

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE

RODRIGO DE QUEIROGA MIRANDA

AVALIAÇÃO INTEGRADA DA VARIAÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL DO BALANÇO
HÍDRICO NA CAATINGA

RECIFE

2017

RODRIGO DE QUEIROGA MIRANDA

AVALIAÇÃO INTEGRADA DA VARIAÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL DO BALANÇO
HÍDRICO NA CAATINGA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente do Departamento de Geografia do Centro de Filosofia e Ciências Humanas e da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito para obtenção do título de Doutor em Desenvolvimento e Meio Ambiente.

Área de concentração: Desenvolvimento e Meio Ambiente

Orientadora: Prof. Dra. Josiclêda Domiciano Galvínio

Coorientadora: Dra. Magna Soelma Beserra de Moura

RECIFE

2017

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria Janeide Pereira da Silva, CRB4-1262

M672a	Miranda, Rodrigo de Queiroga. Avaliação integrada da variação espacial e temporal do balanço hídrico na Caatinga / Rodrigo de Queiroga Miranda. – 2017. 122 f. : il. ; 30 cm. Orientadora : Profª. Drª. Josiclêda Domiciano Galvêncio Coorientadora : Profª. Drª. Magna Soelma Beserra de Moura Tese (doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, CFCH. Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Recife, 2017. Inclui Referências, apêndices e anexos. 1. Meio ambiente. 2. Hidrologia. 3. Caatinga. 4. Calibração. 5. Desmatamento. 6. Evapotranspiração. 7. Biometria. 8. Área foliar I. Galvêncio, Josiclêda Domiciano (Orientadora). II. Moura, Magna Soelma Beserra de (Coorientadora). III. Título. 363.7 CDD (22. ed.)
-------	--

UFPE (BCFCH2017-088)

RODRIGO DE QUEIROGA MIRANDA

**AVALIAÇÃO INTEGRADA DA VARIAÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL DO
BALANÇO HÍDRICO NA CAATINGA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Desenvolvimento e Meio Ambiente.

Aprovada em: 23/02/2017.

BANCA EXAMINADORA

Prof^o. Dr. Josiclêda Domiciano Galvêncio (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^o. Dr. Suzana Maria Gico Lima Montenegro
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^o. Dr. Inajá Francisco da Silva
Universidade Federal de Sergipe

Prof^o. Dr. Bernardo Barbosa da Silva
Universidade Federal de Campina Grande

Prof^o. Dr. Danielle de Almeida Bressiani
Agência ClimaTempo

*Dedico este trabalho a minha esposa,
aos meus pais e a minha irmã.*

AGRADECIMENTOS

À minha esposa M.A. Paula Cristina Pereira Lins, aos meus pais e à minha irmã, que sempre me incentivaram e apoiaram, por sempre estar ao meu lado em qualquer situação, e por toda a paciência durante o desenvolvimento desta pesquisa.

À minha amiga e orientadora Dra. Josiclêda Domiciano Galvêncio, e minha amiga e coorientadora Dra. Magna Soelma Beserra de Moura, pelo imenso privilégio de ter sido orientado por ambas, por todo apoio, compreensão, amizade, confiança, grande dedicação e paciência no desenvolvimento deste trabalho; e acima de tudo, por sempre acreditar em mim.

Aos meus amigos e professores Dr. Srinivasan Raghavan e Dr. Charles Allan Jones por me tirar várias dúvidas e auxiliar direta e indiretamente em todo o desenvolvimento deste trabalho; e por me receber e dar todo o suporte possível no meu doutorado sanduíche na *Texas A&M University* nos Estados Unidos, fazendo dessa oportunidade uma experiência incrível na minha vida.

Aos meus amigos M.Sc. Ygor Cristiano Britto Moraes e Pedro Ferreira dos Santos, por terem me ajudado a conduzir uma parte significativa das análises do primeiro e quarto capítulos, e pelas discussões sobre o meu trabalho, o que me permitiu novas perspectivas acerca de muitos dos meus resultados e metodologias; e por toda a amizade e palavras de incentivo na reta final que antecedeu a defesa desta pesquisa.

Ao meu amigo e professor Dr. Bernardo Barbosa da Silva, por quem possuo grande admiração, por me trazer conhecimentos sobre sensoriamento remoto antes distantes, e que permitiram a elaboração deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES; PVE A103/2013) pela bolsa de estudos concebida a mim durante o curso e pelo financiamento deste trabalho, respectivamente.

Aos amigos e colegas do Laboratório de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento, em especial a Julliana de Lucena Machado, Pedro Paulo Lima Silva, Kezia Mikaelly do Nascimento Barboza, Gysllayne Cybele Farias de Melo, Any Graziella de Sena, Isabela de Oliveira Barros, Jadson Freire da Silva, Viviane Pedroso Gomes, Luciana Mayla de Aquino França, Wladimir Oliveira de Queiroz, M.Sc. Elisabeth Regina Alves Cavalcanti Silva, M.Sc. Yenê Medeiros Paz, M.Sc. Henrique Ferreira dos Santos, M.Sc. Rafael Fhelipe de Lima Farias e Dra. Valéria Sandra de Oliveira Costa pelos momentos de alegria, conversas e discussões acadêmicas.

RESUMO

No Nordeste brasileiro, 75% de suas áreas são semiáridas, onde a vegetação dominante é a Caatinga, que contém mais de 1.000 espécies de plantas vasculares distribuídas como um mosaico. No entanto, sua biodiversidade contrasta com altos níveis de degradação, colocando a Caatinga entre os ecossistemas mais degradados, e modelar essas alterações a nível de bacia tem se tornado cada vez mais importante. Um dos modelos atuais mais utilizados no mundo é o SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*). A tese ora apresentada, tem como objetivo elucidar a dinâmica espaço-temporal e o balanço hídrico em áreas de Caatinga utilizando o modelo SWAT. Para alcançar tal objetivo, este trabalho foi dividido em 4 capítulos, dos quais o primeiro trata da análise da dinâmica e distribuição espaço-temporal da Caatinga; o segundo e o terceiro capítulos realizam uma análise de confiabilidade nos dados de evapotranspiração (ET) e Índice de Área Foliar (IAF), que foram utilizados na calibração do modelo SWAT; e o quarto capítulo consiste na calibração e análise de dados do modelo SWAT. Os dados mostraram que a área relativa (RA) da Caatinga diminuiu de 90,25% para 60,98% ao longo de 38 anos, enquanto a fragmentação (PD) apresentou um viés crescente. Além disso, a distribuição espacial de ambos os índices tornou-se mais heterogênea e agrupou-se ao norte da área de estudo. Correlações com os produtos MOD16A2 e SAFER do sensor MODIS produziram valores de r^2 mensais = 0,92, 8-dias = 0,88 e diários = 0,85 com o algoritmo SAFER. Os dados mensais do MOD16A2 produziram um valor de r^2 = 0,82. Estimativas de IAF de torre e Accupar para os anos de 2011 a 2016 foram comparadas com MCD15A3/A2, e derivados do MOD09GA. (i) O MCD15A3/A2 apresentou r^2 na composição de 4 dias = 0,34 e 8-dias = 0,6; (ii) os derivados do MOD09GA: r^2 variando de 0,59 a 0,65; (iii) iterações utilizando todas as bandas do produto resultaram em três equações: duas com r^2 = 0,75, e uma com r^2 = 0,73. A calibração ocorreu a nível de ET e IAF Foram encontrados Nash para ET (0,61 e 0,63: calibração e validação) e LAI (0,67 e 0,78). A análise do balanço hídrico indicou que 85,03% da água da chuva é evapotranspirada contra 2,45% para escoamento superficial, 3,58% para percolação e 0,41% para fluxo de retorno. A compreensão do balanço hídrico, em especial em florestas nativas de regiões semiáridas, é fundamental para a resolução de muitos problemas relacionados à agricultura e ao planejamento municipal, uma vez que estas áreas naturalmente servem de tampão para o escoamento superficial, que está intimamente ligado a perda de safras inteiras e deslizamentos de terra em áreas residenciais.

Palavras-chaves: Hidrologia. Caatinga. Desmatamento. Evapotranspiração. Área Foliar.

ABSTRACT

In the Brazilian Northeast, 75% of all region is semi-arid, where the dominant vegetation is the Caatinga, which contains more than 1,000 species of vascular plants distributed as a mosaic. However, such biodiversity contrasts with high levels of degradation, placing the Caatinga among the most degraded ecosystems, and modeling these changes at basin level has become increasingly important. Currently one of the most accurate models is SWAT (Soil and Water Assessment Tool). The thesis presented here, aims to elucidate the spatial-temporal dynamics and water balance of the Caatinga, using SWAT with a minimum of possible parameters measured through direct determination. In order to reach this objective, this study was divided in 4 chapters, of which the first is related to the analysis of the spatial-temporal distribution of the Caatinga; The second and third chapters perform a reliability analysis on evapotranspiration (ET) and Leaf Area Index (LAI) data, which was used in the calibration process of SWAT; And finally, the fourth chapter is the calibration itself and data analysis of the SWAT model. The data showed that the relative area (RA) of Caatinga decreased from 90.25% to 60.98% over 38 years, while fragmentation (PD) presented a growing trend. In addition, the spatial distribution of both indexes became more heterogeneous and grouped at the north. Correlations with MOD16A2 and SAFER products of the MODIS sensor produced values of monthly r^2 values = 0.92, 8 days = 0.88 and daily = 0.85 for the SAFER algorithm. The monthly data of MOD16A2 yielded a value of r^2 = 0.82. Estimates of LAI from meteorological tower and Accupar for the years 2011 to 2016 were compared to MCD15A3/A2 products, and derivatives of MOD09GA. (i) MCD15A3/A2 presented r^2 in the composition of 4 days = 0.34 and 8 days = 0.6; (ii) derivatives of MOD09GA: r^2 ranging from 0.59 to 0.65; (iii) iterations using all bands resulted in three equations: two with r^2 = 0.75 and one with r^2 = 0.73. Calibration occurred at the level of evapotranspiration and Leaf Area Index. Nash-Sutcliffe values for ET (0.61 and 0.63: calibration and validation) and LAI (0.67 and 0.78) were found. The Caatinga water balance analysis showed surface runoff only when precipitation values exceeded 63 mm with a maximum of 20 mm. In the Caatinga, 85.03% of rainwater is evapotranspired against 2.45% for surface runoff, 3.58% for percolation, and 0.41% for return flow. Understanding the water balance, especially in native forests in arid and semi-arid regions, is fundamental for solving many problems related to agriculture and municipal planning, since these areas naturally serve as a buffer for the surface runoff, which is intimately related to loss of entire harvests and landslides in residential areas.

Keywords: Hydrology. Caatinga. Deforestation. Evapotranspiration. Leaf Area.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVOS	12
2.1	Objetivo geral	12
2.2	Objetivos específicos	12
3	REFERENCIAL TEÓRICO	13
3.1	Modelagem hidrológica	14
3.2	SWAT-CUP (SWAT Calibration and Uncertainty Programs)	15
3.3	O algoritmo SUFI2	16
3.4	A heterogeneidade espaço-temporal da Caatinga	18
3.5	O que é, como surgiu, e qual a utilidade do sensoriamento remoto?	21
3.6	A série Landsat	22
3.7	O sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)	23
3.7.1	O produto de Evapotranspiração (MOD16)	24
3.7.2	O produto do Índice de Área Foliar (MOD15)	26
4	CONCLUSÕES	27
	REFERÊNCIAS	28
	APÊNDICE A - Dinâmica do Desmatamento de Floresta Seca no Brasil	35
	APÊNDICE B - Confiabilidade dos Produtos de Evapotranspiração MODIS para Floresta Seca Heterogênea: Um Estudo de Caso da Caatinga	55
	APÊNDICE C - Calibração do IAF por Sensoriamento Remoto com Dados de Campo	70
	APÊNDICE D - Análise Espaço-Temporal do Balanço Hídrico na Bacia do Rio Pontal utilizando o Modelo SWAT	86
	ANEXO A	110
	ANEXO B	120

1 INTRODUÇÃO

Um dos maiores problemas do mundo atual é a escassez hídrica, a qual tem preocupado não somente a comunidade acadêmica científica, mas principalmente a sociedade civil. Muitos estudos têm sido desenvolvidos com o intuito de elucidar diferentes estratégias para amenizar os impactos do clima, do uso e ocupação do solo e do aumento populacional nos recursos hídricos, porém para a realização de tais estudos pesquisadores deparam-se com várias dificuldades como a falta e imprecisão de dados, e as grandes mudanças no uso e ocupação do solo. Estes fatores são ainda mais preocupantes quando se tratam de regiões semiáridas do mundo. No Brasil, a região nordeste corresponde a 18% do território nacional, sendo 75% deste classificado como regiões semiáridas (ou BSwH; Köppen) (LIMA; BARBOSA; BARBOSA, 2009), onde a vegetação dominante é a Caatinga, que é constituída por um complexo vegetacional que abrange uma área de 735.000 km² (SANTOS et al., 2011). A Caatinga contém cerca de 187 espécies de abelhas, 240 espécies de peixes, 167 espécies de répteis e anfíbios, 516 espécies de aves e 148 espécies de mamíferos, com níveis de endemismo variando de 9% em aves a 57% em peixes (LEAL; TABARELLI; SILVA, 2003). Além disso, possui mais de 1.000 espécies de plantas vasculares distribuídas como um mosaico de florestas tropicais sazonalmente secas (SDTF) e vegetação arbustiva. Contudo tamanha biodiversidade contrasta com altos níveis de degradação, colocando a Caatinga entre os ecossistemas mais ameaçados da Terra, com altas taxas de conversão da vegetação nativa em agricultura (MENEZES et al., 2012; VIEIRA et al., 2013).

Dessa forma, afim de estabelecer planos de manejo adequados para assegurar a biodiversidade e os serviços ambientais prestados pela Caatinga, políticas de cunho socioambiental estão sendo estabelecidas pelo governo de Pernambuco, e.g. Lei nº 14.090, de 17 de junho de 2010. Essas políticas visam regulamentar, e empregar esforços e capital financeiro em pesquisas para determinar a máxima eficiência de exploração dos recursos naturais a longo prazo, levando em consideração todas as suas implicações hidroecológicas. Contudo, a determinação direta de muitos parâmetros ambientais (e.g. precipitação, umidade relativa do ar e armazenamento de água no solo) requer instalação, manutenção e operação de equipamentos e experimentos em campo, demandando, por vezes, vários anos de coleta de dados com altos custos associados, enquanto, devido à falta de um plano de gestão adequado ou constantemente defasado, a degradação cresce de maneira rápida e dinâmica. Visando a solução desse problema, pesquisadores têm desenvolvido vários modelos matemáticos para determinar qual o melhor método de manejo a ser empregado em dada região.

Modelos matemáticos têm sido utilizados em todo mundo por pesquisadores e agentes

de governo para simular processos físicos e biológicos que enfrentam dificuldades analíticas em função de sua complexidade, ou pelo alto custo associado, especialmente no caso de monitoramentos contínuos em larga escala (*e.g.* modelos hidrológicos; ARNOLD et al., 1998). Um dos modelos atuais mais utilizado é o SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*), o qual vem gradualmente ampliando suas fronteiras, pois detém um perfil de modelagem versátil aos interesses tanto de empresas privadas como de órgãos públicos (BRESSIANI et al., 2015). Atuais aplicações do SWAT incluem os continentes africano (AWOTWI; YEBOAH; KUMI, 2015; BOSSA et al., 2012; FARAMARZI et al., 2013; POUYAN NEJADHASHEMI A, 2011; WELDERUFAEL; WOYESSA; EDOSSA, 2013) e europeu (KOCH; BAUWE; LENNARTZ, 2013; MALAGÒ et al., 2015; OEURNIG; SAUVAGE; SÁNCHEZ-PÉREZ, 2011; SELLAMI et al., 2013; TAYLOR; HE; HISCOCK, 2016), e os Estados Unidos da América (BIEGER et al., 2015; CHIEN; YEH; KNOUFT, 2013; MAREK et al., 2016a, 2016b). O SWAT é um modelo semidistribuído no qual uma bacia hidrográfica alvo é dividida em várias sub-bacias, as quais, por sua vez, são subdivididas em unidades de resposta hidrológica (*Hydrological Response Units* - HRUs) que consistem em áreas homogêneas em relação ao uso e cobertura da terra, relevo e características do solo. O modelo SWAT possui cinco principais componentes: hidrologia, solo, clima, vegetação e manejo da terra; e é capaz de prover resultados em quatro resoluções temporais: anual, mensal, diário e sub-diário (ARNOLD et al., 2012).

Contudo, assim como vários outros modelos ecohidrológicos ambientais, o SWAT requer calibração pois possui coeficientes e variáveis simuladas a partir de sub-modelos (ARNOLD et al., 2012); além de entradas espacialmente heterogêneas que são geralmente mensuradas de forma pontual em campo, como as características do solo, vegetação e clima. Calibração é o processo pelo qual os parâmetros de um modelo podem ser aproximados para um intervalo realista dadas as condições locais (KHAKBAZ et al., 2012). Mesmo para modelos matemáticos, que requerem um mínimo de parâmetros ambientais mensurados, às vezes não é possível obter dados de boa qualidade espaço-temporal no Brasil. Nesse sentido, o sensoriamento remoto surge como uma alternativa à determinação direta de parâmetros, provendo as informações necessárias para a calibração de modelos. O sensoriamento remoto é um conjunto de técnicas que permite caracterizar processos físicos, químicos e biológicos através da análise de suas interações com a radiação eletromagnética (REM) utilizando sensores (NOVO, 2008), e quando se trata de monitoramento de recursos florestais e hídricos, produtividade agrícola e previsão do tempo em escala regional, o sensor MODIS, a bordo dos satélites Terra e Aqua, surge como uma ótima opção, pois fornece dados diários da superfície terrestre em diversas resoluções espaciais (0,25 a 1 km).

Pensando nesta problemática, a tese ora apresentada tem como objetivo elucidar a dinâmica espaço-temporal e o balanço hídrico em áreas de Caatinga, utilizando o modelo SWAT com o mínimo de parâmetros possível mensurados através de determinação direta. Para alcançar tal objetivo, este trabalho foi dividido em 4 capítulos, dos quais o primeiro trata da análise da dinâmica e distribuição espaço-temporal da Caatinga, haja vista as rápidas mudanças de uso e cobertura da terra que vêm acontecendo em todo mundo devido às expansões agropecuária e urbana. Neste estudo decidiu-se não utilizar um mapeamento fixo no modelo SWAT, como muitos estudos o fazem, mas um mapeamento dinâmico que reflita as mudanças que ocorreram em mata nativa, e a sua própria dinâmica natural; e nos segundo e terceiro capítulos é feita uma análise de confiabilidade nos dados de evapotranspiração (ET) e Índice de Área Foliar (IAF), que foi utilizada na calibração do modelo SWAT; e por fim, o quarto capítulo compreende a avaliação integrada do balanço hídrico na Caatinga através de resultados calibrados e validados do modelo SWAT.

2 OBJETIVOS:

2.1 Objetivo geral:

- Analisar a dinâmica espao-temporal e o balanço hídrico da Caatinga na bacia do rio Pontal.

2.2 Objetivos específicos:

- Analisar a dinâmica da distribuição espaço-temporal da Caatinga na bacia do rio Pontal.
- Avaliar a eficiência e calibração de dados de evapotranspiração do sensor MODIS utilizando dados de torre micrometeorológica.
- Avaliar a eficiência e calibração de dados de área foliar com modelos ajustados e medições em campo.
- Analisar o balanço hídrico da Caatinga na bacia do rio Pontal utilizando o modelo SWAT.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Modelagem hidrológica

Modelos matemáticos têm sido utilizados em todo mundo por pesquisadores e agentes de governo para simular processos físicos e biológicos que enfrentam dificuldades analíticas em função de sua complexidade, ou pelo alto custo associado, especialmente no caso de monitoramentos contínuos em larga escala (ARNOLD et al., 1998). Existem dois principais tipos de modelos que possuem objetivos e aplicações distintas: (i) os modelos conceituais ou semânticos, os quais são construídos com base apenas nas relações entre as variáveis envolvidas, e buscam identificar e explicar certos fenômenos e suas implicações sobre um sistema real. Estes modelos por vezes são essenciais para a criação dos (ii) modelos empíricos ou físicos, os quais por sua vez buscam abstrair o comportamento de um fenômeno em um sistema real sob certas condições fisicamente observadas ou mensuradas, permitindo inclusive prever sua dinâmica futura (MCKAY; BECKMAN; CONOVER, 1979).

Em geral, os modelos empíricos requerem um conjunto de dados de entrada, $X = (X_1, X_2, \dots, X_N)$, que produzem um valor de saída, $Y = f(X)$. Quando o valor de Y se aproxima do valor que seria obtido por um experimento sob as condições X , o modelo é considerado acurado. Além disso, quando Y representa um fenômeno no mundo real, ele geralmente possui variação temporal, $Y(t)$, ou espacial, $Y(x,y)$, ou ambas, $Y(t,x,y)$, o que aumenta consideravelmente sua complexidade (MCKAY; BECKMAN; CONOVER, 1979). Algumas vezes o nível de abstração necessário é impraticável ou as incertezas em X são muito grandes, impossibilitando a obtenção de valores acurados sem a inclusão de algum nível de aleatoriedade (SCHREINEMACHERS; BERGER, 2011). Estes modelos são classificados como estocásticos, e neles Y pode ser explicado através da distribuição de seus possíveis valores, *e.g.* modelos climáticos e geológicos, ao contrário dos modelos determinísticos, nos quais Y é exclusivamente determinado pelos valores de X utilizados na modelagem, *e.g.* modelos hidrológicos.

Modelos hidrológicos simulam matematicamente a dinâmica de um sistema natural particular, permitindo inclusive realizar previsões. Nas últimas décadas, vários modelos hidrológicos foram criados, evoluindo do método racional (MULVANY 1850 *apud* TODINI, 2007) para os modelos empíricos distribuídos (WIGMOSTA; VAIL; LETTENMAIER, 1994). Estes modelos diferem bastante em termos de complexidade. Alguns são simples e modelam apenas os atributos do balanço hídrico no solo, *i.e.* escoamento superficial, percolação, fluxo lateral sub-superficial, fluxo de retorno do aquífero raso e evapotranspiração, como SHETRAN (EWEN; PARKIN; O'CONNELL, 2000) e TOPMODEL (BEVEN; KIRKBY, 1979); outros

são complexos e modelam todos os principais processos físicos associados ao crescimento da vegetação, movimento da água no solo e mudanças climáticas em diferentes escalas espaciais e temporais (ARNOLD et al., 1998). Atualmente, modelos complexos são os mais utilizados para administrar reservas naturais em bacias hidrográficas, avaliar impactos antrópicos, e planejar o uso da água garantindo que as várias demandas humanas e naturais sejam atendidas.

Um dos modelos hidrológicos atuais mais utilizados é o SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*), o qual vem gradualmente ampliando suas fronteiras, pois detém um perfil de modelagem versátil aos interesses tanto de empresas privadas como de órgãos públicos (BRESSIANI et al., 2015). Atuais aplicações do SWAT incluem os continentes africano (AWOTWI; YEBOAH; KUMI, 2015; BOSSA et al., 2012; FARAMARZI et al., 2013; POUYAN NEJADHASHEMI A, 2011; WELDERUFAEL; WOYESSA; EDOSSA, 2013) e europeu (KOCH; BAUWE; LENNARTZ, 2013; MALAGÒ et al., 2015; OEURNG; SAUVAGE; SÁNCHEZ-PÉREZ, 2011; SELLAMI et al., 2013; TAYLOR; HE; HISCOCK, 2016), e os Estados Unidos da América (BIEGER et al., 2015; CHIEN; YEH; KNOUFT, 2013; MAREK et al., 2016a, 2016b). O SWAT é um modelo semidistribuído no qual uma bacia hidrográfica alvo é dividida em várias sub-bacias, as quais por sua vez são subdivididas em unidades de resposta hidrológica (*Hydrological Response Units* - HRUs) que consistem em áreas homogêneas em relação ao uso e cobertura da terra, relevo e características do solo. As HRUs são representadas no modelo como a porcentagem da área da sub-bacia, e podem ou não ser espacialmente explícitas, dependendo do número delas por sub-bacia. O modelo SWAT possui cinco principais componentes: hidrologia, solo, clima, vegetação e manejo da terra; e é capaz de prover resultados em quatro resoluções temporais: anual, mensal, diário e sub-diário (ARNOLD et al., 2012). O componente hidrológico é o seu principal modulador, impactando diretamente no crescimento vegetal, e nos movimentos de sedimentos, nutrientes e pesticidas. O componente climático requer dados de precipitação diária, temperatura do ar máxima/mínima, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa do ar. O SWAT pode tanto ler estes dados através de arquivos de texto como simulá-los com base em estatísticas mensais de dados observados. O SWAT utiliza um único modelo para simular a dinâmica de crescimento das plantas em todos os usos, distinguindo apenas vegetações anuais e perenes. Detalhes sobre as equações utilizadas no modelo foram descritos por Arnold et al. (1998).

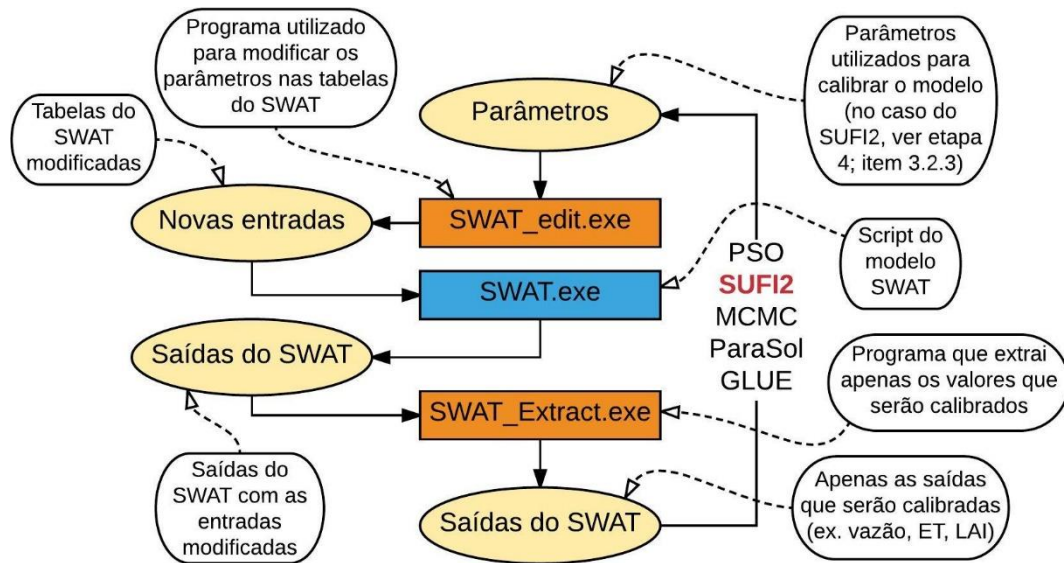
Contudo, assim como vários outros modelos hidrológicos, O SWAT requer calibração pois possui coeficientes e variáveis simuladas a partir de sub-modelos (ARNOLD et al., 2012); além de entradas espacialmente heterogêneas que são geralmente mensuradas de forma pontual em campo, como as características do solo, vegetação e clima. Calibração é o processo pelo

qual os parâmetros de um modelo podem ser aproximados para um intervalo realista dadas as condições locais (KHAKBAZ et al., 2012). A calibração de um modelo inicia pela determinação dos parâmetros mais sensíveis para uma dada bacia ou sub-bacia hidrográfica através da análise de sensibilidade, a qual é o processo pelo qual se obtém o padrão de mudança de uma saída do modelo em relações aos parâmetros de entrada. Existem dois tipos de análise de sensibilidade: a local, onde um único parâmetro é modificado; e a global, onde múltiplos parâmetros são avaliados conjuntamente. A desvantagem da análise local é que o valor ideal para um dado parâmetro não leva em consideração a influência da variação dos outros parâmetros. A segunda etapa é a calibração propriamente dita, e consiste na escolha dos valores ideais para os parâmetros sensíveis, comparando os valores modelados com os observados de mesmo período. A calibração geralmente acontece de forma iterativa sobre uma lista de conjuntos de valores, criada a partir da combinação matemática de valores obtidos para cada parâmetro sensível em intervalos predefinidos. Por fim, a validação é usada para analisar as incertezas das saídas do modelo. Nessa etapa, os parâmetros obtidos durante a calibração são inseridos no modelo, e seus valores de saída são comparados com dados observados não utilizados em nenhuma etapa anterior (ARNOLD et al., 2012). Em todo o mundo, vários pesquisadores têm realizado o processo de calibração do SWAT com o software SWAT-CUP (*SWAT Calibration and Uncertainty Programs*; ROUHOLAHNEJAD et al., 2012), recomendado pelos desenvolvedores do SWAT.

3.2 SWAT-CUP (SWAT Calibration and Uncertainty Programs)

SWAT-CUP é um software que integra as saídas do modelo SWAT e cinco algoritmos de calibração: SUFI2 (*Sequential Uncertainty Fitting 2*; ABBASPOUR; JOHNSON; VAN GENUCHTEN, 2004), GLUE (*Generalized Likelihood Uncertainty Estimation*; BEVEN; BINLEY, 1992), PSO (*Particle Swarm Optimization*; KENNEDY; EBERHART, 2002), ParaSol (*Parameter Solution*; VAN GRIENSVEN; MEIXNER, 2007), e MCMC (*Markov chain Monte Carlo*; GILKS, 2005) em uma única interface gráfica. O processamento no SWAT-CUP consiste em três grandes etapas (Figura 1): modificar os valores das entradas do SWAT, rodar o SWAT e extrair os valores de saída desejados. Detalhes sobre o funcionamento do SWAT-CUP são descritos por Rouholahnejad et al. (2012).

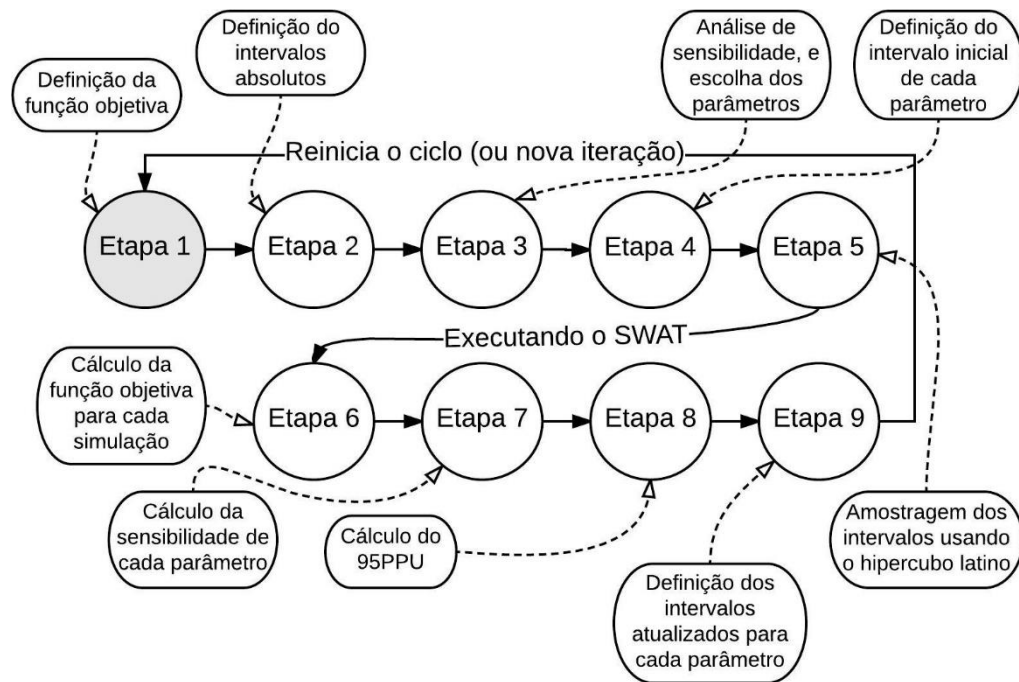
Figura 1 - Adaptação da estrutura do SWAT-CUP publicada por Rouholahnejad et al. (2012).



