

IMPACTOS DAS MUDANÇAS DE COBERTURA VEGETAL NOS PROCESSOS DE SUPERFÍCIE NA REGIÃO SEMIÁRIDA DO BRASIL

ANA PAULA MARTINS DO AMARAL CUNHA¹, REGINA CÉLIA DOS SANTOS ALVALÁ², GILVAN SAMPAIO DE OLIVEIRA²

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (INPE/CPTEC), São José dos Campos, SP, Brasil

²INPE, Centro de Sistema Terrestre (CST), São José dos Campos, SP, Brasil

ana.paula@cptec.inpe.br, regina.alvala@inpe.br, gilvan.sampaio@inpe.br

Recebido Dezembro de 2011 - Aceito Setembro de 2012

RESUMO

A cobertura vegetal da superfície continental tem sido consideravelmente alterada pelas atividades humanas, principalmente através da conversão em grande escala da vegetação natural por áreas de cultivos e pastagens. Essas mudanças na cobertura da superfície podem alterar o clima regional e global por meio de processos biofísicos e biogeoquímicos. Assim, o presente trabalho avaliou como a substituição da vegetação natural da caatinga por agropecuária, bem como a degradação da caatinga, podem causar modificações nos processos de superfície na região semiárida do Nordeste do Brasil (NEB), a qual é uma das mais vulneráveis do Brasil, do ponto de vista social, à mudança de clima. Para isto, foram realizados experimentos numéricos de conversão da cobertura da superfície utilizando-se o modelo *Integrated Biosphere Simulator* – IBIS. Por meio da conversão da cobertura vegetal, as características morfológicas e biofísicas da vegetação foram modificadas e por isso, causaram alterações nas componentes dos balanços de energia, de água e de carbono. O balanço de energia foi mais afetado pelo aumento do albedo decorrente da alteração da vegetação caatinga para agropecuária e para caatinga degradada. Além disso, as alterações do comprimento de rugosidade e das propriedades estomáticas da vegetação corroboraram para as alterações ocorridas nas trocas turbulentas entre a superfície e a atmosfera. Com relação às componentes do balanço de carbono, durante a estação chuvosa com a conversão da caatinga natural para agropecuária, houve um aumento da assimilação de CO₂ (NEE) e com isso maior Produtividade Primária Líquida do ecossistema (NPP). O contrário ocorreu com a conversão para caatinga degradada, na qual a assimilação se manteve próxima de zero durante as horas do dia e NPP foi reduzida, o que pode ter ocorrido em função das alterações ocorridas no Índice de Área Foliar (IAF), tanto para a agropecuária, como para a caatinga degradada. **Palavras – chave:** Mudanças de cobertura, processos de superfície, semiárido.

ABSTRACT: THE IMPACT OF LAND COVER CHANGE ON LAND SURFACE PROCESSES IN THE SEMIARID OF BRAZIL

Vegetation cover on the surface of the Earth has changed considerably due to human activities, mainly through the conversion of natural vegetation to croplands and pastures. These changes have altered regional and global climates through biophysical and biogeochemical processes. In this work, the effects of the conversion of natural caatinga to croplands and to degraded caatinga on the land surface processes in the semiarid region of Brazil are analysed using the *Integrated Biosphere Simulator* (IBIS) model. Through these land cover changes, the biophysical and morphological characteristics of the vegetation have been modified and therefore, these changes have affected the exchange of energy, water and carbon between the atmosphere and land surface. Results of a simulated conversion from caatinga cover to cropland and degraded caatinga show that surface albedo (in wet and dry season) increased, consequently the energy balance was altered. In addition, roughness length and stomatal conductance changes corroborate the variations in turbulent exchanges between the surface and atmosphere. Regarding the components of carbon balance, when caatinga is replaced by cropland, the

net ecosystem exchange (NEE) and net primary productivity (NPP) increases. The opposite effects are found when caatinga is replaced by degraded caatinga. It indicates that the metabolic activity of the ecosystem decreases and this land cover (degraded caatinga) is acting as a source of CO₂ to the atmosphere, however with low rates. The present work has important implications for land use management issues in the semiarid region of Brazil, including efforts to restore and preserve the natural ecosystem.

Keywords: Land change cover, land surface processes, semiarid.

1. INTRODUÇÃO

O território brasileiro, como um todo, tem apresentado diferentes transformações no padrão espacial de uso e cobertura da terra nas últimas décadas. Segundo os resultados do Censo Agropecuário de 2006, a década 1996-2006 caracterizou-se por apresentar aumento de 30% nas áreas de lavouras na Região Nordeste do Brasil (NEB). O Censo também apontou a substituição das áreas de vegetação natural por lavouras e pastagens (IBGE, 2006). Tais transformações podem levar à degradação ambiental (no caso de manejo inadequado). Os processos de degradação produzem consequências sobre os diferentes componentes ambientais, tais como a eliminação da cobertura vegetal original e presença de uma cobertura invasora, e a perda parcial ou total do solo devido a fenômenos físicos (erosão) ou químicos (salinização e alcalinização) (Ross, 2001). O semiárido do NEB apresenta problemas ambientais de degradação resultantes dos fatores acima mencionados, e as áreas degradadas podem ser significativamente ampliadas em decorrência de ações antrópicas.

Nos processos que envolvem mudanças na cobertura vegetal, o clima pode ser seriamente afetado, uma vez que a atmosfera é sensível às características da superfície continental (Charney et al., 1977; Xue e Shukla 1993; Clark et al., 2001; Taylor, 2002; Oyama, 2002; Xue et al., 2004; Twine, 2004; Souza, 2006; Yanagi e Costa, 2011; Oliveira, 2008, Souza e Oyama, 2011). Estudos têm mostrado que a conversão da vegetação natural para áreas agrícolas ou de pastagem afetam as trocas de energia, água e carbono entre a atmosfera e a superfície continental (Claussen et al., 2001, Twine, 2004). Estes impactos decorrentes das alterações da cobertura vegetal ocorrem devido às mudanças nas características biofísicas e no ciclo de carbono. As características biofísicas, por exemplo, aquelas relacionadas às propriedades radiativas da superfície (como o albedo) afetam o balanço de energia e as trocas turbulentas de calor sensível e latente entre a superfície e a atmosfera. Mesmo pequenas alterações no albedo da superfície podem afetar significativamente as trocas de água e energia entre a superfície e a atmosfera e, conseqüentemente, a temperatura do ar, pressão de vapor, estabilidade atmosférica e a precipitação (Charney, 1975; Nobre et al., 1991, Clark et al., 2001; Twine, 2004).

A maioria dos estudos sobre os impactos das mudanças dos usos e cobertura da terra concentra-se apenas nos processos biofísicos envolvidos (Betts, 1999; Chase et al., 2000; Kleidon et al., 2000; Pitman e Zhao, 2000; Twine, 2004), ou nos processos biogeoquímicos (DeFries et al., 1999) das mudanças da cobertura da terra. Além disso, nenhum estudo relacionado neste contexto foi realizado para o semiárido do Brasil. Assim, o presente trabalho avaliou conjuntamente os impactos nos processos biofísicos e no balanço de carbono decorrentes da conversão da vegetação natural no semiárido do Brasil. É importante também explorar, especialmente para esta região, que é uma das mais vulneráveis do Brasil do ponto de vista social à mudança de clima (Marengo, 2008), como a substituição da vegetação natural da caatinga por agropecuária, bem como, a degradação da caatinga, podem causar modificações nos balanços de energia, água e carbono na região semi-árida do NEB. Para isto, no presente trabalho foram realizados experimentos de conversão da cobertura da vegetação natural utilizando-se o modelo de superfície IBIS (*Integrated Biosphere Simulator*, Foley et al., 1996), com a finalidade de avaliar as trocas entre a superfície continental e a atmosfera. O modelo IBIS foi utilizado no modo *offline* (desacoplado do modelo atmosférico), o que significa que este tipo de estudo não incorpora os processos de *feedbacks* que possam ocorrer em consequência dos fluxos de superfície alterados em variáveis como, por exemplo, precipitação.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Descrição do modelo IBIS

Nesse estudo, utiliza-se a versão atualizada do IBIS 2.6 (Foley, et al., 1996; Kucharik et al., 2000). O IBIS é um modelo de vegetação dinâmica que representa os processos físicos, fisiológicos e ecológicos que ocorrem na vegetação e nos solos. A maior parte da estrutura do módulo de superfície continental é baseada no esquema de superfície LSX de Thompson e Pollard (1995 a,b). O modelo inclui para cada célula de grade duas camadas de vegetação: “árvores” e “gramíneas e arbustos”. Além disso, o modelo considera seis camadas de solo para simular a temperatura, o conteúdo de água no solo e a quantidade de gelo sobre o solo. O IBIS representa a cobertura da vegetação

como um conjunto de Tipos Funcionais de Plantas (TFP), em que cada TFP é caracterizado em termos de biomassa (carbono nas folhas, troncos e raízes finas) e Índice de Área Foliar (IAF). Os TFPs diferem com relação à forma (árvores ou gramíneas ou arbustos), comportamento das folhas (perenifólias ou caducifólias), forma das folhas (folhas largas ou aciculadas) e fisiologia (C_3 ou C_4). No modelo IBIS, um ponto de grade pode conter um ou mais TFPs, que juntas correspondem a um tipo de vegetação (Foley et al., 1996).

