ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>

Mudanças no Uso da Terra e Efeito nos Componentes do Balanço Hídrico no Agreste Pernambucano

Thyago Rodrigues do Carmo Brito¹, José Romualdo de Sousa Lima², Cássio Lopes de Oliveira³, Rodolfo Marcondes Silva Souza⁴, Antônio Celso Dantas Antonino⁵, Érika Valente de Medeiros⁶, Eduardo Soares de Souza⁷, Edevaldo Miguel Alves⁸

¹ Mestre em Produção Agrícola, Pesquisador, Unidade Acadêmica de Garanhuns, Universidade Federal do Agreste de Pernambuco, Av. Bom Pastor, s/n, CEP 55292-278, Garanhuns, Pernambuco. (87) 3764-5529. thyagorodrigues@agronomo.eng.br.

² Dr.em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Professor Associado II, Unidade Acadêmica de Garanhuns, Universidade Federal do Agreste de Pernambuco, Av. Bom Pastor, s/n, CEP 55292-278, Garanhuns, Pernambuco. (87) 3764-5529. romualdo.lima@ufpe.br (autor para correspondência).

³ Engenheiro Agrônomo, Mestrando em Produção Agrícola, Unidade Acadêmica de Garanhuns, Universidade Federal do Agreste de Pernambuco, Av. Bom Pastor, s/n, CEP 55292-278, Garanhuns, Pernambuco. (87) 3764-5529. cassio.agronomo@yahoo.com.

⁴ Dr.em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Pesquisador do INCT: ONDACBC, Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Av. Prof. Luiz Freire, 1000, CEP 50740-540, Recife, Pernambuco. (81) 2126-7973. rsouza@lavabit.com.

⁵ Dr. em Física do Solo, Professor Titular, Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Av. Prof. Luiz Freire, 1000, CEP 50740-540, Recife, Pernambuco. (81) 2126-7973. acda@ufpe.br.

⁶ Dra.em Agronomia/Fitotecnia, Professora Associada II, Unidade Acadêmica de Garanhuns, Universidade Federal do Agreste de Pernambuco, Av. Bom Pastor, s/n, CEP 55292-278, Garanhuns, Pernambuco. (87) 3764-5626. evmbio@gmail.com.

⁷ Dr.em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Professor Associado II, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Fazenda Saco, s/n, CEP 56900-000, Serra Talhada, Pernambuco. (87) 3929-3026. eduardo.souza.rd@gmail.com.

⁸ Dr.em Engenharia Civil, Professor Adjunto, Centro Acadêmico do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco, Rodovia BR-104 km 59 s/s - Nova Caruaru, CEP. 55.014-900, Caruaru, Pernambuco. (81) 2103-9156. edevaldofisica@gmail.com.

Artigo recebido em 13/09/2019 e aceito em 24/03/2020

RESUMO

As mudanças no uso da terra podem provocar alterações no regime hídrico de várias regiões do mundo. Na região agreste de Pernambuco, essas mudanças consistem, principalmente, na retirada da Caatinga para a implantação de pastagens e culturas agrícolas. Contudo, pouco se sabe sobre o efeito dessas mudanças nos componentes do balanço hídrico. Desse modo, o objetivo do presente trabalho foi avaliar o efeito da conversão de áreas de Caatinga em áreas de pastagem nos componentes do balanço hídrico. Para isso, foram medidos, simultaneamente, o armazenamento de água no solo, os fluxos de água (drenagem e/ou ascensão capilar), o escoamento superficial e a evapotranspiração (ET) durante o período de 24 meses (outubro de 2013 a setembro de 2015), pela metodologia do balanço hídrico no solo, em áreas de Caatinga e de pastagem no município de São João-PE. Verificou-se que o armazenamento de água no solo na Caatinga foi menor que na pastagem, devido ao maior dossel e sistema radicular da Caatinga. As perdas de água por drenagem totalizaram -103,9 mm na pastagem e foram nulas na Caatinga. Em ambas as áreas a ET foi proporcional a precipitação pluvial, totalizando 1.195,6 mm com média de 1,64 mm d⁻¹ na Caatinga e na pastagem totalizou 1.087,4 mm e 1,49 mm d⁻¹. Conclui-se que as mudanças no uso da terra (retirada da Caatinga e implantação de pastagem) resultaram em aumento das perdas de água por drenagem e redução da evapotranspiração, que pode causar impacto no clima regional.

Palavras-chave: Caatinga; evapotranspiração; pastagem; umidade do solo.

Land Use Changes and Effects on the Water Balance Components in Agreste Pernambucano

ABSTRACT

Land use changes can cause alterations in water regime in various regions of the world. In the Agreste region of Pernambuco, these changes consist mainly of the removal of Caatinga for the implantation of grassland and crops. However, little is known about the effect of these changes on water balance components. Thus, the objective of the present study was to evaluate the effect of the conversion of Caatinga areas into grassland in the water balance components. For this, we measured simultaneously the soil water storage, water fluxes (drainage and / or capillary rise), runoff and evapotranspiration (ET) over a 24-month period (October 2013 to September 2015), by the soil water balance method in Caatinga and grassland areas in São João-PE. It was found that the soil water storage in Caatinga was lower than in the grassland, due to the higher canopy and root system of the Caatinga. Water losses, via drainage, totaled -103.9 mm in the grassland and were zero in the Caatinga. In both areas, ET was proportional to rainfall, totaling 1,195.6 mm with an average of 1.64 mm d⁻¹ in the Caatinga and in the grassland totaled 1,087.4 mm and 1.49 mm d⁻¹. It

concludes that land use changes (i.e., the conversion of Caatinga areas into grassland) resulted in increased losses of drainage and reduced evapotranspiration, which can affect regional climate.

Key words: Caatinga; evapotranspiration; grassland; soil water content.

Introdução

Com o avanço das mudanças climáticas globais, devido ao aquecimento global, o aumento do estresse hídrico em regiões áridas e semiáridas tem se tornado um problema de suma importância (Zhang and Shangguan, 2016). Essas regiões são caracterizadas por chuvas de baixa quantidade e alta variabilidade, além de uma elevada evapotranspiração potencial, o que resulta numa limitada disponibilidade de água no solo para a produtividade e crescimento vegetal (Abaker et al., 2018).

Desse modo, a umidade do solo é um dos fatores mais limitantes para o desenvolvimento da vegetação nas regiões áridas e semiáridas (Yu et al., 2018), causando impacto tanto nas variáveis climáticas (Silva et al., 2017), quanto na produtividade vegetal (Silva et al., 2014; Gomes et al., 2015; Gondim et al., 2015; Fang et al., 2016; Machado et al., 2016; Souza et al., 2016; Ribeiro et al., 2018).

Assim, o conhecimento da umidade do solo e de seus processos inter-relacionados, tais como, infiltração, redistribuição, drenagem, evapotranspiração, etc., é de primordial importância para um manejo eficiente dos recursos hídricos, para vários processos ec hidrológicos (fotossíntese, respiração do ecossistema, fluxos de carbono, etc.) e para a sustentabilidade da produção agrícola (Zanella de Arruda et al., 2016; Zhang and Shangguan, 2016; Queiroz et al., 2020; Meena et al., 2020).

Associado com as mudanças climáticas globais, ainda se tem os problemas relacionados com as mudanças no uso da terra. Essas mudanças, que são causadas pelas ações humanas, por meio da conversão da vegetação natural para a implantação, geralmente, de culturas agrícolas ou pastagens, têm afetado as trocas de água, energia e carbono entre a atmosfera e a superfície terrestre (Liu et al., 2008; Cunha et al., 2015; Lima et al., 2017; Marhaento et al., 2017; Silva et al., 2017; Luan et al., 2018; Fontes Júnior and Montenegro, 2019; Šípek et al., 2020). Além disso, as mudanças no uso da terra são a segunda maior fonte de emissão de gases de efeito estufa, principalmente, devido ao desmatamento nas regiões tropicais e subtropicais (Don et al., 2011), o que tem um importante efeito no clima (Cunha et al., 2015; Silva et al., 2017; Aleixo and Silva Neto, 2018).

