



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

Herica Fernanda de Sousa Carvalho

**DINÂMICA DOS FLUXOS DE ENERGIA E ÁGUA NA
CAATINGA E CANA-DE-AÇÚCAR IRRIGADA NO
SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

JUAZEIRO – BA
2017

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

Herica Fernanda de Sousa Carvalho

**DINÂMICA DOS FLUXOS DE ENERGIA E ÁGUA NA
CAATINGA E CANA-DE-AÇÚCAR IRRIGADA NO
SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

Dissertação apresentada a Universidade Federal do Vale do São Francisco-UNIVASF, Campus Juazeiro-BA como requisito para obtenção do título de mestre em Engenharia Agrícola.

Orientadora: Prof. Magna Soelma Beserra de Moura.

Co-orientador: Prof. Thieres George Freire da Silva.

JUAZEIRO – BA
2017

| | |
|-------|--|
| | Carvalho, Herica Fernanda de Sousa |
| C331d | Dinâmica dos fluxos de energia e água na caatinga e cana-de-açúcar irrigada no Semiárido brasileiro / Herica Fernanda de Sousa Carvalho. -- Juazeiro-BA, 2017. |
| | X, 74f. ; 29 cm. |
| | Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Vale do São Francisco, Campus, Juazeiro-BA, 2017. |
| | Orientador (a): Prof ^ª . Dr ^ª Magna Soelma Beserra de Moura. |
| | 1. Uso da terra. 2. Balanço de energia 3. Evapotranspiração. 4. Alteração climática. I.Título. II. Moura, Magna Soelma Beserra de. III. Universidade Federal do Vale do São Francisco. |
| | CDD 551.572 |

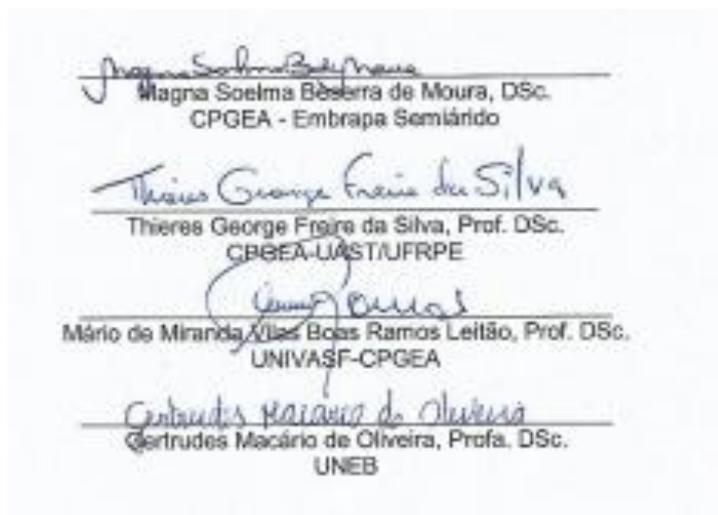
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

FOLHA DE APROVAÇÃO

Herica Fernanda de Sousa Carvalho

**DINÂMICA DOS FLUXOS DE ENERGIA E ÁGUA NA
CAATINGA E CANA-DE-AÇÚCAR IRRIGADA NO
SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de mestre em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal do Vale do São Francisco.



Juazeiro, 24 de março de 2017

Meu pai e avô José Ramos de Carvalho (*in memoriam*)

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Ao nosso Deus, pela força divina imposta durante toda à minha vida;

A orientadora professora, pesquisadora Magna Soelma Beserra de Moura pela paciência, ensinamentos e oportunidade de realizar a pesquisa, na qual aprendi muito, muitíssimo obrigada;

Ao co-orientador professor Thieres George Freire da Silva pelos conselhos, paciência, ensinamentos e pela grande contribuição nesta pesquisa, meus sinceros agradecimentos;

Ao professor Mário Miranda pelo incentivo nos estudos, ensinamentos, valiosos “puxões de orelha” que me fazem procurar melhorar profissionalmente a cada dia, e ainda suas contribuições na presente pesquisa, muito obrigada;

A todos da minha família “Carvalho”, meus considerados irmãos e irmãs, de modo especial a minha tia Lita, meu padrinho Vilmar, madrinha Rosilda, João Batista, José Raimundo, assim como seus cônjuges, aos meus primos e primas que vibram com minhas conquistas, torço muito pelas conquistas de vocês também;

Ao grupo de pesquisa Caatinga-FLUX da Embrapa Semiárido, composto por Joabe Almeida, ser humano de gentileza imensurável, muito obrigada; aos bolsistas e estagiários Geovane Silva, Joana Mayra, Micheli Lira, Leide Dayane, agradeço de coração. Aos colegas pós-graduandos Carlos Tiago, Clovis Ramos, muito obrigada. Todos vocês formam uma equipe determinada e responsável nos trabalhos, continuem assim;

Aos amigos que conquistei desde a graduação: Ebert Santos, Sabrina Souza, Eivaldo Júnior vocês serão sempre lembrados, agradeço por tudo! Geizibel Lopes, Verônica Silva, Rute Lopes, Maria Aparecida, Adriana, Camila, Alzeneide, obrigada pela companhia, carinho e força cedida nos momentos feliz e triste; e os colegas que conquistei durante o curso, serão sempre lembrados, torço muito pelo sucesso de todos;

A Embrapa Semiárido pela infraestrutura cedida para realização deste trabalho e FACEPE pelo apoio financeiro ao Projeto Caatinga-FLUX Fase 2 Processo APQ-0062-1.07/15;

A equipe do programa de pós-graduação em Engenharia Agrícola da Univasf, e a Capes pela bolsa concedida durante a pesquisa;

Em fim, a todos aqueles que contribuíram direto ou indiretamente para a realização desta pesquisa, agradeço.

CARVALHO, H. F. de S. **Dinâmica dos fluxos de energia e água na caatinga e cana-de-açúcar irrigada no Semiárido brasileiro.** 2017. 74f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Vale do São Francisco-UNIVASF, Juazeiro-BA.

RESUMO

A substituição da vegetação natural provoca efeito nas trocas de calor e água na interface superfície-atmosfera. Por esse motivo, é importante conhecer a dinâmica destas trocas e seus fatores controladores em regiões Semiáridas. Objetivou-se quantificar as alterações nas trocas de energia e massa causadas pela substituição da caatinga preservada por cana-de-açúcar irrigada e, identificar os principais fatores controladores do processo evapotranspirativo nessas superfícies. Realizou-se um estudo em uma área de caatinga preservada e de cana-de-açúcar irrigada sob as condições semiáridas no Submédio do Vale do São Francisco. Durante o período de junho de 2015 a maio de 2016 foram medidos, e ou determinados os componentes dos balanços de radiação e energia, elementos meteorológicos e índice de cobertura vegetal por meio de sensores instalados em torres micrometeorológica localizada no centro de cada área experimental. Adicionalmente realizou-se o monitoramento dos parâmetros biométricos da cana-de-açúcar. Os dados de cada superfície foram agrupados em períodos com base no volume e número de dias com chuva, totalizando cinco períodos. As duas superfícies foram comparadas em cada período, posteriormente, cada superfície foi avaliada em cada um dos períodos. E na identificação dos fatores controladores (ET) e a relação ET/ET_o, foram utilizadas variáveis meteorológicas e parâmetros de crescimento, analisados por meio da matriz de correlação de Pearson, diagnóstico de multicolinearidade, análise canônica e de trilha. A partir dos resultados verificou-se que as proporções dos fluxos de energia e massa nas superfícies são quantitativamente distintas durante todo o ano, com valores elevados de H e baixos valores (LE) na caatinga preservada, porém, induz a maior manutenção de energia, enquanto na cana-de-açúcar, aumenta gradativamente o fluxo de LE diante da boa condição hídrica, uma vez que é irrigada e há disponibilidade de energia durante todo ano. A dinâmica do crescimento da caatinga e da cana-de-açúcar no Submédio do Vale São Francisco não exibiram correlação significativa com a sazonalidade da evapotranspiração real destas superfícies. Na caatinga, a umidade do solo influenciou de modo direto e indireto na ET, da mesma forma que a radiação solar global alterou a resposta da evapotranspiração real à demanda atmosférica. Na cana-de-açúcar, a ET foi controlada direta e indiretamente pela radiação fotossinteticamente ativa interceptada e, temperatura do solo, sendo que esta última também afetou a razão evapotranspiração real e de referência. A substituição da caatinga pela cana-de-açúcar irrigada promove alterações significativas nos componentes dos balanços de radiação e energia, e por sua vez, na transferência de vapor d'água para a atmosfera, promovendo alterações no clima local e devendo ser considerada nos modelos de simulação hidrológicos e climáticos.

Palavras-chave: Uso da terra, Balanço de energia, Evapotranspiração, Alteração climática.

CARVALHO, H. F. de S. **Dynamics of energy and water flows in the caatinga and irrigated sugar cane in the Brazilian semi-arid region.** 2017. 74f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Vale do São Francisco-UNIVASF, Juazeiro-BA.

ABSTRACT

The substitution of natural vegetation causes an effect on the heat and water exchange at the surface-atmosphere interface. For this reason, it is important to know the dynamics of these exchanges and their controlling factors in semi-arid regions. The objective was to quantify the changes in energy and mass changes caused by the substitution of the caatinga preserved by irrigated sugarcane and to identify the main controllers of the evapotranspiration process in these surfaces. A study was carried out in an area of preserved caatinga and sugar cane irrigated under semi-arid conditions in the Submedia of the São Francisco Valley. During the period from June 2015 to May 2016, the components of the radiation and energy balances, meteorological elements and vegetation cover index were measured by means of sensors installed in micrometeorological towers located at the center of each experimental area. In addition, the biometric parameters of the sugarcane were monitored. The data of each surface were grouped in periods based on the volume and number of rainy days, totaling five periods. The two surfaces were compared in each period, after which each surface was evaluated in each of the periods. And in the identification of the control factors (ET) and ET / ETo ratio, meteorological variables and growth parameters were analyzed, using the Pearson correlation matrix, multicollinearity diagnosis, canonical and trail analysis. From the results it was verified that the proportions of the energy and mass fluxes in the surfaces are quantitatively distinct throughout the year, with high values of H and low values (LE) in the preserved caatinga, but it induces the greater maintenance of energy, While in sugarcane, it gradually increases the flow of LE before the good water condition, since it is irrigated and there is availability of energy throughout the year. The dynamics of caatinga and sugarcane growth in the Submedia of the São Francisco Valley did not show a significant correlation with the seasonality of the actual evapotranspiration of these surfaces. In the caatinga, soil moisture influenced directly and indirectly the ET, in the same way that the global solar radiation altered the response of the real evapotranspiration to the atmospheric demand. In sugarcane, the ET was directly and indirectly controlled by the intercepted photosynthetically active radiation and soil temperature, and the latter also affected the real and reference evapotranspiration ratio. The replacement of the caatinga by the irrigated sugar cane promotes significant changes in the components of the radiation and energy balances, and in turn, the transfer of water vapor to the atmosphere, promoting changes in the local climate and should be considered in the models Hydrological and climatic simulation.

Keywords: Land use, Energy balance, Evapotranspiration, Climate change

SUMÁRIO

| | |
|-----------------------------------|----|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 10 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 12 |
| 2.1 Balanço de radiação..... | 12 |
| 2.2 Balanço de energia..... | 13 |
| 2.3 Evapotranspiração..... | 16 |
| 2.4 Mudanças do uso da terra..... | 18 |
| 3. ARTIGO 1..... | 20 |
| 4. ARTIGO 2..... | 41 |
| 5. CONCLUSÃO GERAL..... | 56 |
| 6. REFERÊNCIAS..... | 57 |

1. INTRODUÇÃO

No Nordeste do Brasil, região semiárida, entre o oeste do estado de Pernambuco e norte do estado da Bahia, encontra-se a Bacia hidrográfica do Submédio do Vale São Francisco, recoberta pela vegetação caatinga, ecossistema esse que abrange 844. 453 km² e ocupa 11% do território nacional (MMA, 2015). Predomina vegetação do tipo xerófila e caducifólia, composta por diversas espécies arbóreas e arbustivas. O clima local é sazonal, com meses chuvosos de janeiro a abril e longo período de estiagem durante os meses de maio a dezembro que, associado à elevada incidência de radiação solar provoca altos valores de evapotranspiração potencial, resultando em baixa disponibilidade de água para as plantas (MOURA et al., 2007a).

Nessa região do Submédio do Vale São Francisco existe extensas áreas agrícolas irrigadas de exploração comercial de diversas frutíferas, olerícola e cana-de-açúcar, esta última, ultrapassa 15.132 ha (IBGE, 2014), responsáveis por importantes indicadores sociais e econômicos da região, cujo sucesso produtivo se deve ao uso da irrigação, às condições edafoclimáticas adequadas durante todo o ano, associados a utilização de tecnologias agrícolas. Nessa região os rios são temporários com raras exceções como o Rio São Francisco, que tem 52% de sua bacia hidrográfica inserida no Semiárido brasileiro, responsável pelo desenvolvimento de grandes projetos agrícolas irrigados ao longo de sua extensão (TEIXEIRA et al., 2008a), promovendo e intensificando a mudança do uso da terra.

A retirada da vegetação nativa demasiadamente altera o nível de cobertura vegetal, conseqüentemente o balanço de radiação e energia em escala local, levando a mudanças na hidrologia e no clima (DAVID et al., 2011; SPRACKLEN et al., 2012; CHAMBERS & ARTAXO, 2017). Mudanças ocasionadas por alterações físicas na superfície repercutem nos processos de interação entre a superfície e atmosfera resultando em condições inadequadas para o desenvolvimento de atividades agropecuárias e sobrevivência do homem.

Trabalhos realizados por Melo et al. (2014) e Souza et al. (2015a) indicaram que, a redução no teor de vapor d'água na atmosfera normalmente referenciados como o déficit de pressão de vapor de saturação é um forte controlador da evapotranspiração em áreas de caatinga. Já em áreas agrícolas, no caso da cana-

de-açúcar irrigada no semiárido, o controle fica sob a energia disponível (SILVA et al., 2013). Em outras regiões de clima semiárido estudos indicam que a umidade relativa do ar, velocidade do vento e precipitação, condicionados pela vegetação e topografia, são os fatores controladores do processo de evapotranspiração (ZANG et al., 2016 a, b)

Dentre os métodos micrometeorológicos que se baseiam no balanço de massa e energia destaca-se: correlações turbulentas, razão de Bowen e método aerodinâmico (MOURA et al., 2011). Medidas micrometeorológicas já foram realizadas na caatinga (OLIVEIRA et al., 2006a; TEIXEIRA et al., 2008a; SANTOS et al., 2012; SOUZA, et al., 2015a, b) e extensas áreas de monocultivo de fruteiras e cana-de-açúcar (SOARES et al., 2003; TEIXEIRA et al., 2008a, b; MOURA et al., 2011; SILVA et al., 2011) mostrando a forte sazonalidade da densidade de fluxos de energia e massa ao longo do tempo. Porém, informações realizadas ao mesmo tempo em área de vegetação preservada e monocultivo de cana-de-açúcar irrigada em ambiente semiárido são escassas e precisam ser investigados.

Portanto, a comparação dos processos de interação superfície-atmosfera nesses dois tipos de superfície em ambiente semiárido é útil, logo, que é uma das regiões mais vulneráveis a mudança de clima, e cada vez mais enfrenta longos períodos do ano sem chuva (MARENGO et al., 2008). Assim como identificar os principais condicionadores da evapotranspiração visando proporcionar melhorias nas respostas de modelos hidrológicos, climatológicos e tomadores de decisões na elaboração de políticas públicas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Balanço de radiação

A radiação solar global (R_g) influencia todas as outras variáveis meteorológicas por ser a principal fonte de energia. Ao percorrer a atmosfera sofre múltiplos processos de espalhamento, absorção e reflexão. Parte desta radiação é refletida pelas nuvens e espalhada na atmosfera. Com isso, apenas uma parte atinge diretamente a superfície da terra, enquanto o restante representa as contribuições difusa e térmica da atmosfera (LIOU, 2002).