O modelo IBIS simula a assimilação de CO_2 e a respiração da folha utilizando as equações de Farquhar (Farquhar et al., 1980; Farquhar e Sharkey, 1982). A assimilação de CO_2 bruta (A_g) é uma função da luz absorvida (APAR), da temperatura da folha (T), da concentração interna de CO_2 (c_i), e capacidade máxima da enzima Rubisco ($V_{máx}$); a respiração de manutenção (R_d) é uma função apenas de $V_{máx}$. A simulação da Troca Líquida do Ecossistema (NEE, sigla em inglês) pelo IBIS é uma função da respiração heterotrófica (R_H) e da Produção Primária Líquida do ecossistema (NPP, sigla em inglês). Além disso, a NPP é uma função da Produtividade Primária Total (GPP, sigla em inglês) e da respiração autotrófica (R_A) do ecossistema (soma da respiração de manutenção e custo de alocação de CO_2). R_H é a soma da taxa de decomposição dos reservatórios metabólicos, lignina e estrutural de CO_2 das folhas, galhos e raízes em decomposição. A_n é assimilação de CO_2 líquida. Deste modo, tem-se que:

$$NEE = R_H - NPP$$

$$NPP = GPP - R_A = 0,7 \int A_n dt$$

O IBIS simula as trocas de radiação solar e infravermelha entre a superfície, vegetação do dossel e atmosfera. As propriedades radiativas do dossel, do solo e neve (por exemplo, a reflectância e a transmissividade) são calculadas no modelo, e então relacionadas às características da radiação incidente (por exemplo, fração de radiação difusa e direta, ângulo zenital). Com isso, o albedo da superfície é função da cobertura vegetal, do tipo de solo e da radiação solar incidente (Twine, 2004). O IBIS estima o balanço de radiação à superfície, e o particiona em fluxos difusos e turbulentos de calor sensível (H) e calor latente (LE). Em geral, essa partição é função principalmente da condutância estomática (g_s). Por sua vez, g_s depende principalmente da taxa de assimilação de CO_2 líquida, a qual é controlada pela Radiação fotossinteticamente ativa absorvida (APAR) e por $V_{máx}$, o que inclui estressores térmicos e de umidade do solo. A_n é sensível principalmente ao parâmetro $V_{máx}$ e o parâmetro relacionado à distribuição de raízes finas (β_2), enquanto g_s responde também ao coeficiente relacionado à condutância estomática (m).

O modelo IBIS utiliza uma formulação multi-camadas do solo para simular nele as variações diurnas e sazonais de

calor e umidade. Em cada passo de tempo de uma hora, cada camada é descrita em termos da temperatura do solo, conteúdo volumétrico de água no solo e conteúdo de gelo. O módulo de física de solo utiliza as equações de Richards para calcular a taxa temporal de trocas de umidade no solo, enquanto o fluxo vertical de água no solo é modelado de acordo com a lei de Darcy (Campbell e Normam, 1998). A formulação do processo de transpiração (P) no IBIS é baseada em Pollard e Tompson (1995):

$$P = \frac{\rho C}{(1 + rC)} (1 - f^{wet}) (q_{sat}(L) - q) IAF$$

em que ρ é a densidade do ar próximo à superfície e C é a fração de área foliar úmida interceptada pela água ou neve. L é a temperatura da folha, C o coeficiente de transferência de calor/vapor entre o dossel e o ar, e q_{sat} a umidade específica de saturação à temperatura da folha, q é a umidade específica ambiente no dossel, r a resistência estomática por unidade de área foliar, que é função da radiação fotossinteticamente ativa (PAR), temperatura, deficit de pressão de vapor e conteúdo de água disponível no solo. A evapotranspiração total da superfície é tratada como a soma dos três fluxos de vapor de água: evaporação da superfície do solo seco e úmido, evaporação da água interceptada pelo dossel da vegetação, e a transpiração do dossel (Pollard e Thompson, 1995, Campbell e Norman, 1998; Twine, 2004; Soyulu et al., 2011).

2.2 DADOS

2.2.1 Sítio experimental

As medidas meteorológicas necessárias como forçantes para o modelo foram coletadas no sítio experimental localizado na Embrapa (9°03'30,6"S; 40°19'45,1"W) – Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semiárido – CPATSA (Figura 1). De acordo com Oliveira et al. (2006), essa área compreende 600 ha de vegetação de *caatinga* nativa, na qual predomina uma vegetação de caráter espinhento e folhas pequenas com árvores de aproximadamente 4,5 metros de altura, pertencentes à família Leguminosae (*Mimosa tenuiflora*), sendo verificada também a presença de árvores, à distância, com alturas de até 8 metros. O solo da área experimental de estudo é classificado como Argissolo Amarelo (PA) caracterizado, por apresentar textura arenosa nos horizontes superficiais, baixa retenção de água e pobre fertilidade. A precipitação na região apresenta grande variabilidade espacial e temporal. Em termos de médias mensais, para um período de 35 anos de medidas obtidas por uma estação meteorológica convencional em um campo experimental dentro da EMBRAPA/SEMIÁRIDO (Figura 2), observa-se que a precipitação concentra-se nos meses de novembro a abril, indicando a existência de uma estação seca intensa e duradoura.

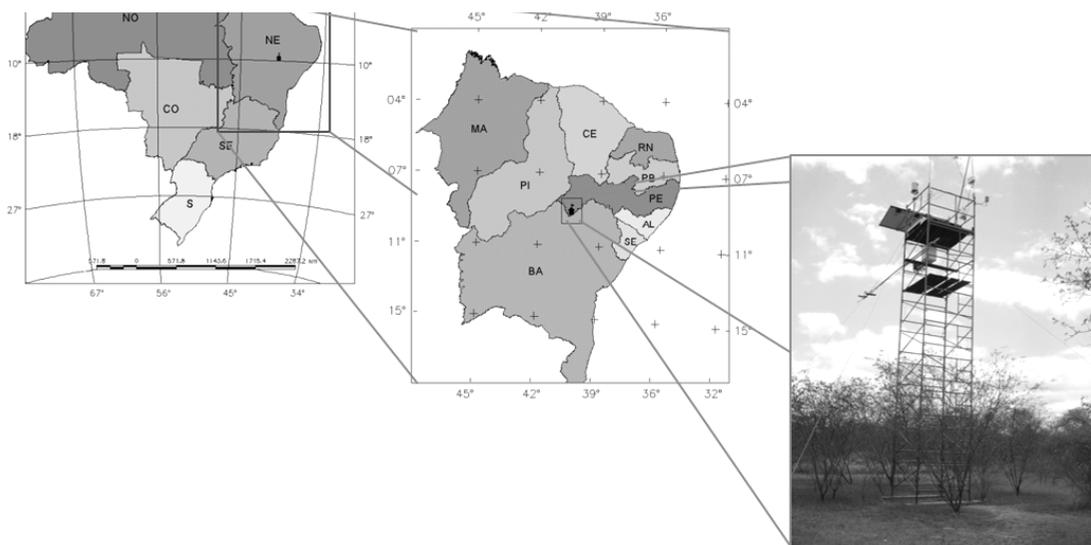


Figura 1 - Localização geográfica da torre micrometeorológica instalada na Embrapa Semi-Árido em Petrolina, PE.

A temperatura média mensal situa-se entre 24 °C e 28 °C com pequena variabilidade ao longo do ano, assim como a umidade relativa (Oliveira et al., 2006).

Foram coletados neste sítio dados de radiação solar incidente (Sin); radiação de onda longa incidente (Lin); temperatura do ar (Ta); velocidade horizontal do vento (u_a); precipitação (P) e umidade relativa do ar (Ur), os quais foram medidos acima do dossel. Para medidas de velocidade e direção do vento foi utilizado o anemômetro sônico CS8000 (R. M. Young, Traverse City, Michigan, EUA). O termohigrômetro HMP45C (Vaisala, Helsinki, Finlândia) foi usado para medir a temperatura e a umidade do ar. A quantidade de precipitação foi medida pelo pluviômetro TB4 (Hydrological Services, Edmonton, Canadá). O piranômetro CM6B (Kipp e Zonen, Delft, Holanda) foi utilizado para a medição da radiação de onda curta. Além dessas medidas, radiação de onda longa incidente foi obtida com um pirgeômetro CG1 (Kipp e Zonen). Estes instrumentos foram instalados a uma altura de 10 metros. Os

dados desses sensores foram lidos a cada minuto e seus valores médios e totais a cada 10 minutos foram armazenados em um coletor de dados CR23X (Campbell Scientific, Logan, Utah, EUA). Estes dados representativos do bioma caatinga foram coletados entre janeiro de 2004 e dezembro de 2007.

