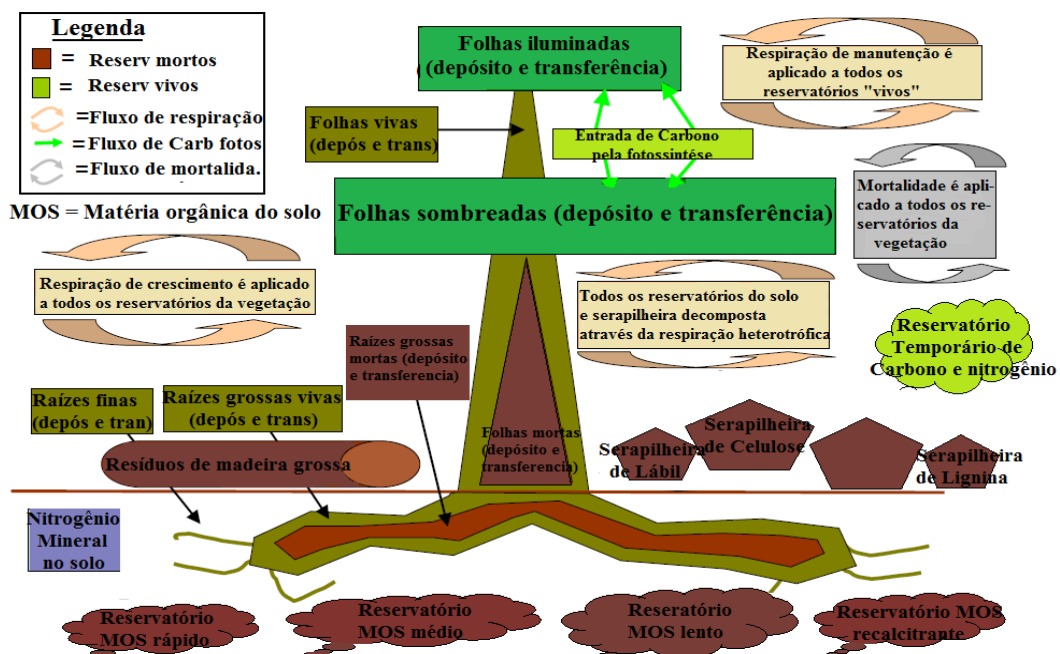


Figura 3.5. Reservatórios de carbono e nitrogênio no modelo Biome-BGC, modificado de Thornton 1998.

O nitrogênio no solo é adicionado à vegetação de três formas: pela mineralização, a mais lenta a partir da matéria orgânica no solo (MOS); pela deposição úmida e seca de nitrogênio a partir da atmosfera, e pela fixação de nitrogênio. As taxas são definidas pelo

usuário (ver *Apêndice B*). A mineralização de nitrogênio é perdida no sistema, através da lixiviação, quando há escoamento ou por meio da desnitrificação da água (volatilização de nitrogênio). Lixiviação e volatilização são assumidas para ocorrer com taxas constantes.

- Respiração de Manutenção das Árvores:

Uma vez que o estado da água e as partições da radiação são conhecidas, o Biome-BGC entra no cálculo dos ciclos de carbono e nitrogênio. O primeiro passo desse processo consiste em calcular a respiração da manutenção (RM) de todos os tecidos vivos, isto é feito antes da fotossíntese. Como a RM das folhas é necessária para o cálculo da assimilação de carbono, o modelo Biome-BGC estima a RM em função da temperatura e o teor de nitrogênio, o modelo prevê um aumento exponencial de RM com a temperatura e linear com o teor de nitrogênio.

- Fotossíntese:

Como já mencionado, o modelo de fotossíntese Biome-BGC utiliza uma representação de “duas folhas” para modelar toda a fotossíntese do dossel. Todos os cálculos da fotossíntese são realizados separadamente para folhas iluminadas e sombreadas. Os detalhes da implementação do modelo da fotossíntese são baseados em (Farquhar et al. 1980) e serão melhor explicados na seção das equações que representam o modelo da fotossíntese para absorção de carbono da vegetação, seção (3.2.3). O modelo baseia-se na fotossíntese cinética da enzima de *Rubisco* em relação à temperatura, a disponibilidade de CO₂ e a taxa de regeneração de *Rubisco*. A fotossíntese é o único processo do modelo Biome-BGC que proporciona uma entrada de carbono para qualquer reservatório. Todo o carbono é assimilado durante esse processo. Inicialmente, esta assimilação é colocada em um conjunto de reservatórios temporários, onde é dividido em duas partes: crescimento futuro e crescimento atual. Antes que o carbono assimilado possa ser alocado, no entanto, a demanda por nitrogênio microbiano da decomposição deve ser calculada para determinar se o nitrogênio vai limitar a alocação desse carbono.

- Decomposição:

Como é mostrado na Figura 3.5, Biome-BGC tem vários reservatórios que estocam carbono e nitrogênio da madeira morta e as folhas em decomposição. Os resíduos de

madeira grossa (RMG) é o primeiro reservatório de carbono que se forma, devido às raízes grossas mortas e a madeira do tronco quando morre. Essa reserva de carbono se fragmenta em lixo de carbono o tempo todo. A taxa de fragmentação depende da umidade e da temperatura do local, ao contrário de materiais lenhosos finos, como raízes finas, e folhas que entram diretamente nas reservas de lixo quando morrem. A desfragmentação da RMG, e as folhas e raízes finas são divididas em reservatórios específicos de lixo de carbono, dependendo do teor de carbono encontrado em relação ao lábil, celulose, ou formas de lignina (que são definidas pelo usuário ver *Apêndice B*). Essas reservas de lixo de carbono se decompõem e entram como matéria orgânica no solo (MOS).

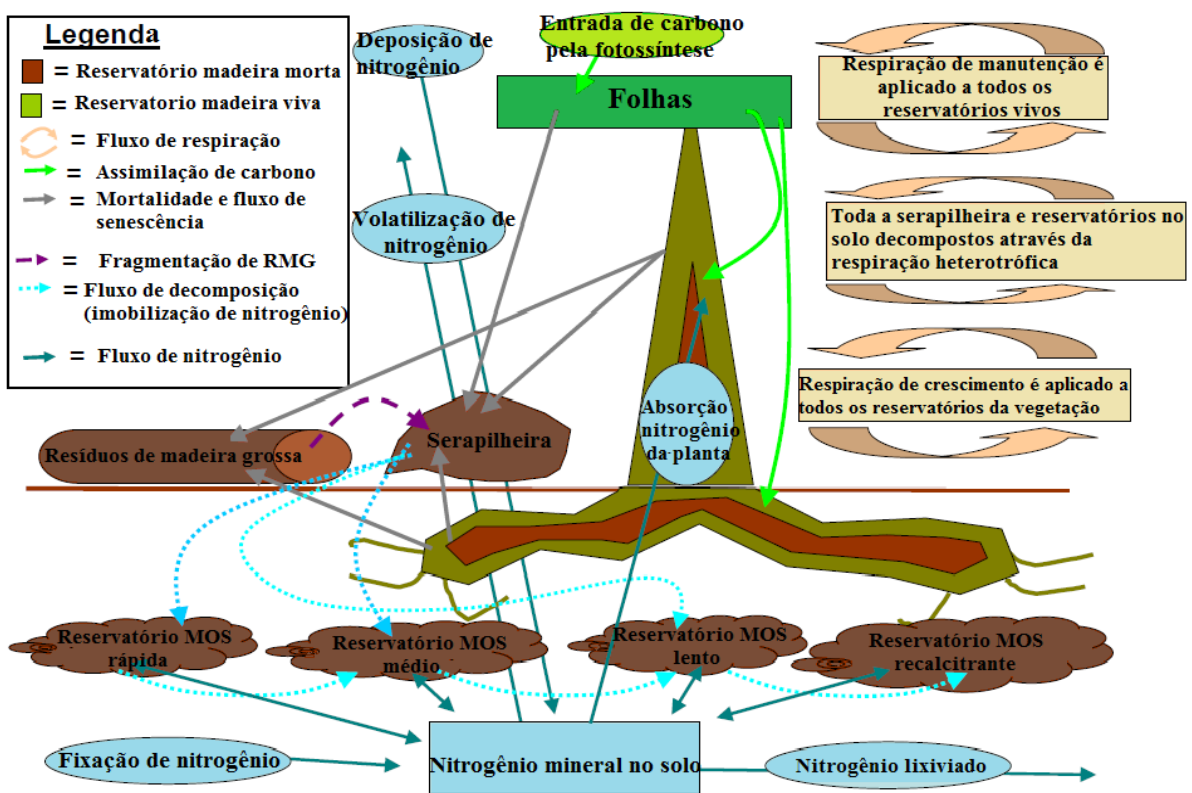


Figura 3.6. Fluxos de carbono e nitrogênio no modelo Biome-BGC modificado de Thornton 1998

Os reservatórios de MOS também sofrem decomposição limitada pela água, pelo solo e pela temperatura. Como o MOS decompõe, e nitrogênio é imobilizado pelos micróbios, o MOS é transferido sucessivamente em uma decomposição mais lenta. O modelo Biome-BGC considera que os micro-organismos e as plantas compitem com igual peso pelo nitrogênio presente no solo. A Figura 3.6 mostra os fluxos de RMG e lixo de carbono entre os reservatórios de MOS. O Biome-BGC calcula as taxas limitadas pelo nitrogênio, esse nitrogênio em decadência armazena essas taxas até que a demanda de nitrogênio da árvore

é calculado. O potencial da árvore para alocar carbono e o potencial da decomposição é função do teor de nitrogênio no sistema. A estrutura desse modelo faz várias suposições chave, Biome-BGC assume que a quantidade de nitrogênio demandado pela floresta, compete com o nitrogênio que demanda os micróbios em períodos de tempo diários e podem ser apropriadamente representados por esses períodos de tempo. Segundo, Biome-BGC assume que os micróbios e a vegetação têm peso igual ao competir pelo nitrogênio no solo. O Biome-BGC também assume frações constantes de carbono/nitrogênio de reservas no solo, independentemente do tipo de vegetação, como também supõem taxas de decomposição constantes do lixo de carbono nos reservatórios no solo, independentemente do tipo de vegetação.

- Alocação:

A quantidade de carbono estocado pela vegetação e a decomposição real que ocorre, são estimadas após o cálculo do potencial de assimilação de carbono por fotossíntese, e o cálculo da taxa de decadência da vegetação. O Biome-BGC atribui a alocação e a decomposição real de carbono, baseado na disponibilidade de nitrogênio, tanto como mineral no solo, como de nitrogênio retranslocado que a vegetação estocou. O esquema central do modelo Biome-BGC na alocação do carbono usa várias frações fixas para todas as estruturas de vegetação (definido pelo usuário *ver Apêndice B*) para repartir carbono uma vez que os limites de nitrogênio foram considerados. Biome-BGC também reserva uma porcentagem fixa (mais uma vez definido pelo usuário) do carbono, assimilado como estoque para o crescimento do ano seguinte e um percentual fixo que é equivalente aos 30% da respiração do crescimento da árvore. Para a alocação de carbono em diferentes tecidos (raízes, folhas e tronco), Biome-BGC escala toda a alocação em relação ao teor de carbono na folha, enquanto o usuário define a relação de alocação para as raízes, e tronco (Waring e Pitman, 1985; Waring e Running, 2007; Wang, Ichii et al., 2009). Todas as proporções de alocação do carbono são assumidas constantes ao longo da vida do ecossistema. Embora não tenha limitação de nitrogênio no processo calculado da fotossíntese, existe um limite na assimilação de nitrogênio durante a alocação. O Biome-BGC reduz o carbono assimilado nas folhas de sombra e luz proporcionalmente a essa limitação.

- Respiração de Crescimento:

Respiração de crescimento é assumida como uma proporção constante de todo o crescimento de novas raízes, tronco e folhas (30% do novo tecido é respirado - (Larcher, 2003)). Respiração de crescimento é contabilizada durante a alocação para assimilar novas folhas, raízes e troncos.

- Mortalidade:

O Biome-BGC usa um parâmetro definido pelo usuário (*ver Apêndice A*) para fixar a fração de mortalidade que é aplicada a cada dia na vegetação. O Biome-BGC também tem uma fração fixa de mortalidade por fogo que é definida pelo usuário, já que emite, nesta circunstância, maior quantidade de carbono e nitrogênio na atmosfera, que uma reserva de carbono ou floresta em decomposição natural.

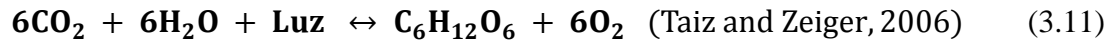
3.2.2.3 Princípio da Conservação da Energia e Massa:

O princípio fundamental do modelo Biome-BGC é a entrada de energia de radiação, carbono, nitrogênio, e água. Todos devem estar em equilíbrio em qualquer momento de tempo (Thornton, 1998). Na prática, isso significa que, no final de cada dia, as atualizações do Biome-BGC de cada variável de estado são testadas para manter esse equilíbrio. Para que os quatro elementos se mantenham em equilíbrio, as quantidades de entrada menos as quantidades de saída devem ser iguais às variações de estoque no modelo. Depois de que todos os processos acima descritos são modelados, o Biome-BGC verifica esta condição.

3.2.3 Equações para estimar a PPL no Biome-BGC (Fotossíntese).

A função da fotossíntese (equação 3.11) no Biome-BGC é a parte mais importante do modelo, já que representa de forma mecânica a adição de carbono no ecossistema. A base desse código é o modelo de fotossíntese de duas-folhas de DePury e Farquhar (Farquhar, Caemmerer et al., 1980; DePury e Farquhar, 1997). Além disso, a cinética da enzima, construída para esse modelo é baseada em Woodrow e Berry (1988). A taxa da fotossíntese é sensível ao teor de nitrogênio das folhas, ao nitrogênio em *Rubisco* e à forma em que a temperatura como esta controla a cinética da enzima. A fotossíntese também depende de RFAA, a respiração de manutenção da floresta e a diferença entre a pressão parcial interna e externa de CO₂. Como sempre, todas as etapas são feitas separadamente para folhas iluminadas e sombreadas.

A fotossíntese é o processo onde moléculas de CO₂ e H₂O são combinadas usando energia do sol para gerar açúcares simples, a reação geral é:



O Biome-BGC representa essa reação usando três equações separadas para representar três controles diferentes na taxa da fotossíntese. A primeira equação (equação (3.13)), representa as limitações da difusão de CO₂ na taxa fotossintética, essa é a taxa que o CO₂ pode ser introduzido na folha, e é função da abertura estomática da folha e a diferença entre a pressão parcial atmosférica de CO₂ e a pressão parcial de CO₂ interna na folha. Conforme descrito acima, a abertura estomática é uma função de vários fatores de escala definidos pelo usuário neste modelo.

A segunda equação usada é para restringir a taxa da fotossíntese devido ao controle da taxa de carboxilação da reação da fotossíntese (equação (3.14)). A carboxilação é o processo onde três moléculas de CO₂ são fixadas para um esqueleto de carbono pela enzima Rubisco (Taiz e Zeiger, 2006). A taxa em que isto ocorre depende da cinética enzimática que determina quão rápido o CO₂ pode ser vinculado a *RuBP* (o substrato da carboxilação) pela enzima Rubisco. Quando a taxa de fotossíntese é limitada pela carboxilação, significa que a disponibilidade do substrato *RuBP* não é o limitante, e sim, que a fotossíntese é limitada pela concentração de CO₂ (Lambers, Chapin et al., 2008). Isso também depende da pressão parcial interna de CO₂ na folha, e dessa forma está relacionada com a equação (3.13). A enzima Rubisco também é sensível ao teor de O₂ na célula. A taxa de carboxilação também depende da temperatura como a atividade de qualquer enzima. Por último, a assimilação de carbono é regulada pelo teor de nitrogênio na folha, o que, na enzima Rubisco, determina a quantidade de Rubisco disponível para catalisar a reação de carboxilação. O teor de Rubisco, portanto, depende da fração de nitrogênio na folha em Rubisco e a fração de carbono/nitrogênio nas folhas (ambos definidos pelo usuário).

A terceira e última equação usada para restringir a taxa da fotossíntese, representa a limitação de transporte de elétrons de regeneração de *RuBP* (equação (3.15)). Quando a concentração de CO₂ na folha não limita a taxa de fotossíntese (ou seja, há suficiente CO₂), a taxa de assimilação é regulada pela rapidez que *RuBP* pode ser regenerada para fixar novas moléculas de CO₂, essa é a limitação de transporte de elétrons. A Figura 3.7 é

tomada do livro Lambers et al., (1998), ela mostra o *RuBP* saturado (limite de CO_2); a fração limite de carboxilação da curva de assimilação ($A(c)$ – $A(v)$) na equação (3.14) e o limite de *RuBP* devido à taxa de transporte de elétrons equação (3.15). A taxa de assimilação de carbono é a mínima dessas duas equações (a linha sólida). No modelo Biome-BGC, a equação 3.13 é resolvida para C_i e substituída nas equações 3.14 e 3.15 para criar duas equações quadráticas que podem ser resolvidas. A menor das duas soluções resultantes é usada como a taxa de assimilação de carbono. J é uma função da taxa máxima de carboxilação (V_{cmax}).

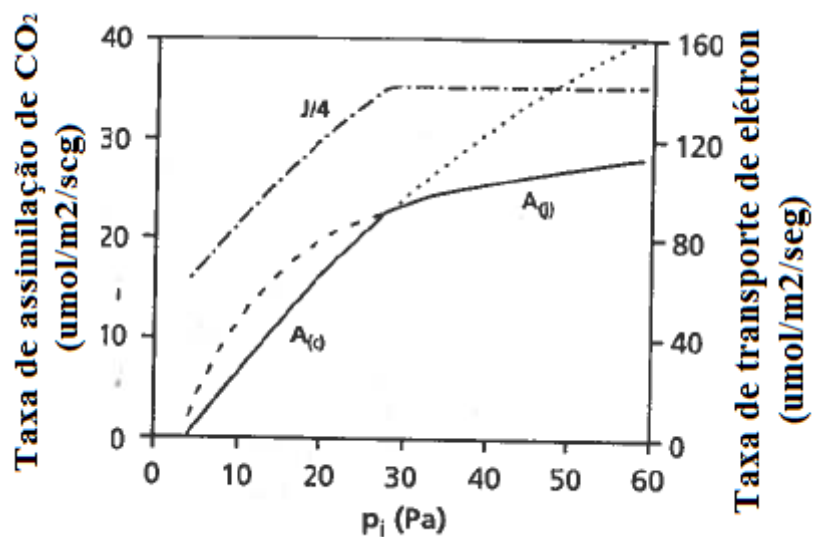


Figura 3.7. Curva de representação da fotossíntese a 25°C (linha sólida) calculada com valores de V_{cmax} e J_{max} de 100 e $140\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ respectivamente, a parte mais baixa da relação é limitada pela capacidade de carboxilação ($A(c)$) e a parte mais acima representa a capacidade de transporte de elétrons ($A(j)$), a taxa de transporte do elétron ($j/4$) é mostrada também.

A cinética da enzima incorporada neste modelo é baseada no Woodrow e Berry (1988). A taxa de fotossíntese é sensível ao teor de nitrogênio nas folhas, à fração de nitrogênio em *Rubisco* e à temperatura que controla a cinética das enzimas. A fotossíntese também depende da RFAA, a RM da floresta e a diferença entre a pressão interna e externa de CO_2 . Todas as etapas desse processo são feitas separadamente para folhas iluminadas e sombreadas.

O primeiro passo para esse cálculo, é converter a condutância estomática já calculada para o vapor de água em uma condutância para CO_2 nas unidades usadas pelo submodelo de fotossíntese (m/s a $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}/\text{Pa}$). Esta conversão é vista na equação 3.12 (Nobel e Jones, 1992):

$$g_{mTc} = \frac{1 \times 10^6 * g_{Tv}}{1,6 * R(T_{dia} + 273,15)} \quad (3.12)$$

Onde R é a constante de gases universal, g_{Tv} é a condutância da folha da água transpirada, T_{dia} é a temperatura durante o dia, e 1,6 é a relação entre o peso molecular do vapor de água e do CO₂. Quando a condutância da folha para CO₂ é conhecida, a rotina principal da fotossíntese é iniciada, e a lógica da rotina da fotossíntese consiste em três principais equações (Farquhar, Caemmerer et al., 1980):

$$A_{(v ou j)} = g_{mTc} * (C_a - C_i) \quad (3.13)$$

$$A_v = \frac{V_{cmax} * (C_i - \Gamma^*)}{C_i + K_c * \left[1 + \frac{O_2}{K_0}\right]} - MR_{leafday} \quad (3.14)$$

$$A_j = \frac{J * (C_i - \Gamma^*)}{4,5 * C_i + 10,5 * \Gamma^*} - MR_{leafday} \quad (3.15)$$

Onde C_a é a pressão parcial atmosférica de CO₂ (Pa) e C_i é a pressão parcial intercelular de CO₂ (Pa), Γ^* (Pa) é o ponto de compensação de CO₂ na ausência da respiração de manutenção da folha, K_c e K_0 são as constantes cinéticas para a carboxilação Rubisco e oxigenação respectivamente, funções exponenciais da temperatura. O_2 é a pressão parcial atmosférica de O₂ (Pa); $MR_{leafday}$ é a respiração de manutenção da folha durante o dia em uma base de índice de área foliar, e J é a taxa máxima de transporte de elétrons.

Equação 3.13 representa a limitação de difusão de CO₂ na assimilação de carbono, a equação 3.14 representa a limitação de carboxilação na taxa de assimilação de carbono, a equação 3.15 representa a taxa de transporte de elétrons da limitação da regeneração do substrato na assimilação de carbono. Thornton (1998) explica que resolvendo a equação 3.13 para C_i , e, em seguida, substituindo esse valor nas equações 3.14 e 3.15, duas equações quadráticas são criadas e podem ser resolvidas. O menor dos dois resultados quando são resolvidas as duas equações é a taxa de assimilação de carbono real.

Há várias etapas necessárias antes das raízes quadráticas estiverem prontas para serem calculadas. Para começar, J deve ser calculado. J é uma função da taxa máxima de carboxilação (V_{cmax}) (Wullschleger, 1993):

$$J = 2.1 * V_{cmax} \quad (3.16)$$

V_{cmax} é uma função do nitrogênio por unidade índice de área foliar, nas folhas iluminadas e sombreadas e também a fração do nitrogênio na folha em Rubisco, e potencial ativação de Rubisco, definido por Woodrow e Berry (1988):

$$V_{cmax} = N_{\text{folhas ilumin e sombre}} * \text{fração de rubisco de nitrogênio na folha} * 7,16 * ACT \quad (3.17)$$

O teor de nitrogênio nas folhas iluminadas e sombreadas é uma proporção que é definida pelo usuário C/N nas folhas:

$$N_{\text{folhas iluminadas e sombreadas}} = \frac{1/C:N \text{ leaf}}{SLA_{\text{Sol e Sombra}}} \quad (3.18)$$

A fração de Rubisco de nitrogênio na folha é um parâmetro constante que depende do tipo da vegetação. O valor de 7.16 representa a proporção de peso de Rubisco em relação ao seu conteúdo de nitrogênio (Kuehn e McFadden 1969; Fasman, 1976), e ACT representa a atividade de Rubisco em função da temperatura, O_2 e CO_2 . O primeiro passo para calcular a cinética da enzima Rubisco é calcular a pressão parcial de O_2 supondo que a sua concentração na atmosfera é de 21%.

$$O_2 = 0.21 * \text{pressão atmosférica (Pa)} \quad (3.19)$$

A seguir a atividade de Rubisco pode ser calculada seguindo a dinâmica Michealis-Menten para O_2 e CO_2 (os cálculos de CO_2 variam dependendo se a temperatura é maior que $15^\circ C$ ou menor que $15^\circ C$). Assumindo que todas as taxas são funções exponenciais com a temperatura, seus valores podem ser calculados por:

$$K_o = K_{O25} * Q_{10K_o}^{\left(\frac{T_{dia}-25}{10}\right)} \quad (3.20)$$

$$\text{If } T_{dia} > 15^\circ C : \quad (3.21)$$

$$\begin{aligned}
 a. \quad K_C &= K_{C25} * Q_{10K_C}^{\left(\frac{T_{dia}-25}{10}\right)} \\
 b. \quad ACT &= ACT_{25} * Q_{10ACT}^{\left(\frac{T_{dia}-25}{10}\right)}
 \end{aligned}$$

$$\text{If } T_{dia} \leq 15^\circ C \quad (3.22)$$

$$\begin{aligned}
 a. \quad K_C &= \frac{K_{C25} * 1,8 Q_{10K_C}^{\left(\frac{T_{dia}-25}{10}\right)}}{Q_{10K_C}} \\
 b. \quad ACT &= \frac{ACT_{25} * 1,8 Q_{10ACT}^{\left(\frac{T_{dia}-25}{10}\right)}}{Q_{10ACT}}
 \end{aligned}$$

Com a ACT, Kc e Ko calculado, Γ^* (Pa) (O ponto de compensação de CO₂ na ausência de respiração de manutenção na folha) e V_{cmax} pode ser agora achado. Γ^* é:

$$\Gamma^* = 0,105 * K_C * \frac{O_2}{K_0} \quad (3.23)$$

Todos os cálculos são feitos para folhas iluminadas e sombreadas no final do dia. A Assimilação total do carbono, é a soma da assimilação das folhas iluminadas e sombreadas. O carbono total assimilado calculado é, na realidade, a taxa da assimilação de carbono por unidade de área foliar multiplicado pela duração do dia e multiplicado pela RFAA para folhas iluminadas e sombreadas, e assim, encontrar o total de carbono assimilado. Esta assimilação de carbono é convertida em unidades de umol/m²/seg a kg/m²/dia e colocado como um reservatório de carbono.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

4.1.1 Localização da FAL

Este estudo foi realizado em um plantio de eucalipto localizado na Reserva Ecológica e Experimental da Universidade de Brasília, Fazenda Água Limpa (FAL), localizada no Distrito Federal, ver Figura 4.1. Está situada entre as coordenadas 15^o56' e 15^o59' Sul e 47^o55' e 47^o58' W, ocupando uma área total de 4.500 ha, a uma altitude de 1100 m. A FAL limita-se ao norte com o Núcleo Rural da Vargem Bonita, o Setor de Mansões Park Way – SMPW e o Catetinho; ao sul, com a BR-251; a leste, com a Reserva Ecológica do IBGE e o Jardim Botânico de Brasília; e a oeste com a Estrada de Ferro REFESA.

