**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO GEOGRAFIA FÍSICA**

Albedo em cerrado *sensu stricto* como resposta à variação climática e biológica - conexões com índice de vegetação, estoques de carbono e fluxos de CO₂.

Diogo Ladvocat Negrão Couto

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia Física do Departamento de Geografia da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Climatologia

Orientadora: Profa Dra. Maria Elisa Siqueira Silva

V.1

São Paulo

2009

Albedo em cerrado *sensu stricto* como resposta à variação climática e biológica - conexões com índice de vegetação, estoques de carbono e fluxos de CO₂.

Diogo Ladvocat Negrão Couto

Dissertação apresentada como requisito à obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aprovada por:

Dra. Maria Elisa Sigeira Silva

Dr. Emerson Galvani

Dra Marisa Dantas Bitencourt

São Paulo

2009

Agradecimentos

Agradeço a minha família que sempre incentivou e apoiou para que eu continuasse na academia.

Minha orientadora Dra. Maria Elisa Siqueira Silva, pela oportunidade e aprendizado e ao Dr. Humberto Ribeiro da Rocha, pela disposição de dados do Programa Biota/Fapesp e experiência.

Aos pesquisadores que, em algum momento, contribuíram para esta pesquisa: Dra. Marisa Dantas Bitencourt (IB/USP); Dr. Marcos Aida (Instituto de Botânica/SP); Dr. Emerson Galvani (FFLCH/USP); Paulo Artaxo (IF/USP), Dr. Augusto Franco (IB/UnB); Dra. Heloisa Miranda (IB/UnB); Dr. Flavio Ponzoni (DSR/INPE); Dr. Marco Batalha (CCBS/UFSCar); Dr. Osvaldo Cabral (Embrapa); Ms. Helber de Freitas (IAG/USP); Ms. Jonatan Tatsch (IAG/USP), Emília Brasilio (IAG/USP).

Ao PPGG e CNPq pela bolsa concedida.

Sumário

Resumo	5
Abstract	6
1.0 Introdução	7
1.1 O Bioma Cerrado	9
1.2 Estrutura da Vegetação em Cerrados	12
1.3 Ecofisiologia de Plantas do Cerrado	17
1.4 Interação Biosfera-Atmosfera	21
1.5 Estudos de Larga Escala por Sensoriamento Remoto	24
1.6 Objetivo	25
1.7 Motivação	25
2.0 Material e Métodos	27
2.1 Área de Estudo: Sítio Experimental Gleba Pé de Gigante	27
2.2 Estimativas de Biomassa e Estoques de Carbono	32
2.3 Medidas Micrometeorológicas	36
2.4 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada	39
3.0 Resultados e Discussão	40
3.1 Biomassa e Estoque de Carbono na Gleba Pé de Gigante	40
3.2 Variação Climática	42
3.3 Albedo em Cerrado <i>Sensu Stricto</i>	53
3.4 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada em Cerrado <i>Sensu Stricto</i>	62
3.5 Albedo RFA <i>versus</i> Índice de Vegetação por Diferença Normalizada	65
4.0 Conclusões e Considerações Finais	67
4.1 Sugestões Para Trabalhos Futuros	73
5.0 Referências Bibliográficas	74
Apêndice 1	88
Apêndice 2	89
Lista de Figuras	90
Lista de Tabelas	93

Resumo

Neste trabalho analisamos a influência da variabilidade climática sobre um ecossistema representado principalmente por cerrado *sensu stricto*, na Gleba Pé de Gigante, em Santa Rita do Passa Quatro, SP, durante o período de 2001 a 2007. Os dados coletados para esta análise são provenientes da torre micrometeorológica localizada no Parque Estadual de Vassununga, cuja instalação está associada ao desenvolvimento do projeto temático “Interação Biosfera-Atmosfera Fase 2: Cerrados e Mudanças de Uso da Terra”. As propriedades físicas do clima utilizadas para análise foram a precipitação, a temperatura do ar e a radiação solar. Um levantamento teórico da biomassa acima e abaixo do solo foi realizado para caracterizar a vegetação quanto ao potencial de estoque de carbono existente. A biomassa da área coberta por campo cerrado foi de 67,1 Mg.ha⁻¹, da área coberta por cerrado *sensu stricto*, 185,6 Mg.ha⁻¹ e da área coberta por cerrado denso, 242,7 Mg.ha⁻¹. Uma relação entre estoques de carbono e fluxos de CO₂ foi estabelecida, onde uma tonelada de carbono em cerrado *sensu stricto* é capaz de assimilar, em média, 0,27 KgC.ha⁻¹.dia⁻¹ da atmosfera. A combinação de diferentes intensidades das propriedades climáticas formam condições ambientais variadas que contribuem para o estado da vegetação e sua produtividade. O principal parâmetro usado para avaliar o estado da vegetação foi o albedo, tanto para a faixa espectral da radiação visível (albedo solar) como para a faixa da radiação fotossinteticamente ativa (albedo RFA). O comportamento sazonal do albedo permitiu verificar que a vegetação apresentou-se fortemente condicionada pela variabilidade climática, que ditou o ritmo da funcionalidade ecossistêmica. De maneira geral, a precipitação, a temperatura do ar e a oferta de energia solar oscilam de forma proporcional ao longo das estações, caracterizando dois períodos distintos: um período com condições favoráveis ao desenvolvimento vegetal, de outubro a março, e um período de estresse, de abril a setembro. Os valores mínimos e máximos de albedo solar sobre o cerrado *sensu stricto*, durante o período analisado, oscilou entre 15% (novembro/dezembro) e 9% (setembro/outubro) e, o albedo RFA oscilou entre 2% (fevereiro/março) e 6% (setembro/outubro). Na escala interanual, observou-se o aumento do albedo RFA em 2006 após um período de três anos de queda contínua da precipitação, entre 2003 e 2006, sendo 2006 o ano menos chuvoso de toda a série considerada. Em 2007, os valores de albedo RFA foram bem mais baixos do que os calculados para os demais anos, respondendo rapidamente ao alto índice de precipitação ocorrido na estação chuvosa entre 2006 e 2007. Embora tenha sido observado uma resposta relativamente rápida do albedo RFA à recuperação do estresse hídrico na escala sazonal, o padrão do albedo na escala interanual é distinto: entre 2003 e 2006, período em que se observou taxas negativas de precipitação consecutivas, o albedo RFA diminuiu ou ficou com valores aparentemente constantes, apresentando valores mais altos somente em 2006. Desta forma, conclui-se que o estado da vegetação é condicionado principalmente pelo índice de precipitação, uma vez que a temperatura do ar e a quantidade de radiação solar não apresentam variações bruscas na região considerada. Considerando-se a importância da estimativa de albedo RFA como um parâmetro para estimar a variação sazonal do estado da vegetação, sugeriu-se um ajuste linear simples para a estimativa de albedo RFA em cerrado *sensu stricto* com base nos valores de IVDN, cuja variância explicada foi igual a 0,68.

Palavras chave: Cerrado, albedo, clima, fotossíntese, senescência, carbono, Pé de Gigante.

Abstract

In this work we analyze the climatic variability influence over a woodland savannah ecosystem at Gleba Pe de Gigante, Santa Rita do Passa Quatro, SP, during the 2001-2007 period. The data collected for this analysis are from a micrometeorological tower located at Vassununga State Park, which was installed under the thematic project called "Biosphere-Atmosphere Interaction Phase 2: Savannah and Land Use Change". The physical climate properties used for this analysis were precipitation, air temperature and solar radiation. A theoretical survey for above and below ground biomass was made to characterize the existing carbon stock potential related to the vegetation. The total biomass estimated at grassland savannah was 67.1 Mg.ha^{-1} , at woodland savannah was 185.6 Mg.ha^{-1} and at dense savannah was 242.7 Mg.ha^{-1} . A relationship between carbon stocks and CO_2 fluxes was established where one tone of carbon in woodland savannah absorbs an average of $0.27 \text{ KgC.ha}^{-1}.\text{day}^{-1}$ from the atmosphere. The combination of different climate properties and intensities generates different environmental conditions that lead to the vegetation state and its productivity. The main physical parameter considered to evaluate vegetation state was the albedo, which was shared in two spectral bands: visible spectrum (solar albedo) and photosynthetic active radiation (PAR albedo). The seasonal pattern of albedo allows checking that vegetation was strongly conditioned by climatic variability, which dictates the ecosystem functionality rhythm. Generally, precipitation, air temperature and solar radiation vary in a proportional way along the year, providing two different periods related to vegetation status: one period characterized by favorable conditions to vegetal development (October-March) and another by stressing conditions (April-September). Maximum and minimum values for solar albedo at woodland savannah varied, respectively, between 15% (November/December) and 9% (September/October); for PAR albedo, maximum and minimum values varied between 6% (September/October) and 2% (February/March). At annual scale, PAR albedo rose in 2006, after a four years period of falling precipitation rate, between 2003 and 2006. 2006 was the drier year among the others. In 2007, the PAR albedo values were much lower than those calculated for the remaining years, promptly responding to the high precipitation rate observed in the previous rainy season, 2006-2007. Even though a quick response in PAR albedo was noticed due to the recovered water stress in seasonal scale, the albedo pattern in annual scale held a different way: between 2003 and 2006, period characterized by consecutive and negative precipitation rates, vegetation was apparently associated to stable values of PAR albedo, presenting higher values only in 2006. Considering these results, we conclude that the vegetation state is mainly conditioned by precipitation rate, once the air temperature and solar radiation had not presented high variation in the study region. Based on the importance of PAR albedo as a parameter to estimate seasonal vegetation status, a simple linear adjustment according for woodland savannah PAR albedo based on NDVI values was suggested, which explained variance by NDVI was equal to 0.68.

Key words: Savannah, albedo, climate, photosynthesis, senescence, carbon, Pe de Gigante.

1.0 Introdução

A teoria de Gaia ([Lovelock, 1972](#); [Margulis e Lovelock, 1974](#)) é uma alternativa à sabedoria convencional, em que as rochas, oceanos e atmosfera são considerados como parte da vida no planeta. Considera a Terra um grande sistema, a vida e todo seu ambiente estreitamente acoplados de modo a formar um sistema auto-regulador, onde organismos e ambiente co-evoluem ([Lovelock, 2006](#)). Para [Lovelock](#), Gaia consiste em uma visão filosófica da Terra, que atua dentro de um conjunto de limitações, consequentes das interações entre os subsistemas da Terra. As limitações surgem por meio de vínculos intrincados entre a atmosfera, a biosfera, a geosfera e a hidrosfera, em que ciclos se retroalimentam. A biosfera, especificamente, apresenta um papel importante na regulação do clima devido à sua íntima relação com os ciclos biogeoquímicos, em especial, o do carbono ([Lovelock, 1991](#)). A [Figura 1.1](#) tenta representar Gaia e suas interações. A esfera tracejada na interseção central entre a biosfera, atmosfera, hidrosfera e geosfera representa o meio em que vivemos, um equilíbrio derivado das relações interdependentes e que proporciona um *feedback* às condições impostas ao meio ambiente.

Figura 1.1: Representação das interações de Gaia.

A auto-manutenção do equilíbrio não é apenas difícil de ser explicada. Fenômenos emergentes como a vida, consciência e Gaia resistem a uma linguagem sequencial tradicional, fora dos limites do pensamento de causa e efeito da ciência. Não há um meio linear de explicar seu funcionamento, a lógica torna-se circular. Mas isso não nega sua existência. E o mais importante é que a coisa toda se tornou mais do que a soma de suas partes.

Atualmente, embora não seja totalmente entendida, a auto-regulação de Gaia é aceita pela ciência; e existe um esforço mundial para quantificar as interações da Terra.

1.1 O Bioma Cerrado

Ecossistema pode ser definido como uma dinâmica complexa entre as plantas, a comunidade (animais e microorganismos) e as forçantes abióticas, interagindo como uma unidade funcional (Millennium Ecosystem Assessment, 2005; Reid *et al.*, 2005). Os ecossistemas são reconhecidos como um suporte crítico para o bem-estar humano (Reid *et al.*, 2005) e sua preservação é importante frente à possibilidade de mudança global do clima (Fischlin *et al.*, 2007). As amplas variações de concentração atmosférica de CO₂ e clima, às quais a biosfera ficou exposta no decorrer da história geológica (Augustin *et al.*, 2004; Siegenthaler *et al.*, 2005; Jansen *et al.*, 2007), proporcionaram alterações na sensibilidade dos ecossistemas devido a diferenças nos fatores forçantes (Overpeck *et al.*, 2006), possivelmente alterando a variabilidade natural do funcionamento dos ecossistemas.

Cerradas são formações tropicais e subtropicais que apresentam uma cobertura vegetal mista quase contínua de espécies graminóides e lenhosas (Coutinho, 1978), sendo esta última intercalada por estratos arbóreos e arbustivos em proporções variadas. Formações de cerrado constituem uma parte substancial da vegetação da América Tropical (Sarmiento, 1983). Seu desenvolvimento vegetal é estritamente relacionado à variação das condições nas estações secas e úmidas de tal forma que o crescimento e reprodução vegetal estão diretamente ligados à sazonalidade (Bourlière e Hadley, 1983).

O domínio do cerrado no Brasil cobre aproximadamente $1,2 \times 10^6 \text{ km}^2$ (Figura 1.2), representando cerca de 24% do território nacional (Ribeiro e Walter, 1998). Em termos de área, é excedido apenas pela floresta amazônica, que cobre aproximadamente $4,1 \times 10^6 \text{ km}^2$ do território brasileiro. O cerrado no Brasil estende-se desde as regiões marginais da floresta amazônica, no norte do país, até áreas em estados do sudeste e sul, como São Paulo e Paraná.

Ocupa áreas com extensão latitudinal de mais de 20 graus e altitude de aproximadamente 1.800 metros, incidindo inclusive em áreas localizadas ao nível do mar ([Ratter et al., 1997](#)).

Figura 1.2: Distribuição geográfica do cerrado no Brasil.
Fonte: [Ribeiro e Walter \(1998\)](#)

Como qualquer ecossistema, o cerrado apresenta relações intrínsecas às variações climáticas. Segundo o [IPCC \(2007\)](#), nas últimas décadas, a queima de combustíveis fósseis e as mudanças no uso do solo têm levado a um aumento na concentração de dióxido de carbono atmosférico, o que contribui para o aumento do efeito estufa existente na atmosfera terrestre. No Brasil, particularmente os cerrados, apresentam uma contribuição significativa para esta questão. Segundo [Fearnside \(1992\)](#), 10×10^6 hectares de cerrado foram desmatados e convertidos em pastagem em 1990. De acordo com [Schroeder e Winjum \(1995\)](#), o

desmatamento e a queima dos cerrados em 1990 provocaram a emissão de $(27 - 35) \times 10^6$ MgC, o que esteve associado à liberação de 75×10^6 e 10×10^6 MgC, respectivamente, do solo em áreas de florestas e campo convertido para áreas de agricultura intensiva.

Apesar da degradação que os ecossistemas florestais vêm sofrendo e da contribuição às mudanças climáticas, emissões de CO₂ ocorrem naturalmente, como parte natural do ciclo do carbono. Rocha *et al.* (2002) observaram diferenças sazonais em uma área de cerrado *sensu stricto*, no sítio experimental da Gleba Pé de Gigante, SP. A respiração média anual do solo, de acordo com estas observações, foi igual a $4,8 \mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ com diferenças sazonais que variaram entre 2 e $8 \mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, da estação seca (entre abril e setembro) à chuvosa (entre outubro e março), respectivamente. A variação sazonal da respiração do solo foi associada a um padrão de sensibilidade com a temperatura e umidade do solo. Com base na evolução temporal do fluxo atmosférico de CO₂, a produtividade líquida do ecossistema variou, acompanhando a sazonalidade da respiração do solo. A produtividade líquida do ecossistema foi negativa durante a estação chuvosa (absorção de CO₂ pelo ecossistema) e, positiva durante a estação seca (emissão de CO₂ pelo ecossistema), com fluxos líquidos de até 40 kgC.dia^{-1} (Figura 1.3). Apesar da sazonalidade, a troca de CO₂ do cerrado *sensu stricto*, na Gleba Pé de Gigante, apresentou uma média muito próxima do equilíbrio entre as estações, ou, como um pequenino sumidouro de carbono de $0,1 \text{ tC.ha}^{-1}$. Voutirilis *et al.* (2002) sugeriram o mesmo equilíbrio para medições feitas em um cerradão na borda da floresta amazônica brasileira. Em estudo semelhante, Miranda *et al.* (1997), em área de cerrado denso, indicaram comportamento semelhante de emissão e absorção de CO₂. Um padrão sazonal semelhante também foi estudado por Santos (1998) e Silva (1999), para uma área de campo sujo, no Distrito Federal. Segundo os autores, o ecossistema liberou e assimilou, 5,7 e $17,5 \text{ kgC.ha}^{-1}.\text{dia}^{-1}$, nas estações seca e úmida, respectivamente. Para Scurlock e Hall (1998),

globalmente, as savanas e pradarias assimilam $0,5 \text{ PgC ano}^{-1}$.