Medidas de alta frequência das componentes do vento, temperatura do ar, concentrações de vapor de água foram realizadas com o sistema de covariância dos vórtices turbulentos (*eddy correlation*), compostos pelo analisador de H₂O de caminho aberto LI7500 (Licor, Lincoln, Nebraska, EUA) e o anemômetro sônico tridimensional CSAT3 (Campbell), os quais foram instalados no topo de um mastro acoplado na torre, à uma altura de 11 metros (Tabela 1). A distância da torre até a borda mais próxima da área de caatinga é de 1000 m, 100 vezes a altura do sistema de medidas de fluxo, o que garante, com uma margem de segurança satisfatória, que os fluxos medidos sejam originados apenas de áreas de caatinga, mesmo durante condições estáveis. Os dados de alta frequência foram lidos a cada 0,0625 segundos (16 Hz) por um coletor de dados CR10X (Campbell) e armazenados em um computador portátil. Posteriormente, esses dados foram processados por Oliveira et al. (2006) para o cálculo dos fluxos de calor latente, de calor sensível, utilizando a técnica da covariância dos vórtices turbulentos seguindo a metodologia de Aubinet et al. (2000). Os dados de fluxos turbulentos foram medidos de julho de 2004 a junho de 2005.

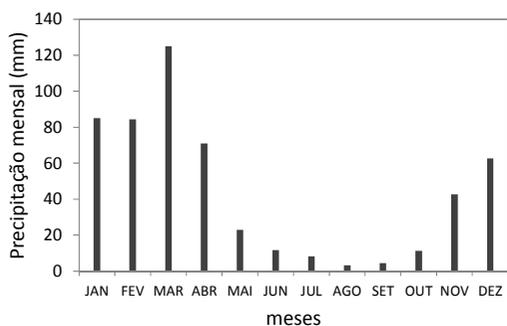


Figura 2 - Precipitação pluviométrica média mensal (mm) da Estação Agrometeorológica de Bebedouro (Petrolina-PE 09°09'S 40°22' W). Período 1975-2010. Fonte: EMBRAPA.

2.2.2 Produtos MODIS

Dados de albedo da superfície e produtividade primária líquida, obtidos por meio do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), foram utilizados para

Tabela 1 - Grandezas medidas no experimento e os respectivos instrumentos

Variáveis	Instrumentos	Altura (m)
Velocidade e direção do vento	Anemômetro sônico CS8000, R. M.	11
Umidade e temperatura do ar	Termohigrômetro HMP45C, Vaisala	11
Precipitação pluviométrica	Pluviômetro TB4, HydrologicalServices	9
Radiação de onda curta	Piranômetro CM6B, Kipp&Zonen	9
Radiação de onda longa	Pirgeômetro CG1, Kipp&Zonen	9

avaliar as simulações do modelo IBIS. O sensor MODIS é principal instrumento a bordo do satélite Terra, o qual foi lançado em dezembro de 1999 e começou a coletar dados em fevereiro de 2000. Esse sensor apresenta inúmeras características, entre elas a ampla cobertura espacial e espectral. O MOD 17 consiste na medida da fotossíntese líquida e da produtividade primária líquida (NPP), para os períodos de 8 e 32 dias, além de anual. Este produto fornece, em escala global, uma medida da estimativa do crescimento da vegetação terrestre e sua produtividade. O produto MOD43B3 refere-se ao albedo da superfície obtido das bandas do sensor MODIS e possui uma resolução espacial de 1.000 m. O produto disponibiliza dois tipos de albedos para 7 bandas espectrais e 3 bandas largas: os albedos Black-Sky (iluminação direta) e White-Sky (iluminação difusa). Segundo Iqbal (1980), o albedo total da superfície é representado pela soma dos dois albedos ponderados pela proporção de irradiância direta e difusa, denominada albedo *Blue Sky*. As imagens de albedo e NPP para o ano de 2004-2007, utilizadas no presente trabalho, foram obtidas gratuitamente através do site geography.bu.edu/brdf e georeferenciadas utilizando o *Modis Reprojection Tool* (MRT).

2.3 Experimentos

Segundo Twine (2004), para melhor compreender os processos físicos envolvidos nas alterações dos balanços de energia, água e CO₂ decorrentes das mudanças na cobertura vegetal, é importante que sejam feitas simulações com diferentes tipo de cobertura sobre um único ponto de grade do modelo. Assim sendo, para examinar como os processos biofísicos e o ciclo de carbono se alteram com as mudanças na cobertura da superfície na região do NEB, foram realizadas simulações *offline* com o modelo IBIS (desacoplado do modelo meteorológico) no modo estático (vegetação estática). Foram realizados três experimentos envolvendo a conversão da vegetação natural de caatinga do NEB em agropecuária e em caatinga degradada.

Para inicializar o modelo, além das forçantes meteorológicas, são necessárias informações da altura da torre e altura dos instrumentos instalados, assim como informações do solo da área. A Tabela 2 resume os detalhes de configuração dos experimentos realizados com o modelo IBIS. O modelo foi inicializado com dados medidos do conteúdo volumétrico

de água no solo (*wsoi*) e das porcentagens de areia e argila nas seis camadas do solo (0,20; 0,50; 0,90; 1,40; 1,90 e 2,30m).

Para cada experimento, o modelo foi rodado por um período de 4 anos (2004-2007), com as mesmas forçantes meteorológicas, alterando apenas o tipo de vegetação. O primeiro experimento (controle) considerou que o ponto de grade era coberto (100%) por caatinga, que é a vegetação natural presente na maior parte do NEB. Para representar a caatinga no modelo IBIS, foi utilizado a vegetação tipo 11 (*dense shrubland*).

No segundo experimento foi considerado que o ponto de grade é coberto (100%) por agropecuária. Essa segunda simulação foi elaborada com a finalidade de avaliar os impactos nos processos biofísicos e no ciclo de carbono decorrentes da expansão das atividades agropecuárias no NEB. Para isto, esta classe foi representada no modelo IBIS como *grassland* (Tipo de vegetação 12), uma vez que o modelo não possui uma classe específica para representar os cultivos agrícolas junto às áreas de pastagem. De acordo com o mapeamento da cobertura vegetal do NEB realizado por Vieira et al. (2007), dentro da classe agropecuária, a pastagem é predominante na região, uma vez que esta ocorre de forma extensiva. A representação de cultivos agrícolas de forma genérica no modelo IBIS ou em qualquer outro modelo de superfície, acarretaria erros uma vez que cada tipo de cultivo possui diferentes ciclos fenológicos e características biofísicas, e que são diferentes dos da pastagem. Portanto, representar a agropecuária no modelo utilizando a classe *grassland*, foi a aproximação mais simples e apropriada para as simulações deste trabalho.

Souza (2006) fez uma aproximação similar, quando considerou que áreas antropizadas (agropecuária) em algumas regiões do NEB eram representados pela classe tipo 12 (*broadleaf trees with winter wheat*) do modelo *Simplified Simple Biosphere Model* – SSiB (Xue et al., 1991). Esta associação também foi feita pela falta de uma classe de vegetação plenamente apropriada no modelo. Concernente ao modelo IBIS, Costa et al. (2007) também precisou fazer adaptações para fazer simulações considerando a soja na Amazônia. Como no modelo IBIS não existe uma classe que especifique cultivos, a classe soja foi representada a partir dos parâmetros da TFP 12 (C3 grasses), associada com valores de índice de área foliar e albedo da superfície coletados em área experimental de soja na Amazônia.

Tabela2 - Descrição das simulações offline e inicialização do modelo IBIS.

Experimentos			
Tipo de cobertura	<i>caatinga (controle)</i>	<i>agropecuária</i>	<i>caatinga degradada</i>
Tipo de vegetação*	11	10	12
IAF _{inicial} **	1,7	1,5	0,5
Inicialização das características do solo no modelo IBIS			
Profundidade do solo (m)	2		
W _{soi} ***	0,30		
% de areia nas 6 camadas do solo	58,44,93,56,45,64		
% de argila nas 6 camadas do solo	11,14,01,09,15,09		

*Tipos de vegetação considerados no modelo IBIS 2.6.

** Índice de Área Foliar

*** Conteúdo volumétrico de água no solo

Ressalta-se que os valores iniciais de IAF para a agropecuária foram ajustados com base nos dados do produto MOD15 que gera, em uma escala de oito dias, imagens referentes ao IAF.

De acordo com Marengo (2008), um dos possíveis impactos da mudança de clima num cenário de aquecimento global, é que a caatinga pode dar lugar a uma vegetação mais típica de zonas áridas, com predominância de cactáceas e maiores áreas de solo exposto. Assim, um terceiro experimento foi elaborado para avaliar as consequências da diminuição da densidade da vegetação no semi-árido. Para isto, no terceiro experimento considerou-se que o ponto de grade é coberto (100%) por caatinga degradada, ou seja, quantidade menor de arbustos e maior área de solo exposto. Para representar este tipo de cobertura no modelo foi utilizado a vegetação tipo 12 (*open shrubland*).