Nesse sentido, avaliar a influência dessas mudanças na umidade do solo é de fundamental

importância para se compreender os processos ecológicos e hidrológicos (ecohidrológicos), especialmente em ecossistemas limitados por água, como os ecossistemas das regiões áridas e semiáridas (Leite et al., 2018; Yu et al., 2018). Essas regiões são as mais vulneráveis as mudanças no uso da terra, devido aos frequentes anos de precipitações abaixo da média e de secas severas (Cunha et al., 2015), como as ocorridas no período de 2012-2016 na região semiárida do nordeste do Brasil (Marengo et al., 2018). No semiárido nordestino, os períodos de seca afetam o crescimento e produção vegetal e têm substancial impactos sociais e econômicos na população local (Ribeiro et al., 2016).

Nessa região tem-se o único bioma restrito ao território brasileiro, a Caatinga. Nesse bioma o estudo e a conservação da diversidade biológica dessa vegetação é um dos maiores desafios da ciência brasileira, pois, é proporcionalmente a menos estudada entre as regiões naturais brasileiras e é a menos protegida, com menos de 2% de seu território composto por unidades de conservação, além de ainda estar passando por processos de modificação causada pela ação antrópica (Leal et al., 2005).

As condições ambientais da Caatinga são bastante severas. Os solos são pobres, a precipitação pluvial anual é baixa (500-600 mm) e errática (Sampaio et al., 2004), as temperaturas médias anuais são altas (23-28°C) e a umidade relativa, geralmente, é abaixo dos 50%. Desse modo, a evapotranspiração potencial é elevada (acima de 1.500 mm por ano), resultando num déficit hídrico de 07 a 11 meses do ano (Menezes et al., 2012; Ribeiro et al., 2016).

De acordo com Cirilo (2008), para a região semiárida brasileira, as projeções indicam um possível aumento na temperatura do ar (de 2 a 4°C) e uma redução na precipitação pluvial (de 10 a 20%), com uma tendência de “aridização” da região, com a substituição da Caatinga por vegetação mais típica de regiões áridas, como as cactáceas.

Corroborando essas previsões, um relatório divulgado pelo Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas, mostra que as projeções para a Caatinga são de aumento de 0,5° a 1°C da temperatura do ar e decréscimo entre 10% e 20% da precipitação pluvial, durante as próximas três décadas (até 2040). Além disso, esse mesmo relatório diz que a Caatinga é o bioma brasileiro

onde é esperada maior alteração no regime de precipitação, com uma significativa redução das chuvas, podendo resultar em profundas alterações no funcionamento ecológico. As possíveis consequências dessas mudanças no clima são as ocorrências de secas mais intensas e frequentes (PBMC, 2016).

A degradação dos recursos naturais no bioma Caatinga tem sido provocada pelo aumento da intensidade de uso do solo e redução da cobertura vegetal (Menezes and Sampaio, 2002). A retirada da Caatinga, para a implantação de pastos e culturas agrícolas, juntamente com a elevada variabilidade climática, pode provocar degradação do solo, com diminuição da infiltração da água no solo (Oliveira Júnior et al., 2014; Leite et al., 2018) e aumento do escoamento superficial (Silva et al., 2016; Andrade et al., 2017; Fontes Júnior and Montenegro, 2019), redução dos estoques de carbono (Schulz et al., 2016; Jesus et al., 2019; Santos et al., 2019) e da biomassa microbiana (Barros et al., 2019) do solo, aumento da temperatura do ar e redução da evapotranspiração (Silva et al., 2017), contribuindo para o aumento das emissões de CO₂ para a atmosfera (Ribeiro et al, 2016).

Dos componentes do ciclo hidrológico, a evapotranspiração (ET) é um dos mais importantes, uma vez que representa a saída de água por meio dos processos de evaporação do solo e transpiração vegetal. De acordo com Barreto et al. (2009) em algumas regiões, a quantidade de água evapotranspirada de uma bacia hidrográfica representa parcela superior à água que escoar superficialmente.

As mudanças climáticas e de uso da terra têm potencial de alterar os processos do ciclo hidrológico, tais como precipitação que afeta o escoamento superficial, temperatura e umidade relativa e que possuem estreita relação com evaporação e vazão em corpos hídricos e ET das plantas (Gondim et al., 2011; Gashaw et al., 2018; Aladejana et al., 2018; Šípek et al., 2020). Andrade et al. (2017) simularam cenários de mudanças no uso da terra, usando o modelo SWAT, na bacia do Rio Mundaú e encontraram que a implantação de vegetação de Caatinga em áreas agrícolas proporcionou redução no escoamento superficial e aumento na ET e recarga para o aquífero profundo.

A ET é um processo importante que é controlado pela interação de um grande número de fatores bióticos e ambientais (Wilson and Baldochi, 2000; Wever et al., 2002). Os atributos e processos do ecossistema, tais como, umidade do solo, produtividade vegetal, balanços de água e de nutrientes são todos influenciados

pela ET; por outro lado, todos esses processos influenciam a ET. Desse modo, existe um grande interesse em se estudar a ET numa variedade de ecossistemas para melhor se compreender a natureza das interações e das ligações entre ela e outros processos que ocorrem na superfície terrestre (Wever et al., 2002).

Além disso, existe a necessidade de se compreender como a precipitação influencia a ET em florestas sazonalmente secas (como a Caatinga), porque as vegetações das regiões áridas e semiáridas, provavelmente, serão mais sensíveis às mudanças na precipitação do que a outras mudanças globais (Weltzin et al., 2003).

Sabe-se que, juntamente com as mudanças climáticas globais, as mudanças no uso da terra podem provocar alterações no regime hídrico de várias regiões do mundo. Assim, estudos que determinem os componentes do balanço hídrico são de suma importância para se prever como as mudanças no uso da terra vão influenciar nesses processos. Além disso, esses estudos podem ser usados para decisões futuras de mitigação de mudanças climáticas.

A substituição da Caatinga por pastagens poderá afetar vários componentes do balanço hídrico, como o armazenamento de água no solo e a ET. No entanto, ainda não se tem conhecimento aprofundado como essa mudança no uso da terra irá afetar esses fluxos na região semiárida nordestina. Para isso, são necessários estudos que determinem simultaneamente os componentes do balanço hídrico em áreas de Caatinga e de pastagens, simultaneamente.

Neste contexto, em face da região Semiárida ser, possivelmente, uma das que mais sofrerão com os efeitos das mudanças de uso da terra pelas razões abordadas, são necessárias pesquisas no sentido de contribuir para a compreensão dos efeitos advindos desse processo sobre a Caatinga e os sistemas de produção, notadamente as áreas destinadas ao pastejo animal, por ser esta a atividade de maior expressão na região, de forma a auxiliar na tomada de decisões sobre o manejo agrícola e pecuário adequado.

Desse modo, a hipótese dessa pesquisa é de que a mudança no uso da terra, com a retirada da Caatinga e a implantação da pastagem, promoverá uma redução da ET e um aumento nas perdas de água por drenagem, devido às mudanças no tipo da vegetação.

Assim, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o efeito das mudanças no uso da terra nos componentes do balanço hídrico (evapotranspiração, escoamento superficial, drenagem e/ou ascensão capilar, armazenamento

de água no solo) em área da bacia hidrográfica do Rio Mundaú no Agreste de Pernambuco.

Material e métodos

Localização e Caracterização da Área Experimental

O trabalho foi desenvolvido na Fazenda Riacho do Papagaio (8° 48' 33'' S, 36° 24' 24'' O e 705 m de altitude), no município de São João, bacia hidrográfica do Rio Mundaú, e as medidas foram efetuadas em área cultivada com capim braquiária (*Brachiariadecumbens* Stapf), bem como numa área de Caatinga (Figura 1). De acordo com Borges Júnior et al. (2012), o clima da região é tropical chuvoso, com verão seco, sendo as médias anuais de temperatura e umidade relativa do ar de 21,1°C e 82,5%, respectivamente. A precipitação pluvial, de acordo com dados da

APAC é de 772 mm anuais (APAC, 2019), sendo os meses mais chuvosos maio, junho, julho e agosto.