Figura 1.3: Evolução temporal, entre outubro de 1999 e março de 2002 do saldo da produtividade (NEE) em um cerrado *sensu stricto* na Gleba Pé de Gigante. A unidade de NEE é $\text{KgC ha}^{-1}.\text{dia}^{-1}$.

Fonte: [Rocha et al. \(2002\)](#)

1.2 Estrutura da Vegetação em Cerrados

Estruturalmente, as fisionomias de cerrado podem variar consideravelmente ([Figura 1.4](#)), apresentando índices de biomassa bastante diferentes. A biomassa presente pode apresentar variações em seu estoque total, não apenas entre fisionomias, mas também em suas razões entre a biomassa radicular e aérea. A quantidade de biomassa presente nas diferentes fitofisionomias de cerrado assim como a intensidade do fluxo de CO_2 associado estão longe de ser compreendidos em sua real magnitude. As estimativas existentes de biomassa em cerrado estão muito fragmentadas na literatura e muitas vezes publicadas em documentos de circulação restrita ou voltadas para fins de mercado (créditos de carbono).

Figura 1.4: Variação das formas fisionômicas de cerrado.

Fonte: Miranda *et al.* (1996)

A estimativa da biomassa aérea para a vegetação de cerrado apresenta valores bastante oscilantes, de acordo com vários autores: de 11 a 52 Mg.ha^{-1} (Fearnside, 1992), de 12 a 38 Mg.ha^{-1} (Santos, 1998), 25 Mg.ha^{-1} (Castro e Kauffmann 1998), e 26 Mg.ha^{-1} (Abdala *et al.*, 1998). Ottmar *et al.* (2001) apresentam valores de biomassa para diferentes fitofisionomias: 3 a 16 Mg.ha^{-1} para campo limpo, 6 a 15 Mg.ha^{-1} para campo sujo, 12 a 39 Mg.ha^{-1} para cerrado ralo, 20 a 58 Mg.ha^{-1} para cerrado *sensu stricto* e 29 a 71 Mg.ha^{-1} para cerrado denso. A grande diferença entre os valores de biomassa levantada em pesquisas brasileiras deve-se provavelmente à natural heterogeneidade fitofisionômica da vegetação de cerrado, às diferentes metodologias de amostragem e à frequência de queima dentre as áreas estudadas.

A razão entre a biomassa radicular e a biomassa aérea (R:S) pode ser influenciada por diversos fatores, como a idade ou estágio de regeneração da vegetação, espécies presentes e frequência de fogo (Gerhardt e Frederickson, 1995; Carins *et al.*, 1997), assim como fatores abióticos. A diminuição da umidade do solo é apontada como fator que aumenta esta razão, verificando-se, nestas situações, mais biomassa radicular (Nadelhoffer *et al.*, 1985; Murphy e Lugo, 1986; Brown e Lugo, 1990; Carins *et al.*, 1997). Características do solo, como

disponibilidade de nutrientes (Gower, 1987; Cavelier, 1992) e a textura (Warning e Schilesinger, 1985; Vitousek e Sanford, 1986; Gerhardt e Fredericksson, 1995; Voigt *et al.*, 1995) também podem influenciar esta razão.

Mais raras do que as estimativas de biomassa aérea no cerrado, são as que tratam da biomassa radicular abaixo do solo. Castro e Kauffmann (1998), em estudo sobre biomassa abaixo do solo até 200 cm de profundidade, encontraram valores de 16 Mg.ha⁻¹ para campo limpo, 30 Mg.ha⁻¹ para campo sujo, 46 Mg.ha⁻¹ para cerrado *sensu stricto* e 52 Mg.ha⁻¹ para cerrado denso. Segundo os autores, ~75% da biomassa abaixo do solo encontra-se nos primeiros 30 cm de profundidade. Abdala *et al.* (1998), em estudo para um cerrado *sensu stricto*, próximo de Brasília, sobre biomassa abaixo do solo até 620 cm de profundidade, encontraram 33 Mg.ha⁻¹ para cerrado *sensu stricto*, sendo que 80% das raízes estavam localizadas até 100 cm de profundidade.

Comparando-se os dados de biomassa acima e abaixo do solo, Castro e Kauffmann (1988) estimaram a razão R:S sendo igual a 5,5 para campo limpo, 7,7 para campo sujo, 2,6 para cerrado *sensu stricto* e 2,9 para cerrado denso. Abdala *et al.* (1998) encontraram que a biomassa total abaixo do solo, excluindo-se carvão e matéria orgânica do solo, apresenta uma razão muito próxima de 1 (1,025), como esquematizado na Figura 1.5. Existe uma grande variação entre os valores estimados da razão entre biomassa abaixo e acima do solo, como pode ser visto na Tabela 1.1, organizada com base em uma amostragem de estudos sobre cerrados dentro e fora do Brasil.

Figura 1.5: Biomassa em diferentes compartimentos de um cerrado *sensu stricto*. Biomassa acima do solo inclui indivíduos mortos em pé. Diâmetros de raízes foram definidos como: muito fino = material coletado pelo carreamento/flutuação peneirando amostras de solo; fino = diâmetro < 2 mm; médio = diâmetro 2-10 mm; grosso = diâmetro > 10 mm. Rizomas de gramíneas foram incluídos na classe de raízes médias.

Fonte: adaptado de [Abdala et al. \(1998\)](#)

Tabela 1.1: Comparação entre biomassa radicular (R), biomassa aérea (S) e a razão R:S em diferentes ecossistemas tropicais na América do Sul. A profundidade das raízes variou conforme o estudo.

Fitofisionomia	Localização	Biomassa radicular (Mg ha ⁻¹)	Biomassa acima do solo (Mg ha ⁻¹)	R:S	Profundidade (cm)	Referência
Cerrado <i>sensu stricto</i>	Minas Gerais / Brasil	30,4	22,7	1,3	200	Lilienfein et al. (2001)
Cerrado campo limpo	Distrito Federal / Brasil	7,6	1,8	4,2	-	Castro (1996)
Cerrado campo sujo	Distrito Federal / Brasil	15,1	2,7	5,6	-	Castro (1996)
Cerrado <i>sensu stricto</i>	Distrito Federal / Brasil	23,0	9,6	2,4	-	Castro (1996)
Cerrado denso	Distrito Federal / Brasil	25,5	11,0	2,3	-	Castro (1996)
Cerrado <i>sensu stricto</i>	Distrito Federal / Brasil	41,1	36,8	1,1	620	Abdala et al. (1998)
Cerrado campo limpo	Distrito Federal / Brasil	16,3	2,9	5,6	200	Castro e Kauffmann (1998)
Cerrado campo sujo	Distrito Federal / Brasil	30,1	3,9	7,7	200	Castro e Kauffmann (1998)
Cerrado <i>sensu stricto</i>	Distrito Federal / Brasil	46,6	17,6	2,6	200	Castro e Kauffmann (1998)
Cerrado denso	Distrito Federal / Brasil	52,9	18,4	2,9	200	Castro e Kauffmann (1998)
Cerrado campo limpo	Venezuela	11,5	6,0	1,9	200	Sarmiento e Vera (1979)
Cerrado <i>sensu stricto</i>	Venezuela	19,0	5,3	3,6	200	Sarmiento e Vera (1979)
Campo cerrado	São Paulo / Brasil	12,4	4,2	3,0	80	Delitti et al. (2001)

1.3 Ecofisiologia de Plantas do Cerrado

A intensidade da precipitação, da umidade do solo, da temperatura e da energia radiativa, exerce grande influência sobre o funcionamento das plantas. Equilíbrio específico entre estas forçantes abióticas formam condições favoráveis ao desenvolvimento vegetal. Cada uma das forçantes apresenta intervalo de variação no qual o desenvolvimento da vegetação é ótimo; situações em que estas variáveis apresentem valores além do intervalo ótimo podem ser inibidoras do metabolismo das plantas ([Dickinson e Kennedy, 1992](#)). Frente a um ambiente limitado de recursos, como água ou energia radiante, ou sob condições extremas de temperatura, as plantas reduzem seu metabolismo, visando a economia de suas reservas e a sobrevivência ao longo de um período de tempo em condições desfavoráveis ([Larcher, 1994](#)). Segundo este autor, a baixa disponibilidade de água e de energia radiante, assim como temperaturas inferiores a 10°C, são condições estressantes que induzem a redução da atividade fotossintética.

No cerrado, espécies perenifólias, semidecíduas, brevi-decíduas e decíduas ocorrem lado a lado ([Franco 2002; Paula 2002](#)), e a forma como estas espécies reagem ao clima ocorre de forma diferenciada. As espécies que apresentam algum grau de decíduidade reduzem seus ritmos através da senescência ([Larcher, 1994](#)). A redução da área foliar reduz a capacidade de assimilação de CO₂ durante a estação seca ([Franco, 1998](#)), o que pode, em parte, explicar a variação do fluxo de CO₂, tal como apresentado na [Figura 1.3](#). Já as espécies sempre verdes mantêm a maioria de suas folhas durante condições adversas e podem continuar realizando fotossíntese, desde que haja água disponível no solo. Estas reações ocorrem predominantemente pela manhã e, em baixas temperaturas ocorrem mais lentamente ([USDA Forest Service, 2009](#)). As espécies sempre verdes podem manter uma folha viva por até três

anos, para então senescer.

A bioquímica apresenta certa influência no processo de senescência. A clorofila é o principal pigmento foliar e faz com que as folhas tenham uma coloração verde. A radiação solar ativa a clorofila, mas também a destrói (pois é agressiva), então as folhas verdes precisam regenerar clorofila continuamente ([Gedzelman, 2008](#)). Segundo o autor, com o fim da estação chuvosa o metabolismo da planta diminui inclusive a regeneração da clorofila e as folhas preparam-se para a estiagem. A partir de então emergem outros pigmentos nas folhas.

Com a baixa ou nenhuma produção de clorofila, os carotenóides, presentes nas folhas durante todo o ciclo de vida, são desmascarados ([Carman, 2005](#)). Estes pigmentos são responsáveis pela produção de compostos amarelo, laranja e vermelho nas folhas e compõem uma pigmentação fotoprotetora contra danos oxidantes para a absorção de luz ([Delgado-Vargas et al., 2000](#)).

Diferentemente do carotenóide, o aparecimento da antocianina é influenciado pelas condições climáticas, que induzem o processo de senescência. Em situações de estresse a antocianina sobressai em relação ao carotenóide e induz o aparecimento de tons de laranja, vermelho e roxo nas folhas ([Palm Jr., 2009](#)). As antocianinas são componentes químicos solúveis na seiva e alteram sua coloração com a mudança do nível de pH ([Gedzelman, 2008](#)). [Gedzelman](#) afirma que quando a seiva está muito ácida, a antocianina torna-se laranja e vermelha, e quando a seiva está menos ácida ($\text{pH} > 2$), torna-se roxa. Antocianinas são produzidas pela luz solar quando a seiva apresenta alto teor de açúcar. Durante os períodos chuvosos, os açúcares que nutrem a planta são transportados livremente e não se acumulam nas folhas. Com o final do período chuvoso as plantas produzem uma camada corticosa na base do caule que isola progressivamente a folha da planta, até que a folha caia. Este processo visa a economia de nutrientes e água para o período de estiagem e é denominado senescência. A camada corticosa reduz o fluxo de nutrientes minerais para a folha e a retirada de açúcares

delas, causando o aumento da concentração de açúcar nas folhas. A quantidade de antocianina aumenta quando a energia solar atinge as folhas ricas em açúcar ([Gedzelman, 2008](#)). Segundo o autor, a antocianina contribui para a saúde das folhas e plantas das seguintes formas:

- atua como protetor solar, protegendo a clorofila da destruição pela luz solar em situações de redução da produção de clorofila;
- é um antioxidante extremamente poderoso; protege a clorofila e aumenta a eficiência da fotossíntese após longas horas de exposição ao sol intenso; e
- facilita o transporte de nutrientes da folha em amadurecimento para os galhos e troncos e de volta à folha.

Segundo [Palm Jr. \(2009\)](#), em climas temperados, as folhas apresentam maior vermelhidão durante a senescência quando há uma primavera quente e úmida, um verão não tão quente e um período de senescência não tão adverso. Uma boa quantidade de chuva durante a época chuvosa pode atrasar o processo de senescência e reduzir a intensidade das cores durante o período de estresse. Por outro lado, a formação de geada muito severa mata as folhas, tornando-as marrons e proporcionando uma queda mais rápida do galho ([Palm Jr., 2009](#)).

Com a chegada de dias mais curtos, frios e secos durante o inverno ou período seco, a produção de clorofila nas folhas diminui progressivamente, até sumir, o que ocorre devido à manutenção de ambiente desfavorável para a produção de fotossíntese. Este processo revela o carotenóide e/ou a antocianina na planta, como ilustrado nas [Figuras 1.6 e 1.7](#). O surgimento da antocianina permite que as folhas permaneçam nas plantas por mais tempo e que, então, mais nutrientes possam ser extraídos das folhas antes de sua queda ([USDA Forest Service,](#)

2009). Este mecanismo proporciona uma sobrevivência às folhas, potencializando a transferência dos nutrientes produzidos nas folhas de volta para os galhos e troncos, nutrientes estes que serão necessários durante o período de estiagem.

Figura 1.6: Aparência visual de uma folha durante o processo de senescência.
Fonte: Adaptado de [Jacquemoud et al. \(2009\)](#)

Figura 1.7: Foco na senescência em direção às artérias principais de uma folha de Maple.
Fonte: [Gedzelman \(2008\)](#)

A limitação das atividades funcionais das plantas ocorre por meio da senescência programada advinda de um processo evolutivo, medida econômica que assegura uma transição temporal por um período de dormência em regiões onde ocorrem períodos com condições estressantes (Larcher, 1994). O sinal para o início da senescência é frequentemente originado por fatores externos, como dias mais curtos, ocorrência de temperatura do ar além de limites definidos ou por situações de estresse hídrico no solo. Este tipo de informação foi abordado por Ribeiro (2007), em estudo realizado com dados observados na Gleba Pé de Gigante, mesma área de estudo do trabalho ora apresentado. A autora concluiu que o potencial hídrico foliar apresenta seu valor máximo potencial em março e, o mínimo, no auge do inverno; a fotossíntese e a transpiração foliar apresentam seus níveis máximos em março; e a fluorescência da clorofila decresce acentuadamente a partir de abril.

A maneira como as folhas das plantas interagem com o ambiente não é ainda completamente entendida. Sabe-se que a quantidade de luz absorvida pelas plantas está atrelada à saúde da folha e a sua capacidade de absorver e metabolizar energia (Jacquemoud e Ustin, 2008). Estes autores informam que relações quantitativas entre características óticas e propriedades bioquímicas da planta (que, por sua vez, dependem de fatores externos), como as respostas ao envelhecimento das folhas ou a ambientes estressantes, elevam a refletância na faixa espectral da radiação visível, como é apresentado no Capítulo 3.0 deste trabalho.

1.4 Interação Biosfera-Atmosfera

As florestas, tal como conhecidas atualmente, não são mais consideradas áreas passivas, com propriedades climáticas fixas, mas, protagonistas de relevante componente do sistema

climático devido ao armazenamento de calor, água e CO₂, e, às dinâmicas de trocas destas propriedades com a atmosfera (Lovelock, 2006). Lovelock afirma que esta interação apresenta uma forte interdependência, e que representa apenas parte de um sistema bem mais complexo (a Terra), composto de vários subsistemas que se sustentam através da retroalimentação. Nesta relação, a atmosfera impõe limites aos organismos vivos através do clima que, por sua vez, a retroalimenta, condicionando suas características, formando um ciclo auto-organizador através de trocas de propriedades.