A FAL faz parte da Área de Proteção Ambiental (APA) das Bacias do Gama e Cabeça do Veado e tem, no seu interior, a Área de Relevante Interesse Ecológico (ARIE) Capetinga/Taquara, também denominada Estação Ecológica da Universidade de Brasília. Pertence ao Núcleo da Biosfera do Cerrado. Da área total da fazenda, 50% são destinados à preservação e o restante, às áreas de ensino, pesquisa e extensão.

4.1.2 Cobertura Vegetal na FAL

A vegetação nativa predominante na FAL é o cerrado *sensu stricto* que ocupa cerca de 1.480 ha, mas existem áreas cobertas por diversas fitofisionomias do cerrado variando desde campo limpo até florestas de galeria. Registros indicam que cerca de 1.100 espécies de plantas distribuídas entre 135 famílias botânicas já foram identificadas na área. As famílias mais comuns são Leguminosae, Myrtaceae, Rubiaceae, Vochysiaceae, Gramineae, Compositae. Um número de espécies raras também está presente na composição florística e o endemismo é comum.

Cerca de 800 ha da área da FAL está destinada a projetos de silvicultura e manejo, com espécies florestais exóticas e nativas, e, atualmente, a área plantada é de aproximadamente 100 há. Nesses plantios estão sendo testadas diferentes espécies, espaçamentos e tratamentos silviculturais, com a adoção de técnicas, procedimentos e recursos aprimorados do ponto de vista técnico ambiental. O objetivo é atender diferentes pesquisas

e difundir no meio rural da região a silvicultura voltada à produção de madeira como uma alternativa de uso da terra de maneira sustentável e de geração de renda, com benefícios para o proprietário rural, para a região e para o meio ambiente.



Figura 4.1. Localização da Fazenda Água Limpa

Atualmente, existem talhões ocupados por plantios de várias espécies (*Eucalyptus grandis*, e *Eucalyptus urophylla*) e várias idades. Os plantios mais antigos estão com 12 anos e os mais jovens estão com 4 meses. A área para estimar o carbono e PPL por meio dos modelos 3-PG e Biome-BGC, será uma área com plantação nova de mudas do *hibrido Eucalyptus grandis e Eucalyptus urophylla*. A plantação foi iniciada em outubro de 2012, com a implantação das mudas em fevereiro de 2013.

4.1.3 Floresta energética plantada para o estudo

A espécie plantada na FAL para análise deste estudo será o *hibrido Eucalyptus grandis e Eucalyptus urophylla*. O eucalipto tem sido no passado um vilão no trato do solo, mas essas informações têm mudando com muitas pesquisas recentes. Embora resseque o solo o eucalipto não consome tanta água como se pensa. Os estudos feitos sobre o eucalipto indicam que o consumo de água subterrânea e da água no solo não são muito diferentes daqueles observados em plantações de outras espécies de florestas (Lima, 1993). Por exemplo, Segundo Ferri, um cedro brasileiro consome 37.500 litros de água

anualmente, ao passo que cada eucalipto suga 19.600 litros, praticamente a metade. Ao contrário das árvores nativas testadas, diz o trabalho, o eucalipto consome mais água no Verão, justamente no período das chuvas, em que é maior a oferta do líquido. Argumento final, uma plantação de eucaliptos consome, por hectare, muito menos água do que qualquer canavial (Lima, 2007, apud Queiroz & Barrichelo, 2007).

As principais características do eucalipto são plasticidade, crescimento rápido, variações nas propriedades da madeira entre outras. Para a aquisição de celulose é a espécie mais usada devido a sua adaptabilidade a diferentes condições do clima e do solo. O tempo em idade de corte bem menor devido a seu rápido crescimento em comparação com o pinus e também pelo fato de que a madeira de folhosas deslignifica-se mais rapidamente que a de coníferas, possuindo também menor teor de lignina (Olivetti Neto, 2007).

O Brasil na atualidade possui a melhor tecnologia na implantação, condução e colheita de florestas de eucalipto (Couto et al., 2002), e estão entre os ecossistemas mais produtivos do mundo (Silva e Matos, 2003). Pode-se esperar que este setor contribua na absorção de CO₂ na atmosfera como energia renovável já que é um dos mais importantes produtos usados para o uso das siderúrgicas de ferro-gusa no Brasil, trocando as energias de base fóssil, para plantações energéticas que absorvem CO₂ durante seu crescimento.

4.1.3.1 Clonagem do Eucalipto

A reprodução de uma planta idêntica à planta-mãe, usando qualquer parte destacada dessa é o objetivo primordial da propagação vegetativa. A esse processo biológico denomina-se clonagem, que pode ocorrer naturalmente, um dos mais importantes métodos de propagação vegetativa (Zuffellato-Ribas e Rodrigues, 2001). Para reverter ou manter a juvenilidade das plantas pode-se usar a propagação vegetativa seriada, método que consiste em micropropagar, enxertar ou estaquear sucessivamente propágulos adultos até que se obtenha o rejuvenescimento, bem como se pode obtê-la através das podas sucessivas (Eldridge et al., 1994).

Em 1974 iniciaram-se os trabalhos de propagação vegetativa a partir de estacas coletadas de brotações de cepas de eucalipto. A primeira plantação clonal foi estabelecida em 1979 em 1000 ha, no estado do Espírito Santo, pela Cia Aracruz (Ruy, 1998), que

dominou a técnica de propagação vegetativa do eucalipto, sendo a primeira empresa a obter em suas florestas produtividades de 50 m³/ha/ano com o híbrido de *Eucalyptus grandis* vs. *Eucalyptus urophylla* (Mora e Garcia, 2000). Este clone apresenta produtividade razoável mesmo em condições de estresse hídrico, sendo ideal para a região.

4.1.4 Clima e precipitação da FAL

O clima da região, segundo a classificação de Köppen (sistema de classificação global dos tipos climáticos), é do tipo Aw que corresponde a (clima tropical com estação seca de inverno) ver Figura 4.2. A temperatura máxima é de 28,5 °C e mínima de 12 °C. A umidade relativa entre maio e setembro fica abaixo de 70% e a umidade mínima ocorre em agosto, com uma média de 47%, podendo chegar a 15%. A precipitação média anual é de 1600 mm, com uma pronunciada estação seca de julho a setembro.

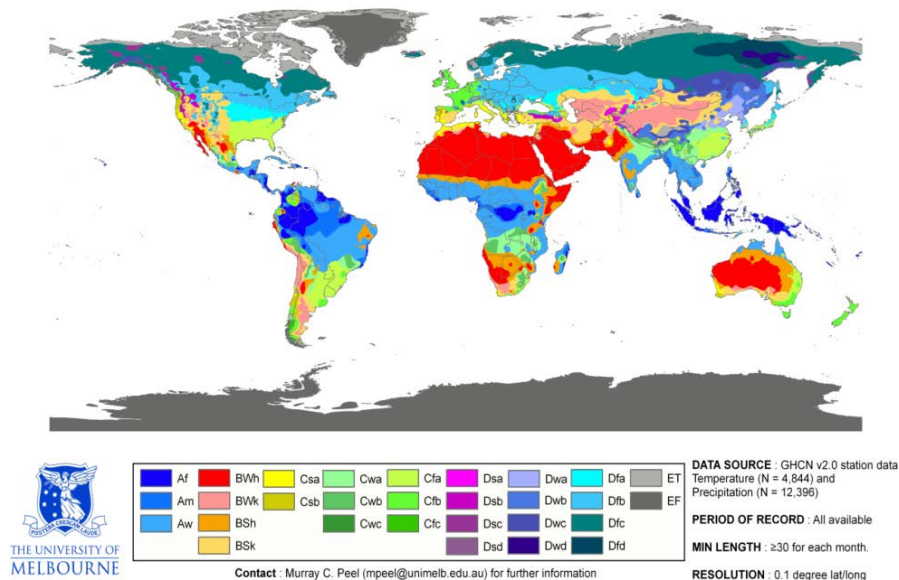


Figura 4.2. Classificação climática do mundo Köppen-Geiger (Modificado da Universidade de MELBOURNE, 2007).

Existe na FAL uma estação meteorológica, mostrada na Figura 4.3, onde foram coletados os dados climatológicos para a execução do 3-PG e do Biome-BGC.



Figura 4.3. Estação de dados meteorológicos da FAL

As variáveis meteorológicas usadas para modelagem obtidas pela estação da FAL são as apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Variáveis climatológicas obtidas da estação meteorológica da FAL com uma frequência de 1 hora

Variável Climatológica	Unidade
Precipitação	mm
Velocidade do vento máxima	m/s
Velocidade do vento mínima	m/s
Temperatura máxima	°C
Temperatura mínima	°C
Radiação global	cal/cm ²
Umidade relativa máxima	%
Umidade relativa mínima	%
Direção do vento	graus

4.1.5 Tipo de solo da plantação

Os Latossolos são os solos mais comuns na região do Cerrado, ver Figura 4.4, cobrindo 46% da área. O solo predominante é o Latossolo Vermelho-Amarelo, pobre em nutrientes e com um alto teor de alumínio.

Os Latossolos possuem excelentes condições físicas e embora apresentem graves limitações quanto à fertilidade natural, tornam-se excepcionalmente produtivos quando são utilizados sistemas de manejo tecnificados, que incluem a correção da acidez, o aumento da fertilidade e o controle da erosão. Os modernos sistemas de manejo agroecológicos, compreendendo a manutenção e o aumento das fontes de matéria orgânica, o manejo dos componentes biológicos, o aumento da capacidade de retenção de umidade.

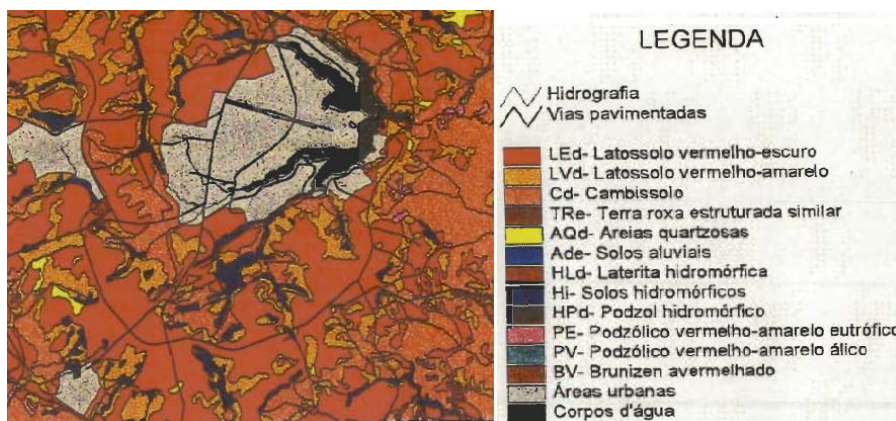


Figura 4.4. Mapa dos solos do DF e FAL (Modificado- EMBRAPA, 1995).

4.1.5.1 Latossolo Vermelho-Amarelo

São solos minerais, como horizonte A moderado, horizonte B latossólico, distróficos ou álicos de textura argilosa ou média, com sequência de horizonte A, B e C com pouca diferenciação e bastante profundo, acentuadamente drenados e acidez variando de moderado a forte. A porcentagem de silte é baixa possuindo uma distribuição uniforme de argila ao longo dos perfis e sua pequena mobilidade por eluviação. Possuem pequena susceptibilidade à erosão; ocupam áreas extensas de relevo plano e suave ondulado, em altitudes que variam de 850 a 1350 metros (Silva, 1998).

A principal limitação apresentada por esses solos é a baixa fertilidade natural, decorrente da sua pobreza em nutrientes disponíveis às plantas e aos teores de alumínio extraíveis na zona onde se encontra a maior parte do sistema radicular de grande parte das culturas.

Os Latossolos Vermelho-Amarelos da área são, em sua grande maioria, de boas características físicas, apresentando baixa susceptibilidade erosão e prestam-se muito bem à agricultura mecanizada, pois, ocorrem em áreas de topografia suave. Para o seu melhor aproveitamento necessitam além de correções e fertilizações, de práticas simples de conservação do solo (EMBRAPA, 1982).

4.1.5.2 Textura do solo da FAL

Avaliada pelo tato, refere-se à proporção relativa das frações granulométricas que compõem a massa do solo. A fração granulométrica dos solos, tratada comumente na

pedologia como textura do solo, é determinada segundo a escala internacional de Atterberg (1912) citado por Souza (1995), como se segue na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Tipos de solo correspondente a sua composição granulométrica

Fração	Diâmetro (mm)
Areia grossa	2,0 – 0,2
Areia fina	0,2 – 0,05
Silte	0,05 – 0,002
Argila	< 0,002

De acordo com os conteúdos de areia, silte e argila, são caracterizadas as seguintes classes de texturas para o solo da FAL área sombreada, ver Figura 4.5.

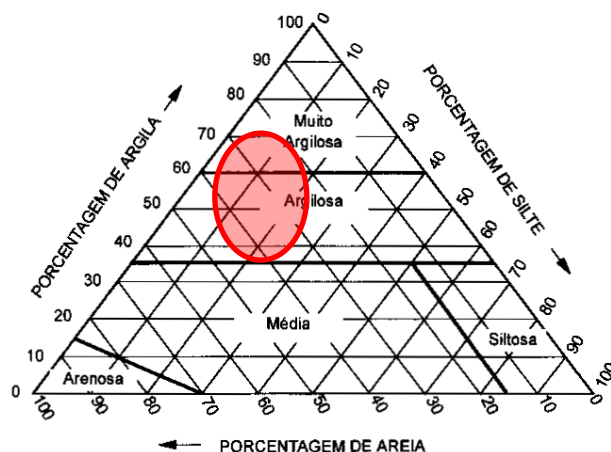


Figura 4.5. Diagrama triangular para grupamento de classes de textura (Modificado, Souza, 1995).

Como é mostrado na Figura 4.5, os latossolos Vermelho-Amarelo e as características dos solos correspondente à FAL, esse solo tem uma variação na textura do solo como se mostra na Tabela 4.3

Tabela 4.3. Porcentagens máximas e mínimas da textura do solo da FAL.

Componentes da Textura do solo	Porcentagem	Porcentagem
	Mínima	Máxima
Areia	10 %	40 %
Argila	40 %	80 %
Silte	5 %	30 %

4.1.5.3 Quantidade máxima e mínima de água disponível no solo da FAL

Os solos argilosos, com valores baixos de volume de matéria sólida, alto teor de argila e microporosidade alta, têm capacidade de campo e umidade de murchamento

elevadas. Da mesma forma, a disponibilidade de água é relativamente baixa, quase comparável aos arenosos. A Figura 4.6 apresenta a disponibilidade de água máxima em mm de chuva.

Vários estudos de retenção de água no solo foram feitos para região do cerrado, sendo os de Ranzani (2010) e Ferri (2004) os apresentados neste trabalho na Tabela 4.4, onde se mostra a capacidade de água nos diferentes solos dependendo da textura.

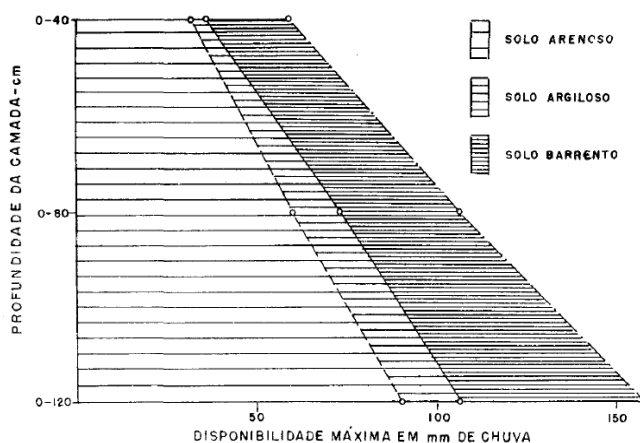


Figura 4.6. Representação gráfica dos valores médios de disponibilidade máxima de água nos solos arenosos, argilosos e barrentos a diferentes profundidades e expressos em mm de chuva. (Modificado, Medina & Grohmann 1966).

Tabela 4.4. Valores médios de capacidade de campo, umidade de murchamento, e disponibilidade máxima de água em milímetros de chuva em solos sub cerrado (modificado-Medina & Grohmann 1966).

Solos	Profundidade e em cms	Máxima capacidade de campo	Umidade de murchamento	Disponibilidade máxima de água
Arenosos	0-40	54.5	23.0	31.5
	0-80	107.5	47.5	60.0
	0-120	166.	72.0	94.5
Argilosos	0-40	127.6	91.6	36.0
	0-80	251.0	177.6	73.4
	0-120	364.0	257.6	106.4
Barrentos	0-40	103.0	44.5	58.5
	0-80	200.5	94.5	106.0
	0-120	306.5	149.0	157.5

Segundo a Tabela 4.4, para solos argilosos a disponibilidade de água para o solo da FAL se situa em torno de **110 mm de chuva**.

4.2 ESTRUTURA DO MODELO 3-PG E BIOME-BGC

Os dois modelos estudados aqui, 3-PG e Biome-BGC, como foram mencionados e estudados no capítulo 3, têm estruturas diferentes para as estimativas da PPL. Neste capítulo apresenta-se a forma em que os parâmetros de início são tratados para cada um dos modelos.

4.2.1 Estrutura do modelo 3-PG

Para fazer as estimativas são necessárias variáveis de entrada, alguns obrigatórios e outros opcionais. Depois de obter os parâmetros de entrada do modelo, pode-se começar a estimar os parâmetros de saída de interesse. Neste caso, a produtividade primária líquida ou a PPL, que no modelo 3-PG é calculada em toneladas de madeira seca por hectare anual ($t_{DM}/ha/ano$).

Parâmetros de Entrada

Na Tabela 4.5, apresenta-se o resumo dos parâmetros de entrada mandatórios e opcionais que requer o modelo 3-PG para ser executado. Issos parâmetros são divididos em três grupos descritos anteriormente. Dados de sítio ou controle, dados meteorológicos e dados de inicialização (são parâmetros referentes à plantação, mês de plantação, ano da plantação, quantidade de mudas por hectare, etc).

Tabela 4.5. Resumo das variáveis chave para executar o modelo 3-PG

Palavra chave	Contexto	Mandatório ou Opcional	Unidade
<i>Dados do local e controle</i>			
Título	Identificar o assunto o qual esta sendo rodado	O	sem
Sítio	O nome do sitio o qual esta sendo rodado	O	sem
Espécie	Identificar a espécie que esta sendo rodada	O	sem
Latitude	Latitude do sitio (- para hemisfério sul)	M	sem
Taxa de fertilidade	Taxa de fertilidade, de 0 a 1	M	sem
Classe de solo	Classe. do solo (argiloso, arenoso. barrento)	M	sem
Máximo ASW	Teor máximo de água disponível no solo	M	mm
Mínimo ASW	Teor mínimo de água disponível no solo	M	mm
Data de plantação	Data de plantação em formato Ano e Mês	O	sem

Ano da plantação	Ano da plantação	O	sem
Mês da plantação	Mês da plantação	M	sem
Idade final	Numero de anos que é rodado o modelo	M	Nº
Idade das saídas	Identifica o intervalo das saídas mês ou ano	O	mês/ano
Nº de saídas	Variáveis de saída na primeira coluna	M	Nº
<i>Dados de inicialização</i>			
Massa da muda	Biomassa da muda	O	gr/muda
Massa da plantação	Biomassa inicial total da plantação	O	ton/ha
Fração de folha inicial	Biomassa inicial da folha da plantação	O	ton/ha
Fração de raiz inicial	Biomassa inicial da raiz da plantação	O	ton/ha
Fração de fuste inicial	Biomassa inicial do fuste da plantação	O	ton/ha
Data inicial	Data inicial anos e meses que começa simular	O	sem
Ano inicial	Ano inicial que começa simular	O	sem
Mês inicial	Mês inicial que começa simular	O	sem
Estoque inicial	Estoque inicial de mudas	M	árvore/ha
ASW inicial	Água inicial disponível no solo	M	mm
<i>Entrada de dados climáticos</i>			
Temperatura máxima	Média de temperatura ambiente máxima	M	°C
Temperatura mínima	Média de temperatura ambiente mínima	M	°C
Precipitação	Precipitação no mês	M	mm/mês
Radiação solar	Média da radiação solar no mês	M	MJ/m ² /dia
Dias de chuva	Número de dias de chuva no mês	M	dia/mês
Dias de geada	Número de dias de geada no mês	M	dia/mês
Pressão de vapor de água	Média de pressão de vapor de água no mês	M	mbar

Especificação dos parâmetros do modelo 3-PG

De forma a obter resultados viáveis, o processo de atribuição de parâmetros deverá, obrigatoriamente, ter por base uma boa compreensão do modelo e seguir uma metodologia rigorosa como a proposta por Sands (2004). De acordo com o autor, deve-se começar por atribuir valores aos parâmetros que sejam obtidos por medição direta, ou que assumam valores padrão para a espécie em causa, podendo utilizar-se valores por analogia com outras espécies. Em seguida, identificam-se os parâmetros que se obtém através dos dados ou por modelação de uma determinada característica em estudo (ex: produção de serapilheira), podendo também ser atribuídos valores de espécies relacionados já conhecidos. Por fim, os parâmetros que não são possíveis de obter dos dados ou por observação direta, deverão ser ajustados de forma a otimizar os valores estimados em

relação aos observados. Esse último procedimento exige um conhecimento sólido sobre os limites de variação dos parâmetros de forma a que esses não percam o seu sentido fisiológico.

Embora a PPL seja estimada, o modelo tem que ser parametrizado, para a espécie de plantação ou vegetação do sítio simulado. Neste estudo, a parametrização foi baseada no trabalho de Borges (2009). Esse autor parametrizou e calibrou o modelo 3-PG em uma região do cerrado de Minas Gerais (MG), para a espécie estudada neste trabalho, *Eucalyptus grandis* -*Eucalyptus urophylla*, com esses dados já parametrizados e calibrados executou-se o modelo com dados de clima e de solo da região do cerrado na FAL, depois foi feita a análise de sensibilidade proposta por Landsberg (2004) para saber que parâmetros têm uma forte sensibilidade na variação da PPL e deveriam ser objeto de um estudo mais rigoroso para determinar exatamente o valor desses parâmetros.

4.2.1.1 Parâmetros do local, controle e inicialização 3-PG.

Os dados do local e de controle, por exemplo: latitude; quantidade máxima da água no solo; classe do solo entre outras, são dados usualmente disponíveis na literatura. Porém, outros fatores poderão representar um pequeno desafio, devido a que eles podem apresentar um grau de incerteza elevado. No caso específico do índice de fertilidade que possui uma variabilidade de (0 – 1), 0 para solos de baixa fertilidade, e 1 para solos férteis. Esse valor é normalmente aproximado, baseado em estudos físicos e químicos do solo, que podem dar uma estimativa da fertilidade, embora não seja um valor exato. Por isso, ele pode ser visto como mais um parâmetro a ajustar/calibrar com base no conhecimento dos solos e dentro de determinados limites (de 0.3 até 0,7), de forma a fazer coincidir os valores observados com os estimados, adotando-se o observado na literatura para latossolos vermelho-amarelo. Na Tabela 4.6, mostra-se os valores dos parâmetros de sítio e controle segundo as pesquisas feitas nesse sentido.

