

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”

Campus Experimental de Ourinhos

EDSON XAVIER FERNANDES

**ANÁLISE DE VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS, BALANÇO DE ENERGIA E FLUXOS DE
CO₂ NO CERRADO DA FLORESTA ESTADUAL DE ASSIS – ASSIS/SP.**

**Ourinhos – SP
2013**

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”

Campus Experimental de Ourinhos

EDSON XAVIER FERNANDES

**ANÁLISE DE VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS, BALANÇO DE ENERGIA E FLUXOS DE
CO₂ NO CERRADO DA FLORESTA ESTADUAL DE ASSIS – ASSIS/SP.**

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Comissão de Avaliação de TCC do curso de Graduação
em Geografia – Bacharelado – da UNESP, Campus
Experimental de Ourinhos, como parte das exigências
para o cumprimento da disciplina Estágio Supervisionado
e Trabalho de Graduação.*

Orientador: Prof. Dr. Jonas Teixeira Nery

**Ourinhos – SP
2013**

FICHA CATALOGRÁFICA

BANCA AVALIADORA

Professor Doutor Jonas Teixeira Nery (Orientador)
UNESP-Ourinhos

Professora Doutora Ana Claudia Carfan
UNESP-Ourinhos

Professor Doutor Edson Luís Piroli
UNESP-Ourinhos

Aos meus pais, Sebastião e Maria Augusta e minha tia, Cida, dedico.

“Todos os meus estudos científicos [...] confirmam minha fé.”
(*Sir Ghilleen Prance, FRS*)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ser Quem é e por me fazer quem eu sou.

Aos meus pais, Sebastião e Maria Augusta, pelo amor, incentivo e ensinamentos (os tenho como maior exemplo de integridade e responsabilidade). Palavras não são, nem serão capazes de expressar minha gratidão a vocês e por vocês. Os amo muito e agradeço por ser seu filho!

À minha tia, Maria Aparecida (Cida!), por todo amor e carinho dedicados ao longo de toda minha vida. Terás sempre um lugar cativo e especial em meu coração, te amo muito minha amiga pra todas as horas.

Aos meus irmãos (“Mito”, “Di” e “Paulinho”), às minhas cunhadas (Simone, “Lê” e Márcia), às minhas sobrinhas (Larissa, Vitória, Rafaela e Ana Livia) e meu sobrinho (“Ian”) pelo suporte e carinho. Todos vocês são meu orgulho e alegria. Amo todos vocês.

Ao meu orientador, Professor Doutor Jonas Teixeira Nery, por ter me acompanhado em grande parte da graduação, pela paciência e dedicação ao longo de toda a iniciação científica. Por seu senso de responsabilidade, dedicação e exigências tem minha admiração.

À FAPESP pela concessão da bolsa de iniciação científica.

Ao professor Antônio Ocimar Manzi, do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, e sua filha, Carina, pela ajuda na primeira análise dos dados e contribuições para o desenvolvimento da pesquisa.

A todos os meus professores que, da pré-escola à universidade, me ensinaram, apoiaram e incentivaram de forma contínua e carinhosa.

A todos os amigos que ao longo da vida me apoiaram e incentivaram para esta empreitada. Não os nomeio, os verdadeiros amigos já sabem sua importância em minha vida e se alegraram e se alegrarão comigo!

Muito Obrigado!

Resumo

O presente trabalho discute a variabilidade anual e sazonal de variáveis meteorológicas (precipitação pluvial, radiação solar, temperatura do ar e umidade relativa do ar), bem como fluxos de calor (calor sensível e calor latente) pelo particionamento do balanço de energia e fluxos de dióxido de carbono (CO_2) em um remanescente preservado de cerrado no interior do estado de São Paulo entre os anos de 2011 e 2012, tendo em vista as atuais discussões em torno do aquecimento global antropogênico. Além disso, apresentam-se discussões sobre o papel da vegetação como condicionadora do microclima. De modo geral, é possível observar um regime sazonal das variáveis meteorológicas, com influência direta no estado da vegetação, por conseguinte nos fluxos de energia e massa. No ano de 2011 esta sazonalidade foi bem marcada, sobretudo no que tange à precipitação pluvial que influenciou diretamente todas as demais variáveis, a vegetação e os fluxos. No que tange ao fluxo de CO_2 o cerrado diminui sua capacidade de absorção durante o período seco, sendo que em 2011 foi mais proeminente, com a emissão de carbono devido às variações da precipitação e temperatura, corroborando com resultados apresentados na literatura.

Palavras-Chave: Cerrado; dióxido de carbono; calor latente; calor sensível.

Abstract

The purpose of this study is to analysis the seasonal and annual variability of meteorological variables (precipitation, solar radiation, air temperature and relative humidity) and heat fluxes (sensible heat and latent heat) by partitioning the energy balance and flows carbon dioxide (CO_2) in a cerrado remnant preserved in São Paulo State. The period of this study is 2011 to 2012. The idea is to provoke discussing about anthropogenic global warming. In general, it is possible to observe a regime of seasonal weather variables, with direct influence on the state of the vegetation, therefore the flow of energy and mass. In 2011 this was well marked seasonality, especially in relation to rainfall directly influenced all soil, vegetation and streams. Regarding the flow of the cerrado CO_2 absorption capacity decreases during the dry season, and in 2011 was more pronounced, with carbon emissions due to variations in rainfall and temperature, confirming results in the literature.

Key-words: Cerrado, carbon dioxide, latent heat, sensible heat.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS	14
LISTA DE EQUAÇÕES	15
1 INTRODUÇÃO GERAL	16
2 OBJETIVOS	18
3 REVISÃO DE LITERATURA	19
3.1 O bioma cerrado	19
3.2 O cerrado no estado de São Paulo.....	22
3.3 Mudanças Climáticas Globais.....	26
3.4 Carbono: estoques, ciclagem, a relação com o cerrado e o direcionamento das pesquisas sobre a alocação de carbono excedente.....	29
3.5 Balanço de Energia	32
3.6 Covariância de vórtices turbulentos (<i>Eddy Covariance</i>).....	35
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
4.1 Área de Estudo.....	37
4.2 Medidas Meteorológicas e de Fluxo	38
4.2.1 <i>Variáveis Meteorológicas</i>	38
4.2.2 <i>Fluxos de calor e CO₂</i>	41
4.2.3 <i>Tratamentos de dados e análise estatística</i>	41
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
5.1 Variáveis meteorológicas I: variabilidade anual do clima no cerrado.....	42
5.1.1 <i>Precipitação</i>	42
5.1.2 <i>Radiação Solar</i>	47
5.1.3 <i>Temperatura do ar e umidade relativa do ar</i>	48
5.2 Variáveis meteorológicas II: comparações entre dois ambientes distintos	51
5.3 Balanço de energia no cerrado.....	54
5.4 Fluxo de CO ₂	63
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Localização e distribuição do bioma Cerrado pelo Brasil.....	20
Figura 2 -	Representação gráfica do gradiente fisionômico da vegetação do cerrado.....	20
Figura 3 -	Reconstituição da cobertura vegetal do estado de São Paulo (situação primitiva) em modelo digital do terreno com inclusão dos atuais limites das unidades de conservação.....	23
Figura 4 -	Comparação das áreas de cerrado nos períodos 1962, 1971-73, 1990-92 e 2000-2001.....	25
Figura 5 -	Ilustração do papel do vento na geração dos vórtices turbulentos em áreas vegetadas.....	36
Figura 6 -	Localização da área de estudo	37
Figura 7 -	Croqui da área da Floresta Estadual de Assis e da Estação Ecológica de Assis, elaborado a partir do ano de 2002.....	38
Figura 8 -	Fotos das estações e do <i>datalogger</i>	40
Figura 9 -	Sensores: anemômetro sônico tridimensional (a) e analisador de gás infravermelho (b).....	41
Figura 10 -	Totais mensais de precipitação registradas no cerrado no ano de 2011.....	43
Figura 11 -	Totais mensais de precipitação registrados no cerrado para o ano de 2012.....	43

Figura 12 -	Totais mensais de precipitação registrados pela estação meteorológica automática da Floresta Estadual de Assis (“área antropizada”) e totais mensais de precipitação para o município de Assis, segundo dados coletados pela Assocana.....	44
Figura 13 -	Totais diários de precipitação registrados no cerrado em fevereiro de 2012.....	45
Figura 14 -	Totais diários de precipitação registrados entre abril e junho de 2012 na “área antropizada” da Floresta Estadual de Assis.....	46
Figura 15 -	Totais diários de precipitação registrados no mês de setembro de 2012.....	47
Figura 16 -	Valores médios mensais da radiação solar observadas no cerrado nos anos de 2011 e 2012.....	48
Figura 17 -	Médias mensais de temperatura do ar observadas no cerrado em 2011 e 2012.....	49
Figura 18 -	Valores médios mensais da umidade relativa observada nos anos de 2011 e 2012 no cerrado.....	49
Figura 19 -	Balanço hídrico normal mensal e seu extrato para os anos de 2011 e 2012, respectivamente, conforme método adotado por Rolim et al. (1998), baseado em Thornthwaite e Mather (1955).....	50
Figura 20 -	Evolução anual da radiação solar no cerrado e na área antropizada nos anos de 2011 e 2012, com base nos valores mensais médios...	51
Figura 21 -	Temperaturas médias mensais para os anos de 2011 e 2012 registradas na área antropizada e no cerrado.....	52
Figura 22 -	Evolução anual da umidade relativa para os anos de 2011 e 2012 no cerrado e na área antropizada, com base nos valores mensais médios.....	53

Figura 23 -	Acumulados totais mensais de chuva registrados no cerrado e na área antropizada nos anos de 2011 e 2012.....	53
Figura 24 -	Relação entre a radiação solar incidente e a radiação líquida, que representa a energia disponível no ambiente para realização de processos biofísicos. Os valores representam as médias horárias dos dois anos analisados (2011 e 2012).....	54
Figura 25 -	Correlação entre a energia disponível no sistema e os fluxos de calor latente (LE) e calor sensível (H) somados, para os anos de 2011 e 2012, respectivamente. Os dados referem-se às médias diárias de cada ano.....	55
Figura 26 -	Evolução mensal dos principais componentes do balanço de energia. Os valores representam as médias mensais para os dois anos analisados.....	56
Figura 27 -	Evolução do ciclo diário dos componentes do balanço de energia (R_n , LE e H) para cada período climático.....	57
Figura 28 -	Evolução do ciclo diário dos fluxos de calor latente e de calor sensível para cada período climático.....	58
Figura 29 -	Fotos do cerrado tiradas em diferentes épocas do ano, em 2011.....	60
Figura 30 -	Valores médios mensais dos três principais componentes do balanço de energia observados no cerrado em 2011 e 2012.....	61
Figura 31 -	Relação entre o saldo de radiação (R_n) e o fluxos de calor latente (◆) e o fluxo de calor sensível (■), a partir dos dados mensais organizados por trimestre.....	62
Figura 32 -	Valores médios mensais da partição dos componentes do balanço de energia para os anos de 2011 e 2012 no cerrado.....	63
Figura 33 -	Evolução anual do fluxo de CO_2 observado no cerrado, com base na média mensal, de janeiro de 2011 a dezembro de 2012.....	64

Figura 34 -	Ciclo diário do fluxo de CO ₂ dividido por períodos climáticos.....	65
Figura 35 -	Evolução diária, com base nas médias mensais horárias, do fluxo de CO ₂ no cerrado organizada por trimestre para os anos de 2011 e 2012.....	66
Figura 36 -	Fluxo médio diário de CO ₂ , temperatura média diária e total diário de precipitação, no cerrado em 2011.....	67
Figura 37 -	Fluxo médio diário de CO ₂ , temperatura média diária e total diário de precipitação, no cerrado em 2012.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Principais usos da terra no cerrado.....	21
Tabela 2 -	Quantificação da vegetação natural remanescente do estado de São Paulo por Regiões Administrativas e com destaque para as fitofisionomias de Cerrado (Adaptado de Kronka et al. 2005).....	24
Tabela 3 -	Comparações das áreas de Cerrado segundo inventários realizados no período de 1962 – 2000/2001. (Fonte: Kronka et al. 2005).....	25
Tabela 4 -	Descrição dos sensores e variáveis meteorológicas analisadas.....	39

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação (1)	$R_n = H + LE + G + P + \Delta S$ - Balanço de energia para ecossistemas vegetados.....	33
Equação (2)	$R_n = H + LE + G$ - Balanço de energia para ecossistemas vegetados (simplificada I).....	33
Equação (3)	$R_n = H + LE$ - Balanço de energia para ecossistemas vegetados (simplificada II).....	34
Equação (4)	$H/R_n = R_a$ - Razão de aquecimento do ar.....	34
Equação (5)	$LE/R_n = R_e$ - Razão evapotranspirativa.....	34
Equação (6)	$\beta = H/LE$ - Razão de Bowen.....	34

1 INTRODUÇÃO GERAL

Nos últimos anos, especialmente nos últimos 50-60 anos, graças aos avanços científicos e tecnológicos, a ação humana sobre a superfície terrestre tornou-se mais proeminente, de modo que as modificações nas paisagens tornaram-se mais intensas e suas dinâmicas (naturais e sociais) alteram-se constantemente conforme o modelo de produção vigente na maior parte do mundo. Milton Santos quando fala, por exemplo, da importância que a informação, ciência e tecnologia possuem no entendimento das atuais configurações espaciais das sociedades aponta que há uma tendência de artificialização do meio, em suas próprias palavras afirma: “o artifício tende a sobrepor-se à natureza e a substituí-la” (SANTOS, 2008, p. 69).

Esta substituição implica em alterações nas dinâmicas dos sistemas naturais, de modo que em muitos casos seus efeitos podem ser sentidos pela própria sociedade, seguindo a lógica apresentada por Tricart (1977) que afirma “o homem participa dos ecossistemas em que vive. Ele os modifica e, por sua vez, os ecossistemas reagem determinando algumas adaptações ao homem” (TRICART, 1977, p. 17). No contexto atual, estas modificações têm causado impactos consideráveis nos vários componentes da Terra, alterando seu funcionamento e despertando a atenção para os efeitos da ação antrópica sobre a natureza, por conseguinte sobre a própria população.

Diante deste quadro, as alterações ocorridas na atmosfera (bem como nos demais componentes do sistema climático e que alteram seu funcionamento como um todo) têm chamado a atenção de inúmeros estudiosos que apontam para um eminente aquecimento em escala global, decorrente das alterações termoquímicas que esta camada de ar que envolve o planeta tem sofrido ao longo dos últimos 300 anos, desde a Revolução Industrial. Isso em função do uso intensivo de combustíveis fósseis e alterações no uso do solo que contribuem para modificar a composição físico-química da atmosfera pela emissão de material particulado, principalmente dos chamados gases de efeito estufa (GEEs), alterando o balanço de energia junto à superfície, intensificando o efeito estufa, elevando as temperaturas e causando desequilíbrios na organização do sistema climático.

Embora esta teoria não obtenha um consenso geral entre os estudiosos do clima, pois existem vozes dissonantes que apontam para um fenômeno oposto, isto é, de resfriamento e que consideram a participação humana pouco expressiva na variabilidade do clima, sendo as mudanças climáticas em escala global dirigidas por fenômenos essencialmente naturais (MOLION, 2007; 2008 e CASAGRANDE et al. 2011), são as discussões em torno do aquecimento global antropogênico (AGA) que têm, segundo Mendonça (2006), delineado grande parte do discurso “climático-meteorológico-ambiental” e “se interpõem definitivamente na pauta da geopolítica internacional do presente e do futuro” (MENDONÇA, 2006, p. 71).

Este mesmo autor afirma também que, as questões ambientais frente aos efeitos da ação antrópica sobre a natureza passaram a ser mais enfatizadas a partir da década de 1970, quando da realização da I Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente (em Estocolmo, no ano de 1972). Desde então têm crescido as conferências, projetos e tratados que buscam engajar inúmeros países em políticas e práticas ambientais direcionadas sob os pressupostos da sustentabilidade (MENDONÇA, 2006).

No que se refere ao clima, foi durante a Rio-92 que, baseados nos pressupostos do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change* – IPCC¹), inúmeros países reconheceram que os problemas vinculados às mudanças climáticas são preocupações de caráter comum à humanidade. A partir disso, negociaram e assinaram a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças no Clima (Convenção do Clima). Um dos principais objetivos era conduzir à estabilização das concentrações dos gases de efeito estufa e mitigar os efeitos das modificações climáticas em andamento (TAVARES, 2004).

Sobre a convenção do clima, Tavares (2004) também afirma que:

(...) a convenção do clima teve o mérito de incentivar o debate da questão antes mesmo que os governos mundiais concordassem plenamente com a existência de dificuldades a serem superadas. Com isso, ela estabeleceu as diretrizes gerais e criou mecanismos destinados à realizações de reuniões periódicas para as discussões e tomadas de ações com base no “princípio da precaução”. Essas medidas consistiram num estímulo à pesquisa científica sobre o assunto, (TAVARES, 2004, p. 78).

Assim, a chamada Agenda-21 e as posteriores Conferências das Partes (as COPs), foram importantes mecanismos criados durante a Rio-92 e que orientam grande parte dos estudos e atuais discussões em torno no conhecimento do clima e de suas mudanças (MENDONÇA, 2006).

Neste sentido, têm se destacado pesquisas e estudos que consigam apontar para possíveis mecanismos de mitigação dos efeitos oriundos das mudanças climáticas, sobretudo no que tange à concentração dos GEEs na atmosfera, principalmente o CO₂, considerado principal gás causador do AGA. Uma destas linhas de pesquisa refere-se ao conhecimento e quantificação dos estoques e fluxos de carbono dentro de ecossistemas terrestres vegetados como, por exemplo, as grandes florestas e demais biomas tropicais (FREITAS, 2012). Acredita-se que estes sistemas naturais atuam como sorvedouros do carbono atmosférico excedente (ou seja, aquele decorrente das emissões antrópicas) e estariam minimizando os efeitos nocivos do aquecimento (APPENZELLER, 2011).

¹O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) foi criado em 1988 como um esforço conjunto da Organização Meteorológica Mundial e do Programa do Meio Ambiente das Nações Unidas para resumir o estado do conhecimento científico sobre mudança climática em uma série de avaliações periódicas importantes. A primeira delas foi concluída em 1990, a segunda em 1995, a terceira em 2001 e a quarta em 2007 (BANCO MUNDIAL, 2010, p. 70).

No Brasil, a maioria deste tipo de estudo têm se concentrado na região da floresta amazônica, mas outros biomas como o cerrado também tem sido alvo de alguns pesquisadores (ARRUDA, 2011). O conhecimento das dinâmicas naturais dos ecossistemas, sobretudo àquelas referentes aos fluxos de energia (calor latente e calor sensível, por exemplo) e massa (CO_2 e vapor de água), frente à diferentes condições ambientais (como a variabilidade climática, por exemplo), tornou-se fundamental para a construção e elaboração de políticas e medidas ambientais de conservação e manutenção dos biomas, tendo em vista seus efeitos benéficos à população.

Neste sentido, o presente trabalho propõe-se a contribuir com este tipo de discussão. Serão apresentados resultados obtidos a partir de medidas micrometeorológicas feitas em um remanescente do bioma cerrado no município de Assis, interior do estado de São Paulo, avaliando como o ecossistema local responde às variações climáticas no que tange ao balanço de energia local e trocas de CO_2 na interface superfície/vegetação-atmosfera.

Estas medidas permitem determinar em quais condições a vegetação do cerrado atuou, ou não, como sorvedouro de carbono. Além disso, também se analisou o papel da vegetação como condicionante do microclima, por meio da análise das variáveis meteorológicas coletadas em duas áreas com cobertura vegetal distinta (sendo uma área com vegetação preservada, no cerrado, e a outra uma área antropizada).

Todavia, antes de discutir os resultados e apresentar as conclusões, são postulados os objetivos deste trabalho e apresenta-se uma revisão de literatura sobre os principais aspectos norteadores desta pesquisa, de modo que se tem: i) breve explanação sobre os aspectos gerais do bioma cerrado; ii) considerações sobre o cerrado paulista; iii) mudanças climáticas globais; iv) os estoques de carbono e a relação do cerrado na assimilação de CO_2 e sua inserção nas atuais pesquisas voltadas a quantificar as trocas de energia e massa nos ecossistemas; v) considerações sobre o balanço de energia, cuja análise auxilia no conhecimento das condições ambientais propícias ao desenvolvimento da vegetação e consequente maior ou menor absorção de carbono e vi) considerações sobre o sistema de covariância de vórtices turbulentos (*Eddy Covariance*), que é o principal meio de obtenção de medidas micrometeorológicas para estudos deste tipo.

2 OBJETIVOS

Os principais objetivos deste trabalho são:

- Realizar análise de variáveis meteorológicas como radiação solar, precipitação pluvial, temperatura do ar e umidade relativa do ar em uma área de cerrado protegida no interior de São Paulo.
- Verificar o papel da vegetação no microclima, através da comparação das mesmas variáveis meteorológicas coletadas em áreas distintas, sendo uma a área de cerrado

preservada e outra uma área antropizada localizada próxima aos escritórios e laboratórios da Floresta Estadual de Assis (FEA).

- Através de dados de fluxos de superfície avaliar a interação superfície/vegetação-atmosfera, analisando o balanço de energia no cerrado pela observação dos principais fluxos de calor, isto é, calor latente (LE) e calor sensível (H).
- Analisar os fluxos de carbono entre a vegetação e a atmosfera, inferindo a partir dos resultados em que condições o ecossistema local absorveu e/ou emitiu carbono.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 O bioma cerrado

O cerrado é considerado por alguns como um bioma do tipo savânico (CONTI e FURLAN, 2003; PINHEIRO, 2008). Troppmair (2008) considera que este bioma apresenta características próprias, distintas daquelas observadas nas savanas, principalmente no que tange à sua fitofisionomia. Para este autor, enquanto as savanas possuem formação vegetal aberta, o cerrado, como o próprio nome indica, é uma formação vegetal do tipo fechada.

No Brasil, o cerrado cobria, originalmente, uma área de aproximadamente 2 milhões de km². Tal dimensão confere-lhe o título de segundo maior bioma brasileiro, atrás da floresta amazônica. Com sua área nuclear localizada nos estados da região Centro-Oeste do país, sua distribuição estende-se desde à borda da floresta Amazônica até áreas de estados nas regiões Nordeste, Sudeste e Sul, além do extremo norte do país (neste caso na forma de enclaves), (Figura 1).

De maneira geral, a vegetação do cerrado é caracterizada por apresentar dois estratos principais, um herbáceo-arbustivo (caracterizado pela presença de gramíneas e de pequenos arbustos) e outro arbóreo (com árvores de médio porte distribuídas, comumente, de forma irregular). A vegetação normalmente apresenta casca espessa e folhas cobertas por uma camada de cortiça (ROMARIZ, 2008) e um sistema radicular bem desenvolvido, que são adaptações às condições do meio físico como clima e solo.

Em relação ao clima, no cerrado as estações chuvosas (no verão) e secas (no inverno) são bem definidas ao longo do ano, com precipitação anual acima de 1.000 mm. Ao longo dos meses secos, a vegetação (as espécies arbóreas) consegue retirar águas dos lençóis freáticos em profundidades de até 15 metros (CONTI e FURLAN, 2003). Apesar de sua vegetação apresentar aspectos que lembram áreas de climas áridos e semiáridos, alguns autores como Ab'Sáber (2003) apontam que a vegetação deste bioma possui um “pseudoxeromorfismo”, indicando que o aspectos lenhoso e retorcido da vegetação não se dão apenas em função das condições climáticas e hídricas, mas também em função dos solos que possuem alta concentração de alumínio e são pobres em nutrientes (AB'SÁBER, 2003; TROPMAIR, 2008).