O balanço de radiação resulta no saldo de radiação (R_n) compreendendo a contabilização do balanço de ondas curtas (BOC) e balanço de ondas longas (BOL) terrestre. O BOC representa a contabilidade dos fluxos de radiação solar global (R_g) que alcança, e é refletida (R_r) pela superfície. A R_g possui duas componentes: a direta (R_c) e a difusa (R_d). Por outro lado, o BOL é a diferença entre os fluxos radiativos de energia emitidos pela superfície terrestre (R_s) e atmosfera (R_a) (ARYA, 2001).

O conhecimento dos processos radiativos recebidos na superfície e atenuados na atmosfera é fundamental para compreender a redistribuição de água e energia (BASTIANSEN et al., 1998). Logo, o saldo de radiação (R_n) é a energia destinada para os processos físicos, químicos e biológicos que ocorre na biosfera, sendo importante na estimativa de perdas de água de superfícies vegetadas, que é necessário em diversas aplicações, dentre elas, planejamento agrícola e gerenciamento de recursos hídricos (OLIVEIRA et al., 2013).

Medidas de cada componente do balanço de radiação são relativamente complexas e de alto custo, exigindo estruturas específicas para instalação de equipamentos sobre o dossel vegetativo (PILAU & ANGELOCCI, 2014). Informações sobre cada componente de radiação têm se concentrado mais na região da Amazônia (SOUZA FILHO et al., 2006) por ser uma das maiores fontes de calor para a atmosfera global. Toda via, estudos sobre as magnitudes dos componentes do balanço de radiação em casos de substituição da vegetação natural também se concentram nesta região (HAHOE, 2011; SWANN et al., 2015), em contrapartida

poucos estudos tem sido desenvolvidos em outras regiões, sobretudo no bioma Caatinga.

Apenas Teixeira et al. (2008a, b) estudou a sazonalidade e a relação dos componentes do balanço de radiação na caatinga e cultivos irrigados. Estes autores verificaram que os componentes e suas relações variaram em resposta ao nível de cobertura vegetal, suprimento de energia e volume de precipitação. Na cana-de-açúcar irrigada em Juazeiro-BA, Silva et al. (2011) verificaram que variações nos balanços de ondas curtas e longas ocorrem principalmente em função do índice de cobertura vegetal ao longo do ciclo.

2.2 Balanço de energia

O balanço de energia resume-se na partição do saldo de radiação após ter efetuado as trocas radiantes de energia que entra e sai da superfície (OMETTO, 1981). Próximo da superfície e de forma simplificada é dividido em fluxo de calor sensível (H) utilizado no aquecimento do ar; fluxo de calor latente (LE) que promove a transferência de água para a atmosfera e o fluxo de calor no solo (G) destinado ao aquecimento do solo, e complementa com a energia destinada aos processos e sínteses biológica, que é desconsiderado no cômputo do balanço de energia, tendo em vista representar menos que 3% do R_n (PEREIRA et al., 2002).

Várias técnicas são utilizadas para medida ou determinação dos componentes do balanço de energia em diversas superfícies, como o método aerodinâmico, correlações turbulentas e da razão de Bowen (LIMA et al., 2011). Dentre estas, se destaca a técnica baseada na Razão de Bowen (β) primeiramente descrito por Bowen (1926) avaliando a demanda energética de uma superfície hídrica com medidas de R_n e G, estimando os fluxos de calor latente e sensível, por meio de medidas do gradiente vertical de temperatura do ar e pressão de vapor determinados em dois níveis acima da superfície estudada.

O uso desta técnica micrometeorológica, razão de Bowen, se tornou confiável apresentando simplicidade e vantagens como a não necessidade de informações sobre o perfil da velocidade média do vento, das propriedades de

rugosidade da superfície e estabilidade atmosférica, quando comparada ao método aerodinâmico e das correlações turbulentas (ZHANG et al., 2008).

Todavia, Perez et al. (1999), estudando o método da razão de Bowen (β), propôs algumas particularidades que devem ser satisfeitas para consistência dos dados de β , como: necessidade dos sensores que medem os gradientes de temperatura do ar e pressão de vapor estarem instalados dentro da camada limite; e em condições de atmosfera neutra, a razão entre os fluxos de calor sensível e latente ser igual a unidade, não atendendo-as, pode ocasionar erros na estimativa de evapotranspiração.

Diversas pesquisas mundiais foram conduzidas por meio do método do balanço de energia baseado na razão de Bowen com o objetivo de avaliar o consumo hídrico de culturas, bem como determinar a evapotranspiração. Na Austrália Inman-Bamber & McGlinchey (2003) determinaram a evapotranspiração para a cana-de-açúcar, encontrando resultados satisfatórios semelhantes ao da FAO. Tahiri et al. (2006) quantificaram a evapotranspiração da cultura, determinaram a evaporação do solo e obteve a transpiração do milho no Japão. E Moran et al. (2009) determinaram a evapotranspiração por meio da técnica de Bowen, em ecossistemas e pastagens no sudeste do Arizona-EUA.

No Brasil, a aplicação desta técnica vem sendo bem sucedida, obtendo resultados consistentes, como aqueles realizados por Righi (2004); Marin et al. (2005); Cabral et al. (2003), dentre outros. No Semiárido brasileiro, mais especificamente no Submédio do Vale do São Francisco foram realizadas pesquisas utilizando essa metodologia, principalmente sobre superfícies irrigadas. Teixeira et al., (2007) verificaram os processos de energia e água em videiras irrigada durante dois ciclos, e constatou que 18% foi destinado ao aquecimento do ar em ambos os ciclos, enquanto 83% e 78% foram convertidos em LE.

Na cana-de-açúcar, Silva et al. (2010) verificaram que o (LE) foi respondeu por 81% da energia disponível no sistema, enquanto o fluxo de calor sensível 16%, e fluxo de calor no solo 3%. Lima et al. (2011) verificaram a partição do saldo de radiação na cultura do feijão caupi cultivado sob condições de sequeiro no município de Areia-PB, no período de julho a outubro de 2003, e constataram que em média, 65% do saldo energético converteu-se na forma de calor latente, 23% na forma de calor sensível, e 12% no aquecimento do solo.

Outra técnica micrometeorológica muito utilizada na medição de fluxos de energia e água é de correlações turbulentas, que se baseia em medidas de alta frequência da velocidade do vento, vapor d'água, CO₂ e flutuações dos turbilhões na camada limite. Nesta técnica a única exigência para os fluxos se tornarem consistentes, é que os sensores precisam ser instalados dentro da camada limite, onde os fluxos são aproximadamente constantes, porém, como desvantagem o custo de equipamentos são muito caros (FOKEN, 2008).

De acordo com Allen et al. (2011), quando os equipamentos são instalados respeitando as recomendações técnicas, a mensuração dos dados é consistente e muito utilizados, principalmente na quantificação da evapotranspiração, sendo aplicado com sucesso para medir evaporação dos dosséis florestais (BALDOCCHI & MEYERS, 1991; WILSON et al., 2001). No Brasil, esta técnica tem sido aplicada tanto em áreas irrigadas, como em áreas de sequeiro.

No município de Cachoeira do Sul-RS, Sena (2012) verificou o fechamento do balanço de energia, utilizando a técnica das correlações turbulentas, em área de arroz irrigado verificando boa correlação dos componentes do balanço de energia, nas condições de solo seco, irrigado e irrigado + cultura, o fechamento apresentou um coeficiente de determinação (R^2) de 0,82, 0,75 e 0,68 nesta ordem. No Cerrado, Fernando e Nery (2015) avaliaram a dinâmica dos fluxos em vegetação natural e verificaram que os fluxos de calor seguem o padrão de energia disponível no ambiente, com maiores valores de LE ocorrendo nos meses chuvosos e menores nos meses sem chuva, demonstrando a importância da disponibilidade de água condicionada pelas condições de tempo na regulação dos fluxos.

Trabalhos similares foram realizados no Semiárido nordestino por Oliveira et al. (2006a), avaliando as trocas de energia e CO₂ entre a superfície e atmosfera na caatinga, durante o período de julho de 2004 a julho de 2005; e por Teixeira et al. (2008a, b) que estudaram o comportamento do balanço de energia em superfícies irrigada e vegetação natural. Ambas as pesquisas, constataram que a maior partição do saldo de energia foi destinada ao aquecimento do ambiente na vegetação natural.

Santos et al. (2009) no distrito de Quixere-CE, verificaram o comportamento do fechamento dos componentes do balanço de energia, obtidos por meio da técnica de correlações turbulentas na cultura da banana, durante o período seco e úmido, e obtiveram R^2 de 0,93 e 0,86 respectivamente. Carneiro et al. (2013) avaliando a

variação sazonal do Rn e fluxo de calor no solo (FCS), em área de reserva, da Mata atlântica e área de cana-de-açúcar, no município de Cururipe-AL obtiveram valores de Rn e FCS elevados na cana-de-açúcar em relação a reserva devido a presença densa de cobertura do solo na floresta amenizando a magnitude de ambos.

Souza et al. (2015a), verificaram a variação sazonal dos componentes do balanço de energia, bem como os parâmetros biofísicos que governam a transferência de água para a atmosfera, durante um ano de seca intensa no município de Petrolina-PE, e constataram que a maior parte da energia disponível destinou-se ao aquecimento do ar, enquanto a evapotranspiração ficou extremamente dependente do déficit de pressão de vapor.

2.3 Evapotranspiração

Informações sobre medida ou estimativa da densidade do fluxo de calor latente indica a utilização de parte da energia disponível por uma comunidade vegetal no processo de transferência de vapor d'água para a atmosfera por transpiração, e/ou simultaneamente a transferência de água para a atmosfera por evaporação da água do solo, denominado de evapotranspiração (PEREIRA et al., 1997). Este processo em superfícies vegetadas é condicionado pela partição da energia disponível, pela disponibilidade de água no solo, pelas propriedades físicas da superfície, umidade do ar, características intraespecíficas das plantas, etc.

O conhecimento dos fatores que influenciam na dinâmica do processo evapotranspiratório é importante; visto que esse processo possui alta relevância no ciclo hidrológico; útil no planejamento dos recursos hídricos, avaliação ambiental e modelagem do tempo e clima, além de ser essencial para o adequado planejamento agrícola, visando o incremento da produção agrícola e lucratividade (CAMPOS et al., 2008).

Nos meses sem chuva em regiões semiáridas, a demanda evaporativa da atmosfera é o fator que mais influencia no transporte de calor e água na interação solo-planta. Logo, o impacto deste, depende da atuação de elementos meteorológicos como: radiação solar, temperatura e umidade relativa do ar e vento (PEREIRA et al., 1997). A radiação solar, principal fonte de energia responsável pelo

aquecimento da superfície e do ar, em maior ou menor magnitude, depende da localização geográfica da região e da época do ano. Normalmente, quando a temperatura do ar diminui, aumenta a umidade relativa do ar, que atuam em conjunto, condicionando a pressão de vapor (MEDEIROS et al., 2003). O vento aumenta a intensidade de evaporação, renovando o ar das superfícies (PEREIRA et al., 2002).

Além dos fatores meteorológicos que influenciam no processo evapotranspiratório, outro importante, é as características das plantas, como tipo de espécie vegetal, uma vez que a variação da arquitetura foliar, tamanho da folhagem, crescimento da planta, e mecanismos fisiológicos das trocas gasosas são importantes para entender a dinâmica deste processo. Ademais, tipo e manejo do solo como salinidade, fertilidade do solo, e nível de compactação podem limitar o crescimento das plantas e reduzir a evapotranspiração (ALLEN et al. 1998).

A evapotranspiração real de cultivos agrícolas como cafezal e maracujá foi determinada utilizando a técnica razão de Bowen (MARIN, 2003; SILVA et al., 2007), em floresta de transição, foi obtida pela covariância dos vórtices turbulentos, razão de Bowen e Priestley-Taylor (ARRUDA et al., 2006).

No Submédio do Vale do São Francisco, Teixeira, (2001), Teixeira et al. (2007), Silva et al. (2011) e Azevedo et al. (2003) determinaram a evapotranspiração real nas culturas da banana, vinhedos, cana-de-açúcar e videira, respectivamente por meio do balanço de energia usando a técnica de Razão de Bowen. Já a Técnica de correlações turbulentas foi utilizada por Teixeira et al. (2008^a), e Souza et al. (2015), ambos para medir a evapotranspiração.

2.4 Mudanças de uso da terra

Os ecossistemas áridos e semiáridos cobrem em média 40% da superfície continental, correspondendo a uma área significativa do sistema climático da Terra (KRISHNAN et al., 2012); onde no Brasil, a área considerada semiárida equivale a 11% do território nacional (MMA, 2015). Essa região possui solos rasos com média e alta fertilidade, escassez e irregularidade de chuvas, além de elevadas taxas de

evapotranspiração potencial (OLIVEIRA et al., 2010). Quase coincidente com os limites do Semiárido brasileiro, o Bioma Caatinga é o único com distribuição geográfica restrita ao Brasil (EMBRAPA, 2007). A vegetação da Caatinga é composta por grande diversidade de espécies da fauna e flora, que em geral possuem adaptações e características para suportarem as elevadas temperaturas e o déficit hídrico prolongado.

De acordo com dados do Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2015), esse bioma vem desaparecendo ao longo dos anos, principalmente devido à ação antrópica; onde 46% de área já foram modificadas, principalmente para fins agrícolas, pastoreio e extração de madeiras para lenha. Esse desmatamento é preocupante e pode provocar impactos ambientais, por ser uma das regiões mais vulneráveis a mudanças climáticas, por ter longo período anual quente e seco, e ainda exploração desordenada e insustentável dos recursos naturais (MARENGO et al., 2011).

Pesquisas sobre substituição de vegetação nativa permite uma melhor compreensão dos papéis relativos do clima versus vegetação, nos processos de troca de energia e água, visando obter respostas de como os ecossistemas responderão a futuras perturbações físicas e biológicas. Torna-se essencial investigar os processos destas trocas em diferentes ecossistemas, durante vários anos para esclarecer os mecanismos que controlam os ciclos de água, carbono e outros processos ecossistêmicos (KRISHNAN et al., 2012).

Supostamente, mudanças que vem ocorrendo sazonalmente na quantidade de chuvas e no aumento da temperatura, provocando elevados déficits hídricos, estão associados à mudança climática global e provavelmente; podem contribuir para aumento de áreas áridas e semiáridas em todo o mundo. Estudos sobre o processo de troca de energia, vapor d'água e CO₂ em pastagens temperadas e ecossistemas agrícolas (SUYKER & VERMA, 2008) e em savanas semiáridas e pastagens (SCOTT et al., 2009, CHEN et al., 2009, BOWLING et al., 2010), indicam uma considerável variação intrasazonal e interanual nos componentes do balanço de energia em superfície. No entanto, relativamente, poucos estudos têm sido realizados no Brasil, para caracterizar a resposta quantitativa dos fluxos de energia em vegetação nativa e cultivos agrícolas em ambiente semiárido.

Estudos desta natureza tem foco voltado principalmente para à região Amazônica, devido à enorme conversão de áreas florestadas por ação antrópica

(TATSCH, 2006), sendo um tema pouco estudado e entendido nas demais regiões e ecossistemas brasileiros. Souza et al. (2013), estudando dois diferentes ecossistemas na região amazônica, monocultivo de soja e Floresta Nacional de Caxuanã, concluíram que o principal responsável pelos impactos ambientais da mudança de uso da terra foi o elevado valor do albedo para a soja, e a perda de radiação de ondas longa em relação a vegetação nativa.

Hayroe et al. (2011), estudando a dinâmica dos fluxos de escoamento da água na superfície do solo, advindos de diferentes ecossistemas na região Amazônica, verificaram que a conversão de terras para cultivo de soja, aumenta o escoamento cerca de 3 vezes mais em comparação com áreas florestais, deste modo, a água que precipita não retorna para a atmosfera na mesma proporção, ocasionando déficit de vapor d'água na atmosfera. Estas mudanças no ciclo da água, segundo Spraklen et al. (2012) modificam o retorno da precipitação em escala local. Estudo mais recente sobre os efeitos da mudança no uso da terra na Amazônia, elaborado por Chambers & Artaxo (2017) confirmam mudanças no comportamento da precipitação por meio de alterações na rugosidade da superfície, observando pequenos pontos de clareiras de porte médio e de desmatamento, desde a década de 80 até 2000 na região da Amazônia.