3. RESULTADOS

3.1 Avaliação do modelo IBIS para caatinga

A seguir é apresentado o desempenho do modelo IBIS em simular o albedo da superfície, as variáveis do balanço de energia e NEE. As demais variáveis não foram avaliadas por falta de medidas de campo associadas às mesmas. Vale ressaltar que as simulações realizadas do balanço de energia com o modelo IBIS foram previamente calibradas para a caatinga natural utilizando medidas de fluxos de superfície coletadas no sítio experimental de caatinga (9°03'30,6"S; 40°19'45,1"W) na área experimental da Embrapa (Cunha et al. 2012). Os parâmetros calibrados foram aqueles relacionados ao balanço de energia (reflectância e transmitância da folha no dossel, parâmetros relacionados à emissividade, entre outros).

A avaliação do modelo IBIS foi realizada utilizando medidas micrometeorológicas coletadas no sítio experimental do CPATSA (caatinga), durante o período de julho de 2004 a junho de 2005. Além disso, também foram utilizados dados de NPP e albedo obtidos por meio do sensor MODIS no período de 2004 a 2007.

Na Figura 3 é mostrada uma comparação entre o albedo da superfície médio mensal simulado pelo modelo IBIS, estimado por meio de dados do sensor MODIS e o observado em área de caatinga (todos estes valores de albedo foram obtidos ao meio-dia). Este último foi calculado considerando dados medidos de radiação solar incidente e refletida obtidos da torre micrometeorológica. Observa-se na série temporal que o albedo simulado pelo modelo IBIS não apresenta o mesmo padrão sazonal dos dados observados, em que menores valores de albedo são encontrados nos meses mais secos. Maiores incertezas nos valores do albedo simulado pelo modelo IBIS ocorreram durante a estação seca, principalmente entre os meses de julho a outubro. No entanto as incertezas nos dados

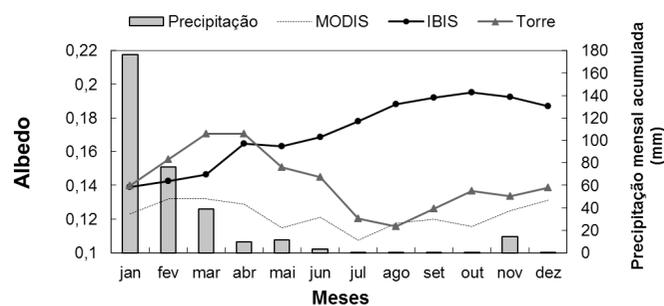


Figura 3 - Albedo da superfície médio mensal simulado com o modelo IBIS, albedo estimado por meio de imagens do sensor MODIS, albedo calculado com dados de radiação solar observado (torre) e precipitação mensal acumulada.

observacionais também devem ser consideradas. Com relação aos dados obtidos pelo sensor MODIS, é importante salientar que os dados são estimados a partir de uma série temporal de 16 dias das observações multiangulares da reflectância, com resolução de 1 km. Além disso, também existem fontes de incertezas relacionadas a estes dados, como por exemplo, a perda de dados na presença de nuvens e contaminação por aerossóis (Yanagi, 2006).

A Figura 4 mostra os resultados das simulações com o modelo IBIS do saldo de radiação (R_n), fluxos de calor sensível (H) e calor latente (LE), e a troca líquida de CO_2 pelo ecossistema (NEE). Estas figuras mostram a hora local no eixo x e o número do dia (começando de 01/07/2004) no eixo y , com a magnitude dos fluxos representada pelas cores. Os gráficos foram gerados a partir de médias horárias a cada 10 dias do ciclo diurno. Assim, consistem de 24 médias no eixo x (médias horárias) e 36 médias no eixo y (médias a cada 10 dias em um período de 1 ano).

A variação sazonal do saldo de radiação no período avaliado acompanha a variação sazonal da radiação solar incidente (não mostrado). Menores valores podem ser observados nos meses de julho de 2004 e maio-junho de 2005 (dias 0-30 e 300-360). E valores mais altos no início da primavera até o final de verão (setembro a março, dias 90-240) (Figura 4a). De modo geral, o modelo IBIS simulou bem R_n , de maneira que os valores simulados são próximos dos dados observados (Figuras 4a-4c).

Com relação à partição da energia disponível em H e LE , a vegetação caatinga do semi-árido do Brasil durante os meses secos, quando está sob condições limitadas de água, a maior parte da energia disponível (R_n) é liberada na forma de calor sensível. De modo geral, o modelo foi hábil em simular essa partição da energia em H e LE no ecossistema estudado (Figuras 4c-4f).

Nas Figuras 4d-4f observa-se que maiores erros na simulação de H ocorreram entre os dias 90-150 (aproximadamente). O modelo subestimou H nas primeiras horas do dia e superestimou nas últimas horas do dia. Observa-se ainda que LE foi superestimado das 8 às 12 horas (em $\sim 40 \text{ W/m}^2$), principalmente nos meses mais secos (dias 1-130) e subestimado das 7 às 16 horas (de -100 W/m^2 à -20 W/m^2) na estação chuvosa (dias 220-330) (Figuras 4g-4i). Com relação à estação seca, o modelo subestima o impacto da baixa umidade do solo e do déficit de pressão de vapor no fechamento estomático em condições secas. Estes resultados mostram que o modelo IBIS apresenta deficiências em simular as abruptas alterações das condições de secas para úmidas na área de estudo. Outra variável que não é bem simulada pelo modelo é a NEE . A troca líquida de CO_2 (NEE) no ecossistema é a diferença entre o CO_2 absorvido pela fotossíntese e o liberado pela respiração

da vegetação e do solo. O modelo superestimou NEE para toda a estação chuvosa (dias 210-330) e subestimou no período de setembro a dezembro. Os maiores erros ocorreram durante as horas do dia (Figuras 4j-4m). Em outras palavras, o modelo não conseguiu representar satisfatoriamente a sazonalidade das trocas líquidas do ecossistema. Embora os erros sejam pequenos, da ordem de $-1 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ nos meses mais secos e da ordem de 3 a $4 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ para os meses chuvosos, as diferenças podem gerar grandes erros em simulações sazonais de longo prazo.

3.2 Experimentos de conversão de cobertura

Após as simulações realizadas calculou-se o ciclo diurno médio das componentes do balanço de energia e de NEE . Além disso, foram calculadas as médias mensais de IAF , $wsoi$, evapotranspiração e NPP . Os resultados das simulações foram avaliados para dois períodos distintos, um representativo da estação úmida (janeiro a março) e o segundo representativo da estação seca (julho a setembro) na área de estudo, selecionados com base no total mensal de precipitação registrados em sítio experimental de caatinga (Petrolina, PE).

O albedo da superfície é um parâmetro que afeta o balanço de radiação da superfície e controla a quantidade de energia disponível para o aquecimento e a evaporação de água na baixa atmosfera. As Figuras 5a e 5b mostram que a conversão da vegetação natural de caatinga, para agropecuária e para caatinga degradada, ocasionou aumento do albedo médio anual da superfície de 0,12 e 0,16, respectivamente (Tabela 3). As mudanças no albedo ocorrem devido às diferenças nas propriedades ópticas da folha entre a vegetação natural da caatinga, a agropecuária e a caatinga degradada. Além disso, os valores mais altos do albedo, decorrentes da conversão da caatinga natural para caatinga degradada, estão associados à maior área de solo exposto. O albedo da superfície é ainda maior durante a estação seca para os três tipos de cobertura, devido à diminuição de folhas verdes em função do baixo índice pluviométrico e baixa umidade do solo.

Como consequência do aumento do albedo, a média anual de R_n para agropecuária reduz $30,8 \text{ Wm}^{-2}$ (27%) e para caatinga degradada reduz $39,9 \text{ Wm}^{-2}$ (35%), em relação a média anual de R_n para a caatinga preservada (Tabela 3 e Figuras 5c e 5d).