3.3 O algoritmo SUFI2

O SUFI2 é a segunda versão do algoritmo SUFI (*Sequential Uncertainty Fitting*) desenvolvido por Abbaspour et al. (1997), e consiste num método iterativo de calibração que combina otimizações e análises de incertezas de múltiplos parâmetros. Este método compartilha muitos elementos com o algoritmo GLUE, mas diferente deste, SUFI2 tem como objetivo definir o melhor intervalo de valores para cada parâmetro, invés do melhor valor específico para cada parâmetro (ABBASPOUR; JOHNSON; VAN GENUCHTEN, 2004). O SUFI2 tem sido reportado como o algoritmo mais eficiente na calibração do modelo SWAT por vários autores (NKONGE et al., 2014; WU; CHEN; LI, 2013; YANG et al., 2008). O funcionamento do SUFI2 a ser apresentado foi previamente descrito por Abbaspour et al. (2004). O SUFI2 pode ser dividido em 9 etapas (Figura 2), as quais iniciam com a definição da função objetiva, que é um indicador matemático que pode variar desde uma simples soma de valores a índices complexos, tais como o coeficiente de determinação (r^2), Chi-quadrado (χ^2), Nash-Sutcliffe (NS), Percent Bias (PBIAS) e a Eficiência de Kling Gupta (KGE). Além disso, SUFI2 incorpora não só a utilização de uma única função, ou várias no caso de uma calibração com multicritérios, como o conceito de formulação multiobjetiva, onde diferentes variáveis, ou diferentes estações de medições de uma mesma variável, são integradas em uma função objetiva. Tanto às variáveis como trechos de uma série de medições (ou compartimentos) podem ser atribuídos pesos que são levados em consideração no cálculo da função objetiva.

Figura 2 - Diagrama geral das etapas do SUFI2 (*Sequential Uncertainty Fitting 2*).



A segunda etapa consiste na determinação de intervalos realistas dentro do qual cada parâmetro pode variar. Esse intervalo evita que o algoritmo defina como calibrado um valor de um dado parâmetro que seja irreal para as condições em que está sendo calibrado, *e.g.* BLAI (valor máximo de área foliar) menor que $0,3 \text{ m}^2/\text{m}^2$ ou maior que $3,1 \text{ m}^2/\text{m}^2$ para uma área de Caatinga. A terceira etapa envolve a análise sensibilidade de vários parâmetros relacionados à saída do modelo que se deseja calibrar, e permite não só definir quais parâmetros entrarão na calibração, como também auxilia a quarta etapa, que consiste na escolha dos valores máximos e mínimos no qual cada parâmetro deve variar. A quarta etapa pode, por vezes, ser confundida com a segunda etapa. Diferente da segunda etapa, esse intervalo não é fixo, ou seja, não é absoluto, e deve variar a cada iteração. Por exemplo, numa dada área de estudo, através de experimentos em campo, análises de sensibilidade ou medições remotas descobriu-se que o parâmetro BLAI deve variar entre $2,0$ a $2,5 \text{ m}^2/\text{m}^2$, contudo a cada iteração esse intervalo deve se mover, se estreitar, e por vezes se expandir, sempre dentro do intervalo absoluto (*e.g.* de $0,3$ a $3,1 \text{ m}^2/\text{m}^2$) até atingir o intervalo ideal. Em seguida, todos os parâmetros escolhidos e seus respectivos intervalos são amostrados e combinados n vezes de forma a maximizar a velocidade e o tempo de processamento do algoritmo. SUFI2 utiliza o método do hipercubo latino, e o número de iterações (n) deve ser definido pelo pesquisador. Este método garante que o intervalo definido para cada parâmetro seja completamente amostrado. Após a etapa 5 se iniciam as avaliações e estatísticas sobre as simulações. A sexta etapa consiste no cálculo da função objetiva para cada simulação, e a sétima compõe uma série de equações que são aplicadas para

obter a sensibilidade de cada parâmetro. Inicialmente, (i) a matriz de sensibilidade e (ii) matriz de Hessian são calculadas conforme descrito em Abbaspour et al. (2004), e então (iii) obtém-se uma estimativa do limite inferior da matriz de covariância de cada parâmetro, assim como seu (iv) desvio padrão e (v) intervalo de confiança a 95%, detalhes em Press et al. (1992). Por fim, a sensibilidade de cada parâmetro é calculada através da média das colunas da matriz de sensibilidade. Na etapa 8, os 95PPUs de todos parâmetros são computados. SUFI2 considera a incerteza das predições como sendo os 2,5° (q_u) e 97,5° (q_i) percentil da distribuição cumulativa dos pontos simulados. O melhor conjunto otimizado é calculado para cada variável q através do percentual de dados observados que ficam dentro da região do 95PPU. As distâncias médias entre 95PPU superior e inferior são determinadas pela seguinte equação:

$$\bar{a} = \frac{1}{K} \sum_{l=1}^K (q_u - q_i) l \quad (1)$$

onde l é um contador sequencial, e K é o número total de observações para cada parâmetro q . O melhor resultado é quando 90% ou mais dos valores observados ficam dentro da região do 95PPU, r^2 é maior ou igual a 0.8, e $\bar{a}$ está próximo de zero.

Em geral, inicialmente a incerteza dos parâmetros é alta, ou seja, $\bar{a}$ apresenta valores altos. Contudo, à medida que as iterações vão acontecendo, $\bar{a}$ vai se aproximando de zero e a porcentagem de valores observados dentro da faixa do 95PPU vai aumentando. Isso acontece porque a cada iteração os valores definidos na quarta etapa são atualizados, produzindo menores intervalos para uma melhor precisão na definição do melhor intervalo. O novo intervalo, definido na nona etapa, só aumenta quando o melhor valor está perto dos limites do anterior intervalo, contudo este aumento nunca excede os valores definidos na etapa 2.

3.4 A heterogeneidade espaço-temporal da Caatinga

Haja vista as rápidas mudanças de uso e cobertura da terra que vêm acontecendo em todo o mundo devido às expansões agropecuária e urbana, neste estudo decidiu-se não utilizar um mapeamento fixo no modelo SWAT, como muitos estudos o fazem, mas um mapeamento dinâmico que reflita as mudanças que ocorreram em mata nativa, e a sua própria dinâmica natural. Contudo, a disponibilidade de informações confiáveis sobre a cobertura vegetal e sua dinâmica ao longo do tempo não está distribuída uniformemente pelos biomas do planeta. As florestas tropicais têm sido amplamente estudadas, enquanto as florestas tropicais secas

recebem menos atenção e esforço (BEUCHLE et al., 2015; PORTILLO-QUINTERO; SÁNCHEZ-AZOFEIFA, 2010; SANTOS et al., 2011); consequentemente, dados sobre esses ecossistemas são geralmente escassos, inconsistentes e limitados, embora 42% de todas as florestas em regiões tropicais sejam classificadas como sazonais secas (BULLOCK; MOONEY; MEDINA, 1995).

O Nordeste brasileiro corresponde a 18% do território nacional, sendo 75% deste, classificado como regiões semiáridas (ou BSwh; Köopen) (LIMA; BARBOSA; BARBOSA, 2009), onde predominam depressões que variam de 300 a 500 m de altitude (SANTOS et al., 2011), e a precipitação média anual é de 510 mm, concentrada de Janeiro a Abril, e marcada por forte irregularidade espaço-temporal, e pela possibilidade de fortes chuvas (120-130 mm) durante um período de apenas 24 horas. A temperatura média do ar é 26,2 °C (SOUZA et al., 2015). A vegetação dominante é a Caatinga, nome indígena que significa “floresta branca” (SAMPAIO, 1995), e é constituída por um complexo vegetacional que abrange uma área de 735.000 km² (SANTOS et al., 2011), que contém cerca de 187 espécies de abelhas, 240 espécies de peixes, 167 espécies de répteis e anfíbios, 516 espécies de aves e 148 espécies de mamíferos, com níveis de endemismo variando de 9% em aves a 57% em peixes (LEAL; TABARELLI; SILVA, 2003). Além disso, possui mais de 1.000 espécies de plantas vasculares distribuídas como um mosaico de florestas tropicais sazonalmente secas (SDTF) e vegetação arbustiva. A Caatinga é não só reconhecida como um dos “Últimos lugares selvagem da Terra”, mas também como uma das 37 “Áreas silvestres do mundo” (ALBUQUERQUE et al., 2012). No entanto, essa biodiversidade contrasta com altos níveis de degradação, colocando também a Caatinga entre os ecossistemas mais ameaçados da Terra, com altas taxas de conversão da vegetação nativa em agricultura. Vieira et al. (2013), utilizando dados Landsat Thematic Mapper - TM dos anos de 1999, 2000 e 2001 (162 imagens de satélite), mostrou que as áreas agrícolas ocupavam 55% do estado de Pernambuco. Atualmente, as áreas convertidas na região ultrapassam 60% de sua área original (MENEZES et al., 2012).

Em termos de dinâmica temporal, no município de Belém de São Francisco, as áreas de sequeiro ganharam força através de programas governamentais de desenvolvimento rural; esta foi a principal razão para o desmatamento da Caatinga na região (ASSIS et al., 2014). No município de Santa Maria da Boa Vista, a conversão foi principalmente movida pela expansão agressiva das áreas urbanas (TAURA et al., 2010). Como um todo, a perda bruta de Caatinga entre 1990 e 2010 foi de 25.335 km², com uma taxa de variação anual de -0,44% ano⁻¹ (BEUCHLE et al., 2015), e a maioria dessas áreas foram convertidas em áreas de agricultura e pecuária (COELHO et al., 2014). Contudo, apesar da forte pressão para a conversão de áreas

naturais, este processo está condicionado a uma gama de condições ambientais (MAYAUX et al., 2005), e a conversão do uso da terra às vezes pode retardar, parar ou até mesmo diminuir. Em determinados períodos, as características climáticas ou econômicas podem não ser favoráveis para as práticas rurais, o que pode alterar toda a dinâmica do uso da terra em uma determinada área (COELHO et al., 2014). Florestas secundárias podem ser estabelecidas através do recrescimento em terras abandonadas e plantações florestais (MAYAUX et al., 2005).

Em termos de dinâmica espacial, uma das principais consequências do desmatamento é a criação de paisagens dominadas por fragmentos florestais remanescentes da cobertura florestal contínua e original (PORTILLO-QUINTERO; SÁNCHEZ-AZOFEIFA, 2010). Estes fragmentos estão geralmente embebidos em uma matriz de habitats transformados. Do ponto de vista ecológico, a forma como esses fragmentos são distribuídos no espaço e no tempo pode afetar seus microclimas, distribuição espacial e composição de espécies, interações de espécies, estrutura trófica de comunidades e movimento de indivíduos entre os fragmentos. Assim, grandes fragmentos capturam a maioria das espécies e processos vitais para manter as funções do ecossistema, enquanto que os fragmentos menores geralmente têm menos variedade de espécies, especialmente quando estes são antigos, porque os recursos podem se tornar um fator limitante ao serem escassos e difíceis de encontrar. Além disso, estes fragmentos possuem uma maior probabilidade de serem convertidos para outras coberturas de terra em relação aos maiores (PORTILLO-QUINTERO; SÁNCHEZ-AZOFEIFA, 2010). Do ponto de vista social, a Caatinga tem recebido constantemente os menores investimentos. Líderes políticos e governos ainda não prestaram atenção à relação potencial entre biodiversidade e pobreza. À medida que a Caatinga se degrada, a temperatura do ar e da superfície, a evaporação de água no solo e a mudança do ciclo geoquímico aumentam, tornando mais difícil cultivar perto da Caatinga. Estas contribuições da biodiversidade para os meios de subsistência através da manutenção de terras produtivas e ecossistemas foram detalhadamente descritas por Roe et al. (2014).

Historicamente, tem sido difícil avaliar a distribuição da perda de ecossistemas naturais e fauna do Brasil nos últimos 500 anos. O processo de desmatamento tem estado ativo na região desde o ano de 1500, e os registros históricos são poucos e escassos (COIMBRA-FILHO; CÂMARA, 1996). Entretanto, desde os anos 80, o monitoramento destas mudanças tem sido imperativo no Brasil, com muitas iniciativas como os programas PRODES (Monitoramento da Floresta Amazônica por Satélite), DETER (Detecção do Desmatamento em Tempo Real), PROBIO (Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica), e mais recentemente, PMDBBS (Projeto de Monitoramento do Desmatamento dos Biomas Brasileiros

por Satélite). Estes projetos se utilizam principalmente de técnicas de sensoriamento para realizar a quantificação espaço-temporal da vegetação.

3.5 O que é, como surgiu, e qual a utilidade do sensoriamento remoto?

Neste estudo o sensoriamento remoto foi utilizado tanto para realizar os mapeamentos de uso e cobertura da terra, quanto para fornecer dados observados para a calibração do SWAT, haja vista a dificuldade de adquirir dados de boa qualidade espaço-temporal no Brasil. O sensoriamento remoto é um conjunto de técnicas que permite caracterizar processos físicos, químicos e biológicos através da análise de suas interações com a radiação eletromagnética (REM), utilizando sensores, e equipamentos de processamento e transmissão de dados instalados em torres, aeronaves, espaçonaves, ou outras plataformas (NOVO, 2008). Estas técnicas começaram a ser desenvolvidas a partir do surgimento das câmeras fotográficas e fotografias aéreas (FLORENZANO, 2011).

A história do sensoriamento remoto pode ser dividida em dois períodos. O primeiro foi entre os anos de 1860 a 1960, quando se limitava apenas à utilização de fotografias aéreas. O processamento de tais imagens foi crucial em muitas batalhas durante as duas grandes guerras mundiais, pois permitia obter informações sobre a topografia e a vegetação do território inimigo, e com isso um melhor planejamento para possíveis ataques. Além disso, nesse período foram desenvolvidos os primeiros sensores a captar a radiação infravermelha. O segundo período foi a partir dos anos 60, quando se iniciaram os primeiros registros de imagens da Terra a partir de fotografias orbitais. Mais precisamente, em abril de 1960 foi lançado o primeiro satélite meteorológico da série Tiros, e em 1972 o primeiro satélite com finalidade civil (ERTS-1) destinado à obtenção de dados de forma rápida, confiável e repetitiva de alvos terrestres. Este período se estende até os dias atuais, e nos últimos anos vem sendo caracterizado pela multiplicidade de sistemas de sensores (ROSA, 2009).

A principal componente do sensoriamento remoto é a radiação eletromagnética (REM), que se propaga sobre a forma de ondas, na velocidade da luz (≈ 299.7920 km/s), e com diferentes frequências e comprimentos de onda. A principal fonte de REM é o Sol, mas existem outras, como antenas e radares. Embora ilimitada em termos de frequências e comprimentos de onda, a REM é comumente representada em forma de espectro eletromagnético (NOVO, 2008; ROSA, 2009), que é a porção de REM observada, na natureza e utilizada em tecnologias, dividida em várias bandas ou faixas; geralmente com comprimentos de 0,4 a 0,7 μm (visível), 0,72 a 1,3 μm (infravermelho próximo), 1,3 a 4,0 μm (infravermelho médio), e 4,0 a 300 μm (infravermelho distante). Ao incidir sobre o planeta Terra, a REM pode ser (i) transmitida, (ii)

refletida ou (iii) absorvida. A atmosfera terrestre, por ser opaca em muitas regiões do espectro, permite somente a transmissão de uma parte de REM; e a intensidade e o comprimento de onda a ser refletido ou absorvido varia de acordo com as propriedades físico-químicas do alvo. Todo corpo reflete ou emite a radiação eletromagnética nos diversos comprimentos de onda de forma diferente, e o resultado é uma curva de refletância ou assinatura espectral. No caso da vegetação, por exemplo, esse comportamento espectral permite a identificação de três faixas espectrais distintas, as quais são definidas por diferentes compostos da folha. Na faixa do visível as folhas absorvem predominantemente energia com comprimentos de onda da região do vermelho, devido à interação com clorofilas. As regiões do verde e infravermelho próximo podem ser consideradas faixas de alta refletância, sendo o infravermelho consideravelmente menos transparente que o verde em decorrência do maior espalhamento interno de radiação na folha (NOVO, 2008).

Nos últimos anos, os avanços na qualidade radiométrica das imagens provenientes de sensores em satélites (*e.g.* a série Landsat, e o sensor MODIS), nos modelos de transferência radiativa (KOTCHENOVA; VERMOTE, 2007), e na capacidade de descrever as características do espalhamento e absorção atmosférica no espaço e no tempo (VERMOTE; EL SALEOUS; JUSTICE, 2002), tornaram possível fazer uma recuperação remota com precisão aceitável e viável de muitos parâmetros físicos e biológicos, como por exemplo, ET e a área foliar total (IAF) em uma determinada área.

3.6 A série Landsat

A série Landsat se iniciou em 1972, quando a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) lançou o primeiro satélite da série Landsat, inicialmente nomeado de ETRS-1 e depois de Landsat-1 carregava o sensor MSS (*MultiSpectral Scanner*), que é composto por um sistema ótico que converte o fluxo radiante da energia refletida do alvo, ou radiância, em sinais elétricos, utilizando quatro conjuntos de filtros e detectores. O objetivo principal era construir um sistema não-tripulado que fornecesse informações sobre os recursos naturais do planeta Terra. A missão foi um sucesso, e resultou em outros lançamentos a fim de não só continuar o monitoramento, mas inová-lo cada vez mais. Os Landsat-2, 3 e 4 foram lançados em 1975, 1978 e 1982 respectivamente; Os Landsat-5 e 6 foram lançados ambos em 1993. Em 1999 foi lançado o Landsat-7 que ainda se mantém ativo (KAIRU, 1982; LAUER; MORAIN; SALOMONSON, 1997; MACHADO, 2014). Os satélites Landsat-4 e 5 além do sensor MSS, também vinham equipados com o sensor TM (*Thematic Mapper*) que registrava a radiância não só provenientes das regiões do visível, mas do infravermelho próximo, médio e termal do

espectro eletromagnético, o que permitiu uma gama muito maior de medições, análises, pesquisas e definições de metodologias a nível global (LIU, 2007). O sensor TM/Landsat-5 se manteve operacional por 28 anos, e foi sucedido em 2013 pelos sensores OLI (*Operational Land Imager*) e TIRS (*Thermal Infrared Sensor*) a bordo do Landsat-8. A série Landsat, com resolução temporal de 16 dias, e espacial de 15-120 m (CHANDER; MARKHAM; HELDER, 2009), é a ferramenta principal do programa de ciências da Terra da NASA, permitindo o monitoramento das mudanças climáticas, biodiversidade, energia, recursos hídricos, agricultura e expansão urbana. As vantagens do uso do sensoriamento remoto orbital para este tipo de monitoramento são inúmeras.

3.7 O sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)

Quando se trata de monitoramento de recursos florestais e hídricos e de produtividade agrícola em escala regional, o sensor MODIS, a bordo dos satélites Terra e Aqua, surge como uma ótima opção, pois fornece dados diários da superfície terrestre em diversas resoluções espaciais (0,25 a 1 km). O sensor MODIS, que está integrado ao satélite Terra (EOS AM-1) foi lançado no dia 18 de dezembro de 1999, e o do satélite Aqua (EOS PM-1) em 4 de maio de 2002. Ambos oferecem uma olhar para fenômenos terrestre, atmosférico e do oceano, beneficiando uma comunidade de usuários ampla e diversa em todo o mundo (NASA, 2013). No Brasil, diversos estudos ambientais têm sido desenvolvidos a partir de produtos do sensor MODIS, com aplicações na agricultura, meio ambiente, hidrosfera e atmosfera (RUDORFF; SHIMABUKURO; CEBALLOS, 2007).

Tabela 1 - Lista de produtos provenientes do sensor MODIS.

Produto	Descrição
01	Radiância Bruta
02	Radiância Calibrada
03	Geolocalização
04	Aerossol
05	Água Precipitável Total
06	Cobertura de Nuvem
07	Perfis Atmosféricos
08	Atmosfera em Grid
09	Refletância de Superfície
10	Cobertura de Neve
11	Temperatura da Superfície e Emissividade
12	Cobertura da Terra
13	Índices de Vegetação
14	Anomalias Térmicas
15	Fração da Radiação Fotossinteticamente Ativa e Índice de Área Foliar
16	Evapotranspiração
17	Produtividade Primária Bruta e Produtividade Primária Líquida
18	Radiância da Água Normalizada

Produto	Descrição
19	Concentração de Pigmento
20	Fluorescência de Clorofila
21	Concentração de Clorofila A
22	Radiação Fotossinteticamente Disponível
23	Concentração de Sólidos Suspensos
24	Concentração da Matéria Orgânica
25	Concentração de Coccolith
26	Coefficiente de Atenuação da Água do Oceano
27	Produtividade Primária do Oceano
28	Temperatura da Superfície do Mar
29	Cobertura de Gelo Marinho
31	Concentração de Ficoeritrina
35	Máscara de nuvem
36	Coefficiente de Absorção Total
37	Propriedades do Aerosol do Oceano
39	Água Limpa
43	Albedo
44	Conversão da Cobertura da Terra

O MODIS realiza observações de toda a superfície terrestre e adquire dados em 36 bandas espectrais situadas entre 0,4 e 14,4 μm com diferentes resoluções espaciais (LIU, 2007): 2 bandas com 250 m (1 e 2), 5 com 500 m (3 a 7), e as demais com 1 km. Essas bandas são combinadas com algoritmos complexos, na forma de vários produtos que fornecem informações de vários parâmetros (Tabela 1), classificados em cinco níveis de processamento (0 a 4) e seis diferentes composições temporais (diário; 4, 8 e 16 dias; mensal; e anual), e dois sensores (MOD = Terra; MYD = Aqua; e MCD = Combinado).

3.7.1 O produto de Evapotranspiração (MOD16)

A evapotranspiração é normalmente considerada como a soma de toda a água que se evapora do solo e transpira de plantas (ALLEN et al., 1998; MU et al., 2007). Pode ser utilizada para estimar a quantidade de água utilizada pelas lavouras, e a quantidade de irrigação necessária para a produção ideal da cultura (TEIXEIRA, 2012). Também pode ser usado como um componente de modelos como o SWAT que estimam outros componentes do balanço hídrico, incluindo o escoamento superficial, fluxo lateral, fluxo de base e percolação de aquíferos (RUHOFF et al., 2013; STRAUCH; VOLK, 2013). Tais estimativas são úteis para a gestão da água em solos, reservatórios e até mesmo hidrelétricas (GOVENDER; CHETTY; BULCOCK, 2009). À medida que a população humana aumenta, a gestão da água está se tornando uma preocupação maior para os pesquisadores (MU et al., 2007), agricultores e outros tomadores de decisão, e informações precisas sobre variações temporais e espaciais de ET ajudam significativamente. Além disso, na região semiárida brasileira a vegetação está condicionada ao déficit hídrico relacionado à seca, em virtude da irregularidade das chuvas.

Contudo, não é apenas o baixo índice pluviométrico que provoca o déficit hídrico, mas a associação desta com outros fatores característicos da região, como, por exemplo, as altas temperaturas relacionadas com a intensidade luminosa elevada, que provocam uma demanda evaporativa alta e consequente dessecação do solo (AMORIM; SAMPAIO; ARAÚJO, 2009). O solo é altamente salino (DANTAS et al., 2006) devido ao alto nível de evaporação do solo e à pobre drenagem, resultando na acumulação de sais na superfície do solo (SAMPALIO, 1995). Essas condições muitas vezes estão associadas à intermitência dos rios, o que dificulta bastante a calibração do modelo SWAT.

Os produtos MOD16 de evapotranspiração são disponibilizados em três composições temporais (8 dias, mensal e anual), e se apresentam como uma excelente opção para calibração do SWAT rápida e de baixo custo, haja vista que são disponibilizados já prontos e livremente na internet. O produto MOD16 é composto por dois componentes: (i) dados meteorológicos e (ii) de sensores remotos, e é calculado utilizando um algoritmo (Eq. 2; MU et al., 2007; MU; ZHAO; RUNNING, 2011), que é uma modificação da equação descrita por Cleugh et al. (2007), que por sua vez é uma abordagem Penman-Monteith para estimar ET (MONTEITH, 1965).

$$ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \frac{\rho C_p (e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (2)$$

Onde R_n é o saldo de radiação ($\text{J m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), G é o fluxo de calor do flux ($\approx 0 \text{ J m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), ρ é a densidade do ar (kg m^{-3}), C_p é o calor específico do ar a uma pressão constante, ($1013 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$), e_s é a pressão de saturação do vapor, e_a é a pressão de vapor no momento, Δ é a inclinação curva de pressão em relação à temperatura do ar (Pa K^{-1}), e γ é a constante psicométrica (kPa K^{-1}). Os dados meteorológicos de entrada para essa equação são fornecidos pelo Escritório Global de Modelagem e Assimilação (GMAO), e incluem radiação total diária (R_s ; $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), temperatura do ar média diária (T ; $^{\circ}\text{C}$), temperaturas do ar diurnas e noturnas (T_D , T_N ; $^{\circ}\text{C}$), temperatura do ar mínima diária ($T_{\min}$; $^{\circ}\text{C}$), e pressão de vapor (e_s , e_a ; kPa). Todos com resolução espacial de $1,0^{\circ} \times 1,25^{\circ}$. As entradas de superfície são adquiridas a partir de três produtos MODIS, com resolução espacial de 500 a 1.000 m^2 . Estes produtos são MOD12Q1 (FRIEDL et al., 2002), MOD15A2 (MYNENI et al., 1997), e MCD43B2/B3 Coleção 5 (albedo) (SALOMON et al., 2006). Mais detalhes do algoritmo MOD16 são dados em Mu et al. (2011).

3.7.2 O produto do Índice de Área Foliar (MOD15)

O Índice de Área Foliar (IAF) é a área foliar em m^2 por m^2 de solo. A sua determinação é essencial em vários estudos de evapotranspiração (MU et al., 2007) a produtividade de florestas (RODRIGUEZ et al., 2009). Além disso, o IAF é um parâmetro chave em modelos globais e regionais da biosfera. Existem dois principais grupos de métodos para obter o IAF: (i) os diretos, no quais são realizadas medidas reais do dossel foliar a partir da soma das áreas das folhas, que podem ou não ser destrutivos, mas geralmente são inviáveis quando realizados em maior escala; e (ii) os indiretos, que necessitam de sensores ativos ou passivos para realizar as medições. Os sensores ativos não dependem da radiação solar. Eles emitem sua própria onda eletromagnética, e capturam os ecos refletidos pelos objetos, *e.g.* LAI-2000. Os sensores passivos baseiam-se na relação entre a área foliar e a probabilidade de a radiação ser transmitida através do arranjo estratificado de elementos foliares no dossel das árvores. Tal probabilidade pode ser adquirida através de modelo de transferência radiativa (KNYAZIKHIN et al., 1998). Além disso, existem métodos que utilizam a resposta espectral e alguns coeficientes, em geral o IVDN (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada; GALVÍNCIO et al., 2013; MACHADO, 2014) ou IVAS (Índice de Vegetação Ajustado ao Solo; BASTIAANSEN, 1998).

O produto MODIS-IAF (MODIS 15) é projetado para fornecer valores com resolução de 1 km e intervalos temporais de 4 e 8 dias, e é derivado de um algoritmo complexo que utiliza valores de reflectâncias de superfície diária (MODIS 09) e dados de um modelo de transferência radiativa, que fica armazenado em uma tabela de consulta (LUT de *Lookup Table* em inglês) com duas dimensões (WENZE YANG et al., 2006). Quando este método falha, ou não encontra um valor satisfatório, um algoritmo reserva é utilizado. Esse algoritmo é baseado na relação empírica entre IVDN e IAF, e variam para cada bioma (KNYAZIKHIN et al., 1998).

4 CONCLUSÕES

Os resultados do presente estudo mostraram que a Caatinga pode servir não só como espécie de tampão para o escoamento superficial, que está intimamente relacionado com perda de safras inteiras e deslizamentos de terra em áreas residenciais. O modelo SWAT foi calibrado para a Caatinga, e foram encontrados valores de Nash para ET (0,61 e 0,63: calibração e validação) e LAI (0,67 e 0,78), que são valores equiparáveis a outras de vegetação semelhante. Para tal, os dados observados de ET e LAI foram adquiridos através de técnicas de sensoriamento remoto, e validados na área. O experimento foi conduzido em uma área de Caatinga preservada, onde medidas meteorológicas e de ET foram realizadas ao longo de 2012 com torre de fluxo turbulentos, e comparadas com ET advinda dos produtos MOD16A2 e SAFER do sensor MODIS. As correlações foram realizadas em escalas mensais, de 8 dias e diárias; E produziu valores de r^2 mensais = 0,92, 8-dias = 0,88 e diários = 0,85 para o algoritmo SAFER. Os dados mensais de MOD16A2 produziram um valor de r^2 = 0,82. Na mesma área, foram realizadas medições de LAI utilizando dados de torre meteorológica e do Accupar para os anos de 2011 a 2016 na mesma área experimental. Essas estimativas foram comparadas com os produtos MCD15A3/A2, e derivados do MOD09GA. (i) MCD15A3/A2 apresentou r^2 na composição de 4 dias = 0,34 e 8-dias = 0,6; (ii) derivados do MOD09GA: r^2 variando de 0,59 a 0,65; (iii) iterações utilizando todas as bandas do produto resultaram em três equações: duas com r^2 = 0,75, e uma com r^2 = 0,73. Além disso, haja vista as rápidas mudanças de uso e cobertura da terra que vem acontecendo em todo mundo devido às expansões agropecuárias e urbana, neste estudo decidimos não utilizar um mapeamento fixo no modelo SWAT, como muitos estudos o fazem, mas um mapeamento dinâmico que reflita as mudanças que ocorreram em mata nativa, e a sua própria dinâmica natural, e os dados indicaram que a área relativa (RA) de caatinga na bacia hidrográfica do rio Pontal diminuiu de 90,25% para 60,98% ao longo de 38 anos, enquanto a fragmentação (PD) apresentou um viés crescente. A distribuição espacial de ambos os índices tornou-se mais heterogênea e agrupou-se ao norte. Sugerimos que os conhecimentos sobre a aptidão da terra para a agricultura foram as principais causas do desmatamento, já que a precipitação é 112% mais intensa no norte da bacia do que no sul. Por fim, a análise do balanço hídrico da Caatinga apresentou escoamento superficial apenas quando os valores de precipitação ultrapassaram os 63 mm acumulados com uma máxima de 20 mm. Na Caatinga, 85,03% da água da chuva é evapotranspirada contra 2,45% para escoamento superficial, 3,58% para percolação, e 0,41% para fluxo de retorno. A compreensão do balanço hídrico, em especial em florestas nativas de regiões áridas e semiáridas, é fundamental para a resolução de muitos problemas relacionados à agricultura e ao planejamento municipal.