Swann et al. (2015) confirmaram que a diminuição da vegetação nativa conduz a uma diminuição da umidade, e conseqüentemente, diminui a transferência de vapor d'água para a atmosfera, decorrente da mínima transpiração por área foliar. Fernandes e Nery (2015), conduzindo estudos no município de Assis-SP, visando analisar a sazonalidade da interação entre a vegetação e a atmosfera no Cerrado, por meio da análise dos fluxos de energia, mostraram que a disponibilidade de água condicionada pela dinâmica das condições ambientais, aparece como regulador do fluxo de calor latente, enquanto a falta de água na estação seca provoca decréscimo do fluxo de calor latente; uma grande parte da energia disponível no ambiente é usada para aquecer o ar, uma vez que a evapotranspiração diminuiu.

No Submédio do Vale do São Francisco, a expansão de áreas agrícolas tem se tornado muito expressiva, visto que as condições de clima e solo, associadas ao uso da irrigação favorecem produtividade de diversas frutíferas, olerícolas e cana-de-açúcar durante todo ano. Porém, essa expansão agrícola ocorre em áreas que

originalmente eram ocupadas pela caatinga, promovendo alterações na cobertura vegetal (SÁ et al., 2010).

No entanto, estudos que quantificam a densidade de fluxos de energia e água em diferentes tipos de cobertura vegetal são escassos com exceção de Lima et al., (2009) que avaliou pastagem e caatinga; Siqueira et al., (1998) comparando microclimas de caatinga preservada e área reflorestada com algarobas; Teixeira et al. (2008a) avaliaram cultivos agrícolas e caatinga preservada, sazonalmente durante dois anos. Cunha et al. (2013) avaliaram a substituição da vegetação natural por pastagens e caatinga degradada por meio de modelos de simulação e verificaram alterações no balanço de energia, água e carbono. Estas medidas não foram efetuadas simultaneamente nas superfícies e não foram feitas nenhum tipo de análise estatística, sobretudo com o cultivo da cana-de-açúcar em ambiente semiárido

Comparação dos Fluxos de Energia e Massa de caatinga Preservada e Cana-de-Açúcar Irrigada no Semiárido Brasileiro

Resumo

Objetivou-se avaliar as alterações nos fluxos de energia e massa proporcionadas pela substituição da caatinga pelo monocultivo da cana-de-açúcar irrigada em ambiente Semiárido brasileiro. Para tanto, foram analisados os componentes dos balanços de radiação, energia e parâmetros ambientais correspondentes ao período de junho de 2015 a maio de 2016. No centro de cada área experimental foi instalado uma torre micrometeorológica equipada com vários sensores eletrônicos. Para determinar os componentes do balanço de energia, na caatinga utilizou-se a técnica das correlações turbulentas, e na cana-de-açúcar da Razão de Bowen; adicionalmente determinou-se o índice de cobertura vegetal. Verificou-se que, a maior parte dos componentes do balanço de radiação e energia da área de caatinga mostraram diferença significativa ($p > 0,05$) em relação à área de cana-de-açúcar. Durante todos os períodos analisados a caatinga utilizou a maior parte da energia disponível para aquecimento do ar, enquanto a cana-de-açúcar foi na injeção de vapor d'água para atmosfera uma vez que é irrigada e há disponibilidade de energia. Desta forma, a substituição da vegetação nativa por cana-de-açúcar irrigada altera os componentes de energia e água promovendo alterações no clima local.

Palavras-chave: mudança de uso da terra, alteração climática, balanço de energia, evapotranspiração.

Comparison of Energy Flows and Mass of Preserved caatinga and Irrigated Sugar Cane in the Brazilian Semi-Arid

Abstract

The objective of this study was to evaluate the changes in the energy and mass fluxes provided by the substitution of the caatinga for the irrigated sugarcane monoculture in a semi-arid Brazilian environment. For that, the components of the radiation, energy and environmental parameters corresponding to the period from June 2015 to May 2016 were analyzed. At the center of each experimental area was installed a micrometeorological tower equipped with several electronic sensors. In order to determine the components of the energy balance, in the caatinga the technique of turbulent correlations was used, and in the sugarcane of the Bowen Reason; Additionally, the vegetative cover index was determined. It was verified that, most of the components of the radiation and energy balance of the caatinga area showed a significant difference ($p > 0.05$) in relation to the area of sugarcane. During all the analyzed periods, the caatinga used most of the energy available for heating the air, while the sugarcane was in the injection of water vapor into the atmosphere once it is irrigated and there is availability of energy. In this way, the substitution of native vegetation for irrigated sugar cane alters the energy and water components promoting changes in the local climate.

Key words: land use change, climate change, energy balance, evapotranspiration

1. Introdução

A Caatinga é um bioma exclusivamente brasileiro, ocupa 11% do território nacional (MMA, 2015), caracterizado por formações vegetais arbóreo-arbustivas, sobretudo com

espécies leguminosae (Souto et al., 2009). Apesar de sua vasta extensão territorial, este bioma vem sendo modificado de forma acelerada e segundo dados do MMA (2015), o desmatamento já chega a 46% da área total.

Na região do Submédio do Vale do São Francisco, especificamente nas cidades de Petrolina-PE e Juazeiro-BA, a retirada de vegetação natural ocorreu com a expansão da atividade agrícola, principalmente para plantio de culturas irrigadas nas últimas décadas, com destaque para diversas frutíferas e cana-de-açúcar. Esta última, já ocupa área superior a 15.132 ha (IBGE, 2014), representando extensa área de monocultivo com alta relevância socioeconômica na região.

Estudos indicam que a substituição da vegetação nativa por monocultivos altera o nível de cobertura vegetal e, logo, o balanço de radiação e energia em escala local, ocasionando mudanças na hidrologia e no clima (David et al., 2011; Spraklen et al., 2012; Chambers & Artaxo, 2017).

Medições micrometeorológicas em áreas de caatinga (Oliveira et al., 2006; Teixeira et al., 2008; Souza et al., 2015a, b) e de cana-de-açúcar (Silva et al., 2011) já foram conduzidas no Submédio do Vale do São Francisco, mostrando a forte sazonalidade da densidade de fluxos de energia e massa ao longo das estações do ano e em função do regime hídrico, em processo de feedback com a dinâmica vegetal.

No entanto, pesquisas conduzidas simultaneamente, de modo a inferir quais as principais alterações microclimáticas promovidas pela substituição da caatinga por áreas de cultivo de cana-de-açúcar irrigada ainda são incipientes. Desta forma, o objetivo deste trabalho é avaliar as alterações dos fluxos de energia e massa proporcionadas pela substituição da caatinga pelo monocultivo da cana-de-açúcar irrigada em ambiente Semiárido brasileiro.

2. Dados e Metodologia

O experimento foi realizado simultaneamente entre junho de 2015 a maio de 2016, em dois sítios experimentais: um de caatinga preservada e outro de cana-de-açúcar irrigada, localizados na região do Submédio do Vale São Francisco. A condição climática das regiões é semelhante, segundo a classificação de Köopen, o clima é do tipo BSw^h, tropical semiárido, com temperatura do ar variando de 20,7 °C a 32,1 °C, mínima e máxima, média de 26,4 °C, umidade relativa do ar média de 62% e precipitação anual de 520 mm (Embrapa Semiárido, 2015).

O sítio de caatinga preservada se encontra no município de Petrolina-PE, em áreas da Embrapa Semiárido (09°05'S; 40°19'O; 350 m de altitude). Ocupa 600 ha, preservada há mais de 35 anos, solo do tipo Argissolo Amarelo Eutrófico, composta por espécies de porte arbóreo-arbustivo, caráter espinhento, hiperxerófila, caducifólias, com folhas pequenas e altura variando de 4 a 7 m.

Por sua vez, o cultivo agrícola de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* spp.) foi conduzido no município de Juazeiro-BA, na empresa Agroindústria do Vale do São Francisco (09°26'S; 40°19'O; 396 m de altitude). A área plantada foi de 13,97 ha, solo do tipo Vertissolo, 3º ciclo produtivo, variedade VAT 90-212, fileiras em espaçamento duplo de 1,3 m x 1,0 m, irrigada por gotajamento sub-superficial, no qual as lâminas de água foram calculadas com base na evapotranspiração de referência, calculada por meio do método de Penman-Monteith parametrizado no boletim 56 da FAO (Allen et al., 1998), a partir de dados meteorológicos coletados de uma estação automática situada próxima a área experimental.

Em cada sítio experimental foi instalada uma torre micrometeorológica equipada com sensores eletrônicos para quantificação dos componentes do balanço de radiação, energia e demais parâmetros ambientais. Na caatinga, a torre era de 16 m de altura, com

dois sistemas de medidas, um em baixa frequência para medições dos componentes do balanço de radiação (CNR1 Net radiometer, Kip & Zonen, B.V. Delft Netherlands), temperatura e umidade relativa do ar (HMP45, Vaisala, Finlândia) e precipitação (CS700-L, Hydrological Services Rain Gage, Liverpool, Austrália). No solo foi instalado o termistor CS107 (Campbell Scientific, INC, Logan, Utah, USA), para medição da temperatura do solo, e fluxo de calor no solo medido através do fluxímetro HFT3-REBS (Campbell Scientific, INC, Logan, Utah, USA)

Já o sistema de alta frequência realizava medidas em 10 Hz, composto por um anemômetro sônico tridimensional (CSAT-3, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, EUA) para medição das flutuações da velocidade do vento e temperatura do ar, e um analisador de gás ao infravermelho (LI-7500, LI-COR, Inc. Lincoln, NE, EUA) para obtenção da concentração de vapor d'água.

Os dados do balanço de energia, fluxo de calor sensível (H) e latente (LE) deste sítio foram obtidos por meio do método das correlações turbulentas, utilizando o software Alteddy, considerando as Eqs. 1 e 2:

$$H = \rho_a C_p \overline{W'T'} \quad (1)$$

$$LE = L \overline{W'q'} \quad (2)$$

em que:

LE - fluxo de calor latente ($W m^{-2}$);

H - fluxo de calor sensível ($W m^{-2}$);

L - calor latente de vaporização ($KJ Kg^{-1}$);

W - desvio instantâneo da velocidade do vento em relação ao valor médio ($m s^{-1}$);

q' - desvio instantâneo da densidade vapor d'água em relação a valor médio ($Kg m^{-3}$);

ρ_a - densidade do ar ($Kg m^{-3}$);

C_p - calor específico do ar à pressão constante ($KJ Kg^{-1}$);

q - umidade específica (g g^{-1});

T - temperatura do ar (K°).

Por sua vez, no sítio da cana-de-açúcar a torre era de 8 m, equipada com vários sensores de baixa frequência, semelhante aos descritos para o sítio caatinga. Ademais, foi instalado três conjuntos psicrométricos ventilados, para medir temperatura do bulbo seco e temperatura do bulbo úmido, posicionados a 0,50; 2,0 e 3,5 m sobre a cultura, realocados conforme o crescimento das plantas. O saldo de radiação (R_n) e fluxo de calor no solo (G) foram medidos, enquanto o LE e H foram estimados, utilizando o método do balanço de energia da razão de Bowen (β) aplicando os critérios definidos na metodologia de Perez et al. (1999), conforme as Eqs. 3 e 4.

$$LE = \frac{R_n - G}{1 + \beta} \quad (3)$$

$$H = \frac{\beta(R_n - G)}{1 + \beta} \quad (4)$$

em que:

β - razão de Bowen (adimensional).

A razão de Bowen (β) foi determinada por meio da expressão psicrométrica conforme Righi et al. (2007), apresentada na Eq. 5.

$$\beta = \left(\frac{\Delta + \gamma}{\gamma} \frac{(t_{bu1} - t_{bs1})}{t_{bu2} - t_{bs2}} - 1 \right) \quad (5)$$

em que:

Δ - declividade da curva de pressão de saturação do vapor d'água ($\text{Kpa } ^\circ\text{C}^{-1}$);

γ - constante psicrométrica ($\text{Kpa } ^\circ\text{C}^{-1}$);

t_{bu} - temperatura do bulbo úmido no nível Z1 e Z2 ($^\circ\text{C}$);

t_{bs} - temperatura do bulbo seco no nível Z1 e Z2 ($^\circ\text{C}$)

Os dados de LE das duas áreas foram convertidos em evapotranspiração real, baseado na Eq. 6.

$$E_{Tr} = \frac{LE \cdot T \cdot f_{tempo}}{L} \quad (6)$$

em que:

T - tempo de armazenamento dos valores médios (30 minutos);

f_{tempo} - fator de ajuste de tempo;

L - calor latente de vaporização ($KJ Kg^{-1}$).

Para determinação do índice de cobertura vegetal (ICV) utilizou-se o método não destrutivo da interceptação da luz, realizando medidas de radiação fotossinteticamente ativa (PAR) acima e abaixo do dossel, por meio do sensor portátil ceptômetro, a cada 15 dias em subparcelas representativas de cada área de estudo. E o monitoramento da umidade do solo foi realizada por meio do sensor CS658 HydroSence (Campbell Scientific, INC, Logan, Utah, USA) efetuando leituras a cada 15 dias em ambas as áreas.

Os dados de 30 minutos dos componentes do balanço de radiação e energia foram integrados em escala diária, agrupados em cinco períodos, considerando o volume e o número de dias com chuva. Definiu-se que, se ocorresse um chuva <20 mm em 5 dias era caracterizado como seco, >20 mm em 5 dias caracterizado como chuvoso e >13 mm em 5 dias caracterizado como transição. Assim, no presente estudo a classificação ficou distribuída da seguinte forma: seco (01/06/2015 à 06/11/2015); transição seco/chuvoso (07/11/2015 à 07/01/2016); chuvoso (08/01/2016 à 31/01/2016); transição chuvoso/seco (01/02/2016 à 25/05/2016) e seco (26/05/16 à 06/11/2016).

Os dados foram submetidos à análise estatística não paramétrica, comparando as duas superfícies em cada período, usando o teste de Mann Whitney. Posteriormente, cada superfície foi avaliada em cada um dos períodos, usando o teste de Kruskal Wallis e Dunn, ao nível de 5% de probabilidade, por meio do aplicativo XLSTAT v.2016.

3. Resultados e Discussão

A magnitude das trocas energéticas foi afetada por fatores físicos e biológicos inerentes ao tipo de cobertura vegetal, associados a fatores como posição geográfica e mudanças proporcionadas pelos movimentos da Terra, que resultam nas estações do ano.

Observa-se que não houve diferença significativa ($p > 0,05$) na radiação solar global (R_g) entre as áreas de estudo, uma vez que, as áreas experimentais são próximas, ou seja, a incidência de energia que atinge as superfícies é a mesma (Tabela 1).

Tabela 1. Valores médios dos componentes do balanço de radiação, na caatinga preservada e cana-de-açúcar irrigada, no Submédio do Vale São Francisco, Semiárido brasileiro

| Período | R_g ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) | | R_r ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) | | R_s ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) | | R_a ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) | |
|--------------|---|----------|---|----------|---|----------|---|-----------|
| | Caatinga | Cana | Caatinga | Cana | Caatinga | Cana | Caatinga | Cana |
| Seco/2015 | 21,37 Ab | 21,12 Ab | 2,33 Ab | 2,84 Ac | 39,08 Ab | 39,05 Ab | 33,40 Ab | 32,65 Bc |
| Seco/chuvoso | 26,23 Aa | 25,67 Aa | 3,14 Ba | 4,53 Aa | 41,96 Aa | 40,02 Ba | 34,68 Aab | 34,21 Ab |
| Chuvoso | 18,58 Ab | 17,80 Ab | 2,26 Bb | 3,09 Ac | 39,85 Ab | 38,97 Ab | 36,67 Aa | 35,82 Aa |
| Chuvoso/seco | 22,15 Ab | 22,49 Ab | 2,78 Bb | 4,09 Aab | 38,49 Bb | 39,21 Ab | 33,76 Ab | 33,94 Ab |
| Seco/2016 | 15,25 Ab | 16,38 Ab | 1,88 Bb | 3,19 Abc | 39,28 Ab | 38,36 Bb | 35,95 Aab | 34,32 Aab |

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na horizontal não diferem estatisticamente entre si ao nível de significância ($p < 0,05$) pelo teste não paramétrico de Kruskal-Wallis; Médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem estatisticamente entre si ao nível de significância ($p < 0,05$) pelo teste não paramétrico de Mann-Whitney.