A área de pastagem possui histórico de mais de três décadas de abertura e exploração da pecuária bovina, como principal atividade. Atualmente, a área é ocupada com pasto de braquiária em estágio considerável de degradação. Já a área de Caatinga segue relativamente preservada durante décadas (mais de 50 anos), sem resquícios severos de exploração neste ponto (Barros et al, 2019).

O solo da área é classificado como NeossoloRegolíticoeutrófico típico (Santos et al., 2012), cujas características físicas estão apresentadas na Tabela 1.

Figura 1. Localização das áreas de pastagem e de Caatinga em São João – PE.

Tabela 1. Granulometria (areia, silte e argila) e classificação textural do NeossoloRegolítico nas áreas de Caatinga e de pastagem na fazenda Riacho do Papagaio em São João – PE.

Caatinga	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Classificação textural
0-20 cm	84,5	13,2	2,3	Areia franca
20-40 cm	80,0	14,1	5,9	Areia franca
40-60 cm	77,1	15,4	7,5	Franco-arenosa
Pastagem	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Classificação textural
0-20 cm	87,7	8,8	3,5	Areia
20-40 cm	81,7	12,0	6,3	Areia franca
40-60 cm	76,4	16,2	7,4	Franco-arenosa

Componentes do balanço hídrico e atributos físico-hídricos do solo

Para a determinação dos componentes do balanço hídrico foram instalados sensores automatizados para medição da umidade volumétrica do solo nas profundidades de 10, 20, 30, 40 e 50 cm. As leituras de cada sensor foram realizadas a cada minuto com o valor de cada trinta minutos armazenado num sistema de aquisição de dados.

O balanço hídrico em determinado volume de solo, num certo período de tempo (Silva et al., 2014), é descrito pela equação:

$$\Delta A = P + I + AC - D - ES - ET \quad (1)$$

Sendo ΔA a variação de armazenamento de água no perfil de solo; P a precipitação pluvial; I a irrigação; AC a ascensão capilar; D a drenagem profunda; ES o escoamento superficial e ET a evapotranspiração. Todos os termos dessa equação estão em mm.

O termo irrigação foi nulo, pois o trabalho se realizou em condições de sequeiro. A precipitação pluvial foi monitorada por meio de um pluviômetro automatizado instalado numa torre no centro da área.

O armazenamento acumulado de água no solo foi calculado pela regra do trapézio, considerando-se que as medidas foram realizadas em intervalos igualmente espaçados, desde a superfície ($z = 0$) até a profundidade de interesse ($z = L$).

A variação no armazenamento de água no perfil de solo (ΔA) foi determinada pela diferença dos valores do armazenamento de água do perfil nos tempos inicial e final de cada período considerado, sendo expressa pela seguinte equação:

$$\Delta A = [\theta_{(f)} - \theta_{(i)}]L = A_f - A_i \quad (2)$$

Sendo A_f e A_i os armazenamentos acumulados de água final e inicial, respectivamente.

A camada de solo que foi realizada o balanço hídrico foi de 0-50 cm, uma vez que englobe todo o sistema radicular da pastagem (Silva et al., 2014) e a maior parte do sistema radicular da Caatinga (Pinheiro et al., 2013).

O fluxo total de água (Q), ou seja, as perdas por drenagem ($-Q$) ou os ganhos por ascensão capilar ($+Q$), de água da zona radicular por meio do limite inferior do volume de solo estudado ($z = 50$ cm), respectivamente, foram determinados a partir da equação 3 (Silva et al., 2014):

$$Q = \int_0^t q dt = q \Delta t \quad (3)$$

Sendo q (mm d^{-1}), a densidade de fluxo de água no limite inferior do volume de solo, delimitado pela zona radicular e Δt o intervalo de tempo de estudo do balanço hídrico (no nosso caso, mensal).

As densidades de fluxo (q) foram estimadas com base na equação de Darcy-Buckingham:

$$q = -K(\theta) \nabla \phi \quad (4)$$

Sendo q o fluxo de água na base do perfil de solo, $K(\theta)$ a condutividade hidráulica não saturada e $\nabla \phi$ o gradiente de potencial total.

Foram coletadas cinco amostras indeformadas em cada uma das áreas e nas profundidades de 10, 20, 30, 40, e 50 cm, totalizando 50 amostras (25 na área de Caatinga e 25 na área de pastagem). Essas amostras foram usadas para a determinação, em laboratório, da curva de retenção da água no solo, da porosidade total (PT) e da densidade do solo (DS), de acordo com procedimentos descritos em Lima et al. (2014).

Os dados experimentais das curvas de retenção da água no solo, obtidos por meio dos pares dos valores de umidade volumétrica do solo e de potencial matricial do solo, foram ajustados por intermédio da equação proposta por van Genuchten (1980).

Neste estudo, $\theta(h)$ e $K(\theta)$ foram descritas, respectivamente, pelos modelos de van Genuchten (1980) e de Brooks & Corey (1964). Esses modelos contêm seis parâmetros desconhecidos: três parâmetros de forma (m , n e η) e três parâmetros de normalização (θ_s , K_s , h_g). Os parâmetros de forma são ligados a textura, enquanto que os parâmetros de normalização dependem da estrutura dos solos. Esses parâmetros foram obtidos de acordo com os procedimentos descritos em Souza et al. (2008).

Para determinação do escoamento superficial, foram instaladas 4 calhas coletoras, seguindo a metodologia proposta por Souza et al. (2015), sendo duas calhas na área de pasto e duas calhas na área de Caatinga. As calhas possuíam as dimensões de 1,08 m² (0,95 m lados retos e 1,05 m lado curvo). Na confecção da lateral das calhas usou-se uma chapa metálica para conduzir a água escoada superficialmente para um balde fechado, com volume de 0,02 m³, para evitar a evaporação da água nos eventos chuvosos.

Desse modo, com todos os componentes da equação do balanço hídrico (eq. 1), a ET foi obtida como termo residual.

Análise estatística

Para avaliar o efeito das mudanças no uso da terra nos atributos físico-hídricos do solo e nos parâmetros da curva de retenção, utilizou-se o delineamento experimental inteiramente casualizado, com dois tratamentos (Caatinga e pastagem) e cinco repetições. Os efeitos dos tratamentos (usos) sobre os atributos físico-hídricos do solo foram testados por meio de análise de variância (ANOVA). Analisou-se o efeito do uso do solo em cada profundidade, separadamente. Quando as variáveis foram estatisticamente diferentes, as médias foram

comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Resultados e discussão

Precipitação pluvial e armazenamento de água no solo

A distribuição da precipitação pluvial mensal de outubro de 2013 a setembro de 2015 é apresentada na Figura 2.

Figura 2. Precipitação pluvial mensal entre outubro de 2013 e setembro de 2015 em São João – PE.

Figura 3. Precipitação pluvial e armazenamento de água no solo (0-50 cm) de 01/10/2013 a 30/09/2015 em área de Caatinga e pastagem em São João – PE.

O total de chuvas acumulado durante o período foi de 1.200,5 mm. Nos três meses avaliados de 2013, choveu 102,2 mm, que ficou acima do normalmente esperado para a região nesse período (61,3 mm). No ano de 2014 choveu um total de 749,1 mm, ficando um pouco abaixo da normal climatológica do município de São João, que é de 772 mm (APAC, 2019). Já no período de janeiro a setembro de 2015 houve um total acumulado de chuvas de 342,2 mm, o qual é um valor bem abaixo do normalmente esperado para esse período que é de 710 mm. Assim, pode-se afirmar que o ano de 2014 foi caracterizado como ano normal e o de 2015 como ano de seca.

Como uma forma de melhor visualizar a distribuição da precipitação pluvial e seus efeitos no armazenamento de água no solo, bem como o efeito das mudanças no uso da terra nesse armazenamento, na Figura 3 é mostrada a distribuição diária de precipitação pluvial e do armazenamento de água no solo (na camada de 0-50 cm) nas áreas de pastagem e de Caatinga.