Rocha, em 2004, descreveu que a superfície e a atmosfera terrestre encontram-se em uma relação bilateral de ação e reação permanente. O tempo e o clima influenciam o estado da vegetação e limitam sua funcionalidade, principalmente por meio da oferta de energia, água e oscilações na temperatura, assim como as respostas da vegetação nos padrões do balanço de energia à superfície, manifestantes sobre cada ecossistema, são expressas no microclima. Dependendo da área superficial alterada, essa dinâmica pode influenciar o clima local, regional e de grande escala (Nobre *et al.*, 1991; Dickinson e Kennedy, 1992; Silva; 2002).

A componente vegetal da biosfera predominantemente floresce melhor entre 25°C e 35°C, o que caracteriza apenas uma parte da regulação fisiológica. O desenvolvimento vegetal também é influenciado pela oferta de água e luz (Larcher, 1994). Adicionalmente, essas propriedades precisam ser fornecidas em quantidades específicas para que o desenvolvimento vegetal seja potencializado. A oferta de água no solo é um aspecto físico que condiciona a atividade fotossintética, e a consequente produtividade ecossistêmica. O inverno nas regiões temperadas, quando as temperaturas são menores, a água permanece por mais tempo no solo devido à menor taxa de evapotranspiração, mantendo o solo úmido e adequado ao crescimento das plantas. Entretanto, no cerrado paulista, o inverno coincide com o período seco, provocando os menores valores de água acumulada no solo. Durante este período

ocorrem chuvas esparsas de pouca intensidade, sendo, por isso, de importância vital para a produtividade do ecossistema. A vegetação enfrenta também, a intrusão de massas de ar frio durante o inverno, proporcionando condições de temperaturas baixas extremas (inferiores a 10°C). O cerrado *sensu stricto* na Gleba Pé de Gigante foi considerado por Rocha *et al.* (2002) um ecossistema emissor de carbono para a atmosfera no período seco, fato este, em parte, relacionado às questões limitantes do meio físico como forçantes da atividade metabólica do ecossistema (Figura 1.3).

A quantidade de radiação solar recebida por um ecossistema ou organismo vegetal é fator fundamental ao seu funcionamento. A radiação fotossinteticamente ativa (RFA), limitada entre 0,4 μm e 0,7 μm , apresenta um papel importantíssimo no metabolismo vegetal, disponibilizando radiação solar específica para os processos fotossintéticos (Galvani *et al.*, 2004). Segundo o autor, a RFA seria responsável por ativar o processo de fotossíntese, representando a maior parte da energia solar convertida em nutrientes para as atividades metabólicas. Entretanto, as condições biofísicas da vegetação influenciam a quantidade de energia RFA absorvida pelo ecossistema, como é discutido no Capítulo 3.0 deste trabalho, onde os resultados e discussões são apresentados.

Outra importante característica que influencia a interação entre o ecossistema e a atmosfera é o albedo, propriedade biofísica da vegetação, que representa a quantidade de radiação solar refletida de volta para a atmosfera em relação à interceptada pela planta (Ollinger *et al.*, 2008). É uma informação de grande aplicabilidade em estudos sobre balanços de energia e modelagem da radiação solar, cujas variações traduzem as propriedades óticas da superfície. A variabilidade do albedo solar indica a energia disponível para os diferentes processos físicos e fisiológicos que ocorrem em determinado meio (Galvani *et al.*, 2001). O albedo sobre determinada superfície vegetada é função do tipo de cobertura do solo, da umidade da vegetação, do arranjo foliar, do ângulo de incidência dos raios solares (época do

ano e hora do dia), do tipo de radiação (direta, difusa e global) e da intensidade da irradiância (Stanhill *et al.*, 1968; Blad e Baker, 1972; Leitão *et al.*, 1990).

Variações do albedo podem ser relevantes para caracterizar alterações das propriedades biofísicas de determinada superfície durante diferentes períodos. Evidenciam as características de determinada cultura desde seu período de crescimento até a colheita (Epiphanio *et al.*, 1996), a variabilidade da vegetação em análises sazonais (Tannus, 2004) ou na escala de longos períodos (Hoffmann e Jackson, 2000).

1.5 Estudos de Larga Escala por Sensoriamento Remoto

O estudo dos diversos tipos de vegetação é uma das principais aplicações do sensoriamento remoto. Além do monitoramento há o interesse em avaliar as propriedades biofísicas dos alvos vegetados, como, por exemplo, a percentagem de cobertura do solo, o índice de área foliar e a biomassa (Epiphanio *et al.*, 1990; Epiphanio e Formaggio, 1991). Segundo Epiphanio *et al.* (1990), tais propriedades biofísicas funcionam como indicadores da condição desses alvos e, muitas vezes, servem como parâmetros de entrada em modelos diversos.

A quantidade de folhas na cobertura vegetal é um importante fator que modula a absorção de RFA (Mesquita Jr., 2003). A variabilidade espacial e temporal da relação entre medidas por sensoriamento remoto e parâmetros biofísicos pode ser estudada através do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (IVDN) (Moran *et al.*, 1997; Daughtry *et al.*, 2000). Jackson *et al.* (1983). Analisando diferentes índices de vegetação, estes autores verificaram que os índices de vegetação são bastante sensíveis a variações de umidade da superfície, sendo o IVDN o menos sensível à influência da atmosfera. A variação do IVDN

reflete a condição do estado biofísico da vegetação, de tal forma que valores máximos indicam uma vegetação com alto índice de folhas verdes e valores menores, menor índice de folhas verdes. O IVDN tem sido proposto como um bom método não destrutivo para estimar biomassa verde ou para classificar uma vegetação ([Bitencourt-Pereira, 1986](#)).

1.6 Objetivo

O estudo discute a variação sazonal e interanual do albedo e suas relações com a variabilidade dos fatores climáticos (oferta de radiação solar, temperatura do ar, precipitação) e biológicos (fotossíntese, senescência, rebrota) em área de cerrado *sensu stricto*, em Santa Rita do Passa Quatro, SP, durante o período de 2001 a 2007. Busca uma Associação entre o padrão de albedo com IVDN, estoques de carbono e fluxos de CO₂.

1.7 Motivação

No sentido de aprofundar os conhecimentos relacionados aos cerrados, a Gleba Pé de Gigante tem recebido significativa atenção científica. Este sítio experimental tem sido utilizado para o desenvolvimento de pesquisas em temas variados, como foram os trabalhos voltados para biologia da conservação [[Batalha \(1997\)](#); [Batalha *et al.* \(1998, 1999, 2000, 2001\)](#); [Pivello *et al.* \(1998, 1999\)](#); [Fidelis e Godoy \(2003\)](#); [Pivello e Varanda \(2005\)](#); [Shida e Pivello \(2005\)](#); [Ribeiro \(2007\)](#); [Ribeiro *et al.* \(2007\)](#); [Silva *et al.* \(2007\)](#)], fluxos atmosféricos [[Rosolem, \(2002\)](#); [Rocha *et al.* \(2002\)](#); [Rocha, \(2004\)](#); [Negron-Juarez \(2004\)](#); [Tannus \(2004\)](#); [Tasch](#)

(2006)] e sensoriamento remoto [Bitencourt *et al.* (1997, 2007); Bitencourt e Mesquita Jr. (2005); Mesquita Jr. (1998, 2003)], dentre outros.

A Gleba Pé de Gigante ganha importância pelo aprofundamento do conhecimento que vem sendo gerado sobre a estrutura e funcionalidade deste ecossistema ao longo do tempo; por sua localização no extremo sul do bioma no Brasil e alto índice de espécies endêmicas (Ribeiro, 2007); por ser a maior reserva contínua de cerrado *stricto sensu* no sudeste do Brasil (Shida e Pivello, 2005); e por apresentar certo grau de proteção legal (Parque Estadual de Vassununga), assegurando que o conhecimento poderá ser continuado e aprofundado.

Os resultados obtidos com esta pesquisa constituem um elo extremamente relevante para esclarecer os padrões dos fluxos de superfície e balanço de carbono sob condições climáticas diversas. Adicionalmente, provê um modelo simplificado da relação dos parâmetros de refletância via IVDN com medidas de campo, permitindo o escalonamento espacial de características locais para áreas de maior extensão.

2.0 Material e Métodos

2.1 Área de Estudo: Sítio Experimental Gleba Pé de Gigante

A Gleba Pé de Gigante (**Figuras 2.1 e 2.2**) é uma Área de Relevante Interesse Ecológico (ARIE), faz parte do Parque Estadual de Vassununga, e encontra-se no município de Santa Rita do Passa Quatro às margens da rodovia Anhanguera (SP-330, km 255 a 258), pertencendo à micro-região de Ribeirão Preto, Estado de São Paulo. A Gleba é delimitada pelas coordenadas $21^{\circ}38'32''\text{S}$; $47^{\circ}36'41''\text{W}$ e $21^{\circ}36'35''\text{S}$; $47^{\circ}38'02''\text{W}$, ocupando uma área de 1.225 ha, sendo a cabeceira de drenagem do córrego Paulicéia.

Figura 2.1: Área de estudo - Gleba Pé de Gigante, Santa Rita do Passa Quatro, SP.
Fonte: [Google Earth \(2009\)](#)

Figura 2.2: Panorama do cerrado na Gleba Pé de Gigante. Foto tirada do alto da torre micrometeorológica em direção ao sul, com uma área de campo úmido ao centro e diferentes usos do solo no entorno da Gleba (março, 2008).

A Gleba Pé de Gigante encontra-se entre as cotas 590 m e 740 m, onde coexistem diferentes fitofisionomias. De acordo com [Batalha \(1997\)](#), a área de ocorrência das fitofisionomias apresenta a predominância do cerrado *sensu stricto*, como pode ser observado na [Tabela 2.1](#). A distribuição espacial das fisionomias de cerrado na vegetação da Gleba Pé de Gigante é indicada na [Figura 2.3](#) ([Ruggerio et al., 2006](#)).

Tabela 2.1: Área de ocorrência das fitofisionomias na gleba Pé de Gigante (Batalha, 1997).

Fitofisionomia	Hectares	Área (%)
Campo úmido	6,74	0,55%
Campo Sujo de Encosta	3,06	0,25%
Campo Cerrado	96,78	7,90%
Cerrado <i>sensu stricto</i>	967,75	79%
Cerradão	135,98	11,10%
Floresta Estacional Semidecidual	14,70	1,20%
Total	1.225	100%

Figura 2.3: Ocorrência das diferentes fitofisionomias na Gleba Pé de Gigante.
Fonte: [Ruggerio et al. \(2006\)](#)

Segundo [Cooper et al. \(2005\)](#), os solos da Gleba Pé de Gigante são compostos predominantemente por Neossolos Quartzarênicos, ocupando 94% da área, Neossolo Flúvico Tb eutrófico; Latossolo Vermelho e; Latossolo Vermelho-Amarelo, não correspondendo às variações de vegetação no nível de detalhe estudado pelo autor.

Para caracterizar a climatologia da região de Santa Rita do Passa Quatro, [Tasch \(2006\)](#) utilizou dados de longo prazo de precipitação em seis estações meteorológicas localizadas no entorno da área de estudo, oriundos do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE/SP). A partir de dados mensais, determinou a média entre as estações pluviométricas para a composição da climatologia da precipitação na região de estudo para o período de 1961-1990. As informações da temperatura foram obtidas com base nos dados da estação meteorológica C4-107, de Santa Rita do Passa Quatro, inserida na bacia hidrográfica do Rio Mogi Guaçu, no período de 1982-1998.

O clima da região de Santa Rita do Passa Quatro pode ser definido como um clima de forte sazonalidade, sendo ameno, mas com a ocorrência de temperaturas inferiores a 10°C, geadas e baixo índice de precipitação durante o inverno, e alta temperatura (35°C), precipitação (443 mm.mês⁻¹) e umidade relativa (92%) na estação chuvosa. De acordo com [Sarmiento \(1984\)](#) o ecossistema pode ser classificado como cerrado estacional ([Figura 2.4](#)). A temperatura média varia de 19°C, durante o inverno (junho), até 24°C, no verão (fevereiro); a precipitação média mensal apresenta valores superiores a 200 mm durante o verão, ao passo que durante o inverno os valores médios mensais são inferiores a 50 mm, sendo a climatologia anual da precipitação igual a 1498 ± 312 mm e, a climatologia anual da temperatura igual a 22,1 ± 0,5°C, como ilustrado na [Figura 2.5](#) ([Tasch, 2006](#)).

Figura 2.4: Fotografias da torre micrometeorológica na Gleba Pé de Gigante. À esquerda, período chuvoso, à direita, seca.

Fonte: Laboratório de Clima e Biosfera

(<http://www.dca.iag.usp.br/www/material/humberto/index.htm>)

Figura 2.5: Climatologia da (a) temperatura mensal para a estação Santa Rita do Passa Quatro (C4-107), utilizando uma série de 30 anos (1961-1990). (b) Pluviograma da região de Santa Rita do Passa Quatro, para o período 1961-2000. A linha sólida une os valores médios de cada mês.

Fonte: **Tasch (2006)**

A distribuição geográfica da climatologia da precipitação na estação chuvosa e seca do Estado de São Paulo é apresentada na **Figura 2.6**. Observa-se que a

variabilidade espacial da precipitação durante a estação chuvosa e seca apresenta comportamentos distintos. Durante a estação chuvosa, o maior gradiente de precipitação é observado na direção zonal (oeste-leste), sugerindo que a proximidade do oceano e a convecção local, pelo aquecimento da superfície, apresentam maior interferência neste caso. Durante o inverno, a dinâmica de escala sinótica é mais perceptível, sugerindo que a atuação de frentes frias é que determina a gradiente de precipitação na direção meridional (sul-norte).

Figura 2.6: Climatologia da precipitação para as estações (a) chuvosa e (b) seca. O período considerado para o cálculo da climatologia foi 1961-2000. O pequeno quadrado no setor nordeste do Estado representa aproximadamente a localização de Santa Rita do Passa Quatro.

Fonte: adaptado de [Tasch \(2006\)](#)

2.2 Estimativas de Biomassa e Estoques de Carbono

Esse trabalho apresenta principalmente os resultados de observação de parâmetros físicos característicos do cerrado *sensu stricto* da Gleba Pé de Gigante, fisionomia para a qual um inventário visual foi realizado nesta pesquisa. Apresenta adicionalmente os resultados de estimativa da biomassa de toda a Gleba Pé de Gigante, considerando-se a variação de formas fisionômicas que ocorrem na unidade de conservação, incluindo

cerrado denso, cerrado *sensu stricto* e campo cerrado, sendo que campo cerrado consiste na união das fisionomias campestres de cerrado presentes na Gleba.

A estimativa de biomassa segue o método proposto por [Ottmar et al. \(2004\)](#) com base numa série de estéreofotografias para o cerrado, em que a biomassa das árvores é calculada individualmente, usando-se a equação alométrica para vegetação de cerrado proposta por [Abdala et al. \(1998\)](#), tal como indicada a seguir:

$$\log (y) = 0,9967 * \log (x) + 2,587 ,$$

em que “y” é o total de biomassa seca para cada indivíduo e “x” é o volume cilíndrico (em dm³) calculado como produto entre a área basal a 30 cm do solo e a altura oblíqua do indivíduo.

Para estimar a biomassa acima do solo na Gleba Pé de Gigante, foram aplicados valores de biomassa derivados de [Ottmar et al. \(2004\)](#), de acordo com a [Tabela 2.2](#). A [Figura 2.7](#) representa o inventário visual feito para o cerrado *sensu stricto*.

Tabela 2.2: Valores utilizados para estimativa de biomassa acima do solo na Gleba Pé de Gigante.

Fisionomia	Biomassa seca acima do solo (Mg / ha)	Observações
campo cerrado	21,07	Esta categoria refere-se à média ponderada de todas as classes campestre de cerrado presentes na Gleba, com base nas informações disponíveis em Ottmar et al. (2004)
cerrado <i>sensu stricto</i>	58,01	O valor associado ao cerrado <i>sensu stricto</i> segue o método proposto por Ottmar et al. (2004)
cerrado denso	67,47	Para o cerrado denso aplicou-se um valor intermediário apresentado por Ottmar et al. (2004)

Figura 2.7: Características da estrutura do cerrado *sensu stricto* próximo à torre micrometeorológica, na Gleba Pé de Gigante, Santa Rita do Passa Quatro, SP.

A razão entre a biomassa radicular e a biomassa aérea (R:S), na Gleba Pé de Gigante, foi definida como a média entre os valores encontrados, para cada fisionomia, nos trabalhos de [Sarmiento e Vera \(1979\)](#), [Castro \(1996\)](#), [Castro e Kauffmann \(1998\)](#), [Abdala *et al.* \(1998\)](#), [Delitti *et al.* \(2001\)](#) e [Lilienfein *et al.* \(2001\)](#). A R:S para campo cerrado é derivada da média ponderada dos valores encontrados para três fisionomias campestres de cerrado, encontradas nos trabalhos citados anteriormente ([Tabela 2.3](#)).