Comportamento diferente foi constatado na radiação refletida (R_r), com exceção do período seco/15, em que, na cana-de-açúcar havia maior exposição do solo e presença de umidade, contribuindo para maior absorção de energia, ficando a reflectância equivalente aquela observada na caatinga (Tabela 1).

Ao se comparar a radiação de ondas longas emitida das superfícies, percebe-se que não houve diferença significativa nos períodos seco/15 e chuvoso. A radiação emitida da atmosfera (R_a) mostrou diferença apenas no período (seco/15) (Tabela 1).

Considerando as mudanças sazonais em cada período, percebe-se que, a R_g , no período transição seco-chuvoso foi superior aos demais, nas duas superfícies, logo, este é o período em que há maior incidência de R_g na região, ocorrendo maior quantidade de dias de céu claro. No período seguinte, com o início das precipitações, ocorreram reduções em função da ocorrência de nebulosidade (Tabela 1)

Variações semelhantes foram relatados em trabalhos realizados na mesma região por Silva et al. (2011), Santos et al. (2012) e Souza et al. (2015b), estudando a sazonalidade dos componentes do balanço de radiação, enfatizando que magnitudes maiores ocorreram nos mesmos meses correspondentes ao período do presente estudo. Chen et al. (2016) afirma que essa variável é influenciada principalmente pelas condições climáticas e presença de nuvens.

Por sua vez, a R_r apresentou diferenças significativa entre os períodos nas duas superfícies vegetais. Na caatinga, o período de transição seco/chuvoso, foi superior ao demais, enquanto nos demais períodos houve similaridade (Tabela 1). Esses valores mais elevados certamente devem-se a maior incidência de radiação solar, associado ao baixo índice de cobertura vegetal, em média $1,92 \text{ m}^{-2} \text{ m}^{-2}$ (Figura 1), e a coloração da vegetação do tipo caducifólia que perde totalmente a folhagem ficando apenas galhos acinzentados, e à baixa umidade no solo (Tabela 2).

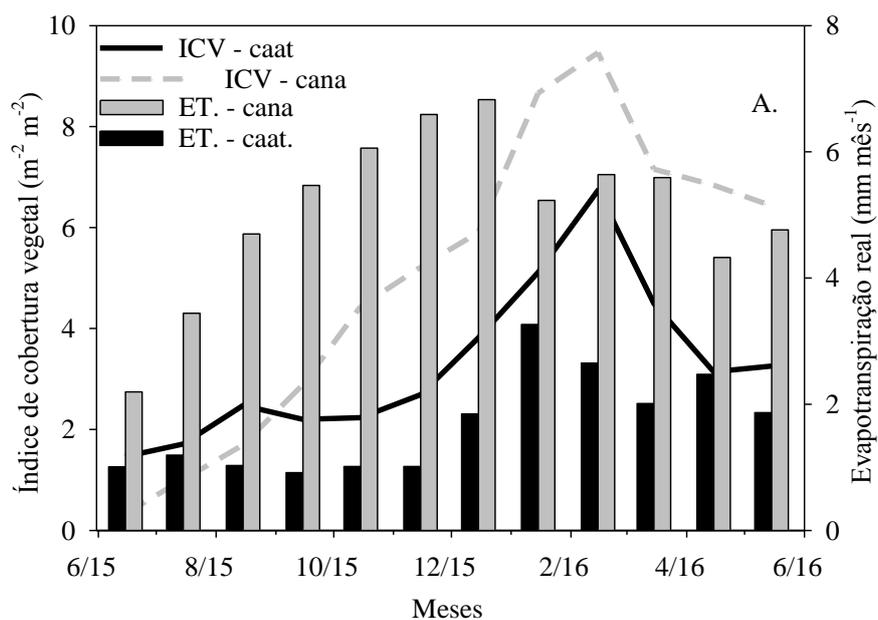


Figura 1. Comportamento médio do índice de cobertura vegetal (ICV) e evapotranspiração real diária (ET) na caatinga preservada e cana-de-açúcar irrigada, Submédio do Vale do São Francisco, Semiárido brasileiro

Em contrapartida, as variações da R_r na cana-de-açúcar foram mais acentuadas, acompanhando o aumento do ICV da cultura (Figura 1). De acordo com André et al. (2010), a tendência dos valores de R_r é aumentar conforme crescimento da cultura, em razão da cobertura do solo, contribuindo para aumento do albedo da superfície, alterando o balanço de energia.

No geral, a diferença entre a R_r nos dois ecossistemas foi de $1,05 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, com aumento de 42% ao mudar caatinga preservada para cana-de-açúcar. Von Randow et al. (2004) e Souza et al. (2013) verificaram aumento na radiação refletida de 58% e mais de 100% ao substituir vegetação nativa por culturas como pastagens e soja, respectivamente, na região Amazônia.

No período de transição seco/chuvoso a radiação de ondas longas emitida pelas superfícies (R_s) foi superior em relação aos demais (Tabela 1), coincidindo com a alta

incidência de R_g , que também foi elevada neste período contribuindo para o aumento da temperatura do solo (Tabela 2), razão dos valores elevados. A radiação de ondas longas atmosférica seguiu padrão sazonal, com aumento no período chuvoso em ambas as áreas.

Tabela 2. Valores médios dos componentes do balanço de radiação, na caatinga preservada e cana-de-açúcar irrigada, Submédio do Vale São Francisco, semiárido brasileiro

| Períodos | Ts ($^{\circ}$ C) | | Us (%) | |
|--------------|--------------------|----------|----------|----------|
| | Caatinga | Cana | Caatinga | Cana |
| Seco/2015 | 31,39 Ab | 26,35 Bb | 1,36 Bb | 47,02 Ab |
| Seco/Chuvoso | 36,43 Aa | 28,76 Ba | 5,30 Bab | 44,31 Ab |
| Chuvoso | 28,22 Ac | 25,54 Bb | 18,15 Ba | 50,27 Aa |
| Chuvoso/Seco | 30,05 Ab | 25,26 Bb | 11,55Bb | 48,76 Ab |
| Seco/2016 | 26,69 Ac | 24,41 Ab | 5,18 Bab | 42,35Ab |

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na horizontal não diferem estatisticamente entre si ao nível de significância ($p < 0,05$) pelo teste não paramétrico de Kruskal-Wallis; Médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem estatisticamente entre si ao nível de significância ($p < 0,05$) pelo teste não paramétrico de Mann-Whitney.

A contabilização de entrada e saída dos componentes citados acima resulta no saldo de radiação (R_n), apresentando comportamento semelhante ao da R_g , porém, houve diferença significativa nos dois períodos de transição (Tabela 3). Em média, houve uma redução de até $1,03 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ de energia ao longo do ciclo da cana-de-açúcar, comparado a caatinga.

O fato de a caatinga refletir menos radiação solar e emitir mais radiação de ondas longas, com exceção do período chuvoso seco (Tabela 1), justifica os valores elevados de R_n , havendo maior disponibilidade de energia, em relação a cana-de-açúcar.

Os processos LE e H, assim como as partições, mostraram diferença significativa durante todo o período experimental entre as áreas experimentais (Tabela 3 e 4). Por

outro lado, a energia destinada ao aquecimento do solo (G), se diferenciou no período inicial, e no período de transição chuvoso/seco, do mesmo modo ocorreu com a partição (Tabela 3 e 4).

Tabela 3. Valores médios dos componentes do balanço de energia, na caatinga preservada e cana-de-açúcar irrigada, Submédio do Vale São Francisco, Semiárido brasileiro

| Período | Rn (MJ m ⁻² dia ⁻¹) | | H (MJ m ⁻² dia ⁻¹) | | LE (MJ m ⁻² dia ⁻¹) | | G (MJ m ⁻² dia ⁻¹) | |
|--------------|--|----------|---|----------|--|----------|---|----------|
| | Caatinga | Cana | Caatinga | Cana | Caatinga | Cana | Caatinga | Cana |
| Seco/2015 | 14,3 Ab | 14,25 Ab | 11,55 Ab | 2,32 Ba | 2,61 Bb | 11,13 Ab | 0,14 Bab | 0,80 Aa |
| Seco/chuvoso | 18,17 Aa | 17,47 Ba | 14,24 Aa | 0,77 Bc | 3,68 Bb | 16,35 Aa | 0,25 Aa | 0,35 Aa |
| Chuvoso | 13,98 Ab | 13,71 Ab | 5,87 Ac | 1,04 Bbc | 8,30 Ba | 12,82 Ab | -0,19 Ab | -0,15 Ab |
| Chuvoso/seco | 16,57 Ab | 14,82 Bb | 10,24 Ac | 2,74 Ba | 6,1 Ba | 12,25 Ab | 0,23 Aa | -0,17 Bb |
| Seco/2016 | 11,44 Ab | 11,06 Ab | 7,07 Ac | 1,94 Bab | 4,75 Bb | 9,38 Ab | -0,38 Ab | -0,26 Ab |

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na horizontal não diferem estatisticamente entre si ao nível de significância ($p < 0,05$) pelo teste não paramétrico de Kruskal-Wallis; Médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem estatisticamente entre si ao nível de significância ($p < 0,05$) pelo teste não paramétrico de Mann-Whitney.

Ao se avaliar os valores médios dos fluxos em cada período, o H na caatinga foi maior na transição seco-chuvoso, se comparado aos demais, diferentemente da maior energia disponível que foi no período seco/15, em média 80% foi destinada ao aquecimento do ar (Tabela 4). Certamente, a baixa disponibilidade hídrica contribuiu para o aumento destes valores, uma vez que a ocorrência de precipitação no período seco/2015 foi de 5,61 mm, enquanto o período seco/chuvoso 2015 foi de 48 mm em um único dia de dezembro.

Tabela 4. Valores médios da energia disponível destinada aos fluxos de energia e massa na caatinga preservada e cana-de-açúcar irrigada, Submédio do Vale São Francisco, Semiárido brasileiro

| Períodos | LE/Rn | | H/Rn | | G/Rn | |
|--------------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|
| | Caatinga | Cana | Caatinga | Cana | Caatinga | Cana |
| Seco/2015 | 0,18 Bb | 0,78 Ab | 0,80 Aa | 0,16 Ba | 0,01 Bb | 0,05 Aa |
| Seco/Chuvoso | 0,20 Bb | 0,93 Aa | 0,78 Aa | 0,04 Bb | 0,01 Aa | 0,02 Ab |
| Chuvoso | 0,59 Ba | 0,93 Aa | 0,41 Ac | 0,07Bba | -0,01 Ab | -0,01 Ac |
| Chuvoso/Seco | 0,33 Bb | 0,78 Ab | 0,61 Ab | 0,17 Ba | 0,02 Aa | -0,01 Bc |
| Seco/2016 | 0,41Bab | 0,81 Aab | 0,61 Ab | 0,17 Ba | -0,03 Bb | -0,02 Bc |

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na horizontal não diferem estatisticamente entre si ao nível de significância ($p < 0,05$) pelo teste não paramétrico de Kruskal-Wallis; Médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical não diferem estatisticamente entre si ao nível de significância ($p < 0,05$) pelo teste não paramétrico de Mann-Whitney.

Na caatinga, como era de se esperar, para todos os períodos analisados, em função da baixa disponibilidade hídrica no solo (Tabela 2) variações ocorreram nos valores dos fluxos. No caso de H, as maiores intensidades foram no período de transição seco/chuvoso, mostrando-se superior em relação aos demais. Diferentemente ocorreu com o LE, em que, elevados valores foram registrados no período chuvoso, semelhante a transição chuvoso/seco. (Tabela 3).

O G apresentou poucas variações, quase sempre foram verificados valores positivos, com exceção apenas do período chuvoso, indicando perda de energia a partir do solo para a atmosfera.

Nas plantas da caatinga, é comum ocorrer o fechamento estomático, quando há baixa disponibilidade hídrica, o que certamente reduz a transferência de água para a atmosfera, diminuindo a evapotranspiração, e conseqüentemente o consumo de energia para aquecer o ar (H) aumenta.

Quando há baixa disponibilidade de água no solo (Tabela 2) e baixo ICV (Figura 1), o ar em movimento sobre a vegetação recebe mais calor do que vapor d'água, casos dos períodos seco e de transição. É notório que, quando a umidade do solo aumenta (Tabela 2), rapidamente ocorre redução em H, com partição H/Rn de 41%, e aumento

de LE, e 61% LE/Rn (Tabela 4), situações desta natureza ocorreram no mês de janeiro (período chuvoso) em que, precipitou 263 mm acima da média esperada no mês.

Por outro lado, na cana-de-açúcar, ocorreram poucas variações nos fluxos de energia e água, em razão da boa disponibilidade hídrica e aumento gradativo do ICV (Figura 1). Elevados valores de H foram registrados no início do ciclo, período seco/2015, quando a cultura apresentava baixo ICV (Figura 1), e na transição chuvoso-seco e seco/2016, em razão do tombamento e redução na irrigação, o que causa a senescência das folhas.

Por sua vez, percebe-se que o LE na cana-de-açúcar expressou aumento gradativamente ao longo do ciclo, diminuindo levemente no último período (Seco/2016) em razão da suspensão da irrigação e limitação estomática da planta devido ao estresse hídrico. O G iniciou com valores positivos, e negativos no final do estudo, em virtude do aumento do ICV (Figura 1), o que fez com que pouca energia atingisse o solo.

Em média o comportamento de LE, H, e G no sítio de cana-de-açúcar irrigada, foram 0,85%; 0,13%; 0,1% nesta ordem, enquanto Teixeira et al. (2008) encontraram 79%, 89%, e 77% em videiras e pomar de manga irrigado para o LE, superior ao resultado de Silva et al. (2011) em que, em média 81% da energia disponível foi destinada para LE, na mesma cultura irrigada por sulcos, na mesma região.

Teixeira et al. (2008) também verificou média de Rn, LE e H em caatinga preservada inferiores aos do presente estudo, o que pode estar associado a variabilidade na disponibilidade hídrica e ao grau de nebulosidade ao longo dos dias.

Cunha et al. (2013), por meio de modelos de simulação verificaram alterações nos componentes do balanço de energia ao converter áreas de caatinga em agropecuária e caatinga degradada, os resultados estão associados a modificações de características morfológicas e biofísicas da vegetação. Estes mesmos autores, afirmam que,

características como comprimento de rugosidade e propriedades aerodinâmicas afetam as trocas turbulentas e o balanço de água, influenciando na dinâmica dos fluxos.

Estudo realizado por Pongratz et al. (2006) relata que, os impactos causados pela substituição de florestas por outro tipo de superfície engloba vários fatores, inclusive a morfologia e fisiologia da superfície. Neste trabalho, as plantas de cada sítio possuem metabolismo distinto, conseqüentemente ocorre modificações no que condiz a interação superfície-atmosfera.

Contudo, uma das principais razões das diferenças nos fluxos entre os dois sítios experimentais do presente estudo foi, em grande parte imposta pela disponibilidade hídrica, uma vez que na caatinga a única fonte de água é a precipitação, apresentando grande variabilidade ao longo dos períodos de estudo. Enquanto na cana-de-açúcar irrigada, que associada a ocorrência de chuvas promove crescimento do dossel, fixação de carbono na biomassa e grande volume de água transferido para a atmosfera durante todo período experimental.

Os dados mensais e acumulados de precipitação, irrigação e evapotranspiração real dos dois sítios experimentais são apresentados na Figura 2. Na caatinga, a precipitação durante o experimento foi de 405,1 mm, abaixo da média na região, 520,0 mm, resultando no total 604,76 mm de água para a atmosfera durante o estudo.