As maiores precipitações diárias foram registradas nos dias 05 e 06/04/2014 (45,6 e 47,1 mm, respectivamente) e 04/12/2014 (52,6 mm). Do total de dias avaliados (730 dias), em 304 dias (42%) ocorreram precipitações, sendo que em apenas 7% (50 dias) do período ocorreram chuvas acima de 5 mm. Esses resultados mostram o padrão de chuvas que ocorrem nessa região, as quais caracterizam-se por serem mais constantes, com valores pequenos e de baixa intensidade. Esse padrão de chuvas está de acordo com o observado por Souza et al. (2013), que mediram os componentes do balanço hídrico em solo cultivado com mamona na região do Brejo Paraibano.

Em relação ao armazenamento de água no solo, observa-se que os valores máximos, mínimos e médios de Armz_caatinga foram 41,0; 11,2 e 18,0 mm respectivamente. Já na área de pastagem o armazenamento (Armz_pasto) variou de 28,8 a 78,8 mm, com valor médio de 40,3 mm. Assim, a média geral da pastagem é superior em 22,3 mm de água a mais se comparada à Caatinga. Essa diferença é muito expressiva, uma vez que equivale a 223 m³ de água por hectare, na zona de absorção de água do sistema radicular.

Maiores valores de Armz_pasto que Armz_caatinga também foram observados por Silva et al. (2017), ao avaliarem os efeitos do uso da terra nos fluxos de água, energia e carbono em áreas de Caatinga e de pastagem em Serra Talhada, PE. Yu et al. (2018) avaliando o efeito de mudanças no uso da terra na China encontraram que a umidade do solo foi menor na área de floresta, quando

comparada com a área de pastagem, corroborando com os resultados desta pesquisa.

Uma provável explicação para o menor armazenamento de água na Caatinga é devido a perda da água da chuva por interceptação, uma vez que o seu dossel é mais denso que o da pastagem, retendo parte da água precipitada no local, que retorna para atmosfera por evaporação. Logo, não atingindo a superfície do solo. As perdas por interceptação na Caatinga podem chegar a 13%, como as que foram relatadas por Medeiros et al. (2009) no semiárido cearense.

Outra explicação pode ser devido ao sistema radicular da Caatinga ser mais desenvolvido que o da pastagem, como encontrado por Silva et al. (2017), o que faz com que ocorra uma maior retirada de água do solo. De acordo com Yu et al. (2018), a extração de água pelo sistema radicular é o principal processo que determina a dinâmica da umidade do solo, sendo que a distribuição de raízes é muito útil para se compreender os processos ecohidrológicos em ambientes áridos e semiáridos.

Pinheiro et al. (2013) mediram a profundidade efetiva do sistema radicular da Caatinga no semiárido cearense e encontraram valores variando de 0,60 a 0,78 m, enquanto Silva et al. (2014) na mesma área de pastagem de nossa pesquisa encontraram valores do sistema radicular da pastagem variando de 0,10 a 0,30 m.

ÖzkanandGökbülak (2017) mediram a umidade do solo em áreas de florestas e de vegetação herbácea nas condições edafoclimáticas da Turquia, sob clima úmido, portanto diferente do dessa pesquisa. Contudo, esses autores também encontraram que a remoção da floresta promoveu um aumento da umidade do solo. De acordo com esses autores existem duas razões para esse fato: 1) as perdas de água por interceptação vegetal e transpiração, que são maiores na área de floresta; 2) a extração de água pelo sistema radicular da floresta é maior que nas áreas de vegetação herbácea. Assim, esses autores também encontraram os mesmos processos que os dessa pesquisa para explicar o efeito das mudanças de uso da terra na umidade do solo.

Outra pesquisa que também encontrou maior umidade do solo em área agrícola que em área de floresta foi a de KellnerandHubbart (2016), nas condições edafoclimáticas do Missouri, Estados Unidos. Esses autores atribuíram esse resultado aos padrões de extração de água pelo sistema radicular, que é bem maior em área de floresta.

Observa-se, ainda, que o armazenamento de água no solo seguiu as variações da precipitação pluvial, com os maiores valores

ocorrendo na estação chuvosa e os menores na estação seca, como esperado, independentemente do tipo de uso da terra. Esse comportamento também foi observado por vários outros autores que mediram o armazenamento de água no solo, quer seja em área de Caatinga (Silva et al., 2017), quer seja em áreas de pastagens (Silva et al., 2014; Souza et al., 2015) ou em áreas de culturas agrícolas (Souza et al., 2013).

Com a redução da precipitação pluvial nos períodos mais secos do ano, houve uma redução no armazenamento de água no solo, tanto para a área de Caatinga quanto para a área de pastagem. Isso se explica devido ao fato do solo das duas Tabelas 2. Densidade do solo (DS), porosidade total (PT) e parâmetros de ajustes (θ_s , α , n e m) da curva de retenção (equação de van Genuchten) sob diferentes usos e profundidades em São João – PE.

áreas ser um NeossoloRegolítico, o qual é caracterizado por altos teores de areia (Tabela 1) e baixa retenção de água (Santos et al., 2012).

Atributos físico-hídricos do solo

A densidade do solo e a porosidade total, bem como os parâmetros da equação de van Genuchten (1980), utilizados para o ajuste dos dados da curva de retenção do NeossoloRegolítico, nas áreas de Caatinga e de pastagem são apresentadas na Tabela 2.

Atributos	Camada	Caatinga	Pastagem		
Ds (g cm⁻³)	0-10 cm	1,32 a	1,40 b		
	10-20 cm	1,44 a	1,52 b		
	20-30 cm	1,43 a	1,51 b		
	30-40 cm	1,38 a	1,53 b		
	40-50 cm	1,42 a	1,48 a		
PT (cm³ cm⁻³)	0-10 cm	0,501 a	0,472 b		
	10-20 cm	0,457 a	0,427 b		
	20-30 cm	0,462 a	0,432 b		
	30-40 cm	0,479 a	0,422 b		
	40-50 cm	0,463 a	0,441 a		
	Camada	Caatinga	Pastagem	R ² Caatinga	R ² pastagem
θ_s (cm³ cm⁻³)	0-10 cm	0,428 a	0,311 b	0,994	0,983
	10-20 cm	0,380 a	0,248 b	0,982	0,993
	20-30 cm	0,392 a	0,230 b	0,991	0,995
	30-40 cm	0,444 a	0,254 b	0,997	0,992
	40-50 cm	0,317 a	0,264 b	0,991	0,980
α (cm⁻¹)	0-10 cm	9,055 a	3,853 b	0,994	0,983
	10-20 cm	1,475 a	0,512 b	0,982	0,993
	20-30 cm	2,231 a	1,071 b	0,991	0,995
	30-40 cm	1,032 a	1,085 a	0,997	0,992
	40-50 cm	1,810 a	1,810 a	0,991	0,980
n	0-10 cm	2,181 a	2,198 a	0,994	0,983
	10-20 cm	2,231 a	2,291 a	0,982	0,993
	20-30 cm	2,209 a	2,239 a	0,991	0,995
	30-40 cm	2,244 a	2,241 a	0,997	0,992
	40-50 cm	2,178 a	2,178 a	0,991	0,980
m	0-10 cm	0,083 a	0,090 a	0,994	0,983
	10-20 cm	0,104 a	0,127 a	0,982	0,993
	20-30 cm	0,095 a	0,107 a	0,991	0,995
	30-40 cm	0,109 a	0,108 a	0,997	0,992
	40-50 cm	0,082 a	0,082 a	0,991	0,980

Valores seguidos da mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Tabela 3. Capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e água disponível (AD) em diferentes camadas de um NeossoloRegolítico em áreas de Caatinga e de pastagem no município de São João-PE.

	CC (cm ³ cm ⁻³)		PMP (cm ³ cm ⁻³)		AD (cm ³ cm ⁻³)	
Camada	Caatinga	pastagem	Caatinga	pastagem	Caatinga	pastagem
0-10 cm	0,124 a	0,095 b	0,051 a	0,035 b	0,073 a	0,060 b
10-20 cm	0,119 a	0,078 b	0,038 a	0,018 b	0,081 a	0,060 b
20-30 cm	0,126 a	0,075 b	0,044 a	0,023 b	0,082 a	0,052 b
30-40 cm	0,142 a	0,081 b	0,042 a	0,025 b	0,100 a	0,056 b
40-50 cm	0,125 a	0,104 a	0,052 a	0,043 a	0,073 a	0,061 a

Valores seguidos da mesma letra na linha, para cada atributo do solo, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Observa-se que ocorreu um bom ajuste dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980), uma vez que para ambas as áreas e em todas as camadas de solo avaliadas o coeficiente de determinação (R^2) foi sempre superior a 0,98. Esse bom ajuste dos parâmetros permite fazer uma estimativa adequada do potencial matricial da água no solo, por meio dos dados de umidade volumétrica.