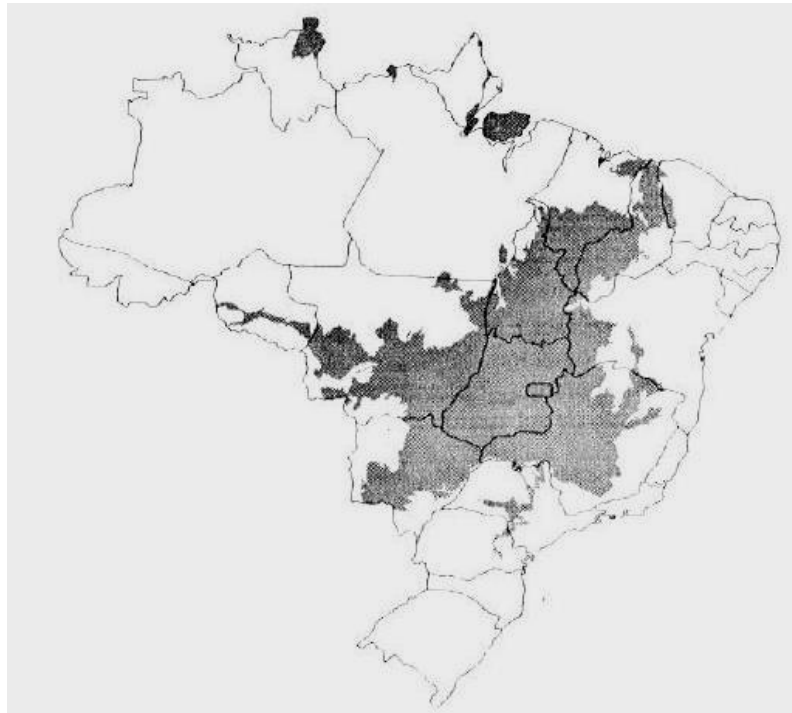


Figura 1 – Localização e distribuição do bioma Cerrado pelo Brasil
Fonte: Tannus, 2005 adaptado de Ribeiro e Walter, 1998.

Fatores ambientais relativos à questão climática como, por exemplo, a disponibilidade hídrica e aos solos (pobreza e toxidez) determinam conforme Ratter (2002) *apud* Pinheiro (2008), a existência de diferentes fitofisionomias no cerrado, as quais vão desde o campo limpo, passando pelo campo sujo, campo cerrado e cerrado *sensu-stricto*, até o cerradão (caracterizado por maior densidade vegetacional e maior fitomassa) (Figura 2). De acordo com Sano (2011) as diferentes fisionomias da vegetação expressam os diferentes tipos de solos dos quais as plantas retiram nutrientes, levando-se em conta também a topografia e o lençol freático, sendo que as formações florestais (como o cerradão, por exemplo) são visíveis em solos férteis ou com disponibilidade hídrica.



Figura 2 – Representação gráfica do gradiente fisionômico da vegetação do cerrado.
Fonte: PINHEIRO, 2008, adaptado de Durigan, 2003.

A criação de Brasília, na década de 1950, na área nuclear do cerrado acabou impulsionando novos processos de urbanização, demografia, infra-estruturas viária e deu início ao processo para o desenvolvimento e expansão da fronteira agrícola na região (AB'SÁBER, 2003; SANO, 2011). Silva (2000) e Ferreira et al. (2009), apontam que a topografia suave da região Centro-Oeste, marcada pelas condições planas de relevo com presença de chapadões, por exemplo, além dos solos bem desenvolvidos, favoreceram uma forte mecanização agrícola e o desenvolvimento das atividades agropecuárias, fato que conferem ao cerrado um papel estratégico e o coloca no centro de algumas discussões acerca do desenvolvimento sócio-econômico (baseados nas atividades agroindustriais e pecuárias que se dão em seu domínio), bem como da necessidade de se conciliar crescimento econômico com sustentabilidade a longo prazo.

Ferreira et al. (2009) também afirmam que, embora a fronteira agrícola esteja aparentemente consolidada e estabilizada, os desmatamentos continuam de forma intensa. Citando um estudo realizado no ano de 2002 por Machado et al. (2004), utilizando imagens do satélite MODIS, Klink e Machado (2005) mostraram que 55% do bioma já foram devastados ou modificados pela ação antrópica.

As transformações ocorridas no cerrado nos últimos anos desencadearam grandes danos ambientais como, por exemplo, fragmentação dos habitats, extinção da biodiversidade, invasão de espécies exóticas, erosão dos solos, poluição dos aquíferos, alteração no regime de queimadas, desequilíbrios no ciclo do carbono e, possivelmente, modificações climáticas em escala regional (KLINK e MACHADO, 2005). Na Tabela 1, têm-se as áreas e as porcentagens dos principais usos da terra no cerrado.

Tabela 1 – Principais usos da terra no cerrado².

USO DA TERRA	ÁREA (ha)	% ÁREA CENTRAL DO BIOMA
Áreas Nativas ³	70.581.162	44,53
Pastagens plantadas	65.874.145	41,56
Agricultura	17.984.719	11,35
Florestas plantadas	116.760	0,07
Áreas urbanas	3.006.830	1,90
Outros	930.304	0,59
Total	154.493.921	—

² Conforme os autores (KLINK e MACHADO, 2005) as categorias são classificadas de acordo com o tipo de cobertura do solo.

³ Estimativas sem aferição em campo e incluindo áreas nativas em qualquer estado de conservação (KLINK e MACHADO, 2005).

De acordo com Lima (2011), a agricultura e a pecuária praticadas no cerrado são responsáveis pela produção nacional de 60% da soja, 59% do café, 44% do milho, 45% do feijão, 81% do sorgo e 55% da carne bovina, que são alguns dos principais produtos de exportação brasileiros. Assim, o cerrado está na complexa interface entre desenvolvimento econômico e preservação ambiental, fato que requer o pensar novas práticas agrícolas com base na sustentabilidade, manejo adequado das unidades de conservação e ampliação destas, bem como pesquisas que conduzam ao maior conhecimento sobre as dinâmicas naturais deste bioma e sua importância socioambiental.

3.2 O cerrado no estado de São Paulo

Romariz (2008) afirma que as principais teorias que buscam explicar a origem do cerrado baseiam-se no clima, no solo e na ação humana e que, ao mesmo tempo em que se afirmam, são opostas e se contradizem em algum ponto, tanto no que se refere às características observadas na porção nuclear do bioma na região Centro-Oeste, quanto aos seus enclaves dispersos por outros estados brasileiros.

Dentro da Geografia, a Teoria dos Refúgios Florestais é um dos meios mais utilizados para explicar a ocorrência do cerrado em áreas para além de seu núcleo (como é o caso do estado de São Paulo), tendo nas flutuações climáticas ocorridas durante o Pleistoceno terminal (13.000 a 18.000 anos antes do presente) sua base.

Viadana e Cavalcanti (2007) mostram que neste período o clima da América do Sul, consequentemente do Brasil apresentava-se mais frio e seco, o que favoreceu a expansão de tipos vegetacionais de fisionomia aberta, como é o caso do cerrado e da caatinga, por grande parte do território (inclusive no estado de São Paulo). No final deste período, com a retomada da tropicalidade e o aumento gradual da umidade, houve uma retração desses biomas e uma expansão das florestas tropicais úmidas que cercaram as fisionomias das vegetações outrora dominantes em redutos, os quais foram chamados de refúgios⁴. Estes mesmo autores concluem que:

A expansão das formações vegetacionais abertas (cerrados e caatingas) no estado de São Paulo, entre 13.000 e 18.000 anos antes do presente e suas posteriores retrações aos limites atuais de seus respectivos domínios morfobioclimáticos, explicam as manchas de cerrados prevaletentes em seções territoriais paulistas (VIADANA e CAVALCANTI, 2007, p. 76).

Todavia, para Borgonovi e Chiarini (1965), responsáveis por um dos primeiros inventários florestais do estado de São Paulo, neste caso a ocorrência da vegetação do cerrado está atrelada, particularmente, a uma condição edáfica, tendo o fator solo maior

⁴ É válido lembrar que embora a ideia de “refúgio” tenha sido aplicada num primeiro momento às florestas tropicais que se “refugiaram” em áreas propícias à sua manutenção e desenvolvimento durante o predomínio do clima mais seco, na atualidade pode ser aplicada aos remanescentes contemporâneos de cerrado fora de sua porção nuclear.

expressão do que o fator clima. Sob a mesma perspectiva, Ratter et al. (1997) *apud* Latansio-Aidar et al. (2010), afirmam que a presença do cerrado em São Paulo é associada a solos de baixa fertilidade, ocorrendo na forma de enclaves e dispersos, principalmente em áreas da Depressão Periférica e do Planalto Ocidental Paulista (Figura 3).

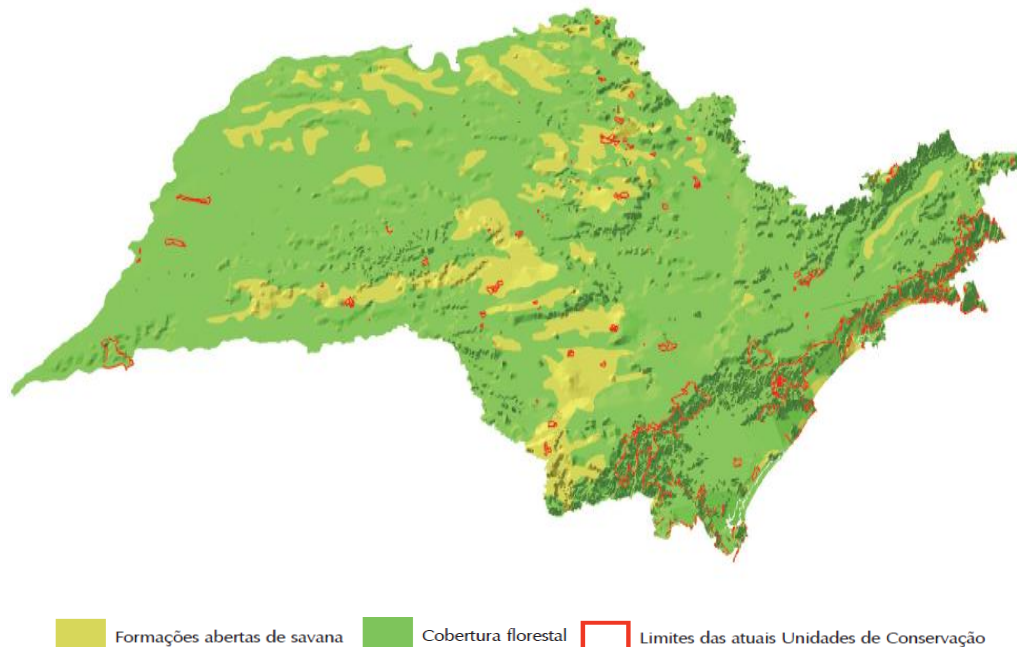


Figura 3 – Reconstituição da cobertura vegetal do estado de São Paulo (situação primitiva) em modelo digital do terreno com inclusão dos atuais limites das unidades de conservação.
Fonte: Kronka et al. (2005) adaptado de Victor (1979).

Originalmente, o cerrado cobria 14% do território do estado de São Paulo (MENDONÇA, 2004; DURIGAN et al. 2007; PINHEIRO, 2008). Todavia, esta porcentagem foi drasticamente reduzida ao longo do processo de ocupação do território paulista a partir do século XVIII, quando o governo incentivou a ocupação do planalto para efetivar a ocupação da Capitania de São Paulo e fixar sua população, mais tarde com a chegada do café às terras do planalto a devastação da cobertura vegetal se intensificou (MENDONÇA, 2004), sobretudo pelo uso de métodos rudimentares como a “coivara” (que era o emprego da derrubada e da queima da vegetação para instalação de culturas agrícolas).

A cobertura vegetal do solo sofre modificações constantes com a ação do homem. A princípio, essa dinâmica é mais intensa nas áreas com solos de maior fertilidade e de condições ecológicas mais adaptadas à exploração agrícola econômica (BORGONOVÍ e CHIARINI, 1965, p. 159).

Sob esta lógica se deu a devastação da cobertura vegetal em São Paulo. Em um primeiro momento, o cerrado que era atrelado a solos de baixa fertilidade, manteve-se fora do caminho dos grandes fazendeiros e cafeicultores. Todavia, como aponta Pinheiro (2008), com a valorização do café e a instalação de infraestruturas ligadas à cafeicultura, mesmo as

terras do cerrado passaram a ser utilizadas. Mais tarde, com a derrocada do café, na primeira metade do século XX, muitos fazendeiros começaram a vender e a dividir suas terras, apostando no cultivo do algodão e nas pastagens e, nos anos seguintes, a pecuária, agricultura extensiva e monocultora e a silvicultura contribuíram ainda mais para reduzir as áreas com cobertura vegetal nativa (DURIGAN et al. 2003a, *apud* PINHEIRO, 2008).

O resultado deste processo é que, dos 14% de cobertura original de cerrado mencionados anteriormente, hoje restam menos de 1%. Em um inventário florestal realizado por Kronka et al. (2005), foi diagnosticado que das principais formações de cerrado existentes no estado de São Paulo (cerrado *stricto sensu*, cerradão e campo cerrado), este bioma representa algo em torno de 0,85% (Tabela 2).

Neste mesmo inventário, também foi mostrado que em quase 40 anos (1962 - 2000/2001), o cerrado sofreu uma redução de 88,5% em sua área, sendo que as culturas que mais contribuíram para esta redução foram a cana-de-açúcar, pastagens, culturas temporais, citricultura e reflorestamento (KRONKA et al. 2005) (Tabela 3 e Figura 4). Durigan et al. (2007) corroboram com estes dados e asseveram que no estado de São Paulo os remanescentes de cerrado estão muito fragmentados e dentro de propriedades particulares, o que muitas vezes dificulta sua preservação. Além disso, mostram também que outra ameaça a estes remanescentes é a invasão de gramíneas africanas que desestabilizam os ecossistemas e priorizam que remanescentes próximos aos centros urbanos ou estradas de rodagem devem ter prioridade para serem transformados em unidades de conservação.

Tabela 2 – Quantificação da vegetação natural remanescente do estado de São Paulo por Regiões Administrativas e com destaque para as fitofisionomias de cerrado (Adaptado de Kronka et al. 2005).

REGIÃO ADMINISTRATIVA	MATA	CAPOEIRA	CERRADO	CERRADÃO	CAMPO CERRADO	CAMPO	VEGETAÇÃO DE VÁRZEA	MANGUE	RESTINGA	VEGETAÇÃO NÃO CLASSIFICADA	TOTAL (ha)
Araçatuba	18.067	25.379	14.634	1.161			5.391			448	65.080
Bauru	36.264	27.707	19.214	9.701	72		9.505			282	102.745
Campinas	57.280	130.863	6.180	5.342			5.341			736	205.742
Litoral	698.909	280.596				848	31.930	20.722	157.372		1.190.377
Marília	44.923	39.532	15.659	4.085			4.528			291	109.018
Presidente Prudente	67.831	32.518	12.853	1.956	32		22.459			640	138.289
Ribeirão Preto	39.290	99.287	34.980	29.048	6	480	44.390			1.713	249.194
São José do Rio Preto	14.598	42.337	23.359	14.517	37		16.188			2.923	113.959
São Paulo	53.719	190.057	976			518	1.521				246.791
Sorocaba	261.520	441.617	12.617	2.761	669		13.766			6	732.956
Vale do Paraíba	135.277	167.514	21		194	5	116			23	303.150
TOTAL (ha)	1.427.678	1.477.407	140.493	68.571	1.010	1.851	155.135	20.722	157.372	7.062	3.457.301
%	5,76	5,96	0,57	0,28	0	0,01	0,63	0,08	0,63	0,03	13,94%*

(*) Em relação à superfície total do estado de São Paulo.

Tabela 3 – Comparações das áreas de cerrado segundo inventários realizados no período de 1962 – 2000/2001. (Adaptado de: Kronka et al. 2005)

PERÍODOS	ÁREAS DE CERRADO (HECTARES)	VARIAÇÃO TEMPORAL/PERDA (%)
1962	1.837.150	1962/1971-73 → -41,1
1962/1971-73	1.082.640	1971-73/1990-92 → -73,6
1990-92	285.555	1990-92/2000-2011 → -25,8
2000-2001	211.925	1962/2000-2001 → -88,5

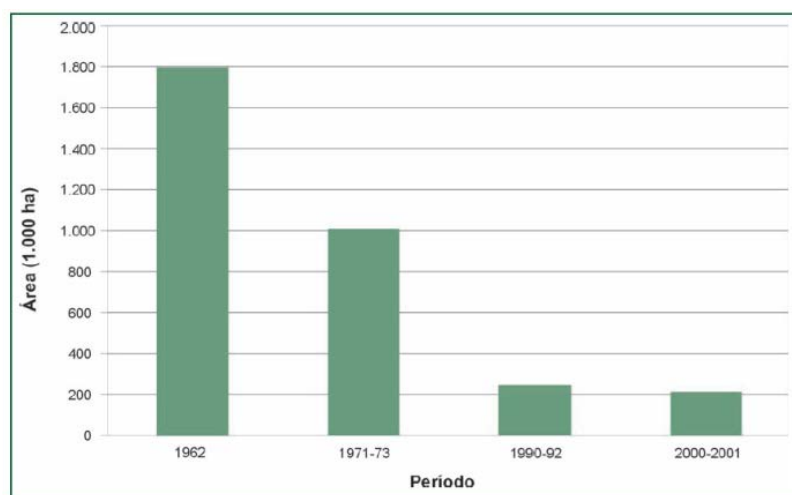


Figura 4 – Comparação das áreas de cerrado nos períodos 1962, 1971-73, 1990-92 e 2000-200. **Fonte:** Kronka et al. 2005.

Diante deste quadro de devastação, o governo do estado de São Paulo aprovou em junho de 2009 a lei nº 13.550, a qual (como o próprio título diz) “dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do bioma cerrado no estado e dá providências correlatas”. Segundo boletim publicado na revista Pesquisa FAPESP (“Proteção ao cerrado paulista”), do mesmo mês da aprovação desta lei, o estado paulista é o primeiro da federação a criar uma lei específica para o cerrado.

Medidas como esta são importantes, já que o cerrado passou a fazer parte dos biomas tidos como prioritários para a conservação da biodiversidade no mundo, um *hot spot* (Meyers et al. 2000). Além disso, como explicitado na introdução, no atual contexto em que se discutem mudanças climáticas globais, em decorrência da ação antrópica, alguns estudos tem se preocupado com o papel dos sistemas vegetacionais neste contexto, tanto pelo impacto no clima oriundo da retirada da cobertura vegetal, quanto pelo papel que a vegetação desempenha no ciclo do carbono, especialmente no que tange à assimilação do carbono atmosférico na forma de CO₂ (FREITAS, 2012).

Assim, como parte da revisão bibliográfica deste trabalho, serão apresentadas breves discussões acerca dos assuntos mudanças climáticas globais e o papel dos ecossistemas vegetados, como o cerrado, neste processo.

3.3 Mudanças Climáticas Globais

O sistema climático da Terra constitui-se em diferentes e complexas interações existentes entre seus principais componentes (a atmosfera, a hidrosfera, a litosfera, a criosfera e a biosfera) e da interação destes com a radiação proveniente do Sol. Em outras palavras, “o clima da Terra é determinado pela entrada de energia do Sol, pela saída de energia irradiada do planeta e pelas trocas de energia entre a atmosfera, terra, oceanos, gelo e seres vivos” (BANCO MUNDIAL, 2010, p. 71).

No que diz respeito à composição da atmosfera, a existência de gases como o vapor de água, CO_2 , o metano (CH_4), o ozônio (O_3) e o óxido nitroso (N_2O) que são praticamente transparentes à radiação de onda curta (radiação solar), mas bons absorvedores da radiação infravermelha (radiação terrestre), é a garantia de um aquecimento (algo em torno de 33°C) que torna possível a manutenção da água em estado líquido e que haja vida do Equador até a proximidade dos polos. Por esta característica, tais gases são conhecidos como gases do efeito estufa.

Todavia, nos últimos três séculos, principalmente nos últimos 50 anos, a intensificação da ação antrópica sobre a superfície terrestre, criando meios artificiais, degradando ecossistemas e liberando substâncias químicas em demasia nos componentes do sistema climático, com alterações significativas no funcionamento destes e nas suas interfaces, têm chamado a atenção pelos efeitos nocivos que podem causar em escala global.

Nos últimos anos, discussões acerca de mudanças climáticas globais têm ganhado à atenção de inúmeros pesquisadores. Para a grande maioria, o planeta vive sob a iminência de um aquecimento global em decorrência da intensificação do efeito estufa pela liberação de gases e aerossóis na atmosfera, decorrentes da ação antrópica. De acordo com IPCC, em seu quarto relatório (IPCC, 2007) as mudanças no clima global, sobretudo pelo aquecimento, é um fato inquestionável, essencialmente atribuível às atividades humanas.

O uso indiscriminado de combustíveis fósseis e as alterações na paisagem pelas mudanças no uso do solo, ou seja, urbanização crescente e destruição de ecossistemas vegetados e sua substituição por pastagens e/ou culturas agrícolas, são apontados como os principais responsáveis pelo aumento na emissão dos GEEs para a atmosfera. Ora, este aumento na concentração destes gases (sobretudo o CO_2) resultaria em um aquecimento acima dos padrões naturais, em escala global, cujas alterações no funcionamento do sistema climático seriam, em sua maioria, danosos à sociedade e à biosfera como um todo.

Alguns dos principais efeitos do aquecimento global seriam degelo dos polos, aumento no nível do mar (com inundação das cidades litorâneas), eventos climáticos extremos (tempestades, furacões, tornados e secas) com maior frequência e intensidade, aumento na ocorrência de doenças tropicais como a Malária, diminuição na produção de alimentos e degradação dos ecossistemas (MARENGO, 2007; BANCO MUNDIAL, 2010; ARRUDA, 2011).

Neste contexto, Nobre (2001) postula que para o Brasil os efeitos mais significativos da mudança climática global são:

... aumento da temperatura, modificações nos padrões de chuva e alterações na distribuição de extremos climáticos tais como secas, inundações, penetração de frentes frias, geadas, tempestades severas, vendavais, granizos, etc. (NOBRE, 2001, p. 240).

A maioria dos pesquisadores que defendem o aquecimento global antropogênico, baseia suas análises em resultados obtidos por modelos numéricos que correlacionam o aumento nas concentrações de CO₂ e seus impactos na temperatura média global, estabelecendo cenários em que o aumento na temperatura média global⁵ resulta em alterações nas dinâmicas de circulação atmosférica e precipitação em diferentes áreas do globo.

Sobre estes modelos, Marengo (2007) define que existem dois tipos de modelos: os Modelos Globais atmosféricos (GCMs) e os Modelos Globais Acoplados Oceano Atmosfera (AOGCMs). Este mesmo autor escreve que:

... esses modelos provêm de uma visão tridimensional do sistema climático, descrevendo os principais processos físicos e dinâmicos, assim como as interações entre os componentes do sistema climático e os mecanismos de retroalimentação (*feedbacks*) entre os processos físicos (MARENGO, 2007, p. 20).

A ação antrópica (segundo alguns pesquisadores, responsável pelo aumento dos GEEs na atmosfera e pelo consequente aquecimento global) e a utilização destes modelos computacionais ao mesmo tempo em que são a base da teoria aquecimentista, é foco também de grande crítica de outro grupo de pesquisadores que ao longo dos anos têm se posicionado contrários à teoria do AGA (CASAGRANDE et al. 2011), são os chamados “não aquecimentistas” ou “céticos do clima”.

Estes pesquisadores procuram demonstrar que as alterações climáticas globais devem-se, em primeira instância, a fenômenos essencialmente naturais como os ciclos

⁵ De acordo com o cenário mais otimista gerado por estes modelos numéricos computacionais, a temperatura média global poderá aumentar em até 1,4°C. Já o cenário mais pessimista aponta para uma elevação em torno de 5,8°C até o final do presente século (MARENGO, 2007). Nobre (2001), sugere que modelos utilizados para estimarem o aumento os efeitos do aquecimento global no Brasil apontam para elevações na temperatura entre 4 e 6°C.

solares (responsáveis ora por maior ou menor incidência de radiação), mudanças no albedo planetário em consequência, por exemplo, de maior nível de aerossóis na atmosfera em função de erupções vulcânicas e alterações dos ciclos astronômicos que regulam a posição da Terra em relação ao Sol, por conseguinte a entrada e a interceptação de energia pela superfície (MOLION, 2007; 2008).