Tabela 2.3: Valores de R:S usados para estimar a biomassa de raízes na Gleba Pé de Gigante, Santa Rita do Passa Quatro, SP.

Fisionomia	Média R:S
Campo cerrado	4,67
Cerrado <i>sensu stricto</i>	2,22
Cerrado denso	2,60

As estimativas para estoque de carbono baseadas nos estudos do [IPCC \(2003\)](#) informam que aproximadamente 50% da biomassa seca é igual à massa de carbono. Para converter o carbono estocado na biomassa seca em dióxido de carbono (CO₂) atmosférico, foi calculado o produto da biomassa seca pela fração de carbono obtida dos estudos do IPCC (igual a 0,5, tal como mencionado anteriormente) e pela razão entre o peso molecular do CO₂ e do carbono (44/12), tal como expresso na seguinte equação:

$$\text{CO}_2 = \text{biomassa seca} \times 0,5 \times 3,67$$

A porção de floresta semidecidual da Gleba Pé de Gigante, que ocupa 1,2% da área total, não foi considerada nas estimativas de biomassa e de estoque de carbono deste estudo.

2.3 Medidas Micrometeorológicas

Os dados reportados no capítulo de resultados referem-se às medições feitas na Gleba Pé de Gigante, obtidos por instrumentos instalados na torre micrometeorológica, que tem de 21 metros de altura (Figura 2.8). A torre está localizada sobre uma área de cerrado *sensu stricto*, cujo dossel tem altura aproximada de 10 metros. Os dados foram coletados no período de 1º de janeiro de 2001 a 31 de dezembro de 2007. As medidas de irradiância solar e irradiância fotossinteticamente ativa (RFA), temperatura do ar, umidade do ar, precipitação e umidade do solo foram armazenadas em um *datalogger CR 10X (Campbell Systems)*, com aquisição de dados a cada 15 segundos e gravação das médias, valores máximos e mínimos a cada 10 minutos. As informações coletadas foram agrupadas em séries de 30 minutos, cujas somatórias e médias originaram valores diários (24 horas). Os instrumentos utilizados na observação dos dados estão indicados na Tabela 2.4. Foi realizado um estudo fitossociológico em área correspondente ao *footprint*¹ da torre (Figura 2.9).

¹ *Footprint* refere-se à área da superfície que influencia os dados amostrados pelos sensores da torre.

Figura 2.8: Torre micrometeorológica instalada no cerrado *sensu stricto* da Gleba Pé de Gigante, Santa Rita do Passa Quatro, SP.

Figura 2.9: Mapa de localização dos indivíduos e espécies levantados na área da torre micrometeorológica, no cerrado *sensu stricto* da Gleba Pé de Gigante.
Fonte: Rocha (2007)

Tabela 2.4: Descrição das variáveis medidas e instrumentação correspondente instalada na torre micrometeorológica da Gleba Pé de Gigante, utilizadas neste trabalho.

Variável	Símbolo/Unidade	Sensor
Temperatura do Ar	T (°C)	Psicrômetro CSI HMP45C
Umidade Relativa	UR (%)	Psicrômetro CSI HMP45C
Precipitação	Prec (mm)	Pluviômetro Hydrological Services
Irradiância Solar Global incidente e refletida	Ki e Kr (Wm ⁻²)	Piranômetro Licor 200X
Irradiância Fotossinteticamente Ativa incidente e refletida	RFAi e RFAr (Wm ⁻²)	Licor Quantum LI 190

A média diária do albedo solar e do albedo RFA foi calculada com base nas médias de 30 minutos, das 8:30 às 17:00 horas, tal como discutido em [Galvani *et al.*, 2002](#). A exclusão dos valores de irradiância em horários próximos ao nascer e pôr do sol diminui a má estimativa dos valores de albedo devido à incidência direta dos raios solares no sensor. Desta forma, considerou-se 17 dados por dia, com exigência de 100% de dados válidos. As equações utilizadas para o cálculo do albedo da radiação solar e da RFA médio diário foram as seguintes:

$$\text{albedo solar} = \frac{\sum K_r}{\sum K_i} \quad \text{e} \quad \text{albedo RFA} = \frac{\sum \text{RFA}_r}{\sum \text{RFA}_i}.$$

As informações apresentadas nesta pesquisa são derivadas do Projeto Temático Biota/FAPESP (02/09289-9), Interação Biosfera-Atmosfera Fase 2: Cerrados e Mudança do Uso da Terra, coordenado pelo Dr. Humberto Ribeiro da Rocha, do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, LCB (Laboratório de Clima e Biosfera), da USP.

2.4 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada

O índice de vegetação foi calculado a partir de dados de refletância coletados pelo sensor CBERS-2 do nas bandas 3 (vermelho) e 4 (infravermelho próximo), cujas faixas espectrais correspondem a 0,63 - 0,69 μm e 0,77 - 0,89 μm , respectivamente. As imagens têm resolução espacial de 20 metros.

Rouse *et al.* (1974) sugeriram a normalização da diferença simples entre a refletância nestas duas bandas, obtendo valores entre -1 e +1. Propuseram, assim, o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (IVDN), que pode ser expresso pela seguinte equação:

$$\text{IVDN} = (\text{IVP} - \text{V}) / (\text{IVP} + \text{V}),$$

em que IVP é a refletância na banda do infravermelho próximo e V, a refletância na banda do vermelho.

O processamento das imagens foi feito com o auxílio do software IDRISI Andes 15.0. As imagens não foram corrigidas quanto aos possíveis efeitos de espalhamento e atenuação atmosférica. As análises de IVDN foram elaboradas com o auxílio da Dra. Marisa Dantas Bitencourt, no Laboratório da Paisagem e Conservação (LePac), pertencente ao Departamento de Ecologia, do Instituto de Biociências, da USP.

3.0 Resultados e Discussão

Neste capítulo são apresentados os resultados dos dados observados na Gleba Pé de Gigante no período de 2001 a 2007. Os resultados foram distribuídos em três partes principais: estimativa de massa de carbono respectiva à biomassa da vegetação; condições atmosféricas observadas no decorrer do período analisado (2001-2007) e; cálculo do IVDN para períodos específicos do ano e sua comparação com valores de albedo RFA.

Em geral, os resultados apresentaram influência marcante da sazonalidade do ambiente. A precipitação apresentou-se como o principal condicionante físico ao estado da vegetação, o que está provavelmente relacionado ao fato de que entre 70 e 95% da precipitação anual registrada na área ocorre durante a estação úmida.

3.1 Biomassa e Estoque de Carbono na Gleba Pé de Gigante

A estrutura da vegetação (biomassa aérea e radicular) na Gleba Pé de Gigante foi estimada em 219.749 Mg (**Tabela 3.1**). A soma da biomassa radicular e aérea aumenta de acordo com o gradiente de vegetação nas fitofisionomias campo cerrado, cerrado *sensu stricto* e cerrado denso. A massa estimada para estas fitofisionomias é igual a 67,1 Mg.ha⁻¹ para campo cerrado, 185,6 Mg.ha⁻¹ para cerrado *sensu stricto*, e 242,7 Mg.ha⁻¹ para cerrado denso e a razão R:S, igual a 4,2, 2,2 e 2,6, respectivamente. O cerrado

sensu stricto apresenta a maior quantidade de biomassa viva em toda a área da Gleba, com 179.606 Mg, devido à maior área ocupada por esta fitofisionomia. Em massa total na área, o cerrado *sensu stricto* é seguido pelo cerrado denso, com 32.996 Mg e pelo campo cerrado, com 7.147 Mg.

Tabela 3.1: Estimativa de biomassa na Gleba Pé de Gigante, Santa Rita do Passa Quatro, SP

Fitofisionomia	Área na Gleba Pé de Gigante (ha)	Biomassa aérea (Mg)	Biomassa radicular (Mg)
Campo Cerrado	106,6	1.260,4	5.886,6
Cerrado <i>sensu stricto</i>	967,8	56.139,2	123.467,1
Cerrado Denso	136,0	9.174,2	23.821,7
Floresta Estacional Semidecidual	14,7	-	-
Total	1.225,0	66.573,8	153.175,4

A torre micrometeorológica instalada em cerrado *sensu stricto*, na Gleba Pé de Gigante, tem como objetivo principal estimar fluxos de carbono, vapor d'água, calor e energia na interação biosfera-atmosfera. Segundo Rocha *et al.* (2002), este cerrado *sensu stricto* absorve, em média, $25 \text{ kgC.ha}^{-1}.\text{dia}^{-1}$, podendo sequestrar até $40 \text{ kgC.ha}^{-1}.\text{dia}^{-1}$ durante estações chuvosas, enquanto que durante estações secas, o ecossistema emite até $50 \text{ kgC.ha}^{-1}.\text{dia}^{-1}$. Sugere-se, neste trabalho, que os fluxos de carbono apresentados por Rocha *et al.* (2002) correspondam a um ecossistema onde há um estoque de $92,8 \text{ MgC.ha}^{-1}$ (correspondente a 50% de 185,6 Mg, (Tabela 3.1)). Ainda, levando-se em consideração a área de ocorrência do cerrado *sensu stricto* na Gleba Pé de Gigante (967,8 ha), é possível estimar que a fração correspondente a esta fisionomia da Gleba absorve em média $24,1 \text{ MgC.dia}^{-1}$, alcançando até $38,7 \text{ MgC.dia}^{-1}$ nas estações chuvosas, e emitindo até $48,2 \text{ MgC.dia}^{-1}$ durante as estações secas.

Levando-se em consideração um cenário de mudanças climáticas e as altas taxas de desmatamento no Brasil, a manutenção dos estoques de carbono na biosfera é de

extrema importância para que o aumento da temperatura não ultrapasse 2°C até 2050 em relação aos níveis de 1990, como é recomendado pelo IPCC. Seguindo as estimativas do [IPCC \(2003\)](#), a perda total da vegetação da Gleba Pé de Gigante representaria a emissão de 403.240 MgCO₂eq para a atmosfera. Este tipo de estimativa tem como objetivo não apenas evidenciar a importância da preservação dos ecossistemas frente às mudanças climáticas, mas também evidenciar o forte vínculo existente na interface biosfera-atmosfera-sociedade.

3.2 Variação Climática

A distribuição temporal das chuvas ([Figura 3.1](#)) segue um padrão sazonal bem definido, com verão úmido e inverno seco. A estação chuvosa (outubro–março), entre 2001 e 2007, apresentou meses com precipitação acumulada superior a 400 mm e a estação seca (abril–setembro) apresentou meses sem precipitação.

Figura 3.1: Precipitação mensal acumulada (mm) entre os anos 2001 e 2007 na Gleba Pé de Gigante, Santa Rita do Passa Quatro, SP.

A **Figura 3.2** apresenta a distribuição acumulada das chuvas entre as estações úmidas e secas para cada ano da série (2001-2007). É possível observar um decréscimo da precipitação acumulada na estação úmida entre 2004 e 2006, que volta a aumentar a partir de então. A precipitação durante a estação seca, entre 2004 e 2006, também decresceu, embora tenha apresentado acumulados mensais bem menores. Portanto, é possível observar que a precipitação, neste período, diminuiu nas duas estações do ano, seca e úmida, resultando em um padrão geral de queda da precipitação. A precipitação observada durante a estação seca, para o período considerado, equivale a um valor que varia de 5% a 30% da precipitação observada durante a estação úmida.

Figura 3.2: Precipitação sazonal acumulada (mm) entre os anos 2001 e 2007, na Gleba Pé de Gigante, Santa Rita do Passa Quatro, SP. Note que a precipitação ocorrida em parte da estação úmida dos anos 2001 e 2007 não foram computadas e apresentadas neste gráfico.

A **Figura 3.3** apresenta a distribuição anual da chuva acumulada com base no ano hidrológico, com início em 1º de outubro. Com base nos valores anuais (**Figura 3.3**), observa-se um decréscimo da precipitação de 2003 a 2006. A maior variação interanual observada no período foi de 791 mm, entre os anos 2003 (mais chuvoso) e 2006 (mais seco). Comparando-se com a precipitação anual dos dados da [Reanálise I](#)

(Kalnay et al., 1996) (Figura 3.4), para a mesma região, é possível observar um padrão de variação interanual similar, entretanto, o ano com o menor índice de precipitação ocorreu em 2004, ao invés de 2006, tal como indicado pelos dados observados na torre micrometeorológica.

Figura 3.3: Precipitação anual acumulada (mm), com base no ano hidrológico, entre os anos 2001 e 2007, na Gleba Pé de Gigante, Santa Rita do Passa Quatro, SP. Note que a precipitação ocorrida anteriormente ao ano 2001 não foi computada e apresentada neste gráfico.

Figura 3.4: Precipitação anual acumulada (mm), com base no ano hidrológico, entre os anos 2001 e 2007, na região de Santa Rita do Passa Quatro, SP.

Fonte: Reanálise I (Kalnay et al., 1996)

Como forma de validação, os dados de precipitação coletados na torre micrometeorológica foram comparados à média mensal calculada com base nos dados da Reanálise I (Kalnay et al., 1996), para a região de Santa Rita do Passa Quatro. A comparação entre a média mensal para todo o período (2001-2007) com os dados das duas fontes indica uma diferença de 19,3 mm (Figura 3.5). É possível observar que a estação chuvosa de 2001 e entre 2005 e 2006 apresentaram forte déficit hídrico, o que apresenta forte correlação com o estado da vegetação e o padrão de albedo, como será analisado no item 3.3, adiante.

Figura 3.5: Desvio da precipitação média mensal (mm) da torre micrometeorológica da Gleba Pé de Gigante em relação à média climatológica mensal de NOAA para a região de em Santa Rita do Passa Quatro, SP.

A variação sazonal da temperatura do ar seguiu o mesmo padrão da precipitação entre os períodos de chuva e estiagem (Figura 3.6). A amplitude térmica entre os valores de temperatura máxima e mínima diurna variou entre 3,28°C a 35,9°C, no período considerado. A temperatura média mensal oscilou entre 18°C e 21°C, em julho, mês com a média mais baixa, e, entre 26,4°C e 21,2°C, em outubro, mês com a média mensal mais alta da série. O mês que apresentou a menor variação de temperatura média mensal (2,0°C), dentre os anos considerados, foi janeiro (Figura 3.7).

Figura 3.6: Temperatura média diária máxima e mínima (°C), entre os anos 2001 e 2007, na Gleba Pé de Gigante, Santa Rita do Passa Quatro, SP. A curva cheia indica o valor médio mensal (valores de temperatura inferiores a 10°C estão associados à indução da senescência na vegetação).

Figura 3.7: Temperatura média mensal (°C) entre os anos 2001 e 2007 na Gleba Pé de Gigante, São Paulo, SP.

Ao longo dos anos 2001-2007 foram observadas temperaturas mínimas inferiores a 10°C principalmente entre os meses de maio e julho. A maior frequência de valores mínimos de temperatura observados na Gleba Pé de Gigante entre 2001-2007 está associada à maior frequência de entrada de massas de ar mais frio, conforme verificado pelas informações do INPE (www.inpe.br).

Como forma de validação, os dados de temperatura da torre micrometeorológica também foram comparados aos dados da Reanálise I para a região de Santa Rita do Passa Quatro. O resultado desta comparação demonstra que os dados levantados na Gleba Pé de Gigante apresentaram um desvio médio sistemático de +2,4°C em relação aos dados da Reanálise. Ou seja, os dados da torre, para o período considerado, são quase sempre maiores do que os dados da Reanálise. Para este período observou-se um desvio máximo de +5,6°C, em maio de 2007, tal como pode ser observado na **Figura 3.8**.

Figura 3.8: Desvio da temperatura média mensal (mm) da torre micrometeorológica da Gleba Pé de Gigante em relação aos dados da Reanálise I entre os anos 2001 e 2007, na Gleba Pé de Gigante, Santa Rita do Passa Quatro, SP.

Assim como temperatura do ar e a precipitação, a umidade relativa do ar segue a variação sazonal entre verão e inverno, evidenciando períodos úmidos e secos, respectivamente, como pode ser observado na **Figura 3.9**. A umidade relativa do ar apresentou valores absolutos diários entre 20% e 90%, nas estações seca e úmida, respectivamente, e valores médios mensais entre 55% e 80%, ao longo dos anos.