Com menos energia disponível na superfície, H também torna-se menor (Figuras 5e e 5f). Na estação seca, o pico de H às 12h foi reduzido de aproximadamente 100 Wm^{-2} decorrente da conversão de caatinga para agropecuária, e reduzido de aproximadamente 132 Wm^{-2} da conversão da caatinga natural para caatinga degradada (Tabela 3). Estes resultados são semelhantes aos encontrados por Souza (2006), em que após a conversão da caatinga natural para semideserto (*broadleaf*

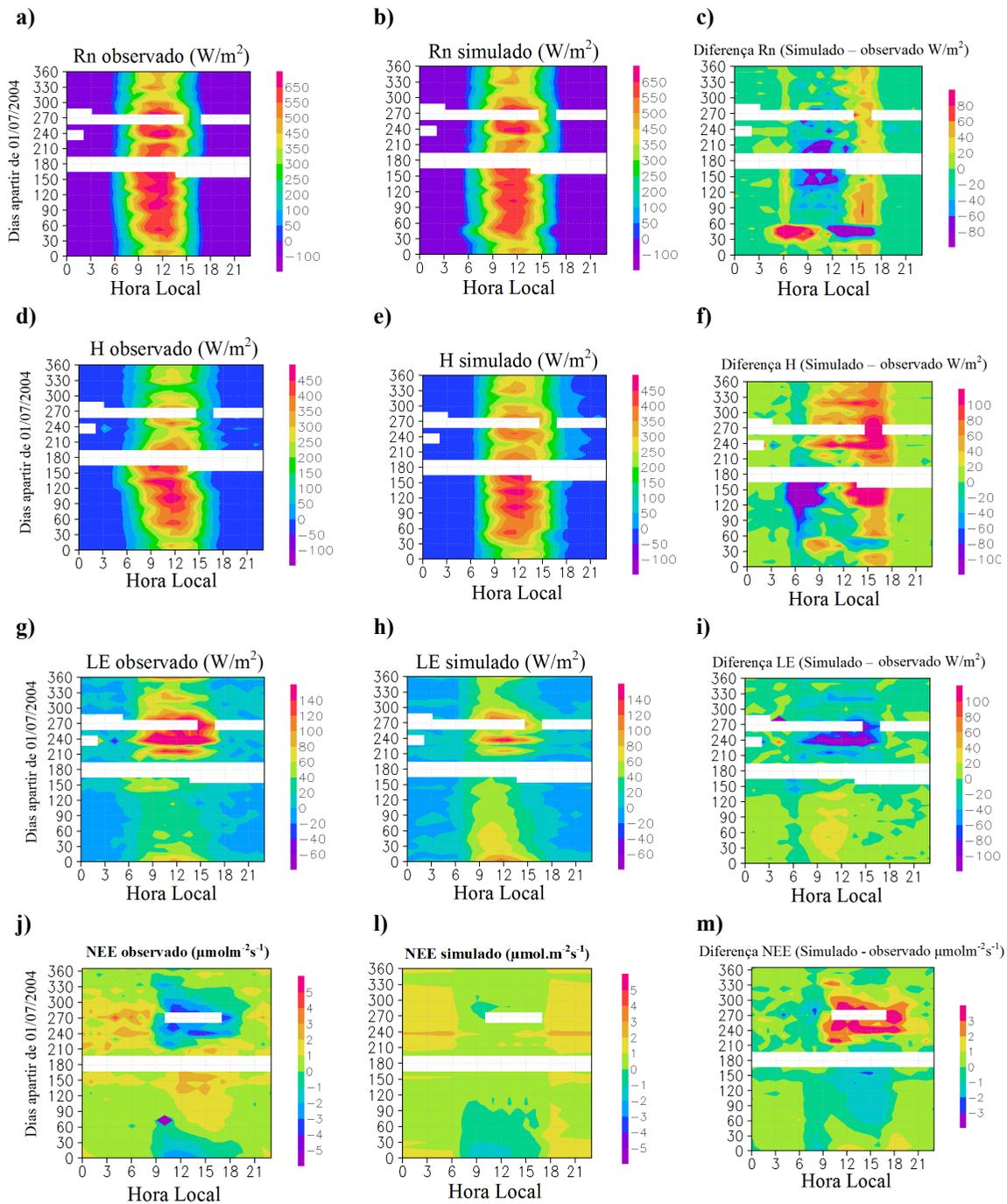


Figura 4 - Padrão diário e anual observado e simulado do saldo de radiação (Rn), fluxos de calor sensível (H) e calor latente (LE), e troca líquida de CO₂ pelo ecossistema (NEE). As imagens de diferença são calculadas de forma que valores positivos indicam que o modelo superestimou os valores observados (c, f, i e m). O espaço em branco indica inexistência de dados.

Em todas as figuras, os fluxos são médias horárias a cada 10 dias. O eixo y são dias a partir de 01 de julho de 2004.

shrubs with bare soil - classe tipo 9 do modelo SSiB), Rn é reduzido e consequentemente reduz H.

Com relação à partição da energia disponível em H e LE, para a vegetação caatinga natural, devido às condições limitadas de água principalmente durante os meses secos, observa-se que a maior parte da energia disponível (Rn) é

liberada na forma de calor sensível. Assim, apesar de Rn apresentar valores relativamente elevados para a caatinga (Figuras 5c e 5d), LE é baixo (Figuras 5g e 5h). Durante a estação seca, o ar acima da vegetação recebe mais calor do que vapor de água, o que resulta no aquecimento das camadas de ar superior. De modo geral, após a conversão

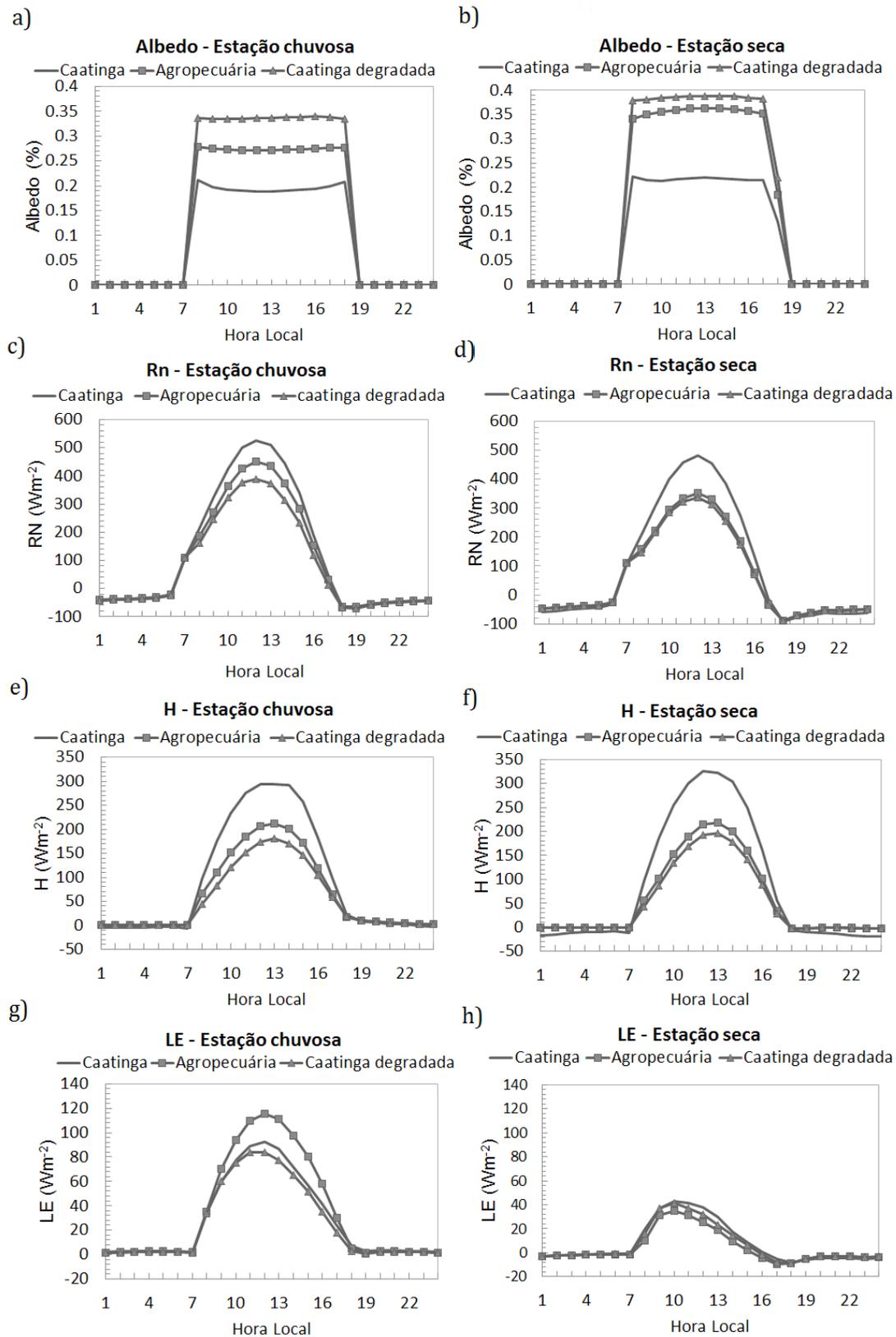


Figura 5 - Ciclo diário médio do albedo da superfície, Saldo de Radiação (Rn), do fluxo de calor sensível (H), do fluxo de calor latente (LE), NEEe NPP simulados para caatinga, agropecuária e caatinga degradada, nas estações seca e chuvosa.