Silva et al. (2014) e Oliveira Júnior et al. (2014) também efetuaram o ajuste desses parâmetros em áreas de pastagem e de Caatinga para NeossoloRegolítico e encontraram resultados semelhantes ao dessa pesquisa.

Com relação a densidade (DS) e porosidade total (PT) do solo, observa-se que a mudança de uso da terra, retirada da Caatinga e implantação da pastagem, promoveu alterações nesses atributos físicos do solo, pois, a DS foi maior e a PT foi menor na área de pastagem quando comparada a área de Caatinga (Tabela 2).

Isso ocorreu devido o manejo adotado na área de pastagem, que era um pastejo extensivo, favorecendo uma maior DS, reduzindo a PT, o que por sua vez, pode afetar a disponibilidade hídrica do solo (Lima et al., 2014; Bezerra et al., 2019).

O aumento da DS propicia uma diminuição da PT por causa da redução dos espaços vazios e alteração na distribuição dos tamanhos dos poros, que por sua vez influencia diretamente para a diminuição do teor de umidade volumétrica, bem como no comportamento das propriedades hidráulicas do solo (Imhoff et al., 2000; Lima et al., 2014).

A compactação do solo se dá devido ao pisoteio constante dos animais durante sua locomoção na área de pastejo (Oliveira et al., 2014). No caso da Caatinga, é bem mais reduzido, pois, há uma menor intensidade de animais transitando na área.

Além disso, em áreas de Caatinga ocorre uma maior deposição de material vegetal (folhas,

galhos, etc.), aumentando o teor de carbono orgânico do solo (Bezerra et al., 2019) e a diversidade microbiana (Barros et al., 2019), o que leva a menores valores de DS e consequentemente maior PT do solo.

Em pesquisa realizada num NeossoloQuartzarênicoÓrtico típico, Sales et al. (2010), encontraram resultados semelhantes, ao avaliarem o efeito de mudanças no uso da terra (retirada do cerrado nativo e implantação de pastagem de capim braquiária) nos atributos físicos do solo (DS e PT). O mesmo ocorreu (aumento da DS e redução da PT) quando se retirou uma mata nativa e implantou-se pastagem de capim braquiária na região agreste de Pernambuco (Bezerra et al., 2019).

Devido a maior PT os valores de umidade saturada do solo (θ_s) observados na Caatinga são superiores aos observados na pastagem (Tabela 2).

Tais resultados corroboram com os obtidos por Oliveira Júnior et al. (2014), que observaram θ_s menor em área de pastagem, quando comparado com a área de Caatinga, em NeossoloRegolítico.

A umidade na capacidade de campo (CC), no ponto de murcha permanente (PMP) e a água disponível (AD) em diferentes camadas do NeossoloRegolítico nas áreas de Caatinga e de pastagem são apresentados na Tabela 3.

Com exceção da camada de 40-50 cm, a CC, o PMP e a AD foram maiores na Caatinga do que na pastagem. Isto se deve as características fitofisionômicas do dossel e das raízes da Caatinga, se comparado com a pastagem. Logo, o carbono orgânico no solo da Caatinga é maior que na pastagem, favorecendo uma maior diversificação da biota do solo (Barros et al., 2019) que, consequentemente, contribui para uma maior ciclagem de nutrientes e melhor estruturação do solo.

Componentes do balanço hídrico do solo

A variação do armazenamento de água no solo (ΔA) na área de Caatinga e de pastagem durante o período de 01/10/2013 a 30/09/2015 é apresentada na Figura 4.

A ΔA corresponde ao saldo de água no volume de solo, durante certo período de tempo (nesse caso mensal). Caso as entradas de água no solo, nessa pesquisa via precipitação pluvial e/ou ascensão capilar, sejam maiores que as saídas de água no solo, via drenagem profunda, escoamento superficial e evapotranspiração, o ΔA será positivo; caso contrário, negativo.

Desse modo, observa-se que a ΔA foi positiva na maior parte do período experimental (14 meses), quer para a área de Caatinga, quer para a área de pastagem. A ΔA seguiu as variações da precipitação pluvial e do armazenamento de água no solo (Figuras 1 e 2).

Em relação ao uso da terra, observa-se que, ao final do período experimental, a Caatinga teve uma ΔA de 4,90 mm, que foi menor que a ΔA final da pastagem (9,23 mm). Essas diferenças, como dito anteriormente, são devido ao dossel e ao sistema radicular da Caatinga, os quais interferem de forma mais acentuada nas perdas de água por interceptação, transpiração vegetal e evaporação do solo.

O fluxo de água no limite inferior do volume de solo (Q) em áreas de Caatinga e de pastagem é apresentado na Figura 5.

Observa-se que ocorreu somente drenagem (valores negativos, $-Q$) e que essa também seguiu as variações da precipitação pluvial, com maior drenagem nos períodos de maior precipitação. Além disso, somente ocorreu Q para a área de pastagem, sendo que na área de Caatinga seus valores foram nulos.

O valor total de drenagem ($-Q$), na área de pastagem, no período experimental foi de -103,9 mm, o que representou 8,7% de toda a água fornecida via precipitação pluvial (1.200,5 mm). Durante o período de junho a agosto de 2014 a drenagem totalizou -41,7 mm e no período de junho a agosto de 2015 esse total foi de -44,8 mm,

perfazendo um total de -86,5 mm, o que correspondeu a 83,3% de toda água perdida, apenas nesses seis meses.

Silva et al. (2014) mediram as perdas por drenagem em capim braquiária, na mesma área experimental, e encontraram valores totais de -103,4 mm, condizentes com os resultados dessa pesquisa.

Esses elevados valores de drenagem sugerem que sejam tomadas medidas, por parte dos produtores, para diminuir essa perda de água para as camadas mais profundas, como a adoção de práticas de manejo que aumentem a retenção de água pelo solo, tais como a incorporação de matéria orgânica no solo.

Esses maiores valores de drenagem na área de pastagem mostram que os valores de umidade do solo nessa área (Figura 3), durante o período chuvoso, foram maiores do que a capacidade de campo do solo e, portanto, contribuíram para a ocorrência de perdas de água por drenagem.

Em trabalho realizado nas condições semiáridas do Sudão, Abaker et al. (2018) avaliaram o efeito de substituir plantações de árvores de *Acaciasenegal* por pastagens no balanço hídrico e encontraram que as perdas por drenagem foram mais elevadas nas áreas de pastagens, devido aos maiores valores de umidade do solo dessas áreas.

Em relação ao escoamento superficial (ES), foram observados pequenos valores totais (menores que 2,0 mm), durante todo o período experimental, tanto na área de Caatinga, quanto na área de pastagem. Desse modo, esse termo da equação do balanço hídrico não foi usado para computar a ET em ambas as áreas.

Em área de Caatinga no semiárido cearense, Figueiredo et al. (2016) analisaram 118 eventos de precipitação pluvial maiores que 10 mm, durante 10 anos (2005-2014). Esses autores encontraram que 85% dos eventos chuvosos não causaram ES, corroborando, portanto, com os resultados dessa pesquisa.

Figura 4. Variação do armazenamento mensal de água no solo em áreas de Caatinga e de pastagem durante o período de outubro de 2013 a setembro de 2015 em São João – PE.

Figura 5. Fluxo mensal de água no solo em áreas de Caatinga e de pastagem durante o período de outubro de 2013 a setembro de 2015 em São João – PE.

A precipitação pluvial e a evapotranspiração (ET) mensal nas áreas de Caatinga e de pastagem no período de 01/10/2013 a 30/09/2015 são apresentadas na Figura 6.