Figura 3.9: Evolução temporal (dados diários) da umidade relativa do ar (%) entre os anos 2001 e 2007, na Gleba Pé de Gigante, Santa Rita do Passa Quatro, SP.

A umidade do solo segue o padrão de sazonalidade marcado pelo padrão das chuvas. As camadas superficiais são mais sensíveis aos processos atmosféricos e umedecem rapidamente com as chuvas fracas, ao passo que as camadas mais profundas precisam de maior recarga do solo para que a umidade apresente valores maiores, o que ocorre com pequeno atraso em relação à chuva. Observando o grau de saturação do solo, percebemos que o final do período de estiagem de 2005 foi sentido tardiamente pelas camadas inferiores a 80 cm (por exemplo, final de outubro, para a camada de 80 cm, [Figura 3.10.d](#), e, dezembro, para a camada de 200 cm, [Figura 3.12.b](#)). Observou-se ainda que o início de 2006 apresentou baixo volume de água no solo ([Figuras 3.10 e 3.11](#)), o que esteve associado ao baixo volume de precipitação durante o período chuvoso 2005/2006 ([Figura 3.2](#)).

Tanto o déficit hídrico como o alto volume de água no solo apresentam relações intrínsecas com o albedo da vegetação, pela maior ou menor eficiência da vegetação em extrair água do solo, o que caracteriza seu estado fisiológico. O período de estiagem de 2002 apresentou alta concentração de água no solo nas camadas superiores, tal como visto na camada de 10 cm ([Figura 3.10a](#)). O volume de água nesta camada cresceu ao

longo do período de estiagem. A taxa de precipitação durante este ano esteve associada a um potencial de recarga do solo principalmente na camada mais superficial, o que representou significativa influência no estado da vegetação. Ao final do período chuvoso posterior, em março de 2003, o ecossistema apresentou alto potencial para a fotossíntese, como será discutido na seção 3.3, o que significa que a umidade antecedente do solo influenciou positivamente o desenvolvimento vegetal.

Figura 3.10: Valores mensais da umidade volumétrica do solo ($m^3.m^{-3}$) para as profundidades de (a) 10 cm, (b) 20 cm, (c) 50 cm e (d) 80 cm e, (e) precipitação acumulada mensal para os anos 2001 a 2007, na Gleba Pé de Gigante, Santa Rita do Passa Quatro, SP.

Figura 3.11: Valores mensais da umidade volumétrica do solo ($m^3.m^{-3}$) para (a) 150 cm, (b) 200 cm e (c) 250 cm e, (d) precipitação acumulada mensal entre os anos 2001 e 2007 na Gleba Pé de Gigante. São Paulo, SP.

Entre abril e setembro a energia média diária ofertada variou entre 160 e 300 Wm^{-2} , enquanto que a energia média diária ofertada entre setembro e abril, variou entre 300 e 350 Wm^{-2} . Além da variação sazonal, a irradiância solar global incidente na

superfície terrestre depende das variações astronômicas da distância Terra-Sol (como a excentricidade da órbita de translação da Terra em torno do Sol, a inclinação do eixo de rotação da Terra com relação ao plano da eclíptica e a precessão). Contudo, as efemérides astronômicas apresentam periodicidades da ordem de grandeza de milhares de anos, sendo, desta forma, a sazonalidade um fator muito mais perceptível na escala de vida da biosfera terrestre. Ao atravessar a atmosfera, a radiação solar pode ser modificada por seus constituintes, e pode ser refletida, absorvida e espalhada.

A variabilidade da radiação solar observada na torre micrometeorológica da Gleba Pé de Gigante, durante o período de 2001 a 2007, está indicada na **Figura 3.12**. Neste gráfico é possível identificar a sazonalidade desta variável assim como sua variabilidade diária, definida na maior parte das vezes pela quantidade de vapor d'água e nebulosidade presentes na atmosfera. Sua variabilidade interanual é bastante pequena.

Figura 3.12: Evolução temporal da irradiância solar global incidente (Wm^{-2}) diária em superfície, entre os anos 2001 e 2007, na Gleba Pé de Gigante, Santa Rita do Passa Quatro, SP.

3.3 Albedo em Cerrado *Sensu Stricto*

O albedo de superfícies vegetadas é fortemente controlado pela variação climática, particularmente em ecossistemas que apresentam uma sazonalidade marcante, já que a variação temporal das propriedades fisiológicas da vegetação é controlada por fatores abióticos, impostos pelo clima. A vegetação do tipo cerrado, presente na Gleba Pé de Gigante, apresenta forte sazonalidade. Os principais fatores abióticos que interferem no comportamento do albedo de superfície são: a radiação solar, o conteúdo de água no solo e a temperatura do ar. Além da variação na escala sazonal, o albedo de superfícies vegetadas também é controlado pela escala climática interanual. Desta maneira, o propósito específico deste item é diagnosticar a variabilidade do albedo da superfície nestas duas escalas, de acordo com os dados disponíveis da série utilizada.

De maneira geral é evidente o padrão sazonal da atmosfera, com duas condições físicas distintas em cada ano da série temporal analisada. O período entre maio e setembro de cada ano é caracterizado por baixa oferta de energia solar, com valores mínimos de radiação solar incidente na superfície, em torno de 200 Wm^{-2} . Como consequência, verifica-se, neste período, valores mínimos de temperatura, eventualmente inferiores a 10°C . Além da maior ocorrência de temperaturas baixas, o clima se torna mais seco, com déficit hídrico no solo e baixa umidade do ar. O período entre outubro e março caracteriza-se por condições contrárias, com grande oferta de energia, em torno de 300 Wm^{-2} , altas temperaturas, altos índices pluviométricos e de umidade do ar e excedente hídrico no solo.

Entre maio e setembro, a combinação das condições físicas do ambiente cria um cenário de estresses múltiplos (principalmente pela diminuição da radiação solar, da temperatura do ar, da precipitação e, por conseguinte, da quantidade de água no solo)

que força a diminuição das atividades metabólicas das plantas, induzindo à redução da atividade fotossintética do ecossistema. As diferentes espécies vegetais reagem de formas diferentes aos estresses provocados pelas condições físicas. Espécies lenhosas com algum grau de decíduidade iniciam seu processo de senescência durante o período seco; espécies sempre-verdes reduzem suas atividades fotossintéticas e; espécies graminóides reagem ao estresse através da dormência. A resposta do ecossistema às condições de estresse se expressa na menor assimilação de CO_2 da atmosfera e, portanto, na diminuição da produtividade do ecossistema (a menor assimilação do CO_2 decorre do fechamento dos estômatos para que a planta não perca água durante situações de estresse hídrico). A interação atmosfera-biosfera, através dos processos mencionados, determina o comportamento sazonal e interanual do albedo na superfície.

Os dados do albedo RFA (Figura 3.13) indicam um forte regime sazonal associado ao comportamento da vegetação, que controla a absorção e a reflexão da RFA. Ao final do inverno (entre agosto e setembro), quando a vegetação está seca há mais tempo e quase não há folhas, ocorrem os maiores valores de albedo RFA, entre 3,5% e 4,0%, exceto no final do inverno de 2001, quando o valor máximo de albedo RFA foi aproximadamente 5,0%. Durante o período seco as folhas apresentam baixo ritmo das atividades metabólicas, as espécies decíduas ficam sem folhas e as espécies sempre verdes começam a fechar os estômatos, diminuindo assim a fotossíntese, para evitar a perda de água para o meio externo. Com o início das chuvas, entre setembro e outubro, o albedo RFA começa a cair em função da rebrota das folhas, até alcançar valores mínimos entre os meses de fevereiro e março (final da estação chuvosa). É neste período que o ecossistema apresenta seu potencial máximo de realização da fotossíntese. Os valores mínimos de albedo RFA variaram entre 2,2% e 2,8% para a série de dados analisada. Em geral, o albedo RFA segue um padrão cíclico anual, com

valores máximos no final do inverno, quando há baixa atividade fotossintética, e valores mínimos no final do verão, quando as folhas absorvem muita RFA para realização da fotossíntese.

Além da variação sazonal, é possível observar a variabilidade interanual do albedo RFA. É possível identificar, ao menos, três aspectos mais visíveis nesta escala: o alto valor do albedo em 2001; valores similares do albedo RFA entre 2002 e 2005 e valores relativamente altos em 2006 (Figura 3.13). Adicionalmente ao aumento anual da temperatura do ar em 2001 (anomalia positiva significativa), verifica-se uma tendência positiva de aumento da temperatura desde 1989 para a área de estudo além de uma estação chuvosa com baixo índice de precipitação, como pode ser observado na Figura 3.5. Entre 2002 e 2006, verificou-se uma diminuição gradativa da precipitação anual (Figura 3.3), o que pode estar associado ao valor mais alto de albedo RFA observado em 2006.

O baixo índice de precipitação acumulada (774 mm) no ano hidrológico de 2006, provavelmente condicionou a menor capacidade de assimilação de RFA e CO₂ pelo ecossistema durante o período úmido (outubro/2005–março/2006). Além de uma estação úmida com pouca chuva entre outubro/2005 e março/2006, o período de abril a setembro de 2006 foi caracterizado como a estiagem mais intensa observada no período. O longo período de redução de precipitação entre 2002 e 2006, intensificando o estresse hídrico no ano hidrológico de 2006 acarretou a elevação do albedo RFA e reduziu a assimilação de CO₂ (Figura 3.13). O albedo RFA alcançou o valor máximo de 4,4% no final de julho/2006, enquanto que a média para o período analisado foi igual a 3,7%, um aumento de 19% no albedo RFA. O ano de 2006 apresentou temperatura média do ar relativamente alta em relação aos demais anos da série, tendo sido observado poucos eventos com temperatura inferior a 10°C.

Contrariamente ao ano de 2006, 2004 foi um ano relativamente mais chuvoso, com precipitação distribuída de forma mais regular durante o ano. A estação úmida de 2003/2004 foi bastante chuvosa, acumulando 1.244 mm. A absorção de RFA para o período úmido de 2003/2004 manteve-se com valores próximos à média do período todo. Entretanto, a estação seca de 2004 foi a que apresentou as menores temperaturas na série de dados estudada. Temperaturas inferiores a 10°C ocorreram no final de maio (temperatura do ar inferior a 10°C está associada à menor eficiência de realização da fotossíntese pela vegetação). As temperaturas baixas, inferiores a 10°C, observadas durante a estação seca local, ocorreram na retaguarda de frentes frias, tal como apresentado na revista [Climanálise \(2004\)](#). Em geral, as temperaturas baixas permanecem numa determinada região durante dois a quatro dias, podendo permanecer por até sete dias consecutivos. Durante os dias 21 a 27 de julho de 2004, as temperaturas mínimas absolutas diárias foram iguais a 10,5°C, 8,33°C, 8,49°C, 8,94°C, 10,25°C, 9,92°C e 10,94°C, respectivamente. Por outro lado, o ano 2004 apresentou o maior índice de precipitação durante a estação seca, entre abril e setembro, com 303 mm acumulados no período. Desta forma, apesar da alta intensidade e frequência de eventos frios atuantes na Gleba Pé de Gigante neste ano, o albedo RFA, durante o período de inverno, manteve-se com valores próximos à média para o período. A literatura descreve que a senescência é fortemente controlada pelo clima, de tal forma que o volume da precipitação, os valores da temperatura do ar e de energia solar incidente em superfície condicionam o desenvolvimento vegetal. Pela análise do albedo RFA nos anos 2004 (quando as baixas temperaturas mais intensas não foram suficientes para provocar uma baixa atividade fotossintética) e 2006 (quando houve uma forte estiagem, mas com temperaturas mínimas não muito baixas), verificou-se que o controle exercido

pelo volume de precipitação foi aparentemente mais forte do que as condições atmosféricas desfavoráveis produzidas pelas baixas temperaturas.

Figura 3.13: Variação temporal do (a) albedo solar (%) e albedo RFA (%), da (b) precipitação mensal acumulada (mm) e da temperatura média mensal, entre 2001 e 2007, na área de estudo. Os valores diários de albedo (gráfico superior) foram suavizados com média móvel com janela de 30 dias.

O albedo solar apresenta uma variação sazonal bem marcada, com valores mínimos entre agosto e setembro (coincidindo com os valores máximos do albedo RFA) e valores máximos entre novembro e dezembro. O albedo solar indica qual a porcentagem da radiação solar é refletida pela superfície de volta para a atmosfera, sendo que radiação solar compreende tanto a banda espectral do visível, onde se inclui a

radiação fotossinteticamente ativa, a radiação infravermelho próximo e a radiação ultravioleta. Ou seja, o albedo solar refere-se também a absorção e reflexão de RFA, IVP e UV. Apresenta um declínio sazonal lento em direção ao valor mínimo, que demora entre 8 e 10 meses e, um retorno rápido ao valor máximo, em torno de 2 a 3 meses (Figura 3.13).

Com a volta das chuvas, o albedo solar aumenta rapidamente, acompanhando a rebrota das folhas até outubro/novembro, quando atinge aproximadamente 14-15%. De seu pico máximo (outubro/novembro), o valor do albedo solar começa a decair de acordo com o amadurecimento das folhas até fevereiro/março, aproximadamente, quando as folhas estão em plena atividade fotossintética. Desde o início da estação chuvosa até o final de fevereiro o ecossistema apresenta aumento da taxa de produtividade, uma vez que a vegetação encontra-se sob condições favoráveis de temperatura, precipitação e energia. Com a redução da oferta de energia, a queda do índice de precipitação e da temperatura do ar, as condições ambientais deixam de ser favoráveis. Este é o momento em que as plantas se preparam para um período de estresses múltiplos. As plantas alteram seu funcionamento e, as propriedades óticas das folhas começam a mudar. Neste momento (fevereiro/março), a produção de clorofila cai e começam a surgir áreas com outros pigmentos nas folhas, como o carotenóide e a antocianina, alterando a coloração das folhas que passa a variar entre amarelo, laranja, e vermelho. Os processos biofísicos que ocorrem na planta, durante este período, são responsáveis pela manutenção das folhas em seus galhos pelo maior tempo possível, para que haja máxima absorção de nutrientes de volta para os galhos e troncos. Com isso, a planta retira o máximo de compostos solúveis da folha, resultando em uma mudança de sua coloração. A mudança da composição dos compostos solúveis da folha e de sua aparência resulta em maior reflexão da radiação solar, por um período de cerca

de três a quatro meses, evidenciado quando a curva do albedo solar apresenta um segundo momento de elevação entre março/junho. À medida que as folhas senescem e caem, a reflexão da radiação solar cai até que não haja mais folhas.

Essa mudança das propriedades físicas e óticas das folhas causada pela senescência é evidente entre os meses de fevereiro e junho, aproximadamente, quando o albedo solar interrompe sua queda brusca, apresentando, por vezes, um segundo pico de reflexão da radiação solar. O início deste período (fevereiro-março) coincide com uma mudança no padrão climático, que impõe o início do processo de senescência (Figuras 3.14).

Figura 3.14: (A) Evolução temporal do albedo RFA, (B) s do albedo solar e (C) da precipitação mensal acumulada entre os anos 2001 e 2007, na Gleba Pé de Gigante. Os valores de albedo foram suavizados por média móvel com janela 30 dias.

Sabe-se que a o teor de clorofila, carotenóide e antocianina nas folhas está associada à variação climática (Palm Jr., 2009). De maneira geral, é possível observar que o início da senescência (mudança de pigmentação das folhas), entre fevereiro e

março (Figura 3.14.a/b), está expresso no ciclo anual dos dois albedos, solar e RFA. Entretanto, o ano de 2004 apresentou um padrão de albedo solar diferenciado, quando:

- houve uma interrupção no suprimento de água para o ecossistema, em dezembro de 2003 (Figura 3.14.c), “quebrando” o ritmo de desenvolvimento vegetal;
- entretanto, apresentou uma estiagem com 303 mm de precipitação acumulada (anomalia acima da média), o que proporcionou melhores condições de permanência das folhas nos troncos e galhos;
- apresentou uma maior frequência e intensidade de baixas temperaturas durante o inverno.

Este conjunto de fatores proporcionou condições climáticas fora do padrão da região, induzindo as folhas a reagirem de forma diferenciada quando aos pigmentos de suas folhas durante a senescência.