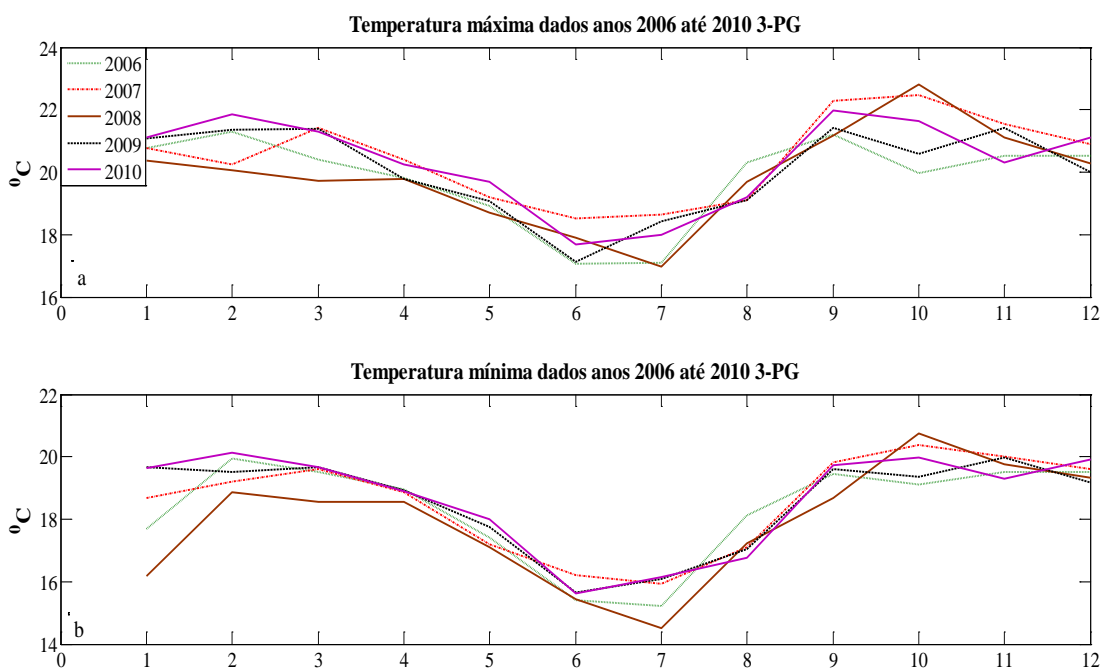
Tabela 4.6. Valores dos parâmetros de sítio, controle e inicialização para FAL.

Parâmetro de sítio e controle	Valores	Unidades
Espécie	<i>Eucalipto</i>	<i>Grandis e Europhylla</i>
Latitude	-15.46	Hemisfério Sul
Taxa de fertilidade	0,5	-
Classe de solo	C	Argiloso

Máximo ASW	110	mm
Mínimo ASW	0	mm
Mês da plantação	Abril	-
Idade final	7	Anos
N ^o de saídas	PPL, IAF, Evapotranspiração, Biomassa total na vegetação	t/ha/ano
Estoque inicial	1111	Árvore/ha
ASW inicial	50	mm

4.2.1.2 Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos usados no modelo foram os coletados pela estação meteorológica da FAL, esses dados foram corrigidos para o formato e unidades que requer o modelo 3-PG. Na Figura 4.7 são apresentados os valores para os anos 2006 até 2010, em um resumo mensal como estipula o 3-PG. Percebe-se na figura uma variabilidade inter-anual considerável nos forçamentos meteorológicos, principalmente em termos de precipitação e radiação solar.



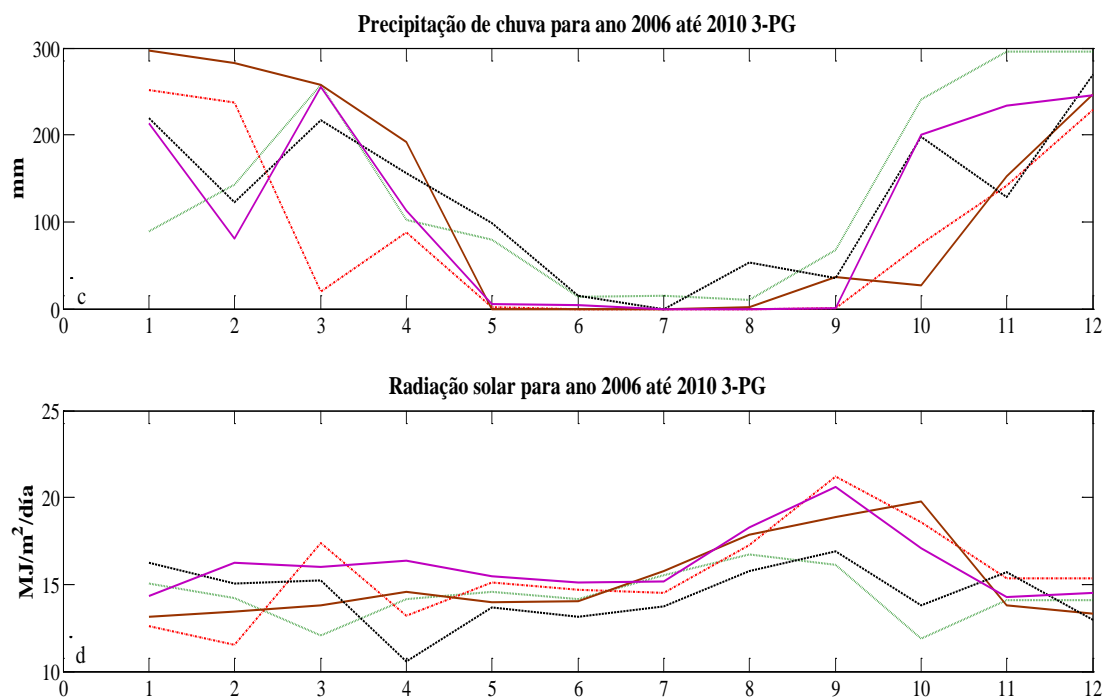


Figura 4.7. Dados meteorológicos da FAL coletados para o ano 2006 até 2010 Na Tabela 4.7, mostra-se os parâmetros calibrados por Sands e Landsberg (2002) e os parâmetros calibrados no estudo feito por Borges (2009). Esses últimos valores são os usados para executar o modelo 3-PG na FAL por a sua aproximação do local e da espécie de estudo.

Tabela 4.7. Valores dos principais parâmetros de diferentes parametrizações do modelo 3-PG (Sands & Lansdsberg (2002), e Borges (2009)), cujos desempenhos são utilizados neste trabalho.

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Sands & Lansberg	Geral Cerrado
Biomassa inicial de folhas	W_F	t/há	0.168	0.168
Biomassa inicial de tronco (tronco + tronco)	W_S	t/há	0.106	0.106
Biomassa inicial de raiz	W_R	t/ha	0.099	0.099
Partição folha/tronco para D= 2 cm	pFS2	-	1	1.64
Partição folha/tronco para D = 20 cm	pFS20	-	0.15	0.15
Const. do relaciona. entre massa do tronco vs DAP	TroncoConst	-	0.095	0.020
Potência do relaciona. entre massa do tronco vs DAP	TroncoPower	-	2.4	3.11
Fração máxima da PPL para raízes	pRx	-	0.8	0.5
Fração mínima da PPL para raízes	pRn	-	0.25	0.1
Taxa de queda de “litter” para plantios em idade adulta	gammaFx	1/mês	0.027	0.07
Taxa de queda de “litter” para t = 0	gammaF0	1/mês	0.001	0.001
Idade que taxa de queda de “litter” tem valor médio	tgammaF	mês	12	4
Taxa de queda de ciclagem radicular	Rttover	1/mês	0.015	0.025
Temperatura mínima para o crescimento	Tmin	°C	8.5	8
Temperatura ótima para o crescimento	Topt	°C	16	25

Temperatura máxima para o crescimento	Tmax	°C	40	40
Valor de “m” quando a fertilidade = 0	m0	-	0	0
Valor de “ f_N ” quando fertilidade = 0	fN0	-	1	0.5
Potência de (1-fertilidade), na expressão do f_N	fNn	-	0	1
Taxa de fertilidade do solo (FR)	FR	-	0.9	0.9
Parâmetro relacionado com dispon. de água no solo	Soil Class	-	C	C
Idade máx. do “stand” para computar a idade relativa	MaxAge	Ano	50	9
Potência da idade relativa na função para <i>fage</i>	nAge	-	4	4
Idade relativa para dar <i>fage</i> = 0.5	rAge	-	0.95	0.95
Área foliar específica para plantios em idade inicial	AFE0	m ² /kg	11	13.74
Área foliar específica para plantios em idade adulta	AFE1	m ² /kg	8.5	7.56
Idade na qual a área foliar específica = $\frac{1}{2}(\sigma_0 + \sigma_1)$	tAFE	Ano	2.5	1.23
Coefficiente de extinção da RFFA pelo dossel	K	-	0.5	0.5
Idade de fechamento do dossel	fullCanAge	Ano	0	2
Máxima proporção de chuva interceptada pelo dossel	Maxintcptn	-	0.15	0.15
IAF em que a interceptação de água pelo dossel é máx.	IAFmaxIntcptn	m ² /m ²	0	3.33
Eficiência máxima quântica do dossel	Alpha	-	0.06	0.08
Relação PPL/PPB	Y	-	0.47	0.5
Máxima condutância do dossel	Maxcond	m/s	0.02	0.02
IAF em que a condutância do dossel é máxima	IAFgex	m ² /m ²	3.33	3.33
Define a resp. estomática ao DPV	CoeffCond	mbar	0.05	0.0324
Condutância da camada limítrofe do dossel	BLcond	m/s	0.2	0.2
Massa de lenho máx para cada 1000 árvores/ha	wSx1000	Kg/arv.	300	300
Fração de galho e casca para plantios em idade inicial	fracBB0	-	0.75	0.59
Fração de galho e casca para plantios em idade adulta	fracBB1	-	0.15	0.19
Idade a fração de tronco e casca = $\frac{1}{2}(P_{BB0} + P_{BB1})$	tBB	Ano	2	2.17
Densidade básica mínima – plantios em idade inicial	rhoMin	t/m3	0.450	0.382
Densidade básica máxima – plantios em idade adulta	rhoMax	t/m3	0.450	0.505
Idade na qual a densidade básica = $\frac{1}{2}(\rho_0 + \rho_1)$	tRho	ano	4	2.264
Constante do relacionamento entre Altura vs DAP	aH	-	-	0.67
Potência do relacionamento entre Altura vs DAP	nHB	-	-	1.27
Constante do relacionamento entre Volume vs DAP	aV	-	-	0.0256
Potência do relacionamento entre volume vs DAP	nVB	-	-	3.22

4.2.2 Análise de sensibilidade para o Modelo 3-PG na FAL

Segundo Sands (2004) os parâmetros podem ser classificados de acordo com o maior ou menor efeito que a alteração tem nos resultados do modelo Tabela 4.8, essa sensibilidade só é usada na estimativa da PPL.

Tabela 4.8. Classes de sensibilidade que podem ser atribuídas aos parâmetros

Classe de Sensibilidade	Inicial	Descrição
Baixa	L	Os resultados são essencialmente independentes do valor do parâmetro
Media	M	Os resultados dependem moderadamente do valor do parâmetro
Elevada	H	Os resultados são fortemente dependentes do valor do parâmetro

Para o 3-PG a análise de sensibilidade foi feito para os seguintes parâmetros:

4.2.2.1 Fertilidade do solo

A fertilidade do solo é considerada uma ciência que estuda a capacidade em suprir (ter e fornecer) nutrientes às plantas. Estuda quais são os elementos essenciais, como, quando e quanto eles podem interagir com o vegetal, o que limita sua disponibilidade e como corrigir deficiências e excessos. A fertilidade do solo é um parâmetro difícil de estabelecer, já que não tem ensaio de laboratório ou equipamento para sua determinação direta, sendo que sua caracterização é realizada por observação do crescimento vegetativo. De acordo com a literatura para “latossolos vermelho-amarelo”, como o solo da FAL, que o índice de fertilidade é baixo. No entanto para a plantação de eucalipto que esta sendo estudado, será adicionado ao solo fertilizante que aumenta a fertilidade no solo. Por esse motivo foi atribuído um valor de 0.5 para a estimativa da PPL para esse parâmetro. Na análise de sensibilidade da PPL para esse parâmetro foi estimado em fertilidades que variam de 0.0 a 1.0.

4.2.2.2 Biomassa Inicial

Para este estudo as mudas de eucalipto serão plantadas como uma distribuição de 3 metros x 3 metros que esta dentro dos padrões comerciais para estoque inicial. Portanto o valor de 1111 árvore/há. Além disso, as mudas são particionadas em frações de biomassa nas folhas, raízes e tronco (toneladas/ha), e é uma medida do tamanho da muda plantada. Uma análise de sensibilidade de PPL foi feita para diferentes valores de biomassa inicial.

4.2.2.3 Tipo do solo

O solo possui características próprias: densidade, cor, textura, consistência e propriedades físicas, químicas e biológicas. Para as plantas crescerem, é necessário que o solo contenha água, e esta capacidade do solo em reter água vai depender do próprio solo. A água dissolve os nutrientes existentes no solo, conduzindo-os e tornando-os disponíveis para as plantas. Os "Latosolos argilosos" presentes no Cerrado brasileiro são suscetíveis à

compactação. No preparo destes solos tem sido utilizado o revolvimento, que, somado às chuvas intensas, temperaturas elevadas, maior erosão, contribuem para degradar o solo, comprometendo a produção das culturas (Monte Braga. 2011). O modelo 3-PG classifica os solos em quatro diferentes classes que dependem das suas propriedades físicas do solo (Argiloso, arenoso, argiloso com silte e arenoso com silte). De acordo com os dados achados na literatura, o solo da FAL latossolo vermelho-amarelo apresenta alto conteúdo de argila com baixo conteúdo de silte, sendo assim, foi considerado o solo da FAL como argiloso.

4.2.2.4 Quantidade de água máxima no solo

Em relação ao conteúdo de água no solo, seu limite máximo é conhecido como saturação, definida como aquela em que todos os poros estão preenchidos com água, a curva de retenção de água no solo é expressa a relação entre o conteúdo de água, em base de massa ou volume, e o potencial matricial da água no solo (força de ligação entre as moléculas de água e as partículas de solo). A retenção da água no solo é afetada por uma série de fatores, mas principalmente pela distribuição relativa do tamanho (granulometria), da forma e do arranjo das partículas do solo. Apresenta diversas aplicações práticas, técnicas e científicas, tais como a disponibilidade total de água no solo. É de fácil determinação, por meio do ensaio da câmara de pressão de Richard. No entanto o valor utilizado neste estudo foi o encontrado na literatura de 110 mm de água para solos argilosos como a FAL.

4.2.2.5 Quantidade de água inicial no solo

É a quantidade inicial de água que tem no solo no momento da plantação das mudas ou árvores (medido em mm de água). Pelo fato de ser plantada as mudas em abril considero-se uma quantidade inicial de água de 50 mm.

4.2.2.6 Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos usados no modelo 3-PG foram os correspondentes aos anos 2006 até 2010 tomados da estação meteorológica da FAL. A análise de sensibilidade é feita para cada ano e para a totalidade dos anos de crescimento da floresta. Os valores meteorológicos correspondentes a cada ano foram simulados por 7 anos, período no qual se estima a maturidade de uma plantação de eucalipto. Foi também simulado em 7 anos

seguidos correspondentes aos valores meteorológicos dos anos 2006 até 2010, repetindo os dados climáticos dos anos 2006 e 2007 para finalizar com os 7 anos de simulação.

4.2.3 Estrutura e parâmetros do modelo Biome-BGC

Três grupos de parâmetros de entrada são necessários para executar o modelo Biome-BGC: o primeiro grupo são os parâmetros ecofisiológicos da vegetação, são 34 parâmetros divididos em varias categorias para distinguir diferentes biomas. A obtenção desses parâmetros na literatura é um processo difícil, já que não temos estudos com muita profundidade a respeito de todos esses tipos de biomas, além de serem parâmetros complicados de medir. O segundo grupo são os parâmetros meteorológicos da região que vai ser estudada. O terceiro grupo são os parâmetros de inicialização, como são características do solo, localização, número de anos simulados, entre outras.

Por ultimo foi feito uma análise de sensibilidade para parâmetros de inicialização e para parâmetros ecofisiológicos no Biome-BGC para conhecer quais parâmetros apresentam um grande efeito na estimativa da PPL, embora tenham sido usados alguns parâmetros já calibrados do estudo do Borges (2009).

Dados de entrada

Como foi mencionado anteriormente o Biome-BGC necessita de três grupos de parâmetros de entrada para ser executado. Uma breve descrição de todos os grupos de parâmetros é dada em primeiro lugar, seguido por discussões detalhadas de cada grupo de parâmetros. O primeiro grupo são os parâmetros ecofisiológicos com 34 tipos diferentes de parâmetros. Para fins de praticidade e devido a sua semelhança ecofisiológica na simulação, estes foram divididos em 7 sub-grupos, 4 desses sub-grupos foi feito a análise de sensibilidade correspondente. Sobre os outros 3 sub-grupos por sua falta de dados desses parâmetros ou pela sua irrelevância aplicada na plantação de eucalipto foram descartados para a análise.

O segundo grupo de parâmetros de entrada necessários são os parâmetros meteorológicos. Eles contêm os valores diários de temperatura, precipitação, umidade, radiação do sitio da simulação, podendo conter qualquer número de anos de dados.

O terceiro grupo de parâmetro de entrada necessário é chamado de parâmetros de sítio ou controle da mesma forma que no 3-PG. Eles fornecem informações gerais sobre a simulação, incluindo uma descrição das características físicas do local da simulação, uma descrição do prazo para a simulação, os nomes de todos os outros parâmetros de entrada necessários, os nomes de parâmetros de saída que serão gerados, e as listas de variáveis para armazenar os parâmetros de saída.

4.2.3.1 Parâmetros ecofisiológicos do modelo Biome-BGC

Este tipo de parâmetro de entrada define as características ecofisiológicas do tipo de vegetação que está sendo simulada. Pesquisadores do NTSG (por sua sigla em inglês *Numerical Terradynamic Simulation Group*) fizeram um grande esforço, para resumir um considerável número de estudos ecofisiológicos da literatura, com intuito de gerar um conjunto de parametrizações padrão para um pequeno número de classes de vegetação muito agregada. Esses parâmetros ecofisiológicos são fornecidos com o Biome-BGC, e os usuários são encorajados a usá-los como uma primeira aproximação dos parâmetros adequados para uma nova simulação. Na Tabela 4.9, são mostrados os parâmetros ecofisiológicos usados para executar o Biome-BGC. Os parâmetros foram baseados no tipo de vegetação padrão *evergreen broadleaf forest*, já que as características gerais desse tipo de vegetação, assim como o eucalipto, conserva alguma parte das folhas durante um ano; tem fotossíntese tipo C3 e lenhosa, ou seja, com grande proporção de tronco em relação às folhas.

Tabela 4.9. Parâmetros ecofisiológicos para executar o Modelo Biome-BGC

Parâmetro ecofisiológicos da vegetação	Unidades	Símbolo	Valores
<i>Parâmetros de mortalidade e renovação da vegetação</i>			
Renovação das raízes finas e folhas	1/ano	LFRT	0.5
Renovação da madeira viva	1/ano	LWT	0.70
Mortalidade da árvore ou planta completa	1/ano	WPM	0.005
Mortalidade por fogo	1/ano	FM	0.0
<i>Parâmetros de alocação</i>			
Alocação de C nas folhas novas/C nas raízes finas novas	kgC/kgC	FRC:LC	1.0
Alocação de C nas folhas novas/C no tronco	kgC/kgC	SC:LC	2.2
Alocação de C do total de madeira nova/C madeira viva nova	kgC/kgC	LWC:TWC	0.1
Alocação de C no tronco /C nas raízes grossas	kgC/kgC	CRC:SC	0.3
<i>Parâmetros de Carbono/nitrogênio (C/N)</i>			

Fração de C/N na folha	kgC/kgN	C:N _{leaf}	42.0
Fração de C/N na serapilheira	kgC/kgN	C:N _{lit}	49.0
Fração de C/N nas raízes finas	kgC/kgN	C:N _{fr}	42.0
Fração de C/N na madeira viva	kgC/kgN	C:N _{lw}	50.0
Fração de C/N na madeira morta	kgC/kgN	C:N _{dw}	300.0
Parâmetros de lábil, Celulose, e lignina.			
Fração de lábil, Celulose, e lignina na folha serapilheira.	%		32,44,24
Fração de lábil, Celulose, e lignina nas raízes finas.	%		30,45,25
Fração de Celulose, e lignina na madeira morta.	%		76,24
Parâmetros morfológicos			
Área específica da folha	kgC/m ²	AFE	12
Fração de todos os lados da folha projetados/IAF	IAF/IAF	IAF _{all:proj}	2.0
Fração de área específica das folhas sombreadas/iluminadas	AFE/AFE	AFE _{shd:sun}	2.0
Taxas de condutância e limitações			
Condutância estomática máxima	m/s	g _{smax}	0.005
Condutância cuticular	m/s	g _{cut}	0.00001
Condutância da camada limite	m/s	g _{bl}	0.01
Potencial de água na folha/redução inicial e final da CE	MPa	Ψ ₁	-0.6,-3.9
DPV /redução no começo da condutância estomática (CE)	Pa	VPD _i	1800
DPV/redução quando a CE é completada	Pa	VPD _f	4100
Parâmetros vários			
Índice de interceptação de água	1/IAF/dia	Wint	0.15
Coeficiente de extinção de luz	I ₀ /I ₁ /IAF	k	0.5
Porcentagem de nitrogênio Rubisco na folha	%	PLNR	0.06

4.2.3.2 Parâmetros do local, controle e inicialização Biome-BGC.

Os valores das variáveis de inicialização são diferentes aos usados no 3-PG, já que o Biome-BGC necessita variáveis de entrada adicionais para a execução do modelo. Essas variáveis são: concentração atmosférica de CO₂, o modelo pode ser executado para um valor constante ou um valor variável. Neste caso foi usado o valor constante de 350 ppm. Outros parâmetros de inicialização além daqueles usados no 3-PG são: a deposição atmosférica de nitrogênio e a fixação de nitrogênio. O modelo Biome-BGC foi executado para valores sem limitações nesses. Na Tabela 4.10, apresentam-se os valores desses parâmetros de inicialização que foram considerados para executar o modelo.

Tabela 4.10. Parâmetros físicos do sítio para executar o modelo Biome-BGC

Parâmetro físico de sítio	Unidade	Valor do parâmetro
Número de anos meteorológicos	Nº	6
Número de anos simulados	Nº	7
Primeiro ano de simulação	Nº	2006
Concentração atmosférica constante CO ₂	ppm	350
Profundidade efetiva do solo	metros	1
Porcentagem de areia	%	25
Porcentagem de silte	%	15
Porcentagem de argila	%	60
Altitude do sítio da vegetação	metros	1100
Latitude do sítio	- hemis sul	-15.46
Radiação albedo do sítio	SEM	0.2
Deposição atmosférica de nitrogênio	kgN/m ² /ano	0.01
Fixação de nitrogênio	kgN/m ² /ano	0.08
Teor de neve no solo	Kg/m ²	0
Proporção inicial de saturação de água no solo	SEM	0.5

4.2.3.3 Parâmetros meteorológicos do modelo Biome-BGC.

Os valores dos parâmetros meteorológicos, ver Figura 4.8, assim como os usados pelo modelo 3-PG, foram tomados da estação meteorológica da FAL. Esses dados foram adequados ao Biome-BGC em termos de unidades e à base diária das medições dos parâmetros como estipula o Biome-BGC.