REFERÊNCIAS

- ABBASPOUR, K. C. et al. A sequential uncertainty domain inverse procedure for estimating subsurface flow and transport parameters. **Water Resources Research**, v. 33, n. 8, p. 1879–1892, ago. 1997.
- ABBASPOUR, K. C.; JOHNSON, C. A.; VAN GENUCHTEN, M. T. Estimating Uncertain Flow and Transport Parameters Using a Sequential Uncertainty Fitting Procedure. **Vadose Zone Journal**, v. 3, n. 4, p. 1340, 2004.
- ALBUQUERQUE, U. P. et al. Caatinga Revisited: Ecology and Conservation of an Important Seasonal Dry Forest. **The Scientific World Journal**, v. 2012, p. 1–18, 2012.
- ALLEN, R. G. et al. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. **FAO, Rome**, v. 300, n. 9, p. D05109, 1998.
- AMORIM, I. L. DE; SAMPAIO, E. V. DE S. B.; ARAÚJO, E. DE L. Fenologia de espécies lenhosas da caatinga do Seridó, RN. **Revista Árvore**, v. 33, n. 3, p. 491–499, jun. 2009.
- ARNOLD, J. G. et al. Large-area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model development. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 34, n. 1, p. 73–89, fev. 1998.
- ARNOLD, J. G. et al. Swat: Model Use, Calibration, and Validation. **Asabe**, v. 55, n. 4, p. 1491–1508, 2012.
- ASSIS, J. M. O. et al. Mapeamento do uso e ocupação do solo no município de Belém de São Francisco – PE no anos de 1985 e 2010. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 5, p. 859–870, 2014.
- AWOTWI, A.; YEBOAH, F.; KUMI, M. Assessing the impact of land cover changes on water balance components of White Volta Basin in West Africa. **Water and Environment Journal**, v. 29, n. 2, p. 259–267, jun. 2015.
- BASTIAANSEN, W. **Remote sensing in water resources management: the state of the art**. IX ed. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute (IWMI), 1998.
- BEUCHLE, R. et al. Land cover changes in the Brazilian Cerrado and Caatinga biomes from 1990 to 2010 based on a systematic remote sensing sampling approach. **Applied Geography**, v. 58, p. 116–127, 2015.
- BEVEN, K.; BINLEY, A. The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction. **Hydrological Processes**, v. 6, n. 3, p. 279–298, jul. 1992.
- BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin

- versant. **Hydrological Sciences Bulletin**, v. 24, n. 1, p. 43–69, mar. 1979.
- BIEGER, K. et al. Development and Evaluation of Bankfull Hydraulic Geometry Relationships for the Physiographic Regions of the United States. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 51, n. 3, p. 842–858, jun. 2015.
- BOSSA, A. Y. et al. Analyzing the effects of different soil databases on modeling of hydrological processes and sediment yield in Benin (West Africa). **Geoderma**, v. 173–174, p. 61–74, mar. 2012.
- BRESSIANI, D. DE A. et al. Review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 8, n. 3, p. 1–27, 2015.
- BULLOCK, S. H.; MOONEY, B. H. A.; MEDINA, E. **Seasonally Dry Tropical Forests**. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
- CHANDER, G.; MARKHAM, B. L.; HELDER, D. L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 5, p. 893–903, 2009.
- CHIEN, H.; YEH, P. J.-F.; KNOUFT, J. H. Modeling the potential impacts of climate change on streamflow in agricultural watersheds of the Midwestern United States. **Journal of Hydrology**, v. 491, n. 1, p. 73–88, maio 2013.
- CLEUGH, H. A. et al. Regional evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data. **Remote Sensing of Environment**, v. 106, n. 3, p. 285–304, fev. 2007.
- COELHO, V. H. R. et al. Dinâmica do uso e ocupação do solo em uma bacia hidrográfica do semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 1, p. 64–72, 2014.
- COIMBRA-FILHO, A. F.; CÂMARA, I. G. **Os limites originais do bioma Mata Atlântica na região nordeste do Brasil**. Rio de Janeiro: Fundação Brasileira para a Conservação da Natureza, 1996.
- DANTAS, J. A. et al. Efeito da salinidade sobre o crescimento e composição mineral de seis clones de *Pennisetum*. **Revista Ciência Agronômica**, v. 37, n. 1, p. 97–101, 2006.
- EWEN, J.; PARKIN, G.; O'CONNELL, P. E. SHETRAN: Distributed River Basin Flow and Transport Modeling System. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 5, n. 3, p. 250–258, jul. 2000.
- FARAMARZI, M. et al. Modeling impacts of climate change on freshwater availability in Africa. **Journal of Hydrology**, v. 480, p. 85–101, fev. 2013.
- FLORENZANO, T. G. **Iniciação em Sensoriamento Remoto**. 3. ed. São Paulo, BRA:

Oficina de textos, 2011.

FRIEDL, M. . et al. Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results.

Remote Sensing of Environment, v. 83, n. 1–2, p. 287–302, nov. 2002.

GALVÍNCIO, J. D. et al. LAI Improved to Dry Forest in Semiarid of the Brazil.

International Journal of Remote Sensing Application, v. 3, n. 4, p. 193, 2013.

GILKS, W. R. Markov Chain Monte Carlo. In: **Encyclopedia of Biostatistics**. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2005.

GOVENDER, M.; CHETTY, K.; BULCOCK, H. A review of hyperspectral remote sensing and its application in vegetation and water resource studies. **Water SA**, v. 33, n. 2, p. 145–151, 14 dez. 2009.

KAIRU, E. N. An introduction to remote sensing. **GeoJournal**, v. 6, n. 3, p. 251–260, 1982.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. **Particle swarm optimization**. Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks. **Anais...IEEE**, 2002Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/488968/>>

KHAKBAZ, B. et al. From lumped to distributed via semi-distributed: Calibration strategies for semi-distributed hydrologic models. **Journal of Hydrology**, v. 418–419, p. 61–77, 2012.

KNYAZIKHIN, Y. et al. Estimation of vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from atmosphere-corrected MISR data. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 103, n. D24, p. 32239–32256, 27 dez. 1998.

KOCH, S.; BAUWE, A.; LENNARTZ, B. Application of the SWAT Model for a Tile-Drained Lowland Catchment in North-Eastern Germany on Subbasin Scale. **Water Resources Management**, v. 27, n. 3, p. 791–805, 28 fev. 2013.

KOTCHENOVA, S. Y.; VERMOTE, E. F. Validation of a vector version of the 6S radiative transfer code for atmospheric correction of satellite data. Part II. Homogeneous Lambertian and anisotropic surfaces. **Applied Optics**, v. 46, n. 20, p. 4455–4464, 20 jun. 2007.

LAUER, D. T.; MORAIN, S. A.; SALOMONSON, V. V. The landsat program: Its origins, evolution, and impacts. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 63, n. 7, p. 831–838, 1997.

LEAL, I. R.; TABARELLI, M.; SILVA, J. M. C. **Ecologia e conservação da Caatinga**. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2003.

LIMA, L. C. M.; BARBOSA, M. C. A.; BARBOSA, D. C. A. **Calendário didático de floração de espécies lenhosas da caatinga de Pernambuco, com base em coleções do Herbário UFP - Geraldo Mariz**. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2009.

LIU, W. T. H. **Aplicações de Sensoriamento Remoto**. 1. ed. Campo Grande, BRA:

UNIDERP, 2007.

MACHADO, C. C. C. **Alterações na superfície do Parque Nacional do Catimbau (PE-Brasil): consolidação dos aspectos biofísicos na definição dos indicadores ambientais do bioma Caatinga.** [s.l.] Universidade Federal de Pernambuco, 2014.

MALAGÒ, A. et al. Comparing calibrated parameter sets of the SWAT model for the Scandinavian and Iberian peninsulas. **Hydrological Sciences Journal**, v. 60, n. 5, p. 1–19, 20 abr. 2015.

MAREK, G. W. et al. Estimating Evapotranspiration for Dryland Cropping Systems in the Semiarid Texas High Plains Using SWAT. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 52, n. 2, p. 298–314, abr. 2016a.

MAREK, G. W. et al. Modeling long-term water use of irrigated cropping rotations in the Texas High Plains using SWAT. **Irrigation Science**, p. 1–13, 23 set. 2016b.

MAYAUX, P. et al. Tropical forest cover change in the 1990s and options for future monitoring. **Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences**, v. 360, n. 1454, p. 373–384, 2005.

MCKAY, M. D.; BECKMAN, R. J.; CONOVER, W. J. Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code. **Technometrics**, v. 21, n. 2, p. 239–245, 1979.

MENEZES, R. S. C. et al. Biogeochemical cycling in terrestrial ecosystems of the Caatinga Biome. **Brazilian Journal of Biology**, v. 72, n. 3 Suppl, p. 643–53, 2012.

MONTEITH, J. L. Evaporation and environment. In: **The state and movement of water in living organisms**. New York, USA: Academic Press, Inc., 1965. p. 205–234.

MU, Q. et al. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. **Remote Sensing of Environment**, v. 111, n. 4, p. 519–536, dez. 2007.

MU, Q.; ZHAO, M.; RUNNING, S. W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 8, p. 1781–1800, ago. 2011.

MYNENI, R. B. et al. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. **Nature**, v. 386, n. 6626, p. 698–702, 17 abr. 1997.

NASA. **MODIS Web**. Disponível em: <<http://modis.gsfc.nasa.gov/>>. Acesso em: 25 abr. 2014.

NKONGE, L. K. et al. Comparison of two Calibration-uncertainty Methods for Soil and Water Assessment Tool in Stream Flow Modeling. **Journal of Sustainable Research in**

Engineering, v. 1, n. 2, p. 40–44, 2014.

NOVO, E. M. L. DE M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 3. ed. São Paulo-SP: Edgard Blücher, 2008.

OEURNIG, C.; SAUVAGE, S.; SÁNCHEZ-PÉREZ, J.-M. Assessment of hydrology, sediment and particulate organic carbon yield in a large agricultural catchment using the SWAT model.

Journal of Hydrology, v. 401, n. 3–4, p. 145–153, maio 2011.

PORTILLO-QUINTERO, C. A.; SÁNCHEZ-AZOFEIFA, G. A. Extent and conservation of tropical dry forests in the Americas. **Biological Conservation**, v. 143, n. 1, p. 144–155, 2010.

POUYAN NEJADHASHEMI A, I. M. Evaluation of Swat Performance on a Mountainous Watershed in Tropical Africa. **Journal of Waste Water Treatment & Analysis**, v. s3, n. 1, p. 1–7, 2011.

PRESS, W. H. et al. **Numerical Recipes in C (2nd ed.): The Art of Scientific Computing**. 2. ed. New York, USA: Cambridge University Press, 1992.

RODRIGUEZ, R. et al. A process-based model to evaluate site quality for Eucalyptus nitens in the Bio-Bio Region of Chile. **Forestry**, v. 82, n. 2, p. 149–162, 1 abr. 2009.

ROE, D. et al. Which components or attributes of biodiversity influence which dimensions of poverty? **Environmental Evidence**, v. 3, n. 1, p. 1–15, 2014.

ROSA, R. **Introdução ao sensoriamento remoto**. 7. ed. Uberlândia, BRA: EDUFU, 2009.

ROUHOLAHNEJAD, E. et al. A parallelization framework for calibration of hydrological models. **Environmental Modelling & Software**, v. 31, p. 28–36, maio 2012.

RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBALLOS, J. C. **Sensor Modis e suas Aplicações Ambientais no Brasil**. 1. ed. São José dos Campos, BRA: Parêntese, 2007.

RUHOFF, A. L. et al. Assessment of the MODIS global evapotranspiration algorithm using eddy covariance measurements and hydrological modelling in the Rio Grande basin.

Hydrological Sciences Journal, v. 58, n. 8, p. 1658–1676, 17 nov. 2013.

SALOMON, J. G. et al. Validation of the MODIS bidirectional reflectance distribution function and albedo retrievals using combined observations from the aqua and terra platforms.

IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v. 44, n. 6, p. 1555–1565, jun. 2006.

SAMPAIO, E. V. S. B. Overview of the Brazilian Caatinga. In: BULLOCK, S. H.; MOONEY, H. A.; MEDINA, E. (Eds.). **Seasonally dry forests**. London: Cambridge University Press, 1995. p. 35–63.

SANTOS, J. C. et al. Caatinga: the scientific negligence experienced by a dry tropical forest. **Tropical Conservation Science**, v. 4, n. 3, p. 276–286, 2011.

- SCHREINEMACHERS, P.; BERGER, T. An agent-based simulation model of human-environment interactions in agricultural systems. **Environmental Modelling and Software**, v. 26, n. 7, p. 845–859, 2011.
- SELLAMI, H. et al. Uncertainty analysis in model parameters regionalization: a case study involving the SWAT model in Mediterranean catchments (Southern France). **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, v. 10, n. 4, p. 4951–5011, 18 abr. 2013.
- SOUZA, L. S. B. DE et al. Radiation balance in Caatinga ecosystem preserved for a year drought in semiarid Pernambucano. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n. 1, p. 41–55, 2015.
- STRAUCH, M.; VOLK, M. SWAT plant growth modification for improved modeling of perennial vegetation in the tropics. **Ecological Modelling**, v. 269, p. 98–112, nov. 2013.
- TAURA, T. A. et al. **Análise Temporal da Degradação Ambiental no Município de Santa Maria da Boa Vista – PE a partir de Imagens Orbitais**. 2nd International Conference: Climate, Sustainability and Development in Semi-arid Regions. **Anais...**Fortaleza, BRA: 2010
- TAYLOR, S. D.; HE, Y.; HISCOCK, K. M. Modelling the impacts of agricultural management practices on river water quality in Eastern England. **Journal of Environmental Management**, v. 180, p. 147–163, set. 2016.
- TEIXEIRA, A. H. DE C. Modelling evapotranspiration by remote sensing parameters and agro-meteorological stations. In: NEALE, C. M. U.; COSH, M. H. (Eds.). **Remote Sensing and Hydrology**. Jackson Hole, USA: International Association Of Hydrological Sciences (August 29, 2012), 2012. p. 154–157.
- TODINI, E. Hydrological catchment modelling: past, present and future. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, n. 1, p. 468–482, 17 jan. 2007.
- VAN GRIENSVEN, A.; MEIXNER, T. A global and efficient multi-objective auto-calibration and uncertainty estimation method for water quality catchment models. **Journal of Hydroinformatics**, v. 9, n. 4, p. 277, out. 2007.
- VERMOTE, E. F.; EL SALEOUS, N. Z.; JUSTICE, C. O. Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared: first results. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1–2, p. 97–111, nov. 2002.
- VIEIRA, R. M. D. S. P. et al. Land use and land cover map of a semiarid region of Brazil for meteorological and climatic models. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 2, p. 129–138, 2013.
- WELDERUFAEL, W. A.; WOYESSA, Y. E.; EDOSSA, D. C. Impact of rainwater harvesting on water resources of the modder river basin, central region of South Africa. **Agricultural**

Water Management, v. 116, p. 218–227, jan. 2013.

WENZE YANG et al. MODIS leaf area index products: from validation to algorithm improvement. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 44, n. 7, p. 1885–1898, jul. 2006.

WIGMOSTA, M. S.; VAIL, L. W.; LETTENMAIER, D. P. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. **Water Resources Research**, v. 30, n. 6, p. 1665–1679, jun. 1994.

WU, H.; CHEN, B.; LI, P. (PU). **Comparison of sequential uncertainty fitting algorithm (SUFI-2) and parameter solution (PARASOL) method for analyzing uncertainties in distributed hydrological modeling – a case study**. The Canadian Society for Civil Engineering (CSCE) 2013 Annual General Meeting and Conference. **Anais...**Montreal, CA: 2013

YANG, J. et al. Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China. **Journal of Hydrology**, v. 358, n. 1–2, p. 1–23, ago. 2008.

APÊNDICE A - Dinâmica do Desmatamento de Floresta Seca no Brasil

(Este manuscrito foi enviado para publicação na revista Caatinga em 29 de setembro de 2016)

1 **DRY FOREST DEFORESTATION DYNAMICS IN BRAZIL**

2

3 **ABSTRACT** - Reliable information on vegetation cover and its dynamics over time is
 4 essential for managing life, resources, and supporting policies. Although many related
 5 initiatives have been undertaken in Brazil since the 1980s, knowledge about its dry forests is
 6 still limited. In this study, we seek to answer: How aggressive and what are the drivers of
 7 deforestation in the Brazilian dry forest Caatinga? For that, we aimed to evaluate its the land
 8 cover dynamics and landscape metrics in the watershed of the Pontal River, as it has become
 9 one of the most socially and environmentally important areas in Brazil. The overall process
 10 consists of a systematic sampling grid with hydrological samples, where Landsat images
 11 (1975 to 2013) combined with the FRAGSTATS package were used to evaluate landscape
 12 metrics indexes for the Caatinga. Data showed that relative area (RA) decreased from 90.25%
 13 to 60.98% over the 38-year period, while fragmentation (PD) presented an increasing bias.
 14 Also, the spatial distribution of both indexes became more heterogeneous and it clustered at
 15 the north. We suggest that the knowledge about land fitness for farming were the leading
 16 causes of deforestation, as rainfall is 112% more intense in the north of the watershed than in
 17 the south, therefore the northern fauna and flora are being significantly altered and reduced.
 18 The relation between deforestation and time shows an increasing threat. Further studies
 19 evaluating those causes are needed for a better understanding of vegetation dynamics of this
 20 region.

21

22 **Keywords.** Caatinga. Ecology. Fragmentation. Landscape. Semiarid.

23

24

25 **DINÂMICA DO DESMATAMENTO DE FLORESTA SECA NO BRASIL**

26

27 **RESUMO** - Informações confiáveis sobre a cobertura vegetal e sua dinâmica ao longo do
 28 tempo são essenciais para a gestão de vidas, recursos, e o apoio a políticas. Embora muitas
 29 iniciativas tenham sido realizadas no Brasil desde a década de 1980, o conhecimento sobre
 30 suas florestas secas ainda é limitado. Neste estudo, procuramos responder as questões: O
 31 quão agressivo é o desmatamento da floresta seca Caatinga do Brasil? E quais são os fatores
 32 que influenciam nesses números? Para isso, tivemos como objetivo avaliar a dinâmica de
 33 ocupação do solo e métricas de paisagem na bacia do rio Pontal, a qual se tornou uma das
 34 áreas mais socialmente e ambientalmente importantes do Brasil. O processo em geral consiste

35 em uma grade de amostragem sistemática baseada em características hidrológicas, onde
36 imagens Landsat (1975 a 2013) combinadas com o software FRAGSTATS foram utilizadas
37 para avaliar índices de métricas de paisagem para a Caatinga. Os dados mostraram que a área
38 relativa (RA) diminuiu de 90,25% para 60,98% ao longo do período de 38 anos, enquanto
39 que a fragmentação (PD) apresentou uma tendência crescente. Além disso, a distribuição
40 espacial de ambos os índices se tornou mais heterogênea e agrupada ao norte, sugerindo que
41 o conhecimento sobre a aptidão da terra para a agricultura foram as causas principais do
42 desmatamento. A chuva é 112% mais intensa no norte da bacia do que no sul. Tal aptidão,
43 podem levar a fauna e flora ao norte a serem significativamente alteradas e reduzidas. A
44 relação entre desmatamento e tempo mostrou uma ameaça crescente, e dessa forma, são
45 necessários mais estudos que avaliem suas causas, trazendo uma melhor compreensão da
46 dinâmica da vegetação desta região.

47

48 **Palavras-chave.** Caatinga. Ecologia. Fragmentação. Paisagem. Semi-árido.

49

50 INTRODUCTION

51 Reliable information on vegetation cover and its dynamics over time is essential for
 52 managing life and resources and supporting policies at various levels. However, knowledge
 53 of this kind of information is not homogeneously distributed across the biomes of the planet.
 54 Rainforests have been widely studied while DTFs (dry tropical forests) receive less attention
 55 and effort (PORTILLO-QUINTERO; SÁNCHEZ-AZOFEIFA, 2010); therefore, data about
 56 these ecosystems is often scarce, inconsistent and limited, even though 42% of all forests in
 57 tropical regions are classified as seasonally dry (BULLOCK; MOONEY; MEDINA, 1995).

58 The northeast region of Brazil makes up 18% of the country, and 75% of its land
 59 surface is covered by semiarid regions (LIMA; BARBOSA; BARBOSA, 2009). In these
 60 regions, the predominant ecosystem a dry forest called Caatinga, which has an area of
 61 735,000 km² and is not only recognized as an ‘Earth's last wild place’ but is also included as
 62 one of the 37 ‘Wilderness Areas of the World’ (ALBUQUERQUE et al., 2012). It contains
 63 around 187 species of bees, 240 species of fish, 167 species of reptiles and amphibians, 516
 64 species of birds, and 148 mammal species, with endemism levels varying from 9% in birds to
 65 57% in fishes (LEAL; TABARELLI; SILVA, 2003). Moreover, it has over 1,000 vascular
 66 plant species distributed as a mosaic of seasonally dry tropical forests (SDTF) and shrub
 67 vegetation. However, such biodiversity is contrasted with high levels of degradation, also
 68 placing the Caatinga among the most endangered ecosystems on Earth with high rates of land
 69 conversion. Nowadays, the areas converted in the region exceed 60% of its original area
 70 (MENEZES et al., 2012).

71 Although since the 1980s monitoring these changes has been imperative, with many
 72 initiatives such as the programs PRODES (Monitoring Brazilian Amazon Forest by Satellite),
 73 DETER (Detecting Deforestation in Real Time), PROBIO (Projeto de Conservação e
 74 Utilização Sustentável da Diversidade Biológica), and more recently PMDBBS (Projeto
 75 Monitoramento do Desmatamento dos Biomas Brasileiros por Satélite), the present
 76 perception of land cover changes in the Caatinga is still limited because most of these studies
 77 have assessed land cover changes using strictly medium-resolution satellite imagery ($\approx$ 1
 78 km). Only a few of them used Landsat imagery ($\approx$ 30 m), but even that lacks precise
 79 vegetation information data prior to 2002. Moreover, studies have analyzed the Caatinga as a
 80 whole, losing geographic details about changes induced by projects that seek to enhance local
 81 economic by promoting agricultural and livestock practices, which often end up increasing
 82 natural forest fragmentation over time. Therefore, in this study we evaluated the land cover
 83 dynamics and landscape metrics in the watershed of the Pontal River. This area has become

84 in recent years one of the most important subbasins in northeast of Brazil, playing a
 85 significant social, environmental, and commercial role in the state of Pernambuco, especially
 86 in terms of agricultural production. We believe that the changes are happening under a fast
 87 and aggressive land cover conversion that is creating hotspots of degradation and will
 88 negatively affect local ecology and geography.

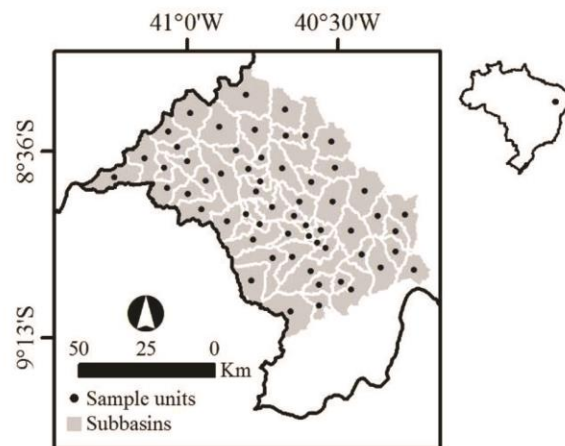
89

90 **METHODOLOGY**

91 *Study area*

92 The watershed of the Pontal River is located in a western region of the state of
 93 Pernambuco, Brazil, between the coordinates 08° 19' 00' S, 40° 11' 42' W and 09° 13' 24' S,
 94 41° 20' 39" W. It occupies an area of 6,057 km², 6.12% of the state (Figure 1). The drainage
 95 area involves four municipalities, of which only the municipality of Afrânio is fully inserted
 96 in the watershed. Its water spring is also located in Pernambuco, between the borders of the
 97 states of Piauí and Bahia. The climate in the area is semiarid, with an average annual
 98 temperature of 27°C, and rainfall is irregular and concentrated in 2-3 months of the year, with
 99 the possibility of heavy rainfall (120-130 mm) over a period of just 24 hours. The
 100 predominant vegetation is the Caatinga, but we have observed a fast expansion of irrigated
 101 agriculture of grape, mango and guava, which is seriously threatening many native forest
 102 areas.

103



104

105 **Figure 1.** Study area: Pontal watershed in Brazil, with the distribution of the sample units.

106

107 *Surface properties and sampling design*

108 In order to spatially characterize the Pontal watershed, elevation data from Aster

109 GDEM raster (30 x 30 m) was downloaded at <http://earthexplorer.usgs.gov/>; soil type data
 110 was acquired from a public database called Zoneamento Agroecológico do Estado de
 111 Pernambuco (ZAPE; www.uep.cnps.embrapa.br/zape); and historic annual rainfall data of the
 112 gauges was downloaded at <http://hidroweb.ana.gov.br/> and interpolated using a spline
 113 technique. All data is presented as maps.

114 The overall process was developed as part of the System of Hydrologic Response Units
 115 for Pernambuco (SUPER) project carried out by UFPE (University Federal of Pernambuco) in
 116 association with TAMU (Texas A&M University) and consists of a systematic sampling grid
 117 with samples at every watershed in the state of Pernambuco, covering the entire state. Each
 118 sample unit has an area of approximately 10^8 m^2 (Figure 1). This value was defined through
 119 the regionalization of soil types; the delineation of each sample unit reflects well the spatial
 120 distribution of soil in the watershed. The sample units were made using the ArcSWAT
 121 extension for the ArcGIS package (v10; ESRI 2011). For each sample unit, we produced
 122 eight land cover maps out of 42 cloud-free images from all sensors of the Landsat series.
 123 Each map is from a different period (Table 1) and is composed by a set of scenes with a
 124 maximum average distance to each target period of 12 months. All these images were
 125 selected on the Landsat archives of USGS (United States Geological Survey) and INPE
 126 (Brazilian National Space Research Institute) based on radiometric quality and absence of
 127 cloud cover ($< 10\%$), and underwent an extensive pre-processing, including image
 128 geolocation check, conversion to at-surface reflectance, and finally merging.

129
 130 **Table 1.** Selected images from all sensors of the Landsat series to be used in the analysis. The
 131 left side is the images from path/row 217/66, and right side is from 218/66.

Sensor/Satellite	Date of image	Sensor/ Satellite	Date of image
MSS/Landsat 1	07/28/1975	MSS/Landsat 1	08/16/1975
MSS/Landsat 1	11/13/1975	TM/Landsat 5	10/18/1992
TM/Landsat 5	08/24/1992	TM/Landsat 5	05/14/1993
TM/Landsat 5	08/11/1993	TM/Landsat 5	09/09/1993
TM/Landsat 5	12/17/1993	ETM/Landsat 7	08/27/1999
TM/Landsat 5	06/25/1999	TM/Landsat 5	09/04/1999
TM/Landsat 5	12/04/2000	TM/Landsat 5	09/22/2000
TM/Landsat 5	10/04/2001	TM/Landsat 5	09/25/2001
ETM/Landsat 7	01/03/2003	ETM/Landsat 7	10/03/2001

TM/Landsat 5	07/06/2003	ETM/Landsat 7	07/18/2002
TM/Landsat 5	11/13/2004	ETM/Landsat 7	10/22/2002
TM/Landsat 5	10/12/2004	TM/Landsat 5	06/27/2003
TM/Landsat 5	10/15/2005	TM/Landsat 5	06/13/2004
TM/Landsat 5	07/30/2006	TM/Landsat 5	08/16/2004
TM/Landsat 5	01/22/2007	TM/Landsat 5	12/06/2004
TM/Landsat 5	09/24/2009	TM/Landsat 5	01/07/2005
OLI/Landsat 8	09/03/2013	TM/Landsat 5	07/18/2005
OLI/Landsat 8	05/10/2013	TM/Landsat 5	09/04/2005
		TM/Landsat 5	11/07/2005
		TM/Landsat 5	01/26/2006
		TM/Landsat 5	07/24/2007
		TM/Landsat 5	09/26/2007
		TM/Landsat 5	08/27/2008
		OLI/Landsat 8	09/26/2013

132

133 *Image preprocessing and classification*

134 For multi-temporal analysis, especially when comparing images from different sensors
135 (like in the present study; Table 1), not only a good geometric match between images is
136 essential, but also the use of high-quality at-surface reflectance products instead of at-sensor
137 spectral radiances is necessary. This is because at-surface reflectance products have no
138 negative effects from different solar zenith angles or variation in the Earth–Sun distance due
139 to the time difference between date acquisitions. In addition, they are normalized for the
140 exoatmospheric solar irradiance arising from each spectral band, as well as for all
141 atmospheric effects (CHANDER; MARKHAM; HELDER, 2009). This is important because
142 these variations may spatially and temporally degrade the data quality.

143 In this context, the registration and orthorectification of all the images had to be
144 enhanced. To do so, we used the well-acknowledged AROP (Automated Registration and
145 Orthorectification Package; MASEK, 2009) to orthorectify TM Landsat images from the
146 GLS archives (Global Land Survey), which are distributed by USGS and provide the best in
147 radiometric and geometric quality, and cloud cover (GUTMAN et al., 2013). The images
148 were georeferenced to the Universal Transverse Mercator projection system and World
149 Geodetic System (WGS84; RMSE < 0.25 pixels). Moreover, the variability in scene-to-scene

was drastically reduced by converting the calibrated digital numbers (Q_{cal}) from the level 1 images to at-surface reflectance (ρ_p), following the instructions of Chander et al. (2009), and using the GDAL library (Geospatial Data Abstraction Library). All required rescaling factors were found in the metadata of each image. To correct for all atmospheric effects, we used the module i.atcorr in the GRASS software to perform the 6S algorithm (Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum; NETELER et al., 2012), which is a radiative transfer model that works in a similar manner as used to correct MODIS imagery (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), on all images. Finally, to create high-quality mosaic data, pixel-by-pixel composition was accomplished by a weighted average of each pixel, in which the weights were based on the distances from the center of each image.

Reference data for classifier training and accuracy assessment were collected through human interpretation of high-resolution imagery in Google Earth (<http://earth.google.com>) using interpretation criteria. Three thousand sample points were created using the function `arcpy.CreateRandomPoints_management()` available in the suite ArcGIS, and all samples without QuickBird imagery (resolution = 2.4 to 2.8 m²) were removed (Table 2). Next, with these points, we created spectral signatures for each image and classified all images, which resulted in three classes: irrigated areas, Caatinga and rainfed pastures or agriculture (Table 3). For 1975, since we could not acquire any valid sample points, an average spectral signature was created using all applicable bands from the other years. All the maps were converted to shapefile format and completely topo-error corrected using the v.clean tool installed in the software GRASS GIS (NETELER et al., 2012). To avoid “pepper and salt” polygons, all areas with less than 100,000 m² were merged with the nearest polygon of equal class.

Due to the lack of field data for our study, we opted for a consistency assessment based on the assumption that using over 15,000 assessments covering the 9 periods would be enough to guarantee the consistency of all maps. The advantages of this methodology has been fully explained by Redo et al. (2013).

Table 2. Number of valid samples used for classifier training and accuracy assessment in the Pontal watershed, Pernambuco State, Brazil. IRA = Irrigated agriculture, RFP = Rainfed pastures or agriculture, CAT = Caatinga.

Year	IRA	CAT	RFP	Total
1975	0	0	0	0

1993	0	33	4	37
2001	8	2015	654	2677
2003	14	1970	697	2682
2005	14	1924	754	2692
2007	11	1864	816	2690
2009	14	1935	754	2703
2013	15	1726	965	2706

181

182 **Table 3.** Description of each landuse class evaluated in the Pontal watershed, Pernambuco
 183 State, Brazil.

Class name	Description
Irrigated agriculture (IRA)	Includes areas with forest and herbaceous vegetation that have been cleared for irrigated crops, like grapes, mango and some tropical fruits.
Rainfed pastures or agriculture (RFP)	Includes areas with forest and herbaceous vegetation that have been cleared for extensive grazing beef cattle, goats, sheep and horses; and for rainfed production of corn, pineapple, lemon and beans.
Caatinga (CAT)	Corresponds to areas with dry forest and shrubland. Areas with forest are presented as densely populated by trees, with average height of 5 m, that have irregular trunks and lose most of their leaves during the dry season. Areas with shrubs are sparse with presence of herbaceous vegetation and bare soil too, and often associated with shallow and rocky soils.

184

185 *Landscape and statistical analysis*

186 Since we were studying Caatinga, calculations of the following landscape metrics
 187 indexes were performed only to that class using the FRAGSTATS package (v3.3;
 188 MCGARIGAL; MARKS, 1995):

189

$$RA = \frac{A_c}{A_t} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$PD = \left(\frac{N_c}{A_c} \right) \times 10^6 \quad (\text{Eq. 2})$$

190

191 where RA, PD and A_c are the relative area, patch density or fragmentation, and area of
 192 each class, respectively, A_t is the total area of all classes and N_c is the number of fragments
 193 per class. More information about all statistical functions of FRAGSTATS can be found in
 194 Zaragozí et al. (2012).

195 To identify any patterns regarding relative area (RA) and time, we used the non-linear
 196 regression model tool in the package R (v3.2.3; FOX, 2005). To evaluate the intensity at
 197 which RA and PD changes over a period interval of 2 years, we used Eq. 3 (see below).
 198 However some period intervals were greater than 2 years; for this, we used Eq. 4 to estimate
 199 the changes per year.

200

$$C_P = V_p - V_{p-1} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$C_P = \left[\left(\left(\frac{V_p}{V_{p-1}} \right)^{\frac{1}{N_y}} \right) - 1 \right] \times 100 \quad (\text{Eq. 4})$$

201

202 where C_P , V_p and V_{p-1} are the absolute change of a given parameter P, the value of P
 203 from a given period p, and the value of P from the previous period of p, respectively, and N_y
 204 is number of years in the period interval. To statistically test spatial distribution of RA and PD
 205 over the area, we used the `arcpy.SpatialAutocorrelation_stats()` tool available in the ArcGIS
 206 suite, which basically evaluates whether the spatial pattern expressed from a given parameter
 207 is clustered, dispersed, or random. All results from all analyses were considered to be
 208 significant when $p \leq 0.05$.