Molion (2007; 2008) também procurou demonstrar que não há qualquer relação direta entre o aumento dos níveis de CO₂ e o consequente aquecimento, sendo mais plausível, segundo ele, que o aumento dos níveis de CO₂ seja uma resposta ao aumento da temperatura. Sobre isto, escreve:

O planeta se aqueceu mais rapidamente entre 1925-1946, quando a quantidade de CO₂ lançada na atmosfera era inferior a 10% do atual, e se resfriou entre 1947-1976, quando ocorreu o desenvolvimento econômico acelerado após a Segunda Guerra Mundial [...] No sumário para Formuladores de Políticas do IPCC, publicado em fevereiro de 2007, afirmou-se que a concentração de CO₂ aumentou 35% nos últimos 150 anos. Porém, isto pode ter sido devido a variações internas ao sistema terra-oceano-atmosfera. Sabe-se que a solubilidade do CO₂ nos oceanos depende de sua temperatura com uma relação inversa. Como a temperatura dos oceanos aumentou, devido à redução do albedo planetário e à atividade solar mais intensa entre 1925-1946, a absorção (emissão) de CO₂ pelos oceanos pode ter sido reduzida (aumentada) e mais CO₂ ter ficado armazenado na atmosfera. Portanto, não se pode afirmar que foi o aumento de CO₂ que causou o aumento da temperatura. Pode ter sido exatamente o contrário, ou seja, que o CO₂ tenha aumentado em resposta ao aumento de temperatura dos oceanos e do ar adjacente. (MOLION, 2008, p. 21).

Os modelos de mudanças climáticas também são alvo de críticas por parte dos céticos. Sobre isto, Molion (2008, p. 17) também afirma que os atuais modelos são “representações ainda simples, grosseira, da complexa interação entre os processos físicos diretos e *feedbacks* que controlam o clima do globo”.

A despeito dos embates científicos em torno das mudanças climáticas globais, são os pareceres e estudos da parte da comunidade científica, defensora do aquecimento global antrópico, que norteiam grande parte das pesquisas e políticas públicas e ambientais. A questão está centrada no controle das emissões de CO₂ para a atmosfera como meio de mitigar os aspectos nocivos do efeito estufa intensificado. Neste sentido, Tavares (2004, p. 70) afirma que “todos os sistemas, naturais ou socioeconômicos, estarão sujeitos, em maior ou menor grau, às mudanças que vierem a ocorrer, dependendo da vulnerabilidade, da magnitude e da rapidez dos acontecimentos”.

Entretanto, é necessário fazer uma ressalva de que, apesar de posicionarem-se contrários à teoria vigente, de modo algum os “céticos do clima” defendem que a negação do aquecimento global seja motivo para que se continue com o atual modelo predatório e nocivo dos recursos naturais, tendo em vista o crescimento populacional que o planeta viverá nos próximos anos. Nas palavras do próprio Molion (2008):

... o bom senso sugere a adoção de políticas de conservação ambiental bem elaboradas e mudanças nos hábitos de consumo para que a Humanidade possa sobreviver, ou seja, para que as próximas gerações possam dispor dos recursos naturais que se dispõem atualmente (MOLION, 2008, p. 23).

Dentro do contexto que defende a teoria aquecimentista, estudos que conduzam à técnicas, políticas e mitigação dos efeitos do aquecimento global tem ganhado destaque, dentre eles àqueles relativos a capacidade que determinados ecossistemas terrestres, como os sistemas florestais, por exemplo, têm de captar da atmosfera o carbono excedente, oriundo da ação humana (SANTOS, 1999; TANNUS, 2004; FREITAS, 2012). Por isso, florestas tropicais como a floresta amazônica e outros biomas como o cerrado e o pantanal, tem despertado a atenção de pesquisadores que, de acordo com Arruda (2011), buscam respostas que ajudem a compreender o equilíbrio entre a produção dos gases de efeito-estufa pela ação antrópica e a quantidade destes gases na atmosfera. Este autor pontua ainda que:

... esses ecossistemas atraem a atenção mundial não somente pela possibilidade de serem grandes consumidores desses gases, como também por funcionarem como importantes fontes de calor e vapor de água para a atmosfera, possuindo papel relevante na circulação geral da atmosfera (ARRUDA, 2011, p. 02).

Esta função de sequestrar ou emitir carbono atmosférico e a capacidade de controlar e manter o clima regional e local faz parte do que Aduan et al. (2003) chamam de serviço ambiental dos ecossistemas, já que tal função tem influência direta sobre a sociedade adjacente a eles, ao mesmo tempo em que as funções ecossistêmicas podem ser grandemente influenciadas pela ação humana. Por isso, ainda há controvérsias entre os cientistas sobre como as florestas, por exemplo, reagirão ao aumento constante dos níveis de CO₂ na atmosfera (APPENZELLER, 2011). A seguir, são apresentadas algumas reflexões tiradas da literatura sobre o assunto e, antes, uma breve referência aos estoques globais de carbono, a interação entre eles e o caso do cerrado neste contexto.

3.4 Carbono: estoques, ciclagem, a relação com o cerrado e o direcionamento das pesquisas sobre a alocação de carbono excedente

Existem quatro grandes compartimentos globais de armazenamento de carbono, a saber: o oceânico, o atmosférico, o terrestre e o geológico, de modo que o carbono não se encontra contido de maneira definitiva nestes compartimentos, mas movimenta-se entre eles, principalmente entre os reservatórios terrestre, atmosférico e oceânico, os quais interagem de forma contínua através de intercâmbios mediados por processos químico e

biológicos, formando o que se chama de “ciclo do carbono” (PACHECO e HELENE, 1990; SOTTA, 1998; D'ANDRÉA, 2004).

“As quantidades de carbono transferidas de um reservatório para outro, por unidade de tempo, devido aos processos físico-geo-químicos, são conhecidas como fluxos de carbono” (PACHECO e HELENE, 1990, p. 209). Estas autoras postulam também que no atual contexto de mudanças climáticas globais pelo aumento na concentração de CO₂ na atmosfera, estudos têm se voltado para analisar e quantificar a absorção deste gás realizada pelos oceanos e pela biomassa terrestre.

Négron-Juárez (2004) corrobora com esta perspectiva ao afirmar que há fortes indícios de que a biota terrestre seja um sumidouro funcional, fato que estaria limitando o crescimento do CO₂ atmosférico global além do observado, sendo, portanto, a manutenção e conservação dos ecossistemas vegetados uma forma de mitigação do efeito estufa antrópico. Négron-Juárez (2004) também afirma que na atualidade há um desequilíbrio no ciclo do carbono, e sobre isso explica que:

... são emitidas 8,1 PgC ano⁻¹ devido às atividades industriais, ao desflorestamento tropical e queimadas, sendo somente 40% (3,2 PgC ano⁻¹) ficam como incremento líquido para a atmosfera. Os oceanos absorvem 1,7±0,5 PgC ano⁻¹ da atmosfera. Isto indica que existe um resíduo, possivelmente como sumidouro terrestre, de aproximadamente 3,2 PgC ano⁻¹. Alguns processos são apontados como responsáveis por esse sumidouro, entre eles a recuperação de florestas sobre terrenos agrícolas abandonados e a fertilização por CO₂ atmosférico (NÉGRON-JUÁREZ, 2004, p. 06).

Neste mesmo sentido, Appenzeller (2011), em um artigo da revista *National Geographic Brasil*, aponta que os campos, florestas e oceanos atuam como sorvedouros de carbono, freando o acúmulo de CO₂ na atmosfera, adiando seus efeitos no clima, assim (nas suas próprias palavras) “livrando-nos de nós mesmos”. Seu artigo apresenta também considerações acerca das incertezas de como a as florestas e demais ecossistemas vegetados poderão reagir frente ao aumento na concentração de carbono na atmosfera. Em relação a isto, transcreve-se abaixo trechos deste artigo intitulado “o ciclo da vida”.

O problema é que os cientistas não sabem com certeza se esse processo benéfico vai continuar ou se, com o aumento das temperaturas globais, ele não poderia virar algo prejudicial – com as florestas e outros ecossistemas se convertendo em fontes de emissão de carbono, lançando na atmosfera mais do que conseguem absorver. [...] Se a natureza deixar de dar sua contribuição, ou seja, se os sumidouros de carbono deixarem de reter parte do nosso excesso de dióxido de carbono, poderemos enfrentar mudanças drásticas antes mesmo de 2050, em um desastre súbito demais para ser evitado. Porém, se os sumidouros de carbono mantiverem ou aumentarem sua atividade, poderíamos contar com mais algumas décadas para substituir as fontes energéticas emissoras de carbono que hoje sustentam a economia mundial (APPENZELLER, 2011, p. 44).

Assim, tem se tornado cada vez mais comuns estudos que buscam quantificar as trocas de carbono existentes na interface vegetação-atmosfera e que consigam quantificar também os estoques de carbono em alguns ecossistemas. No caso do cerrado brasileiro, os chamados “estoques aéreos” (que são aqueles acima da superfície) são inferiores àqueles de sistemas florestais (como a floresta amazônica, por exemplo), contudo, no que se refere ao sistema radicular, ou seja, ao seu estoque subterrâneo, o cerrado pode apresentar estoques de carbono similar ou mesmo superiores aos sistemas florestais mais produtivos (ADUAN et al. 2003). Sawyer (2009) afirma que enquanto na Amazônia a biomassa subterrânea total é de, aproximadamente, 21 %, no cerrado é bem maior, na ordem de 70 %, dado o sistema radicular bem desenvolvido que é importante estoque de carbono.

Quando se pensa a situação do Brasil no contexto do aquecimento global, no que se refere à sua emissão de carbono para a atmosfera na forma de CO₂, tanto a floresta amazônica quanto o cerrado merecem maior atenção. Isto porque, conforme Cerri e Cerri (2007), no país 75 % das emissões de CO₂ para a atmosfera são derivados do desmatamento e das práticas agrícolas, práticas antrópicas amplamente difundidas nas regiões Norte e Centro-Oeste. Tendo em vista o vasto estoque subterrâneo que o cerrado apresenta, Carvalho et al. (2010) chamam a atenção para estudos que tem demonstrado que a conversão do cerrado em agroecossistemas reduz os estoques de carbono no solo e eleva as emissões de GEEs para a atmosfera.

No que tange às trocas líquidas de carbono entre a vegetação e atmosfera, no Brasil, a grande maioria dos estudos tem se concentrado na Amazônia. Na atualidade, um dos mais importantes projetos do tipo em andamento na região é o *Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia* (LBA) que, de acordo com Grecco (2011) conta com uma rede de 11 torres de mais de 50 metros de altura, abrigando diversos instrumentos entre 20 e 30 metros acima das árvores, distribuídas por vários pontos da floresta, sendo que tais instrumentos aferem os fluxos entre a superfície e atmosfera pelo chamado método de covariância de vórtices turbulentos.

Em relação ao cerrado, no Brasil dois importantes trabalhos relativos às trocas de carbono com a atmosfera são o de Miranda et al. (1997), realizado no cerrado do Brasil Central e o de Rocha et al. (2002), feito em um remanescente de cerrado localizado no município de Santa Rita do Passa Quatro, estado de São Paulo. Com base nestes dois trabalhos, outros se seguiram, como é o caso, por exemplo, de Tannus (2004), Négron-Juárez (2004), Tatsch (2006) e Couto (2009), cujas discussões são relativas à comparações entre os fluxos observados no cerrado e em outros ecossistemas ou agroecossistemas (como canaviais e plantação de eucaliptos), bem como diferentes condições de tempo afetam diretamente a vegetação, alterando seu metabolismo, consequentemente as trocas entre ela e a atmosfera.

No geral, a maioria dos trabalhos relata um padrão sazonal dos fluxos existentes no cerrado, de modo que durante a estação chuvosa o ecossistema analisado funcionou como dreno de carbono atmosférico, tendo em vista condições favoráveis ao desenvolvimento da vegetação (como água e energia em abundância, bem como temperaturas elevadas) que intensificam processos como a fotossíntese, por exemplo. Por sua vez, durante o período seco, o déficit hídrico e térmico reduz a atividade metabólica da vegetação, a qual passa a assimilar menos carbono atmosférico ou mesmo emitir CO_2 para a atmosfera, elevando sua intensificação no ar neste período.

É comum também que nestes tipos de trabalho, tanto os realizados no cerrado quanto na Amazônia, as medidas dos fluxos de carbono sejam acompanhadas por medidas dos fluxos de calor, que ajudam a compreender o balanço de energia nos ecossistemas, o qual, segundo Arruda (2011).

... é de grande significado, pois, compreendendo a dinâmica do balanço de energia, poder-se-á igualmente compreender melhor as dinâmicas das florestas nos processos de absorção e emissão de CO_2 para a atmosfera. O entendimento do primeiro pode nos levar a conhecer com mais exatidão o comportamento do outro. Além de sua importância como fonte ou consumidor do dióxido de carbono, os ecossistemas desempenham papel essencial no ciclo biológico da vida sobre a Terra em virtude de sua grande biodiversidade de espécies florestal e animal, e pelos efeitos que o desmatamento em grande escala poderá provocar no clima, na hidrologia e nos ciclos biogeoquímicos em escala regional e global (ARRUDA, 2011, p. 02).

Souza et al. (2009), em um trabalho realizado no Pantanal, afirmam que a compreensão do microclima de uma dada região passa pelo conhecimento dos mecanismos de troca de energia entre a superfície e a atmosfera. Oliveira et al. (2001), cujo trabalho refere-se a uma área da floresta amazônica, asseveram que as medições do balanço de energia são fundamentais para que se entenda o papel dos ecossistemas no clima local, regional e global, além de suas respostas às variações nas condições ambientais.

Neste mesmo sentido, Andrade et al. (2009) apontam também que dada esta estreita relação entre os principais componentes do balanço de energia (sobretudo os fluxos de calor) e o clima, é importante conhecer e quantificar os processos relacionados ao balanço de energia que podem contribuir para a formulação de políticas ambientais e climáticas.

Deste modo, a seguir são expostas algumas definições do que é o balanço de energia à superfície, especialmente em superfícies vegetadas, bem como quais os principais processos considerados, seus componentes e algumas idéias que nortearam esta pesquisa.

3.5 Balanço de Energia

Para Moura (2005, p. 08), o balanço de energia ou saldo de radiação (R_n) à superfície “representa a contabilidade entre a radiação de onda curta incidente (R_g) e

refletida (R_r) e da radiação de onda longa incidente (R_{la}) e emitida pela superfície (R_{ls})". No caso de superfícies vegetadas, com base nas definições de Tubelis e Nascimento (1980) esta mesma autora afirma que:

O R_n num dossel vegetal representa a quantidade de energia disponível repartida entre os fluxos de energia necessários aos processos de evapotranspiração, aquecimento do ar e do solo e para fotossíntese [...], ou seja, o saldo de radiação é o resultado das trocas de energia radiativa que se estabelecem na interface solo-planta-atmosfera (MOURA, 2005, p. 08).

Definição muito similar pode ser encontrada no trabalho de Radünz et al. (2011). Com base em Villa Nova (1973), Cunha et al. (2002) definem o método do balanço de energia como "um processo racional de estimativa de evapotranspiração de uma superfície, o qual mede a energia disponível em sistema natural e separa as frações usadas nos diferentes processos" (CUNHA et al. 2002, p. 736). Souza et al. (2009), baseado em Oke (1987), define que "o balanço de energia na superfície é determinado pela energia disponível no sistema, que, por sua vez, é particionada entre os fluxos turbulentos de calor e o armazenamento pelo meio" (SOUZA et al. 2009, p. 315).

Arruda (2011), com base em Pereira (2002), é que fornece uma das mais completas definições do balanço de energia, a saber:

A essência do conceito do balanço de energia está na afirmação de que a diferença entre a energia que entra e a que sai de um sistema é a energia captada ou utilizada por ele. Da energia que chega à superfície da Terra, parte é utilizada para aquecer o ambiente na forma de calor sensível (H), parte para evaporar a água na forma de calor latente (LE), parte para aquecer a terra, fluxo de calor no solo (G), parte é utilizada na fotossíntese (P) e o restante é utilizada pela biomassa (ΔS) (ARRUDA, 2011, p. 12).

A partir disso, a equação que representa o balanço de energia (R_n) em superfícies com cobertura vegetal pode ser escrita da seguinte maneira:

$$R_n = H + LE + G + P + \Delta S \quad (1)$$

Sendo cada um de seus componentes definidos como os da citação acima. São comuns trabalhos em que o armazenamento pela biomassa seja representado apenas por S , como é o caso de Andrade et al. (2009). De maneira geral os componentes P e ΔS não são considerados na maioria dos trabalhos, pois possuem pouca significância, algo em torno de menos de 2% do particionamento de energia. Assim, a equação pode ser simplificada da seguinte forma:

$$R_n = H + LE + G \quad (2)$$

Ou seja, consideram-se apenas os fluxos de calor. Há casos, todavia, em que se consideram apenas os fluxos de calor sensível (H) e calor latente (LE), os quais, de acordo com Benezoli e Imbuzeiro (2011) podem equivaler, na maioria dos casos, a 90% da energia total disponível. Assim, ainda mais simplificada, a equação do balanço de energia pode ser escrita desta maneira:

$$R_n = H + LE \quad (3)$$

Arruda (2011) também mostra que há outras formas que podem ser consideradas para quantificar o particionamento de energia no ambiente como, por exemplo, valendo das seguintes razões:

$$H/R_n = R_a \quad (4)$$

$$LE/R_n = R_e \quad (5)$$

Sendo, R_a a razão que representa a fração energia utilizada para o processo de aquecimento do ar e R_e para processos de evapotranspiração.

Há ainda a chamada razão de Bowen (β), que é a razão entre os fluxos de calor sensível e calor latente que, de acordo com Moura (2005) foi proposta no ano de 1926 por Bowen como meio de estudar a partição de energia disponível no ambiente. Esta autora escreve também, citando os estudos de Pereira et al. (1997), que o valor da razão de Bowen é influenciada em grande parte pelas condições hídricas da superfície, de modo que se esta estiver umedecida, a maior parte de R_n será utilizada para evapotranspiração, resultando em valores baixos de β . Por outro lado, se a superfície apresentar déficit hídrico, os valores de β serão altos, apontando para o fato de que a maior parte de R_n foi utilizada para aquecer o ar (MOURA, 2005). A razão de Bowen é representada pela seguinte equação:

$$\beta = \frac{H}{LE} \quad (6)$$

Todas as medidas dos fluxos de superfície, sejam fluxos de massa ou de energia, na grande maioria dos trabalhos são realizadas por estações micrometeorológicas dotadas de sensores modernos que dispõem de um sistema denominado *Eddy Covariance*, sistema de Covariância de Vórtices Turbulentos. Estes tipos de sensores e sistema permitem medidas

rápidas das trocas entre a superfície e a atmosfera, correlacionando-as com medidas de variáveis meteorológicas como temperatura do ar e vento, por exemplo.

3.6 Covariância de vórtices turbulentos (*Eddy Covariance*)

Segundo Aguiar (2005), o método micrometeorológico da covariância de vórtices turbulentos é mais utilizado para estimar fluxos de superfície, tendo se tornado uma ferramenta padrão nos estudos sobre o ciclo do carbono, da água e energia, conforme Arruda (2011). Os sensores que operam com este método, segundo Malhi e Grace (2000) que estudaram a relação entre as florestas tropicais e os estoques de carbono, são equipamentos de medição intensiva de alta tecnologia que fornece grande quantidade de dados sobre a variação temporal do carbono, desde escalas horárias até anuais.

O emprego deste método também causa pouco impacto/distúrbio ao microambiente dos ecossistemas analisados (BALDOCHI et al. 1988 *apud* AGUIAR, 2005), bem como possibilita a oportunidade para que pesquisas sejam capazes de determinar se um ecossistema em particular é uma fonte ou um dreno de carbono (GRACE, 2004, *apud* AGUIAR, 2005). Citando Baldochi (2003) e Moncrieff et al. (1997), Arruda 2011, pontua em seu trabalho que as medidas do fluxo de CO₂ são realizadas a partir da covariância entre as variações na velocidade do vento vertical e a razão de mistura do CO₂, sendo este método o mais confiável para o monitoramento das trocas existentes entre a biosfera e a atmosfera.

Para que as medidas sejam eficazes representantes dos fluxos subjacentes à superfície, os instrumentos necessitam serem instalados dentro da camada limite turbulenta, uma vez que são os movimentos do ar (turbulência), na maioria das vezes, na forma de convecção, que realizam os intercâmbios de energia e massa na interface superfície/vegetação-atmosfera.

Sobre esta interação, Tatsch (2006) escreve:

O escoamento de ar próximo à superfície está associado aos vórtices turbulentos (ou “*eddies*”), através dos quais as parcelas de ar se deslocam carregando consigo propriedades, tais como calor, umidade, momento e poluição. Estes mecanismos descrevem os chamados fluxos turbulentos: fluxo de calor sensível (H), fluxo de calor latente (LE), fluxo de momento (τ), fluxo de um escalar ou poluente (F_x). De uma forma geral os fluxos de superfície representam o principal mecanismo de interação entre a biosfera e a atmosfera (TATSCH, 2006, p. 16-17).

O vento ou a turbulência, seja de origem mecânica ou térmica, é responsável pela criação de vórtices turbulentos, os quais são responsáveis pelo transporte de energia e massa, contidas em um dado volume de ar (Figura 5).

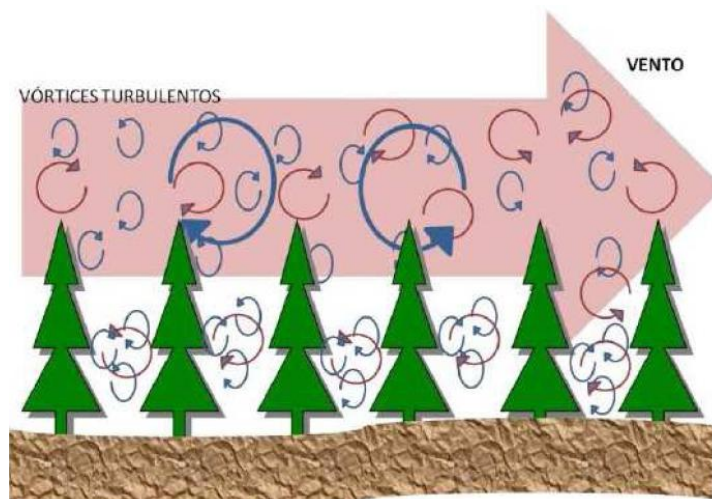


Figura 5 – Ilustração do papel do vento na geração dos vórtices turbulentos em áreas vegetadas. (Fonte: Arruda, 2011, p. 32.)

Quando o vento passa pelos sensores, estes são capazes de identificar e medir as propriedades do ar, distinguindo os fluxos de energia dos fluxos de massa. Arruda et al. (2006) afirmam que as medidas feitas pelo sistema *Eddy Covariance* são mais confiáveis quando as condições de vento, temperatura, umidade e o CO_2 forem constantes, de modo que a vegetação subjacente apresente-se homogênea e sobre um terreno amplo e plano. Citando Baldochi (2003) estes autores afirmam também que quando se trata de medidas sobre paisagens naturais e complexas ou em condições atmosféricas muito variáveis, no caso das trocas de CO_2 entre a biosfera e atmosfera, deve ser incluídas medidas de armazenamento atmosférico (BALDOCHI, 2003 apud ARRUDA et al. 2006).

Apesar da eficácia deste sistema, os autores não descartam falhas nas medidas, principalmente em função do comportamento da camada limite atmosférica. Como as medidas dependem em grande parte dos fluxos turbulentos, sobretudo as do CO_2 , durante a noite quando há estabilidade atmosférica e os ventos são fracos há um acúmulo de dióxido de carbono junto ao dossel, de modo que os fluxos noturnos podem ser subestimados (TANNUS, 2004; AGUIAR, 2005; ARRUDA et al. 2006).

Ainda assim, há uma tendência crescente dos trabalhos que se valem deste sistema. No Brasil, são inúmeros os trabalhos (sobretudo na Amazônia como foi mencionado anteriormente). Entretanto, também existem trabalhos em outros biomas que se valeram deste tipo de sistema como é o caso dos já referidos trabalhos de Miranda et al. (1997) e Rocha et al. (2002) no cerrado. Há também o trabalho de Oliveira et al. (2006) na caatinga. Recentemente, Freitas (2012) na mata atlântica. Fora do país, por exemplo, tem-se o trabalho de Veenendaal et al. (2004) que valeram-se do sistema *Eddy Covariance* para medir trocas gasosas e energéticas em uma savana africana.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Área de Estudo

A Floresta Estadual de Assis (FEA), localizada há 12 km do centro do município de Assis, interior do estado de São Paulo, foi criada no ano de 1959 e se tornou Unidade Conservação em 2002 (Decreto Estadual nº 47098/02). Possui uma área de aproximadamente 2.816,42 ha (MAX et al. 2007), sendo que em seu interior, na Estação Ecológica de Assis (EEcA), abriga um importante remanescente do bioma cerrado (Figura 6).