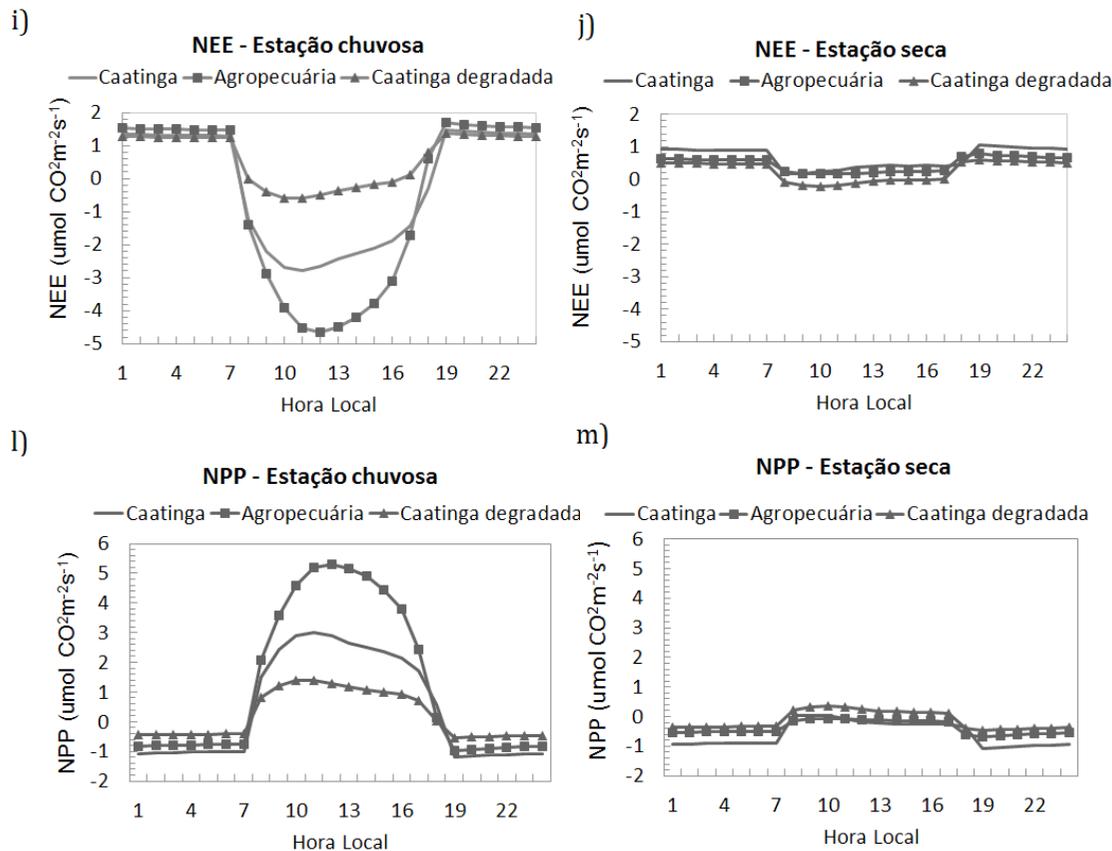


Figura 5 - Continuação

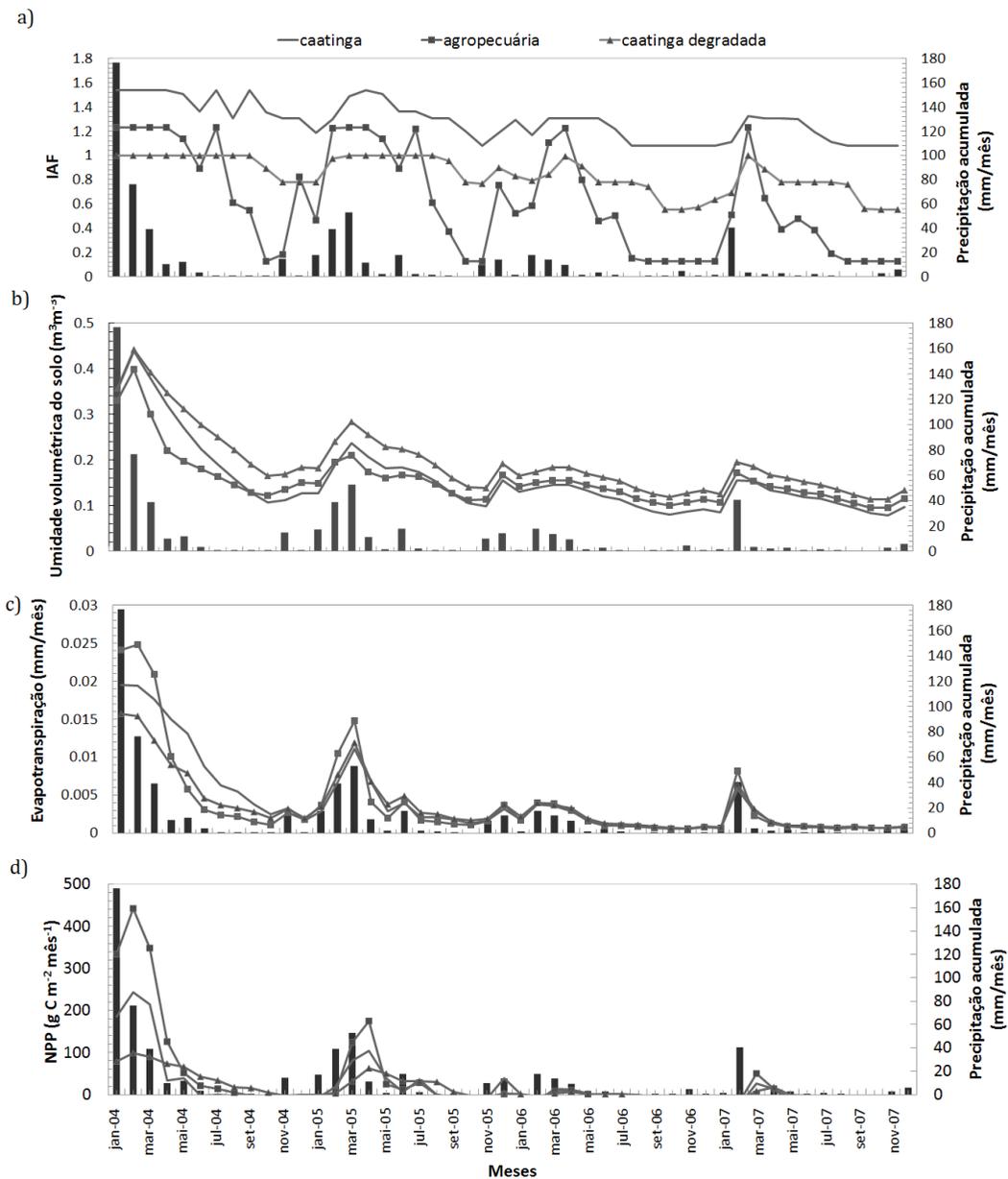
Tabela 3 - Mudança média anual do albedo, saldo de radiação (Rn), fluxo de calor sensível (H) e fluxo de calor latente (LE) decorrentes das alterações da cobertura vegetal natural (caatinga). As setas indicam (↑) aumento e redução (↓) da variável após a conversão.

Cobertura	Albedo	Rn (Wm ⁻²)	H (Wm ⁻²)	LE (Wm ⁻²)
<i>Agropecuária</i>				
2004	↑ 0,08 (40%)	↓ 23,49 (19%)	↓ 17,97 (21%)	↓ 4,66 (14%)
2005	↑ 0,10 (49%)	↓ 25,75 (23%)	↓ 26,68 (29%)	↑ 0,98 (7%)
2006	↑ 0,14 (63%)	↓ 35,72 (34%)	↓ 35,67 (40%)	↓ 0,03 (1%)
2007	↑ 0,16 (70%)	↓ 38,20 (35%)	↓ 38,53 (41%)	↑ 0,39 (8%)
média	↑ 0,12 (58%)	↓ 30,79 (27%)	↓ 29,71 (33%)	↓ 0,83 (6%)
<i>Caatinga aberta</i>				
2004	↑ 0,16 (82%)	↓ 42,72 (34%)	↓ 32,01 (38%)	↓ 9,98 (30%)
2005	↑ 0,15 (75%)	↓ 37,30 (33%)	↓ 39,11 (42%)	↑ 1,90 (14%)
2006	↑ 0,17 (74%)	↓ 39,88 (38%)	↓ 40,33 (45%)	↑ 0,47 (8%)
2007	↑ 0,17 (75%)	↓ 39,72 (37%)	↓ 40,12 (42%)	↑ 0,45 (9%)
média	↑ 0,16 (77%)	↓ 39,90 (35%)	↓ 37,89 (42%)	↓ 1,79 (12%)

da cobertura vegetal natural este padrão se mantém, porém com a energia disponível reduzida em função do aumento do albedo, principalmente para a conversão em caatinga degradada. A Figura 5g mostra que quando a caatinga natural é convertida para agropecuária, o valor de LE às 12h na estação chuvosa aumenta aproximadamente 23 W m⁻², enquanto para a conversão em caatinga degradada reduz aproximadamente 8 W m⁻². Na Figura 6c é observado que a evapotranspiração média mensal, após a conversão de caatinga natural para

agropecuária, aumenta nos meses chuvosos e reduz nos meses secos (para os dois primeiros anos de simulação).