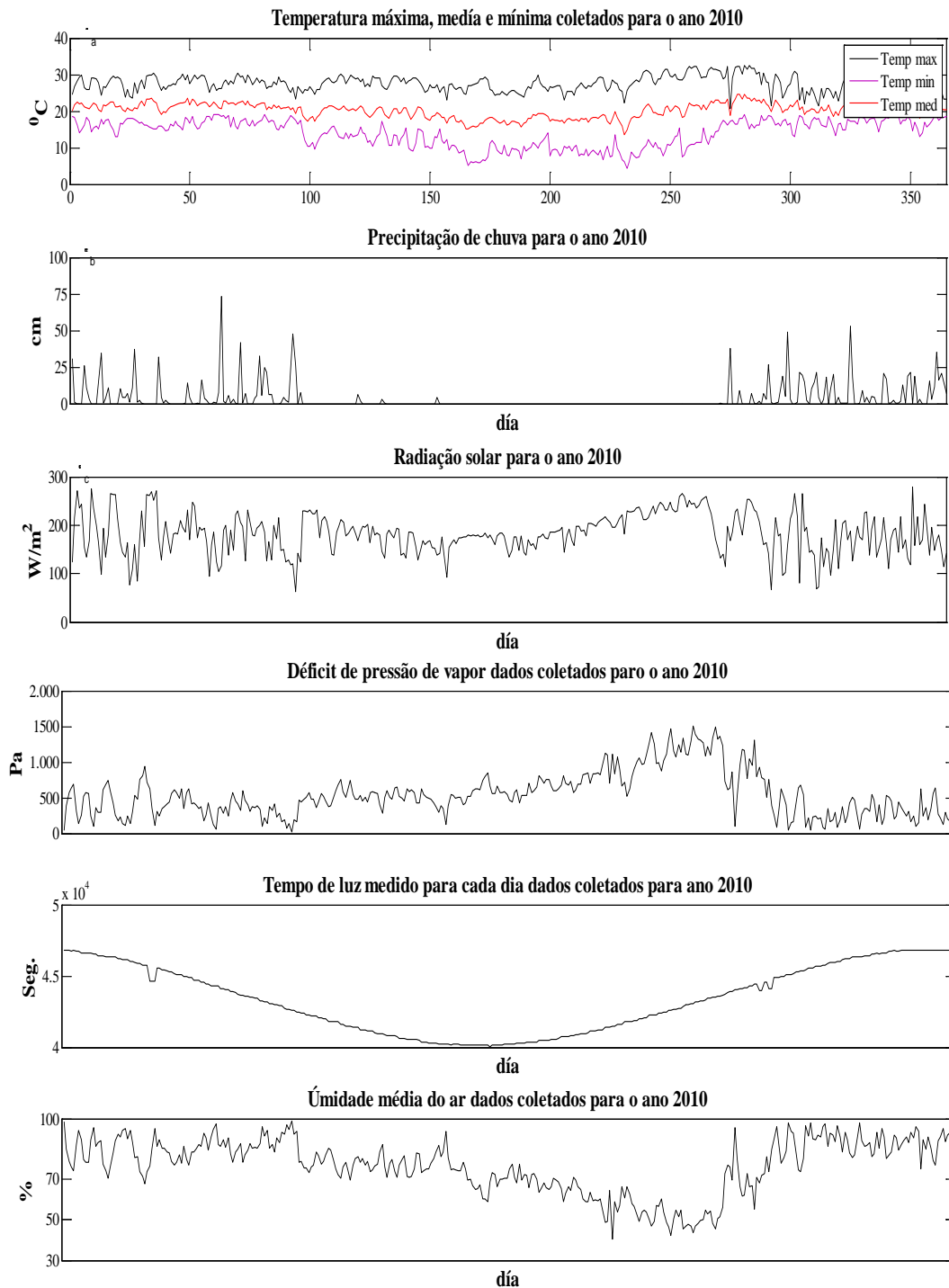


Figura 4.8. Dados meteorológicos usados pelo modelo Biome-BGC da FAL ano 2010

4.2.4 Análise de sensibilidade para o modelo Biome-BGC

Igualmente para o Biome-BGC a análise de sensibilidade foi feita como sugeriu Sands (2002). Para o Biome-BGC a análise de sensibilidade foi feito para os seguintes parâmetros:

Parâmetros ecofisiológicos

São 34 parâmetros ecofisiológicos que formam 7 grupos de parâmetros gerais mencionados anteriormente na seção 0, a simulação foi realizada para os grupos de alocação, relações C/N, frações de lignina, celulose e lábil e parâmetros morfológicos, os outros três grupos de parâmetros não foram simulados devido a sua irrelevância para plantações homogêneas ou falta de parâmetros concretos para o tipo do bioma do eucalipto estudado neste trabalho.

O intervalo de valores para cada um dos parâmetros ecofisiológicos para fazer a análise de sensibilidade, foi baseado no estudo feito por (White, Thornton, Running, Nemani, 2000), eles estabeleceram esses intervalos de valores nos parâmetros ecofisiológicos para diferentes tipos de vegetação.

4.2.4.1 Parâmetros de alocação

Relações alométricas entre reservatórios de tipos de plantas diferentes controlam como o carbono produzido fotossinteticamente é alocado em todo o ecossistema. O Biome-BGC considera a alocação de carbono para reservatórios grandes de plantas, para as raízes (finas e grossas), troncos e folhas. Nesse sentido o valor padrão deste parâmetro foi tomado do 3-PG, sendo 1,0 para a fração de C nas folhas/C nas raízes finas, 2,2 para C nas folhas/C no tronco, 0,1 para C na madeira nova/C total da madeira viva e 0,3 para C no tronco/C nas raízes grossas. A alocação de carbono na vegetação é usada em uma solução algébrica para determinar a alocação de carbono em todo o ecossistema.

4.2.4.2 Parâmetros de diferentes relações Carbono/Nitrogênio

A relação C/N é usada para caracterizar a concentração de nutrientes na folha, serapilheira, raízes finas, madeira viva e reservatórios de madeira morta. O valor padrão deste parâmetro foi tomado da literatura, sendo, 42 para fração de C/N na folha, 93 para C/N na serapilheira, 42 para C/N nas raízes finas, 50 para C/N na madeira viva e 730 para C/N na madeira morta. Este parâmetro exerce forte controle sobre a demanda de N da planta, decomposição e respiração. A relação de C/N na folha (kgC/kgN) determina três fatores importantes: O N necessário para a construção de folhas (assim IAF); o teor de N disponível para investimentos na maquinaria fotossintética e, taxas de respiração da folha. A relação de C/N na serapilheira (kgC/kgN), refletem o teor de N na folha depois da retranslocação, baseia-se em dados de um grande número de espécies. A relação de C/N de

raízes finas (kgC/kgN), controla o N necessário para a construção de raízes finas, mas não tem efeito sobre a absorção de nutrientes ou água.

4.2.4.3 Parâmetros de frações de Lignina, Celulose e Lábil.

Cada reservatório de planta inserindo a sub-rotina de decomposição do solo é dividido em três reservatórios (duas para madeira morta): lábil, celulose e lignina. O fracionamento nesses reservatórios controla quão rapidamente a decomposição ocorre. As porcentagens padrão para este parâmetro foi tomado da literatura. Ver Tabela 4.11.

Tabela 4.11. Porcentagem padrão de lábil, celulose e lignina no eucalipto.

Porcentagens	Raízes finas	Serapilheira	Madeira morta
% Lábil	30	32	---
% Celulose	45	44	24
% Lignina	25	24	76

4.2.4.4 Parâmetros morfológicos

O Biome-BGC modela três parâmetros morfológicos (AFE, IAF e a relação de folhas sombreadas/iluminadas). Estes parâmetros controlam como o carbono é morfológicamente distribuído na folha e no dossel. O valor padrão deste parâmetro é de 12 (kgC/m²) para AFE, 2,0 para IAF e 2,0 para a relação de folhas sombreadas/iluminadas. Este último parâmetro é importante, já que, as folhas sombreadas investem, relativamente, maior proporção de fotoassimilados no aumento da área foliar, para maximizar a captação da luz disponível. Geralmente possuem folhas delgadas, maior área foliar específica (AFE) e folhas com menor densidade de massa. As alterações anatômicas que ocorrem nas folhas que se desenvolvem sob baixa luminosidade têm papel importante na adaptação da planta às condições impostas pelo ambiente. Geralmente estas alterações estão relacionadas com o aumento da captação e aproveitamento da luz incidente, recurso que limita o crescimento na sombra, aumentando a eficiência fotossintética da planta (LAMBERS et al., 1998)

Parâmetros de inicialização

Neste grupo de parâmetros também é apresentada a sensibilidade da PPL aos parâmetros meteorológicos.

4.2.4.5 Deposição e fixação de nitrogênio

A fixação biológica de nitrogênio (FBN) é o processo pelo qual este elemento químico é captado do ambiente e é convertido em compostos nitrogenados (como amônio ou nitrato) usados em diversos processos químico-biológicos do solo especialmente importantes para a nutrição de plantas. A deposição se da por nutrientes presentes no ar, no período de pouca chuva, na seca, intemperização das rochas e a fixação biológica do nitrogênio se da pela fertilização ou nitrientes no solo. O uso desse parâmetro a partir de valores de $0.01 \text{ kgN/m}^2/\text{ano}$, é semelhante a valores de fertilidade 1.0 no modelo 3-PG. O valor padrão deste parâmetro na deposição de N é de $0.01 \text{ kgN/m}^2/\text{ano}$ e na fixação de N é de $0.01 \text{ kgN/m}^2/\text{ano}$.

4.2.4.6 Biomassa inicial

O Biome-BGC não considera a vegetação como uma soma de árvores, quer dizer não trata árvores individuais como no 3-PG, e sim, a quantidade inicial do estoque de carbono nas folhas e troncos para todo o ecossistema por unidade de área. O valor padrão deste parâmetro na modelagem da PPL foi tomado do 3-PG, $0,006 \text{ (kg/m}^2\text{)}$ para folhas e $0,005 \text{ (kg/m}^2\text{)}$ para troncos.

4.2.4.7 Tipo de solo

Como no modelo 3-PG simulou-se para 4 tipos diferentes de solo: Argiloso, Argiloso com silte, Arenoso e arenoso com silte. Esses valores são dados em porcentagens. A soma total de todas as porcentagens deve ser igual a 100%. Apresentou-se o a variação da PPL para diferentes tipos de solos.

4.2.4.8 Saturação de água no solo.

Este parâmetro é uma relação de saturação de água no solo. Ele toma a precipitação que é um dado diário e com relação à saturação calcula qual é a quantidade de água que tem no solo.

4.2.4.9 Índice de radiação de albedo.

A radiação refletida pela superfície é chamada de radiação albedo. Diferentes tipos de superfície apresentam comportamentos distintos em relação à quantidade de energia enviada de volta para a atmosfera, influenciando no equilíbrio do sistema Terra-Atmosfera. Informações sobre essa variável ainda é escassa, normalmente são medidas em áreas experimentais, e por períodos determinados, o que impossibilita ter uma análise em grande escala do seu comportamento espacial e temporal, embora diversos estudos tenham demonstrado o índice de radiação albedo para superfícies como floresta, grama, asfalto, gelo e água. É comum encontrar que para floresta a radiação albedo esta em torno de 0,2 e não tem variações significativas diferentes a esse valor. No Biome-BGC esse parâmetro tem variação de 0 a 1 sem unidades, sendo 0 uma superfície que absorve a totalidade da radiação incidente como é o caso da água, e valores perto de 1 para superfícies como o gelo refletem quase a totalidade da radiação em torno de 0,8.

4.2.4.10 Variação dos dados meteorológicos

Simultaneamente ao que foi feito para a simulação da variação de dados climáticos no modelo 3-PG, no Biome-BGC as simulações do clima correspondem aos anos 2006 até 2010 tomados da estação meteorológica da FAL. O período de simulação foi de 7 anos. As simulações foram conduzidas considerando os 5 anos de dados meteorológicos e repetindo os dados 2006 e 2007 para completar os 7 anos. Para análise de sensibilidade considerou-se simulações repetindo dados meteorológicos de cada um dos 5 anos de dados disponíveis pelos 7 anos de simulação.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados e analisados os resultados da modelagem com o 3-PG e o Biome-BGC, de acordo com as metodologias explicitadas no capítulo anterior. Com o objetivo de facilitar a metodologia da análise, esses resultados serão apresentados na seguinte sequência:

- Comparação de resultados dos dois modelos Biome-BGC e 3-PG, para PPL, Evapotranspiração (ET), IAF e biomassa total na vegetação.
- Modelagem da PPL com variação dos parâmetros como fertilidade do solo, teor de água máxima, clima, biomassa inicial, entre outros para determinar a sensibilidade da PPL na variação desses parâmetros no modelo 3-PG.
- Modelagem da PPL com variação de parâmetros do local e parâmetros ecofisiológicos para determinar a sensibilidade da PPL na variação desses parâmetros no modelo Biome-BGC.
- Parametrização do 3-PG baseado nos resultados do Biome-BGC e comparação destes para PPL, Evapotranspiração (ET), IAF e biomassa total da vegetação. É também feita uma análise espectral para o 3-PG, o Biome-BGC e o 3-PG parametrizado.
- Caracterização do teor de CO₂ absorvido por cada árvore de eucalipto na plantação e o CO₂ emitido à atmosfera na produção de ferro-gusa.

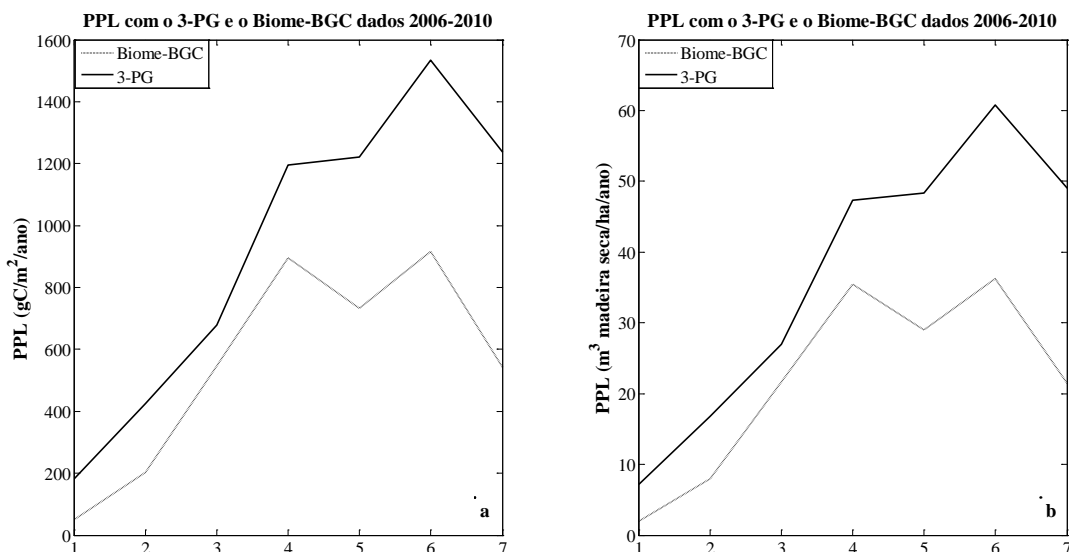
5.1 COMPARAÇÃO DA MODELAGEM 3-PG E BIOME-BGC

Na Figura 5.1 são apresentados os resultados da modelagem para PPL, ver Figura 5.1 (a) e (b). O índice de área foliar e evapotranspiração são mostrados na Figura 5.1 (c) e (d), respectivamente e biomassa total da plantação é exibido na Figura 5.1 (e). Essas estimativas são feitas para o 3-PG e Biome-BGC. A PPL modelada com o 3-PG apresenta valores maiores ao longo dos 7 anos do que com o Biome-BGC, sendo que os valores do Biome-BGC foram mais consistentes aos valores normalmente mostrados na literatura.

O índice de área foliar é uma variável biofísica que expressa a taxa de crescimento de uma determinada comunidade vegetal. (Lang e Mcmurtrie, 1992). O IAF representa a capacidade que a planta tem para explorar o espaço disponível sendo a razão entre a superfície total das folhas de vegetais em relação à superfície total do terreno. As folhas são os órgãos fotossintetizantes por excelência, conseqüentemente há uma estreita relação entre o IAF e a atividade fotossintética. Na Figura 5.1 (b) é modelada o IAF para 3-PG e Biome-BGC. Para os dois modelos o IAF apresentou correlação com a produtividade. Isto pode ser devido ao fato de que o aumento do IAF aumenta a disponibilidade de superfície fotossinteticamente ativa (Vargas et al. 2002), por tanto a PPL.

A evapotranspiração (ET) é a forma pela qual a água da superfície terrestre passa para a atmosfera no estado de vapor. Esse processo envolve a evaporação da água no solo e da vegetação úmida (que foi interceptada durante uma chuva) e a transpiração dos vegetais (IFSC LCE BIOLOGIA, 2001). Na Figura 5.1 (d) é apresentada a variação da ET para o 3-PG e Biome-BGC para 7 anos de dados, sendo que para o 3-PG é mais constante no período simulado apresentado a maior diferença nesse parâmetro entre os dois modelos. Isto pode ser devido à diferença dos modelos em estimar a ET, já que o 3-PG é muito mais empírico, embora não se pode definir como boa ou má estimativa da ET.

A biomassa total na vegetação corresponde à quantidade de carbono alocado em raízes, tronco e folhas na plantação. Este é um parâmetro correlacionado com a PPL como é mostrado na Figura 5.1 (e). Onde para o 3-PG apresentou valores maiores de PPL e quantidade de biomassa que para o Biome-BGC.



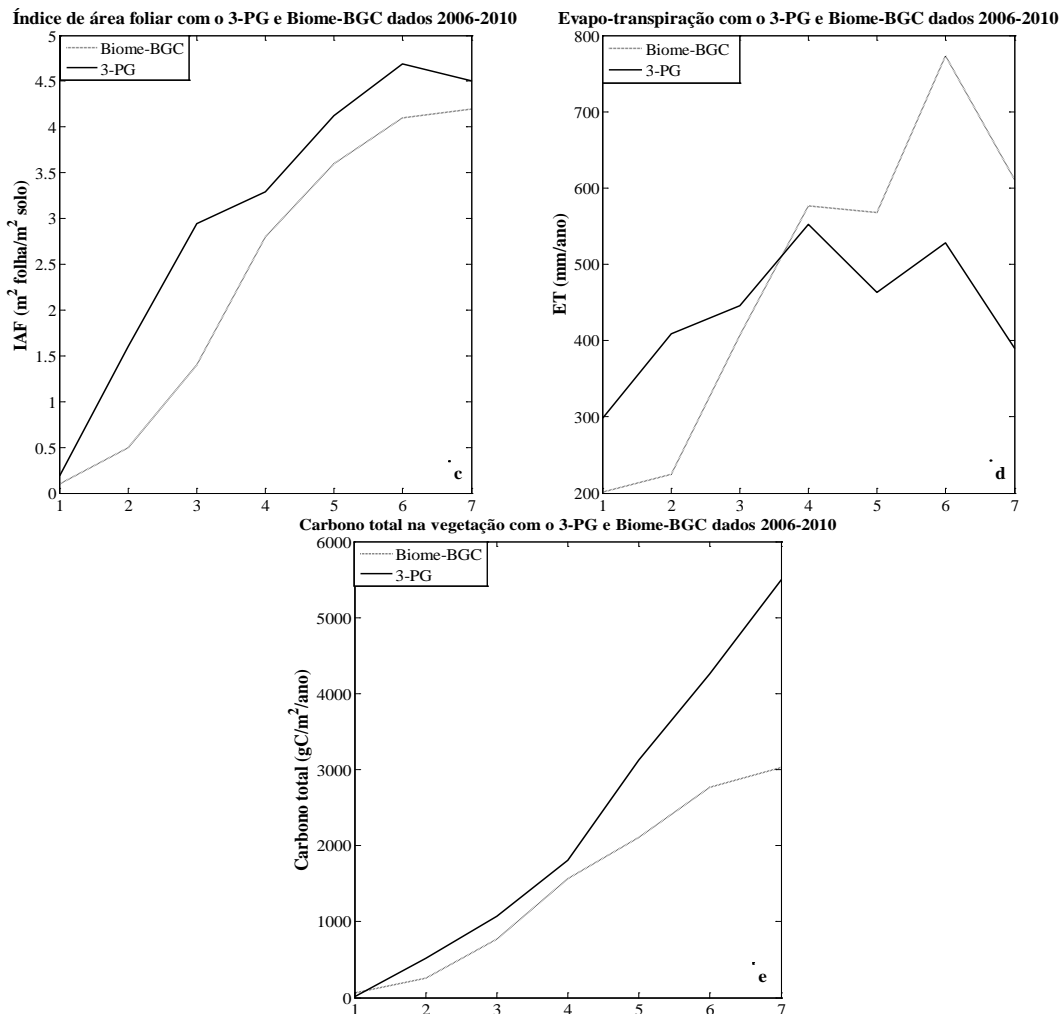


Figura 5.1. Comparação de resultados dos modelos Biome-BGC e 3-PG, para PPL, Evapotranspiração (ET), IAF e biomassa total da vegetação.

5.2 RESULTADOS DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARA O 3-PG

5.2.1 Fertilidade do solo e Biomassa inicial

A fertilidade do solo no 3-PG entra no modelo como valor empírico de 0 a 1, 0 corresponde a um solo como baixíssima fertilidade, e 1 corresponde a um solo completamente fértil, sem restrições de nutrientes. Para cada valor de fertilidade o modelo mostra diferentes PPL. Na Figura 5.2 (a) mostra-se essas variações para valores de fertilidade apresentados na Tabela 5.1. Como é de se esperar, a PPL é maior para fertilidade do solo com valor de 1, e menor para a fertilidade do solo com valor de 0, e variações intermediárias de PPL para fertilidade do solo intermediárias. O modelo apresenta variações consideráveis de PPL com os diferentes valores de fertilidade. Esse fato sugere que a determinação do mesmo é crucial para a obtenção de resultados confiáveis.

Tabela 5.1. Valores de índice de fertilidade do solo para cada simulação no modelo 3-PG

Simulação	Índice de Fertilidade do solo
1	0,2
2	0,8
3	1,0
4	0,0
5	0,5

A quantidade de biomassa inicial é um parâmetro de peso/árvore, quer dizer, o tamanho inicial das mudas de eucalipto na plantação, ver Tabela 5.2. As variações na biomassa inicial apresentam pouca sensibilidade na PPL, para os 7 anos da plantação ver Figura 5.2 (b), isto é explicado pelo fato do que o parâmetro determinante na biomassa na plantação é o estoque (quantidade de árvores por hectare), simulado neste trabalho para 1111 árvores/ha.

Tabela 5.2. Valores de biomassa inicial de folhas, tronco e raízes para cada simulação no 3-PG.

Simulação	Biomassa inicial de folhas (t/ha)	Biomassa inicial de tronco (t/ha)	Biomassa inicial de raiz (t/ha)
1	0,1	0,07	0,05
2	0,05	0,03	0,02
3	0,168	0,106	0,099
4	1,0	1,0	0,5
5	10	20	15

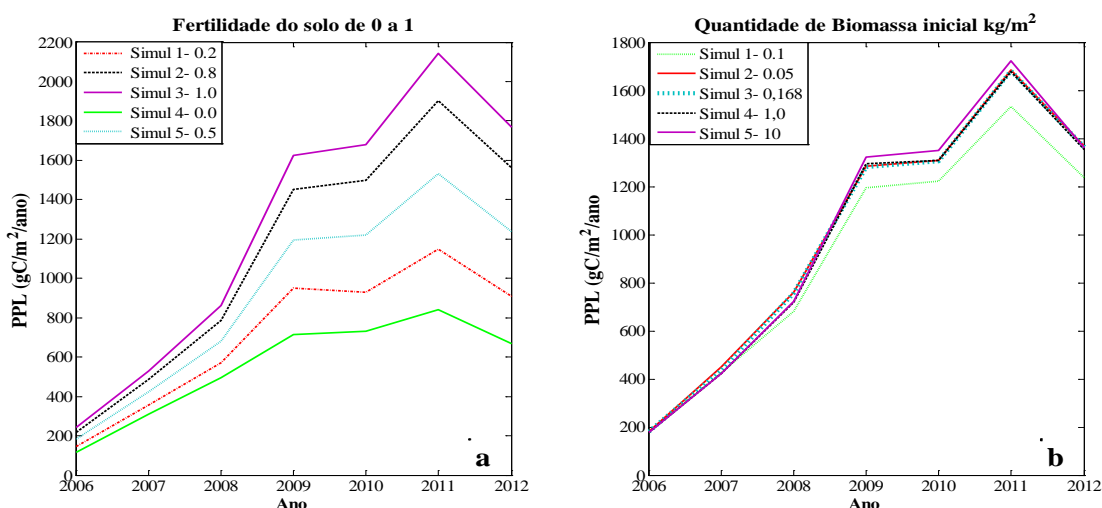


Figura 5.2 - Estimativa da PPL com variação da fertilidade do solo e variação da biomassa inicial plantada no 3-PG

Na Figura 5.3 é mostrada a relação estreita entre o índice de fertilidade e a PPL, assim o índice de fertilidade é um parâmetro limitante na PPL, além da sua importância na estimativa deste, já que fornece variações muito grandes na modelagem da PPL.

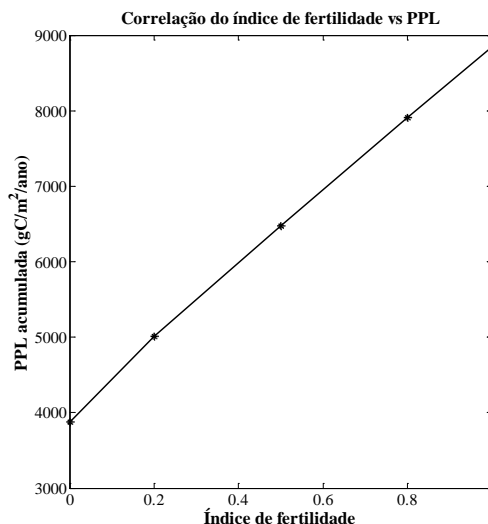


Figura 5.3. Variação da PPL com o índice de fertilidade no 3-PG

5.2.2 Tipo de solo e quantidade de água máxima no solo

O tipo de solo é outro parâmetro analisado para conhecer quão grande é a sensibilidade da PPL aos diferentes tipos de solo. Com variações no tipo de solo, simulou-se 4 tipos diferentes apresentados na Tabela 5.3. Cada parâmetro do tipo do solo foi uma entrada para estimar a PPL. Os resultados podem ser observados na Figura 5.4 (a), com pequenas variações na PPL nos primeiros anos da plantação (3 anos) e variações um pouco maiores para os últimos três anos, embora não apresente pouca sensibilidade a esse parâmetro. No entanto, cada tipo de solo vai apresentar diferentes capacidades de retenção de água. Como a PPL é bastante sensível a essa capacidade, conforme mostrado na Figura 5.4 (b), isso faz com que os tipos de solo tenham um papel mais relevante na PPL do que mostrado Figura 5.4 (a). Este é um exemplo típico de parâmetros correlacionados como foi mencionado anteriormente.