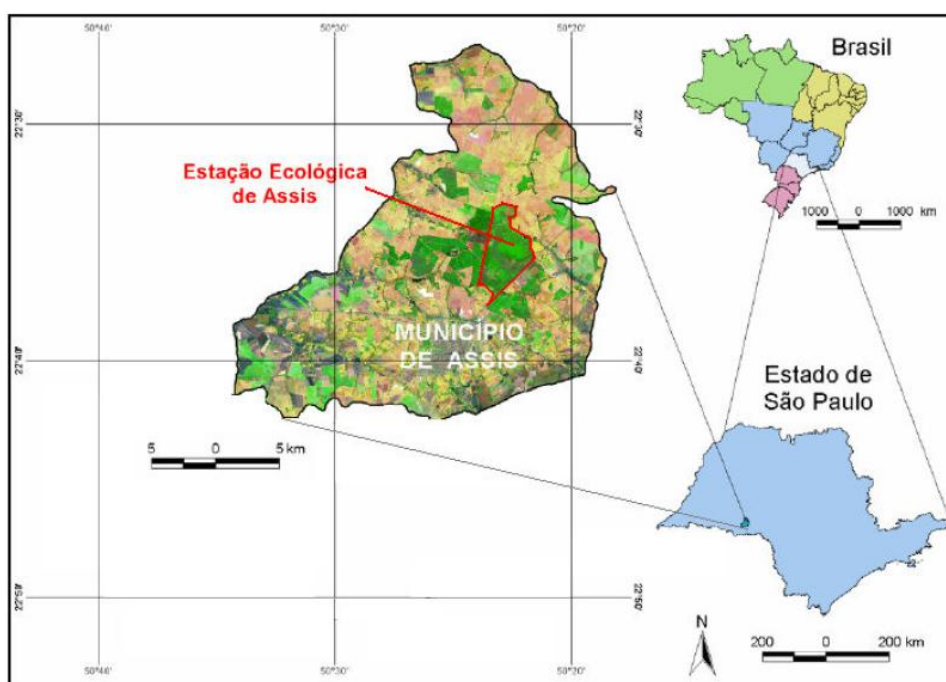


Figura 6 – Localização da área de estudo. (Fonte: Instituto Florestal)

A EEcA, por sua vez, possui uma área total de aproximadamente 1.760,64 ha, dos quais 1.312,68 ha são ocupados por vegetação nativa, isto é, pelo cerrado, cuja fisionomia predominante é o cerradão (aproximadamente, 91%). Está inserida no Planalto Ocidental Paulista (entre as coordenadas 22°33'20" a 22°37'41" latitude Sul e 50°24'4,8" a 50°21'27" longitude Oeste de Greenwich), com um relevo suave ondulado, cujas altitudes variam entre 510 a 596 m (PINHEIRO e DURIGAN, 2009) (Figura 7).

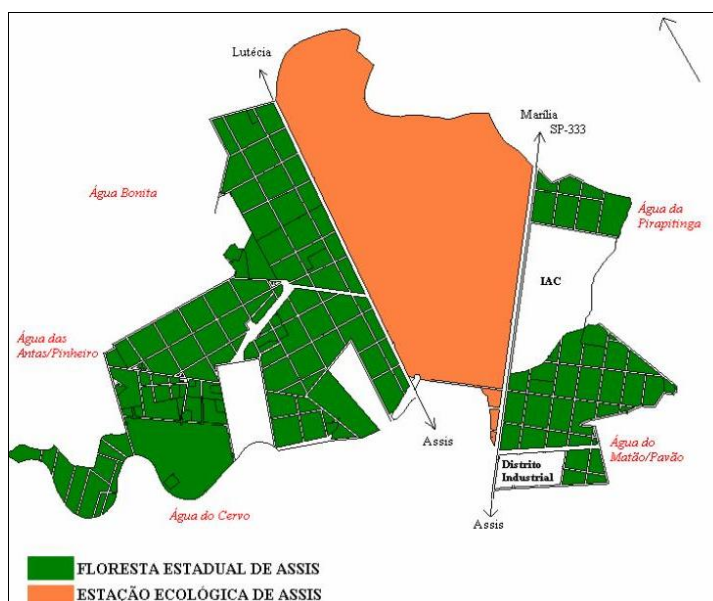


Figura 7 – Croqui da área da Floresta Estadual de Assis e da Estação Ecológica de Assis, elaborado a partir do ano de 2002. (Fonte: Max et al. 2007, p. 14.)

Ainda segundo Pinheiro e Durigan (2009), citando Almeida et al. (1981) e Bognola et al. (1996), a litologia local é formada por arenitos do Grupo Bauru, da Formação Adamantina. No interior da área protegida os solos são do tipo Latossolo Vermelho Distrófico (nas partes mais elevadas, isto é, zonas de interflúvio) e Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico e Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico na parte inferior da vertente.

O município de Assis, bem como a Floresta Estadual e o cerrado, localiza-se próximo ao Trópico de Capricórnio, em uma área, portanto, de transição entre os climas tropical e subtropical. Ao longo do ano sofre tanto com a influência de sistema climáticos dinâmicos de baixas latitudes como, por exemplo, a Zona de Convergência de Umidade (ZCOU) e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), principalmente no verão, quanto de sistemas subtropicais como as frentes frias e os anticiclones pós-frontais, sobretudo no inverno.

Durante a fase inicial da pesquisa, uma caracterização climática da região mostrou a existência ao longo do ano de dois períodos climáticos distintos, sendo um período chuvoso, que se estende entre os meses de outubro a março, com registro das maiores temperaturas e acumulados de precipitação entre dezembro e fevereiro e um período seco de abril a setembro, com as menores temperaturas e baixos acumulados de precipitação registrados entre junho e agosto (FERNANDES e NERY, 2010).

4.2 Medidas Meteorológicas e de Fluxo

4.2.1 Variáveis Meteorológicas

As principais variáveis meteorológicas consideradas neste trabalho são: radiação solar incidente, temperatura do ar, umidade relativa do ar, precipitação pluvial e saldo de radiação (para o estudo do balanço de energia). Os dados foram obtidos por meio de medidas realizadas em duas estações, uma meteorológica automática localizada em uma

área antropizada nas proximidades dos escritórios e laboratórios da FEA⁶ e outra micrometeorológica automática com duas torres, sendo uma para acomodação dos sensores que medem as variáveis meteorológicas e outra para os sensores de fluxo, localizada entre a vegetação do cerrado⁷.

Nas duas estações os sensores realizam medidas minuto a minuto, sendo que somente as médias de cada hora são registradas e armazenadas por um sistema *datalogger* (modelo CR-1000, *Campbell Scientific do Brasil*). Na Tabela 4 têm-se os modelos de sensores utilizados nas estações, as variáveis consideradas e as respectivas unidades de medida e na Figura 8 as fotos das estações e do *datalogger*, sendo a meteorológica automática na “área antropizada” e a micrometeorológica, com duas torres, no cerrado.

Tabela 4 – Descrição dos sensores e variáveis meteorológicas analisadas

Sensor	Modelo	Variável Meteorológica	Unidade de Medida
Radiômetro	CMP-3 (Kipp& Zonen)	Radiação solar	W/m ²
Saldo Radiômetro		Saldo de radiação	W/m ²
Termo-higrômetro	CS215-CSL	Temperatura do ar	°C
Termo-higrômetro	CS215-CSL	Umidade Relativa do ar	%
Pluviômetro	TB4 (CS700)	Precipitação	mm

No que tange às condições ambientais distintas das duas áreas analisadas, a principal característica desta diferenciação é a cobertura vegetal. Na chamada “área antropizada”, que é circundada pelos escritórios, laboratórios e barracões do Instituto Florestal, o solo é coberto por gramíneas. Já a área protegida de cerrado, a cobertura vegetal é muito mais densa, com árvores de médio porte característica da fitofisionomia de “cerradão”. As estações estão localizadas dentro da área protegida da estação ecológica em uma distância aproximada de 4 a 5 quilômetros. Ainda na Figura 8 é possível perceber as condições ambientais distintas de cada área, sobretudo no que diz respeito à vegetação.

⁶ Coordenadas: Lat: 22°34'14"; Long: 50°24'38"; Alt: 533m.

⁷ Coordenadas: Lat: 22°34'47"; Long: 50°22'43"; Alt: 534m.



Figura 8 – Fotos das estações e do *datalogger*.

4.2.2 Fluxos de calor e CO₂

Os sensores responsáveis pela medição dos fluxos de energia (calor latente – LE – e calor sensível – H) e de CO₂ encontram-se em uma torre de, aproximadamente, 7 metros de altura, sendo instalados há dois metros acima do dossel. Foi utilizado um anemômetro sônico tri-dimensional (modelo CSAT-3, *Campbell*) para medir a velocidade do vento na vertical, horizontal e diagonal. Tais medidas, quando cruzadas pelo sistema *eddy covariance* com as medidas de temperatura e umidade captadas à mesma altura, fornecem os valores dos fluxos de calor latente e calor sensível. Tais fluxos são medidos a cada segundo pelos sensores, sendo que as médias destas flutuações são registradas e armazenadas por um *datalogger* (CR-1000, *Campbell*) a cada 30 minutos.

As medidas do fluxo de dióxido de carbono foram obtidas por um analisador de gás infravermelho (modelo IRGA LI-7500, *Licor*), sendo os valores medidos e cruzados com as flutuações do vento segundo a segundo pelo sistema *eddy covariance* e as médias registradas no sistema *datalogger* (CR-1000, *Campbell*) também a cada 30 minutos. Na Figura 9 tem-se a fotografia do anemômetro sônico e do IRGA.

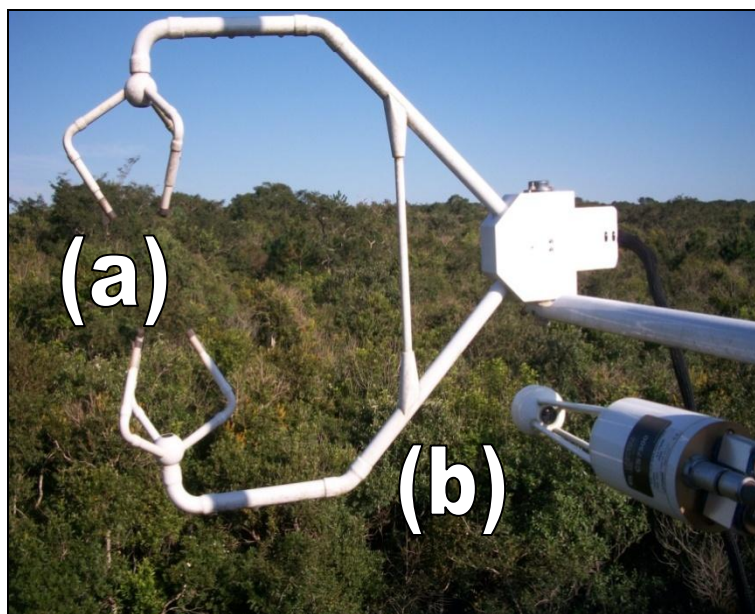


Figura 9 – Sensores: anemômetro sônico tridimensional (a) e analisador de gás infravermelho (b).

4.2.3 Tratamentos de dados e análise estatística

Após contato com pesquisadores do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), que ofereceram uma análise preliminar da série de dados de fluxos de calor e de CO₂, durante o processo de análise alguns dados foram considerados espúrios, sendo eliminados das séries. Para o caso do fluxo de calor latente, foram eliminados dados horários cujos valores fossem maiores que 700 W/m² e menores que -30 W/m² e para o fluxo de calor sensível, àqueles superiores a 700 W/m² e inferiores a -50 W/m². No caso do

fluxo de CO₂, foram considerados espúrios os dados cujos valores fossem maiores que 1 miligrama por metro quadrado por segundo e menores que -1,5 miligramas por metro quadrado por segundo.

A análise estatística consistiu no cálculo de médias diárias, médias mensais, médias mensais horárias e totais mensais (para o caso da chuva), a partir das quais foi possível a construção de gráficos lineares, de barra, de dispersão e correlação linear. Os dados foram tabulados e organizados em planilhas eletrônicas do *software Excel* (versão 2007), nas quais foi possível realizar os cálculos e a construção dos referidos gráficos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Variáveis meteorológicas I: variabilidade anual do clima no cerrado

5.1.1 Precipitação

Antes de apresentar as considerações acerca da precipitação, é necessário informar que os dados referentes aos meses de abril, maio e junho de 2012 não foram considerados, pois o pluviômetro do cerrado apresentou problemas e as medidas foram coletadas de forma errada. Assim, para discutir sobre a variabilidade anual das chuvas, recorreu-se aos dados da estação meteorológica automática instalada dentro da Floresta Estadual e que também é usada neste trabalho, bem como dados de precipitação coletados pela Associação rural dos fornecedores e plantadores de cana da média sorocabana (Assocana)⁸, de Assis, de modo que o mesmo comportamento da variável pode ser considerada e, a partir disso, direcionar as inferências deste trabalho.

Para o ano de 2011, a precipitação seguiu um padrão típico para a região, com concentração de chuvas no primeiro e último trimestre do ano (meses do período chuvoso), especialmente nos meses de janeiro e fevereiro em que foram registrados acumulados totais mensais superiores a 350 mm. O período seco estende-se de abril a setembro, sendo que entre maio e setembro foram registradas chuvas abaixo de 100 mm, além de mal distribuídas ao longo do tempo. Em maio e setembro praticamente não choveu (foram registrados apenas 8 mm em ambos os casos), Figura 10.

⁸ Os dados estão disponíveis em: <<http://www.assocana.com.br/pluvio.php>>.

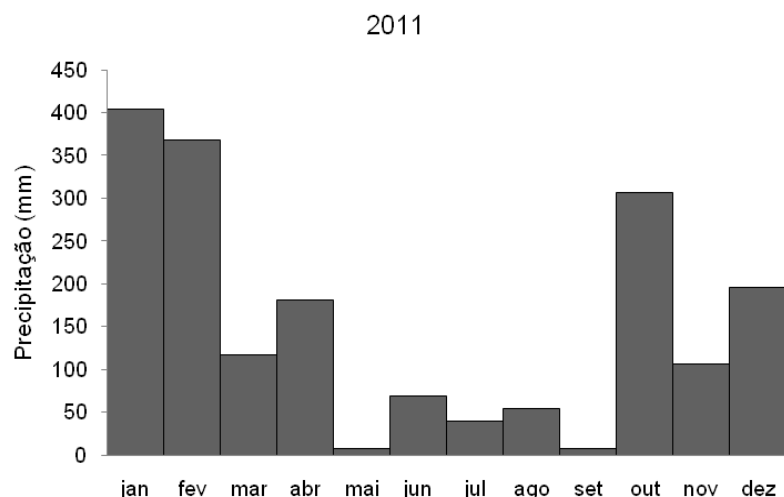


Figura 10 – Totais mensais de precipitação registradas no cerrado no ano de 2011.

Já no ano de 2012, os dois períodos climáticos não foram bem marcados, registrando anomalias de precipitação, especialmente no primeiro semestre. Em fevereiro e março, meses típicos do período chuvoso, foram registradas chuvas abaixo de 150 mm (Figura 11). Já nos meses de abril a junho, que pertencem ao período seco, contrariando as expectativas, foram registrados acumulados de chuva acima do normal, conforme os registros da estação meteorológica automática (na “área antropizada”) da Floresta Estadual de Assis e os dados da Assocana (Figura 12).

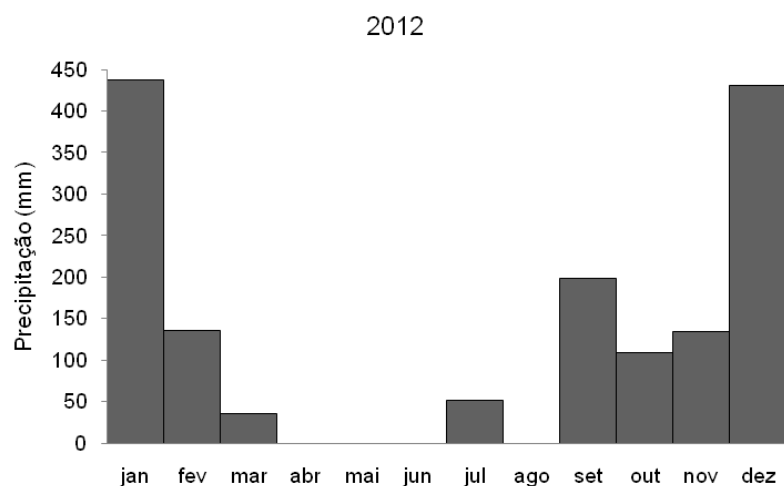


Figura 11 – Totais mensais de precipitação registradas no cerrado no ano de 2012.

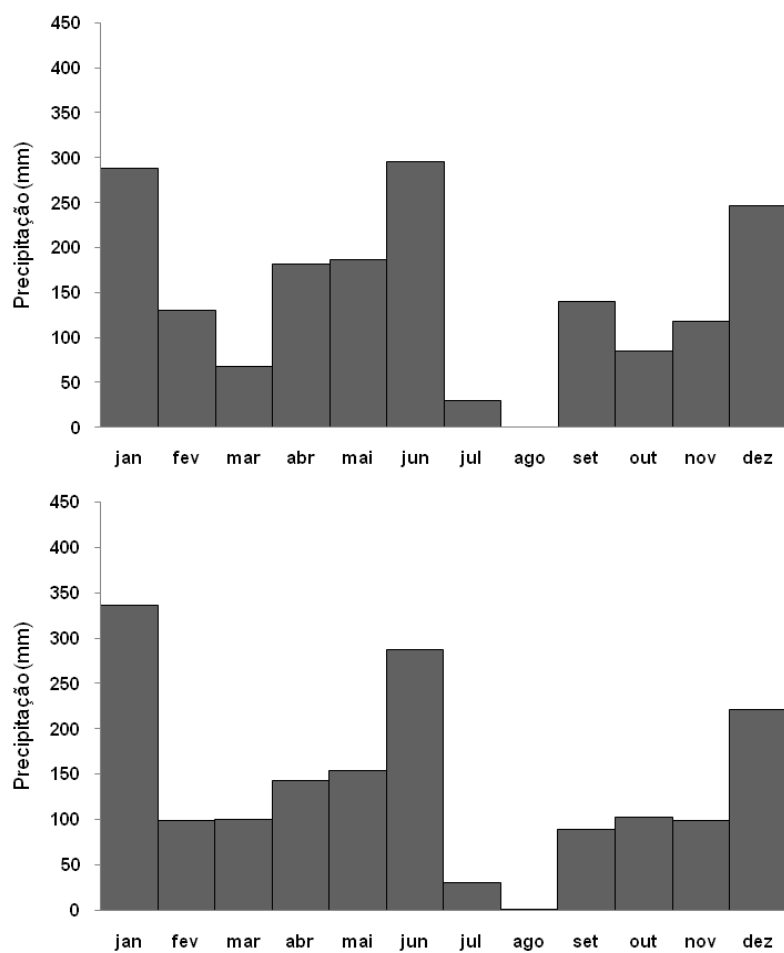


Figura 12 – Totais mensais de precipitação registrados pela estação meteorológica automática da Floresta Estadual de Assis (“área antropizada”) e totais mensais de precipitação para o município de Assis, segundo dados coletados pela Assocana.

Tanto a Figura 11, quanto a Figura 12 permitem afirmar que no ano de 2012, ao longo do período seco, apenas os meses de julho e agosto estiveram dentro da normalidade, pois em setembro, o acumulado de chuvas também foi bem marcado.

No caso do primeiro trimestre de 2012, as anomalias negativas observadas em fevereiro e março e as anomalias positivas observadas de abril a junho, estão de acordo com a síntese sinótica mensal elaborada por pesquisadores do Centro de Previsão e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE). Para o mês de fevereiro, por exemplo, Correa et al. (2012) assinalaram que “no geral, em grande parte do país, a chuva ficou abaixo do normal, com sinais significativos [e] as anomalias negativas, embora se apresentem todo o mês, apresentam sinais mais expressivos na primeira quinzena” (CORREA et al. 2012, p. 06). Os dados de precipitação registrados no cerrado corroboram esta afirmação, como pode ser observado na Figura 13.

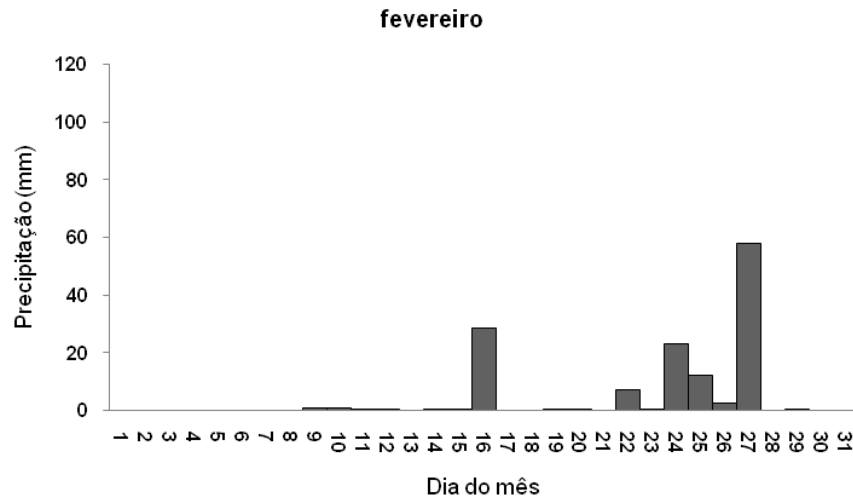


Figura 13 – Totais diários de precipitação registrados no cerrado em fevereiro de 2012.

Para os meses de abril, maio e junho, Correa e Sousa (2012) e Caroline e Sousa (2012) assinalaram que as chuvas nestes meses no sudeste do Brasil apresentaram anomalias positivas de precipitação, sendo a principal causa a atuação de sistemas frontais mais intensos. Para o mês de junho, por exemplo,

... houve anomalias positivas significativas entre o PR, SP e MS que passaram de 200 mm em curto período de tempo. Essas anomalias positivas são reflexos, principalmente do padrão observado pela passagem de cavados e de um sistema frontal na segunda quinzena (CAROLINE e SOUSA, 2012, p. 06)

Na Figura 14 tem-se a distribuição das chuvas nos três referidos meses (abril, maio e junho) de 2012.

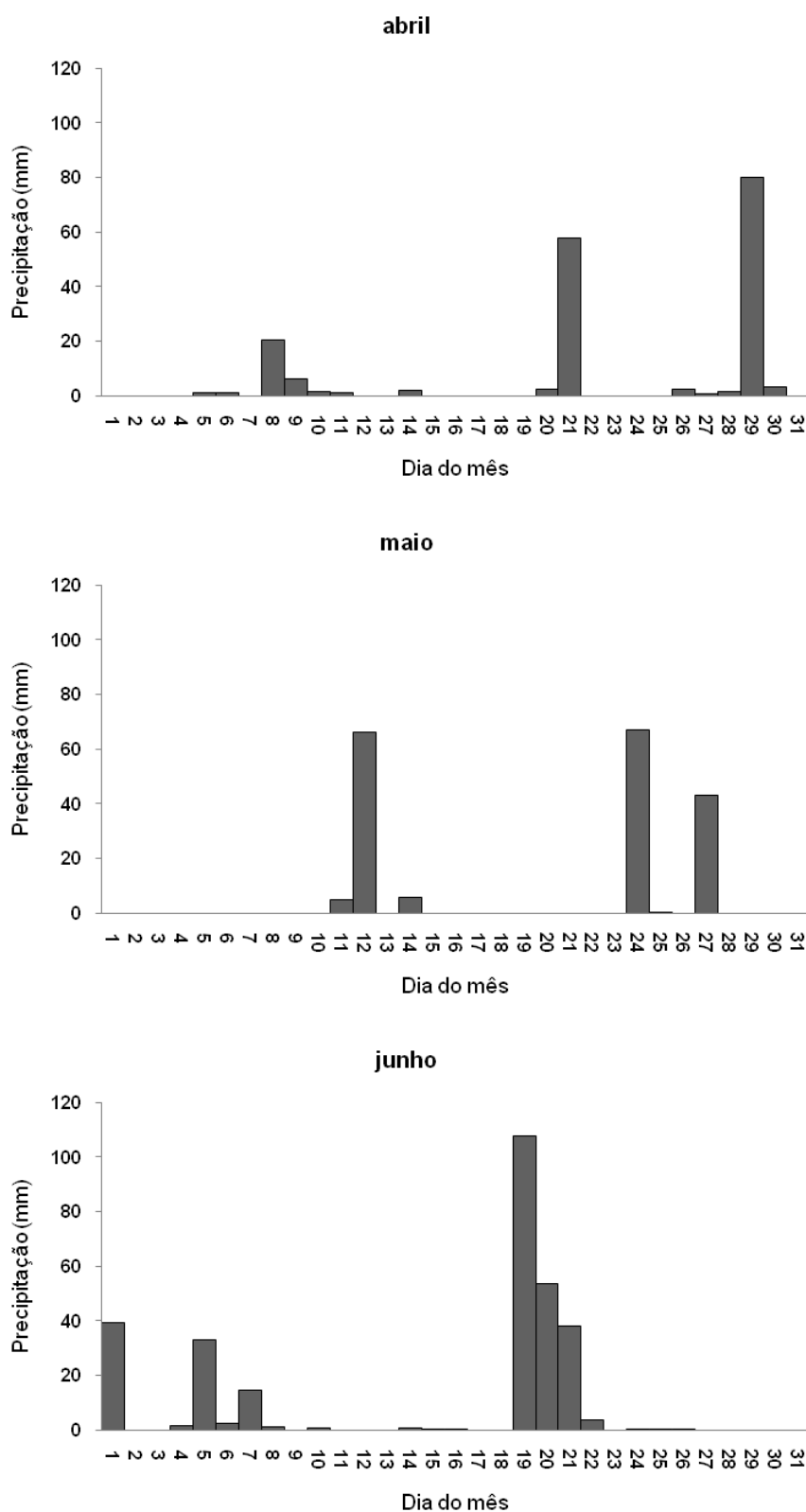


Figura 14 – Totais diários de precipitação registrados entre abril e junho de 2012 na “área antropizada” da Floresta Estadual de Assis.