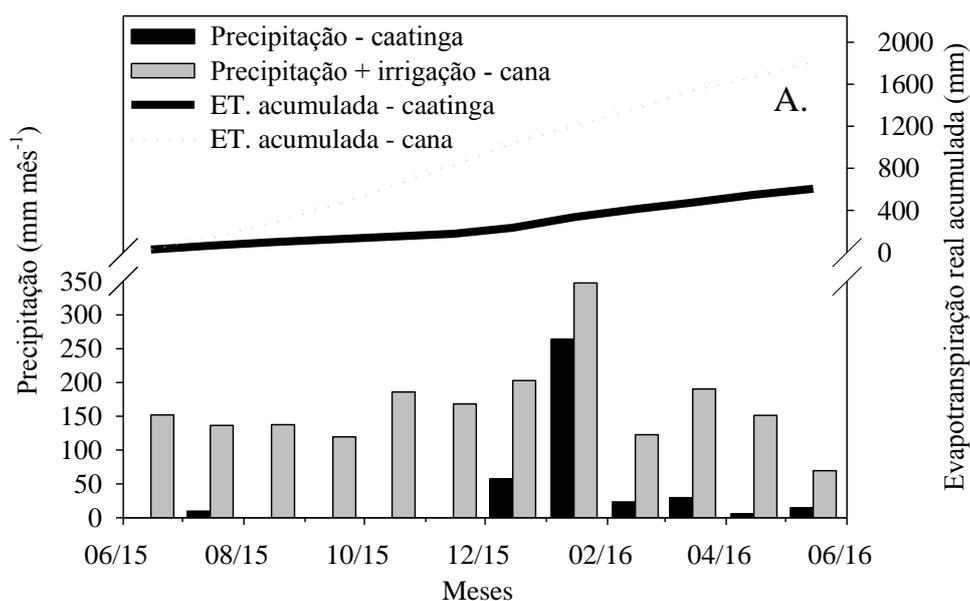


Figura 2. Precipitação mensal e evapotranspiração real acumulada (ET) nos sítios: caatinga preservada, e cana-de-açúcar irrigada na região do Submédio do Vale do São Francisco

Muito diferente foi a lâmina de água na cana-de-açúcar, total foi de 1.983,8 mm (precipitação + irrigação), sendo 325 mm de precipitação e 1610 mm de irrigação. Deste total o retorno para a atmosfera foi de 1.822,6 mm, cerca de três vezes mais o valor da caatinga preservada.

De acordo com Sun et al. (2010), a variabilidade da transferência de água para a atmosfera em regiões com limitação hídrica é explicada pelo ICV, P, e Evapotranspiração de referência, e os diferentes tipos de solo, se tornam um recurso crítico durante os períodos não-chuvosos em regiões semiáridas (Lu et al., 2011). Malhi et al. (2002) cita que, quando há extensos período de seca, rapidamente ocorre mudanças nos padrões de energia, e revela como a disponibilidade de água é importante para a regulação de trocas de energia entre vegetação e atmosfera.

4. Conclusões

As proporções dos fluxos de energia e massa em superfície são quantitativamente distintas durante todo o ano, com valores elevados de fluxo de calor sensível (H) e baixos valores de fluxo de calor latente (LE) na caatinga preservada, enquanto na cana-de-açúcar, aumenta gradativamente o fluxo de LE diante da boa condição hídrica, uma vez que é irrigada e há disponibilidade de energia durante todo ano.

A caatinga preservada induz a maior manutenção de energia no sistema para aquecimento do ar, enquanto a cana-de-açúcar irrigada promove maior partição da energia na injeção de vapor d'água para a atmosfera.

A substituição da caatinga pela cana-de-açúcar irrigada promove alterações significativas nos componentes dos balanços de radiação e energia, e por sua vez, na transferência de vapor d'água para a atmosfera, promovendo alterações no clima local e devendo ser considerada nos modelos de simulação hidrológicos e climáticos.

5. Referências

- ANDRÈ, R. G. B.; MENDONÇA, J. C.; MARQUES, V. DA S.; PINHEIRO, F. M. A.; MARQUES, J. Aspectos energéticos do desenvolvimento da cana-de-açúcar. Parte 1: Balanço de radiação e parâmetros derivados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 3, p. 375-382, 2010.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. 1ed. Rome: FAO, p. 326, 1998. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).
- CUNHA, A. P. M. A.; ALVALÁ, R. C. S.; OLIVEIRA, G. S. Impactos das mudanças de cobertura vegetal nos processos de superfície na região semiárida do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 2, p.139-152, 2013.

CHEN, X.; YU, Y.; CHEN, J.; ZHANG, T.; LI, Z. Seasonal and interannual variation of radiation and energy fluxes over a rain-fed cropland in the semi-arid area of Loess Plateau, northwestern China. **Atmospheric Research**, v. 176-177, n. 1, p. 240-253, 2016.

CHAMBERS, J. Q.; ARTAXO, P. Biosphere-atmosphere interactions: Deforestation size influences rainfall. **Nature Climate Change**, v.7, n. 1, p. 175-176, 2017.

DAVID, M.; WALKO, R. L.; AVISSAR, R. Effects of deforestation on spatio-temporal distributions of precipitation in South America. **Journal of Climate**, v. 24, n. 1, p. 2147-2163, 2011.

EMBRAPA SEMIÁRIDO. Médias anuais da Estação Agrometeorológica de Bebedouro. Petrolina, 2015. Disponível em: <<http://www.cpatsa.embrapa.br:8080/servicos/dadosmet/ceb-anual.html>>. Acesso em: 16.03.2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICAS. Produção Agrícola Municipal 2014. <www.sidra.ibge.gov.br/bda>. Acesso em: 03 de agosto, 2016.

LU, S.; CHEN, S.; WILSKÉ, B.; SUN.; CHEN, J. Evapotranspiration and soil water relationships in a range of disturbed and undisturbed ecosystems in the semi-arid Inner Mongolia, China. **Journal of Plant Ecology**, v. 4, n. 1-2, p. 49-60, 2011.

MALHI, Y.; PEGORARO, E.; NOBRE, A. D.; PEREIRA, M. G. P.; GRACE, J.; CULF, A. D.; CLEMENT, R. The energy and water dynamics of a central Amazonian rain forest. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. 20, p. 1-17, 2002.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Caatinga**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/biomas/caatinga>> Acesso em 20 de fevereiro de 2016.

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. 3, p. 166-174, 2006.

PEREZ, P. J.; CASTELLVI, F.; MARTINEZ-COB, A. Assessment reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.97, n. 1, p.141-150, 1999.

PONGRATZ, J.; BOUNOUA, L.; DEFRIES, R.S.; MORTON, D.C.; ANDERSON, L.O. The impact of land cover change on surface energy and water balance in Mato Grosso, Brazil. **Earth Interactions**, v. 10, n. 1, p. 1-17, 2006.

RIGHI, E. Z.; ANGELOCCI, L. R.; MARIN, F. R. Energy balance of a young drip-irrigated coffee crop in southeast Brazil: an analysis of errors and reliability of measurements by the Bowen ratio method. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.15, n. 3, p.367-279, 2007.

SPRACKLEN, D. V.; ARNOLD, S. R.; TAYLOR, C. M. Observations of increased tropical rainfall preceded by air passage over forests. **Nature**, v. 489, n. 1, p. 282-285, 2012.

SANTOS, S. DE A.; CORREIA, M. DE F.; ARAGÃO, M. R. DA S.; SILVA, P. K. DE O. Aspectos da variabilidade sazonal da radiação, fluxos de energia e CO₂ em área de caatinga. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, n. 4, p.761-773, 2012.

SOUZA, L. S. B.; MOURA, M. S. B.; SEDIYAMA, G. C.; SILVA, T. G. F. Balanço de energia e controle biofísico da evapotranspiração na Caatinga em condições de seca intensa. **Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 8, p. 627-636, 2015a.

SOUZA, L. S. B.; MOURA, M. S. B.; SEDIYAMA, G. C.; SILVA, T. G. F. Balanço de radiação em ecossistema de Caatinga preservada durante um ano de seca no Semiárido Pernambucano. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n. 1, p. 41-55, 2015b.

SILVA, T. G. F.; MOURA, M. S. B.; ZOLNIER, S.; SOARES, J. M.; SOUZA, L. S. B.; BRANDÃO, E. O. Variação do balanço de radiação e energia da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 2, p. 139-147, 2011.

SUN, G.; ALSTAD, K.; CHEN, J. CHEN, S.; FORD, C. R.; LIN, G.; LIU, G.; LU, N.; MCNULTY, G. S.; MIAO, H.; NOORMETS, A.; VOSE, J. M.; WILSKE, B.; ZEPPEL, M.; ZHANG, Y.; ZHANG, Z. A general predictive model for estimating monthly ecosystem evapotranspiration. **Ecohydrology**, v. 4, n. 2, p. 245-255, 2010.

SOUZA, P. J. O. P.; ROCHA, E. J. P.; RIBEIRO, A. Impactos do avanço da soja no balanço de radiação no leste da Amazônia. **Acta Amazônica**, v. 43, n. 2, p. 169-178, 2013.

SOUTO, P. C.; SOUTO, J. S.; SANTOS, R. V. DOS.; BAKKE, I. A. Características químicas da serapilheira depositada em área de caatinga. **Revista Caatinga**, v. 22, n. 1, p. 264-272. 2009.

TEIXEIRA, A. H. DE C.; BASTIAANSSEN, W. G. M.; AHMAD, N.D.; MOURA, M. S. B. DE.; BOS, M. G. Analysis of energy fluxes and vegetation-atmosphere parameters in irrigated and natural ecosystems of semi-arid Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 362, n. 1-2, p. 110-127, 2008.

VON RANDOW, C.; MANZI, A. O.; KRUIJT, B.; OLIVEIRA, P. J.; ZANCHI, F. B.; SILVA, R. L.; HODNETT, M.; GASH, J.; ELBERS, J. A.; WATERLO, M. Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in south west Amazonia. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 78, n. 1, p. 5-26, 2004.

Fatores controladores da evapotranspiração real da caatinga e cana-de-açúcar no Submédio do Vale São Francisco

Resumo: Conhecer os principais controladores da evapotranspiração real em diferentes tipos de superfícies é importante, sobretudo onde a mudança do uso do solo por áreas agrícolas é mais evidente. No Submédio do Vale São Francisco, os principais fatores controladores da evapotranspiração real da caatinga e da cana-de-açúcar irrigada foram investigados neste estudo. Entre os anos 2015 e 2016, variáveis ambientais foram medidas por sensores acoplados a duas torres micrometeorológicas, uma na caatinga preservada e outra em um cultivo de cana-de-açúcar irrigada. A umidade do solo e o índice de cobertura vegetal também foram avaliados, e dados biométricos obtidos apenas na cana-de-açúcar. A evapotranspiração real foi determinada com base no fluxo de calor latente, pelo método do balanço de energia. Logo, calculou-se a razão entre a evapotranspiração real e de referência. As variáveis respostas foram compostas pela evapotranspiração real e por sua razão com a evapotranspiração de referência; já as variáveis explicativas incluíram os dados de crescimento e ambientais. Análises de multicolinearidade, canônica e de trilha foram aplicadas. Verificou-se que apenas as variáveis ambientais exibiram correlação com a evapotranspiração real e sua razão com a evapotranspiração de referência. Na caatinga, a umidade do solo influenciou de modo direto e indireto na ET, da mesma forma que a radiação solar global alterou a resposta da evapotranspiração real à demanda atmosférica. Na cana-de-açúcar, a ET foi controlada direta e indiretamente pela radiação fotossinteticamente ativa interceptada e, temperatura do solo, sendo que esta última também afetou a razão evapotranspiração real e de referência.

Palavras-chave: correlação, variáveis micrometeorológicas, crescimento

Controlling factors of caatinga and sugarcane evapotranspiration in the Sub-middle São Francisco Valley

Abstract: Knowing the main controllers of real evapotranspiration on different types of surfaces is important, especially where the change of land use by agricultural areas is more evident. In the Submedia of the São Francisco Valley, the main controlling factors of the real evapotranspiration of the caatinga and the irrigated sugar cane were investigated in this study. Between 2015 and 2016, environmental variables were measured by sensors coupled to two micrometeorological towers, one in the preserved caatinga and the other in an irrigated sugar cane crop. Soil moisture and vegetation cover index were also evaluated, and biometric data obtained only in sugarcane. The actual evapotranspiration was determined based on the latent heat flux, by the energy balance method. Therefore, the ratio between actual and reference evapotranspiration was calculated. The response variables were composed by the actual evapotranspiration and by its ratio with the reference evapotranspiration; The explanatory variables included growth and environmental data. Multicollinearity, canonical and track analyzes were applied. It was verified that only the environmental variables exhibited correlation with the real evapotranspiration and its ratio with the reference evapotranspiration. In the caatinga, soil moisture influenced directly and indirectly the ET, in the same way that the global solar radiation altered the response of the real evapotranspiration to the atmospheric demand. In sugarcane, the ET was directly and indirectly controlled by the intercepted photosynthetically active radiation and soil temperature, and the latter also affected the real and reference evapotranspiration ratio.

Key words: correlation, micrometeorological variables, growth

INTRODUÇÃO

O Submédio do Vale São Francisco congrega importantes polos de fruticultura e canaviais irrigados, destacando as produtividades acima da média nacional em pleno semiárido. Essa expansão de áreas agrícolas em meio à vegetação nativa vem mudando a paisagem da região, a interação entre as superfícies e atmosfera e alterando o ciclo da água e as trocas energéticas (Zhang et al., 2016a).

Neste sentido, a evapotranspiração (ET), componente elementar do ciclo hidrológico, pode sofrer modificações significativas, acarretando em alterações no tempo e no clima tanto em escala local quanto global, já que a mesma depende de fatores associados ao solo, planta e atmosfera (Zhao et al., 2015).

O controle da ET na caatinga foi relatado em trabalhos realizados por Melo et al. (2014) e Souza et al. (2015), indicando que, o déficit de pressão de vapor d'água (DPV) como forte controlador deste processo, por causa da restrição do regime hídrico.

Em cultivos irrigados, como a cana-de-açúcar, Silva et al. (2013) afirmam que a ET é fortemente dependente da energia disponível, ou seja, do saldo de radiação (R_n). Em outras culturas como o milho irrigado, além do efeito de R_n , a radiação solar global incidente, temperatura do ar e DPV influenciam a ET (Zhang et al., 2016b).

Conhecer os principais controladores da evapotranspiração em diferentes tipos de superfícies é importante, sobretudo onde a mudança do uso do solo por áreas agrícolas é mais evidente. Em ambiente semiárido, estas alterações associadas com as modificações climáticas intensificam o processo de desertificação. Em áreas irrigadas, o manejo de água pode ser melhorado a partir da adequação da tomada de decisão a partir das variáveis meteorológicas mais condicionantes (Silva et al., 2012).

No Submédio do Vale São Francisco, os principais fatores controladores da ET da caatinga e da cana-de-açúcar irrigada foram investigados neste estudo.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido, entre junho de 2015 e maio de 2016, simultaneamente em dos sítios experimentais: uma de caatinga preservada e outra de cana-de-açúcar irrigada, localizadas no Semiárido, Submédio do Vale São Francisco.

O sítio da caatinga preservada se encontra no município de Petrolina, PE, na Embrapa Semiárido (09° 05' S; 40° 19' O; 350 m). O solo é classificado como Argissolo Amarelo Eutrófico, com presença de espécies vegetais de porte arbóreo-arbustivo, caráter espinhento, hiperxerófila, caducifólias, e altura variando de 4 a 7 metros.

Por sua vez, o monocultivo de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* spp.), var. VAT 90-212, foi conduzido no município de Juazeiro-BA (09° 26' S; 40° 19' O; 396 m), segunda rebrota, solo do tipo Vertissolo, fileiras duplas com espaçamento de 1,3 m x 1,0 m, irrigada por gotejamento subsuperficial.