Tanto na área de Caatinga, quanto na área de pastagem, a ET acompanhou as variações da precipitação pluvial, com os maiores valores ocorrendo no período chuvoso e vice-versa. Os maiores valores de ET na estação chuvosa se explicam devido se ter maiores valores de umidade do solo, o contrário ocorrendo nos períodos secos. Esse comportamento da ET em função da precipitação pluvial e, consequentemente da umidade do solo, também foi observado em outras áreas de Caatinga (Lima et al., 2017; Silva et al., 2017; Campos et al., 2019; Marques et al., 2020) e de pastagens (Silva et al., 2014; Gondim et al., 2015; Machado et al., 2016; Silva et al., 2017).

A ET total na Caatinga (ET_{caat}) foi 1.195,6 mm, o que corresponde a 99,6% do total da precipitação pluvial. Na área de pastagem a ET (ET_{pasto}) total foi 1087,4 mm e correspondeu a 90,6% de toda água precipitada.

Fazendo-se uma regressão entre a precipitação pluvial e a ET mensal, tem-se um R^2 de 0,9768 para a Caatinga e de 0,8716 para a pastagem. Desse modo, em ambas as áreas, pode-se fazer uma estimativa da ET mensal, por meio da precipitação pluvial mensal, com uma elevada precisão.

Além disso, como os valores de escoamento superficial e de drenagem foram nulos na área de Caatinga, pode-se estimar com elevada confiabilidade a ET da mesma, pelo método do balanço hídrico (Equação 1), por meio das medidas do armazenamento de água no solo e da precipitação pluvial.

Esse resultado é de muita significância, uma vez que a medição da ET, pelo método do balanço de energia – razão de Bowen, usado na pesquisa de Lima et al. (2017), ou pelo método da correlação dos turbilhões, utilizado por vários autores (Silva et al., 2017; Campos et al., 2019; Marques et al., 2020), envolve equipamentos caros e de difícil manutenção (por exemplo: anemômetro sônico tridimensional e analisador de gás por infravermelho), quando comparados aos envolvidos no método do balanço hídrico (sensor de umidade do solo).

Em relação as mudanças no uso da terra, observa-se que a retirada da Caatinga e a

implantação da pastagem ocasionou uma redução da ET. Essa redução da ET pode ser devido a Caatinga ter um maior sistema radicular que a pastagem, portanto, extraindo mais água do solo tendo maior ET. Além disso, na área de pastagem ocorreu uma considerável perda de água por drenagem (Figura 5).

Silva et al. (2017) avaliaram o efeito da conversão de áreas de Caatinga em pastagem na ET, em Serra Talhada-PE, e encontraram que essas mudanças de uso da terra também promoveram uma redução da ET, portanto, corroborando com os dados dessa pesquisa.

Sob condições de solo e de clima diferentes dos dessa pesquisa, outros autores encontraram que a substituição de florestas por pastagens também ocasionou uma redução da ET. Por exemplo, nas condições edafoclimáticas da República Tcheca, Šípek et al. (2020) realizaram a medição e modelagem dos componentes do balanço hídrico durante um período de 05 anos (2003-2007) e encontraram que a ET média anual da área florestada foi de 431 mm, enquanto a da pastagem foi de 368 mm. Segundo esses autores, isso ocorre devido às diferenças no sistema radicular, as quais possibilitam maior extração de água e, consequentemente, maior transpiração nas áreas de florestas.

A ET média para a Caatinga foi 1,64 mm d⁻¹. O valor da ET_{caat} está dentro do intervalo de valores encontrados, os quais podem variar de 0,2 a 2,7 mm d⁻¹ (Lima et al., 2017; Silva et al., 2017; Campos et al., 2019; Marques et al., 2020), dependendo das condições de umidade do solo (Lima et al., 2017; Silva et al., 2017; Marques et al., 2020).

Para a ET_{pasto} o valor médio foi de 1,49 mm d⁻¹, o que está dentro dos valores encontrados por Silva et al. (2014) na mesma área dessa pesquisa, usando a metodologia do balanço hídrico. Já Machado et al. (2016) usaram a metodologia do balanço de energia – razão de Bowen e encontraram valor médio de ET em área de pastagem de 1,2 mm d⁻¹, o que corrobora os resultados dessa pesquisa.

A diferença entre a ET média da Caatinga (1,64 mm d⁻¹) e a do pasto (1,49 mm d⁻¹) foi de 0,15 mm d⁻¹. Essa diferença pode parecer pequena, mas se considerarmos a escala de campo que o trabalho foi realizado (área de 04 ha), isso equivale a 6,0 m³ por dia ou 2.190.000 L de água por ano.

Figura 6. Evapotranspiração e precipitação pluvial mensal em áreas de Caatinga e de pastagem durante o período de outubro de 2013 a setembro de 2015 em São João – PE.

Conclusões

Em ambos os tipos de uso da terra, as variações dos componentes do balanço hídrico acompanharam a variação sazonal da precipitação pluvial, com os períodos de alta pluviosidade tendo maior armazenamento de água no solo, maior drenagem e evapotranspiração.

A mudança no uso da terra (retirada da Caatinga e implantação de pastagem) promoveu alterações nos componentes do balanço hídrico, com aumento das perdas de água por drenagem e redução da evapotranspiração.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE, processo IBPG-0416-5.03/14), da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC, processo BCT-0090-5.03/15), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES – Código de Financiamento 001), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, processos 307335/2017-8, 409990/2018-3, 465764/2014-2, 448504/2014-6, 441305/2017-2, 438596/2018-8, 310537/2017-7) e do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia – Observatório Nacional da Dinâmica da Água e de Carbono no Bioma Caatinga (INCT-ONDACBC). Os autores também agradecem ao proprietário da fazenda Riacho do

Papagaio (Prof. Antonio de Pádua Montenegro), pela cessão da área experimental.

Referências

- Abaker, W.E., Berninger, F., Starr, M., 2018. Changes in soil hydraulic properties, soil moisture and water balance in Acacia senegal plantations of varying age in Sudan. *Journal of Arid Environments* 150, 42–53. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2017.12.004>
- Aladejana, O.O., Salami, A.T., Adetoro, O-I.O., 2018. Hydrological responses to land degradation in the Northwest Benin Owena River Basin, Nigeria. *Journal of Environmental Management* 225, 300-312. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.095>
- Aleixo, N.C.R., Silva Neto, J.C.A., 2018. Vegetation Index and Air Temperature Behavior in Tefé-Amazonas, Brazil. *Revista Brasileira de Geografia Física* 11, 864-876. <http://dx.doi.org/10.26848/rbgf.v11.3.p864-876>
- Andrade, C.W.L., Montenegro, S.M.G.L., Lima, J.R.S., Montenegro, A.A.A., Magalhães, A.G., 2017. Modelagem hidrológica sob mudanças na cobertura vegetal de uma bacia hidrográfica no Nordeste do Brasil. *Journal of Environmental Analysis and Progress* 02, 239-248. <https://doi.org/10.24221/jeap.2.3.2017.1446.239-248>