209

210 RESULTS AND DISCUSSION

211 We established 59 sample units covering all of Pontal watershed. These sampling units
 212 extracted by ArcSWAT allow us to recognize spatial arrangements of soils, which may favor

the identification of homogeneous areas, and offer support to make inferences about the size of sample units. Tropical dry forests are among the most threatened ecosystems in the world as a consequence of intensive anthropogenic disturbance (FOLEY et al., 2005; SANTOS et al., 2011). Through the 1975-2013 period, the Caatinga's relative area (RA) in the Pontal watershed has been depleted substantially (from 90.25% to 60.98% in a polynomial pattern; Figure 2). The process of occupation in the area happened by converting natural forests first into rainfed pastures or agriculture and secondly into irrigated agriculture. The same process occurred in many other areas in the state of Pernambuco. In the municipality of Belém de São Francisco, rainfed areas got strength through government rural development programs; this was the main reason for Caatinga's deforestation in the area (ASSIS et al., 2014). In the municipality of Santa Maria da Boa Vista, the main drive for land transformation was the aggressive expansion of urban areas (TAURA et al., 2010). As a whole, the Caatinga gross loss between 1990 and 2010 was 25,335 km² with an annual change rate of -0.44% yr⁻¹ (BEUCHLE et al., 2015). Most of these lost areas were converted into agriculture and livestock areas (COELHO et al., 2014). Vieira et al. (2013), using Landsat Thematic Mapper TM data from the years of 1999, 2000 and 2001 (162 satellite images), showed that farming areas occupied 55% of the state of Pernambuco.

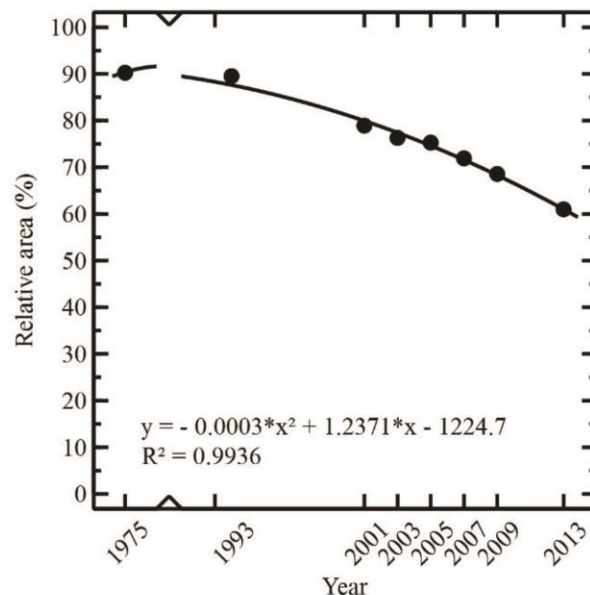


Figure 2. Relationship between time and relative area of Caatinga over 48 years in the Pontal watershed in west Pernambuco State in Brazil.

The pressure for converting natural areas is strong but varies according to a range of

environmental conditions (MAYAUX et al., 2005). Land use conversion is not always pressured to increase. Sometimes it can slow down, stop or even decrease. For certain periods, weather or economic characteristics might not be favorable for rural practices, which may alter all land use dynamics in a given area. These mechanisms are not new; Beuchle et al. (2015) pointed out the importance of estimating and discussing these mechanisms, which are significant in most regions, yet hard to evaluate. In addition, Mayaux et al. (2005) showed that during these periods, secondary forests can be established through re-growth on abandoned land and forest plantations, with different ecological, biophysical and economic characteristics compared with primary forests. In the Pontal watershed, only in recent years (2009-2013) have deforestation rates of Caatinga slowed down. We believe that this could be related to weather variation, since 2012 and 2013 were atypically dry years and dominant rainfed agriculture or pastures are very precipitation dependent.

One of the principal consequences of deforestation is the creation of landscapes occupied by forest fragments that are remnants of original continuous forest cover (PORTILLO-QUINTERO; SÁNCHEZ-AZOFEIFA, 2010). These fragments are usually embedded in matrices of transformed habitats. Currently in the Pontal, what remains of the natural ecosystem is highly fragmented. Patch density or fragmentation (PD) presented an increasing bias, with a peak in PD during the 2007-2009 period, which is also the beginning of a declining period for that variable (Table 4). Therefore, the fauna and the flora are being significantly altered and reduced. From the point of view of ecology, the way these fragments are distributed in space and time may affect their microclimates, spatial distribution and composition of species, species interactions, trophic structure of communities, and movement of individuals between the fragments. Thus large fragments capture the majority of species and processes vital for maintaining ecosystem functions, while smaller fragments usually have less variety of species, especially when the fragments are old, because resources might become scarce and hard to find over time. In fact, these fragments have a high probability of being converted to other land covers (PORTILLO-QUINTERO; SÁNCHEZ-AZOFEIFA, 2010). In the Pontal watershed, The mean area of the fragments varied over time, from $21.13 \cdot 10^6 \text{ m}^2$ in 1975 to $0.98 \cdot 10^6 \text{ m}^2$ in 2013, in a general negative bias with an exception for the 2007-2009 period, where values increased around 50% from 2005 (Figure 3). That suggests that some very small patches were converted, increasing the mean area of fragments. From the social point of view, the Caatinga has constantly received the lowest investment. Political leaders and governments have not yet paid attention to the potential relation between biodiversity and poverty. As Caatinga gets degraded, air and surface temperature,

270 evapotranspiration and geochemical cycle change, i.e., stored water and nutrients in the soil
 271 deplete, making it harder to plant anything near the Caatinga. These contributions from
 272 biodiversity to livelihoods through maintenance of productive land and ecosystems were also
 273 described by Roe et al. (2014).

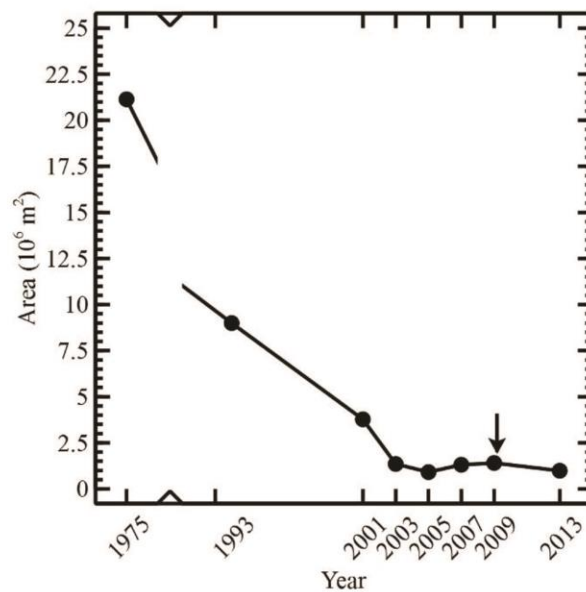
274

275 **Table 4.** Periodic mean variation and ratio, in percentage, of relative area and patch density
 276 of Caatinga in all samples from the Pontal watershed, Pernambuco State, Brazil.

Period	N_Y^*	N_I^*	Relative area (RA)	Patch density (PD)	Ratio RA:PD
1975-1993	18	9	-0.54 (-0.03 per yr)	16.83 (0.87 per yr)	0.03
1993-2001	8	11	-11.64 (-1.53 per yr)	106.24 (9.47 per yr)	0.16
2001-2003	2	10	-1.06	5.42	0.20
2003-2005	2	16	-0.79	6.39	0.12
2005-2007	2	16	-2.36	6.32	0.37
2007-2009	2	7	-2.43	10.46	0.23
2009-2013	4	5	-10.68 (-2.79 per yr)	22.29 (5.16 per yr)	0.54

277 * N_Y = number of years, N_I = number of images used in computation.

278



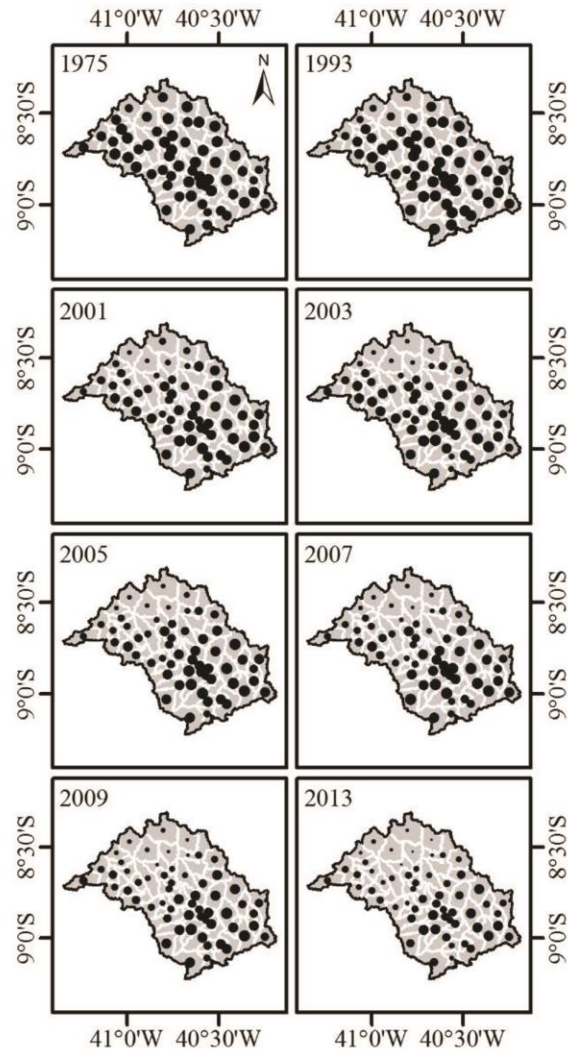
279

280 **Figure 3.** Mean area of fragments of Caatinga over 48 years in the Pontal watershed in west
 281 Pernambuco State in Brazil; the arrow marks the beginning of an increasing values period.

282

283 Historically, it is difficult to evaluate the distribution of loss of natural ecosystems and

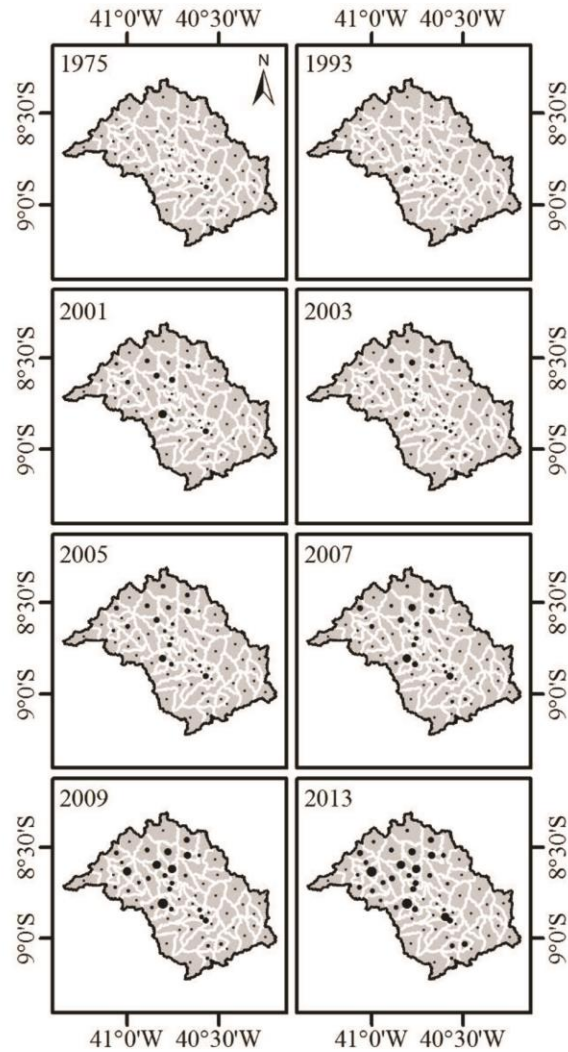
284 fauna of Brazil over the last 500 years. The deforestation process has been active in the
 285 region since the 1500's, and historical records are few and far between (COIMBRA-FILHO;
 286 CÂMARA, 1996). In our study, the spatial distribution of both RA and PD became more
 287 heterogeneous and they clustered at the north of the watershed (Figure 4 and 5), although in
 288 1975, both variables presented a random distribution (Table 5). We could only observe
 289 clustered distributions after 1993 and 2001 for small relative areas and high fragmentation
 290 spots, respectively, and only in 2007 did the south start to be more degraded. We suggest that
 291 a possible leading cause is likely simple fitness of land for agriculture, which can be an
 292 isolated distribution or a combination of optimal soil, terrain slope and water availability in
 293 the north. The maps showed us that elevation (z) is higher in the north of the watershed than
 294 in the south (414 m of difference; Figure 6), but only a single slope class is dominant and
 295 well distributed in the watershed, showing no specific spatial pattern. Terrain is
 296 predominately undulated (82.37% of the watershed), but we also could identify flat (7.58%),
 297 very undulated (9.85%) and steep areas (0.2%). Regarding soils distribution, Acrisols is the
 298 dominant soil type, covering 82.42% of the watershed, and as expected, it shares the same
 299 spatial characteristics of undulated slope class, since this type of soil commonly form
 300 undulated areas. Acrisols is characterized by high levels of clay, is the second most abundant
 301 soil type in Brazil after Ferralsols. In the Pontal watershed only the precipitation pattern
 302 correlated with Caatinga dynamics. The difference can reach and 298 mm of rainfall, that is
 303 112% more intense in the north of the watershed than in the south, and that may be enhancing
 304 land quality for farming, making the Caatinga in that area more susceptible to agriculture
 305 conversion. This low rainfall in southwest of the watershed is probably associated to
 306 instabilities caused by cold fronts moving from south pole to the northeast region of Brazil,
 307 more precisely to the south of the state of Bahia (ASSIS; SOUZA; SOBRAL, 2015). These
 308 fronts often generate instabilities in in December to February. In the north, we have many
 309 systems acting, but the intertropical convergence zone must be emphasized. It often acts
 310 between the months of March and April.
 311



312

313 **Figure 4.** Spatial changes of relative areas of Caatinga over 48 years in the Pontal watershed
 314 in west Pernambuco State in Brazil. 98% (●), 50% (•) and 17% (.) of caatinga at the scale of
 315 1:4,250 (or 1 cm = 42.5 km).

316



317

318 **Figure 5.** Spatial changes of patch density or fragmentation of Caatinga over 48 years in the
 319 Pontal watershed in west Pernambuco State in Brazil. 85% (●), 50% (◐) and 0.5% (◑) of
 320 fragmentation at the scale of 1:4,250 (or 1 cm = 42.5 km).

321

322 **Table 5.** Spatial autocorrelation (Moran's I) of relative area and patch density of Caatinga of
 323 the Pontal watershed, Pernambuco State, Brazil.

	Year	Moran's Index	z-score	p-value
Relative area	1975	0.061052	0.961642	0.336229
	1993	0.238799	3.336578	0.000848**
	2001	0.424582	5.424173	0.000001**
	2003	0.412357	5.253958	0.000001**
	2005	0.444226	5.624971	0.000001**

Fragmentation	2007	0.520138	6.535147	0.000001**
	2009	0.583219	7.311988	0.000001**
	2013	0.590187	7.395845	0.000001**
	1975	0.036148	0.767403	0.442842
	1993	0.012842	0.445187	0.656185
	2001	0.139494	1.971831	0.048629*
	2003	0.362335	4.611361	0.000004**
	2005	0.267797	3.474459	0.000512**
	2007	0.278079	3.601036	0.000317**
	2009	0.381022	4.857508	0.000001**
	2013	0.392939	4.980496	0.000001**

p-value statistically significant at 0.05 (*) and 0.01 (**)

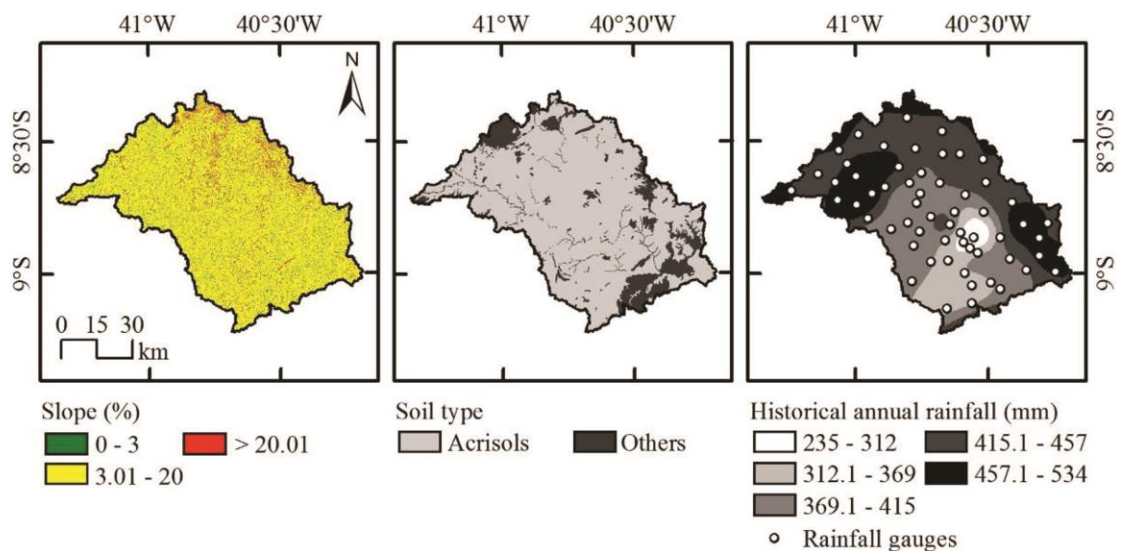


Figure 6. Spatial characterization of the Pontal watershed in west Pernambuco State in Brazil.

CONCLUSION

In summary, the relation between deforestation and time shows an increasing threat against Caatinga. The leading causes of the spatial pattern of this process are still not totally clear, but we hypothesize that rainfall pattern could be influencing in land fitness, enhancing land quality for farming in the north, and also making the Caatinga more susceptible to land cover conversion. Perhaps those who tried and did not succeed passed down through

generations the knowledge that the northern areas were more suitable for farming. Further studies evaluating the causes are needed for a better understanding of the vegetation dynamics at Caatinga.

ACKNOWLEDGEMENTS

We thank CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brazilian Coordination for the Improvement of Higher Level Personnel) for funding this study through the international project PVE A103/2013. The text benefited from comments by Sarah and Dan, and anonymous reviewers.

REFERENCES

- ALBUQUERQUE, U. P. et al. Caatinga Revisited: Ecology and Conservation of an Important Seasonal Dry Forest. **The Scientific World Journal**, v. 2012, p. 1–18, 2012.
- ASSIS, J. M. O. et al. Mapeamento do uso e ocupação do solo no município de Belém de São Francisco – PE no anos de 1985 e 2010. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 5, p. 859–870, 2014.
- ASSIS, J. M. O. DE; SOUZA, W. M. DE; SOBRAL, M. DO C. Análise climática da precipitação no submédio da bacia do rio São Francisco a partir do índice de anomalia de chuva. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v. 36, p. 188–202, 2015.
- BEUCHLE, R. et al. Land cover changes in the Brazilian Cerrado and Caatinga biomes from 1990 to 2010 based on a systematic remote sensing sampling approach. **Applied Geography**, v. 58, p. 116–127, 2015.
- BULLOCK, S. H.; MOONEY, B. H. A.; MEDINA, E. **Seasonally Dry Tropical Forests**. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
- CHANDER, G.; MARKHAM, B. L.; HELDER, D. L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 5, p. 893–903, 2009.
- COELHO, V. H. R. et al. Dinâmica do uso e ocupação do solo em uma bacia hidrográfica do semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 1, p. 64–72, 2014.
- COIMBRA-FILHO, A. F.; CÂMARA, I. G. **Os limites originais do bioma Mata Atlântica na região nordeste do Brasil**. Rio de Janeiro: Fundação Brasileira para a Conservação da Natureza, 1996.
- ESRI. **ArcGIS Desktop: Release 10**. Redlands, USA: Environmental Systems Research

- Institute, 2011.
- FOLEY, J. A. et al. Global consequences of land use. **Science (New York, N.Y.)**, v. 309, n. 5734, p. 570–574, 2005.
- FOX, J. The {R} {C}ommander: A Basic Statistics Graphical User Interface to {R}. **Journal of Statistical Software**, v. 14, n. 9, p. 1–42, 2005.
- GUTMAN, G. et al. Assessment of the NASA-USGS Global Land Survey (GLS) datasets. **Remote Sensing of Environment**, v. 134, p. 249–265, 2013.
- LEAL, I. R.; TABARELLI, M.; SILVA, J. M. C. **Ecologia e conservação da Caatinga**. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2003.
- LIMA, L. C. M.; BARBOSA, M. C. A.; BARBOSA, D. C. A. **Calendário didático de floração de espécies lenhosas da caatinga de Pernambuco, com base em coleções do Herbário UFP - Geraldo Mariz**. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2009.
- MASEK, J. Automated registration and orthorectification package for Landsat and Landsat-like data processing. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 3, n. 1, p. 33515, 2009.
- MAYAUX, P. et al. Tropical forest cover change in the 1990s and options for future monitoring. **Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences**, v. 360, n. 1454, p. 373–384, 2005.
- MCGARIGAL, K.; MARKS, B. J. **FRAGSTATS: Spatial pattern analysis program for quantifying categorical maps**. Corvallis, USA: Forest Science Department, Oregon State University, 1995.
- MENEZES, R. S. C. et al. Biogeochemical cycling in terrestrial ecosystems of the Caatinga Biome. **Brazilian Journal of Biology**, v. 72, n. 3 Suppl, p. 643–53, 2012.
- NETELER, M. et al. GRASS GIS: A multi-purpose open source GIS. **Environmental Modelling & Software**, v. 31, p. 124–130, 2012.
- PORTILLO-QUINTERO, C. A.; SÁNCHEZ-AZOFEIFA, G. A. Extent and conservation of tropical dry forests in the Americas. **Biological Conservation**, v. 143, n. 1, p. 144–155, 2010.
- REDO, D.; AIDE, T. M.; CLARK, M. L. Vegetation change in Brazil's dryland ecoregions and the relationship to crop production and environmental factors: Cerrado, Caatinga, and Mato Grosso, 2001–2009. **Journal of Land Use Science**, v. 8, n. 2, p. 123–153, 2013.
- ROE, D. et al. Which components or attributes of biodiversity influence which dimensions of poverty? **Environmental Evidence**, v. 3, n. 1, p. 1–15, 2014.
- SANTOS, J. C. et al. Caatinga: the scientific negligence experienced by a dry tropical forest. **Tropical Conservation Science**, v. 4, n. 3, p. 276–286, 2011.
- TAURA, T. A. et al. **Análise Temporal da Degradação Ambiental no Município de Santa**

- 404 **Maria da Boa Vista – PE a partir de Imagens Orbitais.** 2nd International Conference:
405 Climate, Sustainability and Development in Semi-arid Regions. **Anais...**Fortaleza, BRA:
406 2010
- 407 VIEIRA, R. M. D. S. P. et al. Land use and land cover map of a semiarid region of Brazil for
408 meteorological and climatic models. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 2, p. 129–
409 138, 2013.
- 410 ZARAGOZÍ, B. et al. A free and open source programming library for landscape metrics
411 calculations. **Environmental Modelling & Software**, v. 31, n. May 2012, p. 131–140, 2012.
412

**APÊNDICE B - Confiabilidade dos Produtos de Evapotranspiração MODIS para
Floresta Seca Heterogênea: Um Estudo de Caso da Caatinga**

(Este artigo foi aceito para publicação na revista *Advances in Meteorology* em 29 de novembro de 2016, e publicado em 25 de janeiro de 2017)

Research Article

Reliability of MODIS Evapotranspiration Products for Heterogeneous Dry Forest: A Study Case of Caatinga

Rodrigo de Queiroga Miranda,¹ Josiclêda Domiciano Galvêncio,¹
Magna Soelma Beserra de Moura,² Charles Allan Jones,³ and Raghavan Srinivasan³

¹Laboratório de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento, Universidade Federal de Pernambuco,
50670901 Recife, PE, Brazil

²Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semi-Árido,
56302970 Petrolina, PE, Brazil

³Spatial Sciences Laboratory, Texas A&M University, College Station, TX 77845, USA

Correspondence should be addressed to Rodrigo de Queiroga Miranda; rodrigo.qmiranda@gmail.com

Received 23 September 2016; Accepted 29 November 2016; Published 23 January 2017

Academic Editor: Minha Choi

Copyright © 2017 Rodrigo de Queiroga Miranda et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Evapotranspiration (ET) is normally considered as the sum of all water that evaporates from the soil and transpires from plants. However, accurately estimating ET from complex landscapes can be difficult because of its high spatial heterogeneity and diversity of driver factors, which make extrapolation of data from a point to a larger area quite inaccurate. In this paper, we hypothesize that MODIS products can be of use to estimate ET in areas of Caatinga vegetation, the hydrology of which has not been adequately studied. The experiment was conducted in a preserved level area of Caatinga in which meteorological and water flux measures were taken throughout 2012 by eddy covariance. Evapotranspiration estimates from eddy covariance were compared with remotely sensed evapotranspiration estimates from MOD16A2 and SAFER products. Correlations were performed at monthly, 8-day, and daily scales; and produced r^2 values of monthly scale = 0.92, 8-day scale = 0.88, and daily scale = 0.85 for the SAFER algorithm. Monthly MOD16A2 data produced a value of $r^2 = 0.82$, and they may be useful because they are free, downloadable, and easy to use by researchers and governments.

1. Introduction

The high equipment and maintenance costs involved in measuring water fluxes in agrosystems and natural ecosystems through field experiments make remote sensing an attractive alternative [1]. Remote sensing has been used worldwide as a low cost, fast, and practical methodology to measure physical and biological parameters at multiple scales from land surfaces [2]. It has been applied in different climatic regions to determine and to map the spatial and temporal variation of components of water balance [3, 4]. It has been coupled with hydrological models, such as the Soil and Water Assessment Tool (SWAT), providing input data normally obtained from agrometeorological stations [5].

Evapotranspiration is normally considered as the sum of all water that evaporates from the soil and transpires

from plants [6, 7]. It can be used to estimate the amount of water used by crops and the amount of irrigation required for optimum crop production [8]. It can also be used as a component of models used to estimate other components of the water balance, including surface runoff, lateral flow, base flow, and percolation to aquifers [5, 9]. Such estimates are useful for management of water in soils, reservoirs, and even hydroelectric plants [2]. As human population increases and climate changes, water management is becoming a greater concern for researchers [7], farmers, and other decision makers. The state of Pernambuco has developed policies for climate change (state law number 14,090 of June 17, 2010) and coastal management (state law number 14,258 of December 23, 2010) and to combat desertification and mitigate the effects of drought (state law number 14,091 of June 17, 2010). These policies are designed to help manage the water in the

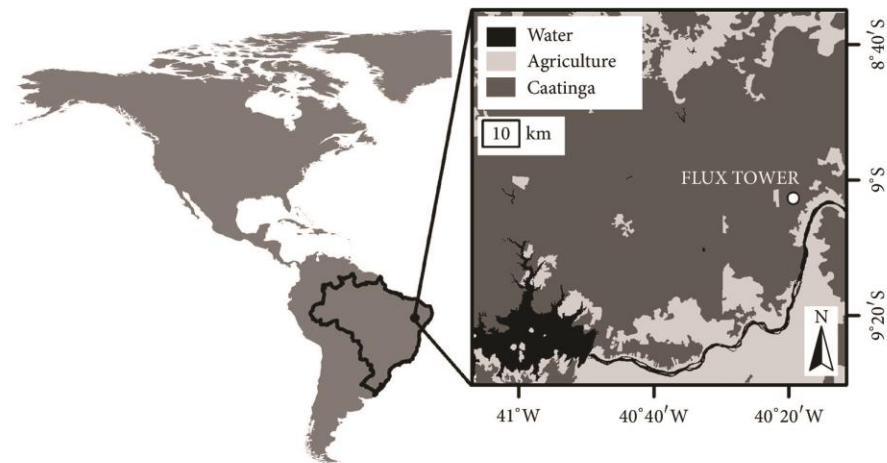


FIGURE 1: Location of the Flux tower installed in an area of Caatinga at Embrapa Semiárido, which is a research station of the state of Pernambuco, Brazil. Land use map source: PROBIO.

state, and accurate information about temporal and spatial variations in ET could assist in their implementation.

Spatial heterogeneity of ET can be great due to spatial variations in vegetation, weather, soils, and topography. As a result, extrapolation of ET estimates from flux towers to larger areas can be misleading [1, 10]. Also, ET is spatially autocorrelated, so changes at a point can affect its surroundings [11]. Direct measurement of ET in the field is expensive and difficult; therefore, satellite-based products that can be used to remotely estimate ET have become very popular among researchers and government agencies. Several models of landscape energy balance based on remotely sensed data have been developed, for example, SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land, [12, 13]), MOD16 [7, 14], and SAFER (Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving, [8]). Each of these models has advantages and disadvantages depending on where they are being applied [15]. Because models are often based on a global scale [7] or on a model-species approach [16, 17], calibration and validation may be required to parameterize a model to a given set of local conditions [18].

Validation is used to analyze the uncertainties of model outputs, ensuring the accuracy of remotely sensed ET and enhancing its applications. A wide range of methods has been used, but in most cases, deviance measures and statistical tests are recommended ones. The first one evaluates the differences between the simulated and observed values [19]. With squared deviations, Root Mean Square Errors (RMSE) can be useful to derive statistical properties. The second one is better for bias analysis. It is important to use both methods because a dataset could be extremely close in absolute values but spatially removed from the perfect covariance fit (*i.e.*, regression curve) and vice versa, especially when it is a nonlinear relationship like an exponential fit. For that, the coefficient of determination (r^2) is usually the measurement to evaluate the proportion of output variation that can be explained by the fit curve.

In this paper, we hypothesize that MODIS products can be used to accurately estimate ET in areas of Caatinga vegetation in northeastern Brazil, which is a neglected Brazilian vegetation type in terms of research and investments [20]. In our laboratory, Machado et al. [21] have previously estimated ET using Landsat imagery, but we believe the MODIS sensor may be better suited for monitoring ET in Caatinga because of its high temporal resolution. In this study, we used eddy covariance data to calibrate MODIS estimates of ET for Caatinga vegetation on monthly, 8-day, and daily time scales.

2. Methodology

2.1. Study Area. The experiment was conducted in a preserved flat area of Caatinga (≈ 600 ha) located at Embrapa Semiárido research station of the state of Pernambuco, Brazil ($40^\circ 19' 16''$ W, $9^\circ 02' 33''$ S; 350 m) (Figure 1). Caatinga is a hyperxerophilic vegetation type that consists of deciduous xerophytic shrubs and trees with an average height of 5 m and over 1,000 vascular plant species [20]. In the study area, dominant plant species include *Poincianella microphylla* (Mart. ex G. Don), *Croton conduplicatus* (Kunth), *Bauhinia cheilantha* (Bong.), *Manihot pseudoglaziovii* (Pax & Hoffman), and *Commiphora leptophloeos* (Mart.). The climate type is BSwh (Köppen) or semiarid, with rainy season from January to April. Average annual rainfall is 510 mm, and it is temporally and spatially very heterogeneous. Mean air temperature is 26.2°C [22].

2.2. Eddy Covariance Flux Tower. Meteorological and water flux measurements were taken throughout 2012 with sensors installed in a 16 m tower located in the study area. A net radiometer (model CNR-1, Kipp & Zonen B; V; Delft, Netherlands) installed at 13.3 m above the soil surface was used to determine incoming solar radiation (R_s). Air temperature and relative humidity (HMP45C, Vaisala, Helsinki,

TABLE 1: List of all MODIS imaged days of the year of 2012 used in the SAFER analysis. All these images were selected by having clear and high quality data for the pixel regarding an area of Caatinga at Embrapa Semiárido, which is a research station of the state of Pernambuco, Brazil (9°05'S; 40°19'W; 350 m).