No mês de setembro, a síntese sinótica elaborada por Sousa et al. (2012), aponta que na primeira quinzena as precipitações foram marcadas por padrões negativos ou mesmo dentro da normalidade. Entretanto, na segunda quinzena, o avanço sobre latitudes

menores de dois sistemas frontais entre os dias 21 e 26 contribuiu para que gerar instabilidade e chuvas fortes entre os estado de Mato Grosso do Sul e São Paulo. A Figura 15 mostra que as chuvas registradas no cerrado neste mês estão de acordo com as análises do CPTEC.

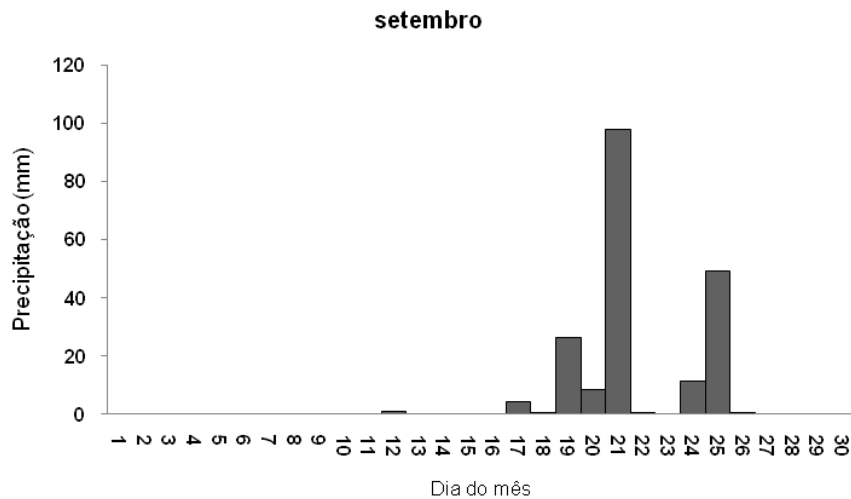


Figura 15 – Totais diários de precipitação registrados no mês de setembro de 2012.

Esta diferença observada no comportamento da precipitação ao longo dos dois anos analisados tem efeito sobre o comportamento das demais variáveis meteorológicas, bem como dos fluxos de energia e matéria.

5.1.2 Radiação Solar

Os maiores valores de radiação solar global ocorrem de outubro a março, principalmente nos meses de verão (dezembro a fevereiro), enquanto os menores valores são observados ao longo do período seco, principalmente nos meses de inverno (junho e julho). Esta variação é uma resposta ao ciclo anual de translação da Terra em torno do Sol (Figura 16).

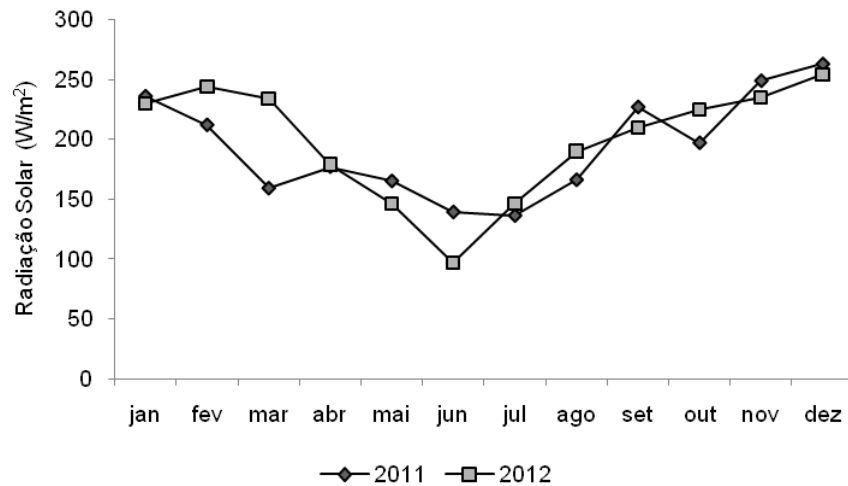


Figura 16 – Valores médios mensais da radiação solar observadas no cerrado nos anos de 2011 e 2012.

Em grande medida, a entrada de radiação é controlada pelas condições de nebulosidade. Assim, para o primeiro trimestre de 2012, sobretudo em fevereiro e março, meses em que, como foi observado, foram marcados por anomalias negativas de precipitação, a cobertura menor de nuvens contribuiu para que os valores observados neste período fossem maiores que os observados no mesmo período de 2011.

Da mesma forma, no segundo trimestre (abril a junho), dadas as chuvas mais frequentes em função dos sistemas frontais mais intensos, a maior cobertura de nuvens dificultou a entrada de radiação solar, de modo que os valores observados em 2012 foram menores que em 2011. Este diferencial influencia, por sua vez, os fluxos de energia.

5.1.3 Temperatura do ar e umidade relativa do ar

Seguindo o padrão anual da entrada de radiação, as temperaturas maiores foram observadas nos meses de verão e as menores foram observadas no inverno, quando também são influenciadas pela ação mais intensa de sistemas frontais de origem polar, bem como de sistema de alta pressão (anticiclones). Em 2011, o mês mais quente foi janeiro, cuja temperatura média mensal foi 23°C, ao passo que no mês mais frio, junho, a temperatura média mensal foi de 13°C. Já em 2012, o mês mais quente foi dezembro (25°C) e o mais frio foi julho (15°C) (Figura 17).

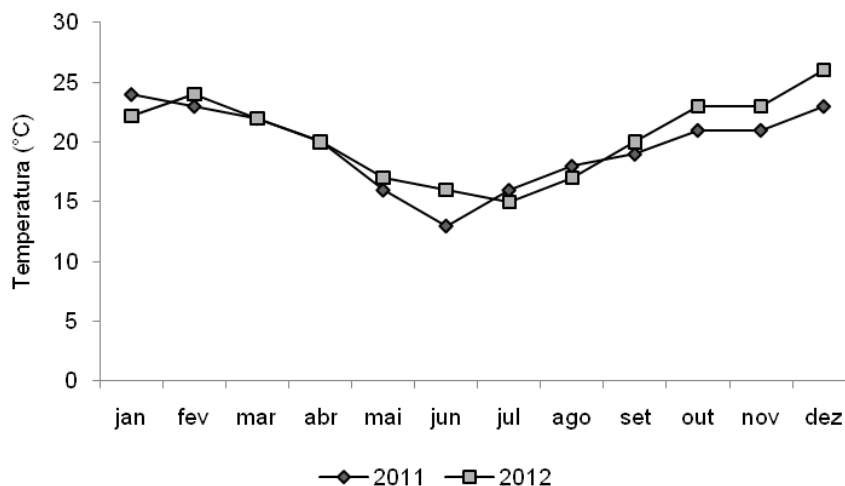


Figura 17 – Médias mensais de temperatura do ar observadas no cerrado em 2011 e 2012.

A umidade relativa, por sua vez, no ano de 2011 manteve valores altos (acima de 80%) ao longo do primeiro semestre, decaindo no início do segundo e atingindo os menores valores à medida que se intensificou o período seco (setembro foi o mês mais seco) e voltando a subir em seguida, com o retorno no período de chuvas a partir de outubro. Já em 2012, o comportamento da precipitação no primeiro semestre também influenciou a umidade relativa. No primeiro trimestre, os valores foram menores que no mesmo período de 2011, evidenciando a falta de chuvas. No segundo trimestre, as chuvas mais abundantes contribuíram para que os valores de umidade relativa se elevassem consideravelmente, sendo que em junho de 2012 a média mensal foi de 90%. Nos meses subsequentes estes valores decaíram ao longo do período seco e voltaram a subir a partir de outubro. Deve-se ressaltar que a partir de abril de 2012 as médias mensais de umidade relativa foram sempre maiores ou iguais aos valores observados no mesmo período de 2011 (Figura 18).

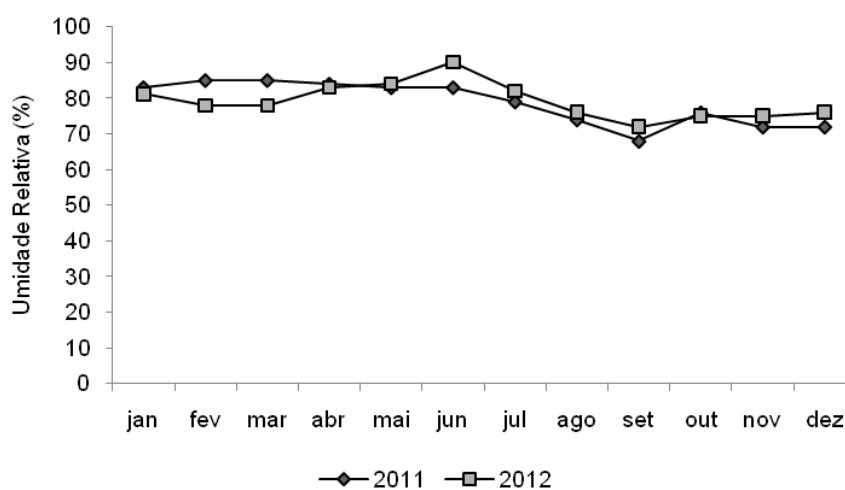


Figura 18 – Valores médios mensais da umidade relativa observada nos anos de 2011 e 2012 no cerrado.

No ano de 2011 as variáveis meteorológicas apresentaram um comportamento sazonal mais bem marcado do que em 2012, principalmente no que tange à chuva. Em 2011, ao longo do período seco, a ação de frentes frias e de anticiclones pós-frontais sobre a região do cerrado de Assis contribuiu para quedas mais marcadas na temperatura, além de inibir a formação de nuvens, aumentando, assim, as condições de estresse hídrico e térmico a que a vegetação esteve exposta. Em 2012 nos meses de transição do período úmido para o seco, a ação de sistemas frontais mais intensos colaborou para ocorrência de chuvas mais abundantes no período, garantindo uma disponibilidade hídrica maior para a vegetação.

O balanço hídrico normal mensal para os dois anos evidencia o déficit de água mais acentuado no ano de 2011. Em alguns meses do período seco a evapotranspiração é maior do que a precipitação (fato que assinala a deficiência hídrica), o que no ano de 2012 é observado com menor expressão (Figura 19).

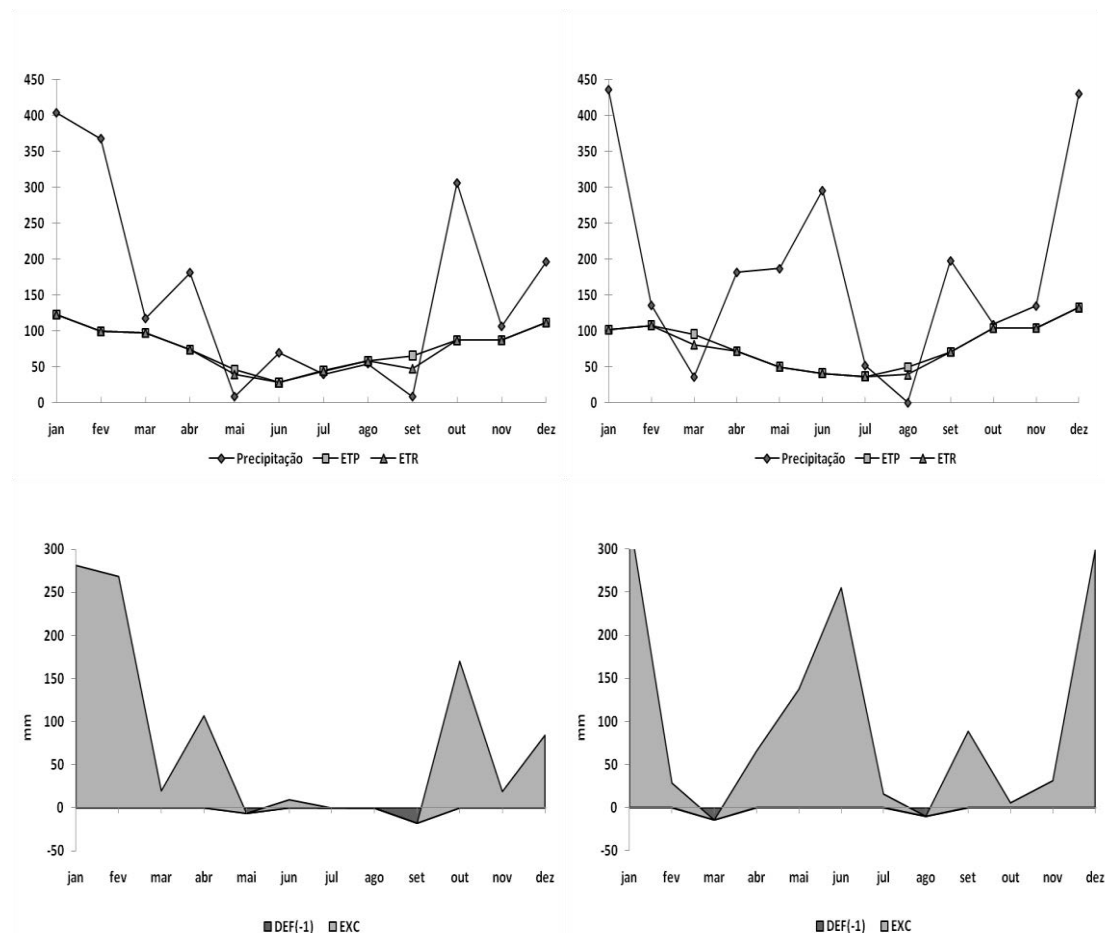


Figura 19 – Balanço hídrico normal mensal e seu extrato para os anos de 2011 e 2012, respectivamente, conforme método adotado por Rolim et al. (1998), baseado em Thornthwaite e Mather (1955).

Em condições ambientais distintas, no que tange a influencia que a vegetação sofre do tempo e do clima, tendo sua funcionalidade limitada por meio da oferta de energia, água

e variação na temperatura (TATSCH, 2006), a interação que existe na interface superfície/vegetação-atmosfera também se apresentou de maneira diferenciada, basicamente no que tange às trocas de calor (energia) e de CO₂ (massa) entre a cobertura vegetal e o ar adjacente a ela.

5.2 Variáveis meteorológicas II: comparações entre dois ambientes distintos

Alterações no uso do solo são diretamente responsáveis por mudanças no clima local (microescala) e também, dependendo do nível de alteração, no clima regional (mesoescala). Conforme Tatsch (2006, p. 01) ponderou em seu trabalho, “a urbanização, o desflorestamento, o monocultivo intensivo, ou de forma resumida, as práticas de uso da terra e da agricultura, podem controlar o clima local e potencialmente o clima regional (*sic*)”.

Isto se dá em grande medida porque a interceptação da radiação solar pela superfície é alterada, com efeitos diretos no comportamento das demais variáveis, tais como a temperatura e a umidade relativa do ar. A análise comparativa da radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa do ar e precipitação pluvial no cerrado e em uma área antropizada localizada nos limites da FEA mostram como o clima é diferenciado em função da cobertura vegetal distinta.

Na Figura 20 é possível observar que os valores médios mensais da radiação solar registrados no cerrado ao longo dos anos de 2011 e 2012, foram menores que aqueles registrados na área antropizada. A presença da vegetação que, neste caso, intercepta uma quantidade maior de energia solar no topo do dossel, além de utilizar boa parte desta energia em suas funções metabólicas (fotossíntese e evapotranspiração), contribui para este diferencial, somando-se a isso o maior sombreamento em superfície.

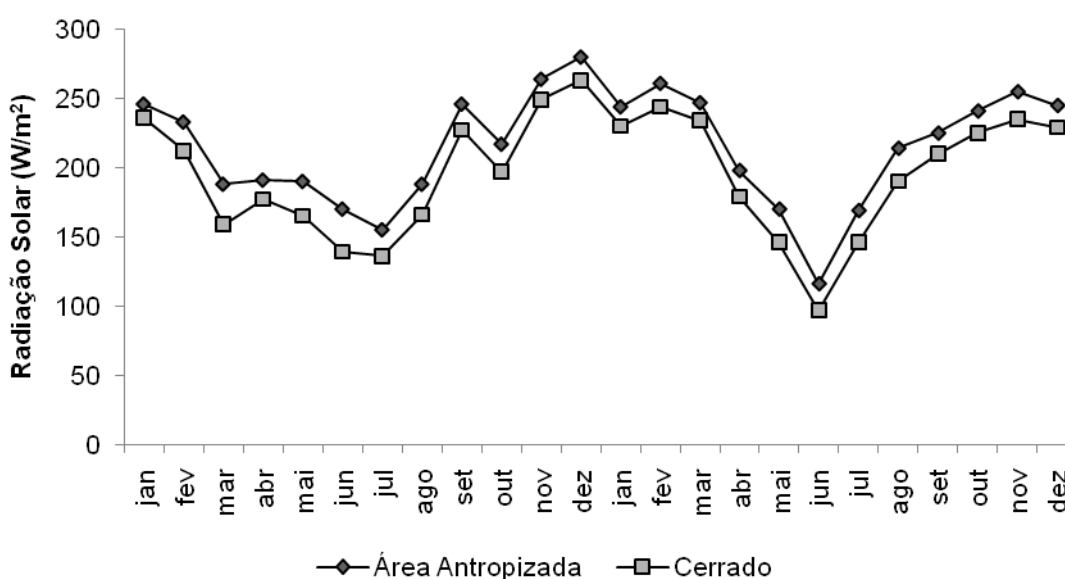


Figura 20 – Evolução anual da radiação solar no cerrado e na área antropizada nos anos de 2011 e 2012, com base nos valores mensais médios.

Como a temperatura em qualquer ponto da superfície depende diretamente da entrada de radiação solar, os valores médios mensais desta variável mostram que na área antropizada, ao longo dos dois anos analisados, a temperatura do ar foi sempre maior que a observada no cerrado (Figura 21). Como na área antropizada a radiação solar incide sobre a superfície com maior intensidade, pois nesta área não há vegetação capaz de interceptar uma quantidade maior desta energia, causando sombreamento, a temperatura registrada neste ponto é “naturalmente” maior que a observada no cerrado.

No caso da temperatura é válido ressaltar também que é durante o período seco (inverno) que aumenta a amplitude entre os valores observados no cerrado e na área antropizada. Isto permite inferir que somada a menor incidência de radiação solar neste período, o sombreamento causado no cerrado pela vegetação contribui para que a temperatura registrada seja menor ainda.

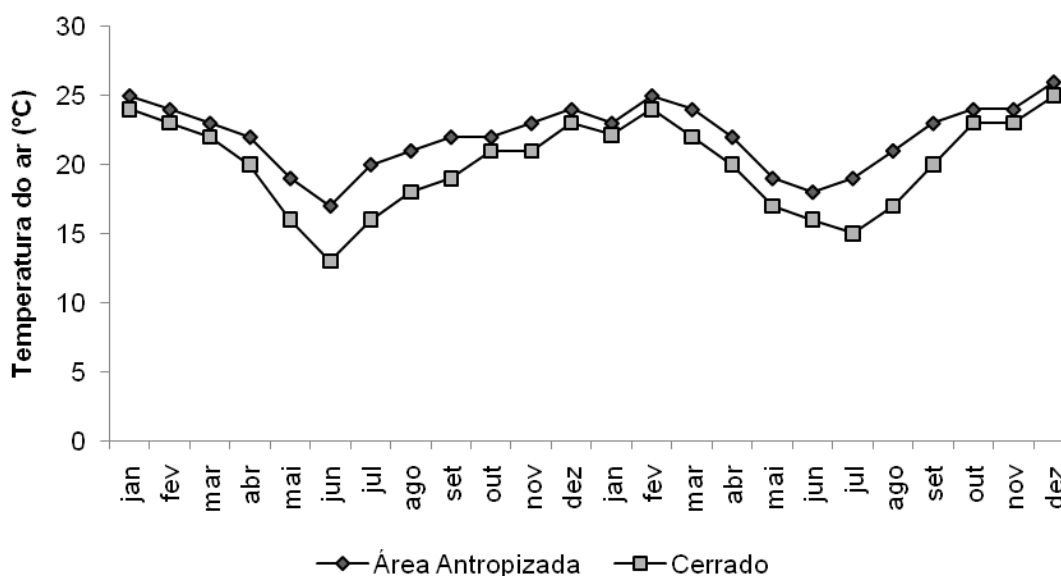


Figura 21 – Temperaturas médias mensais para os anos de 2011 e 2012 registradas na área antropizada e no cerrado.

Na umidade relativa do ar os valores médios mensais registrados no cerrado foram maiores do que na área antropizada, ao longo de todo o período analisado (Figura 22). Isto se deve, além das temperaturas menores que favorecem a condição de maior umidade relativa, ao fato de que a vegetação, pelo processo de evapotranspiração é fonte de umidade para a atmosfera (mesmo no período seco). Outro fato que deve ser observado no caso da umidade relativa do ar é que ela varia conforme a disponibilidade hídrica, ou seja, de acordo com o regime de precipitação.

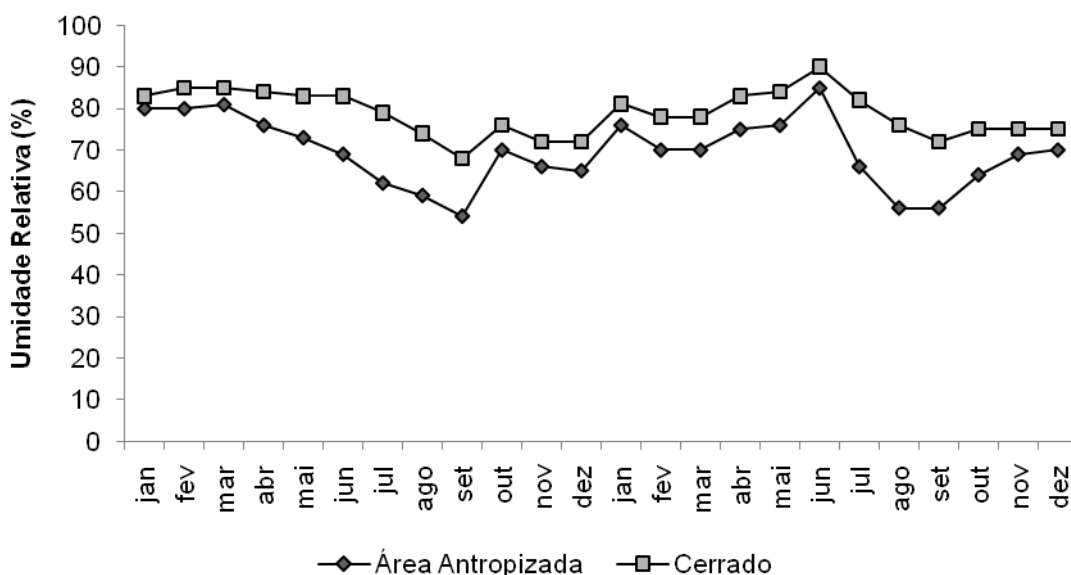


Figura 22 – Evolução anual da umidade relativa para os anos de 2011 e 2012 no cerrado e na área antropizada, com base nos valores mensais médios.