Tabela 5.3. Tipos de solo simulados na sensibilidade no 3-PG

Simulação	Índice de Fertilidade do solo
1	Argiloso
2	Argila com conteúdo de silte
3	Arenoso com conteúdo silte
4	Arenoso

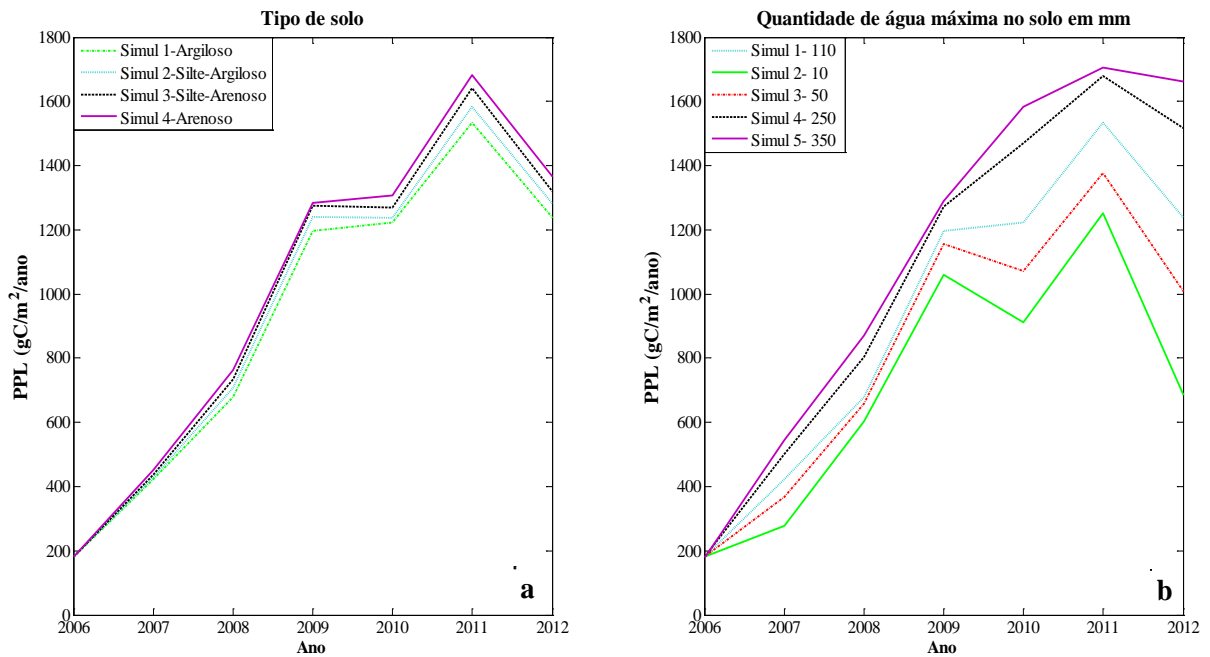


Figura 5.4. Estimativa da PPL, variação do tipo de solo e variação quantidade máxima de água disponível no solo do modelo 3-PG.

5.2.3 Quantidade de água inicial no solo e variação de dados climáticos por ano.

A quantidade inicial de água no solo para o 3-PG não tem variação perceptível na PPL ver Figura 5.5 (a). Isso pode ser devido ao fato de que o 3PG foi executado a partir do período úmido, período de precipitação de chuva. As chuvas do período reabastecem o sítio plenamente.

Com relação à variação de dados climáticos como precipitação, radiação solar e temperatura, observa-se que tem sensibilidade muito alta na PPL, como pode ser visto na Figura 5.5 (b). Essas variáveis climáticas são parâmetros de entrada no 3-PG em períodos mensais. Como foi mencionado anteriormente, os valores climatológicos foram simulados para cada ano (exemplo os valores do ano 2006 foi simulado para 7 anos estimando a PPL), e assim para cada ano até o 2010. No entanto, tem-se uma última simulação, correspondente a estimar a PPL baseado em todos os valores climatológicos contínuos (ano 2006-2010), para completar os 7 anos repetiu-se os anos 2006 e 2007 na simulação. Nota-se que a PPL tem crescimento contínuo até o sexto ano e estabiliza-se no sétimo ano para todas as simulações com repetições de dados meteorológicos. Além disso, as variações da PPL na simulação usando todos os dados meteorológicos esta intimamente relacionada à variabilidade meteorológica.

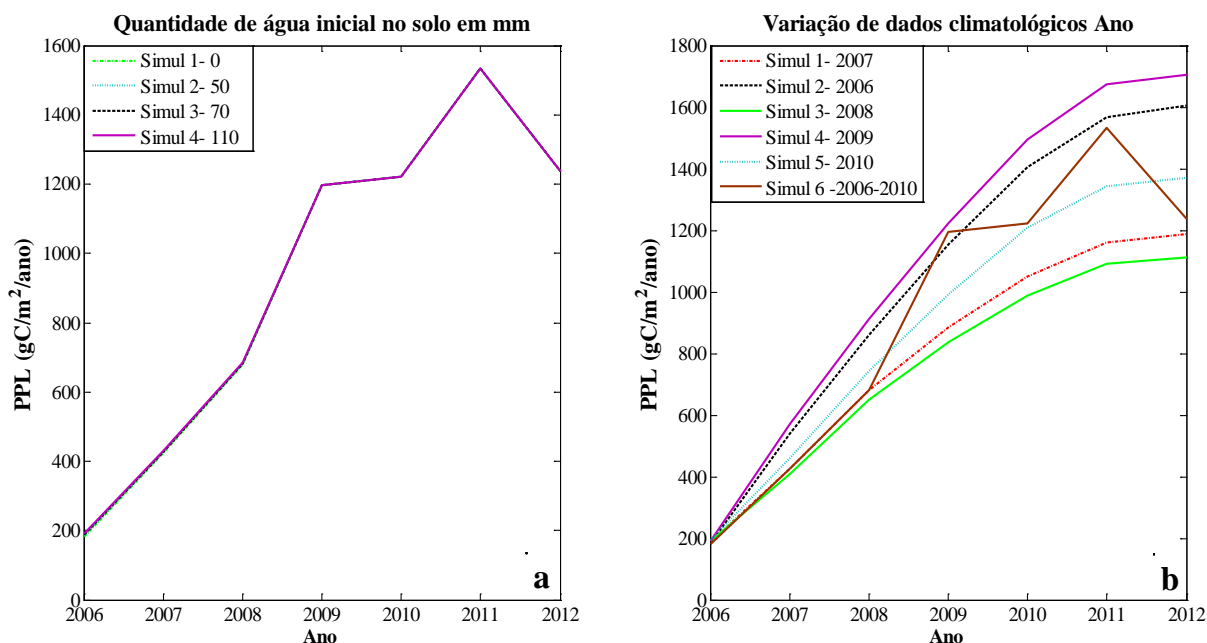


Figura 5.5. Estimativa da PPL, variação da quantidade inicial de água no solo e variação de dados climáticos de 2006-2010 no 3-PG.

Segundo Sands (2004) os parâmetros podem ser classificados de acordo com o maior ou menor efeito que a alteração tem nos resultados do modelo ver Tabela 4.8 mostrada no capítulo anterior. Essa sensibilidade solo é usada na estimativa da PPL. Este autor expressa que variações em parâmetros de entrada de 100% não têm variações na PPL (parâmetro de saída) de mais de 10%, Os resultados são essencialmente independentes do valor do parâmetro; variações de 10% até 20% no parâmetro de saída, Os resultados dependem moderadamente do valor do parâmetro; e porcentagens acima disso, os resultados são fortemente dependentes do valor do parâmetro. Na Tabela 5.4, vemos o resumo da sensibilidade dos parâmetros de entrada na PPL para o modelo 3-PG.

Tabela 5.4. Resumo da análise de sensibilidade da PPL para diferentes parâmetros de entrada no modelo 3-PG.

Parâmetro Modelo 3-PG	Sensibilidade	Porcentagem de variação
Fertilidade do solo	Alta	60%
Biomassa inicial	Média	12%
Tipo de solo	Baixa	9%
Quantidade de água máxima no solo	Alta	52%
Quantidade de água inicial no solo	Baixa	1%
Dados meteorológicos	Alta	49%

5.3 RESULTADOS DA ANÁLISE DA SENSIBILIDADE PARA O BIOME-BGC

A unidade da PPL é $\text{gC/m}^2/\text{ano}$ no Biome-BGC. Considerou-se os parâmetros do local ou inicialização e os parâmetros ecofisiológicos por grupos como foi descrito no capítulo quatro.

Parâmetros Ecofisiológicos

Parâmetros ecofisiológicos do Biome-BGC são analisados em 4 grupos, alocação de carbono, proporção de nitrogênio, parâmetros morfológicos e proporção de lábil, lignina e celulose do ecossistema. A simulação foi realizada para os grupos de alocação, relações C/N, frações de lignina, celulose e lábil e parâmetros morfológicos. Os outros três grupos de parâmetros não foi simulado devido a sua irrelevância para plantações homogêneas ou falta de parâmetros concretos para o tipo do bioma do eucalipto estudado neste trabalho.

5.3.1 Alocação de carbono e proporção de nitrogênio nas folhas, tronco e raízes.

Alocação de carbono é o parâmetro que mede como é distribuído o carbono na planta (folhas, tronco e raízes). Na Figura 5.6 (a), mostra-se que a sensibilidade da PPL é maior enquanto que a proporção de carbono nas folhas é maior, e menor a sensibilidade enquanto a proporção de carbono nas raízes é maior. Isto é devido a que quanto maior o teor de carbono nas raízes menor são os nutrientes e água no solo. Os picos de PPL se apresentam em proporção de carbono maior nas folhas que nas raízes, isso é devido a que quando menos carbono para as raízes e mais carbono para as folhas, maior será a subsetibilidade do ecossistema ao estresse hídrico. Os valores de entrada no Biome-BGC de alocação de carbono são relações entre cada uma das partes da planta. Cada valor desse parâmetro é mostrado na Tabela 5.5.

Tabela 5.5. Alocação de carbono nas folhas, tronco, raízes para cada simulação no Biome-BGC.

Simulação	C em folhas novas/C em raízes finas novas (kgC/kgC)	C em folhas novas/C tronco (kgC/kgC)	C do total de madeira nova/C madeira viva nova (kgC/kgC)	C tronco /C em raízes grossas (kgC/kgC)
1	1.00	2.20	0.10	0.30
2	1.76	1.99	0.08	0.20
3	0.40	3.30	0.08	0.20
4	0.52	2.11	0.08	0.375

A proporção de carbono/nitrogênio é um parâmetro que indiretamente mede a quantidade de nutrientes na folha, tronco e raiz, O nitrogênio é um dos elementos de grande impacto na produtividade das florestas, e seu efeito nas plantas pode ser avaliado por meio de técnicas de diagnóstico do estado nutricional. Na Figura 5.6 (b), se pode observar que teores altos de nitrogênio na planta para folhas, tronco e raízes apresenta maior PPL na floresta plantada, isso devido ao fato do nitrogênio representar os nutrientes da planta, de forma similar ao índice de fertilidade no modelo 3-PG. Esse parâmetro de entrada no Biome-BGC é de kgC/kgN, isso para folhas, troncos e raízes. Os valores para cada simulação desse parâmetro é apresentado na Tabela 5.6.

Tabela 5.6. Frações C/N em folhas, serapilheira, madeira morta e raízes finas usadas em cada simulação no Biome-BGC.

Simulação	Fração de C/N na folha (kgC/kgN)	Fração de C/N na serapilheira (kgC/kgN)	Fração de C/N nas raízes finas (kgC/kgN)	Fração de C/N na madeira viva (kgC/kgN)	Fração de C/N na madeira morta (kgC/kgN)
1	51	134	82	50	1400
2	23	104	54	50	555
3	30	114	82	50	1250
4	42	49	42	50	300

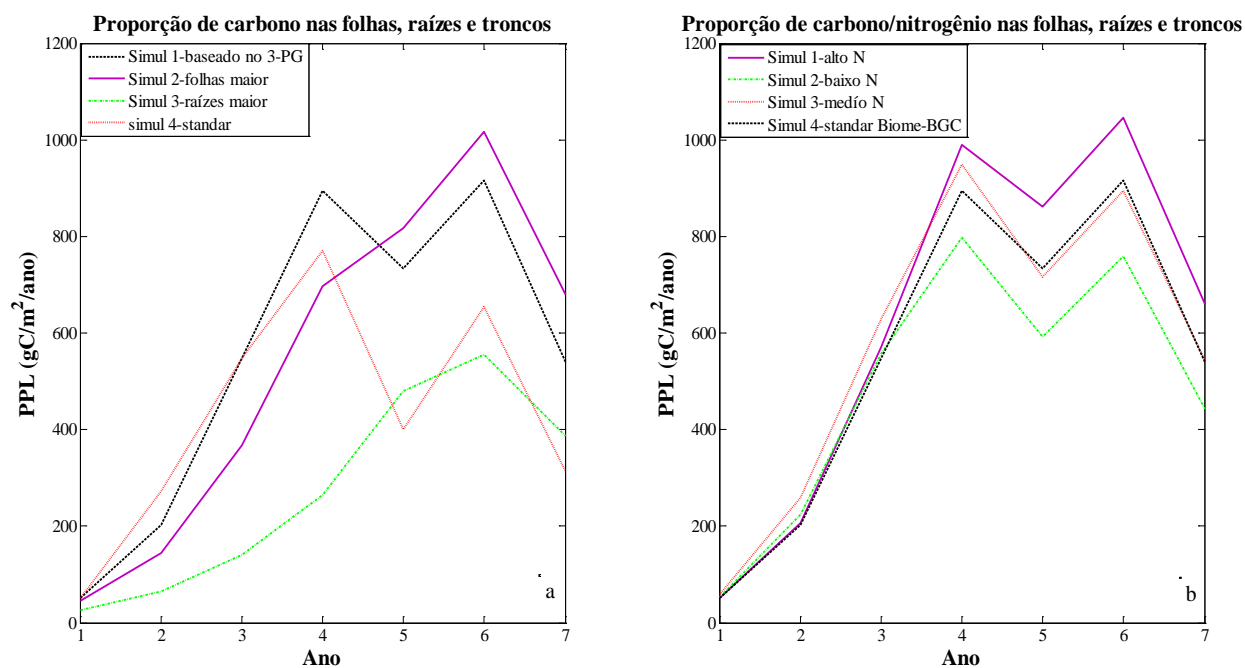


Figura 5.6. Estimativa da PPL em relação à proporção de carbono e relação carbono-nitrogênio em folhas, tronco, e raízes Biome-BGC.

5.3.2 Frações de lignina, lábil e celulose e Parâmetros morfológicos.

Teores de lignina, lábil e celulose em madeira viva e madeira morta determina a rapidez da decomposição da serapilheira no solo, para gerar mais nutrientes para a planta. Em geral. Na Tabela 5.7 são apresentados os valores das simulações feitas para modelar a PPL para esse parâmetro. Entra no Biome-BGC como porcentagem de cada uma das frações de lábil, celulose e lignina, embora nem sempre a soma total seja de 100%, isso é devido a que na madeira morta a fração de lábil é zero. Na Figura 5.7 (a) mostra-se diferentes porcentagens de lábil, lignina, e celulose na planta e como variações de cada uma afeta a PPL. A variação pequena é um reflexo do fato de que a floresta já tem os nutrientes suficientes recolhidos da deposição e fixação do nitrogênio.

Tabela 5.7. Porcentagens de frações de Lábil, Celulose e Lignina para cada simulação do Biome-BGC.

Simulação	Fração de Lábil, Celulose, e Lignina na folha serapilheira. %			Fração de Lábil, Celulose, e Lignina nas raízes finas. %			Fração de Lignina e Celulose, na madeira morta. %	
1	32	44	24	30	45	25	76	24
2	27	49	24	15	47	38	70	30
3	36	43	21	33	45	22	72	28
4	34	44	22	31	45	24	71	29

Parâmetros morfológicos da planta (AFE, relação de folhas sombreadas/iluminadas e IAF). Na Tabela 5.8 são mostrados os valores dos parâmetros para cada simulação. Esses parâmetros controlam como o carbono na folha é morfológicamente distribuído na folha e no dossel. Na Figura 5.7 (b), observa-se que a PPL tem variações muito grandes para variações no parâmetro morfológico, sendo de PPL muito baixa para parâmetro com AFE muito pequena, como é o caso da simulação 3. Isto, de acordo com Evans & Poorter (2001), o aumento da AFE é o fator mais importante na maximização do ganho de carbono por unidade de massa foliar, como foi visto no parâmetro de alocação de carbono (seção 5.3.1), a quantidade de carbono, e onde o carbono é alocado influencia fortemente a PPL. É por isso que a alocação de carbono e parâmetros morfológicos são parâmetros correlacionados.

Tabela 5.8. Valores morfológicos para cada simulação (área específica da folha, fração índice de área foliar, fração de área folhas sombreadas / iluminadas no Biome-BGC).

Simulação	Área específica da folha (kgC/m ²)	Índice de área foliar	Fração de área específica das folhas sombreadas / iluminadas
1	12	2.0	2.0
2	21.0	2.45	1.5
3	5.60	2.0	2.5
4	44	2.3	2.0

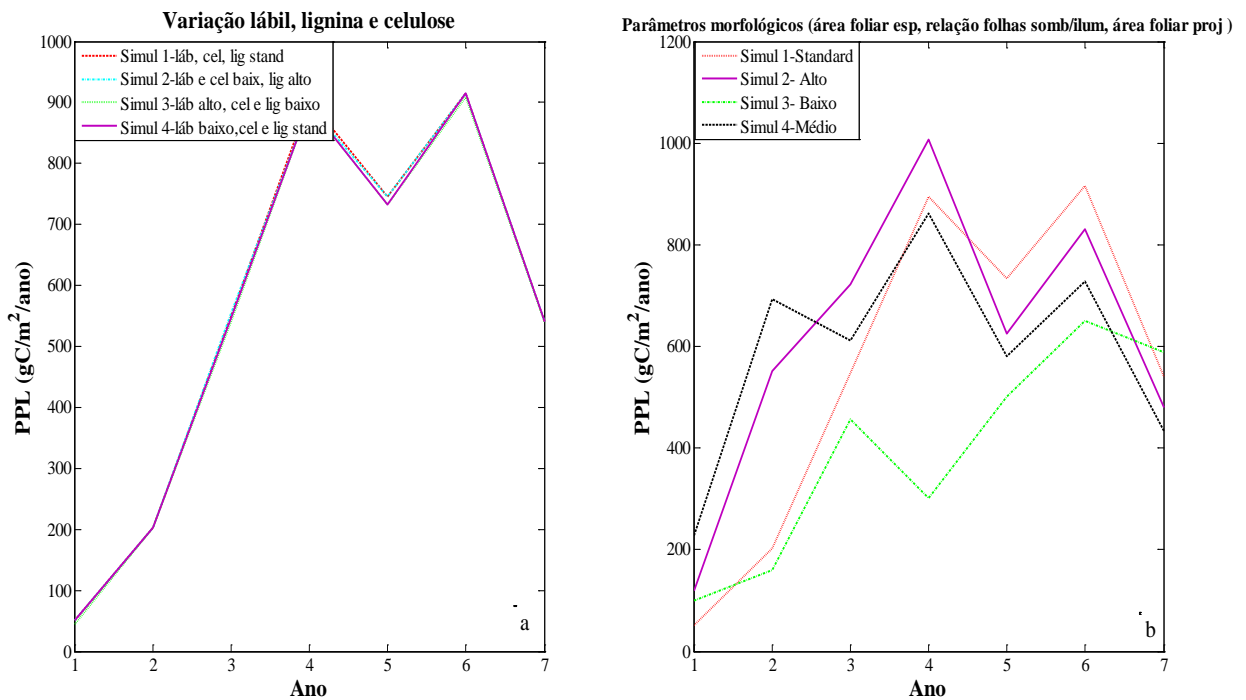


Figura 5.7. Estimativa da PPL, com variações de parâmetros morfológicos, como área específica foliar, índice de área, relação de folhas sombreadas-iluminadas Biome-BGC.

Parâmetros de inicialização ou de local.

Os parâmetros de inicialização ou de sitio no Biome-BGC são 6 parâmetros similares aos parâmetros do 3-PG analisados anteriormente.

5.3.3 Deposição, fixação de nitrogênio e biomassa inicial da plantação.

Este parâmetro é análogo ao parâmetro de fertilidade do 3-PG. Para o Biome-BGC, a deposição e a fixação de nitrogênio são parâmetros de entrada em KgN/m²/ano, a Figura 5.8 (a), apresenta a sensibilidade da PPL com a variação deste parâmetro, de acordo aos valores apresentados na Tabela 5.9. Assim como no 3-PG a PPL modelada apresenta alta sensibilidade ao parâmetro de fertilidade. Embora a partir de valores maiores de 0.01

kgN/m²/ano, a PPL não continua aumentando e se estabiliza. Pode-se então afirmar que a partir desse valor, que os nutrientes não são o fator limitante ao crescimento.

Tabela 5.9. Quantidade de deposição e fixação de nitrogênio no local da plantação, para cada simulação no Biome-BGC.

Simulação	Deposição de N (kgN/m ²)	Fixação de N(kgN/m ²)
1	0.0001	0.004
2	0.001	0.006
3	0.01	0.01
4	0.1	0.1

Para o Biome-BGC a entrada da biomassa inicial se dá de forma diferente do 3-PG. Ver valores de cada simulação na Tabela 5.10, devido ao fato de que o Biome-BGC foi criado sem considerar uma estrutura de árvores por área, e sem uma biomassa inicial por unidade de área. Por essa razão o parâmetro de biomassa inicial no Biome-BGC é muito importante na sensibilidade da PPL, ver Figura 5.8 (b). Observa-se que valores muito grandes de biomassa inicial fornecem PPL constantes ao longo do tempo, isto é devido a que o Biome-BGC entende que é uma floresta madura, que não esta em crescimento.

Tabela 5.10. Quantidade de Biomassa inicial na plantação para folhas e troncos para cada simulação no Biome-BGC

Simulação	Quantidade de C inicial na folha (kg/m ²)	Quantidade de C inicial no tronco (kg/m ²)
1	0.0006	0.0001
2	0.006	0.005
3	0.06	0.1
4	0.6	3.0
5	0.0012	0.006

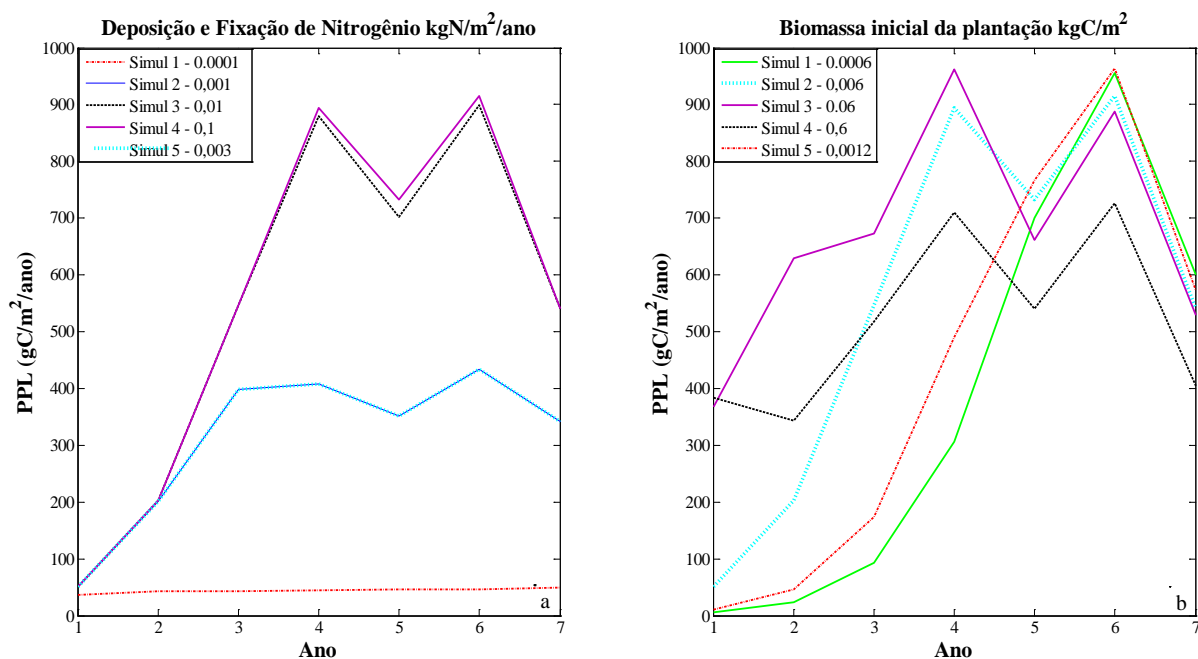


Figura 5.8. Estimativa da PPL, para diferentes valores de deposição e fixação de nitrogênio no ecossistema no Biome-BGC.