01/07/2012	04/19/2012	05/31/2012	07/26/2012	10/20/2012
01/10/2012	04/26/2012	06/02/2012	07/31/2012	10/23/2012
01/28/2012	04/28/2012	06/06/2012	08/07/2012	10/26/2012
03/01/2012	04/29/2012	06/07/2012	08/08/2012	10/28/2012
03/02/2012	05/01/2012	06/09/2012	08/10/2012	10/29/2012
03/03/2012	05/03/2012	06/10/2012	08/11/2012	10/30/2012
03/04/2012	05/05/2012	06/15/2012	08/29/2012	12/14/2012
03/07/2012	05/07/2012	06/18/2012	09/04/2012	12/18/2012
03/09/2012	05/12/2012	06/20/2012	09/08/2012	12/20/2012
03/14/2012	05/14/2012	06/21/2012	09/14/2012	12/22/2012
03/17/2012	05/15/2012	06/22/2012	09/21/2012	12/25/2012
03/23/2012	05/16/2012	06/26/2012	09/25/2012	—
03/25/2012	05/17/2012	07/08/2012	09/26/2012	—
03/28/2012	05/29/2012	07/13/2012	10/03/2012	—
04/06/2012	05/30/2012	07/23/2012	10/10/2012	—

Finland) and rainfall (CS700-L Hydrological Services Rain Gauge, Liverpool, Australia) were measured at 15.7 m and 16.3 m height, respectively. Wind speed values were obtained with an ultrasonic anemometer 3D (WindMaster Pro, Gill Instruments Ltd., Lymington, UK) at 16.9 m height, and ET was directly measured by an Open Path H₂O analyzer (IRGA; model LI-7500, LI-COR Inc., Lincoln, NE, USA). All sensors were connected to a data logger (model CR1000, Campbell Scientific Inc., Logan, Utah, USA) set up to take measurements every 10 seconds. More information on the study site and monitoring system can be found in a previous paper [22].

2.3. MOD16A2 Products. MODIS MOD16A2 products were downloaded for all 8-day and month periods of the year of 2012 from <http://www.nts.gov.umt.edu/project/mod16>. The 58 images were rescaled from 0.1 mm 8-day⁻¹ or 0.1 mm month⁻¹ to correct units (mm 8-day⁻¹ or mm month⁻¹) by multiplication of all pixels by the 0.1, using the GDAL library (Geospatial Data Abstraction Library). The ET MOD16A2 dataset is composed of two components, (i) meteorological and (ii) remote sensing based data, and is computed using an algorithm, (1); [7, 14], a modification of the equation described by Cleugh et al. [23], which in turn is a Penman-Monteith approach to estimate ET [24].

$$ET = \frac{\Delta (R_n - G) + \rho C_p (e_s - e_a) / r_a}{\Delta + \gamma (1 + r_s / r_a)}, \quad (1)$$

where R_n is radiation budget (J m⁻² day⁻¹), G is soil heat flux (≈ 0 J m⁻² day⁻¹), ρ is the air density (kg m⁻³), C_p is the specific heat of air at constant pressure (1013 J kg⁻¹ K⁻¹), e_s is saturation vapor pressure (Pa), e_a is current vapor pressure (Pa), Δ is the slope of the curve pressure versus air temperature (Pa K⁻¹), and γ is the psychrometric constant (kPa K⁻¹). The meteorological input data for that equation is

always provided by the Global Modelling and Assimilation Office (GMAO) and includes daily total downward radiation (R_s ; MJ m⁻² day⁻¹), daily average air temperature (T ; °C), daytime and nighttime air temperatures (T_D , T_N ; °C), daily minimum air temperature (T_{min} ; °C), and vapor pressure (e_s , e_a ; kPa), all at 1.0° × 1.25° spatial resolution. The land surface inputs are acquired from three MODIS products, with a spatial resolution from 500 to 1,000 m². These products are MOD12Q1 [25], MOD15A2 [26], and MCD43B2/B3 Collection 5 (albedo) [27]. Further details of MOD16 algorithm are given in Mu et al. [14].

2.4. SAFER Products. To create SAFER products, we used images of level 1B MOD021KM products from sensor Terra/MODIS for the year of 2012. Firstly, all 366 images were downloaded through the Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System (LAADS; <https://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>), and secondly, 71 images were selected as having clear and high quality data for the pixel regarding Embrapa Semiárido (Table 1). The MOD021KM product has 36 spectral bands, from 0.405 μm to 14,385 μm, with different spatial resolutions, from 250 to 1,000 m². The SAFER algorithm is basically a simplified and calibrated version of SEBAL [12, 13] for Brazilian semiarid conditions [15]. It was first proposed by Teixeira [8] using Landsat imagery, but MODIS application details can be found in Teixeira et al. [3]. It utilizes only four bands in a five-step process to acquire ET. The first step was to convert the digital numbers (DN) of two bands from the visible spectrum (bands 1 and 2) into reflectance (p_b) and DN of two thermal bands (bands 31 and 32) into radiance (L_b ; W m⁻² sr⁻¹ μm⁻¹). For that, we used following equation:

$$p_b = a (DN_b - b), \quad (2)$$

where DN is the digital number and a and b are calibrated constants retrieved from the metadata of each product.

The second step is used to calculate values of albedo, as recommended by Valiente et al. [28]:

$$\alpha_s = a + bp_1 + cp_2, \quad (3)$$

where a , b , and c are 0.08, 0.41, and 0.14, which are values calibrated to Brazilian semiarid by Teixeira et al. [29]. The third step is to process the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), which can be acquired as follows [30]:

$$\text{NDVI} = \left(\frac{p_2 - p_1}{p_2 + p_1} \right), \quad (4)$$

where p_1 and p_2 are the reflectance of band 1 and 2, respectively. The fourth step is used to calculate surface and brightness temperatures:

$$T_b = \left(\frac{K_2}{\ln(K_1/L_b + 1)} \right), \quad (5)$$

$$T_0 = aT_{31} + bT_{32},$$

where T_{31} and T_{32} are brightness temperatures from band 31 and 32, respectively, a and b are both coefficients with value of 0.5 [29], T_b is brightness temperature of each band b , L_b is spectral radiance, and K_1 and K_2 are conversion coefficients in $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$. K_1 and K_2 can be calculated with the following equations [31]:

$$\begin{aligned} K_1 &= 2hc^2\lambda^{-5}10^{-6}, \\ K_2 &= \frac{hc}{\sigma\lambda}, \end{aligned} \quad (6)$$

where h is the Planck constant ($6.62606896 \cdot 10^{-34} \text{ J s}^{-1}$), c is the speed of light ($2.99792458 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$), σ is the Boltzmann constant ($1.3806504 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$), and λ is the mean wavelength for each thermal band in meters ($11.0186 \cdot 10^{-6}$ and $12.0325 \cdot 10^{-6}$ for bands 31 and 32 resp.). Finally for the ET ratio ($\text{ET} : \text{ET}_0$), inputs are NDVI, α_s , and T_0 (7). The ET ratio is related with soil moisture and vegetation chlorophyll content. It can be used to estimate components of the water balance at the scale of the remote sensing pixels, which may include different agrosystems and natural plant communities.

$$\frac{\text{ET}}{\text{ET}_0} = \exp \left[a + b \left(\frac{T_0}{\alpha_s \text{NDVI}} \right) \right], \quad (7)$$

where ET_0 is the reference evapotranspiration and a and b are regression coefficients of values $1.90e-0.008$, respectively for Brazilian semiarid conditions [8]. All calculations were performed with the GDAL library.

2.5. Reference Evapotranspiration. To estimate the reference evapotranspiration (ET_0) required by the last step of SAFER algorithm, we used the following equations with daily resampled data from the eddy covariance Flux tower:

$$\begin{aligned} \text{ET}_0 &= \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma(900/(T - 273))u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}, \end{aligned} \quad (8)$$

where R_n is radiation budget ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$), G is soil heat flux ($\approx 0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$), T is air temperature at 2 m ($^{\circ}\text{C}$), u_2 is wind speed at 2 m (m s^{-1}), e_s is saturation vapor pressure (kPa), e_a is current vapor pressure (kPa), Δ is the slope of the curve pressure versus air temperature ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$), and γ is the psychrometric constant ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$). R_n was calculated following this series of equations:

$$\begin{aligned} R_{ns} &= (1 - \alpha) R_s, \\ \varphi &= \frac{\pi}{180}l, \\ d_r &= 1 + 0.033 \cos \left(\frac{2\pi}{365}j \right), \\ \delta &= 0.409 \sin \left(\frac{2\pi}{365}j - 1.39 \right), \\ \omega_s &= \arccos [-\tan(\varphi) \tan(\delta)], \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} R_a &= \frac{24(60)}{\pi} \\ &\cdot G_{SC} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)], \end{aligned}$$

$$R_{S0} = (0.75 + 2 \cdot 10^{-5}z) R_a,$$

$$R_{nl} = \sigma T^4 (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \times \left(1.35 \frac{R_s}{R_{S0}} - 0.35 \right),$$

$$R_n = R_{ns} - R_{nl},$$

where R_{ns} is net solar or net shortwave radiation ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$); α is albedo or canopy reflection coefficient, which was considered 0.175 as indicated by de Souza et al. [22] for the study area; R_s is measured incoming solar radiation from meteorological tower ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$); l is latitude in degrees; φ is latitude in radians; d_r is the inverse relative Earth-Sun distance; j is the number of the day in the year; δ is the solar declination; ω_s is the sunset hour angle (radians); R_a is daily extraterrestrial radiation ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$); G_{SC} is the solar constant ($0.0820 \text{ MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$); R_{S0} is clear-sky solar radiation ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$); z is elevation above sea level in meters; R_{nl} is net longwave radiation ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$); and σ is the Boltzmann constant ($4.903 \cdot 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$). The parameters u_2 , e_s , e_a , Δ , and γ were acquired with the equations below, respectively, where u_z is wind speed at elevation z (m s^{-1}) and RH is relative air humidity (%).

$$u_2 = u_z \frac{4.87}{\ln(67.8z - 5.42)}, \quad (10)$$

$$e_s = 0.6108 \exp \left(\frac{17.27T}{T + 273} \right), \quad (11)$$

$$e_a = \frac{\text{RH}}{100} e_s, \quad (12)$$

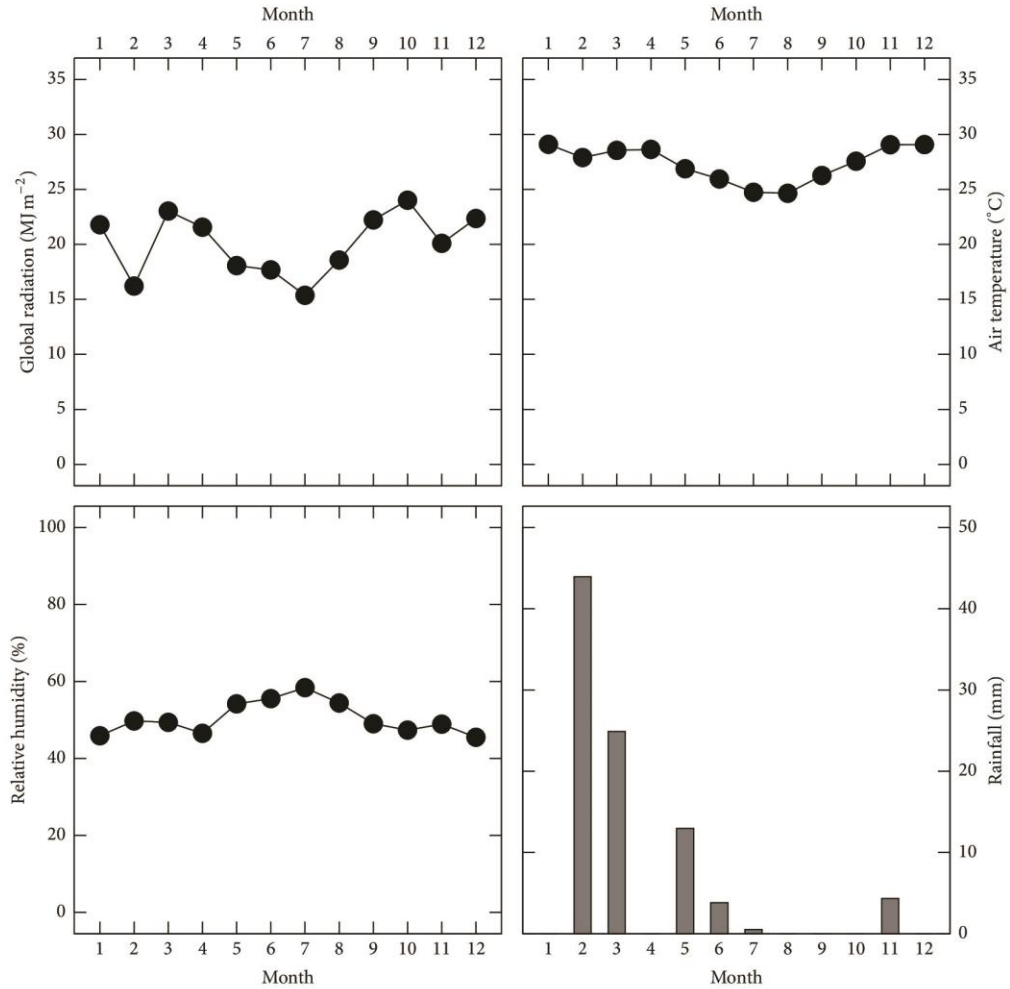


FIGURE 2: Meteorological scenario for the year of 2012 recorded by the Flux tower installed in an area of Caatinga at Embrapa Semiárido, which is a research station of the state of Pernambuco, Brazil. Global radiation is the monthly mean of accumulated daily incoming radiations; air, temperature, and relative humidity are presented as monthly mean of the daily mean; and rainfall is the monthly sum of all precipitations.

$$\Delta = \frac{4098 \times 0.6108e_s}{(T + 273)^2}, \quad (13)$$

$$\gamma = 0.665 \cdot 10^{-3} \left(101.3 \left(\frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26} \right). \quad (14)$$

2.6. Statistical Analysis. Covariance between SAFER and MOD16A2 and tower estimates of ET were analyzed using linear and nonlinear regressions. Normality and homoscedasticity of all ET data were tested with Shapiro Wilk test and Brown Forsyth test, respectively [32]. The differences between the simulated and observed absolute values were evaluated using RMSE [19, 32]. All statistical analyses were performed with the package R (v3.2.3; [33]), and results were considered to be significant when $p \leq 0.05$. Graphs were plotted with the software Veusz (v1.24; [34]).

3. Results and Discussion

3.1. Climatology and Surface Properties. A first analysis of the weather data showed that, in general, global radiation (R_s), air temperature (T), and relative humidity (RH) exhibited normal behavior in 2012, with low values of R_s and T and high values of RH in July and August (Figure 2). Exceptions in the patterns were observed only for February, April, and November, when rainfall had a strong direct or indirect influence. Annual precipitation was 90.42 mm, which was only 17% of historical averages for the area (510 mm). Temporal variation in rainfall was large, with peaks in February, April, and November. February was a cloudy month, with R_s reaching values similar to July and T decreasing as RH increased. The effects of the February rainfall peak can also be observed in ET_0 , which decreased to 76.6% of January's (Figure 3). Global radiation measured in meteorological stations can be

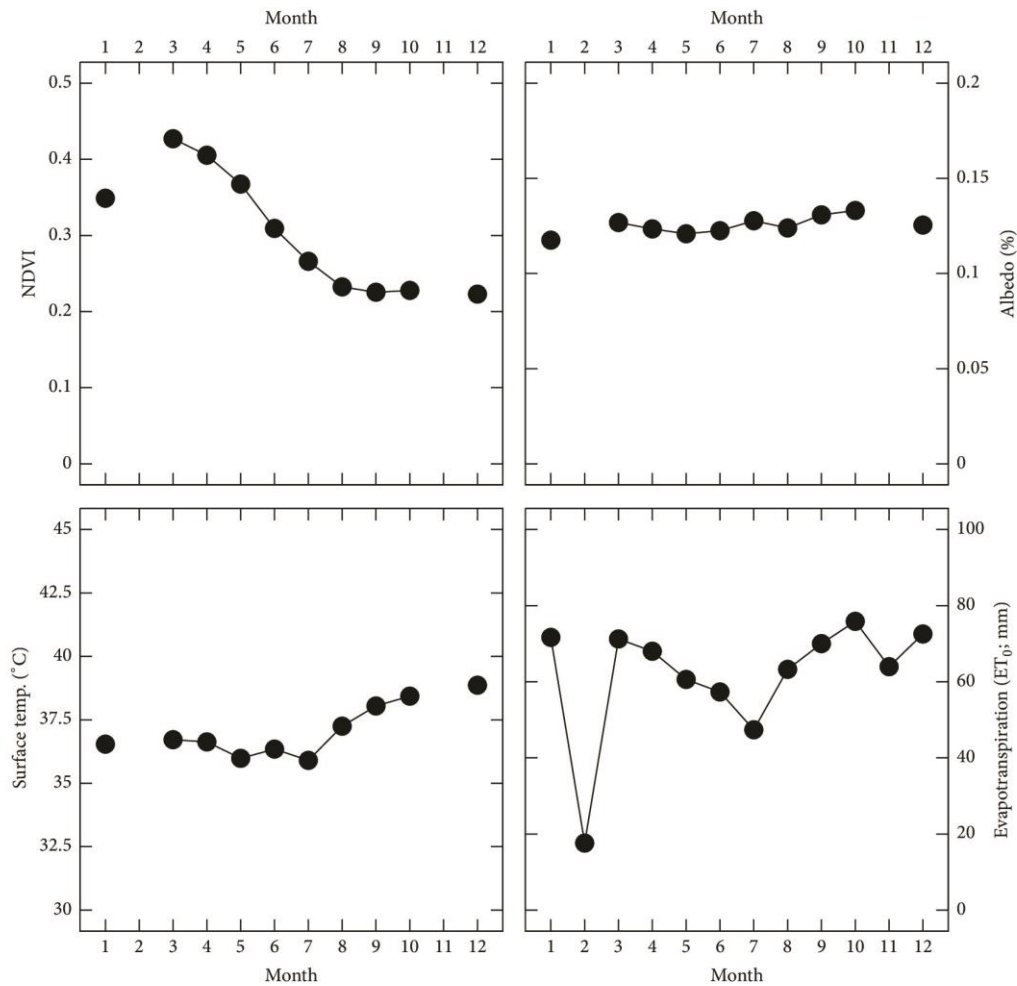


FIGURE 3: Monthly variation of all input parameters used in the SAFER algorithm for the year of 2012 in an area of Caatinga at Embrapa Semiárido, which is a research station of the state of Pernambuco, Brazil. NDVI, albedo, and Surface Temperature are presented as monthly mean of all available data and evapotranspiration is the monthly mean of all available data multiplied by the number of days in that month.

drastically decreased during cloudy days, and that might significantly affect the amount of energy available to the process of evapotranspiration. Also, ET_0 is a modelled variable and varies positively in function of R_s . For these ground measurements, cloudy days still produce reliable data, since surface data is acquired beneath the clouds, which is not true for satellite-based data that attempts to acquire surface data from above it. The values of NDVI, α_s , and T_0 could not be processed to February due to these interferences. April presented a pattern inverse to February, with high R_s and T and low values of RH. Although it was a dry month, NDVI were still high because of the existing lag between rainfall and vegetation cover dynamics, and that kept α_s , T_0 , and ET_0 stable. November was again a rainy month that followed the same pattern as February, but since vegetation cover is lower in November than in February, T was proportionally higher than in February.

3.2. Monthly Evaluation. The ET estimates for the MODIS pixel of Caatinga in which the tower was located were compared with the observations *in loco* performed by equipment installed on that tower. The relationship between observed data and MOD16A2 products presented coefficients of determination (r^2) of 0.77 for the linear fit and 0.82 for the exponential one (Figure 4). These values are comparable to that found by Ruhoff et al. [9] ($r^2 = 0.89$) when comparing MOD16A2 ET against eddy covariance measurements in an area of Cerrado, which is a Brazilian ecosystem that consists of a dense vegetation dominated by shrubs and trees with 5–10 m height. When using SAFER data instead of MOD16A2, we obtained r^2 of 0.92 for a linear relation and 0.79 for an exponential relation.

The lower r^2 obtained with MOD16A2 compared with SAFER suggest that the limitations cited by Mu et al. [7] may be operative. Those limitations include (i) inaccuracy

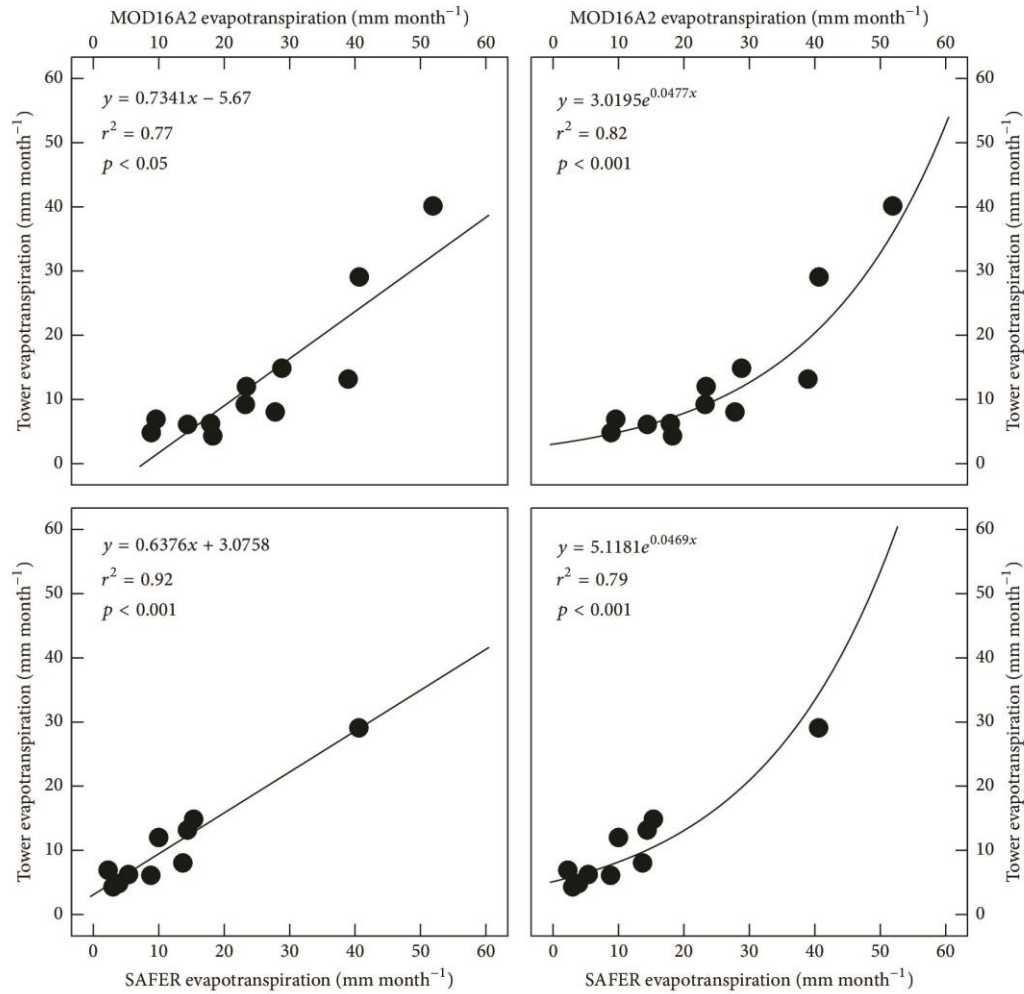


FIGURE 4: Monthly linear and exponential regression of MOD16A2 evapotranspiration (superior part) and SAFER evapotranspiration (inferior part) versus evapotranspiration from a Flux tower installed in an area of Caatinga at Embrapa Semiárido, which is a research station of the state of Pernambuco, Brazil, for the year of 2012.

of algorithm inputs, such as MODIS LAI (Leaf Area Index) that tends to be overestimated [35] and may result in overestimates of ET; inaccuracy of MODIS EVI that may lead to miscalculation of vegetation cover fraction; and misclassification of land cover (MOD12Q1) that may result in incorrect VPD and minimum air temperature values in equations [7, 25] and (ii) average parameter values for stomatal dynamics that may not represent well all species within that biome [36, 37]. On the other hand, the SAFER algorithm was created and validated for the Brazilian semi-arid. Its greatest advantage is that both the algorithm itself [8] and its inputs (α_s and T_0 in Teixeira et al. [15]) have been calibrated for the Caatinga conditions.

The exponential model performed better than the linear one for MOD16A2, indicating that the product's ET estimates saturate and lose sensitivity at high ET rates. However, that is not a disadvantage of the SAFER algorithm. Since SAFER

uses an exponential regression. This saturation pattern is based on an intrinsic behavior of the vegetation indexes used in both MOD16A2 and SAFER equations that are often over- or underestimated at low and high values for the Caatinga, respectively, and also on their relationships with LAI that has proven to be always exponential. For example, Costa et al. [38] (15) and Domiciano Galvncio et al. [39] (16) have found exponential relationships between LAI and NDVI for Caatinga vegetation. In addition, vegetation indexes produce nonlinear relationships with LAI due to their mathematical structure [40].

$$\text{LAI} = 0.6401e^{(2.6929 \times \text{NDVI})}; \quad (15)$$

$$\text{LAI} = \exp \left[1.426 + \left(\frac{-0.542}{\text{NDVI}} \right) \right]. \quad (16)$$

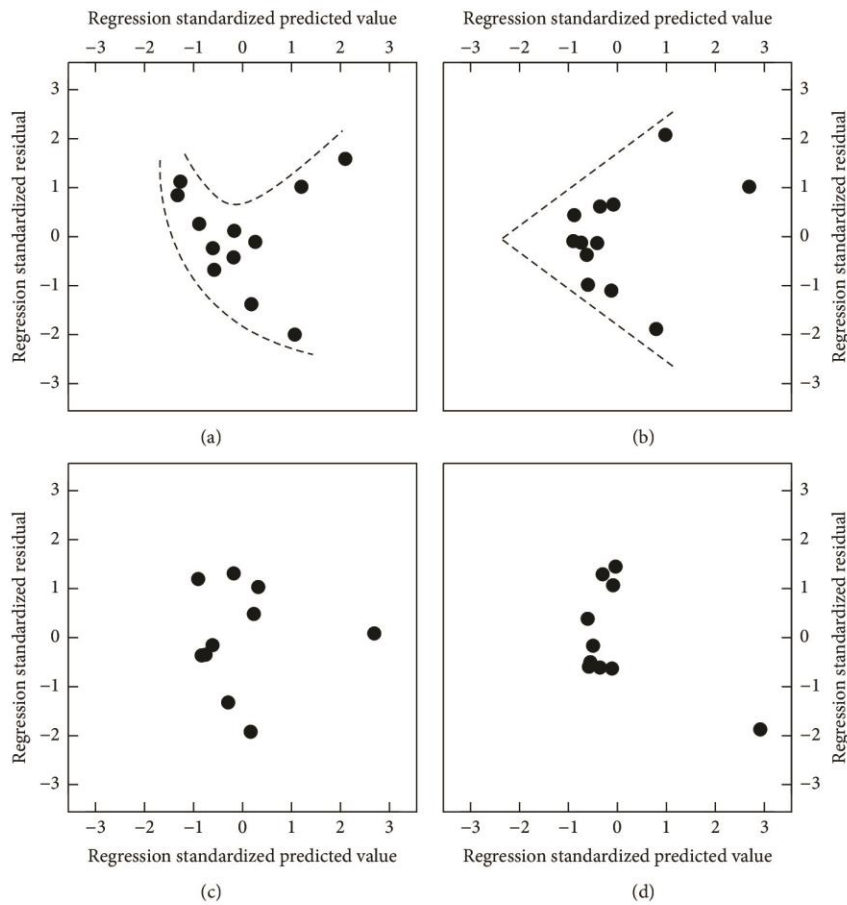


FIGURE 5: Monthly regression standardized residuals versus regression standardized predicted values of all models. (a) and (b) are linear and exponential models for MOD16A2, respectively; and (c) and (d) are linear and exponential models for SAFER algorithm, respectively.

Linear estimation of ET using MOD16A2 produced a greater average residual ($3.98 \text{ mm month}^{-1}$) than exponential one ($2.82 \text{ mm month}^{-1}$). These results corroborate the NDVI-LAI relation that is better for nonlinear than linear equations. Also, the linear model violates assumptions of linearity and homoscedasticity. We can observe curvilinearity in the data, and residuals are greater for greater values of predicted ET (Figure 5(a)). Note that the model should only be used within the range of data used to develop the model, which in our case is from 4.31 to 40.15 mm of ET. The exponential model for MOD16A2 was similar to the linear model, but it violates only the assumption of homoscedasticity, presenting the same increasing relation of residual's variances and regression predicted values (Figure 5(b)). That is, estimates of small values of ET are more precise than large values. For SAFER, neither linear nor exponential models present any specific pattern of errors, suggesting that the assumptions were met (Figures 5(c) and 5(d)). However, the linear model is preferred because its r^2 is greater and its residuals are smaller ($1.6 \text{ mm month}^{-1}$) when compared with exponential estimates ($2.43 \text{ mm month}^{-1}$).

3.3. Eight-Day Evaluation. The relationship between observed ET and MOD16A2 estimates presented r^2 values of 0.62 and 0.69 for a linear and exponential fit, respectively (Figure 6). These values are again close to that found by Ruhoff et al. [9] in the Cerrado ($r^2 = 0.78$), when comparing 8-day MOD16A2 ET with tower flux measurements of ET. Limitations regarding MOD16A2 products and linear models are the same as described for monthly data. Residuals from the linear model using MOD16A2 presented a greater average residual ($1.56 \text{ mm 8-day}^{-1}$; Figure 7(a)) than the exponential model ($1.2 \text{ mm 8-day}^{-1}$; Figure 7(b)), and we can observe the same pattern as in the monthly analysis, where both show signs of heteroscedasticity, and only the linear model violates the linearity assumption. However, the 8-day exponential model overestimates ET more than the monthly model. The mean positive residuals were 90.7% greater than the mean negative residuals in the 8-day model, while in the monthly model, mean positive residuals were 12.4% larger. That corroborates results of Ruhoff et al. [9] in which MOD16A2 overestimated ET for another biome in Brazil. We obtained r^2 values of 0.88 and 0.65 for linear

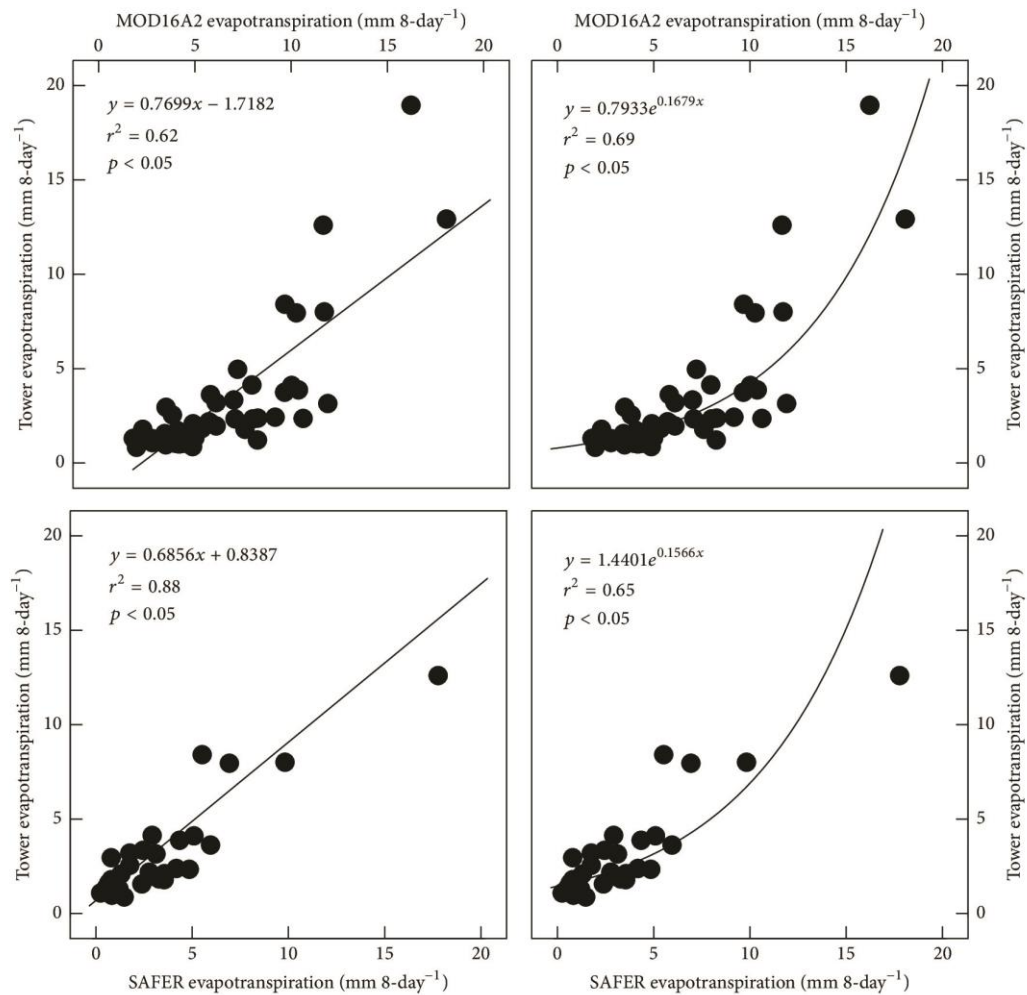


FIGURE 6: 8-day linear and exponential regression of MOD16A2 evapotranspiration (superior part) and SAFER evapotranspiration (inferior part) versus evapotranspiration from a Flux tower installed in an area of Caatinga at Embrapa Semiárido, which is a research station of the state of Pernambuco, Brazil, for the year of 2012.

and exponential SAFER models, respectively (Figure 6), with average residuals of $0.81 \text{ mm } 8\text{-day}^{-1}$ and $1.15 \text{ mm } 8\text{-day}^{-1}$ for linear and exponential models, respectively (Figures 7(c) and 7(d)). For the linear model, symmetry of residuals was quite large with small differences (6.2% for 8-day), but again the monthly model was better with only 0.01% of difference between average negative and positive residuals.