- APAC - Agência Pernambucana de Águas e Clima, 2019. Moniotamento pluviométrico. Disponível:
<http://www.apac.pe.gov.br/meteorologia/monit>
[oramento-pluvio.php](http://www.apac.pe.gov.br/meteorologia/monit). Acesso: 05 jul. 2019.
- Barreto, C.E.A.G., Wendland, E., Marcuzzo, F.F.N., 2009. Estimativa da evapotranspiração a partir de variação de nível estático de aquífero. *Engenharia Agrícola* 29, 52-61. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162009000100006>
- Barros, J.A., Medeiros, E.V., Costa, D.P., Duda, G.P., Lima, J.R.S., Santos, U.J., Antonino, A.C.D., Hammecker, C., 2019. Human disturbance affects enzyme activity, microbial biomass and organic carbon in tropical dry sub-humid pasture and forest soils. *Archives of Agronomy and Soil Science* 65, 1-15. <https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1622095>
- Bezerra, C.B., Souza Junior, A.J., Corrêa, M.M., Lima, J.R.S., Santoro, K.R., Souza, E.S., Oliveira, C.L., 2019. Latossolo húmico sob pastagem com diferentes intensidades de usos: atributos químicos e físico-hídricos. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias* 14, e5603. <http://dx.doi.org/10.5039/agraria.v14i1a5603>
- Borges Júnior, J.C.F., Anjos, R.T., Silva, T.J.A., Lima, J.R.S., Andrade, C.L.T., 2012. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para a microrregião de Garanhuns, PE. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 16, 380-390. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000400008>
- Brooks, R.H., Corey, A.T., 1964. Hydraulic properties of porous media. Colorado State University, Fort Collins.
- Campos, S., Mendes, K.R., Silva, L.L., Mutti, P.R., Medeiros, S.S., Amorim, L.B., Santos, C.A.C., Perez-Marin, A.M., Ramos, T.M., Marques, T.V., Lucio, P.S., Costa, G.B., Silva, C.M.S., Bezerra, B.G., 2019. Closure and partitioning of the energy balance in a preserved area of a Brazilian seasonally dry tropical forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 271, 398-412. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.03.018>
- Cirilo, J.A., 2008. Políticas públicas de recursos hídricos para o semiárido. *Estudos Avançados* 22, 61-82. <https://doi.org/10.1590/S0103-40142008000200005>
- Cunha, A.P.M.A., Alvalá, R.C.S., Kubota, P.Y., Vieira, R.M.S.P., 2015. Impacts of land use and land cover changes on the climate over Northeast Brazil. *Atmospheric Science Letters* 16, 219-227. <https://doi.org/10.1002/asl2.543>
- Don, A., Schumacher, J., Freibauer, A., 2011. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks – a meta-analysis. *Global Change Biology* 17, 1658-1670. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02336.x>
- Fang, K., Li, H., Wang, Z., Du, Y., Wang, J., 2016. Comparative analysis on spatial variability of soil moisture under different land use types in orchard. *Scientia Horticulturae* 207, 65-72. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2016.05.017>
- Figueiredo, J.V., Araújo, J.C., Medeiros, P.H.A., Costa, A.C., 2016. Runoff initiation in a preserved semiarid Caatinga small watershed, Northeastern Brazil. *Hydrological Processes* 30, 2390-2400. <https://doi.org/10.1002/hyp.10801>
- Fontes Júnior, R., Montenegro, A.A.A., 2019. Impact of Land Use Change on the Water Balance in a Representative Watershed in the Semiarid of the State of Pernambuco Using the Swat Model. *Engenharia Agrícola* 39, 110-117. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v39n1p110-117/2019>
- Gashaw, T., Tulu, T., Argaw, M., Worqlul, A.W., 2018. Modeling the hydrological impacts of land use/land cover changes in the Andassa watershed, Blue Nile Basin, Ethiopia. *Science of The Total Environment* 619-620, 1394-1408. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.191>
- Gomes, C.A., Lima, J.R.S., Antonino, A.C.D., Soares, W.A., Souza, E.S., Ribeiro, A.A., Alves, E.M., Machado, C.B., Firmino, F.H.T., 2015. Medição e Simulação dos Fluxos de Energia e Evapotranspiração em Solo Cultivado com *Brachiariadecumbens* na Microrregião de Garanhuns-PE. *Revista Brasileira de Geografia Física* 8, 365-373. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v8.2.p365-376>
- Gondim, P.S.S., Lima, J.R.S., Antonino, A.C.D., Hammecker, C., Silva, R.A.B., Gomes, C.A., 2015. Environmental control on water vapour and energy exchanges over grasslands in semiarid region of Brazil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 19, 3-8. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n1p3-8>
- Gondim, R.S., Fuck Júnior, S.C.F., Evangelista, S.R.M., Castro, M.A.H., Teixeira, A.S., 2011. Impacto das mudanças climáticas na evapotranspiração em nível de bacia hidrográfica utilizando um Sistema de

- Informações Geográficas. Revista Brasileira de Recursos Hídricos 16, 5-12. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v16n2.p5-12>
- Imhoff, S., Silva, A.P., Tormena, C.A., 2000. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. Pesquisa Agropecuária Brasileira 35, 1493-1500. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2000000700025>
- Jesus, K.N., Albuquerque, E.R.G.M., Sampaio, E.V.S.B., Sales, A., 2019. Estoques de carbono em solos de Pernambuco, Brasil. Revista Brasileira de Geografia Física 12, 714-721. <http://dx.doi.org/10.26848/rbgf.v12.3.p714-721>
- Kellner, E., Hubbard, J.A., 2016. A comparison of the spatial distribution of vadose zone water in forested and agricultural floodplains a century after harvest. Science of the Total Environment 542, 153-161. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.080>
- Leal, I.R.S., Tabarelli, M., Lacher JR., T.E., 2005. Mudando o curso da conservação da biodiversidade na Caatinga do Nordeste do Brasil. Megadiversidade 1, 139-146.
- Leite, P.A.M., Souza E.S., Santos E.S., Gomes, R.J., Cantalice, J.R., Wilcox, B.P., 2018. The influence of forest regrowth on soil hydraulic properties and erosion in a semi-arid region of Brazil. Ecohydrology 11, e1910. <https://doi.org/10.1002/eco.1910>
- Lima, J.R.S., Oliveira, C.L., Barbosa, A.C., Antonino, A.C.D., Souza, E.S., 2017. Variação sazonal dos fluxos de energia e evapotranspiração em caatinga no agreste Pernambucano. Agrometeoros 25, p.113-120. <http://dx.doi.org/10.31062/agrom.v25i1.26272>
- Lima, J.R.S., Souza, E.S., Antonino, A.C.D., Silva, I.F., Corrêa, M.M., Lira, C.A.B.O., 2014. Atributos físico-hídricos de um Latossolo Amarelo cultivado e sob mata nativa no Brejo Paraibano. Revista Brasileira de Ciências Agrárias 9, 599-605. <http://dx.doi.org/10.5039/agraria.v9i4a3532>
- Liu, M.H., Tian G., Chen W., Ren C., Liu J., 2008. Effects of land use and land cover change on evapotranspiration and water yield in China during 1900-2000. Journal of the American Water Resources Association 44, 1193-1207. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2008.00243.x>
- Luan, X-B., Wu, P-T., Sun, S-K., Li, X-L., Wang, Y-B., Gao, X-R., 2018. Impact of Land Use Change on Hydrologic Processes in a Large Plain Irrigation District. Water Resource Management 32, 3203-3217. <https://doi.org/10.1007/s11269-018-1986-5>
- Machado, C.B., Lima, J.R.S., Antonino, A.C.D., Souza, E.S., Souza, R.M.S., Alves, E.M., 2016. Daily and seasonal patterns of CO2 fluxes and evapotranspiration in maize-grass intercropping. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 20, p.777-782. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n9p777-782>
- Marengo, J.A., Alves, L.M., Alvalá, R.C.S., Cunha, A.P., Brito, S., Moraes, O.L.L., 2018. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. Anais da Academia Brasileira de Ciências 90, 1973-1985. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170206>
- Marhaento, H., Booij, M.J., Rientjes, T.H.M., Hoekstra, A.Y., 2017. Attribution of changes in the water balance of a tropical catchment to land use change using the SWAT model. Hydrological Processes 31, 2029-2040. <https://doi.org/10.1002/hyp.11167>
- Marques, T.V., Mendes, K., Mutti, P., Medeiros, S., Silva, L., Perez-Marin, A.M., Campos, S., Lúcio, P.S., Lima, K., Reis, J., Ramos, T.M., Silva, D.F., Oliveira, C.P., Costa, G.B., Antonino, A.C.D., Menezes, R.S.C., Silva, C.M.S., Bezerra, B.G. Environmental and biophysical controls of evapotranspiration from Seasonally Dry Tropical Forests (Caatinga) in the Brazilian Semiarid. Agricultural and Forest Meteorology 287, 107957. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.107957>
- Medeiros, P.H.A., Araújo, J.C., Bornstert, A., 2009. Interception measurements and assessment of Gash model performance for a tropical semi-arid region. Revista Ciência Agronômica 40, 165-174.
- Meena, A., Hanief, M., Dinakaran, J., Rao, K.S., 2020. Soil moisture controls the spatio-temporal pattern of soil respiration under different land use systems in a semi-arid ecosystem of Delhi, India. Ecological Processes 9, 1-13. <https://doi.org/10.1186/s13717-020-0218-0>
- Menezes, R.S.C., Sampaio, E.V.S.B., 2002. Simulação dos fluxos e balanços de fósforo em uma unidade de produção agrícola familiar no Semiárido paraibano. In: Silveira, L.M., Petersen, P., Sabourin, E. (ed.). Agricultura familiar e agroecologia no Semi-árido: avanços