Analisando-se o período 2001-2007, percebemos que o albedo solar apresenta dois picos: um primeiro pico bastante evidente por volta do início de outubro, associado à rebrota, quando o albedo solar apresenta seus valores mais elevados, e um segundo pico entre fevereiro e março, associado ao processo de senescência, mas que em 2004 ficou acima da média. Houve, portanto um albedo solar mais elevado durante a senescência de 2004, o que pode ser justificado por uma alteração no padrão de coloração das folhas durante o processo de senescência, influenciado por um clima diferenciado no ano de 2004. O ano de 2004 apresentou a senescência de forma mais expressiva no albedo solar, sugerindo que as folhas permaneceram nos galhos durante mais tempo, ao longo deste processo, devido às condições favoráveis de clima.

3.4 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada em Cerrado *Sensu Stricto*

Como os valores de IVDN permitem estimar o estado biofísico da vegetação no decorrer do tempo, é possível que sejam bem correlacionados com os valores de albedo RFA. Desta forma, sugere-se neste e no próximo item uma avaliação simplificada desta correlação. O IVDN foi estimado na Gleba Pé de Gigante para dias específicos dos meses de fevereiro, abril, maio, junho, agosto, setembro e dezembro, de 2005, de acordo com a disponibilidade de imagens de satélite do acervo do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), com potencial para uso, devido à presença ou não de cobertura de nuvens. Os valores de IVDN calculados para a região de estudo apresentam uma variabilidade sazonal marcante, de acordo com o apontado na **Tabela 3.2** e **Figura 3.15**.

Com base nas imagens de satélite, pode-se observar os menores valores de IVDN nos períodos de estiagem, associados à baixa oferta de energia radiativa, de água no solo e a temperaturas relativamente baixas, condições indutoras à senescência e caracterizadas por tons de amarelo e marrom. Os períodos chuvosos, por sua vez, estão associados a altos valores de IVDN, caracterizados por tons de verde (**Figura 3.15**).

O resultado obtido pelo cálculo do IVDN ao longo do ano de 2005 (**Tabela 3.2**) permite uma avaliação sazonal das condições do ecossistema. A variação sazonal do estado biofísico da vegetação e a quantidade de folhas verdes evidenciam que os condicionantes físicos climáticos exercem influência e determinam as taxas de assimilação da radiação RFA pelo ecossistema, tal como observado na **Figura 3.15**. Condições estressantes de sobrevivência (estiagem e friagem) influenciam a densidade,

o estado da vegetação (índice de área foliar) e seu funcionamento (fotossíntese e senescência), gerando uma resposta espectral clara às forçantes físicas climáticas.

Tabela 3.2: Valores de IVDN calculados para a Gleba Pé de Gigante.

Cerrado <i>Sensu Stricto</i>			
Este estudo		Bitencourt <i>et al.</i> (2007)	
DATA	IVDN	DATA	IVDN
14 / fevereiro / 2005	0,63	-	-
7 / abril / 2005	0,61	-	-
3 / maio / 2005	0,57	-	-
29 / maio / 2005	0,53	junho / 1995	0,54
24 / junho / 2005	0,50	julho / 1995	0,53
15 / agosto / 2005	0,48	agosto / 1995	0,41
9 / outubro / 2005	0,49	novembro / 1995	0,63
23 / dezembro / 2005	0,64	janeiro / 2006	0,69

Figura 3.15: IVDN da Glepa Pé de Gigante, Santa Rita do Passa Quatro, SP, para o ano 2005.

3.5 Albedo RFA *versus* Índice de Vegetação por Diferença Normalizada

A possibilidade de se obter dados do albedo RFA para uma determinada localidade a partir dos dados de IVDN, que são extraídos das imagens de satélite e que, portanto, podem apresentar uma abrangência espacial maior do que as medidas feitas em campo, nos leva ao estudo da correlação entre estas duas variáveis. A variação temporal e espacial com maior resolução do albedo RFA é útil tanto em estudos observacionais como em estudos de modelagem numérica. Pode-se definir uma parametrização do albedo RFA em função de valores de IVDN.

Pela comparação dos dados de albedo RFA providos pelo radiômetro da torre micrometeorológica da Gleba Pé de Gigante com as informações de IVDN extraídas das imagens CEBERS-2, percebe-se que há uma clara correlação linear negativa entre os valores medidos pelos diferentes sensores (Figuras 3.16 e 3.17), em meses diferentes. Sugere-se, desta forma, que, apesar de serem poucas as medidas, os dados de IVDN calculados a partir de sensores remotos e dados do albedo RFA coletados em campo apresentam uma correlação que pode ser escrita na forma matemática, tornando possível o cálculo do albedo RFA a partir de dados de satélite. O melhor ajuste linear encontrado para a relação entre albedo RFA e IVDN, para o ano de 2005, é expresso pela seguinte equação, cujo R^2 é igual a 0,68:

$$\text{Albedo RFA} = - 0,0513 \times \text{IVDN} + 0,0569$$

Figura 3.16: Variação temporal do albedo RFA e IVDN em datas específicas para o cerrado *sensu stricto* na Gleba Pé de Gigante, durante o ano 2005.

Figura 3.17: Ajuste linear entre os valores de albedo RFA e IVDN para os dados de 2005, na Gleba Pé de Gigante, Santa Rita do Passa Quatro, SP.

A robustez de uma equação de regressão entre IVDN e albedo RFA para a Gleba Pé de Gigante depende ainda da estimativa de valores de IVDN para diferentes anos, contemplando uma série mais longa, na tentativa de se considerar as várias situações climáticas possíveis e assim obter significância física e estatística. Além da necessidade de aumento de dados na dimensão tempo, seria desejável a realização desta análise para diferentes localidades, o que demandaria ainda a instalação de novos sensores radiométricos.

4.0 Conclusões e Considerações Finais

Este trabalho apresenta como proposta, evidenciar os padrões de reação da vegetação através do albedo RFA e solar frente às imposições do clima local. Os dados foram coletados em uma torre micrometeorológica instalada sobre o ecossistema de cerrado *sensu stricto*, em Santa Rita do Passa Quatro, SP, entre os anos 2001 e 2007. Os parâmetros analisados nesta pesquisa visam evidenciar os padrões de resposta da vegetação, no que tange às atividades metabólicas relacionadas ao potencial de fotossíntese frente às condições climáticas, como oferta de radiação solar, disponibilidade de água no ecossistema e temperatura do ar. O padrão de resposta do ecossistema, devido às condições climáticas, apresenta uma forte relação com a absorção e emissão de CO₂, representando um dos aspectos da interação entre a biosfera e a atmosfera.

Apesar do conceito de Gaia, proposto por [Lovelock](#), ser uma abordagem teórica, com um tratamento filosófico sobre a vida no (“do”) planeta, os resultados apresentados neste trabalho indicam uma forte interação do ecossistema com a atmosfera, sob uma relação de retroalimentação permanente. O clima apresentou uma influência marcante sobre a vegetação. A sazonalidade do ecossistema apresentou-se fortemente acoplada às condições atmosféricas. Portanto, as propriedades biofísicas da vegetação, decorrentes das condições atmosféricas, retroalimentam a própria atmosfera, formando uma relação cíclica entre atmosfera e biosfera. Este tipo de relação seria uma pequenina fração do que se considera ser Gaia e, extrapolando as relações observadas para escalas de sistemas maiores, exemplifica como os grandes compartimentos terrestres interagem em prol da manutenção da vida.

A partir deste estudo foi possível levantar algumas características da relação biosfera-atmosfera e observar características no comportamento das variáveis atmosféricas e superficiais, principalmente em duas escalas temporais: sazonal e interanual. Os pontos são destacados a seguir:

Ciclo Anual

- O estado da vegetação é fortemente condicionado por fatores físico-climáticos como precipitação, temperatura e energia radiante (radiação solar e fotossinteticamente ativa). A radiação solar apresenta um ciclo anual muito bem definido na região de estudo. Devido a este aspecto, que tem sua origem nas condições astronômicas de translação da Terra em torno do Sol, as demais variáveis analisadas também mostram ciclos anuais definidos, como a temperatura do ar, que tem alta correlação com a radiação solar recebida em superfície, além da precipitação, que também apresenta um ciclo anual com valores máximos entre dezembro e fevereiro.
- Considera-se que a precipitação (associada à umidade do solo e a umidade atmosférica) seja o principal condicionante do estado da vegetação. A taxa de saturação do solo, em diferentes profundidades, apresentou forte correlação com o potencial de fotossíntese e, conseqüentemente, com o grau de biomassa verde presente no ecossistema. Já a temperatura do ar, outro aspecto considerado pela literatura como condicionante do estado da vegetação, apresentou um intervalo de variação condizente com o necessário para o desenvolvimento da maior parte

das espécies vegetais encontradas nas regiões tropicais. Entretanto, quando a temperatura do ar apresentou seu maior potencial de afetar a vegetação com baixas temperaturas, não foi evidenciado qualquer poder de influência.

- O albedo RFA, em todo o período considerado, apresentou valores máximos entre os meses de agosto e setembro, que coincide com o final da estação seca e o maior estresse hídrico da vegetação e alcança os valores mínimos entre fevereiro e março, final da estação chuvosa, evidenciando sua conexão com a atmosfera. O albedo solar apresentou os valores máximos entre outubro e novembro, e um pico secundário, após as chuvas, evidenciando a imposição da senescência; os valores mínimos ocorreram, em média, nos meses de agosto e setembro, com um lento decréscimo entre os meses de novembro do ano anterior e agosto.
- O albedo solar apresentou um padrão de reflexão mais complexo e sensível às condições da vegetação. Uma estiagem menos severa é capaz de alterar consideravelmente o albedo solar, devido à capacidade que o ecossistema apresenta em manter as folhas por mais tempo durante a senescência, como pode ser observado no ano de 2004, quando as condições climáticas favoreceram o ecossistema a continuar realizando fotossíntese por intermédio da função dos pigmentos das folhas. As propriedades bioquímicas das folhas alteram devido à disponibilidade de água para as plantas. Enquanto há água disponível no ecossistema, a planta continua suprimindo as folhas com água para realização de fotossíntese, ao passo que, com o surgimento de uma estiagem, a planta cessa o suprimento de água para as folhas. Com água, os nutrientes das folhas ficam

diluídos para serem transferido para a planta e quando há menos água, esses nutrientes acumulam na folha, elevando o grau de concentração dos mesmos. Dependendo do grau de concentração de nutrientes na folha durante a senescência (consequência do tempo com disponibilidade de água), a coloração das folhas varia, o que influencia o padrão de albedo solar. Apesar de o albedo RFA e solar reagirem de formas diferentes, apresentaram-se naturalmente relacionados, reagindo geralmente, de forma inversa quanto ao índice de reflexão, demonstrando forte ligação com as propriedades biofísicas da vegetação.

- A variação temporal do albedo RFA e do IVDN ao longo de um ano permitiu elaborar um modelo matemático simplificado, regressão linear simples, para o albedo RFA em função do IVDN, cuja explicação da variância do albedo RFA pelo IVDN (R^2) foi igual a 0,68. Embora o modelo matemático requeira maior significância estatística, com a utilização de séries temporais e espaciais maiores, sugere-se que um ajuste deste tipo possa ser utilizado para a estimativa de albedo RFA em larga escala com base em valores de IVDN.

Variabilidade Interanual

- A precipitação apresenta seu menor índice acumulado em 2006, quando é observada uma elevação do albedo RFA em 13%. Tanto 2001 quanto 2006, caracterizados como anos relativamente mais secos, apresentam os menores valores de água no solo para os níveis mais profundos (80 cm, 150 cm, 200 cm e

250 cm) durante o final da estação chuvosa. Por outro lado, nestes mesmos anos, 2001 e 2006, o início da estação chuvosa acontece anteriormente aos demais anos analisados, dando uma idéia de compensação entre o comportamento climático do início e o final do ano.

- O ano de 2004 apresenta uma estiagem com elevado índice de precipitação para o período, o que condiciona a vegetação a manter as folhas por mais tempo. Entretanto, as folhas permanecem com uma coloração diferenciada em função de sua pigmentação, o que altera o padrão de albedo solar.

Conexões Com o Clima Global

- As taxas brutas de assimilação de CO₂ pelos ecossistemas estão relacionadas à estrutura da vegetação. O trabalho de Rocha *et al.* (2002) analisa taxas de fluxo de CO₂ em cerrado *sensu stricto* na Gleba Pé de Gigante. Relacionando os resultados obtidos por Rocha *et al.* (2002) com os resultados deste estudo, supõe-se que a assimilação/emissão média de 25 KgC.ha⁻¹.dia⁻¹, com uma capacidade máxima de 40 KgC.ha⁻¹.dia⁻¹, seja correspondente à uma vegetação aérea e radicular com estoque de 92,8 MgC.ha⁻¹. Este tipo de informação torna-se bastante relevante uma vez que se assume como premissa que o potencial de sequestro de CO₂ da atmosfera pela vegetação esteja associado tanto aos condicionantes atmosféricos quanto à estrutura da vegetação e à sua forma de responder às condições ambientais geradas pelo clima. Com isso, cria-se uma relação entre fluxos de CO₂ e estoque de carbono, até então sem precedentes em

estudos sobre cerrados no Brasil. Este tipo de relação permite estimar que cada MgC na vegetação apresenta uma assimilação/emissão média de $0,27 \text{ KgC.ha}^{-1}.\text{dia}^{-1}$, com uma capacidade máxima de $0,43 \text{ KgC.ha}^{-1}.\text{dia}^{-1}$ ou que cada KgC atmosférico é assimilado/emitido por 3,7 MgC na vegetação, com uma assimilação/emissão máxima por 2,32 MgC na vegetação.

- Outro tema ainda não esclarecido nesta pesquisa refere-se às baixas temperaturas como fatores condicionantes a inibir a atividade fotossintética e a consequente assimilação/emissão de CO_2 pelo ecossistema. Levanta-se a hipótese de um *feedback* ainda não reconhecido no sistema climático global. Sob um cenário de mudanças climáticas e aumento da temperatura média global, a intensidade e frequência de massas de ar com temperaturas baixas tendem a diminuir em algumas localidades, proporcionando condições mais favoráveis ao desenvolvimento vegetal e à atividade fotossintética. Assim haveria uma redução da emissão bruta de CO_2 pelos ecossistemas nos períodos de estresse, proporcionando alterações no albedo, balanço de energia em superfície e ciclo do carbono. Tal questão pode ser explorada com o uso de modelos de biosfera.

4.1 Sugestões Para Trabalhos Futuros

- I. Analisar o albedo solar em seus diferentes espectros (RFA, IVP, UV), visando o completo entendimento dos padrões de albedo em cerrado *sensu stricto*;
- II. Levantamento em campo de biomassa no *footprint* da torre micrometeorológica para que se criem relações sólidas entre albedo, estoques de carbono e fluxos de CO₂;
- III. Modelar o impacto das mudanças climáticas no metabolismo vegetal para regiões afetadas por baixas temperaturas.

5.0 Referências Bibliográficas

- Abdala, G.C., Caldas, L.S., Haridasan, M., Eiten, G., 1998. Above and belowground organic mater and root:shoot ratio in a cerrado in Central Brazil. *Braz. J. Ecol.* 2 (1), 11–23.
- Augustin, L., C. Barbante, P.R.F. Barnes, J.M. Barnola, M. Bigler, E. Castellano, O. Cattani, J. Chappellaz, D. Dahljensen, B. Delmonte, G. Dreyfus, G. Durand, S. Falourd, H. Fischer, J. Fluckiger, M.E. Hansson, P. Huybrechts, R. Jugie, S.J. Johnsen, J. Jouzel, P. Kaufmann, J. Kipfstuhl, F. Lambert, V.Y. Lipenkov, G.V.C. Littot, A. Longinelli, R. Lorrain, V. Maggi, V. Masson-Delmotte, H. Miller, R. Mulvaney, J. Oerlemans, H. Oerter, G. Orombelli, F. Parrenin, D.A. Peel, J.R. Petit, D. Raynaud, C. Ritz, U. Ruth, J. Schwander, U. Siegenthaler, R. Souchez, B. Stauffer, J.P. Steffensen, B. Stenni, T.F. Stocker, I.E. Tabacco, R. Udisti, R.S.W. van de Wal, M. van den Broeke, J. Weiss, F. Wilhelms, J.G. Winther, E.W. Wolff and M. Zucchelli, 2004: Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature*, 429, 623-628.
- Batalha, M. A., 1997. Análise da vegetação da ARIE Cerrado Pé-de-Gigante (Santa Rita do Passa Quatro, SP). Dissertação de Mestrado do Departamento de Ecologia, Instituto de Biociências, USP.
- Batalha, M. A; Mantovani, W., 1998. Composição florística da Reserva Pé-de-Gigante (Santa Rita do Passa Quatro, SP, Brasil). In: 4. Congreso Latinoamericano de Ecologia, 1998, Lima. Resúmenes del 4. Congreso Latinoamericano de Ecologia. Lima: Sociedade Latinoamericana de Ecologia, 1998. p. 8.3.