3.4. Daily Evaluation. As monthly and 8-day SAFER linear models gave better results than the exponential ones, we decided to develop a linear model for daily ET. This model gave r^2 of 0.85 with residuals varying from -0.4 to 0.6 mm (Figure 8). In comparison, Teixeira [1] found r^2 of 0.89 in a linear relation between SAFER data and field measurements of irrigated crops and Caatinga. In our study, the patterns of residuals suggested heteroscedastic behavior. This result was

inconsistent with residuals of the linear monthly and 8-day SAFER models, possibly the result of temporal downscaling of weather data. However, daily ET data is essential for a precise environment monitoring, especially in the case of the Brazilian semiarid where there is a high space-time variation of rainfall [41], for example, 20% of the yearly rainfall may occur in a single day or 60% in a month [42]. Because of limitations in quantity and quality of weather station data in Brazil, use of remotely sensed data by researchers and government agencies has increased. Among the various sensors with freely available data that have been used to estimate ET, MODIS may be the most widely used. It provides data on a daily basis (250 to 1,000 m), which not only allows precise monitoring of ET at daily, monthly, and yearly scales, but also can provide daily inputs to hydrological models like SWAT [5].

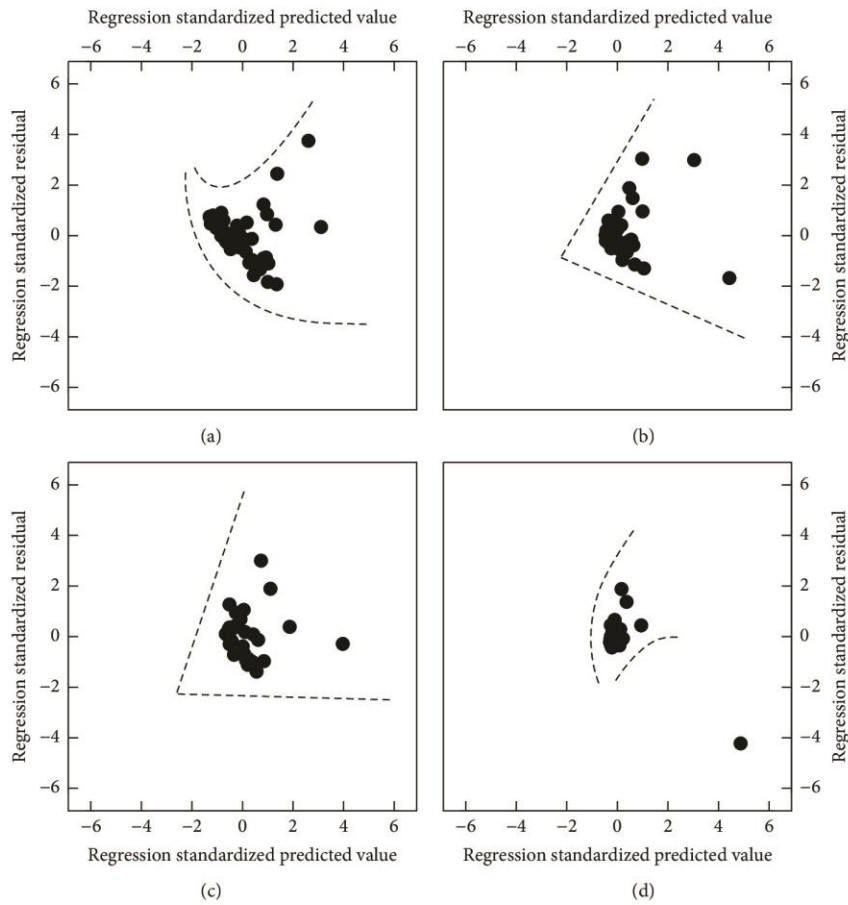


FIGURE 7: 8-day regression standardized residuals versus regression standardized predicted values of all models. (a) and (b) are linear and exponential models for MOD16A2, respectively; and (c) and (d) are linear and exponential models for SAFER algorithm, respectively.

3.5. Temporal Evaluation. ET estimates of the SAFER algorithm were closer to Flux tower estimates than MOD16A2 estimates (Figure 9), especially from April to December, where the mean monthly difference between the tower and remotely sensed estimates was $-0.26 \text{ mm month}^{-1}$ for SAFER in comparison to $11.08 \text{ mm month}^{-1}$ for MOD16A2, and the mean 8-day differences were 0.019 and $2.89 \text{ mm 8-day}^{-1}$ for SAFER and MOD16A2, respectively. However for the period between January and March, the differences were not as great: $-0.012 \text{ mm month}^{-1}$ and $0.17 \text{ mm 8-day}^{-1}$ for SAFER compared to $16.36 \text{ mm month}^{-1}$ and $4.31 \text{ mm 8-day}^{-1}$ for MOD16A2. For the daily scale, the differences between SAFER and Flux tower ET estimates were $0.017 \text{ mm day}^{-1}$ and 0.21 mm day^{-1} for the first and second periods, respectively. The SAFER model gave better results than the MOD16A2 model at all evaluated temporal scales. MOD16A2 tended to overestimate ET, due, we suggest, to the meteorological input data used in MOD16A2 algorithm. It is derived from a $1.00^\circ \times 1.25^\circ$ grid, while meteorological input data for the SAFER algorithm was acquired from the Flux tower itself.

Mu et al. [14] have reported that GMAO data produces biases if compared to measures from meteorological stations. The period when all products and the Flux tower were closest was from September to October. As we showed in the residual analysis, low values of ET tend to have smaller variances than high values. In those months, both SAFER and MOD16A2 presented the smallest values of ET because this was the only period that a dry month ($\approx 0 \text{ mm}$ of rainfall) was followed by another dry month and no soil water recharge occurred. However, even during these months when no rainfall occurred, we observed levels of ET varying from ≈ 3 to 10 mm . This ET may result from plant transpiration of water from deep soil layers and soil evapotranspiration of dew. In northern Israel during the dry season, Agam and Berliner [43] found that even when no dew is deposited on the soil surface, soil evaporation can be observed, suggesting that humidity is absorbed by the soil during the night and evaporates during the day.

SAFER linear ET models more closely matched Flux tower estimates of ET than all other models (Table 2), with

TABLE 2: Brief statistical summary and Root Mean Square Error (RMSE) of all nine evapotranspiration models.

Model	Product	Min and max obs. values (mm)	Min and max pred. values (mm)	RMSE (mm)
$y = 0.7341x - 5.67$ $y = 3.0195e^{0.0477x}$	Monthly MOD16A2		0.83 to 32.4	4.91
$y = 0.6376x + 3.0758$ $y = 5.1181e^{0.0469x}$	Monthly SAFER	4.31 to 40.15	4.6 to 35.8 4.5 to 28.94 5.68 to 34.32	3.68 1.97 2.86
$y = 0.7699x - 1.7182$ $y = 0.7933e^{0.1679x}$	8-day MOD16A2		0.33 to 12.17	2.18
$y = 0.6856x + 0.8387$ $y = 1.4401e^{0.1566x}$	8-day SAFER	0.83 to 18.95	1.07 to 16.47 1.06 to 13.02 1.49 to 23.3	1.99 1.13 2.27
$y = 0.5351x + 0.1067$	Daily SAFER	0.07 to 1.91	0.12 to 1.45	0.15

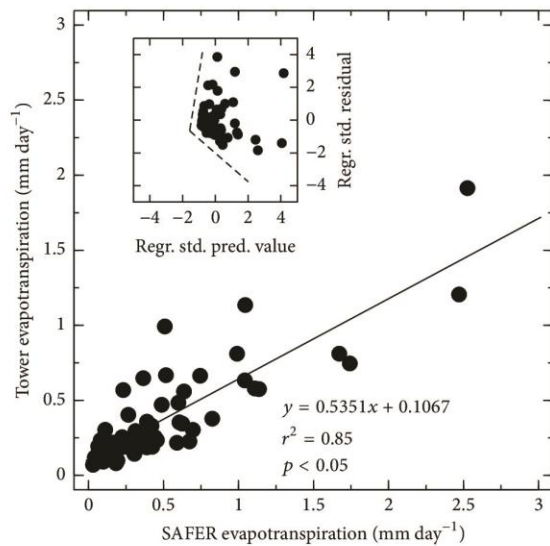


FIGURE 8: Daily regression of SAFER evapotranspiration versus evapotranspiration from a Flux tower installed in an area of Caatinga at Embrapa Semiárido, which is a research station of the state of Pernambuco, Brazil, for the year of 2012. In the insets, dispersion pattern of residuals is relative to the model.

Root Mean Square Errors (RMSE) of 1.97 and 1.13 mm for monthly and 8-day scales, respectively, while MOD16A2's errors ranges were 1.99 and 4.91 mm, respectively. In the Cerrado, Ruhoff et al. [9] found RMSEs of 19 and 0.78 mm when comparing monthly and 8-day ET estimates from MOD16A2 to tower flux measurements, respectively, with monthly differences between predicted and measured data ranging from 0 to 40 mm. We also compared the minimum and maximum predicted values from the SAFER and MOD16A2 estimates to the Flux tower dataset. The MOD16A2 linear model underestimated the minimum Flux tower value by 81% for the monthly scale and by 60% smaller for the 8-day scale. In contrast, SAFER linear and MOD16A2 exponential models showed minimum values of

only 4% and 7% greater than the observed minimum values from Flux tower dataset for monthly scale, and both were 28% greater for the 8-day scale. For the maximum values, the 8-day SAFER exponential model overestimated Flux tower estimates by 23%. Daily SAFER linear model showed 0.15 mm RMSE, over- and underestimating the minimum and maximum values, respectively, compared to the RMSE of 0.34 mm found by Teixeira [1], when analyzing ET field measurements and SAFER data. The SAFER algorithm was compared with another algorithm by its developers in their report [44], and they argued that SAFER outperformed because it estimates the ratio $ET:ET_0$ instead of ET, which allows spatial extrapolation of ET [44]. However, since the MOD16A2 model estimates the same ratio, we suggest that the regionally calibrated inputs [8] are the reason that SAFER estimates may be more accurate over other methods.

4. Conclusion

In this study, we compared ground-based ET with remotely sensed ET from MOD16A2 and SAFER products, and it produced r^2 values of monthly scale = 0.92, 8-day scale = 0.88, and daily scale = 0.85 for the SAFER algorithm. Monthly MOD16A2 data produced a value of $r^2 = 0.82$, and 8-day value = 0.69. Although, dataset variance increased in temporal downscaling ET data, we showed that MODIS derived products can be of use to model ET for the Caatinga ecosystem, with acceptable r^2 values for the SAFER algorithm at all temporal scales. Moreover, we also recommend the use of MOD16A2 monthly products to monitor the Caatinga when if locally observed meteorological data are not available to produce SAFER estimates. MODIS data produced satisfactory estimates of Flux tower observed data and are freely downloadable at <http://www.ntsug.umd.edu/project/mod16>. We believe this study contributes to the assessment evapotranspiration data via remote sensing techniques, which may provide better understanding of the evapotranspiration dynamics of the Caatinga ecosystem, which might be a world reference in the future for ecological disturbances due to climate changes or simply key information to help federal and municipal governments plan land use changes with rational criteria.

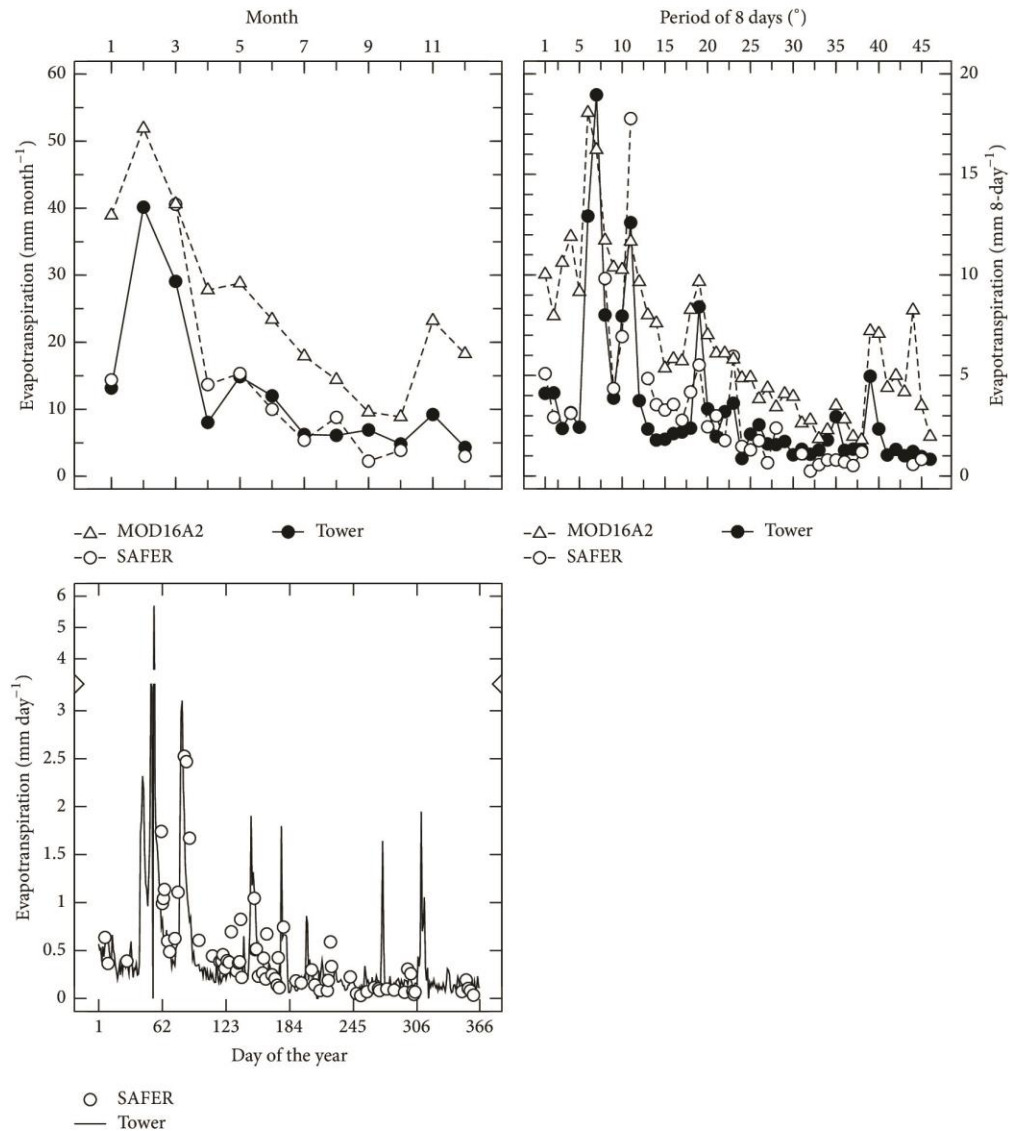


FIGURE 9: Monthly, 8-day, and daily variations of MOD16A2 and SAFER evapotranspiration and evapotranspiration from a Flux tower installed in an area of Caatinga at Embrapa Semiárido, which is a research station of the state of Pernambuco, Brazil, for the year of 2012.

Competing Interests

The authors declare that they have no competing interests.

Acknowledgments

The authors thank CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brazilian Coordination for the Improvement of Higher Level Personnel) for funding this study through the international project PVE A103/2013.

References

- [1] A. H. D. C. Teixeira, "Determining regional actual evapotranspiration of irrigated crops and natural vegetation in the São Francisco river basin (Brazil) using remote sensing and Penman-Monteith equation," *Remote Sensing*, vol. 2, no. 5, pp. 1287–1319, 2010.
- [2] M. Govender, K. Chetty, and H. Bulcock, "A review of hyperspectral remote sensing and its application in vegetation and water resource studies," *Water SA*, vol. 33, no. 2, pp. 145–151, 2007.

- [3] A. H. D. C. Teixeira, M. Sherer-Warren, H. L. Lopes, F. B. T. Hernandez, R. G. Andrade, and C. M. U. Neale, "Application of MODIS images for modelling the energy balance components in the semi-arid conditions of Brazil," in *Proceedings of the Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XV*, vol. 8887 of *Proceedings of SPIE*, 2013.
- [4] A. H. de C Teixeira, D. C. Victoria, R. G. Andrade, J. F. Leivas, E. L. Bolfe, and C. R. Cruz, "Coupling MODIS images and agrometeorological data for agricultural water productivity analyses in the Mato Grosso State, Brazil," in *Proceedings of the Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XVI*, vol. 9239 of *Proceedings of SPIE*, September 2014.
- [5] M. Strauch and M. Volk, "SWAT plant growth modification for improved modeling of perennial vegetation in the tropics," *Ecological Modelling*, vol. 269, pp. 98–112, 2013.
- [6] R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, *Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper 56*, vol. 300, no. 9, FAO, Rome, Italy, 1998.
- [7] Q. Mu, F. A. Heinsch, M. Zhao, and S. W. Running, "Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data," *Remote Sensing of Environment*, vol. 111, no. 4, pp. 519–536, 2007.
- [8] A. H. C. Teixeira, "Modelling evapotranspiration by remote sensing parameters and agro-meteorological stations," in *Remote Sensing and Hydrology*, C. M. U. Neale and M. H. Cosh, Eds., no. 352, pp. 154–157, International Association of Hydrological Sciences, Jackson Hole, Wyo, USA, 2012.
- [9] A. L. Ruhoff, A. R. Paz, L. E. O. C. Aragao et al., "Assessment of the MODIS global evapotranspiration algorithm using eddy covariance measurements and hydrological modelling in the Rio Grande basin," *Hydrological Sciences Journal*, vol. 58, no. 8, pp. 1658–1676, 2013.
- [10] A. H. De C Teixeira, M. Scherer-Warren, F. B. T. Hernandez, R. G. Andrade, and J. F. Leivas, "Large-scale water productivity assessments with MODIS images in a changing semi-arid environment: a Brazilian case study," *Remote Sensing*, vol. 5, no. 11, pp. 5783–5804, 2013.
- [11] P. Segurado, M. B. Araújo, and W. E. Kunin, "Consequences of spatial autocorrelation for niche-based models," *Journal of Applied Ecology*, vol. 43, no. 3, pp. 433–444, 2006.
- [12] W. G. M. Bastiaanssen, M. Menenti, R. A. Feddes, and A. A. M. Holtslag, "A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation," *Journal of Hydrology*, vol. 212–213, no. 1–4, pp. 198–212, 1998.
- [13] W. G. M. Bastiaanssen, H. Pelgrum, J. Wang et al., "A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 2. Validation," *Journal of Hydrology*, vol. 212–213, no. 1–4, pp. 213–229, 1998.
- [14] Q. Mu, M. Zhao, and S. W. Running, "Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm," *Remote Sensing of Environment*, vol. 115, no. 8, pp. 1781–1800, 2011.
- [15] A. H. D. C. Teixeira, W. G. M. Bastiaanssen, M. D. Ahmad, and M. G. Bos, "Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil: part A: calibration and validation," *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 149, no. 3–4, pp. 462–476, 2009.
- [16] R. C. Beeson Jr., "Modeling actual evapotranspiration of Viburnum odoratissimum during production from rooted cuttings to market size plants in 11.4-L containers," *HortScience*, vol. 45, no. 8, pp. 1260–1264, 2010.
- [17] J. C. B. Hoedjes, A. Chehbouni, F. Jacob, J. Ezzahar, and G. Boulet, "Deriving daily evapotranspiration from remotely sensed instantaneous evaporative fraction over olive orchard in semi-arid Morocco," *Journal of Hydrology*, vol. 354, no. 1–4, pp. 53–64, 2008.
- [18] J. G. Arnold, D. N. Moriasi, P. W. Gassman et al., "SWAT: Model use, calibration, and validation," *Transactions of the ASABE*, vol. 55, no. 4, pp. 1491–1508, 2012.
- [19] D. G. Mayer and D. G. Butler, "Statistical validation," *Ecological Modelling*, vol. 68, no. 1–2, pp. 21–32, 1993.
- [20] J. C. Santos, I. R. Leal, J. S. Almeida-Cortez, G. W. Fernandes, and M. Tabarelli, "Caatinga: the scientific negligence experienced by a dry tropical forest," *Tropical Conservation Science*, vol. 4, no. 3, pp. 276–286, 2011.
- [21] C. C. Machado, B. B. Silva, M. B. de Albuquerque, and J. D. Galvêncio, "Estimativa do balanço de energia utilizando imagens TM—Landsat 5 e o algoritmo SEBAL no litoral sul de Pernambuco," *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 29, no. 1, pp. 55–67, 2014.
- [22] L. S. B. de Souza, M. S. B. de Moura, G. C. Sedyama, and T. G. F. da Silva, "Radiation balance in Caatinga ecosystem preserved for a year drought in semiarid Pernambuco," *Revista Brasileira de Geografia Física*, vol. 8, no. 1, pp. 41–55, 2015.
- [23] H. A. Cleugh, R. Leuning, Q. Mu, and S. W. Running, "Regional evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data," *Remote Sensing of Environment*, vol. 106, no. 3, pp. 285–304, 2007.
- [24] J. L. Monteith, "Evaporation and environment," in *The State and Movement of Water in Living Organisms*, pp. 205–234, Academic Press, New York, NY, USA, 1965.
- [25] M. A. Friedl, D. K. McIver, J. C. F. Hodges et al., "Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results," *Remote Sensing of Environment*, vol. 83, no. 1–2, pp. 287–302, 2002.
- [26] R. B. Myneni, C. D. Keeling, C. J. Tucker, G. Asrar, and R. R. Nemani, "Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991," *Nature*, vol. 386, no. 6626, pp. 698–702, 1997.
- [27] J. G. Salomon, C. B. Schaaf, A. H. Strahler, F. Gao, and Y. Jin, "Validation of the MODIS bidirectional reflectance distribution function and albedo retrievals using combined observations from the aqua and terra platforms," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 44, no. 6, pp. 1555–1564, 2006.
- [28] J. A. Valiente, M. Nunez, E. Lopez-Baeza, and J. F. Moreno, "Narrow-band to broad-band conversion for Meteosat-visible channel and broad-band albedo using both AVHRR-1 and -2 channels," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 16, no. 6, pp. 1147–1166, 1995.
- [29] A. H. D. C. Teixeira, W. G. M. Bastiaanssen, M. D. Ahmad, M. S. B. Moura, and M. G. Bos, "Analysis of energy fluxes and vegetation-atmosphere parameters in irrigated and natural ecosystems of semi-arid Brazil," *Journal of Hydrology*, vol. 362, no. 1–2, pp. 110–127, 2008.
- [30] J. W. Rouse, R. H. Haas, J. A. Schell, and D. W. Deering, "Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS," in *Proceedings of the 3rd Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, NASA SP-351, pp. 309–317, 1973.
- [31] Y. Oguro, S. Ito, and K. Tsuchiya, "Comparisons of brightness temperatures of landsat-7/ETM+ and Terra/MODIS around Hotien Oasis in the Taklimakan Desert," *Applied and Environmental Soil Science*, vol. 2011, Article ID 948135, 11 pages, 2011.

- [32] J. H. Zar, *Biostatistical Analysis*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, 3rd edition, 1996.
- [33] J. Fox, "The R commander: a basic-statistics graphical user interface to R," *Journal of Statistical Software*, vol. 14, no. 9, pp. 1–42, 2005.
- [34] J. Sanders, *Veusz—A Scientific Plotting Package*, Max Planck Institute, Garching bei München, Germany, 2015.
- [35] F. A. Heinsch, M. Zhao, S. W. Running et al., "Evaluation of remote sensing based terrestrial productivity from MODIS using regional tower eddy flux network observations," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 44, no. 7, pp. 1908–1923, 2006.
- [36] D. P. Turner, S. Urbanski, D. Bremer et al., "A cross-biome comparison of daily light use efficiency for gross primary production," *Global Change Biology*, vol. 9, no. 3, pp. 383–395, 2003.
- [37] D. P. Turner, W. D. Ritts, W. B. Cohen et al., "Scaling Gross Primary Production (GPP) over boreal and deciduous forest landscapes in support of MODIS GPP product validation," *Remote Sensing of Environment*, vol. 88, no. 3, pp. 256–270, 2003.
- [38] T. C. Costa, L. J. Accioly, M. A. Oliveira, N. Burgos, and F. H. Silva, "Phytomass mapping of the "seridó caatinga" vegetation by the plant area and the normalized difference vegetation indices," *Scientia Agricola*, vol. 59, no. 4, pp. 707–715, 2002.
- [39] J. Domiciano Galvêncio, M. S. Beserra de Moura, T. G. Freire da Silva, B. B. da Silva, and C. R. Naue, "LAI improved to dry forest in semiarid of the Brazil," *International Journal of Remote Sensing Application*, vol. 3, no. 4, p. 193, 2013.
- [40] J. R. Jensen, *Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres*, Parêntese, São José dos Campos, Brazil, 1st edition, 2009.
- [41] S. J. Reddy, "Climatic classification: the semi-arid tropics and its environment—a review," *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, vol. 18, pp. 823–847, 1983.
- [42] S. H. Bullock, H. A. Mooney, and E. Medina, *Seasonally Dry Tropical Forests*, Cambridge University Press, 1995.
- [43] N. Agam and P. R. Berliner, "Diurnal water content changes in the bare soil of a coastal desert," *Journal of Hydrometeorology*, vol. 5, no. 5, pp. 922–933, 2004.
- [44] R. G. Allen, M. Tasumi, A. Morse et al., "Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—applications," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 133, no. 4, pp. 395–406, 2007.

APÊNDICE C - Calibração do IAF por Sensoriamento Remoto com Dados de Campo

Resumo

O Índice de Área Foliar (IAF) é a área foliar em m^2 por m^2 de solo, e é essencial em vários estudos que variam desde meteorologia a produtividade de florestas. IAF é um produto padrão criado com dados do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*); e à medida em que foi disponibilizado, várias validações foram desenvolvidas. Contudo, estimativas para a Caatinga no Brasil não foi validada com medições em campo. Este estudo objetiva avaliar a eficiência e calibração de dados de área foliar do sensor MODIS utilizando modelos ajustados, e medições em campo em áreas de Caatinga. O experimento foi conduzido em área de Caatinga preservada, onde foram realizadas medições utilizando dados de torre meteorológica e do Accupar para os anos de 2011 a 2016. Essas estimativas foram comparadas com os produtos MCD15A3/A2, e derivados do MOD09GA. (i) MCD15A3/A2 apresentou r^2 na composição de 4 dias = 0,34 e 8 dias = 0,6; (ii) derivados do MOD09GA: r^2 variando de 0,59 a 0,65; (iii) iterações utilizando todas as bandas do produto resultaram em três equações: duas com $r^2 = 0,75$, e uma com $r^2 = 0,73$. Todas as três utilizaram o vermelho e o verde, variando apenas o azul e NIR. Contudo, recomenda-se o modelo vermelho-verde-NIR, pois estudos apontam para a qualidade duvidosa de dados na faixa do azul. Além disso, também recomenda-se o uso do MCD15A2 para monitorar a Caatinga, pois são dados disponibilizados gratuitamente, e produziram estimativas satisfatórias equiparáveis a outros modelos publicados desenvolvidos em áreas de Caatinga.

Palavras-chaves: MODIS, MCD15A3/A2, MOD09GA, semiárido, sensoriamento remoto.

Abstract

The Leaf Area Index (LAI) is the leaf area in m^2 per m^2 of soil, and is essential in several studies ranging from meteorology to forest productivity. IAF is a standard product created with the sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) data; and as it became available, various validations were developed. However, the Caatinga in Brazil has never been validated with field measurements. This study aims to evaluate the efficiency and calibration of MODIS leaf area data using fitted models and field measurements from areas of Caatinga. The experiment was carried out in a preserved area of Caatinga, where measurements were taken using meteorological tower and Accupar data for the years 2011 to 2016. These estimates were compared to the products MCD15A3/A2 and MOD09GA-derived. (i) MCD15A3/A2 presented r^2 in the composition of 4 days = 0.34 and 8 days = 0.6; (ii) MOD09GA-derived: r^2 ranging

from 0.59 to 0.65; *(iii)* iterations using all product bands resulted in three equations: two with $r^2 = 0.75$ and one with $r^2 = 0.73$. All three used red and green, varying only in blue and NIR. However, we recommend the red-green-NIR model, as studies have pointed to a poor quality of data of blue bands. In addition, we also recommend the use of MCD15A2 to monitor the Caatinga, since it is available freely and it produced satisfactory estimates comparable to other published models developed in areas of Caatinga.

Keywords: MODIS, MCD15A3/A2, MOD09GA, remote sensing, semiarid.

Introdução

O Índice de Área Foliar (IAF) é a área foliar em m^2 por m^2 de solo. A sua determinação é essencial em vários estudos, que variam desde os meteorológicos (e.g. evapotranspiração; MU et al., 2007) aos de produtividade de florestas (RODRIGUEZ et al., 2009). Além disso, o IAF é um parâmetro chave em modelos globais e regionais da biosfera. Existem dois principais grupos de métodos para obter o IAF: *(i)* os diretos, no quais são realizadas medidas reais do dossel foliar a partir da soma das áreas das folhas, que podem ou não serem destrutivos, mas geralmente são inviáveis quando realizados em maior escala; e *(ii)* os indiretos, que necessitam de sensores ativos ou passivos para realizar as medições. Os sensores ativos não dependem da radiação solar. Eles emitem sua própria onda eletromagnética, e capturam os ecos refletidos pelos objetos, e.g. LAI-2000. Os sensores passivos baseiam-se na relação entre a área foliar e a probabilidade de a radiação ser transmitida através do arranjo estratificado de elementos foliares no dossel das árvores. Tal probabilidade pode ser adquirida através de modelo de transferência radiativa (KNYAZIKHIN et al., 1998). Além disso, existem aqueles métodos que utilizam a resposta espectral e alguns coeficientes, em geral o IVDN (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada; GALVÍNCIO et al., 2013; MACHADO, 2014) ou IVAS (Índice de Vegetação Ajustado ao Solo; BASTIAANSEN, 1998).

O Índice de Área Foliar é um produto padrão disponibilizado a partir de dados adquiridos pelo sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) a bordo do satélite Terra. Ele é projetado para fornecer valores com resolução de 1 km e intervalos temporais de 4 e 8 dias (MCD15A3 e MCD15A2 respectivamente), e é derivado de um algoritmo complexo que utiliza valores de refletâncias de superfície diária do sensor MODIS em um ou ambos os satélites Terra e Aqua, e dados de um modelo de transferência radiativa, que fica armazenado em uma tabela de consulta (LUT de *Lookup Table* em inglês) com duas

dimensões (WENZE YANG et al., 2006). Exceto quando este método falha, ou não encontra um valor satisfatório, um algoritmo reserva é utilizado. Esse algoritmo é baseado na relação empírica entre IVDN e IAF, e variam para cada bioma (KNYAZIKHIN et al., 1998).