As chuvas também apresentaram regime diferenciado entre o cerrado e a área antropizada. Embora em ambos os casos pode ser observado um comportamento similar ao longo do tempo, no cerrado sempre foram registrados os maiores acumulados (Figura 23), fato que se pode associar à formação de células de chuva localizadas, formadas por padrões termodinâmicos alimentados pela maior evapotranspiração da vegetação do cerrado.

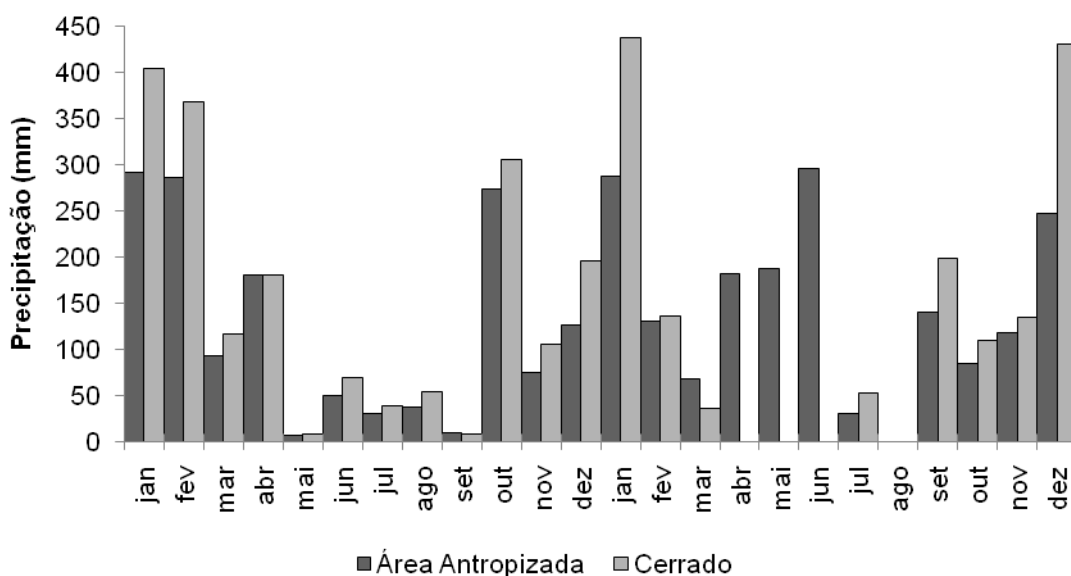


Figura 23 – Acumulados totais mensais de chuva registrados no cerrado e na área antropizada nos anos de 2011 e 2012.

5.3 Balanço de energia no cerrado

O balanço de energia depende em grande parte da entrada da energia proveniente da radiação solar, além de outros fatores como a disponibilidade hídrica do ambiente e as condições fenológicas e estruturais da vegetação, por exemplo. A associação entre a radiação solar incidente e a energia disponível no ambiente (radiação líquida) foi marcada, com coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,93 (Figura 24). Assim, a variação do saldo de radiação, R_n (bem como dos demais componentes do balanço de energia) seguiu a sazonalidade apresentada pela radiação solar.

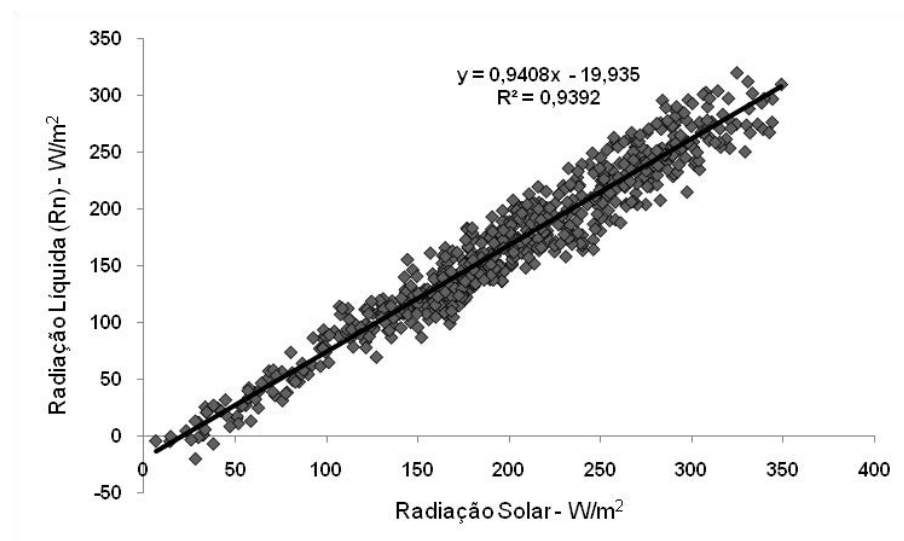


Figura 24 – Relação entre a radiação solar incidente e a radiação líquida, que representa a energia disponível no ambiente para realização de processos biofísicos. Os valores representam as médias horárias dos dois anos analisados (2011 e 2012).

Com base na equação geral, $R_n = H + LE + G + P + \Delta S$, considerando que os fluxos de calor latente (LE) e calor sensível (H) podem corresponder a 90 % da energia disponível no sistema para processos biofísicos (BENEZOLI e IMBUZEIRO, 2011), sendo os outros 10 % correspondentes aos fluxos de calor no solo (G), fotossíntese (P) e armazenamento na biomassa (ΔS), os quais não foram medidos neste trabalho. Através da análise de regressão, averiguou-se quanto da energia total disponível foi utilizada para evapotranspiração (LE) e aquecimento do ar (H), somados.

Para ambos os anos o coeficiente de correlação (R^2) foi considerável, sendo os respectivos valores obtidos de $R^2=0,81$, para 2011 e $R^2=0,75$, para 2012 (Figura 25). Logo, é possível determinar que no cerrado, em Assis efetivamente a maior parte da energia disponível no sistema para a realização de processos biofísicos é utilizada para mudança de estado da água e aquecimento do ar. Por isso, as análises se pautaram na avaliação destes três principais componentes do balanço de energia (R_n , LE e H) e sua evolução ao longo de todo período, ou seja, com base na série de dois anos de dados e, após, visto

separadamente, ano a ano, buscando demonstrar como a variabilidade climática influencia no estado da cobertura vegetal e, por sua vez, também influencia nos fluxos de calor.

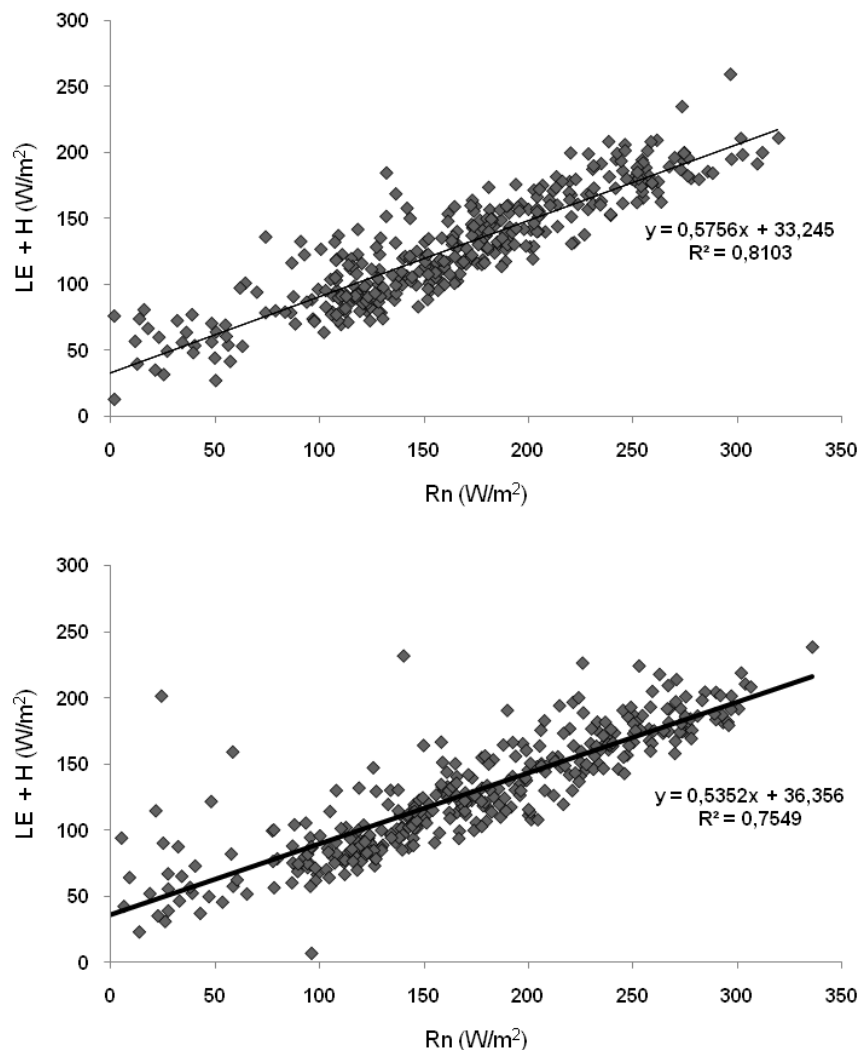


Figura 25 – Correlação entre a energia disponível no sistema e os fluxos de calor latente (LE) e calor sensível (H) somados, para os anos de 2011 e 2012, respectivamente. Os dados referem-se às médias diárias de cada ano.

Os valores máximos de Rn ocorrem durante o verão e os mínimos durante o inverno. Ao longo dos dois anos analisados, em dezembro foi registrado a maior média de Rn (235 W/m^2), mês de transição entre primavera e verão, quando a entrada de radiação solar passa a ser maior e a quantidade menor de chuvas/nebulosidade, se comparado aos demais meses do verão, contribuem para que haja maior disponibilidade de energia no ambiente. Já a menor média mensal foi registrada em junho (92 W/m^2), Figura 26.

Ainda na Figura 26 têm-se os valores médios mensais dos fluxos de calor latente (LE) e calor sensível (H) em todo o período analisado. Em geral, o fluxo de LE predomina sobre o fluxo de H durante todo o período, principalmente nos meses do período úmido e de transição úmido-seco, isso se deve a disponibilidade hídrica e a evapotranspiração que

tendem a acompanhar a disponibilidade de energia radiativa. A maior média mensal de LE também foi em dezembro (129 W/m^2) e a menor em julho (58 W/m^2).

O fluxo de calor sensível (H), por sua vez, teve os menores valores registrados durante o período úmido e os maiores no período seco. Ocorreu, portanto um gradativo aumento, à medida que a disponibilidade hídrica diminuiu e sendo mais intenso no final da estação seca. A maior média mensal de H foi registrada em setembro (56 W/m^2) e a menor em abril (18 W/m^2).

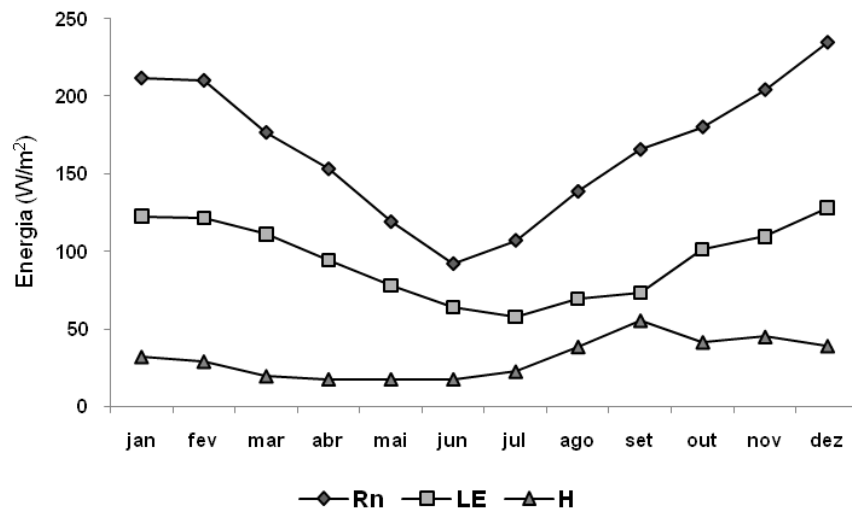


Figura 26 – Evolução mensal dos principais componentes do balanço de energia. Os valores representam as médias mensais para os dois anos analisados, 2011 e 2012.

A evolução diária de Rn, LE e H também mostra esta variação sazonal, com os menores valores sendo registrados durante o período seco. Na Figura 27 é possível visualizar também que a variabilidade do ciclo diurno dos componentes do balanço de energia é limitada pela intensidade da radiação solar, sendo os valores máximos atingidos próximos ao meio dia e os valores mínimos entre o anoitecer e o amanhecer. No período úmido o valor máximo de Rn registrado ao meio-dia foi de 762 W/m^2 , ao passo que no período seco, o valor máximo no mesmo horário foi de 655 W/m^2 . Os picos dos fluxos de calor, por sua vez, foram registrados entre as 12 e 14 horas. Os valores máximos de LE nos períodos úmido e seco foram, respectivamente, 337 W/m^2 e 232 W/m^2 , ambos registrados às 13 horas. O fluxo de H, por sua vez, teve seus picos de 163 W/m^2 ao meio dia na estação úmida e 152 W/m^2 às 13 horas da fase seca.

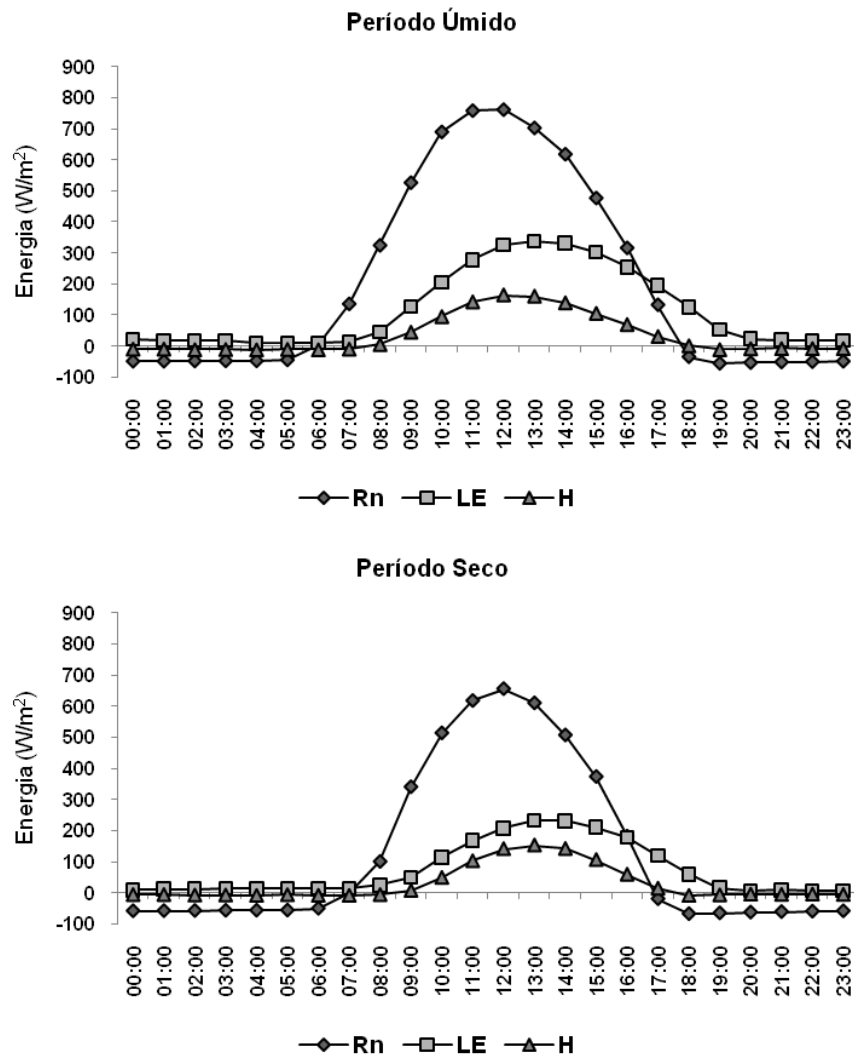


Figura 27 – Evolução do ciclo diário dos componentes do balanço de energia (Rn, LE e H) para cada período climático, com base na média mensal horária.

A observação do ciclo diário dos fluxos de calor permite ainda apontar que é o fluxo de calor latente que mais sofre diminuição ao longo do ano, já que além da incidência de radiação solar, sua evolução também depende de outros parâmetros biofísicos do ambiente como, por exemplo, a disponibilidade hídrica e o metabolismo da vegetação que, por sua vez, é grandemente influenciada pelas condições climáticas. Os valores positivos de LE durante à noite, em ambos os períodos, também permitem apontar a continuidade dos processos de evapotranspiração (principalmente nas primeira horas da noite, no período úmido), mesmo após cessar incidência de radiação solar e a disponibilidade de energia no ambiente, Figura 28.

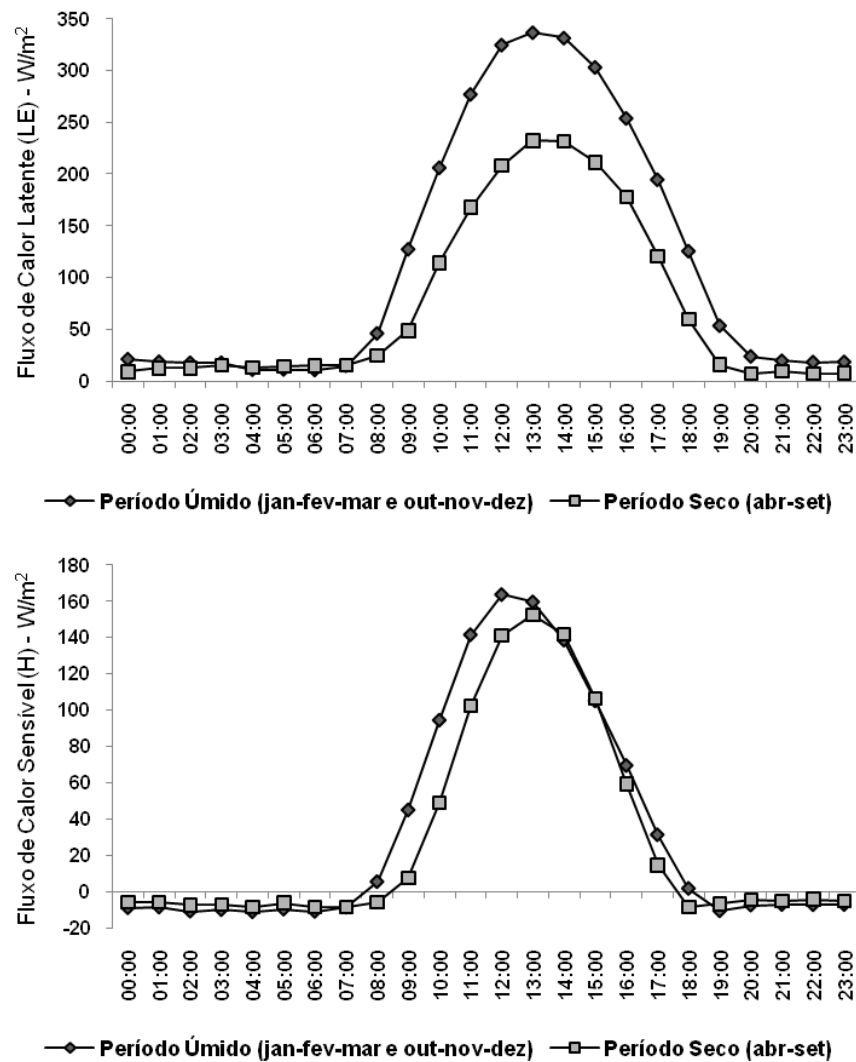


Figura 28 – Evolução do ciclo diário dos fluxos de calor latente e de calor sensível para cada período climático, com base na média mensal horária.

Rocha et al. (2002) e Tannus (2005) reportaram um comportamento similar do particionamento do balanço de energia em outra área com remanescente de cerrado no estado de São Paulo. Miranda et al. (1997) também identificaram esta sazonalidade no cerrado do Brasil Central e Andrade et al. (2009) também identificaram este mesmo comportamento em uma área de transição entre a Floresta Amazônica e o cerrado, no estado de Mato Grosso.

Como já mencionado anteriormente, além da incidência de radiação solar, parâmetros como o clima local e a situação da cobertura vegetal também influenciam grandemente no balanço de energia. No caso do cerrado *sensu-stricto* analisado por Tannus (2005), o autor considerou que tanto a redução do fotoperíodo quanto o estresse hídrico condicionaram a redução da evapotranspiração e da fotossíntese, influenciando os fluxos atmosféricos de energia e massa que apresentaram forte variação sazonal.

No caso do cerrado em Assis, esta variabilidade sazonal e a influências das condições hídricas e térmicas do ambiente sobre o balanço de energia são mais evidentes,

considerando-se as séries de dados são analisadas separadamente ano a ano. Como observado anteriormente, o padrão sazonal das variáveis meteorológicas (precipitação, radiação solar, temperatura do ar e umidade relativa) foi mais evidente no ano de 2011 do que em 2012, quando foram registradas anomalias.

Couto (2009), quando estudou a interação biosfera-atmosfera em outro remanescente de cerrado em São Paulo, pontuou que:

... 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 [...]. A vegetação enfrenta também, a intrusão de massas de ar frio durante o inverno, proporcionando condições de temperaturas baixas extremas (inferiores a 10°C). (COUTO, 2009, p. 23).

Conforme a análise das variáveis meteorológicas mostrou, no ano de 2011 o cerrado de Assis esteve em condições similares às descritas acima. Além da baixa disponibilidade hídrica, entre os meses de julho e agosto a vegetação sofreu com a ocorrência de geadas, como a que foi reportada pela previsão feita pelo Centro de Previsão e Estudos Climáticos (CPTEC) em seu boletim técnico do dia 04 de agosto, cujo trecho é transcrito abaixo.

Hoje (04/08) e na sexta-feira (05/08) a temperatura ainda estará bastante baixa no centro-sul do país, devido a atuação do anticiclone pós-frontal, além disso, a atmosfera voltará a estabilizar, o que favorece forte perda radiativa noturna, assim fará com que as mínimas cheguem a zero grau, com registro de mínimas negativas em algumas áreas da região Sul do Brasil, como ocorreu hoje. Ainda haverá chance de geada, inclusive, na Serra da Mantiqueira e no *Vale do Paranapanema* e em grande parte da região Sul (CENTRO DE PREVISÃO E ESTUDOS CLIMÁTICOS, 2011, grifo nosso).

Em trabalho de campo no cerrado, no dia 08 de agosto de 2011 constatou-se os efeitos da geada na estrutura da vegetação. Nas fotos a seguir (Figura 29) é possível observar a situação da vegetação, antes e depois da ocorrência da geada, evidenciando a perda da área foliar. As fotos foram tiradas, respectivamente, em 24 de março e 16 de junho (fotos acima) e 08 de agosto de 2011 (fotos abaixo), após a geada.



Figuras 29 – Fotos do cerrado tiradas em diferentes épocas do ano, em 2011.

Assim, em 2011, à medida que se intensificava o período seco, marcado por estresses hídrico e térmico, o fluxo de calor sensível (H) aumentou a ponto de ser maior que o fluxo de calor latente (LE) no mês de setembro, o que não ocorreu em 2012, embora se tenha registrado também um aumento do fluxo de H nos últimos três meses do período seco (Figura 30).