As modificações no balanço de energia ocorreram principalmente em função das alterações das propriedades radiativas da superfície e consequentemente do albedo. Além disso, as diferenças morfológicas e biofísicas entre os tipos de vegetação analisados, tais como o comprimento de rugosidade e as propriedades estomáticas também são responsáveis por tais modificações (Oyama e Nobre 2004).



Figuras 6 - Média mensal do Índice de Área Foliar (IAF), umidade volumétrica do solo, total mensal da evapotranspiração e NPP simulados para caatinga agropecuária e caatinga degradada.

Com relação às componentes do balanço de água, observa-se que, em função dos valores de precipitação serem baixos na região de estudo, principalmente na estação seca, a evapotranspiração (E) é mínima, tanto para caatinga, como para a agropecuária (Figura 6c). Após a conversão da cobertura vegetal para caatinga degradada, a evapotranspiração reduz 41%. Souza (2006), também verificou a redução da evapotranspiração após conversão da caatinga natural para semideserto, o que ocorreu em função da variação na fração de área vegetada. Sobre a área não vegetada predomina a evaporação do solo nu.

O *runoff* e o escoamento são nulos para ambas as coberturas (não mostrados). Os diferentes tipos de vegetação considerados nas simulações podem acarretar diferenças nos mecanismos de infiltração, escoamento, transpiração e, conseqüentemente, na umidade volumétrica do solo. Na Figura 6b observa-se que a umidade volumétrica do solo é maior para a caatinga degradada durante a maior parte do período de simulação. O cálculo da umidade volumétrica do solo no modelo IBIS é feito com base na equação de Richards, que é função de parâmetros relacionados à extração de água pelas raízes e da evapotranspiração da planta (Li et al. 2005), que por sua vez

é variável em função do tipo funcional de planta. Assim, após a conversão de caatinga natural para caatinga degradada, a evapotranspiração é reduzida, o que pode ter causado o aumento do conteúdo volumétrico de água no solo.

Com relação ao IAF, este, por sua vez, após a conversão da cobertura para a agropecuária e caatinga degradada torna-se menor. Essas modificações no IAF, além de afetarem a evapotranspiração, também ocasionaram alterações no balanço de carbono.

As Figuras 5i e 5j mostram NEE para as estações chuvosa e seca, respectivamente. A variação média do ciclo diurno de NEE, durante a estação chuvosa, apresentou um comportamento típico durante a noite, mantendo-se positivo, como resultado da combinação das emissões do solo e da respiração da própria vegetação, tornando o sistema solo-planta fonte de CO₂ para a atmosfera. Logo após o amanhecer, às 7h, a vegetação absorve o CO₂ atmosférico e as atividades fotoquímicas ocorrem com maior intensidade. No entanto, para a caatinga degradada, nesse mesmo período, NEE se manteve próximo de zero. Assim, durante a estação chuvosa a classe agropecuária, seguida da caatinga, é a classes que assimilou maiores quantidades de CO₂. Para a agropecuária, verificou-se um pico de $-4,6 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ às 12h e para caatinga um pico de $-2,8 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ às 11h. Durante a estação seca, o ciclo diurno médio de NEE apresentou apenas valores positivos para a caatinga natural e para a agropecuária, indicando que a fotossíntese foi minimizada nesse período devido à queda das folhas das árvores e arbustos, e consequente, diminuição da atividade metabólica do ecossistema (Figura 5j). As condições de baixa umidade do ar e as altas temperaturas são desfavoráveis à fotossíntese e a vegetação apresenta pequeno fechamento dos estômatos, evitando a perda excessiva de água por evaporação, diminuindo ainda as taxas de assimilação de CO₂, em conformidade com o ressaltado por Santos (2001). Assim, durante a estação seca, a vegetação atua como fonte de CO₂, porém com taxas muito baixas.

A produtividade primária líquida (NPP, sigla em inglês) é a taxa de armazenamento de matéria orgânica nos tecidos vegetais, desconsiderando a respiração pelas plantas. Na Figura 6d, pode-se observar valores mais baixos de NPP nos meses de junho à dezembro para ambas as coberturas, em decorrência dos baixos valores pluviométricos na região e, também, pela perda das folhas das árvores e arbustos durante a estação seca. Além disso, nota-se que com a conversão de caatinga para a agropecuária, NPP aumenta, indicando maior captura de CO₂ pela vegetação.

5. CONCLUSÕES

No presente trabalho o modelo IBIS foi utilizado como ferramenta para avaliar as consequências das mudanças

da cobertura da terra nas trocas de energia e massa entre a superfície continental e a atmosfera em uma região do semiárido do Brasil. Vale ressaltar que o modelo foi previamente calibrado e ajustado para a vegetação caatinga natural. No entanto, foi observado que o modelo IBIS ainda não calcula satisfatoriamente algumas variáveis, tais como o albedo e NEE, para o ambiente semiárido.

Nos experimentos em que a vegetação natural foi substituída por outro tipo de cobertura, observou-se alteração nas características biofísicas da vegetação que, por sua vez, contribuiu para modificações nos balanços de água, de energia e carbono à superfície. Nas simulações realizadas, o modelo IBIS foi forçado com os mesmos dados de entrada (temperatura do ar, precipitação, radiação solar, velocidade do vento e umidade do ar). Portanto, as alterações nas componentes dos balanços de energia, água e carbono resultaram das modificações das características morfológicas e biofísicas da vegetação após as conversões. A partir das alterações ocorridas no albedo da superfície, a energia total disponível na superfície foi reduzida e, conseqüentemente, todas as componentes do balanço de energia foram alteradas. Resultados semelhantes a estes foram obtidos por Oyama (2002) e Souza (2006), após fazerem a conversão da cobertura natural do NEB para deserto e semideserto, respectivamente.

As trocas turbulentas e o balanço de água à superfície são afetados pelas alterações do comprimento de rugosidade e das propriedades estomáticas da vegetação. A classe de vegetação tipo agropecuária tem a altura menor do que os arbustos da caatinga, por isso o comprimento de rugosidade e deslocamento do plano zero são reduzidos e, conseqüentemente, há uma redução nos processos de transporte turbulento de momentum, calor e massa na camada de ar acima da vegetação. A resistência estomática da classe de vegetação agropecuária é menor quando comparada com a da caatinga, e a da caatinga degradada é maior do que a da caatinga natural, o que corrobora para o aumento da evapotranspiração da conversão da caatinga natural para a agropecuária (principalmente nos meses chuvosos) e redução da evapotranspiração da conversão da caatinga natural para a caatinga degradada.

Na estação chuvosa, a agropecuária apresentou um maior consumo de CO₂ para realizar as funções ecofisiológicas do que a caatinga natural e a caatinga degradada, e picos mais altos de NPP, principalmente após períodos de chuva. Esses picos durante meses chuvosos para agropecuária também são verificados na curva da evapotranspiração anual, embora os valores sejam baixos. Embora os impactos no balanço de água não tenham sido significativos em função do baixo índice pluviométrico na região, as alterações que ocorreram na umidade volumétrica do solo foram significativas do ponto de vista das trocas entre o solo e a atmosfera, uma vez que a

umidade do solo exerce importante papel sobre o balanço local de umidade e de calor à superfície.

Este estudo foi realizado utilizando o modelo IBIS desacoplado de um modelo atmosférico. Estudos dos impactos climáticos da conversão da cobertura natural do NEB realizados por Oyama (2002) e Souza (2006), utilizando modelo de superfície acoplado, mostraram que as alterações da cobertura podem influenciar significativamente o albedo da superfície, o qual pode reduzir o saldo de radiação no topo da atmosfera, induzindo anomalias de subsidência para manter o equilíbrio térmico e, conseqüentemente, reduzir a convergência de umidade em baixos níveis causando, assim, o enfraquecimento do ciclo hidrológico.