À medida que os produtos MODIS IAF começaram a estar disponíveis ao público, não só um programa de validação iniciou (JUSTICE et al., 2000; PRIVETTE et al., 2000), mas também várias iniciativas independentes foram desenvolvidas e publicadas (BIUDES et al., 2014; FENSHOLT; SANDHOLT; RASMUSSEN, 2004; PRIVETTE et al., 2002; SPRINTSIN et al., 2009; TIAN et al., 2002a, 2002b; WANG et al., 2004). A validação é o processo que fornece o *feedback* necessário aos desenvolvedores de um dado algoritmo ou equação na tentativa de contribuir no seu melhoramento e acurácia tanto sob condições ou situações normais como nas peculiares, através de análises de incertezas. Infelizmente, a distribuição destes estudos é muito desigual, apresentando uma grande fração do planeta Terra ainda descoberta. Em particular, estimativas para a Caatinga no Brasil não foi devidamente validada por medições em campo. A Caatinga é constituída por um complexo vegetacional que abrange uma área de 735.000 km² (SANTOS et al., 2011), e possui mais de 1.000 espécies de plantas vasculares distribuídas como um mosaico de florestas tropicais sazonalmente secas (SDTF) e vegetação arbustiva.

O Índice de Área Foliar reflete as variações da fotossíntese da vegetação, da transpiração e do balanço energético da superfície terrestre (BONAN, 1995), e de várias características climatológicas, hidrológicas e processos biogeoquímicos. IAF é geralmente um dos principais moduladores em modelos de produtividade ecossistêmica, em especial o modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*; ARNOLD et al., 1998). IAF também desempenha um papel importante na caracterização da superfície, e pode em muitos casos, auxiliar em decisões políticas sobre a gestão do meio ambiente (COHEN; JUSTICE, 1999). Dessa forma, medições precisas de IAF se tornam cada vez mais necessárias. O objetivo deste estudo foi avaliar a eficiência e calibração de dados de área foliar do sensor MODIS utilizando modelos ajustados, e medições em campo em áreas de Caatinga.

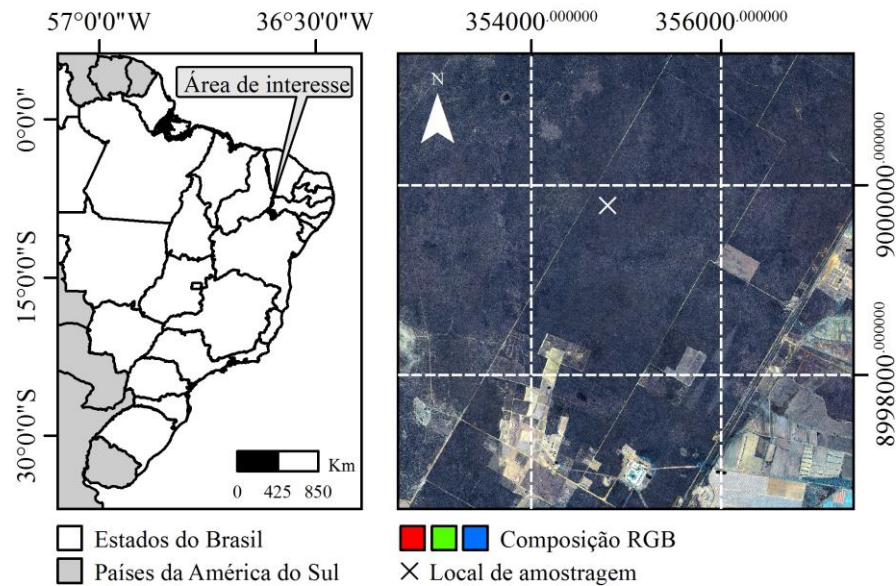
Metodologia

Área de estudo

Todos os dados foram coletados em uma área experimental de Caatinga (≈ 600 ha; Figura 1) localizada na estação de pesquisa da Embrapa Semi-Árido do estado de Pernambuco, Brasil (40°W 19' 16", 9°S 02' 33"; 350 m). A vegetação na área consiste em arbustos e árvores com 5 m de altura em média. As espécies dominantes são *Poincianella microphylla* (Mart. ex

G. Don), *Croton conduplicatus* (Kunth), *Bauhinia cheilantha* (Bong.), *Manihot pseudoglaziovii* (Pax & Hoffman) e *Commiphora leptophloeos* (Mart.) (SOUZA et al., 2015). O tipo climático é BSwH (Köopen) ou semiárido, com estação chuvosa entre os meses de Janeiro a Abril. Precipitação média anual de 510 mm e temperatura média anual de 26,2 °C.

Figura 1 - Mapa de localização da área experimental de Caatinga localizada na estação de pesquisa da Embrapa Semi-Árido do estado de Pernambuco, onde as medições foram realizadas.



Medições em campo

Foram realizadas medições de duas formas diferentes para os anos de 2011 a 2016. A primeira utilizou o analisador de área foliar Accupar (Decagon Devices, Inc. 2365 NE Hopkins Ct. Pullman, WA 99163-USA), o qual estima IAF com base nos ecos da luz pelo dossel em vários ângulos. O Accupar possui um ceptômetro linear com 80 sensores capazes de medir RFA (Radiação Fotossinteticamente Ativa; 400-700 nm) em um intervalo de 0 a 2.500 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$, e é considerado um método de estimativa não destrutiva. Essas medições foram realizadas semanalmente de 2013 a 2016. A segunda forma utilizou dados de torre micrometeorológica instalada na área de estudo. A torre possui 16 m de altura, e quatro sensores quantum capazes de mensurar RFA (LI-190SA; Li-cor, Nebraska, USA): dois instalados acima do dossel, sendo um deles voltado para cima (RFA_T; RFA de topo), e o outro para baixo (RFA_R; RFA refletida), e outros dois em diferentes posições abaixo do dossel (RFA_B; RFA de base). Todos esses sensores estão conectados a um sistema de aquisição de dados (CR1000; Campbell Scientific Inc., Logan, Utah, USA) programado para realizar medidas a cada 30 segundos e armazenar médias em intervalos de 30 minutos.

Medições por sensoriamento remoto

Os produtos MCD15A3/A2 foram baixados para todo o período de 2011 a 10/2016 em <https://earthexplorer.usgs.gov/>. As 537 imagens foram escalonadas de 0,1 m² de área foliar/m² de solo para a unidade correta (m² de área foliar/m² de solo) através da multiplicação de todos os pixels por 0,1 usando a biblioteca GDAL (*Geospatial Data Abstraction Library*). Para estimar outros índices de IAF, foram baixados produtos MOD09GA de refletância da superfície para o período de 2011 a 09/2016 em <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Estes produtos foram corrigidos para a unidade correta através da multiplicação de todos os pixels por 0,0001 usando a biblioteca GDAL (*Geospatial Data Abstraction Library*), e foram submetidos à aplicação das equações propostas por Bastiaanssen (1998; Eq. 1), Galvêncio et al. (2013; Eq. 2) e Machado (2014; Eq. 3), em paralelo a um processo iterativo para a formação de novos índices.

$$IAF = - \frac{\ln \left[(0,69 - IVAS) / 0,59 \right]}{0,91} \quad (1)$$

$$IAF = e^{1,426 + \frac{-0,542}{IVDN}} \quad (2)$$

$$IAF = 0,102e^{5,341 \times IVDN} \quad (3)$$

Onde IVDN (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) e IVAS (Índice de Vegetação Ajustado ao Solo) podem ser obtidos respectivamente pelas equações 4 e 5, nas quais p_1 , p_2 e L são as refletâncias nas faixas do infravermelho próximo (NIR em inglês) e vermelho, e a constante do efeito do solo, que é igual a 0,1.

$$IVDN = \left(\frac{p_2 - p_1}{p_2 + p_1} \right) \quad (4)$$

$$IVAS = \frac{(1 + L)(p_2 - p_1)}{L + p_2 + p_1} \quad (5)$$

O produto MOD09GA fornece 7 bandas em um produto nível L2G diário, incluindo valores de refletância de resolução espacial de 500 m, nas faixas do visível ($p_1 = 620-670$ nm; $p_3 = 459-479$ nm; $p_4 = 545-565$ nm), infravermelho próximo ($p_2 = 841-876$ nm; $p_5 = 1230-1250$ nm), e infravermelho médio ($p_6 = 1628-1652$ nm; $p_7 = 2105-2155$ nm). Esses dados são disponibilizados já corrigidos para as interferências atmosféricas, tais como gases atmosféricos

e aerossóis. A iteração para a criação de índices consiste em calcular vários coeficientes de determinação (r^2) e regressões lineares ($Y = a + bX$), variando apenas os valores de X , uma vez que Y são valores independentes mensurados em campo. Os modelos são criados a partir das combinações das bandas ($p_1, p_2, p_3, \dots, p_7$), suas transformações ($p, 1/p, \ln(p), \log_{10}(p), \sqrt{p}, p^2, e^p$), e operações matemáticas (+, -, *, /). O número de modelos avaliados pode ser calculado utilizando a seguinte função, onde nc é o número de parâmetros inseridos no modelo:

$$f(nc) = C_{\begin{bmatrix} p_1 & p_2 & p_3 \\ p_4 & p_5 & p_6 \\ p_7 \end{bmatrix} + (nc-1)}^{nc} \times C_{\begin{bmatrix} p & 1/p & \ln(p) \\ \log_{10}(p) & \sqrt{p} & p^2 \\ e^p \end{bmatrix} + (nc-1)}^{nc} \times \begin{cases} 1, & nc = 1 \\ C_{\begin{bmatrix} + & - \\ \times & \div \end{bmatrix} + (nc-2)}^{(nc-1)}, & nc \geq 2 \end{cases} \quad (6)$$

Análise e validação de dados

A covariância entre os produtos MCD15 e derivados do MOD09GA, e as estimativas de IAF da torre e Accupar foram analisadas usando regressões lineares e não-lineares. A normalidade e a homocedasticidade de todos os dados de IAF foram testados com o teste de Shapiro Wilk e Brown Forsyth, respectivamente (ZAR, 1996). As diferenças entre os valores absolutos simulados e observados foram avaliadas utilizando os valores máximos e mínimos. Todas as análises estatísticas foram realizadas com o software R (v3.2.3; FOX, 2005), e os resultados foram considerados significativos quando $p \leq 0,05$. Os gráficos foram plotados com o programa Veusz v1.24; SANDERS, 2015). Para a validação dos modelos derivados do MOD09GA foi utilizada a técnica de validação cruzada do tipo Monte Carlo, com 91 diferentes tamanhos de amostragem variando de 5% a 95% do total de dados com intervalo de 1% avaliados, e avaliados com a série de equações abaixo (Eq. 7). A covariância em cada limite foi representada como a média de 50 repetições aleatórias.

$$r^2 = \left(\frac{\text{cov}(x, y)}{\sqrt{\text{var}(x) \text{var}(y)}} \right)^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \right)^2, \quad (7)$$

$$b = \frac{\text{cov}(x, y)}{\text{var}(x)},$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x}$$

Resultados e discussão

Estimativas de IAF obtidas dos pixels das imagens MODIS da área de Caatinga em que a torre está localizada foram comparadas com as observações *in loco* realizadas por seus equipamentos. A relação entre os dados observados e os produtos MCD15A3/A2 apresentaram coeficientes de determinação (r^2) de 0,34 (Figura 2A) e 0,60 (Figura 3A) respectivamente. A baixa correlação dos produtos MCD15A3 em relação aos MCD15A2 sugere que nas composições de 4 dias a proporção de dados de boa qualidade para áreas de Caatinga é menor que nas composições de 8 dias. Estas composições são criadas a partir do maior valor observado, e quanto mais valores disponíveis para a determinação do IAF de cada pixel, maior a probabilidade de este ser um valor preciso, pois dados obtidos por sensoriamento remoto sofrem constantemente influência de uma série de fatores atmosféricos, tais como vapor de água, cobertura de nuvens e aerossóis, e nem sempre apresentam boa qualidade (WENZE YANG et al., 2006). Quanto à correlação com MCD15A2, esse valor é comparável ao encontrado por Galvêncio et al. (2013; $r^2 = 0,60$) ao comparar, na mesma área, dados mensurados com Accupar com índices criados a partir de espectrorradiometria, que foi posteriormente validado com imagens IKONOS (1 m de resolução espacial; GALVÍNCIO et al., 2013) e TM/Landsat 5 (30 m de resolução espacial; MACHADO, 2014). Em ambos os produtos MCD15A3/A2, os dados de IAF foram subestimados, o que é contrário à tendência de superestimativas nos produtos MODIS-IAF identificada em muitos locais no mundo (HEINSCH et al., 2006). Estes desvios influenciam não só diretamente nas observações de IAF, mas em outros produtos derivados dessas medições (*e.g.* MOD16; MU et al., 2007).

Quanto à análise de resíduos, nenhum dos produtos MCD15A3/A2 violou as premissas de linearidade e homocedasticidade, o que indica que ambos são lineares e extrapoláveis. Contudo, observa-se que MCD15A2 se apresenta mais linear com o valor inclinação da reta próximo a um (Figuras 2B e 3B), *i.e.* completa linearidade das estimativas MODIS em relação aos valores observados. Além disso, apesar dos produtos MCD15A3 (0,59%) e MCD15A2 (0,45%) apresentarem uma porcentagem de resíduos positivos maior que negativos, os valores absolutos dos resíduos foram maiores dentre os resíduos negativos (MCD15A3 = $-0,65 \text{ m}^2/\text{m}^2$; MCD15A2 = $-0,34 \text{ m}^2/\text{m}^2$) em relação aos positivos (MCD15A3 = $0,45 \text{ m}^2/\text{m}^2$; MCD15A2 = $0,42 \text{ m}^2/\text{m}^2$). A média geral dos resíduos dos produtos MCD15A3 foi 39% maior (MCD15A3 = $0,53 \text{ m}^2/\text{m}^2$; MCD15A2 = $0,38 \text{ m}^2/\text{m}^2$) que o MCD15A2, indicando que MCD15A3 produz mais variância que MCD15A2.

Figura 2 - (A) Modelo de regressão dos dados de área foliar do produto MCD15A3 versus valores de área foliar mensurados com torre meteorológica ($\circ$) e Accupar ($\square$) em uma área de Caatinga na Embrapa Semiárido, a qual é uma estação de pesquisa do estado de Pernambuco, Brasil, para os anos de 2011 a 2016; e (B) resíduos versus valores padronizados da regressão

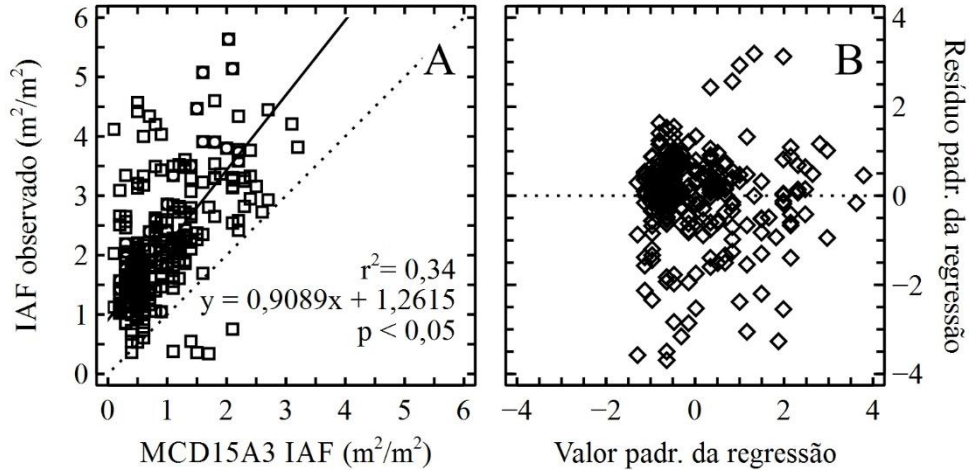
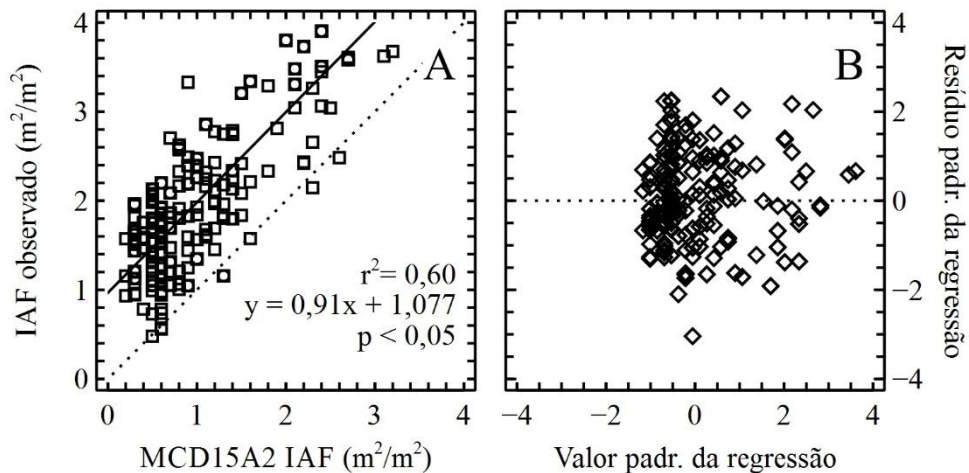


Figura 3 - (A) Modelo de regressão dos dados de área foliar do produto MCD15A2 versus valores de área foliar mensurados com torre meteorológica ($\circ$) e Accupar ($\square$) em uma área de Caatinga na Embrapa Semiárido, a qual é uma estação de pesquisa do estado de Pernambuco, Brasil, para os anos de 2011 a 2016; e (B) resíduos versus valores padronizados da regressão



Além dos produtos MODIS prontos, um segundo ensaio foi realizado, derivando novos índices com os produtos MOD09GA e as equações propostas por Bastiaanssen (1998), Galvêncio et al. (2013) e Machado (2014), das quais a primeira apresentou o menor valor de r^2 (Tabela 1), o que já era esperado, pois a equação foi desenvolvida utilizando apenas seis tipos de uso da terra (algodão, milho, soja, trigo, árvores frutíferas, e vegetais invernais), e nenhum desses se assemelha com a Caatinga. Por outro lado, a equação proposta por Machado (2014), que apresentou o melhor desempenho, foi desenvolvida em uma área de Caatinga, utilizando uma imagem do sensor TM/Landsat 5 combinada com 54 medições de IAF realizadas em

campo com o equipamento LAI-2200, e o estudo apresentou um r^2 de 0,91.

Tabela 1 - Breve resumo dos valores mínimos e máximos dos intervalos de valores obtidos de cada modelo derivado de equação previamente publicada, e os coeficientes de determinação de todos os modelos de Índice de Área Foliar avaliados.

Modelo	Referência	Coeficiente de determinação (r^2)*	Valores min. e máx. do modelo (m^2/m^2)**
$y = -\frac{\ln[(0,69 - IVAS)/0,59]}{0,91}$	BASTIAANSSEN, 1998	0,59	0,04 a 3,28
$y = e^{1,426 + \frac{-0,542}{NDVI}}$	GALVÍNCIO et al., 2013	0,64	0,07 a 2,07
$y = 0,102e^{5,341 \times NDVI}$	MACHADO, 2014	0,65	0,20 a 6,61

*Significante a $\alpha = 0,05$

**Comparável com os valores observados: 0,55 a 3,44

Contudo, como essas equações, muitas outras desenvolvidas no Brasil, se utilizam apenas de índices de vegetação para estudar aspectos complexos da vegetação. Desta forma, vários parâmetros biofísicos são tratados de forma menos rigorosa (*e.g.* conteúdo hídrico da vegetação, biomassa, área foliar total) (ANDERSON et al., 2008; JOINER et al., 2011; SILVA et al., 2013), e isso diminui drasticamente a precisão da análise remota, principalmente quando se trata de mosaicos vegetacionais em grande escala (GOWER; KUCHARIK; NORMAN, 1999) como a Caatinga. Por isso, em um terceiro ensaio foram realizadas iterações para o desenvolvimento de novos índices, que resultou em 183 equações com r^2 maior que 0,7 quando correlacionados com os dados observados; e destes foram selecionados os três primeiros índices para serem apresentados neste estudo (Tabela 2).

Esses três modelos foram criados e não apenas validados como os produtos MCD15A3/A2 e os derivados de equações previamente publicadas, então suas validações se tornaram imperativas para avaliar a confiabilidade dos modelos. O método de validação foi validação cruzada do tipo Monte Carlo, e a Eq. 8 apresentou valores máximo ($r^2 = 0,78$) e mínimo ($r^2 = 0,72$) equiparáveis às outras duas Eq. 9 e 10 que obtiveram r^2 máximos de 0,80 e 0,78 e mínimos de 0,71 e 0,72 respectivamente. O desvio padrão de 0,008 de r^2 foi o mesmo para todas as três equações, indicando que todos os três modelos são confiáveis. Na literatura, a validação cruzada simples (retirando apenas uma amostra) é a mais popular, embora seja assintomaticamente incorreta no sentido que tende a superajustar o modelo. Ou seja, somente na calibração obtém-se excelente resultados (SHAO, 1993). Na validação a eficiência do modelo cai drasticamente. Na figura 4, pode-se observar que variando de 5% a 95% dos dados retirados para validação, os valores de r^2 tendem a se estabilizar, mas o mais importante é que em todas as três validações não há uma tendência clara de aumento dos valores em relação à

retirada de dados da calibração dos modelos, indicando que esses modelos são altamente robustos, e reforçando a qualidade de seus dados de entrada.

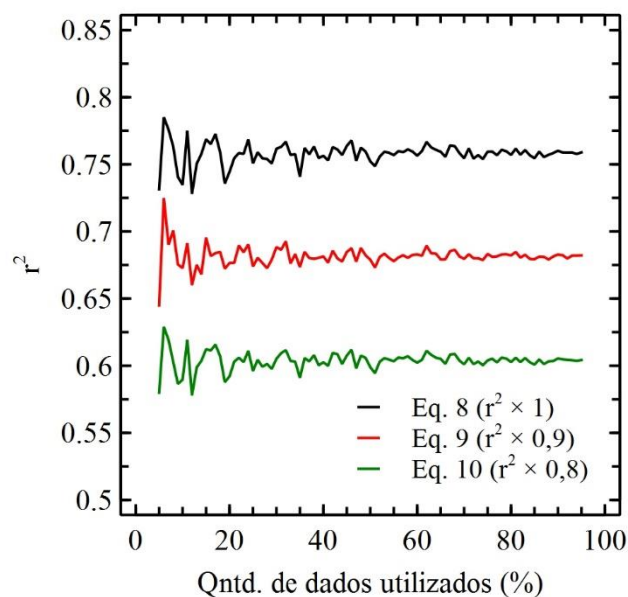
Tabela 2 - Breve resumo dos valores mínimos e máximos dos intervalos de valores obtidos de cada modelo criado através do processo iterativo utilizando dados do MOD09GA., e os coeficientes de determinação de todos os modelos de Índice de Área Foliar avaliados.

Modelo		Coefficiente de determinação (r^2)*	Valores min. e máx. do modelo (m^2/m^2)**
Eq. 8	$y = -25,838(\sqrt{p_1} + p_3^2 - \sqrt{p_4}) + 2,354$	0,75	0,87 a 3,44
Eq. 9	$y = -3,8673\left(\frac{p_1/\sqrt{p_2}}{\sqrt{p_4}}\right) + 4,3275$	0,75	0,78 a 3,17
Eq. 10	$y = -0,2013\left(e^{p_3} + \log_2 p_4 / \log_{10} p_1\right) + 3,8408$	0,73	0,46 a 3,22

*Significante a $\alpha = 0,05$

**Comparável com os valores observados: 0,55 a 3,44

Figura 4 - Validação cruzada dos modelos criados através do processo iterativo utilizando dados do MOD09GA.



A principal componente do sensoriamento remoto é a radiação eletromagnética (REM), que se propaga sobre a forma de ondas, na velocidade da luz (≈ 299.7920 km/s), e com diferentes frequências e comprimentos de onda; e embora ilimitada em termos de frequências e comprimentos de onda, REM é comumente representada em forma de espectro eletromagnético, que é a porção de REM observada, na natureza e utilizada em tecnologias, dividida em várias bandas ou faixas de comprimentos de onda. Neste estudo, os índices selecionados utilizam bandas do visível (vermelho, verde e azul) e NIR, e a quantidade de

energia a ser refletida ou absorvida em cada uma dessas bandas varia de acordo com as propriedades físico-químicas do alvo. Todo corpo reflete ou emite a radiação eletromagnética nos diversos comprimentos de onda de forma diferente, e o resultado é uma curva de refletância ou assinatura espectral. Esse conjunto de interações únicas permite não só distinguir alvos, mas quantificá-los. Por exemplo, no caso da vegetação, as folhas absorvem predominantemente energia da região do azul-vermelho, e refletem da região do verde, devido à interação com clorofilas e carotenoides. As faixas do verde e NIR podem ser consideradas faixas de alta refletância, sendo o infravermelho consideravelmente menos transparente que o verde em decorrência do maior espalhamento interno de radiação na folha (NOVO, 2008).

Do ponto de vista ótico, a quantidade de energia absorvida e refletida pelas folhas possibilita estimar a concentração de pigmentos e a complexidade do mesófilo, e isso acontece porque a estrutura interna das folhas apresenta descontinuidades refrativas entre as paredes celulares e seus espaços intercelulares, e dispersa o fluxo radiante incidente, permitindo que uma grande parte dele seja refletido pela epiderme para ser observada por sensores. Do ponto de vista fisiológico, clorofilas são moléculas orgânicas necessárias para a fotossíntese. Estes pigmentos captam radiação solar e transferem para centros de reação onde se inicia a fotossíntese (BLACKBURN, 2007), e suas concentrações foliares determinam o potencial fotossintético, o estado nutricional das plantas (GAMON et al., 1995), e consequentemente o vigor foliar. Todos os três modelos desenvolvidos utilizaram o vermelho e o verde, variando apenas em relação ao azul e NIR. Embora dois deles tenham apresentado valores iguais de r^2 , o que utiliza apenas bandas do visível apresentou mais proximidade em relação aos valores máximos e mínimos absolutos, com valores máximos iguais aos de referência. A grande contribuição desse modelo, se devidamente calibrado, é permitir estimativas de IAF por sensores que só captam energia no visível, como por exemplo câmeras de monitoramento fenológico e de imagens aéreas. Contudo, muitos estudos apontam para a qualidade duvidosa dos dados na faixa do azul adquiridos por sensoriamento remoto, pois o azul possui alta interação com aerossóis, e sofrendo muita interferência atmosférica. Inclusive, por isso a energia no azul tem sido utilizada por muitos pesquisadores, em ambientes úmidos e de vegetação densa, para redução de possíveis ruídos na faixa do vermelho. Em contrapartida, a vegetação reflete cerca de metade do fluxo radiante incidente na faixa do infravermelho próximo. Essa refletância é principalmente determinada pelo arranjo das camadas de células no mesófilo das folhas e estrutura da copa (ZHAO et al., 2007), e esta é uma banda muito sensível à biomassa e área foliar.

Conclusão

Neste estudo, foram comparados dados de IAF mensurados em campo com IAF obtido por sensoriamento remoto a partir de produtos (i) MCD15A3/A2 com valores de r^2 na composição de 4 dias = 0,34 e 8 dias = 0,6; (ii) derivados do MOD09GA com valores de r^2 de 0,59 utilizando a equação proposta por Bastiaanssen (1998), 0,64 com a de Galvêncio et al. (2013), e 0,65 com Machado (2014); (iii) iterações utilizando todas as sete bandas do MOD09GA para o desenvolvimento de novos índices foram realizadas, resultando em três equações: duas com $r^2 = 0,75$, e uma com $r^2 = 0,73$. Todos os três modelos desenvolvidos utilizaram o vermelho e o verde, variando apenas em relação ao azul e NIR. A grande contribuição desse modelo, se devidamente calibrado, é permitir estimativas de IAF por sensores que só captam energia no visível, como por exemplo câmeras de monitoramento fenológico. Contudo, recomendamos o modelo vermelho-verde-NIR, pois muitos estudos apontam para a qualidade duvidosa dos dados na faixa do azul adquiridos por sensoriamento remoto, que possui alta interação com aerossóis, sofrendo muita interferência atmosférica. Além disso, também se recomenda o uso dos produtos MCD15A2 para monitorar a Caatinga, pois são dados disponibilizados gratuitamente em <https://earthexplorer.usgs.gov/>, e produziram estimativas satisfatórias comparáveis a outros modelos publicados desenvolvidos em áreas de Caatinga. Acreditamos que este estudo contribui para a avaliação de dados de IAF através de técnicas de sensoriamento remoto, o que pode proporcionar uma melhor compreensão da dinâmica vegetacional do ecossistema de Caatinga, que poderá ser referência mundial no futuro para alterações ecológicas devido a mudanças climáticas.

Referências

- ANDERSON, M. et al. A thermal-based remote sensing technique for routine mapping of land-surface carbon, water and energy fluxes from field to regional scales. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 12, p. 4227–4241, 15 dez. 2008.
- ARNOLD, J. G. et al. Large-area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model development. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 34, n. 1, p. 73–89, fev. 1998.
- BASTIAANSEN, W. **Remote sensing in water resources management: the state of the art**. IX ed. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute (IWMI), 1998.
- BIUDES, M. S. et al. Ground and remote sensing-based measurements of leaf area index in a transitional forest and seasonal flooded forest in Brazil. **International Journal of Biometeorology**, v. 58, n. 6, p. 1181–1193, 14 ago. 2014.

- BLACKBURN, G. A. Hyperspectral remote sensing of plant pigments. **Journal of experimental botany**, v. 58, n. 4, p. 855–67, jan. 2007.
- BONAN, G. B. Land-Atmosphere interactions for climate system Models: coupling biophysical, biogeochemical, and ecosystem dynamical processes. **Remote Sensing of Environment**, v. 51, n. 1, p. 57–73, jan. 1995.
- COHEN, W. B.; JUSTICE, C. O. Validating MODIS Terrestrial Ecology Products. **Remote Sensing of Environment**, v. 70, n. 1, p. 1–3, out. 1999.
- FENSHOLT, R.; SANDHOLT, I.; RASMUSSEN, M. S. Evaluation of MODIS LAI, fAPAR and the relation between fAPAR and NDVI in a semi-arid environment using in situ measurements. **Remote Sensing of Environment**, v. 91, n. 3–4, p. 490–507, jun. 2004.
- FOX, J. The {R} {C}ommander: A Basic Statistics Graphical User Interface to {R}. **Journal of Statistical Software**, v. 14, n. 9, p. 1–42, 2005.
- GALVÍNCIO, J. D. et al. LAI Improved to Dry Forest in Semiarid of the Brazil. **International Journal of Remote Sensing Application**, v. 3, n. 4, p. 193, 2013.
- GAMON, J. A. et al. Relationships Between NDVI, Canopy Structure, and Photosynthesis in Three Californian Vegetation Types. **Ecological Applications**, v. 5, n. 1, p. 28–41, 1 fev. 1995.
- GOWER, S. T.; KUCHARIK, C. J.; NORMAN, J. M. Direct and Indirect Estimation of Leaf Area Index, fAPAR, and Net Primary Production of Terrestrial Ecosystems. **Remote Sensing of Environment**, v. 70, n. 1, p. 29–51, out. 1999.
- HEINSCH, F. A. et al. Evaluation of remote sensing based terrestrial productivity from MODIS using regional tower eddy flux network observations. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 44, n. 7, p. 1908–1925, jul. 2006.
- JOINER, J. et al. First observations of global and seasonal terrestrial chlorophyll fluorescence from space. **Biogeosciences**, v. 8, n. 3, p. 637–651, 8 mar. 2011.
- JUSTICE, C. et al. Developments in the “validation” of satellite sensor products for the study of the land surface. **International Journal of Remote Sensing**, v. 21, n. 17, p. 3383–3390, jan. 2000.
- KNYAZIKHIN, Y. et al. Estimation of vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from atmosphere-corrected MISR data. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 103, n. D24, p. 32239–32256, 27 dez. 1998.
- MACHADO, C. C. C. **Alterações na superfície do Parque Nacional do Catimbau (PE-Brasil): consolidação dos aspectos biofísicos na definição dos indicadores ambientais do bioma Caatinga**. [s.l.] Universidade Federal de Pernambuco, 2014.