5.3.4 Tipo de solo e saturação da água no solo

Para variações no tipo do solo o Biome-BGC precisa da porcentagem de argila, areia, e silte do solo, ver Tabela 5.11. A soma total é de 100% como foi mencionado no capítulo 4, para efeitos de comparação com o 3-PG, para a porcentagem de areia no solo maior que 40%, assume-se que o solo é arenoso e a porcentagem de argila no solo maior que 40%, assume-se que o solo é argiloso. A variação desses parâmetros gerou pequenas variações na estimativa da PPL, ainda menor que no caso do 3-PG ver Figura 5.9 (a). Esse fato sugere que a parametrização de retenção de água incorporado no modelo não reflete a realidade.

Tabela 5.11. Porcentagens de areia, silte, arena para cada tipo de solo simulado no modelo Biome-BGC.

Simulação	Tipo de solo	% Argila	% Silte	% Areia
1	Argiloso com silte	50	25	25
2	Arenoso	20	10	70
3	Argiloso	70	10	20
4	Arenoso com silte	10	25	65

A saturação no solo entra no Biome-BGC como um parâmetro adimensional de 0 a 1, sendo 0 solo sem saturação de água e 1 solo completamente saturado. Na Figura 5.9 (b),

observa-se que a saturação no solo afeta muito pouco a sensibilidade da PPL. Com as chuvas do período úmido o solo é reabastecido de água e, assim como no 3-PG, a quantidade de água inicial se torna irrelevante.

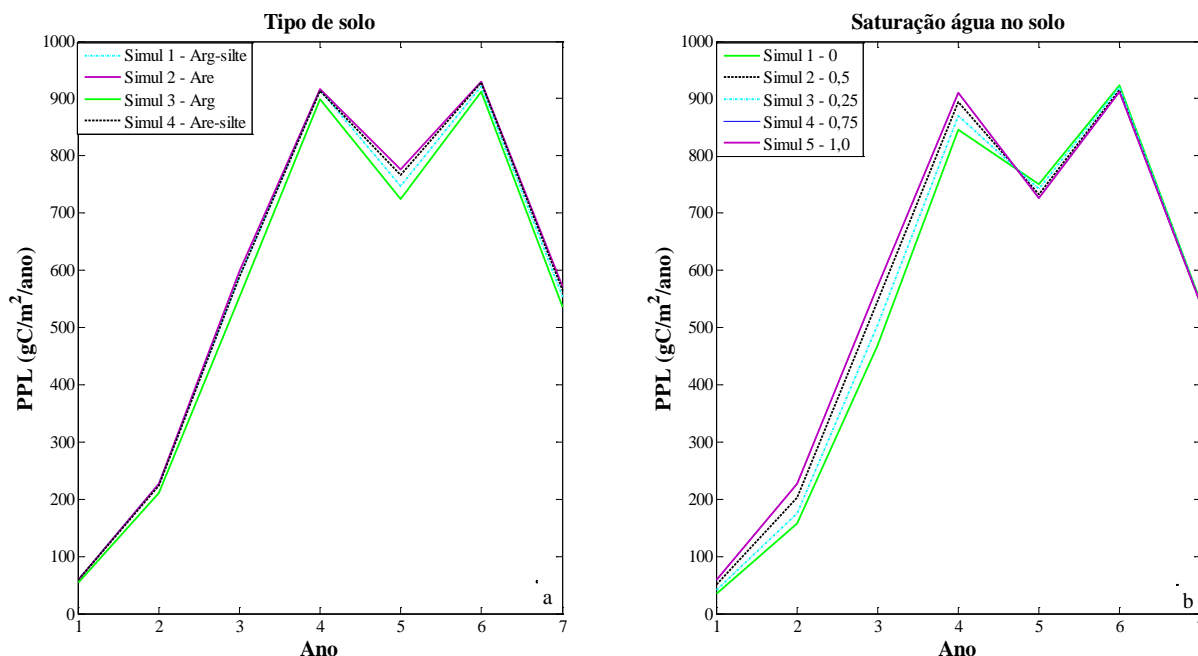


Figura 5.9. Estimativa da PPL, para diferente teor de biomassa inicial na vegetação e teor de água inicial no solo modelo Biome-BGC.

5.3.5 Índice de radiação albedo e meteorologia.

Na Figura 5.10 (a). Observa-se que o Biome-BGC estima a PPL de acordo com dados de radiação albedo fornecidos pela literatura. Quanto mais radiação absorve a floresta, maior é a PPL. Para uma plantação vegetal o índice de radiação albedo esta em torno de 0.2 e não varia muito desse valor.

Os dados meteorológicos são uns dos parâmetros de entrada no Biome-BGC. Na Figura 5.10 (b), observa-se a sensibilidade da PPL para cada um dos dados meteorológicos de cada ano a partir do ano 2006. A simulação desses valores climáticos ao igual que o 3-PG foram simulados para cada ano, e a simulação, correspondente a estimar a PPL baseado em todos os valores climatológicos contínuos (ano 2006-2010), para completar os 7 anos repetiu-se os anos 2006 e 2007 na simulação igual que no 3-PG. A PPL modelada pelo Biome-BGC apresenta um comportamento interessante que reflete a interação da meteorologia com os processos biogeoquímicos do modelo, devido às diferenças apresentadas na PPL para cada ano de simulação.

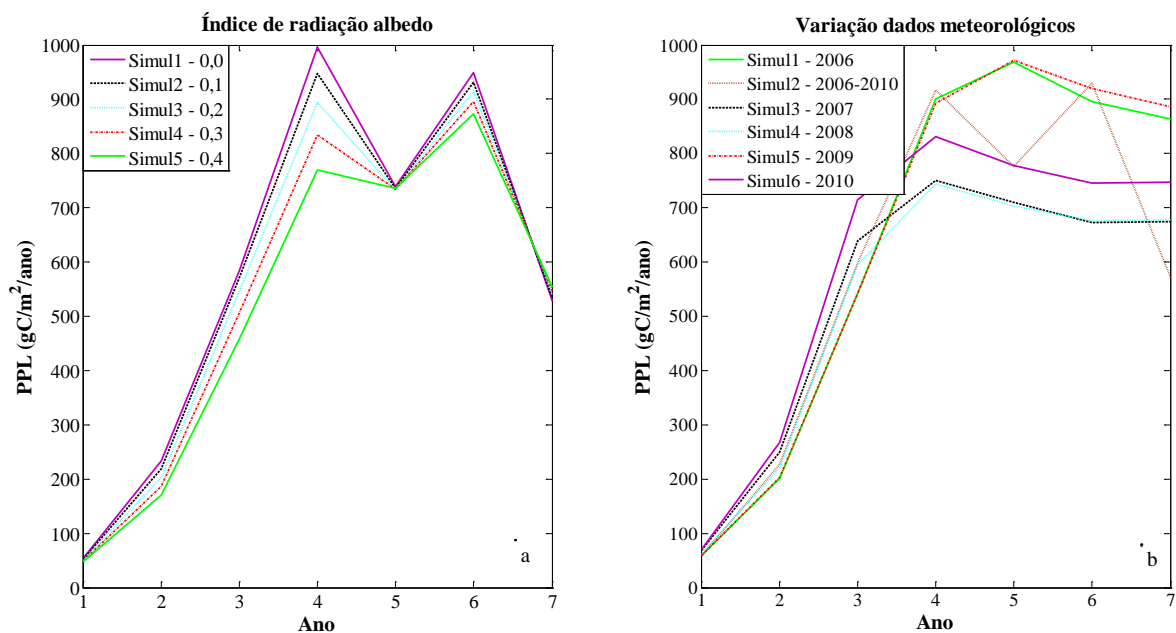


Figura 5.10. Variação do índice de radiação albedo do local e variação do clima no Biome-BGC, na estimativa da PPL.

A Tabela 5.12 mostra a porcentagem de variação da PPL para cada parâmetro de sítio e o parâmetro ecofisiológico do Biome-BGC

Tabela 5.12. Resumo da análise de sensibilidade da PPL no modelo Biome-BGC, para diferentes parâmetros (inicialização e ecofisiológicos).

Parâmetro Modelo Biome-BGC	Sensibilidade	Porcentagem de variação
Parâmetros ecofisiológicos		
Alocação de carbono	Alta	61%
Relação carbono/nitrogênio	Alta	47%
Frações de lignina, lábil, e celulose.	Baixa	8%
Parâmetros morfológicos	Alta	37%
Parâmetros de inicialização		
Deposição e fixação de nitrogênio	Alta	63%
Biomassa inicial	Alta	72%
Tipo de solo	Media	18%
Quantidade de água inicial no solo	Baixa	10%
Índice de radiação albedo do sitio	Alta	45%
Varição dados climáticos	Alta	41%

A análise revelou uma alta sensibilidade da PPL de todas as variáveis testadas para os parâmetros locais seguintes: deposição e fixação de nitrogênio ($\text{kgN/m}^2/\text{ano}$), biomassa

inicial (kgC/m^2), dados meteorológicos. Para parâmetros ecofisiológicos como alocação de carbono, relação carbono/nitrogênio (kgC/kgN) e parâmetros morfológicos se mostraram altamente sensíveis.

5.4 PARAMETRIZAÇÃO DO 3-PG COM OS DADOS DO BIOME-BGC.

As diferenças nos resultados na estimativa da PPL, ET, IAF e biomassa total na vegetação do 3-PG e Biome-BGC, permite perceber a divergência nos fundamentos de cada modelo. O Biome-BGC um modelo mais fundamental nos seus processos biogeoquímicos e o 3-PG um modelo mais empírico. É por isto que um estudo sinérgico dos dois modelos para diminuir as diferenças nas estimativas é feito com base nos valores dos parâmetros do Biome-BGC, para obter resultados nas estimativas do 3-PG melhor caracterizados e mais próximos a valores encontrados na literatura. Na Tabela 5.13 são apresentados os novos valores dos parâmetros no modelo 3-PG, obtendo um modelo 3-PG parametrizado.

Tabela 5.13. Parâmetros do Biome-BGC utilizados para executar 3-PG parametrizado

Parâmetro	Unidade	Biome-BGC	3-PG	3-PG parâmetros Biome-BGC
<i>Parâmetros do local</i>				
Deposição atmosférica de nitrogênio	$\text{kgN/m}^2/\text{ano}$	0.01	Fert. = 0.5	1
Fixação de nitrogênio	$\text{kgN/m}^2/\text{ano}$	0.04	Fert. = 0.5	1
Proporção inicial de saturação de água no solo	sem	0.5	Água inicial 50 mm	55
<i>Parâmetros morfológicos</i>				
Área específica da folha	kgC/m^2	12	7.53	12
IAF	m^2/m^2	2,0	3.33	2,0
<i>Taxas de condutância e limitações</i>				
Condutância estomática máxima	m/s	0.005	0.02	0.005
Condutância da camada limite	m/s	0.01	0.2	0.01
DPV/redução no começo da CE	MPa	1800	287	1800
<i>Parâmetros vários</i>				
Índice de interceptação da água	1/IAF/dia	0.15	0.15	0.15
Coeficiente de extinção de luz	$I_0/I_1/IAF$	0.5	0.5	0.7
Porcentagem de N Rubisco na folha	%	0.06	Fert. = 0.5	1

5.4.1 Comparação do Biome-BGC e 3-PG parametrizado

Na Figura 5.11 são mostrados os resultados na estimativa da PPL, IAF, ET e biomassa total na vegetação para o Biome-BGC e 3-PG parametrizado. Os resultados fornecem estimativas mais próximas para cada uma das variáveis modeladas para os dois modelos. Isto possivelmente é devido, a que para parametrizar o 3-PG valores na condutância estomática e limite foram diminuídos significativamente como é mostrado na Tabela 5.13. E a atividade estomática é um importante fator fisiológico no controle dos processos vitais da planta, além de ser um indicador das condições hídricas do ambiente. Assim, a condutância é proporcional ao diâmetro da abertura estomática, e as variações na abertura dos estômatos são devido às diferenças do potencial de água na folha, que dependem da interação de diversos fatores ambientais.

A atividade estomática responde às mudanças das condições climáticas, independentes da região. Alterações na quantidade de RFA, disponível ou no déficit de pressão de vapor (parâmetro que foi fortemente aumentado no 3-PG parametrizado – ver Tabela 5.13), também são prontamente sentidas pela vegetação (Ferreira da Costa *et al.*, 2003). É por isto que mudando a condutância estomática e limite, e o DPV, ajudaram a fornecer resultados mais próximos aos resultados apresentados no Biome-BGC, ver Figura 5.11 e Figura 5.1, do que o 3-PG sem parametrizar.

É interessante o fato que o IAF para o 3-PG parametrizado é maior nos primeiros anos de simulação, mas a partir do quarto ano é menor, estabilizando-se em $3,5 \text{ m}^2/\text{m}^2$ e $4,2 \text{ m}^2/\text{m}^2$ com o Biome-BGC. A PPL em comparação com o 3-PG sem parametrizar também se aproximou bastante dos resultados do Biome-BGC, sendo até o ano 4 uma relação muito estreita. A biomassa total da vegetação (quantidade de carbono total), apresentou uma relação muito estreita para todos os anos tanto para o Biome-BGC e o 3-PG parametrizado. Um fenômeno diferente acontece com a evapotranspiração, embora tenha favorecido a parametrização, continua apresentando grandes diferenças nos resultados a partir de quarto ano.

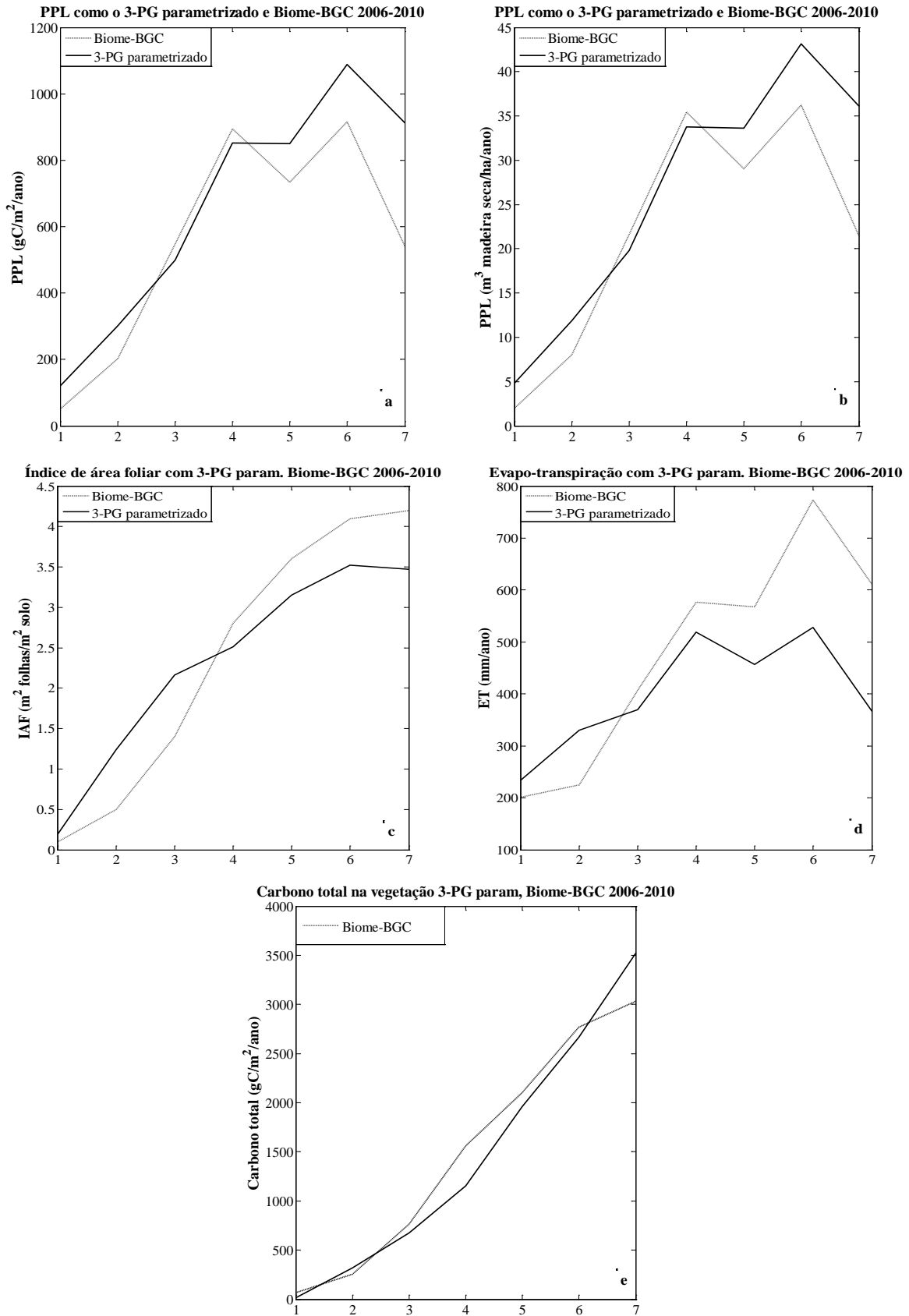


Figura 5.11. PPL, Evapotranspiração (ET), IAF, biomassa total da vegetação modelado com Biome-BGC e com 3-PG parametrizado (parâmetros utilizados no Biome-BGC).

5.4.2 Análise espectral do Biome-BGC, 3-PG e 3-PG parametrizado.

A análise espectral neste trabalho tem o propósito de entender o comportamento da série de dados, ou seja, identificar padrões geradores da série temporal (semanal, mensal, anual e inter-anual). Pode-se pensar no ecossistema como um sistema dinâmico que produz saídas (fluxos) a partir de dados de entrada (forçamentos). O espectro representa como este sistema modula a variabilidade de entrada na produção de variabilidade nas saídas. O estudo corresponde a análise espectral de dados da PPL e ET para o 3-PG, Biome-BGC e 3-PG parametrizado. A estimativa da densidade espectral de potência foi determinada diretamente a partir da série temporal modelada, para os últimos 3 anos, corresponde a 1095 dados (valores diários) para cada variável modelada. Na Figura 5.12, é mostrado um esquema da variabilidade nas entradas no modelo (Temperatura, radiação solar, precipitação, entre outras), e a variabilidade nas saídas do modelo (PPL, ET).

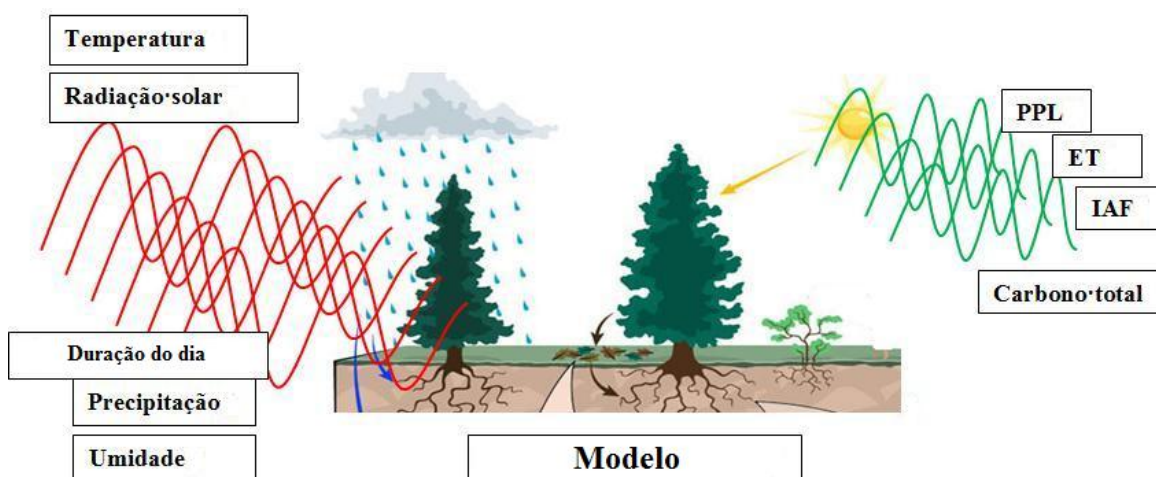


Figura 5.12. Representação esquemática do ecossistema modelado

Na Figura 5.13 (a) é claro o pico na escala sazonal, como era de se esperar devido aos períodos seco e úmido (vide figura 4.7). É mostrado também como Biome-BGC e 3-PG representam a variabilidade da PPL (variável de saída) com a mudança sazonal de forma similar. Ou seja, os dois modelos são suscetíveis semelhantemente à variabilidade das entradas do modelo como radiação solar e precipitação, etc, às mudanças das estações climáticas da região estudada, neste caso, a época da seca e a época da chuva na FAL para a PPL. É interessante notar que, embora o modelo 3-PG parametrizado se ajusta melhor aos resultados de PPL do Biome-BGC, ver Tabela 5.14, a nova parametrização do 3-PG (baseada no Biome-BGC) teve um efeito de reduzir a variabilidade de PPL modelada significativamente.

Na Figura 5.13 (b) é mostrado como o Biome-BGC apresenta uma variabilidade maior na ET que o 3-PG em todas as escalas. Ou seja, na ET (variável de saída) o Biome-BGC é mais suscetível à variabilidade das entradas na época de chuva e seca que o 3-PG. Quando o modelo 3-PG é parametrizado se ajusta um pouco melhor aos resultados de ET do Biome-BGC, ver Tabela 5.14, No entanto, contrário ao observado para PPL, o efeito da nova parametrização na variabilidade de ET é desprezível.

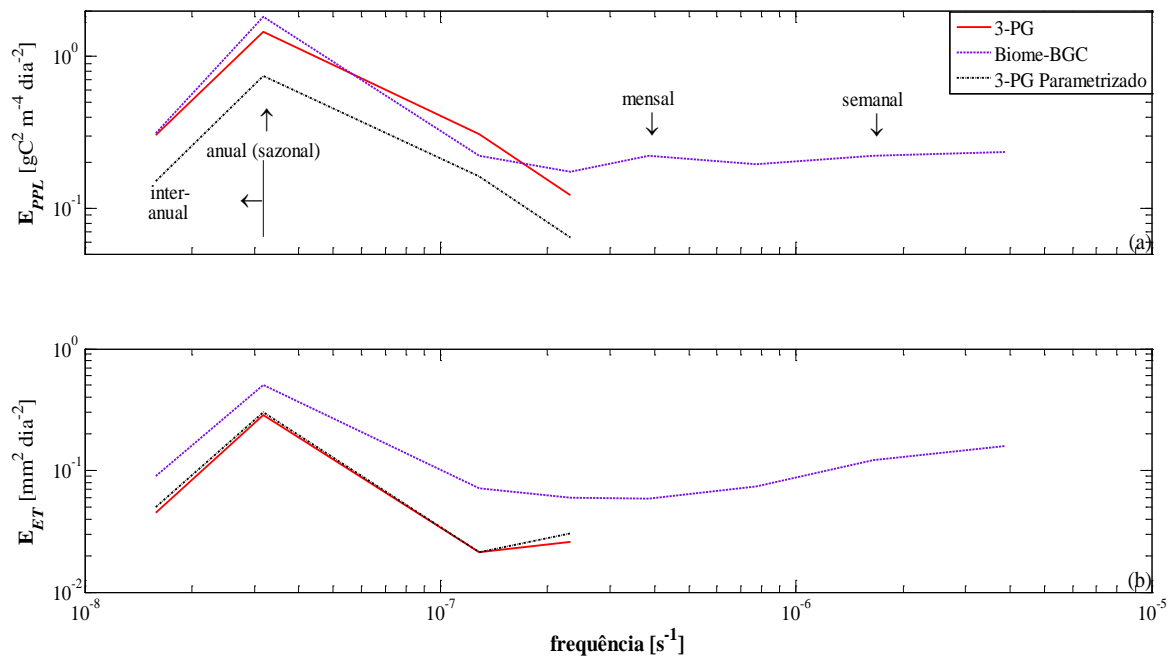


Figura 5.13. Análise espectral da PPL e ET para o 3-PG, Biome-BGC e 3-PG parametrizado

Tabela 5.14. Resultados da PPL e ET para os últimos 3 anos com o 3-PG, Biome-BGC e 3-PG parametrizado

Modelo	3-PG	Biome-BGC	3-PG parametrizado
Soma da PPL (gC/m^2)	3992	2188	2850
Soma da ET (mm)	1381	1951	1411

5.5 BALANÇO DE CARBONO DA FLORESTA ENERGÉTICA USADA NA SUDERÚRGICA DE FERRO-GUSA

Através do processo conhecido como pirólise, a madeira é transformada em carvão. Para isso, a madeira é aquecida com gases provenientes da sua própria combustão parcial, para atender, assim, as necessidades de remoção dos materiais voláteis, ricos em água,

oxigênio e compostos orgânicos leves e oleosos. Os produtos resultantes são o carvão vegetal (CV), os voláteis condensáveis e os gases (alcatrão, licor pirolenhoso e gases não condensáveis). A função principal, da carbonização da madeira é concentrar energia em volume disponível para diferentes usos (SAMPAIO, 2008).