Em cada sítio foi instalada uma torre micrometeorológica com sensores eletrônicos para medição das seguintes variáveis: saldo de radiação (Rn) e radiação solar global incidente (Rg) (CNR1 Net radiometer - Kipp & Zonen B.V. Delft Netherlands), temperatura média (Tar), máximo (Tmáx) e mínima (Tmín) do ar e umidade relativa do ar (UR) (HMP45C, Vaisala, Vaisala, Finlândia), velocidade do vento (Vv) (03001, Young, Michigan, USA) e precipitação pluviométrica (P) (CS700-L Hydrological Services Rain Gage, Liverpool, Austrália).

No solo foram medidas temperatura do solo (Ts) (Campbell Scientific, INC, Logan, Utah, USA) e fluxo de calor no solo (G) (HFT3-REBS, Campbell Scientific, INC, Logan, Utah, USA). Além disso, a umidade do solo (Us) (CS658 HydroSence, Campbell Scientific, INC, Logan, Utah, USA) foi medida em cada sítio, em intervalos de 15 dias, até 0,20 m de profundidade.

Para obtenção do índice de cobertura vegetal (ICV) e da radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFA_I), utilizou-se o método não destrutivo de interceptação da luz, realizando medidas acima e abaixo do dossel, por meio de um ceptômetro portátil (AccuPAR, LP-80, Decagon Devices, Pullman, USA) a cada 15 dias.

No sítio da cana-de-açúcar foram realizadas nove campanhas biométricas e de biomassa da cultura, iniciadas aos 120 dias após o corte: 28/10/2015, 18/11/2015, 16/12/2015, 06/01/2016, 27/01/2016, 24/02/2016, 23/03/2016, 27/04/2016 e 26/05/2016, quando se registrou o número de internódios e a estatura dos colmos (EC), de acordo com Silva et al. (2012). No laboratório, 10 plantas eram utilizadas para determinar a biomassa seca total da parte aérea, conforme Silva et al. (2014).

A evapotranspiração real (ET) foi obtida por meio do balanço de energia, em que, na caatinga utilizou-se o método das correlações turbulentas, enquanto na cana-de-açúcar determinou-se por meio da razão de Bowen, aplicando os critérios adotados por Perez et al. (1999). Logo, calculou-se a razão $ET ETo^{-1}$, sendo a ETo a evapotranspiração de referência, obtida por meio do método de Penman Monteith (Allen et al., 1998), com dados coletados de uma estação agrometeorológica próxima aos sítios experimentais.

Os intervalos das medidas biométricas da cana-de-açúcar foram utilizados como critério de análise das variáveis, as quais foram classificadas em três grupos: Grupo 01 (resposta) - composto pela ET e relação $ET ETo^{-1}$; Grupo 02 (explicativo) - ICV e dados biométricos e grupo 03 (explicativo) - composto pelas variáveis ambientais.

Os dados dos grupos de variáveis foram submetidos à matriz de correlação de Pearson, sendo o coeficiente de correlação (r) avaliado quanto à sua magnitude, sinal (positivo ou negativo) e significância, este pelo teste t de student ($p < 0,01$ e $p < 0,05$). Aplicou-se o teste de multicolinearidade entre variáveis do mesmo grupo, com intuito de averiguar multicolinearidade fraca. A partir destes dois primeiros testes, avaliou-se a

necessidade de realização da análise canônica. A análise de trilha foi usada para desdobramento do coeficiente “r”, a fim de se avaliar os efeitos diretos ou indiretos das variáveis explicativas nas variáveis respostas. Todos os procedimentos foram feitos no programa GENES (Cruz, 2013) e seguiram as etapas descritas por Silva et al. (2015).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 são apresentados os valores das variáveis dos grupos resposta e explicativo do sítio da caatinga preservada no Submédio do Vale São Francisco. Destaca-se a alta sazonalidade da precipitação pluviométrica e, por conseguinte, das variáveis resultantes da interação com superfície (i.e. ET, DPV, umidade do solo, etc.); características essas marcantes no Semiárido brasileiro.

Tabela 1. ET e ET/ET_0 (variáveis respostas) e variáveis de crescimento e ambientais (variáveis explicativas) da Caatinga no Submédio do Vale São Francisco

| Período | ET (mm dia ⁻¹) | ET/ET_0 (mm dia ⁻¹) | ICV (m ² m ⁻²) | Rg (MJ m ⁻² dia ⁻¹) | Rn (MJ m ⁻² dia ⁻¹) | G (MJ m ⁻² dia ⁻¹) | Rn-G (MJ m ⁻² dia ⁻¹) | RFA _I (MJ m ⁻² dia ⁻¹) | fRFA _I (decimal) |
|---------|-------------------------------|--------------------------------------|--|---|---|--|---|---|---|
| (1) | 1,05 | 0,22 | 2,15 | 21,91 | 12,38 | 0,62 | 12,21 | 2,76 | 0,80 |
| (2) | 0,93 | 0,19 | 1,90 | 27,08 | 15,99 | 1,07 | 15,65 | 2,53 | 0,69 |
| (3) | 1,60 | 0,32 | 1,50 | 26,85 | 16,06 | 1,14 | 15,75 | 2,32 | 0,69 |
| (4) | 2,15 | 0,49 | 2,14 | 23,31 | 14,67 | 0,92 | 14,82 | 2,42 | 0,72 |
| (5) | 3,14 | 0,72 | 2,97 | 16,48 | 11,82 | 0,47 | 11,99 | 2,10 | 0,84 |
| (6) | 2,90 | 0,52 | 3,59 | 23,04 | 17,27 | 0,41 | 16,59 | 3,15 | 0,90 |
| (7) | 1,79 | 0,30 | 3,82 | 23,61 | 16,32 | 0,42 | 16,13 | 3,45 | 0,90 |
| (8) | 2,59 | 0,49 | 3,65 | 21,78 | 13,70 | 0,61 | 13,75 | 3,22 | 0,87 |
| (9) | 1,96 | 0,42 | 2,79 | 19,92 | 11,64 | 0,62 | 11,78 | 2,77 | 0,90 |
| Período | Tar (°C) | Tmáx (°C) | Tmín (°C) | Ts (°C) | UR (%) | DPV (kPa) | Vv (m s ⁻¹) | P (mm) | Us (m ³ m ⁻³) |
| (1) | 25,85 | 31,56 | 20,51 | 31,27 | 50,91 | 1,81 | 5,28 | 10,67 | 1,45 |
| (2) | 29,31 | 34,78 | 23,28 | 36,59 | 38,19 | 2,68 | 4,48 | 0,00 | 1,31 |

| | | | | | | | | | |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|--------|-------|
| (3) | 30,49 | 35,97 | 24,55 | 36,76 | 39,10 | 2,88 | 4,44 | 42,68 | 7,98 |
| (4) | 28,22 | 33,72 | 23,27 | 33,74 | 50,00 | 2,08 | 4,96 | 57,91 | 12,40 |
| (5) | 25,50 | 29,52 | 22,32 | 27,56 | 73,45 | 0,98 | 3,27 | 178,56 | 19,76 |
| (6) | 25,24 | 30,43 | 20,65 | 27,36 | 66,31 | 1,19 | 3,64 | 65,43 | 15,96 |
| (7) | 28,06 | 33,49 | 22,85 | 31,10 | 52,47 | 1,94 | 3,97 | 0,00 | 8,41 |
| (8) | 27,74 | 32,85 | 22,58 | 30,18 | 52,83 | 1,90 | 4,34 | 35,38 | 10,30 |
| (9) | 27,03 | 32,17 | 21,94 | 31,44 | 52,70 | 1,84 | 4,43 | 12,19 | 5,19 |

* Período: (1) 10-06-2015 a 28-10-15, (2) 29-10-15 a 18-11-15, (3) 19-11-15 a 16-12-15, (4) 17-12-15 a 06-01-16, (5) 07-01-16 a 27-01-16, (6) 28-01-16 a 24-02-16, (7) 25-02-16 a 23-03-16, (8) 24-03-16 a 27-04-16 e (9) 28-04-16 a 26-05-16, ET - evapotranspiração real, ETo - evapotranspiração de referência, ICV - índice de cobertura vegetal, Rg - radiação solar global, Rn - saldo de radiação, G - fluxo de calor no solo, RFA_I - radiação fotossinteticamente ativa interceptada, fRFA - fração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada, Tar - temperatura do ar, Tmáx - temperatura do ar máxima, Tmín - temperatura do ar mínima, Ts - temperatura do solo (°C), UR - umidade relativa do ar, DPV - déficit de pressão de vapor, Vv - velocidade do vento, P - precipitação pluviométrica, Us - umidade do solo

Nesta superfície apenas as variáveis ambientais exibiram correlação com as variáveis respostas ET e ET ETo⁻¹ (Tabela 2). O ICV, por exemplo, não apresentou relação com essas variáveis, supostamente por causa da contribuição do componente evaporação na ET, por não representar apenas folhas, mas também galhos, e por existir uma defasagem na resposta do ICV às condições de regime de água, comum da vegetação caatinga.

Tabela 2. Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre as variáveis respostas e explicativas dos sítios Caatinga e cana-de-açúcar no Submédio do Vale São Francisco

| | | Variáveis explicativas | | | | | | | |
|----------------|-----------|------------------------|----------|------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | | Rg | Ts | UR | DPV | Vv | P | Us |
| Caatinga | Variáveis | ET | -0,6414 | -0,7616* | 0,8284** | -0,7508* | -0,7247* | 0,7568* | 0,9375** |
| | respostas | ET ETo ⁻¹ | -0,7350* | -0,6791* | 0,8151** | -0,7292* | -0,6443 | 0,8704** | 0,9244** |
| | | Variáveis explicativas | | | | | | | |
| | | | Rn | RFA _I | Tar | Tmáx | Tmín | Ts | - |
| Cana-de-açúcar | Variáveis | ET | 0,7487* | 0,7351* | 0,7468* | 0,6714* | 0,6940* | 0,7700* | - |
| | respostas | ET ETo ⁻¹ | 0,3179 | 0,4150 | 0,5085 | 0,3911 | 0,5976 | 0,7039* | - |

* significativo a 5%; ** significativo a 1%, ambos pelo teste t, ET - evapotranspiração real, ETo - evapotranspiração de referência, Rg - radiação solar global, Rn - saldo de radiação, RFA_I - radiação fotossinteticamente ativa interceptada, Tar - temperatura do ar, Tmáx - temperatura do ar máxima, Tmín - temperatura do ar mínima, Ts - temperatura do solo (°C), UR - umidade relativa do ar, DPV - déficit de pressão de vapor, Vv - velocidade do vento, P - precipitação pluviométrica, Us - umidade do solo

A correlação da ET foi moderada a forte, significativa e negativa com a Ts, DPV e Vv, e positiva com UR, P e Us. As mesmas variáveis exibiram correlação com a ET ETo⁻¹, exceto Vv, mas incluindo a correlação negativa com Rg (Tabela 2).

Ts na caatinga não foi usada nas análises seguintes (canônica e trilha) por promover multicolinearidade alta. Todavia, para as demais variáveis (Rg, UR, DPV, Vv, P e Us), os seus eixos canônicos com o grupo da ET e ET ETo⁻¹ não foram significativos. Logo, estes grupos foram independentes entre si, e os efeitos das variáveis ambientais sobre a ET da caatinga e de sua resposta à demanda atmosférica (ET ETo⁻¹) não ocorreram pela associação de fatores, mas sim por causa da influência de fatores isolados.

Os efeitos direto ou indireto destas variáveis foram identificados no teste de trilha (Tabela 3). No desdobramento “r” para a ET, não foram avaliadas além de Ts, o DPV, enquanto na análise para ET ETo⁻¹ não se assumiu Ts e UR.

A Us exibiu efeito direto (0,9156) e, indireto via UR, Vv, P, sobre a ET da caatinga. O “r” negativo no efeito da Us sobre a ET via Vv (-0,6748) indica que na época com maior Us, que promove maior ET, ocorre a menor Vv. Essa característica é típica do Semiárido brasileiro e pode ser constatada entre o inverno e a primavera (Tabela 1).

Tabela 3. Efeitos diretos e indiretos das variáveis ambientais na ET e na ET ETo⁻¹ da Caatinga no Submédio do Vale São Francisco

| ET | | | ET ETo ⁻¹ | | | |
|---------------------|----|-----------|----------------------|---------------------|----------------------|---------|
| | | r parcial | r total | | r parcial | r total |
| Efeito direto sobre | ET | 0,2864 | | Efeito direto sobre | ET ETo ⁻¹ | -0,5568 |
| Efeito indireto via | Vv | 0,0051 | | Efeito indireto via | P | 0,0345 |

| | | | | | | | |
|--------------------------------|----|-----------|---------|--------------------------------|----------------------|-----------|---------|
| Efeito indireto via | P | -0,1797 | | Efeito indireto via | DPV | 0,2443 | |
| Efeito indireto via | Us | 0,7167 | 0,8284 | Efeito indireto via | Us | -0,4571 | -0,7350 |
| Vv | | r parcial | r total | DPV | | r parcial | r total |
| Efeito direto sobre | ET | -0,0074 | | Efeito direto sobre | ET ETo ⁻¹ | 0,2912 | |
| Efeito indireto via | P | 0,1534 | | Efeito indireto via | Rg | -0,4671 | |
| Efeito indireto via | UR | -0,1959 | | Efeito indireto via | P | 0,0335 | |
| Efeito indireto via | Us | -0,6748 | -0,7247 | Efeito indireto via | Us | -0,5868 | -0,7292 |
| P | | r parcial | r total | P | | r parcial | r total |
| Efeito direto sobre | ET | -0,2428 | | Efeito direto sobre | ET ETo ⁻¹ | -0,0537 | |
| Efeito indireto via | Vv | 0,0047 | | Efeito indireto via | Rg | 0,3577 | |
| Efeito indireto via | UR | 0,2119 | | Efeito indireto via | DPV | -0,1817 | |
| Efeito indireto via | Us | 0,7830 | 0,7568 | Efeito indireto via | Us | 0,7481 | 0,8704 |
| Us | | r parcial | r total | Us | | r parcial | r total |
| Efeito direto sobre | ET | 0,9156 | | Efeito direto sobre | ET ETo ⁻¹ | 0,8748 | |
| Efeito indireto via | Vv | 0,0055 | | Efeito indireto via | Rg | 0,2909 | |
| Efeito indireto via | P | -0,2077 | | Efeito indireto via | P | -0,0460 | |
| Efeito indireto via | UR | 0,2242 | 0,9375 | Efeito indireto via | DPV | -0,1954 | 0,9244 |
| Coeficiente de determinação | | | 0,9172 | Coeficiente de determinação | | | 0,9588 |
| Efeito das variáveis residuais | | | 0,2877 | Efeito das variáveis residuais | | | 0,2029 |

ET - evapotranspiração real, ETo - evapotranspiração de referência, Rg - radiação solar global, UR - umidade relativa do ar, DPV- déficit de pressão de vapor, Vv - velocidade do vento, P - precipitação pluviométrica, Us - umidade do solo

Os efeitos direto e indiretos da Us via Vv, UR, P e Us explicaram 91,72% da variação da ET da caatinga, valor esse maior do que o residual (28,77%), mostrando que a Us foi o fator majoritário na ET da caatinga.

Por sua vez, a resposta da ET da caatinga às variações da demanda atmosférica (ET ETo⁻¹) foi afetada diretamente pela Rg (-0,5556), porém com efeito negativo. Logo, o aumento Rg induziu a redução da ET com o aumento da ETo (Tabela 1). Este resultado é bastante comum em superfícies sob restrição de água na caatinga (Souza et al., 2015).

A redução da Us afeta indiretamente a ET ETo⁻¹, devido a diminuição da P e aumento DPV (Tabela 3). Semelhante a ET, a ET ETo⁻¹ foi afetada diretamente pela Us. Os efeitos direto da Rg e da Us, e indiretos desta última, via DPV e P explicaram 96% da variação da ET ETo⁻¹. Resultados semelhantes foram relatados por Melo et al. (2014) em relação ao DPV, porém, sendo a principal variável de controle da ET na caatinga.