- Batalha, M. A. e Mantovani, W., 1999, Chaves de identificação das espécies vegetais vasculares baseada em caracteres vegetativos para a Arie Cerrado Pé-de-Gigante (Santa Rita do Passa-Quatro, SP). *Revta. Inst. Flor.*, 11: 137-158.
- Batalha, M.A. e Mantovani, W., 2000. Reproductive phenological patterns of cerrado plant species at the Pé-de-Gigante Reserve (Santa Rita do Passa Quatro, SP, Brazil): a comparison between the herbaceous and woody floras. *Revista Brasl. Biol.*, 60(1): 129-145.
- Batalha, M.A. e Mantovani, W., 2001. Floristic composition of the cerrado in the Pé-de-Gigante Reserve (Southeastern Brazil). *Acta Botânica Brasileira*, 15: 147-163.
- Blad, L.B. & Baker, D.G. Reflected radiation from a soybean crop. *Agronomy Journal*, Madison, v.6, p.277-81, 1972.
- Bitencourt-Pereira, M.D., 1986. Correlação de fitomassa foliar de campo cerrado com dados espectrais obtidos pelo sistema MSS-Landsat e por radiometria de campo. *Boletim do INPE-3747-TDI-203*. São José dos Campos, S.P. Brazil.
- Bitencourt, M. D. e Mesquita Jr., H. N., 1997. Brazilian savannas physiognomies analysis with NDVI. *Memórias do VIII Simpósio Latino Americano de Percepção Remota*. Mérida, Venezuela, 2-7 de noviembre de 1997.
- Bitencurt, M.D. e Mesquita JR., H.N., 2005. Análise ambiental espacializada da Gleba Pé-de-Gigante. In: Pivello V.R.; Varanda, E.M. (Ed.). *O Cerrado Pé de Gigante – Ecologia e Conservação*. São Paulo: Imprensa Oficial do Estado de São Paulo. 2005. p. 43-50.
- Bitencourt, M. D., Mesquita Jr., H. N., Kuntschik, G., Rocha, H. R., Furley, P. A., No Prelo. Cerrado vegetation study using optical and radar remote sensing: two Brazilian case studies. *Canadian Journal of Remote Sensing*.

- Brown, S. e Lugo, A.E., 1990. Tropical secondary forests. *Journal of Tropical Ecology*, v. 6, p. 1-32.
- Carman, S., 2005. Rainbow on the bough. *Outdoor Indiana Magazine*. Disponível em: <http://www.in.gov/dnr/fall/Fall-Color-Article.pdf>.
- Cairns M.A., Brown, S., Helmer, E.H., Baumgardner, G.A., 1997. Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia* (1997) 111:1-11.
- Castro, E.A., 1996. Biomass, nutrient pools and response to fire in the Brazilian cerrado. MSc Thesis, Oregon State University, USA.
- Castro, A.E. e Kauffman, J.B., 1998. Ecosystem structure in the Brazilian Cerrado: a vegetation gradient of above biomass, root mass and consumption by fire. *Journal of Tropical Ecology*, 14, 263-383. Cambridge University Press.
- Cavelier, J., 1992. Fine-root biomass and soil properties in a semi-deciduous and a lower montane rain forest in Panama. *Plant Soil* 142:187-201.
- Climanalise. <http://www6.cptec.inpe.br/revclima/revista/>
- Cooper, M., Ruggerio, P.G.C., Sparovek, G., Neto, A.G.P., 2005. Solos da Gleba Pé-de-Gigante. In: Pivello V.R.; Varanda, E.M. (Ed.). *O Cerrado Pé de Gigante – Ecologia e Conservação*. São Paulo: Imprensa Oficial do Estado de São Paulo. 2005. p. 62-70.
- Daughtry, C. S. T., Walthall, C. L., Kim, M. S., Brown de Colstoun, E., & McMurtrey III, J. E., 2000. Estimating corn leaf chlorofila concentration from leaf and canopy reflectance. *Remote Sensing Environment*, v.74, p.229–239.
- Delitti, W.B.C., Pausas, J. e Burger, D.M., 2001. Belowground biomass seasonal variation in two Neotropical savannas (Brazilian Cerrados) with different fire histories. *Annals of Forest Science* 7:713-722.

- Delgado-Vargas, F.; Jiménez, A.R.; Paredes-López, O., 2000. Natural pigments: carotenoids, anthocyanins and betalains – characteristics, biosynthesis, processing, and stability. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, Amherst, v. 40, n. 3, p. 173-289, 2000.
- Dickinson, R. E.; Kennedy, P. Impacts on regional climate of Amazon deforestation. *Geophysical Research Letters*, 19, p. 1947-1950, 1992.
- Eiten, G. 1975. Vegetation of the Serra do Roncador. *Biotropica* 7:112–135.
- Epiphanyo, J.C.N.; Formaggio, A.R.; França, G.V. Avaliação das bandas do satélite Landsat-5 na discriminação entre culturas de trigo e de feijão. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 25(3):371-377, 1990.
- Epiphanyo, J.C.N.; Formaggio, A.R. Sensoriamento remoto de três parâmetros biofísicos de trigo e de feijão. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 26(10):1615-1624, 1991.
- Epiphanyo, J.C.N., Almeida JR., A.C., Formaggio, A.R., 1996. Desenvolvimento do Trigo Avaliado com Dois Índices de Vegetação. *Anais VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Salvador, Brasil, 14-19 abril 1996, INPE, p. 19-24.
- Feamside, P.M., 1992. Greenhouse gas emissions from deforestation in the Brazilian Amazon. In: W. Makundi, J. Sathaye and O. Masera (Editors), *Carbon Emissions and Sequestration in Forests: Case Studies from Seven Developing Countries*. Rep. LBL- 32119, US Environmental Protection Agency, Climate Change Division, Washington, DC and Lawrence Berkeley Laboratory, Energy and Environment Division, Berkeley, CA.

- Fidelis, A. T., e Godoy, S. A. P., 2003. Estrutura de um cerrado *stricto sensu* na gleba cerrado Pé-de-Gigante, Santa Rita do Passa Quatro, SP. Acta bot. bras. 17(4): 531-539. 2003
- Fischlin, A., G.F. Midgley, J.T. Price, R. Leemans, B. Gopal, C. Turley, M.D.A. Rounsevell, O.P. Dube, J. Tarazona, A.A. Velichko, 2007: Ecosystems, their properties, goods, and services. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 211-272.
- Franco, A.C., 1998. Seasonal patterns of gas exchange, water relations and growth of *Roupala montana*, an evergreen savanna species. Plant Ecology 136:69-76.
- Franco, A. C. 2002. Ecophysiology of woody plants. In P. S. Oliveira & R. J. Marquis (Eds.). The cerrados of Brazil: Ecology and natural history of a neotropical savanna. pp. 178-197. Columbia University Press, Irvington, USA.
- Galvani, E., 2001. Avaliação agrometeorológica do cultivo de pepino (*Cucumis sativus*, L.) em ambientes protegido e a campo, em ciclos de outono-inverno e primavera-verão. Botucatu, 2001, 124p. (Tese – Doutorado em Energia na Agricultura, Universidade Estadual Paulista).
- Galvani, E.; Escobedo, L.F.; Assunção, H.F.; Oliveira, H.P. (2001). Coeficiente de reflexão obtido a partir de diferentes metodologias. XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Foz de Iguaçu-PR, 2002. Pag. 2336-2341.
- Galvani, E., Silva, M.E.S., Dechandt, H.C.G., 2004. Radiação fotossinteticamente ativa (RFA/PAR) versus radiação solar global em São Paulo, SP. XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Fortaleza, CE, 29/08 a 03/09 de 2004.

- Gedzelman, S.D., 2008. Fall's festival of colors. Weatherwise November / December 2008. www.weatherwise.org
- Gerhardt, K., Fredriksson, D., 1995. Biomass allocation by broadleaf mahogany seedlings, *Swietenia macrophylla* (King), in abandoned pasture and secondary dry forest in Guanacaste, Costa Rica. *Biotropica* 27:174-182.
- Google Earth, 2007.
- Hoffmann, W.A. & Jackson, R.B. (2000). Vegetation–climate feedbacks in the conversion of tropical savanna to grassland. *Journal of Climate* 39, 145–176.
- IAG – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, 2001. Disponível em: http://www.iag.usp.br/meteo/biota_fapesp/dados.htm. Acesso em 14 de junho de 2007.
- INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. <http://www.wrcc.dri.edu/enso/ensodef.html>
- IPCC, 1997. Houghton, J.T., Meira-Filho, L.G., Lim, B., Treanton, K., Mamaty, I., Bonduki, Y., Gribbs, D.J., Callander, B.A. (Eds.), *Greenhouse Gas Inventory: Reporting Instructions*, vol. 2. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Bracknell, UK, pp. 4.23–4.27.
- IPCC, 2003. Nabuurs, G., Ravindranath, N.H., Paustian, K., Freibauer, A., Hohenstein, W., e Makundi W., 2003. *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*. Disponível em: http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpglulucf/gpglulucf_contents
- Jacquemoud, S., e Ustin, S.L., 2008. Modeling leaf optical properties. *Photobiological Sciences Online*. Disponível em: http://photobiology.info/Jacq_Ustin.html

- Jacquemoud, S., Fret, J.B., Ustin, S.L., 2009. Comprhension et modlisation de la couleur des feuilles. Ecole thmatique interdisciplinaire du CNRS – Couleur, question d’chelle: l’espace. Disponvel em: <http://www.ipgp.fr/~jacquemoud/publications/jacquemoud2009b.pdf>
- Jackson, R.D., Slater, P. N., Pinter Jr, P. J., 1983. Discrimination of Growth and Water Stress in Wheat by Various Vegetation Indices Through Clear and Turbid Atmospheres. Remote Sensing of Environment, New York, NY, v.13, p.187-208.
- Jansen, E., J. Overpeck, K.R. Briffa, J.-C. Duplessy, F. Joos, V. Masson-Delmotte, D.O. Olago, B. Otto-Bliesner, Wm. Richard Peltier, S. Rahmstorf, R. Ramesh, D. Raynaud, D.H. Rind, O. Solomina, R. Villalba and D. Zhang, 2007: Paleoclimate. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 434-496.
- Kalnay, E.; Kanamitsu, M.; Kistler, R.; Collins, W.; Deaven, D.; Gandin, L.; Iredell, M.; Saha, S.; White, G.; Woolen, J.; Zhu, Y.; Chellian, M.; Ebisuzaki, W.; Higgins, W.; Janowiak, J.; Mo, K. C.; Ropelewski, C.; Wang, J.; Leetma, A. Reynolds, R.; Janne, R.; Joseph, D. - The NCEP/NCAR 40- year Reanalysis project. Bulletin of the American Meteorological Society, v.77, p. 437-470, 1996
- Larcher, W. Ecofisiologia vegetal. Traduo Carlos Henrique Britto de Assis Prado. Rima Artes e Textos, 1994. 531 p.

LCB - Laboratório de Clima e Biosfera, Departamento de Ciências Atmosféricas, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo.

Leitão, M.M.V.R.; Azevedo, P.V. de.; Costa, J.P.R. da., 1990. Balanço de radiação e energia numa cultura de soja irrigada, nas condições semi-áridas do nordeste do Brasil. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 6, Salvador-BA, Sociedade Brasileira de Meteorologia. Anais... p.27-32, 1990.

Lilienfein, J., Wilcke, W., Zimmermann, R., Gerstberger, P., Araújo, G.M., Zech, Wolfgang, Z., 2001. Nutrient storage in soil and biomass of native Brazilian Cerrado. Journal of Plant Nutrients and Soil Science, 164, 487-495.

Lovelock, J.E., 1972. Gaia as seen through the atmosphere. Atmos Environ 6:579-80.

Lovelock, J.E., 1991. Gaia – Medicine for an Ailing Planet. Gaia Books; Octopus Publishing Group Ltd. 192 p.

Lovelock, J.E., 2006. A vingança de Gaia. Editora Intrínseca. 160 p

Margulis, L., Lovelock, J.E., 1974. Biological modulation of the earth's atmosphere. Icarus 21:471-89.

Mesquita Jr., H.N., 1998. Análise temporal com sensor orbital de unidades fisionômicas de cerrado na Gleba Pé-de-Gigante (Parque Estadual de Vassununga – SP). Dissertação de Mestrado do Departamento de Ecologia do Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, 118 p.

Mesquita Jr., H.N., 2003. Modelagem das variações da resposta espectral das fisionomias de cerrado em relação às variações climáticas sazonais.. 2003. Tese de Doutorado do Departamento de Ecologia do Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo.

- Miranda A.C., Miranda HS, Lloyd J, Grace J, McIntyre JA, Meir P, Riggan P, Lockwood R, and Brass J. Carbon dioxide fluxes over a cerrado sensu stricto in central Brazil. In Amazon deforestation and climate. J.H. Gash, C.A. Nobre, J.M. Roberts and R.L. Victoria, editores. John Wiley & Sons Ltd., England, 1996, pp.353-363.
- Miranda, A.C., Miranda, H.S., Lloyd, J., Grace, J., Francey, R.J., McIntyre, J.A., Meir, P., Riggan, P., Lockwood, R. & Brass, J., 1997. Fluxes of carbon, water and energy over Brazilian cerrado, an analysis using eddy covariance and stable isotopes. *Plant, Cell and Environment*, 20, 315–328.
- Moran, M. S., Inoue, Y., & Barnes, E. M., 1997. Opportunities and limitations for image based remote sensing in precision crop management. *Remote Sensing of Environment*, v.61, p.319–346.
- Murphy P.G., Lugo A.E., 1986. Structure and biomass of a subtropical dry forest in Puerto Rico. *Biotropica* 18:89-96.
- Nadelhoffer K.J., Aber J.D., Melillo J.M., 1985. Fine roots, net primary production, and soil nitrogen availability: a new hypothesis. *Ecology* 66:1377-1390.
- Negron-Juarez, R. I., Variabilidade climática regional e controle da vegetação no Sudeste: um estudo de observações sobre Cerrado e cana-de-açúcar e Modelagem numérica da atmosfera. 2004. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Universidade de São Paulo.
- Nobre, C. A.; Sellers, P. J.; Shukla, J. Amazonian deforestation and regional change. *Journal of Climate*, v. 4, n. 10, p. 957 – 988, 1991.
- Ollingera, S.V., Richardsona, A.D., Martina, M.E., Hollingerb, D.Y., Frolkinga, S.E., Reichc, P.B., Plourdea, L.C., Katuld, G.G., Mungere, J.W., Orend, R., Smithb, M.L., Paw Ug, K.T., Bolstadc, P.V., Cookc, B.D., Daya, M.C.,

- Martinh, T.A., Monsoni, R.K. e Schmidj, H.P., 2008. Canopy nitrogen, carbon assimilation, and albedo in temperate and boreal forests: Functional relations and potential climate feedbacks. 19336–19341. PNAS. December 9, 2008, vol. 105, no. 49.
- Ottmar, R.D., Vihnanek, R.E., Miranda, E.S., Sato, M.N., Andrade, A.M.A., 2001. Stereo photo series for quantifying Cerrado fuels in Central Brazil, vol. I. Gen. Tech. Re PNW-GTR-519. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Portland, OR, USA, 87 pp.
- Overpeck, J.T., B.L. Otto-Bliesner, G.H. Miller, D.R. Muhs, R.B. Alley and J.T. Kiehl, 2006: Paleoclimatic evidence for future ice-sheet instability and rapid sea-level rise. *Science*, 311, 1747-1750.
- Palm Jr., C.E. 2009. State University of New York College of Environmental Science and Forestry. Disponível em:
<http://www.esf.edu/pubprog/brochure/leaves/leaves.htm>
- Paula, N. F. de . 2002. Capacidade fotossintética, deciduidade e teor de nitrogênio e fósforo em espécies lenhosas do cerrado. Tese de Doutorado, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil.
- Pivello, V. R. ; Bitencourt, M. D. ; Mantovani, W. ; Mesquita JR, H. N. ; Batalha, M. A. ; Shida, C. N., 1998. Proposta de Zoneamento Ecológico para a Reserva de Cerrado Pé-de-Gigante. *Brazilian Journal of Ecology*, v. 2, n. 2, p. 108-118, 1998.
- Pivello, V. R. ; Bitencourt, M. D. ; Mesquita JR, H. N. ; Batalha, M. A., 1999. Banco de Dados em SIG para ecologia aplicada: exemplo do cerrado Pé-de-Gigante, SP. *Caderno de Informações Georreferenciadas Cig*, 1999.