O carvão vegetal consegue fixar entre 70 e 80% do carbono presente na madeira, quando é carbonizado a temperaturas máximas de 500°C, com temperaturas mais elevadas (1.000°C) o processo se denomina de *Coqueificação*, onde são zerados os voláteis, e o carvão produzido, chega a possuir 95% de carbono fixo e 2.000 kJ/kg (SAMPAIO, 2008). Segundo esse mesmo autor, a perda de rendimento gravimétrico (massa de carvão vegetal sobre massa de madeira), no processo de coqueificação não compensaria seu ganho em poder calorífico e portanto, sua utilização. Aliás, é necessária a manutenção dos voláteis no carvão para serem posteriormente liberados no processo de redução no alto-forno para produção de ferro-gusa. No processo de carbonização, o índice técnico de maior importância é o Rendimento Gravimétrico. Esse índice entrega dá o valor em percentagem (%) do peso do CV seco versus o peso da madeira seca utilizada para produzir este CV. Um esquema é mostrado na Figura 5.14, para representar o balanço de carbono de uma floresta energética até produzir ferro-gusa.

Para fazer uma comparação do 3-PG e do Biome-BGC decidiu-se por mudar a PPL para unidades melhor conhecidas de produtividade florestal em plantações de eucalipto ($\text{m}^3/\text{ha}/\text{ano}$ de madeira seca), tendo como base que a unidade da variável de saída da PPL para o 3-PG é toneladas de madeira seca/hectare/ano. Devido às unidades da PPL para o modelo Biome-BGC, que é de gramas de carbono/ m^2/ano , decidiu-se fazer a mudança das unidades, com base o **Fator de Conversão: 0,5** toneladas de carbono/tonelada de biomassa seca. Este valor representa a fração média de carbono na biomassa lenhosa seca das florestas plantadas e foi considerado o valor *default* do IPCC 2006.

Na Figura 5.11 (b), se apresenta a estimativa da Produtividade Primária Líquida tanto para o modelo Biome-BGC como para o 3-PG parametrização, também se pode observar que a estimativa da PPL é próximo para os dois modelos, em torno de $40 \text{ m}^3/\text{hectare}/\text{ano}$.

Tomando como base uma produtividade em torno de $40 \text{ m}^3/\text{hectare}/\text{ano}$, equivalente a $20 \text{ t}_{\text{madeiraseca}}/\text{ha}/\text{ano}$, de acordo com a densidade da madeira de 0.5

toneladas/m³. Com o valor de conversão de 0.5 toneladas de carbono/tonelada de biomassa seca (IPCC), citado anteriormente, a quantidade de carbono estocado por hectare por ano é de **10 tC/ha/ano**.

Como o CV fixa uns 70% a 80% do carbono da madeira, utiliza-se uma média de conversão do carvão vegetal de 70% do carbono, portanto temos:

$$\text{Carvão vegetal} = 10 \text{ tonC} \times 0.75 = 7,5 \text{ ton CV}$$

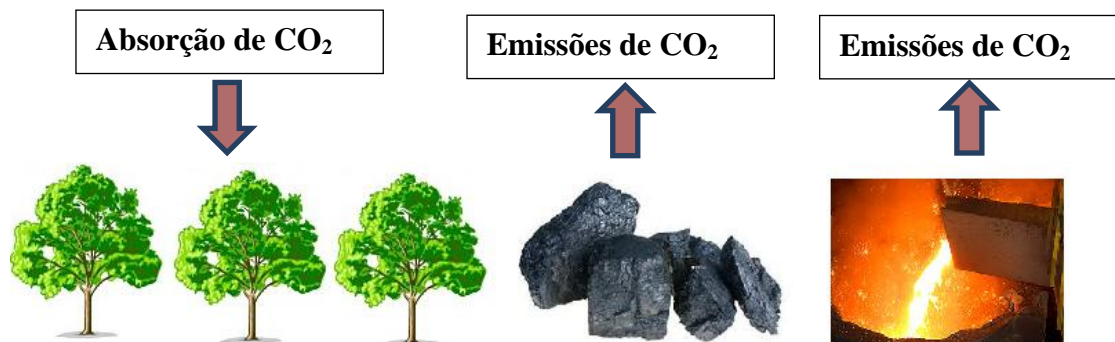


Figura 5.14. Representação do processo de CO₂ da floresta energética a ferro-gusa

5.6 EMISSÕES DE GEE NA CARBONIZAÇÃO

No processo da carbonização da madeira ocorrem emissões de diversos gases, entre eles o CO₂ e CH₄. O cálculo da massa de gases emitidos é realizado a partir da análise elementar dos gases não condensáveis deste processo. Nas práticas atuais, 5% da madeira enforada é queimada para aquecimento da carga do forno. A composição da fumaça liberada nessa fase não é conhecida. Considerando a pequena massa queimada, supõe-se a conversão completa do carbono em CO₂ equivalente (FERREIRA, 2000).

Os principais fatores que influenciam as emissões de GEE na carbonização são: densidade aparente da madeira; densidade aparente do carvão; rendimento gravimétrico da carbonização e temperatura da carbonização. As emissões de GEE para produzir uma tonelada de CV foram estimadas em 1,22t de CO₂ e 0,031 t de CH₄. Isto considerando um rendimento gravimétrico de 19% (FERREIRA, 2000). Considerando um Potencial de aquecimento global (GWP) de 25 para o CH₄ e baseado no estudo do Ferreira, estima-se que na produção de 7,5 ton CV são emitidos **15 ton CO₂**

5.7 EMISSÕES DE CO₂ NA PRODUÇÃO DE FERRO-GUSA

O processo de transformação do minério (óxidos de ferro) em metal (ferro) ou em ligas de ferro com carbono (ferro-gusa) e com silício (ferro-silício), usando o carbono e os voláteis presentes no carvão mineral ou CV produz emissões de GEE para a atmosfera (SAMPAIO, 2004). No estudo de FERREIRA (2000) foram estimadas as emissões de carbono na redução de minério de ferro em ferro-gusa. Estas emissões foram divididas para três gases de efeito estufa (CO₂, CO e CH₄), apresentados na Tabela 5.15. O que levou a uma emissão estimada de 0,58 toneladas de CO₂eq para cada tonelada de ferro-gusa produzido. Observando a Tabela 5.15 e a Figura 5.15, tem-se que com 7,5 ton CV pode-se produzir 10,7 toneladas de Ferro-gusa emitindo **6,2 ton de CO₂ eq.**

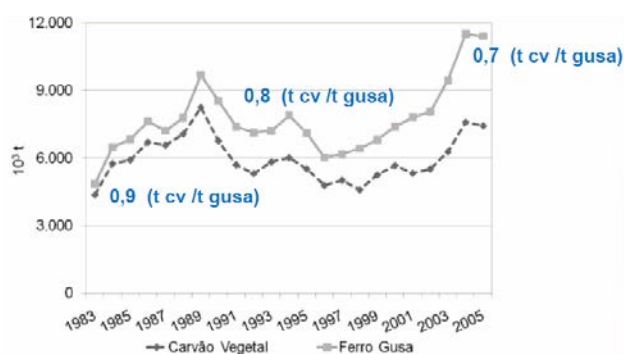


Figura 5.15. Teor de Carvão Vegetal para produzir 1 ton de ferro-gusa, adaptado de Sinifer, 2007

Tabela 5.15. Emissões de GEE do processo de produção de ferro-gusa adaptado de Ferreira 2000

Processo	GEE (t / t de ferro-gusa)			Total
	CO ₂	CO	CH ₄	CO ₂ eq
Emissão	0,170	0,122	0,002	0,579

Voltando ao diagrama inicial ver Figura 5.14, tem-se o seguinte balanço de carbono de floresta energética na produção de ferro-gusa. Ou também para o caso de estudo de ter 1111 árvores/ha, de eucalipto observa-se que a absorção e a emissão de CO₂ por cada árvore para produzir ferro-gusa se mostra na Figura 5.16.

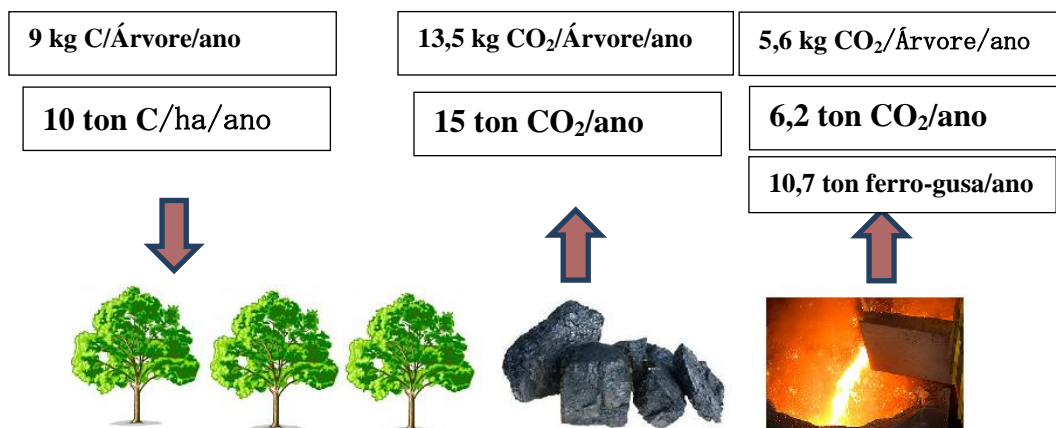


Figura 5.16. Balanço energético de carbono de acordo às estimativas da PPL pelos modelos Biome-BGC e 3-PG, por árvore e por hectare.

Por definição, 1 kg de CO₂ vale 0,2727 kg de carbono equivalente, já que considera apenas a massa das moléculas de carbono em um quilo de dióxido de carbono. A plantação de eucalipto consegue captar 10 toneladas de carbono por hectare por ano, para uma árvore, isso representa 9 kg de carbono por ano. Em termos de CO₂ a plantação de eucalipto para fins energéticos em análise neste estudo, consegue captar **36.7t CO₂/ha/ano** ou **33kg CO₂/árvore/ano**.

A análise feita, comparando as emissões de CO₂ na produção do CV e ferro-gusa e o sequestro de carbono pelo crescimento da plantação de eucalipto endossa a proposta de estabelecimento de crédito internacional, ou bônus, pelo sequestro de carbono. Conforme se vê na Figura 5.16, na produção do CV liberam-se 15t de CO₂ e 6.2t de CO₂ na produção do ferro-gusa, por cada 10.7 toneladas de ferro-gusa produzido, ao passo que a biomassa da plantação sequestra 36.7t de CO₂, no ciclo completo desde a plantação do eucalipto até a produção do ferro-gusa.

A questão em exame comportaria estudos mais refinados como a análise de ciclo de vida, incluindo, do lado do carvão vegetal e do ferro-gusa, análise dos insumos energéticos diretos (acionamento de máquinas usadas na moderna indústria do carvão vegetal e ferro-gusa, etc.) e indiretos (energia empregada na extração e beneficiamento dos nutrientes aplicados na assistência à floresta plantada, etc.).

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Devido a não ter dados experimentais para fazer comparativos e seguimentos da PPL nos modelo 3-PG e Biome-BGC, não se pode estabelecer quais destes modelos estima com maior precisão a PPL, fluxos de carbono, entre outros da floresta para fins energéticos plantada na FAL. Por isso é necessário obter esses dados experimentais, para chegar a obter modelos calibrados e validados para área de estudo. Embora não se tenha comparado com dados experimentais, observou-se que os modelos podem aproximar-se aos dados reais encontrados na literatura para PPL, partindo de parâmetros de entrada também achados na literatura.

É de grande importância a análise de sensibilidade dos parâmetros feitos neste trabalho para o 3-PG e Biome-BGC, já que permite para trabalhos futuros concentrar maiores esforços em parâmetros específicos de entrada na estimativa e modelagem da PPL para esse tipo de florestas com fins energéticos. É o caso da fertilidade e retenção máxima de água no solo no 3-PG e alocação de carbono, relação carbono/nitrogênio, parâmetros morfológicos como AFE e relação de folhas sombreadas/iluminadas, deposição e fixação de nitrogênio e por último biomassa inicial no Biome-BGC.

Tanto o modelo 3-PG como o Biome-BGC, apesar de que poderiam ser aplicados para estimar PPL com boas aproximações, têm diferenças grandes entre os modelos, como se observou nas análises de sensibilidade, onde existem parâmetros de entrada para os dois modelos como biomassa inicial que para o modelo 3-PG teve variação baixa, mas no modelo Biome-BGC, este parâmetro teve uma alta variação na estimativa da PPL. Isso se deve ao fato do modelo Biome-BGC não caracteriza espécies individuais no ecossistema. É por isso que o modelo 3-PG tem como entrada exatamente a quantidade de árvores por hectare, não tem maiores variações quando se começa a estimar a PPL dependendo da quantidade de biomassa inicial de cada árvore, e sim apresenta variações grandes para o modelo Biome-BGC que não tem como saber a quantidade de árvores por hectare, sabendo só a biomassa nessa área.

A análise espectral feita neste estudo determinou que tanto o 3-PG e o Biome-BGC são suscetíveis de forma similar à variabilidade dos dados meteorológicos no período de chuva e seca, embora a variância da ET é menor no 3-PG. Ainda não podemos determinar

que modelo representa melhor a realidade da plantação estudada, mas sabemos que os dois modelos bem parametrizados podem representar e se aproximar a valores reais de PPL e outras variáveis de interesse geral.

As condições de produção e de uso do carvão vegetal na siderurgia examinadas neste trabalho indicam que a indústria de carvão pode atingir a plena maturidade, em função da prevista elevação do preço do petróleo que puxaria os preços dos demais vetores energéticos. Estudos internacionais consultados consideram possível o retorno a economia energética baseada no carvão mineral para produzir combustíveis líquidos sintéticos (7).

Da mesma forma que o álcool combustível, o carvão vegetal concorre com um combustível-redutor fóssil, de custo forçosamente inferior e que, por sua vez, concorre com outro combustível fóssil, o gás natural, cujo uso vem ganhando impulso devido às suas múltiplas aplicações. Assim, o carvão vegetal deve ser considerado por suas vantagens ecológicas e sociais, de vez que o setor emprega numerosa mão de obra pouco qualificada, ocupa terras de valor marginal, por serem pouco adequadas à produção agrícola, além de gerar renda em regiões onde as alternativas de emprego não são particularmente favoráveis ao trabalhador. O potencial de sequestro de carbono e de regeneração do oxigênio, aliado à melhor qualidade do gusa de carvão vegetal como fonte de metal virgem para os fornos elétricos a arco, qualifica este combustível como fator de motivação para as negociações internacionais relacionadas com o clima global.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAF - Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. (2009). Anuário Estatístico da ABRAF: ano base 2008. Brasília. 129 pg.
- ABER JD, FEDERER C.A (1992). A Generalized, Lumped-Parameter Model of Photosynthesis, Evapotranspiration and Net Primary Production in Temperate and Boreal Forest Ecosystems. *Oecologia*, 92, 463–474.
- ALMEIDA, A.C.; MAESTRI, R.; LANDSBERG, J.J. & SCOLFORO, J.R.S. (2003). Linking process-based and empirical forest models in Eucalyptus plantations in Brazil. In: Amaro, A.; Tomé, M. (Eds.), *Modelling Forest Systems*. CABI, Wallingford, UK, p.63–74.
- ALMEIDA, A. C; LANDSBERG, J. J.; SANDS, P. J. (2004) Needs and Opportunities For Using a Process-Based Model As a Practical Tool in *Eucalyptus* Plantations. *Forest Ecology and Management*, Amsterdam, v. 193, n. 1-2, p.167-177.
- ALMEIDA, A., LANDSBERG, J.J, AMBROGI, M. (2008) Needs and Opportunities For Using Process - Based Model As a Practical tool in Eucalypt Plantation., Aracruz Celulose S.A, ES, Brazil.
- AMARAL, A. & SALAS, G. R., & PÁSCOA, F. & JOSÉ, M. T. & SOARES, P. (2001). Aplicação do modelo de crescimento florestal 3-PG a povoamentos de Eucalipto na região centro de Portugal: Escola Agrária Superior de Coimbra.
- BALDOCHI, D.D, FUENTES, J.D (1999). Scaling Isoprene Fluxes from Leaves to Canopies : Test Cases over a Boreal Aspen and a Mixed Species Temperate Forest, Atmospheric Turbulence and Diffusion Division, NOAA, Oak Ridge, Tennessee e Department of Environmental Sciences, University of Virginia, Charlottesville, Virginia
- BALDOCCHI D, Meyers T (1998). On using eco-physiological, micrometeorological and biogeochemical theory to evaluate carbon dioxide, water vapor and trace gas fluxes over vegetation: a perspective. *Agricultural and Forest Meteorology*, 90, 1–25.
- BALDOCCHI D, FINNIGAN J, WILSON K et al. (2000) On measuring net ecosystem carbon exchange over tall vegetation on complex terrain. *Boundary-Layer Meteorology*, 96, 257–291.
- BATTAGLIA, M. et al.. CABALA. (2004). A Linked Carbon, Water And Nitrogen Model. of Forest Growth For Silvicultural Decision Support. *Forest Ecology and Management*, Amsterdam, v. 193, n. 1-2, p. 251-282.
- BELWARD, A. S. (1997). The International Geosphere Biosphere Programme Data And Information System Global Land Cover Data Set (DISCover), pp. 681–689.
- BEVERLY, C. R. & MORRIS, J. D. & COLLOPY, J. J. & BAKER, T. G., & LANE, P. N. J. (2006). Predicting the Impacts of Plantations on Catchment Water Balances Using the 3-PG Forest Growth Model, pp. 2237–2243.
- BOND-LAMBERTY, B. E. N. & GOWER, S. T. & AHL, D. E. & PETER, E. (2005a). Reimplementation of the Biome-BGC model to simulate Successional Change, pp. 413–424.

- BORGES, J.S. (2009), Parametrização, Calibração e Validação do Modelo 3-PG Para Eucalipto na Região do Cerrado de Minas Gerais. Dissertação de mestrado em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal de Viçosa.
- CHURKINA, G., and S. W. RUNNING, (1998): Contrasting climatic controls on the estimated productivity of global terrestrial biomes. *Ecosystems*, 1, 206–215.
- COOPS, N. C., R. H. WARING, and J. J. LANDSBERG, (1998a): 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. *For. Ecol. Manage.*, 104, 113–127.
- COOPS, N.C.; WARING, R.H. & LANDSBERG, J.J. (1998b). The development of a physiological model (3-PGS) to predict forest productivity using satellite data. In: Nabuurs, G.; Nuutinen, T.; Bartelink, H.; Koorhonen, M. (Eds.). *Forest Scenario Modelling for Ecosystem Management at Landscape Level*, EFI Proceedings, p.173–191.
- COOPS, N.C.; WARING, R.H. & LANDSBERG, J.J. (2000). Estimation of potential forest productivity across the Oregon transect using satellite data and monthly weather records. *Int. J. Remote Sens.*
- COOPS, N.C. & WARING, R.H. (2001). Estimating maximum potential site productivity and site water stress of the Eastern Siskiyou Mountains of southwestern Oregon using a satellite driven process model, 3-PGS. *Can. J. For. Res.*, 31:143-154.
- COSBY, B. J., G. M. HORNBERGER, et al. (1984). "A Statistical Exploration of the Relationships of Soil Moisture Characteristics to the Physical Properties of Soils." *Water Resour. Res.* 20(6): 671-681.
- COUTO, L. (2002). Cultivation and production of eucalypts in South América: with special reference to the leaf oils. In: *Eucalyptus – The Genus Eucalyptus*. COPPEN, J. J. W. Ed. Taylor & Francis. London, p.239-250.
- DE PURY, D. G. G. and G. D. FARQUHAR (1997). "Simple scaling of photosynthesis from leaves to canopies without the errors of big-leaf models." *Plant, Cell and Environment* 20: 537- 557.
- DYE, P.J. (2001). Modelling growth and water use in four *Pinus patula* stands with the 3-PG process-based model. *S. Afr. For. J.*, 191:53–63.
- DYE, P.J. (2004). Verification of 3-PG growth and water-use predictions in twelve *Eucalyptus* plantations stands in Zululand, South Africa. *For. Ecol. Manage.*, 193:197-218.
- ELDRIDGE, K.; DAVIDSON, J.; HARWOOD, C.; VAN WYK, G. (1994). *Eucalypt domestication and breeding*. New York: Calendron Press; Oxford University Press, 1994, 287 p.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (2009). *Florestas energéticas. Inovação para Sustentabilidade*. Embrapa Agroenergía / Florestas. MAPA. Brasil. 11 pg.
- EMBRAPA–Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (1982). *Levantamento de Reconhecimento de Média Intensidade dos Solos e Avaliação da Aptidão Agrícola das Terras do Triângulo Mineiro*, pp. 78-87.
- FAO - Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2010).

- Evaluación de los recursos forestales mundiales. Principales Resultados. Roma, Itália. 12p.
- FAO - Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2008). Bosques y Energía: Cuestiones Claves. ESTUDIO FAO: MONTES n°154. Roma, Itália. 86 p.
- FARQUHAR, G. D., S. CAEMMERER, et al. (1980). "A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species." *Planta* 149(1): 78-90.
- FASMAN, G. D. (1976). *Handbook of Biochemistry and Molecular Biology. Proteins, III.* Cleveland, OH, CRC Press.
- FERREIRA. O.C (2005). *ECONOMIA & ENERGIA REVISTA, Emissões de Gases de Efeito Estufa na Produção e no Uso do Carvão Vegetal, Emissões de Gases de Efeito Estufa na Produção e no Uso do Carvão Vegetal na Siderurgia.*
- FONSECA, F. H. (2009). Obstáculos ao desenvolvimento do setor florestal para a produção de biomassa para energia. 1º. Congresso Brasileiro de Florestas Energéticas, Belo Horizonte, 2 a 5 de junho de 2009.
- GONÇALVES, S.M (2010). Análise ambiental e energética da produção de *Eucalyptus gl obulus* para conversão em energia elétrica. Dissertação de mestrado em engenharia do ambiente. Universidade Técnica de Lisboa.
- HANSON PJ, AMTHOR JS, WULLSCHLEGER SD et al. (2004) Oak forest carbon and water simulations: model intercomparisons and evaluations against independent data. *Ecological Monographs*, 74, 443–489.
- HUNT, E. R., Jr., S. C. PIPER, R. NEMANI, C. D. KEELING, R. D. OTTO, and S. W. RUNNING, (1996): Global net carbon exchange and intra-annual atmospheric CO₂ concentrations predicted by an ecosystem process model and three-dimensional atmospheric transport model. *Global Biogeochem. Cycles*, 10, 431–456.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (1995): *Climate Change 1995: The Science of Climate Change.* Cambridge Univ. Press, New York, 572 pp.
- JARVIS P.G (1995). Scaling processes and problems. *Plant Cell And Environment*, 18, 1079–1089.
- JONES, H. G. (1992). *Plants and Microclimate.* Cambridge, Cambridge University Press
- JOHNSEN, K.; SAMUELSON, L.; TESKEY, R.; MCNULTY, S.; FOX, T. (2001). Process models as tools in forestry research and management. 47:2-8 p.
- KATUL G, LAI CT, SCHAFER K et al. (2001) Multiscale analysis of vegetation surface fluxes: from seconds to years, 24, 1119–1132.
- KNEIPP E.L (2011). Calibração Do Modelo 3-PG Para *Eucalyptus saligna* Smith na Região De Guaíba, RS.
- KOCH, G. W., S. C. SILLETT, et al. (2004). "The limits to tree height." *Nature* 428(6985): 851-854.
- KUEHN, G. D. and B. A. MCFADDEN (1969). "Ribulase 1,5-diphosphate carboxylase from *Hydrogenomonas eutropha* and *Hydrogenomona facilis*. I. Purification, metallic ion requirements, inhibition, and kinetic constants." *Biochemistry* 8(6): 2394-2402.
- LAMBERTY, B.B, GOWER S.T, DOUGLAS E. THORNTON P.E (2005). Reimplementation of the Biome-BGC model to simulate successional change Victoria, Canada *Tree Physiology* 25, 413–424.