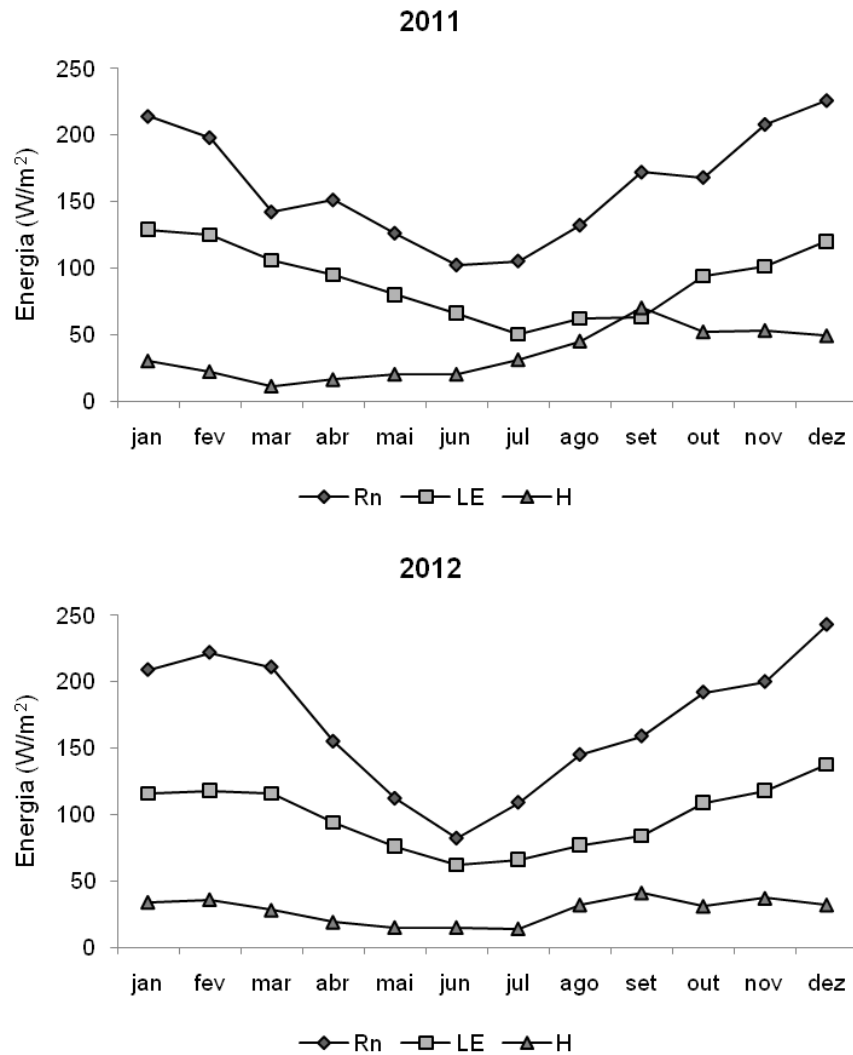


Figura 30 – Valores médios mensais dos três principais componentes do balanço de energia observados no cerrado em 2011 e 2012.

Este mesmo comportamento pode ser observado através dos gráficos de dispersão, nos quais é possível estabelecer uma relação entre a energia disponível no sistema (Rn) e os fluxos de calor (LE e H). Na Figura 31, percebe-se que há uma diminuição sazonal dos fluxos de calor, especificamente em 2011 os valores de H superpõem-se aos de LE nos trimestre junho-agosto-setembro (JAS), o mais seco frio do ano.

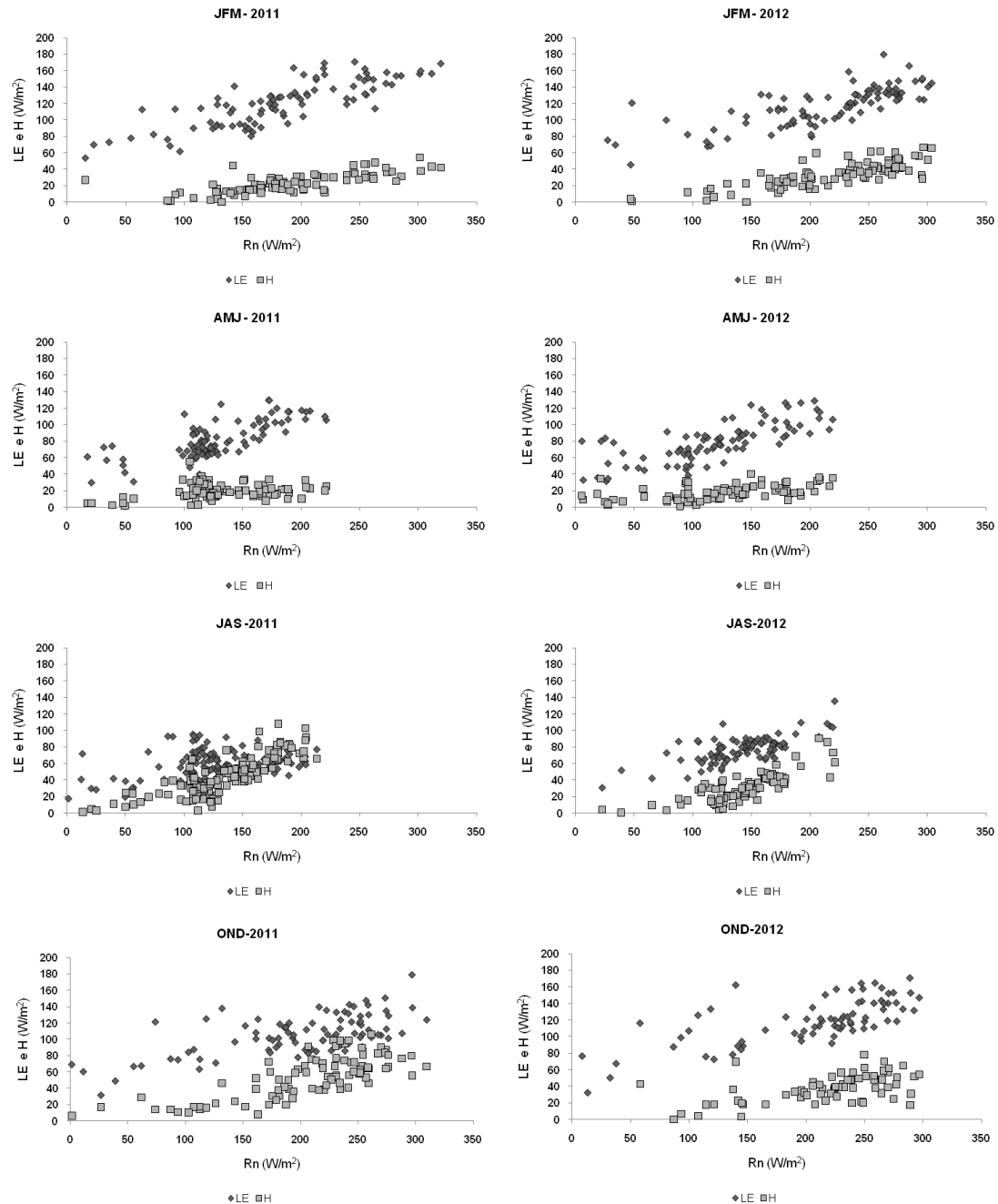


Figura 31 – Relação entre o saldo de radiação (R_n) e o fluxos de calor latente (♦) e o fluxo de calor sensível (■), a partir dos dados mensais organizados por trimestre.

Valendo-se das razões H/LE (razão de Bowen - β), LE/R_n (razão evapotranspirativa) e H/R_n (razão de aquecimento do ar), que são outros indicativos do particionamento de energia no ambiente e de como as condições hídricas afetam este particionamento, tem-se os resultados mostrados na Figura 32, em que é possível observar como os últimos três meses do período seco de 2011 foram mais severos, no que tange à água disponível, já que houve considerável aumento da razão de Bowen (cujos valores são mais altos em ambientes com falta de água), bem como o fato de a razão H/R_n ser maior que LE/R_n em setembro deste mesmo ano.

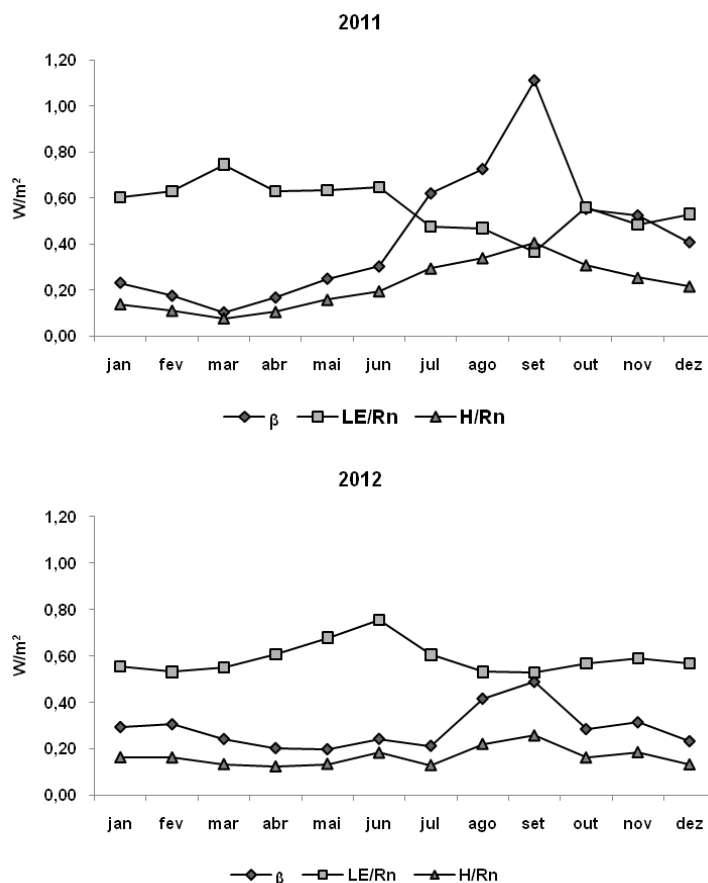


Figura 32 – Valores médios mensais da partição dos componentes do balanço de energia para os anos de 2011 e 2012 no cerrado.

Assim, tanto as condições climáticas e hídricas do ambiente quanto a cobertura vegetal influenciaram em grande medida o fluxo de calor no cerrado, com maior intensidade no ano de 2011, o que torna possível determinar também que além das condições climatológicas (entrada de radiação e precipitação, por exemplo), a vegetação também possui controle sobre as trocas de energia e exerce papel de destaque no equilíbrio térmico da atmosfera (OLIVEIRA et al. 2001).

Com base na variação das variáveis meteorológicas e do balanço de energia, é possível detectar qual período foi mais favorável e/ou crítico ao desenvolvimento da vegetação. No caso, o período mais crítico foi durante o período seco de 2011. A partir disso, faz-se a análise do fluxo de CO_2 , atentando para o fato de que em condições hidroclimatológicas desfavoráveis, a vegetação diminui sua atividade fisiológica influenciando diretamente nas trocas de carbono existente na interface vegetação-atmosfera.

5.4 Fluxo de CO_2

Medidas de fluxo de CO_2 no cerrado foram reportadas por Miranda et al. (1997), Rocha et al. (2002) e Tannus (2004), que mostraram a existência de um comportamento sazonal deste tipo de fluxo, sendo que durante o período de chuvas (e com condições

favoráveis ao desenvolvimento da vegetação) há uma maior assimilação de carbono atmosférico pelo ecossistema. Por sua vez, no período seco, sob condições de estresse hídrico e térmico, o ecossistema diminui sua taxa metabólica assimilando uma quantidade menor de carbono da atmosfera ou mesmo emitindo CO_2 .

Meirelles et al. (2006; 2007), também reportaram em seus trabalhos a sazonalidade do fluxo de carbono, atrelando este fenômeno às diferentes condições hídricas observadas ao longo do ano, especialmente no que tange à altura do lençol freático já que, neste caso, as análises se concentraram em uma área em que predomina a fisionomia de campo limpo úmido de cerrado. Aguiar (2005) reporta um comportamento similar numa floresta tropical no sudoeste da Amazônia.

Por convenção, valores negativos indicam fluxo de carbono da atmosfera para a vegetação (assimilação de CO_2) e valores positivos indicam fluxo na direção oposta, isto é, da vegetação para a atmosfera, logo, emissão de CO_2 . As medidas realizadas neste trabalho também mostraram um comportamento sazonal (Figura 33), sendo esta sazonalidade mais bem marcada no ano de 2011 (como também se observou com os fluxos de calor). Nos meses de julho, agosto e setembro de 2011, dadas as baixas na disponibilidade hídrica e na temperatura, a redução das atividades fisiológicas das plantas (fechamento dos estômatos) e a perda de área foliar (senescência natural e forçada pela ocorrência de geadas), o cerrado emitiu carbono para a atmosfera, voltando a assimilar em outubro (quando do retorno das chuvas).

Em 2012, por sua vez, ainda conforme as médias mensais mostradas (Figura 33) houve o predomínio da assimilação do carbono atmosférico pela vegetação (valores negativos), embora este processo tenha diminuído (aparentemente) entre os meses de setembro e outubro (evidenciando, provavelmente, o tempo de tolerância do sistema às condições hídricas observadas no mês de agosto).

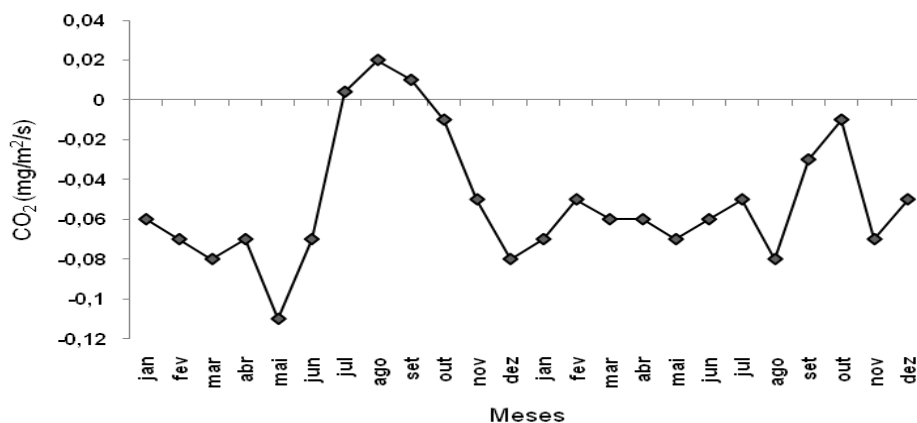


Figura 33 – Evolução anual do fluxo de CO_2 observado no cerrado, com base na média mensal, de janeiro de 2011 a dezembro de 2012.

Esta sazonalidade também pode ser observada por meio da evolução do ciclo diário do fluxo de CO_2 . Na Figura 34, tem-se a evolução diária do fluxo de CO_2 organizados por período climático, considerando os dados de todo o período analisado (de janeiro de 2011 a dezembro de 2012). É possível perceber a diminuição da assimilação de carbono pela vegetação durante o período seco. Também é possível apontar que há uma atividade metabólica maior no ecossistema durante o período úmido, não apenas pela maior assimilação, mas também pela emissão noturna (valores positivos) que indicam, além de um processo de respiração mais intenso, uma atividade microbiana mais ativa na decomposição de serrapilheira, que atua como fonte de carbono atmosférico durante a noite.

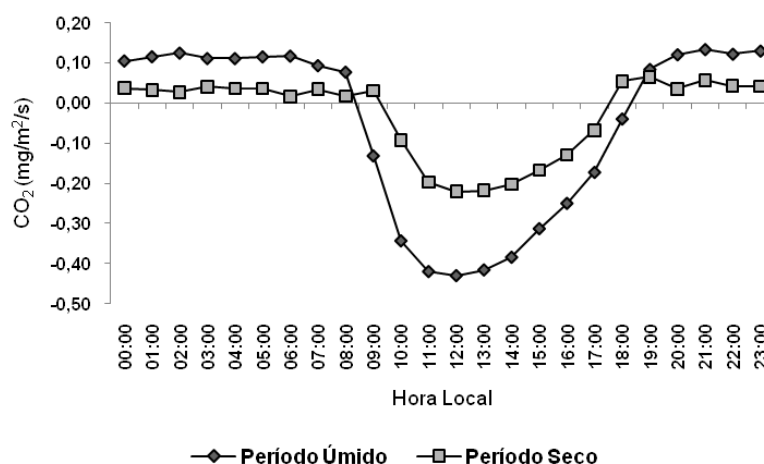


Figura 34 – Ciclo diário do fluxo de CO_2 dividido por períodos climáticos.

Quando o ciclo diário do fluxo de CO_2 é organizado por trimestre nota-se uma diminuição considerável do fluxo negativo, que denota assimilação de carbono pelos ecossistemas durante o período seco e de inverno. Na Figura 35 é possível perceber que no trimestre julho-agosto-setembro é quando ocorre a menor assimilação de carbono atmosférico, sobretudo no ano de 2011, como já mencionado anteriormente.

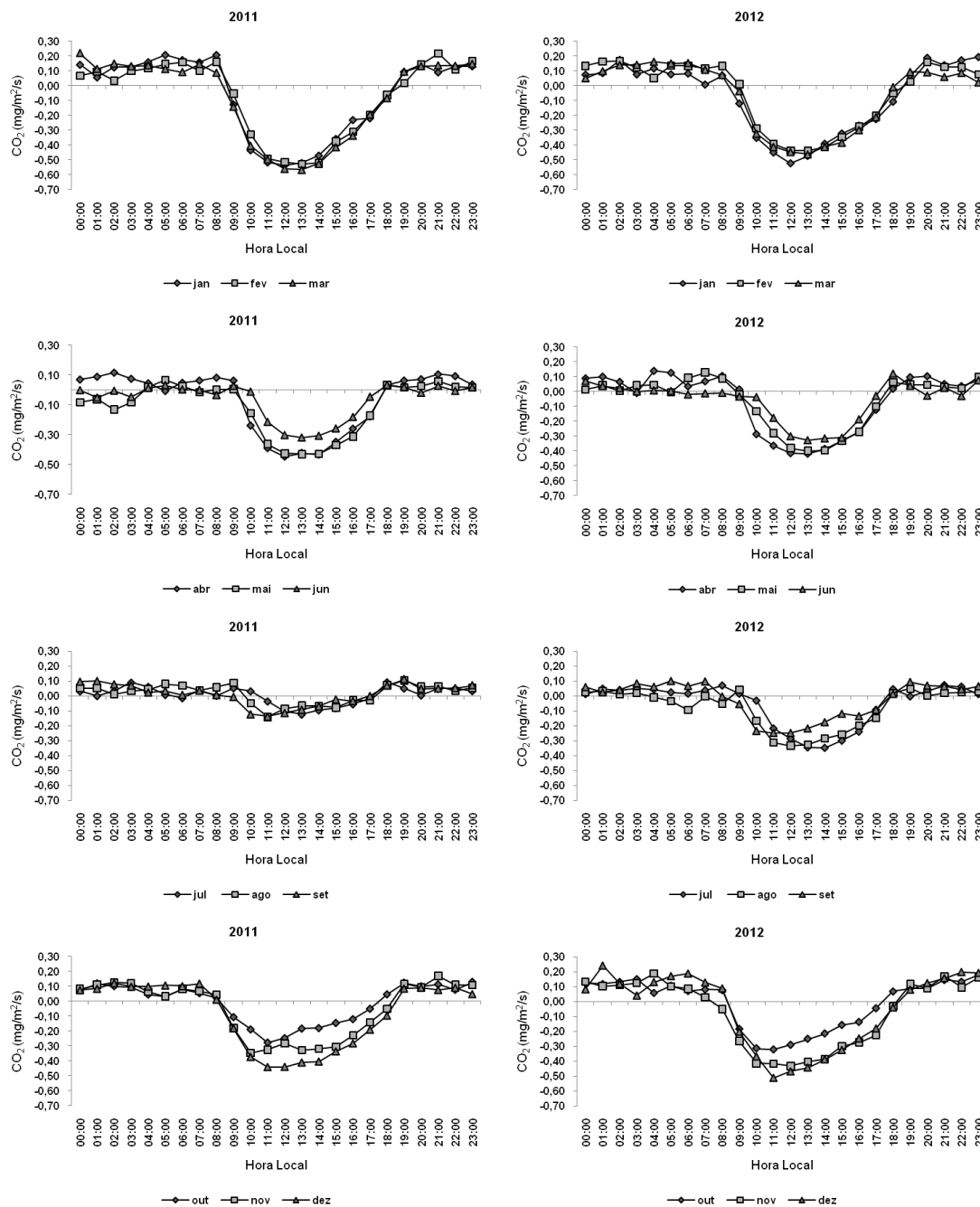


Figura 35 – Evolução diária, com base nas médias mensais horárias, do fluxo de CO₂ no cerrado organizada por trimestre para os anos de 2011 e 2012.

Os valores médios diários do fluxo de CO₂, juntamente com os valores médios diários de temperatura e totais diários de precipitação, também mostram que durante o período seco de 2011 (nos meses de julho, agosto e setembro) houve um predomínio dos valores positivos do ciclo de carbono (emissão), enquanto em 2012 predominaram os valores negativos (absorção), sendo os valores positivos observados (mas sem grande expressão) no início do período chuvoso (em outubro), o que pode denotar um atraso na resposta do ecossistema às condições de estresse ocorridas em agosto e na primeira quinzena de setembro (quando a ocorrência de chuvas foi nula) (Figuras 36 e 37).

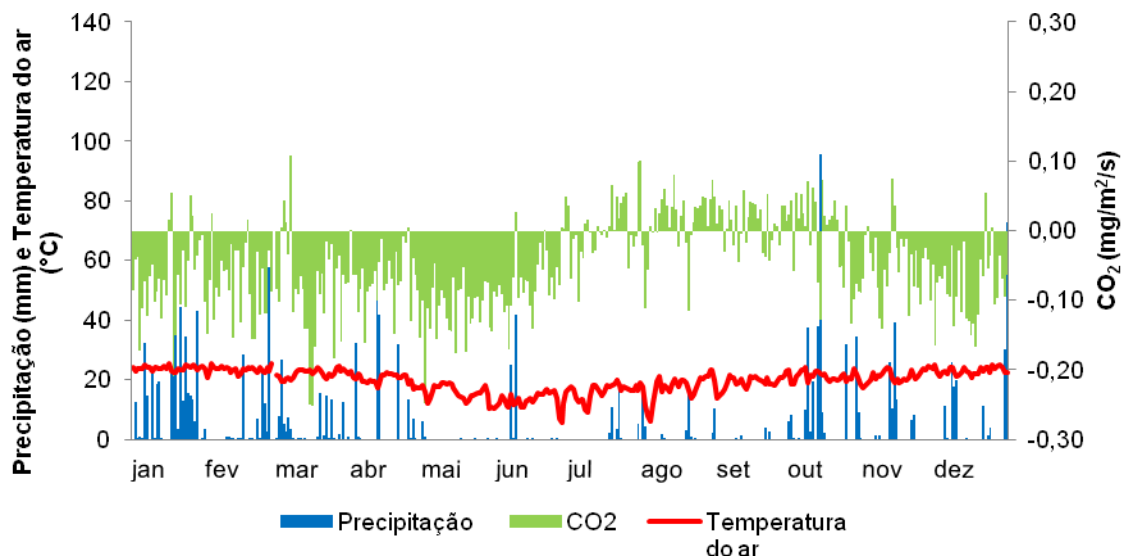


Figura 36 – Fluxo médio diário de CO₂, temperatura média diária e total diário de precipitação, no cerrado em 2011.

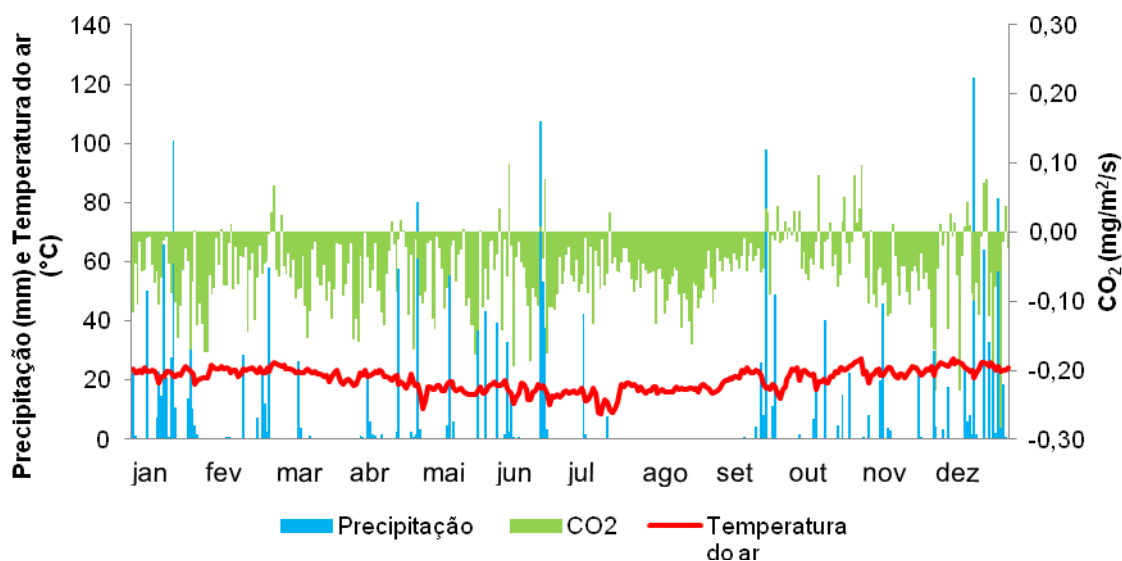


Figura 37 – Fluxo médio diário de CO₂, temperatura média diária e total diário de precipitação, no cerrado, em 2012.