- a partir do Agreste da Paraíba. ASPTA, Rio de Janeiro, pp. 249-260.
- Menezes, R.S.C., Sampaio, E.V.S.B., Giongo, V., Pérez-Marin, A.M., 2012. Biogeochemical cycling in terrestrial ecosystems of the caatinga biome. *Brazilian Journal of Biology* 72, 643–653. <https://doi.org/10.1590/S1519-69842012000400004>
- Oliveira Júnior, J.A.S., Souza, E.S., Corrêa, M.M., Lima, J.R.S., Souza, R.M.S., Silva Filho, L.A., 2014. Variabilidade espacial de propriedades hidrodinâmicas de um NeossoloRegolítico sob pastagem e caatinga. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 18, 631–639. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662014000600010>
- Özkan, U., Gökbülak, F., 2017. Effect of vegetation change from forest to herbaceous vegetation cover on soil moisture and temperature regimes and soil water chemistry. *Catena* 158-166. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.09.017>
- PBMC. Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas, 2016. Base científica das mudanças climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Pinheiro, E.A.R., Costa, C.A.G., de Araújo, J.C., 2013. Effective root depth of the Caatinga biome. *Journal of Arid Environments* 89, 1-4. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2012.10.003>
- Queiroz, M.G., Silva, T.G.F., Zolnier, S., Jardim, A.M.R.F., Souza, C.A.A., AraújoJúnior, G.N., Morais, J.E.F., Souza, L.S.B., 2020. Spatial and temporal dynamics of soil moisture for surfaces with a change in land use in the semi-arid region of Brazil. *Catena* 188, 104457. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104457>
- Ribeiro, A.A., Lima, J.R.S., Souza, R.M.S., Antonino, A.C.D., Souza, E.S., 2018. Fluxos de carbono e evapotranspiração de feijão comum sob condições de sequeiro. *Revista Engenharia na Agricultura* 26, 229-239. <https://doi.org/10.13083/reveng.v26i3.830>
- Ribeiro, K., Sousa-Neto, E.R., Carvalho, J.A., Lima, J.R.S., Menezes, R.S.C., Duarte-Neto, P.J., Guerra, G.S., Ometto, J.P.H.B., 2016. Land cover changes and greenhouse gas emissions in two different soil covers in the Brazilian Caatinga. *Science of the Total Environment* 571, 1048-1057. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.095>
- Sales, L.E.O., Carneiro, M.A.C., Severiano, E.C., Oliveira, G.C., Ferreira, M.M., 2010. Qualidade física de NeossoloQuartzarênico submetido a diferentes sistema de uso agrícola. *Ciência e Agrotecnologia* 34, 667-674. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542010000300020>
- Sampaio, E.V.S.B., Tiessen, H., Antonino, A.C.D., Salcedo, I.H., 2004. Residual N and P fertilizer effect and fertilizer recovery on intercropped and sole-cropped corn and beans in semiarid northeast Brazil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 70, 1-11. <https://doi.org/10.1023/B:FRES.0000049356.83427.93>
- Santos, J.C.B., Souza Júnior, V.S., Corrêa, M.M., Ribeiro, M.R., Almeida, M.C., Borges, L.E.P., 2012. Caracterização de NeossolosRegolíticos da Região Semiárida do Estado de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 36, 683-695. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000300001>
- Santos, U.J., Medeiros, E.V., Duda, G.P., Marques, M.C., Souza, E.S., Brossard, M., Hammecker, C., 2019. Land use changes the soil carbon stocks, microbial biomass and fatty acid methyl ester (FAME) in Brazilian semiarid area. *Archives of Agronomy and Soil Science* 65, 755-769. <https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1523544>
- Schulz, K., Voigt, K., Beusch, C., Almeida-Cortez, J.S., Kowarik, I., Walz, A., Cierjacks, A., 2016. Grazing deteriorates the soil carbon stocks of Caatinga forest ecosystems in Brazil. *Forest Ecology and Management* 367, 62–70. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.02.011>
- Silva, P.F., Lima, J.R.S., Antonino, A.C.D., Souza, R., Souza, E.S., Silva, J.R.I., Alves, E.M., 2017. Seasonal patterns of carbon dioxide, water and energy fluxes over the Caatinga and grassland in the semi-arid region of Brazil. *Journal of Arid Environments* 147, 71–82. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2017.09.003>
- Silva, R.A.B., Lima, J.R.S., Antonino, A.C.D., Gondim, P.S.S., Souza, E.S., Barros Júnior, G., 2014. Balanço hídrico em NeossoloRegolítico cultivado com braquiária (*Braquiária decumbens* Stapf). *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 38, 147-157. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000100014>
- Silva, V.P.R., Silva, M.T., Souza, E.P., 2016. Influence of Land Use Change on Sediment

- Yield: A Case Study of the Sub-Middle of the São Francisco River Basin. Engenharia Agrícola 36, 1005-1015. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n6p1005-1015/2016>
- Šípek, V., Hnilica, J., Vlček, L., Hnilicová, S., Tesař, M., 2020. Influence of vegetation type and soil properties on soil water dynamics in the Šumava Mountains (Southern Bohemia). Journal of Hydrology 582, 124285. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124285>
- Souza, C., Andrade, A.P., Lima, J.R.S., Antonino, A.C.D., Souza, E.S., Silva, I.F., 2013. Balanço hídrico da cultura da mamona sob condições de sequeiro. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 17, 3-10. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000100001>
- Souza, E.S., Antonino, A.C.D., Jaramillo, R.A., Maciel Netto, A., 2008. Caracterização hidrodinâmica de solos: Aplicação do método Beerkan. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 12, 128-135. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662008000200004>
- Souza, R., Feng, X., Antonino, A., Montenegro, S., Souza, E., Porporato, A., 2016. Vegetation response to rainfall seasonality and interannual variability in tropical dry forests. Hydrological Processes 30, 3583-3595. <https://doi.org/10.1002/hyp.10953>
- Souza, R.M.S., Souza, E.S., Antonino, A.C.D., Lima, J.R.S., 2015. Balanço hídrico em área de pastagem no semiárido pernambucano. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 19, 449-455. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n5p449-455>
- vanGenuchten, M.Th., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal 44, 892-898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- Weltzin, J.F., Loik, M.E., Schwinning, S., 2003. Assessing the response of terrestrial ecosystems to potential changes in precipitation. Bioscience 53, 941-952. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2003\)053\[0941:ATROTE\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2003)053[0941:ATROTE]2.0.CO;2)
- Wever, L.A., Flanagan, L.B., Carlson, P.J., 2002. Seasonal and interannual variation in evapotranspiration, energy balance, and surface conductance in northern temperate grassland. Agricultural and Forest Meteorology 112, 31-49. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(02\)00041-2](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00041-2)
- Wilson, K.B., Baldocchi, D.D., 2000. Seasonal and interannual variability of energy fluxes over a broadleaved temperate deciduous forest in North America. Agricultural and Forest Meteorology 100, 1-18. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00088-X](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00088-X)
- Yu, B., Liu, G., Liu, Q., Wang, X., Feng, J., Huang, C., 2018. Soil moisture variations at different topographic domains and land use types in the semi-arid Loess Plateau, China. Catena 165, 125-132.
- Zanella de Arruda, P.H., Vourlitis, G.L., Santanna, F.B., Pinto Jr., O.B., Lobo, F.A., Nogueira, J.S., 2016. Large net CO2 loss from a grass-dominated tropical savanna in south-central Brazil in response to seasonal and interannual drought. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences 121, 2110-2124. <http://dx.doi.org/10.1002/2016JG00340>
- Zhang, Y-W., Shangguan, Z-P., 2016. The change of soil water storage in three land use types after 10 years on the Loess Plateau. Catena 147, 87-95. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.06.036>