- LANGE, H. (2010). Modelling Carbon Dynamics in Forest Ecosystem Using Biome-BGC, Norwegian Forest and Landscape Institute, Ås, Norway, pp. 63–70.
- LAI, C.T., KATUL, G., OREN, R., ELLSWORTH, D., & SCHA, K. (2000). Modeling CO₂ and Water Vapor Turbulent Flux Distributions Within a Forest Canopy. School of the Environment, Duke University, Durham, North Carolina. 105p.
- LAMBERS, H., F. S. I. CHAPIN, et al. (2008). Plant physiological ecology. New York, NY, Springer.
- LANDSBERG, J.J. e R.H. WARING (1997). A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management*. 95:209-228.
- LANDSBERG, J.J., WARING, R.H., COOPS, N.C (2003). Performance of the Forest Productivity Model 3-PG Applied to a Wide Range of Forest Types. *Forest ecology and Management*. College of Forestry, Oregon State University, Corvallis.
- LANDSBERG, J.J & WARING, R.H. (1997). A Generalised Model of Forest Productivity Using Simplified Concepts of Radiation-use Efficiency, carbon balance and partitioning, CSIRO Center of Environmental Mechanics, P.O Canberra, Australia.
- LARCHER, W. (2004). *Ecofisiologia Vegetal. O ambiente das plantas*. Tradução de Carlos Henrique Britto de Assis Prado. Revisão de Carlos Henrique Britto de Assis Prado & Augusto Cesar Franco. 3 ed. São Carlos: RiMa, 2004. 518p. ISBN: 85-86553-03-8.
- LARCHER, W. (2003). *Physiological plant ecology: ecophysiology and stress physiology of functional groups*. New York, Springer.
- LIMA, W. P. (1993). *Impacto ambiental do eucalipto*. 2. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 301p.
- LIMA, A.F. (2007). *Avaliação do Ciclo de Vida no Brasil – Inserção e Perspectivas*. Dissertação de mestrado em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, pp. 14-35
- LONDERO, E.K. (2011). *Calibração Do Modelo 3-PG Para Eucalyptus saligna Smith Na Região de Guaíba, RS*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Florestal, Centro de Ciências Rurais. Universidade Federal Santa Maria.
- MALICO, P. M. (2009). *Calibração do Modelo 3-PG para Povoamentos de Pinheiro Bravo (Pinus pinaster) em Portugal*. Tese de mestrado, Instituto Superior de Agronomia Engenharia Florestal e dos Recursos Naturais Universidade Técnica de Lisboa.
- MEDINA, H. P., & GROHMANN, F. (1965). Disponibilidade de Água Em Alguns Solos Sob Cerrado BRAGANTIA, Boletim científico do instituto Agrônômico do estado de São Paulo. 73p
- MORA, A. L.; GARCIA, C. H. (2000). *A cultura do eucalipto no Brasil. Verso e Reverso Comunicações*. São Paulo, 112 p.
- MOTTA, D., FERNANDES, W.S., & DINIZ, E.N (2006). Rentabilidade na plantação do Eucalipto. Associação Educacional Dom Bosco. VII Simpósio de excelência em gestão e tecnologia.
- NOBEL, P. S. (1991). *Phsiochemical and Environmental Plant Physiology*. San Diego, CA, Academic Press.
- OBERLING, D. F.. 2008. *Avaliação Ambiental Estratégica da Expansão de Etanol no Brasil: uma Proposta Metodológica e sua Aplicação Preliminar*. Dissertação

- (Mestrado). Programa de Planejamento Energético – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2 p.
- OLIVEIRA, A.C, & RAAD, T.J (2010). Carvão Vegetal de Florestas Plantadas E Suas Bases Sustentáveis Para a Siderurgia Nacional, Congresso Florestal de Mato Grosso do Sul.
- OLIVEIRA, I. P., & Rodrigues, C. (2005). Manutenção e Correção da Fertilidade do Solo Para Inserção do Cerrado no Processo, Trabalho realizado pela Embrapa Arroz e Feijão pp. 50–64.
- OLIVETTI NETO, A. (2007). Qualidade de Cavacos de Eucalipto para Obtenção de Celulose Kraft.
- PASSIOURA, J.B. (1996). Simulation models: Science, snake oil, education or engineering ? J. Agr., 88: 690-694.
- PECKHAM, S.D., & GOWER, S.T. (2010). Whole-system carbon balance of a regional temperate forest in Northern Wisconsin, USA. Annual Meeting of the American Geophysical Union Department of Forest and Wildlife Ecology University of Wisconsin-Madison.
- PIETSCH, S. A., H. HASENAUER, et al. (2005). "BGC-model parameters for tree species growing in central European forests." Forest Ecology and Management 211(3): 264.
- PIKETTY, M. G., WICHERTC, M., FALLOT, A., AIMOLA, L. (2009). Assessing land availability to produce biomass for energy: The case of Brazilian charcoal for steel making. biomass and bioenergy. n°33, pag 180–190.
- POGGIANI, F. (1989). Estrutura, funcionamento e classificação das florestas: implicações ecológicas das florestas plantadas. Documentos Florestais. Piracicaba-SP.
- POTTER, C. S., J. T. RANDERSON, C. B. FIELD, P. A. MATSON, P. M. VITOUSEK, H. A. MOONEY, and S. A. KLOOSTER, (1993): Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data. Global Biogeochem.
- QUEIROZ, L. R. de S.; BARRICHELO, L. E. G. (2007) O eucalipto – Um século no Brasil. 1ª ed. Neoband Soluções Gráficas, São Paulo, 37 p.
- RODRIGUEZ-SUAREZ, J.A & IGLESIAS, M. L. & SOTO, B. & DIAZ-FIERROS. F (2010). Application of the 3-PG Forest Growth Model to a Eucalyptus Globulus Plantation in Northwest Spain, 2003, 573–583.
- RUNNING SW, COUGHLAN JC (1988) A general-model of forest ecosystem processes for regional applications.1. Hydrologic balance, canopy gas-exchange and primary production processes. Ecological Modelling, 42, 125–154.
- RUY, O. F. (1998). Variação da madeira em clones de Eucalyptus urophylla S. T. Blake da Ilha de Flores, Indonésia. 1998. 69 p. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia da Madeira) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- SAMPSON DA, JANSSENS IA, CEULEMANS R (2001) Simulated soil CO2 efflux and net ecosystem exchange in a 70-year-old Belgian scots pine stand using the process model secrets. Annals of Forest Science, 58, 31–46.

- SANDS, P. (2004). Adaptation of 3-PG to novel species: guidelines for data collection and parameter assignment. In Project B4: Modeling Productivity and Wood Quality. Cooperative Research Centre for Sustainable Production Forestry, Hobart, Australia.
- SANDS, P. (2010). Description of 3-PG, CSIRO Forestry and Forest Products and CRC for Sustainable Production Forestry, pp. 1–28.
- SANDS, P.J. e J.J. LANDSBERG (2002). Parameterisation of 3-PG for plantation grown *Eucalyptus globulus*. *Forest Ecology and Management*. 163:273-292.
- SAXTON, K. E., W. J. RAWLS, et al. (1986). "Estimating Generalized Soil-water Characteristics from Texture." *Soil Sci Soc Am J* 50(4): 1031-1036.
- SILVA, H.P (1998) Caracterização Geotécnica dos Principais Grupos de Solos do Mapa Pedológico do Distrito Federal (Esc. 1:100.000): Dissertação de mestrado em Geotécnica, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil. Universidade de Brasília, pp. 17-37.
- SILVA, G.G.C. (2006). Nutrição, crescimento e sua modelagem em povoamentos de eucalipto em resposta à disponibilidade de água e nutrientes. 2006. 116p. Tese (Doutorado em solos e nutrição de plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- SILVA, J. C.; MATOS, J. L. M. (2003). A madeira de eucalipto na indústria moveleira. *Revista da Madeira, Curitiba*, n. 70. p. 36-40.
- SIMON, E., MEIXNER, F. X., GANZVELD, L., & KESSELMEIER, J. (2005). Coupled Carbon-water Exchange of the Amazon Rain Forest, and Model description , Parameterization and Sensitivity Analysis. *Biogeosciences Discussions* is the access reviewed discussion forum of *Biogeosciences*.
- SIQUEIRA, M. B., KATUL, G. G., SAMPSON, D. A., STOY, P. C., JUANG, J.-Y., MCCARTHY, H. R., & OREN, R. (2006). Multiscale Model Intercomparisons of CO₂ and H₂O Exchange Rates in a Maturing Southeastern US Pine Forest. *Global Change Biology*.
- SOLARI, RS. (2010), Expansão das Florestas Plantadas Com Fins Energéticos No Brasil E Sua Influência nas Emissões dos Gases e Efeito Estufa – GEE: Análise de Dois Cenários Futuros. Dissertação de Mestrado em Planejamento Energético, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, pp. 5-65.
- STAPE, J.L. (2002). Production ecology of clonal eucalyptus plantations in northesastern Brazil. 2002. 225p. Tese (Doutorado) - Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- STAPE, J.L.; RYAN, M.G. & BINKLEY, D. (2004). 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*, 193:219-234.
- TAIZ, L. and E. ZEIGER (2006). *Plant Physiology*. Sunderland, MA, Sinauer Associates, Inc., Publishers.
- TATARINOV, F.A., & CIENCIALA, E. (2006). Application of BIOME-BGC model to managed forests and Sensitivity analysis, *Forest Ecology and Management*.
- THORNTON, P. E. (1998). Regional Ecosystem Simulation: Combining Surface- and Satellite- Based Observations to Study Linkages between Terrestrial Energy and Mass

- Budgets. College of Forestry. Missoula, MT, The University of Montana. Doctor of Philosophy: 288.
- THORNTON, P.E (2005). Biome-BGC: Modeling Carbon Dynamics in Ponderosa Pine Stands, p.p 5–7.
- THORNTON, P. E. and N. A. ROSENBLOOM (2005). "Ecosystem model spin-up: Estimating steady state conditions in a coupled terrestrial carbon and nitrogen cycle model." *Ecological Modelling* 189(1-2): 25-48.
- THORNTON, P. E., B. E. LAW, et al. (2002). "Modeling and measuring the effects of disturbance history and climate on carbon and water budgets in evergreen needleleaf forests." *Agricultural and Forest Meteorology* 113: 185-222.
- THORNTON, P. E., & RUNNING, S.W (2002). User's Guide for Biome-BGC, Version 4.1.2, Terrestrial Sciences Section Climate and Global Dynamics Division, Numerical Terradynamics Simulation Group School of Forestry University of Montana.
- THORNTON, P. E. and N. E. ZIMMERMANN (2007). "An Improved Canopy Integration Scheme for a Land Surface Model with Prognostic Canopy Structure." *Journal of Climate* 20(15): 3902.
- THORNTON (2010)., Biome-BGC version 4.2: Theoretical Framework of Biome-BGC.
- TICKLE, P.K; COOPS, N.C. & HAFNER, S.D. (2001). Assessing forest productivity at local scales across a native eucalypt forest using the spatial model, 3PG-SPATIAL. *For. Ecol. Manage.*, 152:275–291, 2001
- TRUSILOVA, K., TREMBATH, J., & CHURKINA, G. (2010) Parameter Estimation and Validation of The Terrestrial Ecosystem Model Biome-BGC Using Eddy-Covariance Flux Measurements, Max-Planck-Institut für Biogeochemie, pp. 2-37.
- VETTER, M., G. CHURKINA, et al. (2008). "Analyzing the causes and spatial pattern of the European 2003 carbon flux anomaly using seven models." *Biogeosciences* 5(2): 561.
- WADAS, J.L. (2008). Qualidade de Mudas Clonais do Híbrido de *Eucalyptus Grandis* Submetidas a Diferentes Regimes Hídricos. Tese de Doutorado, em Agronomia – Irrigação e Drenagem. Faculdade de Ciências Agronômicas Campus de Botucatu, pp 7-30.
- WANG, Y.P. (2001). Modelling radiation absorption by plant canopies. *Net Exchange Ecosystem Workshop Proceedings*: 18-20.
- WANG, W., K. ICHII, et al. (2009). "A hierarchical analysis of terrestrial ecosystem model Biome- BGC: Equilibrium analysis and model calibration." *Ecological Modelling* 220(17): 2009- 2023.
- WANG, W., K. ICHII, et al. (2009). "A hierarchical analysis of terrestrial ecosystem model Biome-BGC: Equilibrium analysis and model calibration." *Ecological Modelling* 220(17): 2009-2023.
- WARING, R. H. and S. W. RUNNING (2007). *Forest Ecosystems: Analysis at Multiple Scales*. San Francisco, CA, Elsevier Academic Press.
- WARING, R. H. and G. B. PITMAN (1985). "Modifying Lodgepole Pine Stands to Change Susceptibility to Mountain Pine Beetle Attack." *Ecology* 66(3): 889-897
- WHITE, J.D., SCOTT, N.A., & HIRSCH, A.I. (2006). 3-PG Productivity Modeling of Regenerating Amazon Forests : Climate Sensitivity and Comparison with MODIS-

- Derived NPP, Department of Biology, Baylor University, Waco, Texas and Woods Hole Research Center, Woods Hole, Massachusetts.
- WHITE, M. A., P. E. THORNTON, et al. (1997). "A Continental Phenology Model for Monitoring Vegetation Responses to Interannual Climatic Variability." *Global Biogeochemical Cycles* 11(2): 217-234.
- WHITE, M.A., THORNTON, P.E., RUNNING, S.W., & NEMANI, R.R. (2000). Parameterization and Sensitivity Analysis of the BIOME-BGC Terrestrial Ecosystem Model: Net Primary Production Controls, Numerical Terradynamic Simulation Group, Missoula, Montana.
- WHITEHEAD, D.; HALL, G.M.J.; WALCROFT, A.S.; BROWN, K.J.; LANDSBERG, J.J.; TISSUE, D.T.; TURNBULL, M.H.; GRIFFIN, K.L.; SCHUSTER, W.S.F.; CARSWELL, F.E.; TROTTER, C.M.; JAMES, I.L. & NORTON, D.A. (2002). Analysis of the growth of rimu (*Dacrydium cupressinum*) in South Westland, New Zealand, using process-based simulation models. *Int. J. Biometeorol.* 46:66–75.
- WOODROW, I. E. and J. A. BERRY (1988). "Enzymatic Regulation of Photosynthetic CO₂ Fixation in C₃ Plants." *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 39(1): 533-594.
- WULLSCHLEGER, S. D. (1993). "Biochemical Limitations to Carbon Assimilation in C₃ Plants—A Retrospective Analysis of the A/C_i Curves from 109 Species." *J. Exp. Bot.* 44(5): 907-920.
- ZUFFELLATTO-RIBAS, K. C.; RODRIGUES, J. D. (2001). *Estaquia: uma abordagem dos principais aspectos fisiológicos*. Imprensa Universitária da UFPR, Curitiba, 39 p.

APÊNDICE A- PARÂMETROS DE ENTRADA E SAÍDA DO 3-PG

Neste apêndice são apresentadas algumas das variáveis de saída que é possível estimar quando é executado o modelo 3-PG

Parâmetros de entrada e saída	Símbolo	3PGPJS name	Unidades
Parâmetros do local			
Parâmetros de Entrada			
Tipo de solo		SoilClass	-
Índice de fertilidade	FR	FR	-
Máxima quantidade de água disponível no solo	θ_{sx}	maxASW	mm
Mínima quantidade de água disponível no solo	θ_{sn}	minASW	mm
Fatores climáticos			
Duração do dia (amanhecer ao por do sol)	h	DayLength	s d ⁻¹
Número de dias de geada por mês	d_F	FrostDays	d month ⁻¹
Radiação ativa incidente média por mês	Q	SolarRad	MJ m ⁻² d ⁻¹
Temperatura média mensal	T_a	Tav	°C
DPV média por mês	D	VPD	mbar
Precipitação média por mês	R_p	Rain	mm month ⁻¹
Irrigação	R_l	Irrig	mm month ⁻¹
Atributos gerais			
Idade da plantação	t	StandAge	yr
Estoque da plantação	N	TroncoNo	trees ha ⁻¹
Parâmetros de Saída			
Atributos do dossel			
Área foliar específica	σ	AFE	m ² kg ⁻¹
Fração de área de solo sombreado por o dossel	ζ	CanCover	-
Índice de área foliar do dossel	L	LAI	m ² m ⁻²
Área basal	A	BasArea	m ² ha ⁻¹
Volume do tronco excluindo galhos e casca	V	StandVol	m ³ ha ⁻¹
Incremento do volume anual médio		MAI	m ³ ha ⁻¹ yr ⁻¹
Reservatórios de Biomassa			
Biomassa das folhas	W_F	WF	t _{DM} ha ⁻¹
Biomassa das raízes	W_R	WR	t _{DM} ha ⁻¹
Biomassa do tronco incluindo galhos e casca	W_S	WS	t _{DM} ha ⁻¹
Serapilheira acumulada	W_L	WL	t _{DM} ha ⁻¹
Biomassa total		TotalW	t _{DM} ha ⁻¹
Biomassa média do tronco por árvore	w_S	AvTroncoMass	kg _{DM} /tree
Densidade da madeira	ρ	Density	t _{DM} m ⁻³
Fração de biomassa do tronco incluindo galhos e casca	p_{BB}	fracBB	
Alocação e produção de biomassa			
Produção primária bruta no período atual	P_g	GPP	t _{DM} ha ⁻¹
Produção primária líquida no período atual	P_n	NPP	t _{DM} ha ⁻¹
Radiação total interceptada pelo dossel		RadInt	MJ m ⁻² month ⁻¹
Eficiência quântica do dossel	α_C	alphaC	mol mol ⁻¹
Incremento no volume do tronco no período atual		CVI	m ³ ha ⁻¹

Parâmetros de entrada e saída	Simbolo	3PGPJS name	Unidades
Modificador de biomassa nas raízes	m	<i>m</i>	-
Fração de produtividade primaria líquida alocada nas raízes	η_R	<i>pR</i>	-
Fração de produtividade primaria líquida alocada no tronco	η_S	<i>pS</i>	-
Fração de produtividade primaria líquida alocada nas folhas	η_F	<i>pF</i>	-
Ratio of foliage to tronco biomass allocation	p_{FS}	<i>pFS</i>	-
Taxa de serapilheira de folhas atual	γ_F	<i>gammaF</i>	month ⁻¹
Serapilheira no period atual		<i>Litter</i>	t _{DM} ha ⁻¹
Mortalidade do tronco			
Max. massa do tronco da árvore estocada	w_{Sx}	<i>wSmax</i>	kg tree ⁻¹
Taxa de mortalidade	γ_N	<i>gammaN</i>	month ⁻¹
Número de troncos morrendo no período atual		<i>Mortality</i>	trees ha ⁻¹
Usos da água			
Fração de chuva interceptada pelo dossel	i_R	<i>fRainInt</i>	-
Chuva interceptada pelo dossel no período atual		<i>RainInt</i>	mm
Condutância do dossel	g_C	<i>CanCond</i>	m s ⁻¹
Uso eficiente da água	ω	<i>WUE</i>	gDM mm ⁻¹
Taxa de evapotranspiração rate no período atual	E_T	<i>ET</i>	mm
Taxa de transpiração mensal no período atual		<i>Transp</i>	mm
Água disponível no solo	θ_s	<i>ASW</i>	mm

APÊNDICE B - PARÂMETROS DE ENTRADA PARA EXECUTAR O BIOME-BGC

Neste apêndice são apresentados os parâmetros de entrada de sítio, meteorológicos e ecofisiológicos para executar o modelo Biome-BGC.

PARÂMETROS DO LOCAL OU DE INICIALIZAÇÃO

- 1) Profundidade das raízes no solo
- 2) Textura do solo: porcentagem de areia
- 3) Textura do solo: porcentagem de silte
- 4) Textura do solo: porcentagem de argila
- 5) Altura do local em metros acima do nível do mar
- 6) Latitude do local em graus decimais (valores negativos para o hemisfério sul)
- 7) Índice albedo RFA
- 8) Taxa anual de deposição de nitrogênio atmosférico (deposição úmida e seca) (kgN/ano)
- 9) Taxa anual de fixação de nitrogênio simbiótico e não simbiótico (kgN/ano)
- 10) Estoque de água armazenada em neve
- 11) Proporção inicial de saturação de água no solo
- 12) Quantidade de carbono inicial na folha (kgC/m²)
- 13) Quantidade de carbono inicial no tronco (kgC/m²)

PARÂMETROS METEOROLÓGICOS

- 1) **year**: Ano numérico, repetido para cada dia do ano
- 2) **yday**: Dia do ano numérico, os valores devem começar com 1 e finalizar com 365
- 3) **Tmax**: Temperatura máxima durante o dia (°C)
- 4) **Tmin**: Temperatura mínima durante o dia (°C)
- 5) **Tday**: Temperatura mínima no dia (amanhecer ao por do sol, °C)
- 6) **prcp**: Precipitação total durante o dia, (cm)
- 7) **VPD**: DPV média no dia (Pa)
- 8) **srad**: Radiação fotossinteticamente ativa, RFA (W/m²)
- 9) **daylen**: duração do dia (amanhecer ao por do sol, segundos)

PARÂMETROS ECOFISIOLÓGICOS

EBF (evergreen broadleaf forest - tropical) – Características fisiológicas similares às do

Eucalipto *Grandis e Europhylla*

1) 0.5	(1/ano)	Renovação das raízes finas e folhas
2) 0.70	(1/ano)	Renovação da madeira viva
3) 0.005	(1/ano)	Mortalidade da árvore ou planta completa
4) 0.0	(1/ano)	Mortalidade por fogo
5) 1.0	(fração)	(Alocação) C em folhas novas/C em raízes finas novas
6) 1.0	(fração)	(Alocação) C em folhas novas/C tronco
7) 0.22	(fração)	(Alocação) C do total de madeira nova/C madeira viva nova
8) 0.3	(fração)	(Alocação) C tronco /C em raízes grossas
9) 42.0	(kgC/kgN)	Fração de carbono/nitrogênio na folha
10) 49.0	(kgC/kgN)	Fração de carbono/nitrogênio na serapilheira
11) 42.0	(kgC/kgN)	Fração de carbono/nitrogênio nas raízes finas
12) 50.0	(kgC/kgN)	Fração de carbono/nitrogênio na madeira viva
13) 300	(kgC/kgN)	Fração de carbono/nitrogênio na madeira morta
14) 0.32	(DIM)	Fração de lábil, nas folha de serapilheira
15) 0.44	(DIM)	Fração de celulose nas folha de serapilheira
16) 0.24	(DIM)	Fração de lignina nas folha de serapilheira
17) 0.30	(DIM)	Fração de lábil, nas raízes finas
18) 0.45	(DIM)	Fração de celulose nas raízes finas
19) 0.25	(DIM)	Fração de lignina nas raízes finas
20) 0.76	(DIM)	Fração de celulose na madeira morta.
21) 0.24	(DIM)	Fração de lignina na madeira morta.
22) 0.041	(1/LAI/d)	canopy water interception coefficient
23) 0.7	(DIM)	Coefficiente de extinção de luz
24) 2.0	(DIM)	Fração de todos os lados da folha projetados/índice de área foliar
25) 12.0	(m ² /kgC)	Área específica da folha)
26) 2.0	(DIM)	Fração de área específica das folhas sombreadas/folhas iluminadas
27) 0.06	(DIM)	Porcentagem de nitrogênio Rubisco na folha
28) 0.005	(m/s)	Condutância estomática máxima
29) 0.00001	(m/s)	Condutância cuticular
30) 0.01	(m/s)	Condutância da camada limite
31) -0.6	(MPa)	Potencial de água na folha/redução inicial da condutância estomática
32) -3.9	(Mpa)	Potencial de água na folha/redução final da condutância estomática
33) 1800	(Pa)	DPV/redução da condutância estomática inicial
34) 4100	(Pa)	DPV/redução da condutância estomática final

APÊNDICE C- PARÂMETROS DE SAÍDA NO BIOME-BGC

Neste apêndice são apresentadas algumas das variáveis de saída que é possível estimar quando é executado o modelo Biome-BGC

anual PRCP	Precipitação total anual (mm/ano)
anual Tavg	Temperatura do ar média anual (graus C)
max IAF	Valor máximo do índice de área foliar projetada anual (m^2/m^2)
anual ET	Evapotranspiração total anual(mm/ano)
anual OF	Fluxo de saída total anual (mm/ano)
anual PPL	Produção primaria liquida total anual ($gC/m^2/ano$)
anual PPB	Produção de biomassa liquida anual ($gC/m^2/ano$)

Os seguintes parâmetros podem ser estimados em saídas diária e mensal no Biome-BGC

diário _PPL	Produção primaria liquida total ($gC/m^2/dia$)
diário _NEE	Troca de carbono no ecossistema liquida total ($gC/m^2/dia$)
diário _PPB	Produção primaria bruta total ($gC/m^2/dia$)
diário _RM	Respiração de manutenção total ($gC/m^2/dia$)
diário _RC	Respiração de crescimento total ($gC/m^2/dia$)
diário _FOGO	Fogo no ecossistema ($gC/m^2/dia$)
diário _SERAPIC	Carbono em serapilheira ($gC/m^2/dia$)
diário _ET	Evapotranspiração (mm/dia)
diário _OUTFLOW	Fluxo de saída (mm/dia)
diário _EVAP	Evaporação (mm/dia)
diário _TRANS	Transpiração (mm/dia)
diário _SOLOAG	Água no solo (mm/dia)
diário _NEVEAG	Água em neve (mm/dia)