A Figura 37 permite apontar também, ainda que subjetivamente, que apesar de predominarem os fluxos positivos entre julho e setembro de 2011, seus valores não são tão expressivos, ao se comparar aos valores de absorção (negativos). Portanto, a baixa emissão é compensada pela absorção predominante na maior parte do ano, de modo que se pode dizer que o cerrado, em Assis, possui boa capacidade de alocação de carbono atmosférico.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora o clima no município de Assis apresente-se tipicamente tropical, com uma sazonalidade bem marcada, o monitoramento de variáveis meteorológicas ao longo de dois anos na Floresta Estadual de Assis permitiu observar que a variação de um ano para outro nem sempre obedece a este padrão, como se observou neste trabalho. O ano de 2011 apresentou uma sazonalidade mais marcada do que 2012, quando foram registradas anomalias positivas de chuva, no período de transição entre os períodos úmido e seco (de abril a junho).

Além disso, ao se monitorar variáveis climáticas em duas áreas com condições ambientais distintas percebe-se que o comportamento das variáveis meteorológicas também se apresentam diferenciadas. A cobertura vegetal apresentou-se como importante reguladora do microclima, de modo que no cerrado, com a vegetação mais densa há maior sombreamento e, portanto, menor incidência de radiação em superfície, temperaturas menores e umidade relativa mais elevada que na área antropizada. Além disso, os volumes de chuva registrados no cerrado sempre foram maiores, o que denota o papel da vegetação como importante fonte de vapor de água para a atmosfera que, em condições propícias de convecção local contribuiu para formação de células de chuva localizadas sobre a área de preservação da estação ecológica.

Os fluxos de energia, ao longo dos dois anos analisados, apresentaram uma variabilidade sazonal, em grande parte influenciada pela variação na entrada de radiação solar, mas, também, pelas condições ambientais distintas ao longo do ano, sobretudo no que tange à disponibilidade hídrica e atividade metabólica da vegetação, a qual é mais intensa durante o período úmido (primavera-verão). Percebeu-se que ao longo do ano, o fluxo de calor latente (LE) é maior no período úmido e menor no período seco, sendo o inverso verdadeiro para o fluxo de calor sensível (H). A sazonalidade climática mais bem marcada em 2011 pode ser sentida também nos fluxos de calor, de modo que em parte do período seco deste ano uma parcela maior da energia disponível no ambiente foi utilizada para aquecer a atmosfera (H).

No caso do fluxo de CO_2 , também é possível perceber uma sazonalidade, de modo que há maior absorção de carbono atmosférico durante o período chuvoso, quando há condições mais favoráveis ao desenvolvimento da vegetação. Durante o período seco há uma menor assimilação, quando a vegetação sofre tanto pelo estresse hídrico quanto térmico. Também neste caso, o ano de 2011 também apresentou uma sazonalidade mais marcada, sendo que no período de junho a agosto o cerrado emitiu ou simplesmente deixou de assimilar carbono, aumentando sua quantidade na atmosfera. Para todos os casos de fluxo, o ano de 2012 não apresentou uma variabilidade sazonal tão expressiva.

Assim, é possível apontar que, sob condições estressantes durante o período seco, a vegetação do cerrado em Assis pode atuar como emissor de carbono para a atmosfera,

muito embora, aparentemente, a quantidade emitida é compensada ao longo do ano pelo predomínio da absorção. Deste modo, é possível afirmar, ainda que forma preliminar, que o cerrado em Assis é um sumidouro de carbono e, no atual contexto em que se discute o aquecimento global decorrente do aumento de CO₂ na atmosfera, esta área de conservação adquire uma nova função ecológica, o que eleva ainda mais a necessidade de sua preservação e ampliação de sua área. Baseando-se na capacidade de absorção de carbono atmosférico, que este remanescente apresentou, é possível inferir que se trata de uma vegetação nova, que não alcançou seu clímax (equilíbrio) e mantém seus processos metabólicos e de crescimento ainda em plena atividade.

Se, futuramente, for descartado completamente o aquecimento global de origem antropogênica, ainda assim trabalhos que busquem estudar a interação biosfera-atmosfera por métodos micrometeorológicos são importantes, pois podem auxiliar na condução do manejo adequado de unidades de conservação, bem como dos recursos naturais como um todo, tendo em vista a compilação de políticas públicas e ambientais que assegurem a sustentabilidade na forma que a sociedade se aproprie da natureza, sendo conduzida de maneira racional e socioambientalmente justa.

Ressalta-se, também, que a continuidade das medidas é fundamental para que no futuro se possa estudar com mais clareza a interação que há entre a vegetação do cerrado e a atmosfera e o aprimoramento no tratamento dos dados de modo que ao longo do tempo se adquira maior capacidade de interpretação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AB'SÁBER, A. N. Nos vastos espaços dos Cerrados. In: _____. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. São Paulo: Atêlie Editorial, 2003, p. 35-43.
- ADUAN, R. E.; VILELA, M. F.; KLINK, C. A. **Ciclagem de carbono em ecossistemas terrestres: o caso do cerrado brasileiro**. Planaltina/DF: Embrapa Cerrados, 2003, 30 p.
- AGUIAR, R. G. **Fluxos de massa e energia em uma floresta tropical no sudoeste da Amazônia**. 2005. 59 f. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) – Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá/MT, 2005.
- ANDRADE, N. L. R.; AGUIAR, R. G.; SANCHES, L.; ALVES, E. C. R. F.; NOGUEIRA, J. S. Partição do saldo de radiação em áreas de floresta amazônica e floresta de transição Amazônia-cerrado. In: **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 3, p. 346-355, set. 2009.
- APPENZELLER, T. O ciclo da vida. In: **National Geographic Brasil**. Edição Especial. [São Paulo]; n. 139, p. 42-45, out. 2011.
- ARRUDA, J. C. **Estudos do fechamento do balanço de energia pelo método de covariância de vórtices turbulentos em uma floresta de transição em Mato Grosso**. Cuiabá, 2011, 135 f. Tese (Doutorado em Física Ambiental) – Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá/MT, 2011.
- ARRUDA, J. C.; JORGE, A. PRIANTE FILHO, N.; NOGUEIRA, J. S.; ALMEIDA FILHO, E. O.; CAMPELO JÚNIOR, J. H.; VOURLITIS, G. L. Aplicação de três metodologias para estimar o fluxo de calor latente em floresta de transição. In: **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3b, p. 233-240, dez. 2006.
- BANCO MUNDIAL. A ciência da mudança climática. In: BANCO MUNDIAL. **Relatório sobre o desenvolvimento mundial de 2010: desenvolvimento e mudança climática**. São Paulo: Editora UNESP, 2010. p. 70-84.
- BENEZOLI, V. H.; IMBUZEIRO, M. A. Caracterização dos fluxos de energia nos ecossistemas de floresta tropical, floresta de transição e pastagem pelo modelo biosfera

terrestre IBIS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 17, 2011, Guarapari/ES. **Anais...** Campinas/SP: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2011, s/p.

BORGONOV, M.; CHIARINI, J. V. Cobertura vegetal do estado de São Paulo: levantamento por fotointerpretação das áreas cobertas com cerrado, cerradão e campo, em 1962. In: **Bragantia**, Campinas/SP, v. 24, n. 14, mar. 1965.

CAROLINE, L.; SOUZA, L. K. Síntese sinótica do mês de junho de 2012. **Síntese Sinótica Mensal**, São José dos Campos, jun. 2012.

Disponível em: < <http://www.cptec.inpe.br/noticias/noticia/21909>>.

CARVALHO, J. L. N.; AVANZI, J. C.; SILVA, M. L. N.; MELLO, C. R.; CERRI, C. E. P. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. In: **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa/MG, v. 34, n. 2, p. 277-289, 2010. Disponível em: <<http://redalyc.uemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=180214231001>> Acesso em: 19 abr. 2012.

CASAGRANDE, A.; SILVA JÚNIOR, P.; MENDONÇA, F. A. Mudanças climáticas e aquecimento global: controvérsias, incertezas e a divulgação científica. In: **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba/PR, v. 8, p. 30-44, jan./jun. 2011.

CENTRO DE PREVISÃO E ESTUDOS CLIMÁTICOS. Análise sinótica: 04/08/2011 – 00Z. **Boletim Técnico**, ago. 2011. Disponível em:

< http://tempo.cptec.inpe.br/bol_tecnico.shtml> Acesso em: 15 set. 2011.

CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. Agricultura e aquecimento global. In: **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 23-40, 2007.

CONTI, J. B.; FURLAN, S. A. Geoecologia: o clima, os solos e a biota. In: ROSS, J. L. S. (Org.) **Geografia do Brasil**. 4. ed. São Paulo: Edusp, 2003, 67-207 p.

CORREA, C.; SOUZA, L. K. Síntese sinótica do mês de abril de 2012. **Síntese Sinótica Mensal**, São José dos Campos, abr. 2012.

Disponível em: < <http://www.cptec.inpe.br/noticias/noticia/21499>>.

CORREA, C.; SOUZA, L. Síntese sinótica do mês de maio de 2012. **Síntese Sinótica Mensal**, São José dos Campos, maio 2012.

Disponível em: < <http://www.cptec.inpe.br/noticias/noticia/21745>>.

CORREA, C.; SOUZA, L. K.; VIDAL, C. Síntese sinótica do mês de fevereiro de 2012. **Síntese Sinótica Mensal**, São José dos Campos, fev. 2012. Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/noticias/noticia/20981>>. Acesso em: dez. 2012.

COUTO, D. L. N. **Albedo em cerrado *sensu-stricto* como resposta à variação climática e biológica – conexões com índice de vegetação, estoques de carbono e fluxos de CO₂**. 2009. 93 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

CUNHA, A. R.; ESCOBEDO, J. F.; KLOSOWSKI, E. S. Estimativa do fluxo de calor latente pelo balanço de energia em cultivo protegido de pimentão. In: **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília/DF, v. 37, n. 6, p. 735-743, jun. 2002.

D'ANDRÉA, A. F. **Fluxo de CO₂ do solo em áreas com cafeeiros e povoamento florestais**. 2004. 97 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras/MG, 2004.

DURIGAN, G.; SIQUEIRA, M. F.; FRANCO, G. A. D. C. Threats to the cerrado remnants of the state of São Paulo, Brazil. In: **Scientiae Agricola**, Piracicaba/SP, v. 64, n. 04, p. 355-363, jul./ago. 2007.

FERNANDES, E. X.; NERY, J. T. Diagnóstico de variáveis meteorológicas no cerrado do instituto florestal de Assis. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CLIMATOLOGIA GEOGRÁFICA, 9, 2010, Fortaleza/CE. **Anais...** Presidente Prudente/SP: ABClima, 2010, s/p.

FERREIRA, L. G.; FERREIRA, M. E.; ROCHA, G. F.; NEMAYER, M.; FERREIRA, N. C.; Dinâmica agrícola e desmatamento em áreas de Cerrado: uma análise a partir de dados censitários e imagens de resolução moderada. In: **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro/RJ, v. 2, n. 61, ago. 2009. Disponível em: <http://www.rbc.ufrj.br/_2009/61_2_04.htm>. Acesso em: 20 out. 2012.

FREITAS, H. C. **A influência dos transportes advectivos na estimativa do balanço de CO₂ no ecossistema: um estudo de caso para a mata atlântica com uso de técnicas micrometeorológicas**. 2012. 93 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba/SP, 2012.

GRECCO, D. Reserva de carbono. **National Geographic Brasil**. Edição Especial. [São Paulo]; n. 139, p. 66-79, out. 2011.

INTERGOVERNMENTAL PAINEL ON CLIMATE CHANGE, **Contribution of working groups I, II and III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change**. Editors Pachauri, R.K. and Reisinger, A. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 p., 2007.

KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. Conservação do Cerrado Brasileiro. In: **Megadiversidade**, v. 1, n. 1, jul. 2005.

KRONKA, F. J. N.; NALOM, M. A.; MATSUKAMA, C. K.; KANASHIRO, M. M.; YWANE, M. S. S.; PAVÃO, M.; DURIGAN, G.; LIMA, L. M. P. R.; GUILLAUMON, J. R.; BAITELLO, J. B.; BORG, S. C.; MANETTI, L. A.; BARRADAS, A. M. F.; FUKUDA, J. C.; SHIDA, C. N.; MONTEIRO, C. H. B.; PONTINHA, A. A. S.; ANDRADE, G. G.; BARBOSA, O.; SOARES, A. P. **Inventário florestal da vegetação natural do estado de São Paulo**. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente/Instituto Florestal/Imprensa Oficial, 2005, 200 p.

LATANSIO-AIDAR, S. R.; OLIVEIRA, A. C. P.; ROCHA, H. R.; AIDAR, M. P. M. Fitossociologia de um cerrado denso em área de influência de torre de fluxo de carbono, Pé-de-Gigante, Parque Estadual de Vassununga, SP. In: **Biota Neotropica**. v. 10, n. 1, p. 195-207. 2010. Disponível em:

<<http://www.biotaneotropica.org.br/v10n1/en/abstract?inventory+bn00210012010>> Acesso em: 02 maio 2011.

LIMA, J. E. F. W. Situação e perspectivas sobre as águas do Cerrado. In: **Ciência e Cultura**, Campinas/SP, v. 63, n. 3, jul. 2011, p. 27-29. Disponível em: <<http://cienciaecultura.bvs.br/pdf/cic/v63n3/a11v63n3.pdf>> Acesso em: 03 set. 2012

MALHI, Y.; GRACE, J. Tropical forests and atmospheric carbon dioxide. In: **Tree**, v. 15, n. 8, p. 332-337, ago. 2000.

MARENGO, J. A. **Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI**. 2. ed. Brasília/DF: Ministério do Meio Ambiente, 2007. 212 p.

MAX, J. C. M.; MELO, A. C. G.; HONDA, E. A.; DURIGAN, G.; MALÍCIA, L. C.; SOUZA, M. B. M.; CARDOSO, M. M.; VILAS BÔAS, O.; RAMOS, V. S.; CONTIÉRI, W. A. Plano de

manejo da Floresta Estadual de Assis. In: **Instituto Florestal**: Série Registro. São Paulo, n. 30, p. 1-80, jun. 2007.

MEIRELLES, M. L.; FERREIRA, E. A. B.; FRANCO, A. C. **Dinâmica sazonal do carbono em campo úmido de cerrado**. Planaltina – DF: Embrapa Cerrados, 2006, 32 p.

MEIRELLES, M. L.; SANTOS, J. L. M.; FRANCO, A. C.; FERREIRA, E. A. B. Fluxo de CO₂ em um campo limpo úmido de cerrado. In: CONGRESSO DE ECOLOGIA DO BRASIL, 7, 2007. Caxambu/MG. **Anais...** São Paulo: Sociedade de Ecologia do Brasil/USP, 2007, p. 1-2.

MENDONÇA, F. A. Aquecimento global e suas manifestações regionais e locais: alguns indicadores da região sul do Brasil. In: **Revista Brasileira de Climatologia**, [Presidente Prudente/SP], v. 2, p. 71-86, dez. 2006.

MENDONÇA, R. R. A história de ocupação do interior do estado de São Paulo. In: BITENCOURT, M. D.; MENDONÇA, R. R. **Viabilidade de conservação dos remanescentes de cerrado no estado de São Paulo**. São Paulo: Annablume; FAPESP, 2004. Capítulo 3, p. 57-75.

MEYERS, N.; MITTERMEIER, R. A.; MITTERMEIER C. G.; FONSECA, G. A. B.; KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. In: **Nature**, v. 403, n. 24, fev. 2000.

MIRANDA, A. C.; MIRANDA, H. S.; LLOYD, J.; GRACE, J.; FRANCEY, R. J.; MCINTYRE, J. A.; MEIR, P.; RIGGAN, P.; LOCKWOOD, R.; BRASS, J. Fluxes of carbon, water and energy over Brazilian cerrado: na analysis using eddy covariance and stable isotopes. In: **Plan, Cell and Environment**, v. 20, p. 315-328, 1997.

MOLION, L. C. B. Desmistificando o Aquecimento Global. In: **Intergeo**, v. 5, p. 13-20, 2007.

MOLION, L. C. B. Aquecimento global: uma visão crítica. In: **Revista Brasileira de Climatologia**, [Presidente Prudente/SP], v. 3, p. 7-24, ago., 2008.

MOURA, M. S. B. **Consumo hídrico, produtividade e qualidade do fruto da goiabeira irrigada na região do submédio São Francisco**. 2005. 122 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande/PB, 2005.

NÉGRON-JUÁREZ, R. I. **Variabilidade climática regional e controle da vegetação: um estudo da observação sobre cerrado e cana-de-açúcar e modelagem numérica da atmosfera.** 2004. 163 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Departamento de Ciências Atmosféricas e Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

NOBRE, A. C. Mudanças climáticas globais: possíveis impactos nos ecossistemas do país (Eixo: Modelos e cenários para a Amazônia: o papel da ciência). In: **Parcerias e Estratégias**, n. 12, set. 2001.

OLIVEIRA, M. C. F.; PEREIRA, M. G. P.; SOUZA, P. F.; COSTA, J. P. R.; COSTA, A. C. C; COSTA, M. C. Balanço de radiação e energia da Floresta Nacional de Caxiuanã no período de 1999-2001.

Disponível em: <http://www.museu-goeldi.br/semicax/CCTE_001.pdf> Acesso em: 05 out. 2011.

OLIVEIRA, M. B. L.; SANTOS, A. J. B.; MANZI, A. O.; ALVALÁ, R. C. S.; CORREIA, M. F.; MOURA, M. S. B. Trocas de energia e fluxo de carbono entre a vegetação de caatinga e atmosfera no nordeste brasileiro. In: **Revista Brasileira de Meteorologi**, . v. 21, n. 3b, p. 378-386, dez. 2006.

PACHECO, M. R. P. S.; HELENE, M. E. M. Atmosfera, fluxos de carbono e fertilização por CO₂. **Estudos Avançados**, v. 4, n. 9, p. 204-220, 1990. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S010340141990000200010&script=sci_arttext>.

PINHEIRO, E. S. A dinâmica espaço-temporal (1962-2006) da cobertura vegetal na estação ecológica de Assis. In: _____. **Análises ecológicas e sensoriamento remoto aplicados à estimativa de fitomassa de cerrado na estação ecológica de Assis, SP.** São Carlos (SP), 2008, 192 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental); Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 45-72 p.

PINHEIRO, E. S.; DURIGAN, G. Dinâmica espaço-temporal (1962-2006) das fitofisionomias em unidade de conservação do Cerrado no sudeste do Brasil. In: **Revista Brasileira de Botânica**, [s.l.], v. 32, n. 3, p. 441-454, jul./set. 2009.

PROTEÇÃO AO CERRADO PAULISTA. **Pesquisa FAPESP.** São Paulo/SP, n. 160, jun. 2009, p. 26.

RANDÜNZ, A. L.; SCHÖFFEL, E. R.; RANDÜNZ, A. F. O.; HALLAL, M. O. C.; SILVA, P. R. G. J. Estimativa do saldo de radiação sobre um vinhedo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 17, 2011, Guarapari/ES. **Anais...** Campinas/SP: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2011, s/p.

ROCHA, H. R.; FREITAS, H. C.; ROSOLEM, R.; NÉGRON-JUÁREZ, R. I.; TANNUS, R. N.; LIGO, M. A.; CABRAL, O. M. R.; DIAS, M. A. F. Measurements of CO₂ exchange over a woodland savana (Cerrado sensu stricto) in southeast Brasil. In: **Biota Neotrópica**. v. 2, n. 1, 2002. Disponível em:

<<http://www.biotaneotropica.org.br/v2n1/pt/abstract?article+BN01702012002>> Acesso em: 01 jul. 2011.

ROLIM, G. S.; SENTELHAS, P. C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente EXCELTM para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n.1, p133-137, 1998.

ROMARIZ, D. A. **Biogeografia**: temas e conceitos. São Paulo: Scortecci, 2008, 106-108 p.

SANO, S. M. A oferta ambiental do Cerrado e seu uso. In: **Ciência e Cultura**, v. 63, n.3, São Paulo/SP, jul. 2011, p. 37-38. Disponível em:

< <http://cienciaecultura.bvs.br/pdf/cic/v63n3/a14v63n3.pdf>> Acesso em: 03 set. 2012

SANTOS, E. O. **Contribuição ao estudo do fluxo de dióxido de carbono dentro da floresta Amazônia**. 1999. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

SANTOS, M. Meio ambiente construído e flexibilidade tropical. In: _____. **Técnica, Espaço, Tempo**. São Paulo: EDUSP, 2008, p. 69-76.

SAWYER, D. Fluxos de carbono na Amazônia e no cerrado: um olhar socioecossistêmico. In: **Sociedade e Estado**, Brasília/DF, v. 24, n. 1, p. 149-171, jan./abr. 2009.

SILVA, L. L. O papel do Estado no processo de ocupação das áreas de Cerrado entre as décadas de 60 e 80. In: **Caminhos da Geografia**, Uberlândia/MG, v. 1, n. 2, p. 25-36, dez. 2000.

SOTTA, E. D. **Fluxo de CO₂ entre solo e atmosfera em floresta tropical úmida da Amazônia Central**. 1998. 87 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Universidade do Amazonas, Manaus/AM, 1998.

SOUZA, L. K.; VIDAL, C.; QUEIROS, L.; CORREA, C. Síntese sinótica do mês de setembro de 2012. **Síntese Sinótica Mensal**, São José dos Campos, jun. 2012. Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/noticias/noticia/22480>>.

SOUZA, R. L. M.; MARQUES FILHO, E. P.; ROTUNNO FILHO, O. CO. MESQUITA, F. L. L.; KARAM, H. A.; SÁ, L. D. A. Estudo do balanço de energia superficial do Pantanal Sul-Mato-Grossense durante período seco e período úmido. In: SIMPÓSIO DE GEOTECNOLGIAS DO PANTANAL, 2, 2009, Corumbá/MT. **Anais...** [São José dos Campos]: Embrapa Informática Agropecuária/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, nov. 2009, p. 314-322.

TAVARES, A. C. Mudanças climáticas. In: VITTE, A. C.; GUERRA, A. J. T. (Org.) **Reflexões sobre geografia física no Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. 2004, p. 49-88.

TANNUS, R. N. **Funcionalidade e sazonalidade sobre cerrado e ecótono floresta-cerrado**: uma investigação com dados micrometeorológicos de energia e CO₂. 2004. 92 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Agroecossistemas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba/SP, 2004.

TATSCH, J. D. **Uma análise dos fluxos de superfície e do microclima sobre cerrado, cana-de-açúcar, eucalipto, com implicações para mudanças climáticas regionais**. 2006. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Departamento de Ciências Atmosféricas e Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: IBGE/SUPREN, 1977. 91 p.

TROPPEMAIR, H. **Biogeografia e meio ambiente**. 8. ed. Rio Claro: Divisa, 2008, 92-94 p.

VEENENDAAL, E. M.; KOLLE, O.; LLOYD, J. Seasonal variation in energy fluxes and carbon dioxide exchange for a broad-leaved semi-arid savanna (Mapone woodland) in Southern Africa. In: **Global Change Biology**, v. 10, p. 318-328, 2004. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2486.2003.00699.x/abstract>> Acesso em: 29 jul. 2011.

VIADANA, A. G.; CAVALCANTI, A. P. B. A teoria dos refúgios florestais aplicada ao estado de São Paulo. In: **Revista da Casa da Geografia de Sobral**, Sobral, v. 8/9, n. 1, p. 61-80, 2006/2007.