- Pivello, V. R. e Varanda, E. M. (Orgs.), 2005. O Cerrado Pé-de-Gigante (Parque Estadual de Vassununga, São Paulo) - Ecologia e Conservação. 1. ed. São Paulo: Secretaria de Estado do Meio Ambiente, 2005. v. 1. 312 p.
- Ratter, J.A., Ribeiro, J.F. & Bridgewater, S., 1997. The Brazilian cerrado vegetation and threats to its biodiversity. *Annals of Botany*, 80, 223–230.
- Reid, W.V., H.A. Mooney, A. Cropper, D. Capistrano, S.R. Carpenter, K. Chopra, P. Dasgupta, T. Dietz, A.K. Duraiappah, R. Hassan, R. Kasperson, R. Leemans, R.M. May, A.J. McMichael, P. Pingali, C. Samper, R. Scholes, R.T. Watson, A.H. Zakri, Z. Shidong, N.J. Ash, E. Bennett, P. Kumar, M.J. Lee, C. Raudsepp-Hearne, H. Simons, J. Thonell and M.B. Zurek, Eds., 2005: *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press, Washington, District of Columbia, 155 pp.
- Ribeiro, J. F., Walter, B. M. T., 1998, Fitofisionomias do bioma Cerrado. In: S. M. Sano & S. P. de Almeida (eds.), *Cerrado: ambiente e flora*. Embrapa, Brasília, pp. 89-166.
- Ribeiro, S. L. C., 2007. Dinâmica sazonal das trocas gasosas e do potencial hídrico em espécies arbóreas de um cerrado sensu stricto na Gleba Pé-de-Gigante, P.E. Vassununga, SP. Dissertação de Mestrado. Instituto de Botânica da Secretaria de Meio Ambiente de São Paulo.
- Ribeiro, S.C.L., Rocha, H.R., Aidar, M.P.M., No Prelo. Photosynthetic strategies in dominant tree species from neotropical savanna (to be submitted to *Photosynthetica*, 2007)
- Rocha, H.R., Freitas, H., Rosolem, R., Negron-Juarez, R.I., Tannus, R.N, Ligo, M.V., Cabral, O.M.R., Silva Dias, M.A.F, 2002. Measurements of CO₂ exchange over a woodland savanna (Cerrado Sensu stricto) in southeast Brasil. *Biota*

Neotropica, 2 (1). Disponível em

<http://www.biotaneotropica.org.br/v2n1/pt/abstract?article+BN01702012002>

Rocha, H.R., 2004. Relações Funcionais de Clima e Biosfera no Brasil. Tese de Livre Docência. do Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia e Geofísica da Universidade de São Paulo. 79 p.

Rocha, H.R., 2004. Projeto Temático - Interação Biosfera-Atmosfera Fase 2: Cerrados e Mudanças de Uso da Terra. 3º Relatório Científico Dez 2006 - Ago 2007. Fapesp 02/09289-9. Departamento de Ciências Atmosféricas, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo.

Rosolem, R., 2002. Análise do efluxo de CO₂ do solo em áreas de cana e cerrado. 2002. Iniciação Científica. (Graduação em Meteorologia) - Universidade de São Paulo.

Rouse, J.W., R.H. HAAS, J.A. SCHELL, D.W. DEERING, J.C. HARLAN. Monitoring the vernal advancement of retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation. NASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD, 1974, 371 p.

Ruggiero, P. G. C., Batalha, M. A., Pivello, V. R. & Meirelles, S. T., 2002, Soil-vegetation relationships in cerrado (Brazilian savanna) and semideciduous forest, Southeastern Brazil. Plant Ecol., 160: 1-16.

Santos, J.R., 1988. Biomassa aérea da Vegetação de Cerrado, estimativa e correlação com dados do sensor 'Thematic mapper' do satélite Landsat. PhD Thesis, Universidade Federal do Paraná, Brazil.

Sarmiento, G. & Vera, M. 1979. Composicion, estructura, biomassa y produccion de diferentes sabanas en los Llanos de Venezuela. Boletin de la Sociedade de Venezolana de Ciencias Naturales 136:5-41.

- Sarmiento, G., 1984, The ecology of neotropical savannas. Harvard University, Cambridge, 235p.
- Schroeder, P.E. e Winjum, J.K., 1995. Assessing Brazil's carbon budget: II. Biotic fluxes and net carbon balance. *Elsiever Science B.V.* 0378 – 1127 (95) 03533-8.
- Scurlock, J.M.O. e Hall, D.O., 1998. The global carbon sink, a grassland perspective. *Global Change Biology*, 4, 229–233.
- Shida, C.N. e Pivello, V.R., 2005. O contexto do cerrado Pé-de-Gigante como fragmento: Consequências. In: Pivello V.R.; Varanda, E.M. (Ed.). *O Cerrado Pé de Gigante – Ecologia e Conservação*. São Paulo: Imprensa Oficial do Estado de São Paulo. 2005. p. 267-272.
- Siegenthaler, U., T.F. Stocker, E.Monnin, D. Luthi, J. Schwander, B. Stauffer, D. Raynaud, J.M. Barnola, H. Fischer, V. Masson-Delmotte and J. Jouzel, 2005: Stable carbon cycle-climate relationship during the late Pleistocene. *Science*, 310, 1313-1317.
- Silva, G.T., 1999. Fluxos de CO₂ em um campo sujo submetido à queimada prescrita. *Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasil.*
- Silva M.E.S., 2002. Impacto do desmatamento da Amazônia no clima regional: um estudo com um modelo estatístico-dinâmico acoplado atmosfera-biosfera, incluindo a hidrologia de solo. Tese de doutorado, 232 p., INPE, São José dos Campos, SP.
- Stanhill, G.; Cox, J.T.H.; Moreshet, S. The effect of crop and climate factors on the radiation balance of on irrigated maize crop. *Journal of Applied Ecology*, London, v.5, p. 707-20, 1968.

- Tannus, R.N., 2004. Funcionalidade e sazonalidade sobre Cerrado e sobre ecótono Floresta-Cerrado: uma investigação com dados micrometeorológicos de energia e CO₂. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo.
- Tans, P., 2008. NOAA/ESRL (www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/)
- Tatsch, J.D., 2006. Uma análise dos fluxos de superfície e do microclima sobre cerrado, cana-de-açúcar e eucalipto, com implicações para mudanças climáticas regionais. 2006. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade de São Paulo
- USDA Forest Service, 2009. Why leaves change color. Disponível em: <http://www.na.fs.fed.us/spfo/pubs/misc/leaves/leaves.htm>
- Vitousek, P.M., Sanford, R.L. Jr., 1986. Nutrient cycling in moist tropical forest. *Annu Rev Ecol Syst* 17:137-167.
- Vogt, K.A., Vogt, D.J., Brown, S., Tilley, J.P., Edmonds, R.L., Silver, W.L., Siccama, T.G. 1995. Dynamics of forest floor and soil organic matter accumulation in boreal, temperate, and tropical forests. In: Lal R, Kimble J, Levine E, Stewart BA (eds) *Soil management and greenhouse effect*. CRC, Lewis Publishers, Boca Raton, FL, pp 159-178.
- Vourlitis, G., Priante-Filho, N., Hayashi, M.M.S., Nogueira, J.S., Caseiro, F.T., Campelo, J.H., 2002. The role of seasonal variations in meteorology on the net CO₂ exchange of a brazilian transitional tropical forest. In II Scientific Conference LBA (Large Scale Biosphere-Atmosfera Experiment in Amazonia), Manaus, 9-11 July, 2002.
- Waring, R.H., Schlesinger, W.H., 1985. *Forest ecosystems: concepts and management*. Academic Press, Orlando.

Apêndice 1

Comparação entre as informações providas pelos sensores de radiação instalados na torre micrometeorológica cerrado Pé de Gigante.

Figura 6.1: Regressão entre radiação global incidente e refletida.

Figura 6.2: Regressão entre radiação RFA incidente e refletida.

Figura 6.3: Regressão entre radiação RFA incidente e Global incidente.

Figura 6.4: Regressão entre radiação RFA refletida e Global refletida.

Apêndice 2

Valores integrais de albedo solar e RFA

Figura 6.5: Variação temporal do (a) albedo solar (%) e albedo RFA (%) entre 2001 e 2007, na área de estudo.

Lista de Figuras

Figura 1.1: Representação das interações de Gaia.....	2
Figura 1.2: Distribuição geográfica do cerrado no Brasil.....	4
Figura 1.3: Evolução temporal, entre outubro de 1999 e março de 2002 do saldo da produtividade (NEE) em um cerrado <i>sensu stricto</i> na Gleba Pé de Gigante. A unidade de NEE é kgC ha ⁻¹ .dia ⁻¹	6
Figura 1.4: Variação das formas fisionômicas de cerrado.....	7
Figura 1.5: Biomassa em diferentes compartimentos de um cerrado <i>sensu stricto</i> . Biomassa acima do solo inclui indivíduos mortos em pé. Diâmetros de raízes foram definidos como: muito fino = material coletado pelo carreamento/flutuação peneirando amostras de solo; fino = diâmetro < 2 mm; médio = diâmetro 2-10 mm; grosso = diâmetro > 10 mm. Rizomas de gramíneas foram incluídos na classe de raízes médias.....	9
Figura 1.6: Aparência visual de uma folha durante o processo de senescência.....	14
Figura 1.7: Foco na senescência em direção às artérias principais de uma folha de Maple.....	14
Figura 2.1: Área de estudo - Gleba Pé de Gigante, Santa Rita do Passa Quatro, SP.....	21
Figura 2.2: Panorama do cerrado na Gleba Pé de Gigante. Foto tirada do alto da torre micrometeorológica em direção Sul, com uma área de campo úmido ao centro e diferentes usos do solo no entorno da Gleba (março, 2008).....	22
Figura 2.3: Ocorrência das diferentes fitofisionomias na Gleba Pé de Gigante.....	23
Figura 2.4: Fotografias da torre micrometeorológica na Gleba Pé de Gigante. À esquerda, período chuvoso, à direita, seca.....	25
Figura 2.5: Climatologia da (a) temperatura mensal para a estação Santa Rita do Passa Quatro (C4-107), utilizando uma série de 30 anos (1961-1990). (b) Pluviograma da região de Santa Rita do Passa Quatro, para o período 1961-2000. A linha sólida une os valores médios de cada mês.....	25
Figura 2.6: Climatologia da precipitação para as estações (a) chuvosa e (b) seca. O período considerado para o cálculo da climatologia foi 1961-2000. O pequeno quadrado no setor nordeste do Estado representa aproximadamente a localização de Santa Rita do Passa Quatro.....	26

Figura 2.7: Características da estrutura do cerrado <i>sensu stricto</i> próximo à torre micrometeorológica, na Gleba Pé de Gigante, Santa Rita do Passa Quatro, SP.....	28
Figura 2.8: Torre micrometeorológica instalada no cerrado <i>sensu stricto</i> da Gleba Pé de Gigante, Santa Rita do Passa Quatro, SP.....	30
Figura 2.9: Mapa de localização dos indivíduos e espécies levantados na área da torre micrometeorológica, no cerrado <i>sensu stricto</i> da Gleba Pé de Gigante.....	31
Figura 3.1 Precipitação mensal acumulada (mm) entre os anos 2001 e 2007 na Gleba Pé de Gigante, Santa Rita do Passa Quatro, SP.....	36
Figura 3.2: Precipitação sazonal acumulada (mm) entre os anos 2001 e 2007, na Gleba Pé de Gigante, Santa Rita do Passa Quatro, SP. Note que a precipitação ocorrida em parte da estação úmida dos anos 2001 e 2007 não foram computadas e apresentadas neste gráfico.....	37
Figura 3.3: Precipitação anual acumulada (mm), com base no ano hidrológico, entre os anos 2001 e 2007, na Gleba Pé de Gigante, Santa Rita do Passa Quatro, SP. Note que a precipitação ocorrida anteriormente ao ano 2001 não foi computada e apresentada neste gráfico.....	38
Figura 3.4: Precipitação anual acumulada (mm), com base no ano hidrológico, entre os anos 2001 e 2007, na região de Santa Rita do Passa Quatro, SP.....	38
Figura 3.5: Desvio da precipitação média mensal (mm) da torre micrometeorológica da Gleba Pé de Gigante em relação à média climatológica mensal de NOAA para a região de em Santa Rita do Passa Quatro, SP.....	39
Figura 3.6: Temperatura média diária máxima e mínima (°C), entre os anos 2001 e 2007, na Gleba Pé de Gigante, Santa Rita do Passa Quatro, SP. A curva cheia indica o valor médio mensal (valores de temperatura inferiores a 10°C estão associados à indução da senescência na vegetação).....	40
Figura 3.7: Temperatura média mensal (°C) entre os anos 2001 e 2007 na Gleba Pé de Gigante, São Paulo, SP.....	40
Figura 3.8: Desvio da temperatura média mensal (mm) da torre micrometeorológica da Gleba Pé de Gigante em relação aos dados da Reanálise I entre os anos 2001 e 2007, na Gleba Pé de Gigante, Santa Rita do Passa Quatro, SP.....	41
Figura 3.9: Evolução temporal (dados diários) da umidade relativa do ar (%) entre os anos 2001 e 2007, na Gleba Pé de Gigante, Santa Rita do Passa Quatro, SP.....	42

Figura 3.10: Valores mensais da umidade volumétrica do solo ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$) para as profundidades de (a) 10 cm, (b) 20 cm, (c) 50 cm e (d) 80 cm e, (e) precipitação acumulada mensal para os anos 2001 a 2007, na Gleba Pé de Gigante, Santa Rita do Passa Quatro, SP.....	44
Figura 3.11: Valores mensais da umidade volumétrica do solo ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$) para (a) 150 cm, (b) 200 cm e (c) 250 cm e, (d) precipitação acumulada mensal entre os anos 2001 e 2007 na Gleba Pé de Gigante. São Paulo, SP.....	45
Figura 3.12: Evolução temporal da irradiância solar global incidente (Wm^{-2}) diária em superfície, entre os anos 2001 e 2007, na Gleba Pé de Gigante, Santa Rita do Passa Quatro, SP.....	46
Figura 3.13: Variação temporal do (a) albedo solar (%) e albedo RFA (%), da (b) precipitação mensal acumulada (mm) e da temperatura média mensal, entre 2001 e 2007, na área de estudo. Os valores diários de albedo (gráfico superior) foram suavizados com média móvel com janela de 30 dias.....	51
Figura 3.14: (A) Evolução temporal do albedo RFA, (B) s do albedo solar e (C) da precipitação mensal acumulada entre os anos 2001 e 2007, na Gleba Pé de Gigante. Os valores de albedo foram suavizados por média móvel com janela 30 dias.....	54
Figura: 3.15: IVDN da Gleba Pé de Gigante, Santa Rita do Passa Quatro, SP, para o ano 2005.....	58
Figura 3.16: Variação temporal do albedo RFA e IVDN em datas específicas para o cerrado <i>sensu stricto</i> na Gleba Pé de Gigante, durante o ano 2005.....	60
Figura 3.17: Ajuste linear entre os valores de albedo RFA e IVDN para os dados de 2005, na Gleba Pé de Gigante, Santa Rita do Passa Quatro, SP.....	60

Lista de Tabelas

Tabela 1.1: Comparação entre biomassa radicular (R), biomassa aérea (S) e a razão R:S em diferentes ecossistemas tropicais na América do Sul. A profundidade das raízes variou conforme o estudo.....	10
Tabela 2.1: Área de ocorrência das fitofisionomias na gleba Pé de Gigante (Batalha, 1997).....	23
Tabela 2.2: Valores utilizados para estimativa de biomassa acima do solo na Gleba Pé de Gigante.....	27
Tabela 2.3: : Valores de R:S usados para estimar a biomassa de raízes na Gleba Pé de Gigante, Santa Rita do Passa Quatro, SP.....	29
Tabela 2.4: Descrição das variáveis medidas e instrumentação na torre micrometeorológica da Gleba Pé de Gigante, utilizados neste trabalho.....	31
Tabela 3.1: Estimativa de biomassa na Gleba Pé de Gigante, Santa Rita do Passa Quatro, SP.....	35
Tabela 3.2: Valores de IVDN calculados para a Gleba Pé de Gigante.....	57