No Semiárido do Noroeste da China, Zhang et al. (2016a), estudando 282 bacias hidrográficas, mostraram maior contribuição da P no controle da ET além da vegetação e topografia. Enquanto na Índia, em regiões de clima árido, Mohan & Arumugan (1996) verificaram efeito da $T_{\text{máx}}$ e $T_{\text{mín}}$, UR e Vv, dominando o processo de ET.

Na Tabela 4, constata-se os valores das variáveis respostas (ET e ET/ET_0^{-1}), ICV e ambientais medidas na área de cana-de-açúcar. Os valores de ET e ET/ET_0^{-1} foram bem superiores aos observados para a vegetação caatinga, por causa da alta disponibilidade de água ao longo do ciclo da cultura.

Os dados biométricos e de biomassa da cana-de-açúcar não apresentaram correlação significativa com as variáveis respostas ET e a razão ET/ET_0^{-1} (Tabela 2), o que pode está associado ao fato das medições de crescimento terem iniciado apenas aos 120 dias após corte, quando a cana-de-açúcar apresentava $fRFA_I$ de 0,78 (Tabela 4), indicando já alta cobertura vegetal, como citado por Inman-Bamber (1994) e Silva et al. (2014).

Tabela 4. ET e ET/ET_0^{-1} (variáveis respostas) e das variáveis de crescimento e ambientais do sítio da cana-de-açúcar, no Submédio do Vale São Francisco

| Período | ET* | ET/ET_0^{-1} * | ICV | Rg | Rn | G | Rn-G | RFA_I | $fRFA_I$ |
|---------|-------------------------|------------------|-----------------------------------|---|---|---|---|---|---|
| | (mm dia ⁻¹) | (decimal) | (m ² m ⁻²) | (MJ m ⁻² dia ⁻¹) |
| (1) | 4,60 | 0,98 | 1,84 | 22,00 | 12,45 | 0,40 | 12,05 | 1,84 | 0,78 |
| (2) | 6,27 | 1,27 | 3,63 | 25,44 | 14,77 | -0,16 | 14,93 | 2,86 | 0,94 |
| (3) | 6,89 | 1,38 | 4,64 | 26,40 | 15,89 | -0,15 | 16,03 | 2,98 | 0,96 |
| (4) | 6,49 | 1,48 | 6,33 | 23,26 | 14,10 | -0,57 | 14,68 | 2,98 | 0,98 |
| (5) | 5,23 | 1,20 | 6,37 | 16,45 | 11,27 | -0,58 | 11,84 | 2,25 | 0,98 |
| (6) | 5,40 | 0,96 | 8,26 | 22,99 | 14,38 | -0,72 | 15,10 | 3,22 | 1,00 |
| (7) | 5,82 | 0,98 | 7,85 | 24,79 | 14,97 | -0,53 | 15,50 | 2,72 | 1,00 |
| (8) | 4,41 | 0,84 | 7,10 | 22,29 | 13,06 | -0,69 | 13,75 | 2,34 | 1,00 |
| (9) | 4,95 | 1,06 | 7,58 | 20,53 | 11,44 | -0,67 | 12,11 | 2,29 | 1,00 |
| Período | Tar | $T_{\text{máx}}$ | $T_{\text{mín}}$ | Ts | UR | DPV | Vv | I+P | Us |

| | (°C) | (°C) | (°C) | (°C) | (%) | (kPa) | (m s ⁻¹) | (mm) | (m ³ m ⁻³) |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------------|--------|-----------------------------------|
| (1) | 25,36 | 31,71 | 19,84 | 26,45 | 65,78 | 1,25 | 2,46 | 649,12 | 46,26 |
| (2) | 27,90 | 34,37 | 22,06 | 28,78 | 59,49 | 1,66 | 1,19 | 193,50 | 41,69 |
| (3) | 28,81 | 35,43 | 22,83 | 28,88 | 61,39 | 1,68 | 0,82 | 147,72 | 41,69 |
| (4) | 27,48 | 33,81 | 22,27 | 27,39 | 67,15 | 1,34 | 1,04 | 183,90 | 50,10 |
| (5) | 25,80 | 30,59 | 22,37 | 25,33 | 83,78 | 0,63 | 0,46 | 265,26 | 51,57 |
| (6) | 25,70 | 31,62 | 20,96 | 24,84 | 77,34 | 0,86 | 0,88 | 95,06 | 48,79 |
| (7) | 27,61 | 34,23 | 22,05 | 26,00 | 68,28 | 1,31 | 0,93 | 173,95 | 50,08 |
| (8) | 27,20 | 33,45 | 21,78 | 25,48 | 67,90 | 1,28 | 0,40 | 188,96 | 49,49 |
| (9) | 26,28 | 32,60 | 20,84 | 24,75 | 68,51 | 1,20 | 0,14 | 85,84 | 36,36 |

* Período: (1) 10-06-2015 a 28-10-15, (2) 29-10-15 a 18-11-15, (3) 19-11-15 a 16-12-15, (4) 17-12-15 a 06-01-16, (5) 07-01-16 a 27-01-16, (6) 28-01-16 a 24-02-16, (7) 25-02-16 a 23-03-16, (8) 24-03-16 a 27-04-16 e (9) 28-04-16 a 26-05-16, ET - evapotranspiração real, ETo - evapotranspiração de referência, Rg - radiação solar global, Rn - saldo de radiação, G - fluxo de calor no solo, Rn-G - energia disponível, RFA_I - radiação fotossinteticamente ativa interceptada, f RFA - fração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada, Tar - temperatura do ar, Tmáx - temperatura do ar máxima, Tmín - temperatura do ar mínima, Ts - temperatura do solo (°C), UR - umidade relativa do ar, DPV - déficit de pressão de vapor, Vv - velocidade do vento, I - irrigação, P - precipitação pluviométrica, Us - umidade do solo, Us - umidade do solo

A ET da cana-de-açúcar teve correlação moderada a forte, positiva e significativa com o Rn, Tar, Tmáx, Tmín, Ts e RFA_I. Por sua vez, a Ts foi a única variável que apresentou correlação a ET ETo⁻¹.

Apenas o conjunto das variáveis Rn, Tmáx, Tmín, Ts e RFA_I resultou em baixa multicolinearidade, procedendo-se a análise canônica. Mas, semelhante ao verificado na análise para a caatinga, os eixos canônicos não foram significativos, indicando que os grupos resposta e explicativo foram independentes entre si. Portanto, as variações da ET da cana-de-açúcar e de sua resposta à demanda atmosférica (ET ETo⁻¹) ocorreram por causa do efeito individual de variáveis ambientais.

A análise de trilha revelou efeito direto da Ts e também sua influência indireta via Tmáx e Tmín, e efeito direto da RFA_I e indireto via Rn, sobre a ET da cana-de-açúcar (Tabela 5). A combinação desses efeitos explicaram 88% da transferência de água para

a atmosfera. Resultados similares foram citados por Zhang et al. (2016b) para o milho irrigado, no Norte da China. E diferentemente dos observados por Silva et al. (2013).

Tabela 5. Efeitos diretos e indiretos das variáveis ambientais na ET da cana-de-açúcar no Submédio do Vale São Francisco

| | | | |
|-----------------------------|------------------|-----------|---------|
| Rn | | r parcial | r total |
| Efeito direto sobre | ET | -0,1513 | |
| Efeito indireto via | Ts | 0,3960 | |
| Efeito indireto via | Tmáx | -0,0097 | |
| Efeito indireto via | Tmín | 0,0900 | |
| Efeito indireto via | RFA _I | 0,4237 | 0,7487 |
| RFA _I | | r parcial | r total |
| Efeito direto sobre | ET | 0,5517 | |
| Efeito indireto via | Rn | -0,1162 | |
| Efeito indireto via | Ts | 0,2043 | |
| Efeito indireto via | Tmáx | -0,0059 | |
| Efeito indireto via | Tmín | 0,1013 | 0,7351 |
| Tmáx | | r parcial | r total |
| Efeito direto sobre | ET | -0,0124 | |
| Efeito indireto via | Rn | -0,1184 | |
| Efeito indireto via | Ts | 0,4340 | |
| Efeito indireto via | Tmín | 0,1059 | |
| Efeito indireto via | RFA _I | 0,2624 | 0,6714 |
| Tmín | | r parcial | r total |
| Efeito direto sobre | ET | 0,1962 | |
| Efeito indireto via | Rn | -0,0694 | |
| Efeito indireto via | Ts | 0,2892 | |
| Efeito indireto via | Tmáx | -0,0067 | |
| Efeito indireto via | RFA _I | 0,2847 | 0,6940 |
| Ts | | r parcial | r total |
| Efeito direto sobre | ET | 0,5949 | |
| Efeito indireto via | Rn | -0,1007 | |
| Efeito indireto via | Tmáx | -0,0091 | |
| Efeito indireto via | Tmín | 0,0954 | |
| Efeito indireto via | RFA _I | 0,1894 | 0,7700 |
| Coeficiente de determinação | | | 0,8781 |
| Efeito da variável residual | | | 0,3491 |

Rn - saldo de radiação, RFA_I - radiação fotossinteticamente ativa interceptada, Tmáx - temperatura máxima do ar, Tmín - temperatura mínima do ar, Ts - Temperatura do solo

No presente estudo, percebe-se que a RFA_I apresentou associação com a ET maior do que o próprio R_n (Tabela 5), o que fortalece a sua aplicação em estudos futuros dessa mesma natureza. A análise de trilha não foi feita com a variável resposta $ET\ ETo^{-1}$, pois esta última apresentou correlação significativa apenas com T_s . O aumento da T_{solo} elevou a ET e a razão $ET\ ETo^{-1}$, o que pode estar associada a influência da temperatura na absorção de água pelas raízes (Marin et al., 2009).

CONCLUSÕES

1. A dinâmica do crescimento da caatinga e da cana-de-açúcar no Submédio do Vale São Francisco não exibiram correlação significativa com a sazonalidade da evapotranspiração real destas superfícies.

2. A evapotranspiração real da caatinga preservada foi influenciada de maneira direta e, ou, indireta pela umidade do solo, da mesma forma que esta última e a radiação solar global alteram sua resposta à demanda atmosférica.

3. Para a cana-de-açúcar irrigada, a evapotranspiração real foi governada de maneira direta ou indireta pela radiação fotossinteticamente ativa interceptada e, ou, temperatura do solo, e esta última ainda afetou a razão evapotranspiração real e de referência.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq (Processo 483223/2011-5) e FACEPE (Processo APQ-0062-1.07/15) pelo auxílio financeiro e a CAPES pela concessão da Bolsa de pós-graduação da primeira autora.

LITERATURA CITADA

- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements. 1.ed. Rome: FAO, 1998. 300p. Irrigation and Drainage Paper, 56
- Cruz, C. D. GENES - A software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. *Acta Scientiarum Agronomy*, v.35, p.271-276, 2013.
- Inman-Bamber, N. G. Temperature and seasonal effects on canopy development and light interception of sugarcane. *Field Crop Research*, v.36, p.41-51, 1994.
- Marin, F. R.; Pellegrino, G. Q.; Assad, E. D.; Pinto, H. S.; Júnior, J. Z. Cana-de-açúcar. Monteiro, J. E. B. A. In: *Agrometeorologia dos cultivos: O fator meteorológico na produção agrícola*. Brasília: Instituto Nacional de Meteorologia, 2009. p.107-130.
- Melo, E. C. de S.; Correia, M. de F.; Aragão, M. R. da S. Expansão da agricultura irrigada e mudanças nos processos de interação superfície-atmosfera: Um estudo numérico de impacto ambiental em áreas de Caatinga. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.7, n.5, 2014.
- Mohan, S.; Arumugam, N. Relative Importance of Meteorological Variables in Evapotranspiration: Factor Analysis Approach. *Water Resources Management*, v.1, p.1-20, 1996.
- Perez, P. J.; Castellvi, F.; Martinez-Cob, A. Assessment reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.97, p.141-150, 1999.
- Silva, T. G. F. da.; Zolnier, S.; Moura, M. S. B. de .; Souza, L. S. B. de. Sazonalidade do controle da evapotranspiração pela cana-de-açúcar irrigada e características aerodinâmicas da cultura no Semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.6, n.4, 2013.

- Silva, T. G. F. da; Moura, M. S. B. de.; Zolnier, S.; Souza, L. S. B. de. Biomassa seca acumulada, partições e rendimento industrial da cana-de-açúcar irrigada no Semiárido brasileiro. *Revista Ceres*, v.61, n.5, p.686-696, 2014.
- Silva, T. G. F. da; Primo, J. T. A.; Morais, J. E. F. de; Diniz, W. J. da S.; Souza, C. A. A.; Silva, M. da C. Crescimento e produtividade de clones de palma forrageira no semiárido e relações com variáveis meteorológicas. *Revista Caatinga*, v.28, p.10-18, 2015.
- Silva, T. G. F.; Moura, M. S. B.; Zolnier, S.; Soares, J. M.; Vieira, V. J. S.; Junior, W. F. G. Requerimento hídrico e coeficiente de cultura da cana de açúcar irrigada no semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, n.1, p.64-71, 2012.
- Souza, L. S. B.; Moura, M. S. B.; Sedyama, G. C.; Silva, T. G. F. Balanço de energia e controle biofísico da evapotranspiração na Caatinga em condições de seca intensa. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.50, p.627-636, 2015.
- Zhang, B.; Xu, D.; Liu, Y.; Li, F.; Cai, J.; Du, L. Multi-scale evapotranspiration of summer maize and the controlling meteorological factors in north China. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.216, p.1-12, 2016a.
- Zhang, D.; Xiaomang, L.; Qi, Z.; Kang, L.; Changming, L. Investigation of factors affecting intra-annual variability of evapotranspiration and streamflow under different climate conditions. *Journal of Hydrology*, v.543, p.759-769, 2016b.
- Zhao, J.; Xu, Z.; Zuo, D.; Wang, X. Temporal variations of reference evapotranspiration and its sensitivity to meteorological factors in Heihe River Basin, China. *Water Science and Engineering*, v.1, p.1-8, 2015.

9. CONCLUSÃO GERAL

Por meio desta pesquisa micrometeorológica, realizada em campo simultaneamente, buscou-se conhecer a dinâmica dos fluxos de energia e água em áreas de caatinga preservada e cana-de-açúcar irrigada, em ambiente semiárido. Embora, conclusão óbvia já era sabido, porém, o conhecimento dos valores médios avaliados estatisticamente ao longo do ano, era incipiente.

A partir dos resultados permite-se inferir que os componentes dos balanços de radiação e energia nas superfícies são quantitativamente distintas durante todo o ano, com elevados valores de fluxo de calor sensível (H) e baixos valores de fluxo de calor latente (LE) na caatinga preservada, enquanto na cana-de-açúcar, aumenta gradativamente o fluxo de LE diante da boa condição hídrica, uma vez que é irrigada e há disponibilidade de energia durante todo ano.

A caatinga preservada induz a maior manutenção de energia no sistema para aquecimento do ar, enquanto a cana-de-açúcar irrigada promove maior partição da energia na injeção de vapor d'água para a atmosfera.

A substituição da caatinga pela cana-de-açúcar irrigada promove alterações significativas nos componentes dos balanços de radiação e energia, e por sua vez, na transferência de vapor d'água para a atmosfera, promovendo alterações no clima local, devendo ser considerada nos modelos de simulação hidrológicos e climáticos.

A dinâmica do crescimento da caatinga e da cana-de-açúcar na região do Submédio do Vale São Francisco não exibiram correlação significativa com a sazonalidade da evapotranspiração real destas superfícies.

A evapotranspiração real da caatinga preservada foi influenciada de maneira direta e, ou, indireta pela umidade do solo, da mesma forma que esta última e a radiação solar global alteram sua resposta à demanda atmosférica.

Para a cana-de-açúcar irrigada, a evapotranspiração real foi governada de maneira direta ou indireta pela radiação fotossinteticamente ativa interceptada e, ou, temperatura do solo, e esta última ainda afetou a razão evapotranspiração real e de referência.

10. REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S. HOWELL, T. A.; JESEN, M. A.;
Evapotranspiration information reporting: Factors governing measurement accuracy. **Agricultural water management**, v. 98, p. 899-920, 2011.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements**. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56) Rome: FAO, p. 326, 1998.
- ARYA, S. P. **Introduction to Micrometeorology**. San Diego: Academic Press, 2001, 420p.
- ARRUDA, J. C.de.; J. A.; FILHO, N.P.; NOGUEIRA, J. de S.; FILHO, E. O. de A.; JÚNIOR, J. H. C.; VOURLITS, G. L. Aplicação de três metodologias para estimar o fluxo de calor latente em florestas de transição. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.21, n.3b, p.233-240, 2006.
- AZEVEDO, P. V.; SILVA, B. B.; SILVA, V. P. R. Water requirements of irrigated mango orchards in northeast Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 58, p. 241–254, 2003.
- BASTIAANSEN, W. G. M; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M. A. remote sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL): formulation. **Journal of Hydrology**, p. 198-212, 1998.
- BALDOCCHI, D. D., MEYERS, P.T. Trace gas exchange above the floor of a deciduous forest 1. Evaporation and CO₂ efflux. **Journal of Geophysical Research**, v. 96, p. 7271–7285, 1991.
- BOWEN, I. S. The ratio of heat losses by conduction and evaporation from any surface, **Physical Review**, v. 27 p. 779-789, 1926.
- BOWLING, D. R.; BETHERS-MARCHETTI, S.; LUNCH, C. K.; GROTE, E. E.; BELNAP, J. Carbon, water, and energy fluxes in a semiarid cold desert grassland during and following multiyear drought. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, 2010.

CHEN, S.; CHEN, J.; LIN, G.; ZHANG, W.; MIAO, H.; WEI, L.; HUANG, J.; HAN, X.; Energy balance and partition in Inner Mongolia steppe ecosystems with different land use types. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.149, p.1800-1809, 2009.

CABRAL, O. M. R.; ROCHA, H. R.; LIGO, M. A. V.; BRUNINI, O.; DIAS, M. A. F. S. Fluxos turbulentos de calor sensível, vapor d'água e CO₂ sobre plantação de cana-de-açúcar (*Saccharum* sp.) em Sertãozinho-SP. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 1, p. 61-70, 2003.

CAMPOS, J. H. B. C.; SILVA, V. P. R.; AZEVEDO, P. V.; BORGES, C. J. R.; SOARES, J. M.; MOURA, M. S. B.; SILVA, B. B. Evapotranspiração e produtividade da mangueira sob diferentes tratamentos de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.2, p.150-156, 2008.

CUNHA, A. P. M. A.; ALVALÁ, R. C. S.; OLIVEIRA, G. S. Impactos das mudanças de cobertura vegetal nos processos de superfície na região semiárida do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, p.139-152, 2013.

CARNEIRO, R. G., MOURA, M. A. L., LYRA, R. F. de F., ANDRADE, A. M. D., SANTOS, A. B. dos., MAIA, R. G. X. Fluxo de calor no solo e saldo de radiação dentro de uma área de Mata Atlântica em comparação com uma área de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de geografia física**, v. 6, n. 3, p. 555-565, 2013.

CHAMBERS, J. Q. ARTAXO, P. Biosphere-atmosphere interactions: Deforestation size influences rainfall. **Nature Climate Change**, v.7, p. 175-176, 2017.

DAVID, M.; WALKO, R. L.; AVISSAR, R. Effects of deforestation on spatio temporal distributions of precipitation in South America. **Journal of Climate**, v. 24, p. 2147-2163, 2011.

EMBRAPA, **Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semiárido**, 2007 Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/bioma_caatinga/arvore/CONT000glz1ehqv02wx5ok0f7mv200nvg0xn.html> Acesso em: 05/03/17

FERNANDES, E. X.; NERY, J. T.; Energy balance in the Cerrado of ecological station of Assis- São Paulo state, Brasil. **Acta Scientiarum**. v. 37, p. 411-415, 2015.

FOKEN, T. The energy balance closure problem: an over view, **Ecological Applications**, p. 1351-1367, 2008.

HAYHOE, S.; NEILL, C.; PORDER, S.; MCHORNEY, R.; LEFEBVRE, P.; COE, M.; ELSENBEER, H.; KRUSCHE, A. Conversion to soy on the Amazonian agricultural frontier increases stream flow without affecting storm flow dynamics. **Global Change Biol**, V.5, p. 1821-1833, 2011.

IBGE. **Produção Agrícola Municipal** <www.sidra.ibge.gov.br/bda>. Acesso em: 03 de agosto, 2016.

INMAN-BAMBER, N. G.; MCGLINCHEY, M. G. Crop coefficients and water-use estimates for sugarcane based on long-term bowen ratio energy balance measurements. **Field Crops Research**, v. 83, p. 125-138, 2003.

KRISHNAN, P.; MEYERES, T. P.; SCOTT, R. L.; KENNEDY, L.; HEUER, M. Energy exchange and evapotranspiration over two temperate semi-arid grasslands in North America. **Agricultural and Forest Meteorology**, p. 31-44, 2012.

LIMA, P.C.S.; LEITÃO, M.M.V.B.R.; AZEVEDO, P.V.; OLIVEIRA, G.M.; SOBRINHO, J.E.; MOURA, M.S.B.; MENEZES, H.E.A.; PINTO, M.G.C.L. Albedo de pastagem e caatinga. In XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. Belo Horizonte – MG, 2009.

LIMA, J. R.S.; ANTONIO, A. C. D.; LIRA, C. A. B. O.; SOUZA, E. S.; SILVA, I. F. Balanço de energia e evapotranspiração de feijão caupi sob condições de sequeiro, **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, p.65-74, 2011.

LIOU, K. N. **An Introduction to Atmospheric Radiation**. Second Edition. Academic Press. 583p. 2002.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; BESERRA, E. A.; LACERDA, F. F. **Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro**, Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas Instituto Nacional do Semiárido (ISNA), Campina Grande-PB, 2011.

MMA-**Ministério do Meio Ambiente**, 2015. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/biomas/caatinga>> Acesso em 20 de fevereiro de 2016.

MOURA, M. S. B.; GALVINCIO, J. D.; BRITO, L. T. L.; SOUZA, L. S. B.; AS, I. I. S.; SILVA, T.G. F. **Clima e água de chuva no semiárido**. IN: BRITO, L. T. L.; MOURA, M. S. B.; GAMA, G. F. B.. (Org.). Potencialidades da água de chuva

no semiárido brasileiro. 1 ed. Petrolina: Embrapa semiárido, v.1 p. 37-59, 2007a.

MORAN, M. S.; SCOTT, R. L.; KEEFER, T. O.; EMMERICH, W. E.; HERNANDEZ, M.; NEARING, G. S.; PAIGE, G. B.; COSH, M. H.; ONEILL, P. E. Partitioning evapotranspiration in semiarid grassland and shrubland ecosystems using time series of soil surface temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, p. 59-72, 2009.

MOURA, M. S. B.; SILVA, T. G. F.; VON, R. C.; FRANCIS, F.; SOUZA, L. S. B. Monitoramento dos fluxos de radiação, energia, CO₂, e vapor d'água em superfícies vegetadas. **IN: Mudanças climáticas e modelos ambientais: caracterização e aplicações**. Recife-PE: Editora Universitária UFPE, p.1- 412, 2011.

MEDEIROS, A. T.; SENTELHAS, P. C.; LIMA, R. N. Estimativa da evapotranspiração de referência a partir da equação de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas, em Paraipaba-CE. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 23, n.1, p.21-30, 2003.

MELLO, E. C. de S., CORREIA, M. de F., ARAGÃO, M. R. da S. Expansão da agricultura irrigada e mudanças nos processos de interação superfície-atmosfera : um estudo numérico de impacto ambiental em áreas de caatinga. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.07, n. 05, 2014.

OMETTO, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981, 440p.

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, 166-174, 2006a.

OLIVEIRA, M. B. L.; RANDOW, C. V.; MANZI, A. O.; ALVALA, R. C. S.; SÀ, L. D. A.; LEITÃO, M. M. V. B. R.; SOUZA, A. Fluxos turbulentos de energia sobre o pantanal Sul Mato Grossense. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3b, 159-165, 2006b.

OLIVEIRA, F. T.; SOUTO, J. S.; SILVA, R. P.; ANDRADE FILHO, F. C.; PEREIRA JUNIOR, E. B. Palma forrageira: Adaptação e importância para os ecossistemas áridos e semiáridos. **Revista verde**, v. 5, n 4, p.27-37, 2010.

OLIVEIRA, G.; MORAIS, E. C.; RUDORFF, B. F. T. Balanço de radiação em áreas de expansão do cultivo da cana-de-açúcar no estado de São Paulo nas safras 2006/2007 e 2007/2008. In: XVI simpósio Brasileiro de sensoriamento remoto. **Anais**, Foz do Iguaçu, 2013.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: Fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba-RS: Livraria e Editora Agropecuária, Ltda, p.478, 2002.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba- FEALQ, SP, p.183, 1997.

PEREZ, P. J.; CASTELLVI, F.; MARTINEZ-COB, A. Assessment reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, V.97, p 141-150, 1999.

PILAU, F. G., ANGELOCCI, L. R., Balanço de radiação de copas de cafeeiros em renques e suas relações com radiação solar global e saldo de radiação de gramado. **Bragantia**, Campinas, 2014.

RIGHI, E. Z. **Balanço de energia e evapotranspiração de cafezal adensado em crescimento sob irrigação localizada**. 2004, 168 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

SIQUEIRA, A. de A.; LEITÃO, M. de M. V. B. R.; estimativa da evapotranspiração em áreas de caatinga e reflorestada com algaroba no semi-árido do nordeste brasileiro. In: X Congresso Brasileiro de Meteorologia e VIII congresso da flismet, 1998.

SÁ, I. B.; CUNHA, T. J. F.; TEIXEIRA, A. H. C.; ANGELOTTI, F.; DRUMOND, M. A. Processos de desertificação no Semiárido brasileiro. In: Iêdo Bezerra Sá; Pedro Carlos Gama da Silva. (Org.). **Semiárido brasileiro: pesquisa, desenvolvimento e inovação**. 1ª ed. Brasília: Embrapa, v. 1, p. 125-158, 2010.

SANTOS, S. A.; CORREIA, M. F.; ARAGÃO, M. R. S.; SILVA, P. K. O. Aspectos da variabilidade sazonal da radiação, fluxos de energia e CO₂ em área de caatinga. **Revista Brasileira de Geografia física**, v. 4, p.761-773, 2012.

SANTOS, T. V. **Fluxos de calor na superfície e evapotranspiração diária em áreas agrícolas e de vegetação nativa na bacia do jacuí por meio de**

imagens orbitais. 2009, 96p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SENA, L. J. C. **Estudo das componentes do balanço de energia em uma cultura de arroz irrigado no Sul do Brasil**. 2012. 55 f. Dissertação (Mestrado em meteorologia), Universidade Federal de Santa Maria- RS.

SILVA, T. G. F.; MOURA, M. S. B.; ZOLNIER, S.; SOARES, J. M.; SOUZA, L. S. B.; BRANDÃO, E. O. Variação do balanço de radiação e energia da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 2, p. 139-147, 2011.

SILVA, T. G. F. da.; ZOLNIER, S.; MOURA, M. S. B. de .; SOUZA, L. S. B. de. Sazonalidade do controle da evapotranspiração pela cana-de-açúcar irrigada e características aerodinâmicas da cultura no Semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.06, n.4, 2013.

SOUZA, L. S. B.; MOURA, M. S. B.; SEDIYAMA, G. C.; SILVA, T. G. F. Balanço de energia e controle biofísico da evapotranspiração na Caatinga em condições de seca intensa. **Revista Pesquisa Agropecuária brasileira**, v. 50, p. 627-636, 2015a.

SOUZA, L. S. B.; MOURA, M. S. B.; SEDIYAMA, G. C.; SILVA, T. G. F. Balanço de radiação em ecossistema de Caatinga preservada durante um ano de seca no Semiárido Pernambucano. **Revista Brasileira de Geografia física**, v. 8, p. 41-55, 2015b.

SWANN, L. S.; LONGO, M.; KNOX, R. G.; LEE, E.; MOORCROFT, P. R.; Future deforestation in the Amazon and consequences for south American climate. **Agricultural and Forest Meteorology**, p. 12-24, 2015.

SUYKER, A. E., VERMA, S. B. Interannual water vapor and energy exchange in an irrigated maize-based agroecosystem. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, p.417–427, 2008.

SCOTT, R. L.; JENERETTE, G. D.; POTTS, D. L.; HUXMAN, T. E.; Effects of seasonal drought on net carbon dioxide exchange from a woody-plant-encroached semiarid grassland. **Journal of Geophysical Research**, v. 114, 2009.

SOUZA FILHO, J.D.C.; RIBEIRO, A.; COSTA, M.H.; COHEN, J.C.P.; ROCHA, E.J.P. Variação sazonal do balanço de radiação em uma floresta tropical no

nordeste da Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, p.318-330, 2006.

SPRACKLEN, D. V.; ARNOLD, S. R.; TAYLOR, C. M. Observations of increased tropical rainfall preceded by air passage over forests. **Nature**, p. 282-285, 2012.

TEIXEIRA, A. H. de C.; BASTIAANSSEN, W. G. M.; AHMAD, N.D.; MOURA, M. S. B. de.; BOS, M. G. Analysis of energy fluxes and vegetation-atmosphere parameters in irrigated and natural ecosystems of semi-arid Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 362, p. 110-127, 2008a.

TEIXEIRA, A.H. de C.; BASTIAANSSEN, W.G. M. ; MOURA, M. S. B. SOARES, J. M.; AHMAD, M. D.; BOS, M. G. Energy and water balance measurements for water productivity analysis in irrigated mango trees, Northeast Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.148, p.1524-1537, 2008b.

TEIXEIRA, A.H. de C.; BASTIAANSSEN, W.G. M.; BASSOI, L. H.; Crop water parameters of irrigated wine and table grapes to support water productivity analysis in the Sao Francisco river basin, Brazil. **Agricultural water Management**, v.94, p.31-42, 2007.

TEIXEIRA, A.H. de C.; Avaliação dos componentes do balance de energia durante o primeiro ano de cultura da banana. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v 5, n.1, p.28-32, 2001.

TATSCH, J. P. **Uma análise dos fluxos dos fluxos de superfície e do microclima sobre cerrado, cana-de-açúcar e eucalipto, com implicações paramudanças climáticas regionais**. 2006 132f. Dissertação (Mestrado) Universidade de São Paulo-USP (Instituto de Astronomia, Geofísica, e ciências atmosféricas).

TAHIRI, A. Z.; YASUDA, H. A. H. Fixed and variable light extinction coefficients for estimating plant transpiration and soil evaporation under irrigated maize. **Agricultural water Management**, v. 84, p. 186-192, 2006.

ZHANG, B.; KANG, S.; LI, F.; ZHANG, L. Comparison of three evapotranspiration models to Bowen ratio-energy balance method for a vineyard in an arid desert region of northwest China. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, p. 1629-1640, 2008.

ZHANG, B.; Xu, D.; LIU, Y.; Li, F.; CAI, J; DU, L. Multi-scale evapotranspiration of summer maize and the controlling meteorological factors in north China. **Agricultural and Forest Meteorology**, p. 1-12, 2016a.

ZHANG, D.; XIAOMANG, L.; Qi, Z.; KANG, L.; CHANGMING, L. Investigation of factors affecting intra-annual variability of evapotranspiration and streamflow under different climate conditions. **Journal of Hydrology**, v.543 p. 759–769, 2016b.

WILSON, K. B.; HANSON, P. S.; MULHOLLAND, P. J.; BALDOCCHI, D. D.; WULLSCHLEGER, S. D. A Comparison of the methods for determining forest evapotranspiration and its components: sap-flow, soil water budget, eddy covariance and catchment water balance. **Agriculture Forest and Meteorology**, p. 153-168, 2001.