Finalmente, este estudo mostrou como a substituição da vegetação natural da caatinga por agropecuária, bem como, a degradação da caatinga, podem causar modificações nos processos de superfície na região semiárida do NEB. As diferenças observadas referentes às conversões certamente induzem mudanças microclimáticas que, em uma escala regional, podem ser significativas, dependendo do tamanho da área convertida.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AUBINET, M., et al. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: the EUROFLUX methodology. **Ad. Ecological Research**, v. 30, p. 113-175, 2000.
- BETTS, R.A., **The impact of land use on the climate of present-day. In: Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling**. Edited by H. Richie. CAS/JSC WGNE Report, v. 28, 7.11-7.12, World Meteorological Organization, Geneva, 1999.
- CAMPBELL, G.S., NORMAN, J.M., 1998. **An Introduction to Environmental Biophysics**, Springer-Verlag, New York.
- CHARNEY, J. G. Dynamics of deserts and drought in the Sahel. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.101, p.193-202, 1975.
- CHARNEY, J. G.; QUIRK, W.J.; CHOW, S.H.; KORNFIELD, J.A. A comparative study of the effects of albedo change on drought in semi-arid regions. **Journal of Atmospheric Sciences**, v.34, n.9, p.1366-1385, 1977.
- CHASE TN, PIELKE RA, KITTEL TGF, NEMANI R, RUNNING SW. 2000. Simulated impacts of historical land cover changes on global climate in northern winter. **Climate Dynamics**, v.16, p.93-105, 2000.
- CLAUSSEN, M., BROVKIN, V., GANAPOLSKI, A. Biogeophysical versus biogeochemical feedbacks of large-scale land cover. **Geophysical Research Letters**, v.28, n.6, p. 1011-1014, 2001.
- CLARK, D.B., Y. XUE, R.J. HARDING, P.J. VALDES. Modeling the Impact of Land Surface Degradation on the Climate of Tropical North Africa. **Journal of Climate**, v.14, p. 1809-1822, 2001.
- COSTA, M. H., SILVIA, N. M., YANAGI, P. J. O., SOUZA, A. R., ROCHA, E. J. P. Climate change in Amazonia caused by soybean cropland expansion, as compared to caused by pastureland expansion. **Geophysical Research Letters**, v. 34, 2007.
- CUNHA, A. P. M. A., SAMPAIO, G., ALVALÁ, R. C. S., COSTA, M. H. Calibration and Validation of the Integrated Biosphere Simulator (IBIS) for Brazilian Semi-Arid Region. **Journal Applied Meteorology and Climatology** (Submetido), 2012.
- DEFRIES, R. S., FIELD, C. B., FUNG, J., COLLATZ, G. J., BOUNOUA, L. Combining satellite data and biogeochemical to estimate global effects of human-induced land cover change on carbon emissions and primary productivity. **Global Biogem. Cycles**, v. 13, p. 803-815, 1999.
- FARQUHAR, G.D., CAEMMERER, V.S., BERRY, J.A. A biogeochemical model of photosynthetic CO assimilation in leaves of C species, **Annual Review of Plant Physiology**, 149, 23 p. 78-90, 1980.
- FARQUHAR, G.D., SHARKEY, T.D., Stomatal conductance and photosynthesis. **Annual Review of Plant Physiology**, Boca Raton, **33**. p.317-345, 1982.
- FOLEY, J. A., PRENTICE, I. C., RAMANKUTTY, N., LEVIS, S., POLLARD, D., SITCH, S., HAXELTINE, A. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance and vegetation dynamics. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 10, n. 4, p.603-628, 1996.
- IQBAL, M. **An Introduction to Solar Radiation**. New York: Academic Press, 1980, 212p.
- INTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo agropecuário – 2006: Brasil, Grandes Regiões e Unidades da Federação. Rio de Janeiro, 2006. p.775. Disponível em: < <http://www.ibge.gov.br>>.
- KLEIDON, A., K. FRAEDRICH, M. HEIMANN, A green planet versus a desert world: Estimating the maximum effect of vegetation on the land surface climate, **Climatic Change**, 44, p. 471-493, 2000.
- KUCHARIK, C. J., FOLEY, C. D., DELIRE, C., FISHER, V. A., COE, M. T., LENTERS, J. D., YOUNG-MOLLING, C. RAMANKUTTY, N. Testing the performance of a dynamic global ecosystem model: Water balance, carbon balance, and vegetation structure. **Global Biogeochem. Cycles**, v.14, p.795-825, 2000.
- LI, K. Y., COE, M. T., RAMANKUTTY, N.: Investigation of hydrological variability in West Africa using land surface models, **Journal of Climate**, v. 18, p. 3173-3188, doi:10.1175/JCLI3452.1, 2005.

- MARENGO, J. Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima no semi-árido do Brasil. Parcerias Estratégicas. Brasília, DF. Dezembro de 2008.
- NOBRE, C. A.; SELLERS, P. J.; SHUKLA, J. Amazonian deforestation and regional climate change. **Journal of Climate**, v.4, p.957-988, 1991.
- 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. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v. 21, n. 3b, p. 166-174, 2006.
- OLIVEIRA, G. S. **Conseqüências climáticas da substituição gradual da floresta tropical amazônica por pastagem degradada ou por plantação de soja: um estudo de modelagem**. 2008. 417 p. (INPE-15263-TDI/1346). Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2008.
- OYAMA, M.D. **Conseqüências climáticas da mudança de vegetação no nordeste brasileiro: um estudo de modelagem**. Tese de doutorado em Meteorologia. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 181p. 2002.
- OYAMA, M. D.; NOBRE, C. A. Climatic Consequences of a Large-Scale Desertification in Northeast Brazil: A GCM Simulation Study. **Journal of Climate**, v. 17, n. 16, p. 3203-3213, 2004.
- PITMAN, A. J. E M. ZHAO, M. The relative impact of observed change in land cover and carbon dioxide as simulated by a climate model. **Geophysical Research Letters**, v. 27, p. 1267-1270, 2000.
- POLLARD, D.; THOMPSON, S. L. The effect of doubling stomatal resistance in a global climate model. **Global and Planetary Change**, v.10, p. 129-161, 1995.
- ROSS, J. L. S. **Geografia do Brasil**. 4. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2001.
- SANTOS, S. de N.M. dos. Modelo de fluxos de energia, água e CO₂ aplicado em ecossistema de floresta tropical. 80f. Dissertação (PósGraduação em Meteorologia Agrícola) – Programa de PósGraduação em Meteorologia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.
- SOUZA, S. S. **Impactos climáticos regionais da mudança de vegetação no semi-árido do Nordeste brasileiro**. 209 p. (INPE-14432-TDI/1131). Tese (Doutorado em Meteorologia). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2006.
- SOUZA, D. C., OYAMA, M. D. Climatic consequences of gradual desertification in the semi-arid area of Northeast Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 103, p. 345-357, 2011.
- SOYLU E., E. ISTANBULLUOGLU, J.D. LENTERS, WANG, T. Quantifying the Impact of Groundwater Depth on Evapotranspiration in a Semi Arid Grassland Region, **Hydrology and Earth System Sciences**, v.15, p.787-806, 2011.
- TAYLOR, C.M., E.F. LAMBIN, N. STEPHENNE, R.J. HARDING, R.L.H. ESSERY. The Influence of Land Use Change on Climate in the Sahel. **Journal of Climate**, v.15, p.3615–3629, 2002.
- THOMPSON, S. L.; POLLARD, E D. A global climate model (GENESIS) with a land-surface transfer scheme (LSX). Part I: Present climate simulation. **Journal of Climate**, v.8, p.732–761. 1995A.
- THOMPSON, S. L.; POLLARD, E D. A global climate model (GENESIS) with a land–surface-transfer scheme (LSX). Part II: CO₂ sensitivity. **Journal of Climate**, v.8, p.1104–1121. 1995B.
- TWINE, T. E. Effects of Land Cover Change on the Energy and Water Balance of the Mississippi River Basin. **Journal of Hydrometeorology**. v. 5, p. 640-655, 2004.
- VIEIRA, R. M. S. P., CARVALHO, V. C., ALVALÁ, REGINA, C. S., KALIL, E. M. , FERRAZ NETO, S. Melhorias no mapeamento do uso da terra da região Nordeste do Brasil para utilização em modelos meteorológicos e hidrológicos.. In: XIII Simpósio de Sensoriamento Remoto, 2007, Florianópolis. Anais do XIII SBSR. p. 1923-1930. 2007.
- XUE, Y., SELLERS, P. J., KINTER, J. L., SHUKLA, J. A simplified biosphere model for global climate studies. **Journal of Climate**, v. 4, n.3, p. 345-36, 1991.
- XUE, Y., SHUKLA, J. The influence of land surface properties on Sahel climate. Part I: Desertification. **Journal of Climate**, v.6, n.12, p.2232-2245, 1993.
- XUE, Y.; H.-M. H. JUANG, W.-P. LI, S. PRINCE, R. DEFRIES, Y. JIAO, R. VASIC. Role of land surface processes in monsoon development: East Asia and West Africa. **Journal of Geophysical Research**., v.109, D03105, doi:10.1029/2003JD003556. 2004.
- YANAGI, S. N. M. **Albedo de uma floresta tropical amazônica: Medições de campo, sensoriamento remoto, modelagem, e sua influência no clima regional**. 128 p. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.
- YANAGI, S. N. M.; COSTA, M. H. Modeling radiative transfer in tropical rainforest canopies: sensitivity of simulated albedo to canopy architectural and optical parameters. **Annals of the Brazilian Academy of Sciences**. v. 83, n. 4, p. 1231-1242. 2011.