- MU, Q. et al. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. **Remote Sensing of Environment**, v. 111, n. 4, p. 519–536, dez. 2007.
- NOVO, E. M. L. DE M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 3. ed. São Paulo-SP: Edgard Blücher, 2008.
- PRIVETTE, J. . et al. The EOS Prototype Validation Exercise (PROVE) at Jornada. **Remote Sensing of Environment**, v. 74, n. 1, p. 1–12, out. 2000.
- PRIVETTE, J. . et al. Early spatial and temporal validation of MODIS LAI product in the Southern Africa Kalahari. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1–2, p. 232–243, nov. 2002.
- RODRIGUEZ, R. et al. A process-based model to evaluate site quality for Eucalyptus nitens in the Bio-Bio Region of Chile. **Forestry**, v. 82, n. 2, p. 149–162, 1 abr. 2009.
- SANDERS, J. **Veusz - A Scientific Plotting Package**Garching, GERMax Planck Institute, , 2015. Disponível em: <<http://home.gna.org/veusz/>>
- SANTOS, J. C. et al. Caatinga: the scientific negligence experienced by a dry tropical forest. **Tropical Conservation Science**, v. 4, n. 3, p. 276–286, 2011.
- SHAO, J. Linear Model Selection by Cross-Validation. **Journal of the American Statistical Association**, v. 88, n. 422, p. 486, jun. 1993.
- SILVA, B. B. DA et al. Determinação por sensoriamento remoto da produtividade primária bruta do perímetro irrigado São Gonçalo - PB. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 1, p. 57–64, mar. 2013.
- SOUZA, L. S. B. DE et al. Radiation balance in Caatinga ecosystem preserved for a year drought in semiarid Pernambucano. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n. 1, p. 41–55, 2015.
- SPRINTSIN, M. et al. Evaluating the performance of the MODIS Leaf Area Index (LAI) product over a Mediterranean dryland planted forest. **International Journal of Remote Sensing**, v. 30, n. 19, p. 5061–5069, 22 set. 2009.
- TIAN, Y. et al. Multiscale analysis and validation of the MODIS LAI product I. Uncertainty assessment. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 3, p. 414–430, dez. 2002a.
- TIAN, Y. et al. Multiscale analysis and validation of the MODIS LAI product II. Sampling strategy. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 3, p. 431–441, dez. 2002b.
- WANG, Y. et al. Evaluation of the MODIS LAI algorithm at a coniferous forest site in Finland. **Remote Sensing of Environment**, v. 91, n. 1, p. 114–127, maio 2004.
- WENZE YANG et al. MODIS leaf area index products: from validation to algorithm

improvement. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 44, n. 7, p. 1885–1898, jul. 2006.

ZAR, J. H. **Biostatistical Analysis**. 3. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996.

ZHAO, D. et al. A comparative analysis of broadband and narrowband derived vegetation indices in predicting LAI and CCD of a cotton canopy. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 62, n. 1, p. 25–33, maio 2007.

**APÊNDICE D - Análise Espaço-Temporal do Balanço Hídrico na Bacia do Rio Pontal
utilizando o Modelo SWAT**

Resumo

Mudanças na cobertura e uso da terra têm desencadeado mudanças drásticas cobertura vegetal em várias partes o planeta Terra. No Brasil, um dos ecossistemas mais degradados é a Caatinga, embora políticas venham sendo estabelecidas para proteger maximizando o uso dos recursos naturais. Modelar as alterações a nível de bacia tem se tornado cada vez mais importante. Um dos modelos atuais mais utilizado é o SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*). Este estudo tem como objetivo analisar o balanço hídrico da Caatinga na bacia do rio Pontal utilizando o SWAT. A calibração foi realizada a nível de evapotranspiração e Índice de Área Foliar. Os dados de evapotranspiração e Índice de Área Foliar foram adquiridos através dos produtos MOD021KM e MOD09GA do sensor MODIS. Foram encontrados valores de Nash-Sutcliffe para ET (0,61 e 0,63: calibração e validação) e IAF (0,67 e 0,78) equiparáveis a outros estudos em vegetações similares. A análise do balanço hídrico da Caatinga apresentou escoamento superficial apenas quando os valores de precipitação ultrapassaram os 63 mm com uma máxima de 20 mm. Na Caatinga, 85,03% da água da chuva é evapotranspirada, contra 2,45% para escoamento superficial, 3,58% para percolação, e 0,41% para fluxo de base. A compreensão do balanço hídrico, em especial em florestas nativas de regiões áridas e semiáridas, é fundamental para a resolução de muitos problemas relacionados à agricultura e ao planejamento municipal, uma vez que estas áreas naturalmente servem de tampão para o escoamento superficial, que está intimamente relacionado com perda de safras inteiras e deslizamentos de terra em áreas residenciais.

Palavras-chaves: Caatinga, Evapotranspiração, Índice de Área Foliar, MODIS, SWAT.

Abstract

Changes in land use have triggered drastic cover changes in many parts of the planet Earth. In Brazil, one of the most degraded ecosystems is the Caatinga, although policies are being established to protect while maximizing the use of natural resources. Modeling changes at basin level has become increasingly important. Currently, one of the most used models is SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*). This study aims to analyze the water balance of the Caatinga in the Pontal River basin using SWAT. Calibration for evapotranspiration and Leaf Area Index levels. The evapotranspiration data and Leaf Area Index were acquired from MOD021KM and MOD09GA products of MODIS sensor. Nash-Sutcliffe values for ET (0.61 and 0.63: calibration and validation) and LAI (0.67 and 0.78) were found similar to other studies

in dry vegetations. The Caatinga water balance analysis showed surface runoff only when precipitation values exceeded 63 mm with a maximum of 20 mm. In the Caatinga, 85.03% of rainwater is evapotranspired against 2.45% for surface runoff, 3.58% for percolation, and 0.41% for return flow. Understanding the water balance, especially in native forests in arid and semi-arid regions, is fundamental for solving many problems related to agriculture and municipal planning, since these areas naturally serve as a buffer for the surface runoff, which is intimately related to loss of entire harvests and landslides in residential areas.

Keywords: Caatinga, Evapotranspiration, Leaf Area Index, MODIS, SWAT.

Introdução

Mudanças na cobertura e uso da terra têm desencadeado mudanças drásticas na cobertura vegetal em várias partes do planeta Terra, afetando assim o clima, principalmente a nível regional, por meio de distúrbios nos balanços hídrico e de energia (FOLEY et al., 2005; KALNAY; CAI, 2003). Além disso, a humanidade também vem transformando o ciclo hidrológico para fornecer água doce para irrigação, indústria e consumo doméstico (VOROSMARTY, 2000). Os insumos antropogênicos de nutrientes e poluentes atmosféricos agora ultrapassam as fontes naturais e têm efeitos generalizados na qualidade da água e nos ecossistemas (BENNETT; CARPENTER; CARACO, 2001). A conversão de uso causa grandes perdas, modificações e fragmentação de habitats, além da degradação do solo e da água (PIMM; RAVEN, 2000), o que afeta vários microclimas, distribuição espacial e composição de espécies, interações de espécies, estrutura trófica de comunidades e movimento de indivíduos ou migração.

No Brasil, um dos ecossistemas mais degradados é a Caatinga, que está entre os mais ameaçados do planeta Terra, com altas taxas de conversão da vegetação nativa em agricultura, atualmente ultrapassando 60% de sua área original (MENEZES et al., 2012). A Caatinga é constituída por um complexo vegetacional que abrange uma área de 735.000 km² (SANTOS et al., 2011), contendo mais de 1.000 espécies de plantas vasculares distribuídas como um mosaico de florestas tropicais sazonalmente secas (SDTF) e vegetação arbustiva. A Caatinga é não só reconhecida como um dos "Últimos lugares selvagem da Terra", mas também como uma das 37 "Áreas silvestres do mundo" (ALBUQUERQUE et al., 2012). No estado de Pernambuco, vêm sendo estabelecidas políticas pelo governo de Pernambuco, e.g. Lei nº 14.090, de 17 de junho de 2010, que visam regulamentar, e empregar esforços e capital financeiro em pesquisas

para determinar a máxima eficiência de exploração dos recursos naturais em longo prazo, levando em consideração todas as suas implicações hidroecológicas, afim de assegurar a biodiversidade e os serviços ambientais prestados pela Caatinga, e por isso modelar as alterações que vem acontecendo a nível de bacia tem se tornado cada vez mais importante.

Modelos hidrológicos simulam matematicamente a dinâmica de um sistema natural particular, permitindo inclusive realizar projeções. Nos últimos anos, vários modelos hidrológicos foram criados, evoluindo do método racional (MULVANY 1850 *apud* TODINI, 2007) para os modelos empíricos distribuídos (WIGMOSTA; VAIL; LETTENMAIER, 1994). Estes modelos diferem bastante em termos de complexidade. Alguns são simples e modelam apenas os atributos do balanço hídrico no solo, *i.e.* escoamento superficial, percolação, fluxo de base e evapotranspiração, como SHETRAN (EWEN; PARKIN; O'CONNELL, 2000) e TOPMODEL (BEVEN; KIRKBY, 1979); outros são complexos e modelam todos os principais processos físicos associados ao crescimento da vegetação, movimento da água no solo e mudanças climáticas em diferentes escalas espaciais e temporais como o SWAT (ARNOLD et al., 1998). Atualmente, modelos complexos são os mais utilizados para administrar reservas naturais em bacias hidrográficas, avaliar impactos antrópicos, e planejar o uso da água garantindo que as várias demandas humanas e naturais sejam atendidas. Um dos modelos atuais mais utilizados é o SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*). O SWAT é capaz de modelar o balanço hídrico mesmo quando há baixa disponibilidade de dados (NDOMBA; MTALO; KILLINGTVEIT, 2008), e também em grandes bacias hidrográficas (BRESSIANI et al., 2015a; MALAGÒ et al., 2015; NUNES; SEIXAS; PACHECO, 2008).

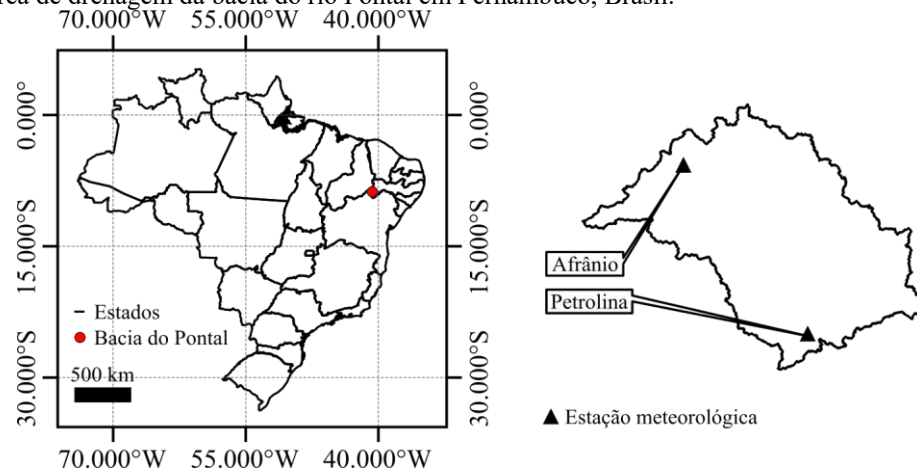
Marchant et al. (1999), há 20 anos atrás, já apontavam as consequências do desmatamento de florestas nativas: erosão do solo, lixiviação e perda de nutrientes, compactação do solo; para o ciclo hidrológico: menor interceptação de chuvas, e evapotranspiração (ET), e em alguns locais impactos climáticos que causaram uma redução na precipitação (P). Entretanto, pouco se sabe dos impactos hidrológicos que o desmatamento da Caatinga vem causando. Dessa forma, afim de elucidar esses mecanismos, este estudo tem como objetivo analisar o balanço hídrico da Caatinga na bacia do rio Pontal utilizando o SWAT, incluindo nele a dinâmica da cobertura e uso da terra dos últimos anos, e suprimindo a baixa disponibilidade de dados mensurados em campo com dados adquiridos através de técnicas de sensoriamento remoto.

Metodologia

Área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Pontal está localizada em uma região oeste do estado de Pernambuco, entre as coordenadas 08° 19' 00" S, 40° 11' 42" W e 09° 13' 24" S, 41° 20' 39" W, e ocupa uma área de 6.057 km², 6,12% do estado (Figura 1). A área de drenagem envolve quatro municípios, dos quais apenas o município de Afrânio está totalmente inserido na bacia hidrográfica. O clima na região é semiárido, com temperatura média anual de 27°C, e as chuvas são irregulares e concentradas em 2 ou 3 meses do ano, com possibilidade de chuvas intensas num período de apenas 24 horas. A vegetação predominante é a Caatinga, mas observou-se uma rápida expansão da agricultura irrigada de uva, manga e goiaba, o que ameaça gravemente muitas áreas de florestas nativas.

Figura 1 - Área de drenagem da bacia do rio Pontal em Pernambuco, Brasil.



Características do modelo SWAT

O modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*, disponibilizado livremente em <http://swat.tamu.edu/>) vem gradualmente ampliando suas fronteiras, pois detém um perfil de modelagem versátil aos interesses tanto de empresas privadas como de órgãos públicos (BRESSIONI et al., 2015b). Atuais aplicações do SWAT incluem os continentes africano (AWOTWI; YEBOAH; KUMI, 2015; BOSSA et al., 2012; FARAMARZI et al., 2013; POUYAN NEJADHASHEMI A, 2011; WELDERUFAEL; WOYESSA; EDOSSA, 2013) e europeu (KOCH; BAUWE; LENNARTZ, 2013; MALAGÒ et al., 2015; OEURNG; SAUVAGE; SÁNCHEZ-PÉREZ, 2011; SELLAMI et al., 2013; TAYLOR; HE; HISCOCK, 2016), e os Estados Unidos da América (BIEGER et al., 2015; CHIEN; YEH; KNOUFT, 2013; MAREK et al., 2016a, 2016b). O SWAT é um modelo semi-distribuído no qual uma bacia hidrográfica alvo é dividida em várias sub-bacias, as quais por sua vez são subdivididas em unidades de resposta hidrológica (*Hydrological Response Units*; HRUs) que consistem em áreas

homogêneas em relação ao uso e cobertura da terra, relevo e características do solo. As HRUs são representadas no modelo como a porcentagem da área da sub-bacia, e podem ou não ser espacialmente explícitas, dependendo do número delas por sub-bacia. O modelo SWAT possui cinco principais componentes: hidrologia, solo, clima, vegetação e manejo da terra; e é capaz de prover resultados em quatro resoluções temporais: anual, mensal, diário e sub-diário (ARNOLD et al., 2012). O componente hidrológico é o seu principal modulador, impactando diretamente no crescimento vegetal, e nos movimentos de sedimentos, nutrientes e pesticidas. O componente climático requer dados de precipitação diária, temperatura do ar máxima/mínima, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa do ar. O SWAT pode tanto ler estes dados através de arquivos de texto como simulá-los com base em estatísticas mensais de dados observados. O SWAT utiliza um único modelo para simular a dinâmica de crescimento das plantas em todos os usos, distinguindo apenas vegetações anuais e perenes. Detalhes sobre as equações utilizadas no modelo foram descritos por Arnold et al. (1998).

O ciclo hidrológico no SWAT é baseado na equação do balanço hídrico: Eq. 1, onde SW_f e SW_i são quantidade de água no solo final e inicial respectivamente (mm), t é tempo (dias), P é precipitação (mm), Q_s é escoamento superficial (mm), ET é evapotranspiração (mm), W_s é percolação (mm) e Q_{gw} é fluxo de base (mm).

$$SW_f = SW_i + \sum_{t=1}^t (P - Q_s - ET - W_s - Q_{gw}) \quad (1)$$

O escoamento superficial é simulado com um modelo empírico, que desde a década de 1950 vem sendo utilizado frequentemente. Este modelo se chama curva SCS (de *Soil Conservation Service*), e é resultado de mais de 20 anos de estudos envolvendo relações chuva e escoamento em pequenas bacias hidrográficas nos EUA. Seu objetivo é ser uma base única para estimar escoamento superficial em diferentes coberturas da terra e tipos de solo (RALLISON; MILLER, 1981).

$$Q_s = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (2)$$

Onde I_a é a abstração inicial que inclui armazenamento superficial, interceptação e infiltração antes do escoamento (mm), comumente aproximada para 0,2 no numerador e 0,8 no

denominador; e S é o parâmetro de retenção da água (mm), que varia espacialmente de acordo com o tipo solo, cobertura da terra, manejo e declividade, e é dado pela Eq. 3, onde CN é a curva número.

$$S = 25,4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (3)$$

Evapotranspiração é o mecanismo primário pelo qual a água é removida de uma bacia hidrográfica no SWAT, e pode ser definida como a soma de todos os processos pelo qual a água na superfície terrestre é convertida para vapor d'água, incluindo evaporação da água retida no dossel da vegetação, transpiração das plantas e evaporação da água no solo. Antes de calcular esses componentes, o SWAT estima a quantidade de água interceptada pelo do dossel que varia em função do Índice de Área Foliar, e a quantidade de água que alcança o solo através do seguinte algoritmo:

$$can_r, P_s = f \left(can = can_{mx} \left(\frac{IAF}{IAF_{mx}} \right), can_i, P \right) \begin{cases} \text{se } P \leq can - can_i: \\ \quad can_r = can_i + P \\ \quad P_s = 0 \\ \text{se } P > can - can_i: \\ \quad can_r = can \\ \quad P_s = P - (can - can_i) \end{cases} \quad (4)$$

Onde can_r é a quantidade final de água retida no dossel (mm), P_s é a quantidade de precipitação que atinge a superfície do solo (mm), can é a quantidade máxima de água que pode ficar retida dentro no dossel (mm), can_{mx} é a quantidade máxima de água que pode ficar retida dentro do dossel quando este está completamente desenvolvido (mm), IAF é o Índice de Área Foliar, e can_i é a quantidade de água armazenada dentro do dossel no início da simulação (mm). Sabendo can_r , a quantidade de água armazenada no dossel ao final da simulação (mm; can_f), e quantidade de can_r evaporada (ET_{can}) podem ser calculadas pela Eq. 5, onde ET_0 é a evapotranspiração potencial (mm). Neste estudo, a ET_0 foi calculada pelo método de Hargreaves et al. (1985) (Eq. 6).

$$can_f, ET_{can} = f(ET_0, can_r) \begin{cases} se ET_0 \leq can_r : \\ ET_{can} = ET_0 = ET \\ can_f = can_r - ET_0 \\ \\ se ET_0 > can_r : \\ ET_{can} = can_r \\ can_f = 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$ET_0 = 0.0023R_a(T_{mx}T_{mn})^{0,5}(T + 17,8) \quad (6)$$

Em que R_0 é a radiação extraterrestre ($MJ m^{-2} dia^{-1}$), T_{mx} é a temperatura máxima do ar ($^{\circ}C$), T_{mn} é a temperatura mínima do ar ($^{\circ}C$), e T é a temperatura média do ar ($^{\circ}C$). Uma vez que ET_0 e ET_{can} foram determinadas, o SWAT calcula a quantidade de transpiração ($E_{t,mx}$; mm; Eq. 7) e de evaporação da água do solo (E'_s ; mm; Eq. 9) utilizando uma abordagem similar à descrita por Richtie (1972).

$$E_{t,mx} = f(ET_0, IAF) \begin{cases} se 0 \leq IAF \leq 3 : \\ E_t = \frac{ET_0 IAF}{3} \\ \\ se IAF > 3 : \\ E_t = ET_0 \end{cases} \quad (7)$$

$$W_{P(z)} = f(z) = \frac{E_{t,mx}}{[1 - \exp(-\beta_w)]} \left[1 - \exp\left(-\beta_w \frac{z}{z_{root}}\right) \right]$$

$$W'_{PL} = (W_{P(B)} - W_{P(T)}) - W_d \times EPCO$$

$$W''_{PL} = f(AWC_L = FC_L - WP_L, SW_L) =$$

$$\begin{cases} se SW_L < (0,25 \times AWC_L): \\ W''_{PL} = W'_{PL} \log \left[5 \left(\frac{SW_L}{(0,25 \times AWC_L)} - 1 \right) \right] \\ \\ se SW_L \geq (0,25 \times AWC_L): \\ W''_{PL} = W'_{PL} \end{cases} \quad (8)$$

$$E_t = \sum_{c=1}^n \min[W''_{PL}; (SW_L - WP_L)]$$

Contudo, o valor para transpiração calculado por Eq. 7 é a quantidade de transpiração que

ocorrerá somente quando a planta estiver crescendo sob condições ideais. Em condições comuns, a $E_{t, \text{mx}}$ pode variar devido à falta de água no perfil do solo. Nesse caso, a absorção de água e transpiração da planta, agora E_t , é calculada pela série de equações Eq. 8, onde $W_{P(z)}$ é a absorção potencial de água pelas plantas (mm) a uma dada profundidade z (mm); $E_{t, \text{mx}}$ aqui é considerada como sendo a transpiração máxima; β_w é um parâmetro de distribuição do uso da água, definido por padrão como 10 no modelo SWAT; Z_{root} é a profundidade da raiz no solo (mm); $W_{P(B)}$ e $W_{P(T)}$ são $W_{P(z)}$, onde z é o limite inferior e superior de cada camada do solo (mm) respectivamente; W_d é a demanda para absorção de água (mm); EPCO é o fator de compensação de absorção, onde quanto mais próximo de 1, maior é a proporção de W_d que pode ser atendida pelas camadas inferiores no solo; SW_L é a quantidade de água no solo (mm); AWC_L é a capacidade do solo de reter água (mm); FC_L é a quantidade de água no solo na capacidade de campo (mm), e WP_L é a quantidade de água no solo no ponto de murcha permanente (mm). Além disso, vale ressaltar que Eq. 8 possui melhoramentos do SWAT para refletir melhor a absorção de água do solo pela plantas em caso de baixa disponibilidade hídrica do substrato, (i) permitindo que as camadas de solo inferiores compensem a falta de água nas camadas superiores para atingir a demanda hídrica das plantas (com W'_{PL}), e (ii) levando em consideração que à medida que a água no solo diminui, se torna cada vez mais difícil para a planta extraí-la (com W''_{PL}).

$$E'_s = \frac{E_s = ET_0 \exp(-5 \times 10^{-5} CV)}{1 + \exp(-5 \times 10^{-5} CV)} \quad (9)$$

$$E_{s(z)} = f(z) = E'_s \frac{z}{z + \exp(2,374 - 0,00713z)}$$

$$E_{sL} = (E_{s(B)} - E_{s(T)}) \times ESCO$$

$$W''_{PL} = f(AWC_L = FC_L - WP_L, SW_L) =$$

$$\begin{cases} \text{se } SW_L < FC_L: \\ E'_{sL} = E_{sL} \exp \left[\frac{2,5(SW_L - FC_L)}{FC_L - WP_L} \right] \\ \\ \text{se } SW_L \geq FC_L: \\ E'_{sL} = E_{sL} \end{cases} \quad (10)$$

$$E''_{sL} = \min[E'_{sL}; 0,8(SW_L - WP_L)]$$

A quantidade de água evaporada do solo é impactada pelo grau de sombreamento, como

descrito em Eq. 9, onde E_s é a evaporação máxima da água do solo (mm), e CV é a biomassa e o resíduo acima do solo (kg ha^{-1}). Além disso, o modelo de evaporação de água do solo do SWAT recebe os mesmos melhoramentos que o de absorção e transpiração descritos na série de equações Eq. 10, onde $E_{s(z)}$ é a demanda evaporativa (mm) em uma dada profundidade z (mm); E_{sL} é a demanda evaporativa para uma dada camada L (mm); $E_{s(B)}$ e $E_{s(T)}$ são $E_{s(z)}$, onde z é o limite inferior e superior de cada camada do solo (mm) respectivamente; ESCO é o coeficiente de compensação de evaporação do solo, e segue os mesmos princípios descritos para o EPCO; e por fim E'_{sL} e E''_{sL} são as versões a W'_{PL} e W''_{PL} em termos de evaporação de água do solo, e são dadas em mm. A percolação é calculada por:

$$W_s = W_p + W_c \quad (11)$$

Onde W_p é percolação da água para a camada mais baixa do solo (mm), e W_c é a água que passa do limite inferior do solo devido ao fluxo de base (mm). O fluxo de base no SWAT é simulado conforme Hooghoudt (1940) *apud* Hattermann et al. (2004) com a Eq. 12, onde K_{gw} é a condutividade hidráulica do aquífero (mm/day), L_{gw} é a distância da divisão de sub-bacias pelo sistema de águas subterrâneas até o canal principal (m), e h_{wt} é a altura do lençol freático em metros.

$$Q_{gw} = h_{wt} \left(\frac{8000K_{gw}}{L_{gw}^2} \right) \quad (12)$$

Etapa 1: dados de entrada no modelo

O SWAT requer dados observados em quatro componentes essenciais: relevo, clima, solos, e uso e cobertura da terra. **Relevo:** dados espaciais do relevo foram obtidos pela base de dados da EMBRAPA Relevo (<https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/relevobr/>), que disponibiliza produtos corrigidos da missão da NASA SRTM (*Shuttle radar topography mission*), a qual tem como objetivo mapear a topografia da superfície terrestre. Os dados deste modelo em formato de imagem, cujos pixels possuem resolução espacial de 90 m, e valores de altitude (m). **Clima:** os dados climáticos da série, *i.e.* precipitação, radiação global, umidade relativo do ar ou temperatura do ponto de orvalho, temperatura média do ar, temperaturas máximas e mínimas do ar, e velocidade do vento, foram obtidos para os anos de 2005 a 2010

através da base de dados do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia; <http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/inicio.php>). Em seguida, foram selecionadas apenas as estações de Petrolina (40W 47' 56", 9S 22' 48"; 548,57 m) e Afrânio (41W 00' 18", 8S 30' 58"; 382,27 m) (Figura 1), ambas localizadas no estado de Pernambuco. **Solos:** dados espaciais das características dos solos foram obtidos através de dois bancos de dados: (i) o mapeamento espacial dos solos veio do Zoneamento Agroecológico do Estado de Pernambuco (ZAPE). Esses dados são disponibilizados em formato de mapa com escala 1:250.000 no site <http://www.uep.cnps.embrapa.br/zafe/>, em seguida (ii) os dados relativos às características físico-químicas de cada tipo de solo foram da base de dados da EMBRAPA Solos (https://www.bdsolos.cnptia.embrapa.br/consulta_publica.html). **Uso e cobertura da terra:** os dados iniciais de uso e cobertura foram obtidos através de imagens MSS/Landsat 1-3, ETM+/Landsat 7 e OLI/Landsat 8 com série de 1975–2013 disponíveis em <https://earthexplorer.usgs.gov/> e www.dgi.inpe.br/CDSR/. Os produtos foram baixados com base na qualidade radiométrica e na ausência de cobertura de nuvens (<10%), e foram criados oito mapas anuais de cobertura terrestre (1975, 1993, 2001, 2003, 2005, 2007, 2009 e 2013), utilizando 42 imagens e a biblioteca GDAL (*Geospatial Data Abstraction Library*) disponível em <http://www.gdal.org/>. Detalhes do processamento podem ser consultados no Capítulo 1 deste trabalho.

Etapa 2: geração do projeto

Nesta etapa todos os dados foram formatados para entrada no modelo SWAT, e o projeto foi criado com o auxílio da ferramenta ArcSWAT disponível para o software ArcGIS em <http://swat.tamu.edu/software/arcsbat/>. Os mapas de uso foram processados utilizando a ferramenta SWAT2009_LUC_64bit.exe, o qual é um préprocessador que implementa a dinâmica da cobertura da terra no SWAT. Detalhes sobre o software podem ser obtidos em Pai e Saraswat (2011). Cada projeto corresponde a uma única bacia. ArcSWAT foi configurado para delimitar sub-bacias ou áreas de drenagem de aprox. 10.000 hectares, gerando 59 subbacias e 285 HRUs (*Hydrological Response Units*); *Range Brush* foi o tipo vegetacional disponível no banco de dados do SWAT, e escolhido para representar a Caatinga, devido a sua proximidade em termos de características físicas. Inicialmente os dados disponíveis no banco de dados referente ao *Range Brush* não foram modificados, exceto a classe da vegetação que foi modificada para *Warm season annual legume* afim de evitar a dormência da vegetação de acordo com a duração do dia, e melhorar a fixação de nitrogênio presente em muitas espécies na Caatinga; e por fim, o SWAT foi configurado para simular mensalmente 7 anos, iniciando

em 2004 até 2010 com dois anos separados somente para o período de aquecimento. Nesse ano de aquecimento, SWAT simulou os dados climático utilizando a ferramenta de *weather generator*.

Etapa 3: calibração e validação do modelo

Software: O modelo foi calibrado utilizando o software SWAT-CUP (*SWAT Calibration and Uncertainty Programs*). O SWAT-CUP é um software que integra as saídas do modelo SWAT e cinco algoritmos de calibração, dos quais o SUFI2 (*Sequential Uncertainty Fitting 2*; ABBASPOUR; JOHNSON; VAN GENUCHTEN, 2004) se destaca pela velocidade e acurácia no processamento, que consiste em três grandes etapas: modificar os valores das entradas do SWAT, rodar o SWAT, e extrair os valores de saída desejados. Detalhes sobre o funcionamento do SWAT-CUP são descritos por Rouholahnejad et al. (2012). **Dados observados:** A calibração ocorreu a nível de evapotranspiração e Índice de Área Foliar. Os dados de evapotranspiração e Índice de Área Foliar foram adquiridos através dos produtos MOD021KM e MOD09GA do sensor MODIS, disponíveis em <https://search.earthdata.nasa.gov/> e <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Os produtos baixados foram processados utilizando a biblioteca GDAL, e corrigidos segundo descrito e recomendado nos Capítulos 2 e 3 deste trabalho.

Análises estatísticas

O desempenho do modelo foi obtido a partir dos valores observados e simulados, utilizando-se os seguintes métodos estatísticos: coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NS) (ZAR, 1996). O NS varia de ∞ para 1 (NASH; SUTCLIFFE, 1970), onde 1 indica uma simulação perfeita (Eq. 13), e pode ser obtido através da Eq. 6, onde Q_o e Q_m são os valores simulados e observados respectivamente, $\bar{Q}_o$ é a média aritmética dos dados observados, e T é o número de amostras ou observações.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \quad (13)$$

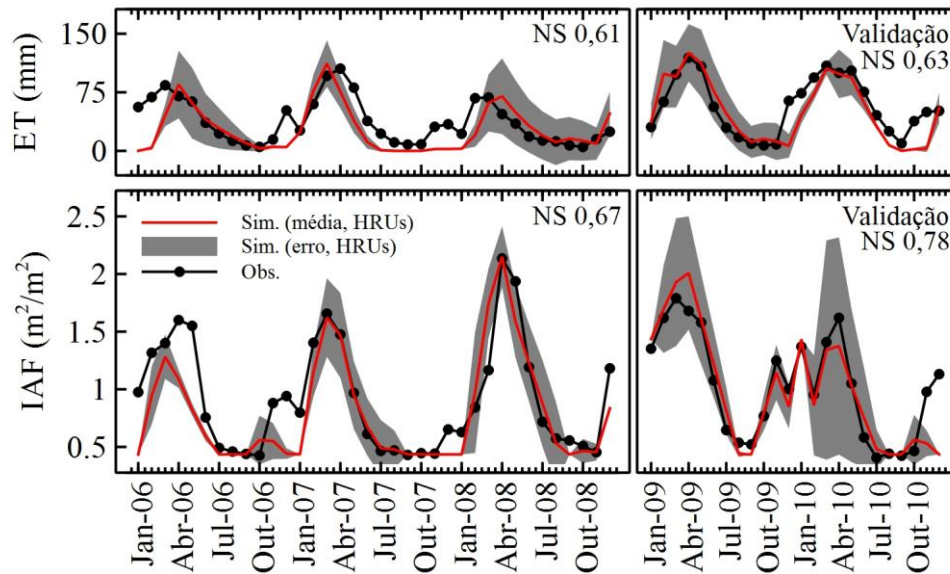
Resultados e discussão

Análise da calibração do modelo

Os parâmetros de entrada mais sensíveis estão apresentados na Tabela 1. Esse conjunto

de parâmetros é similar ao de outras análises de sensibilidade realizadas em ambientes áridos e semiáridos. O modelo SWAT é altamente sensível a parâmetros relacionados ao balanço hídrico, em especial o CN2 do escoamento superficial (T. L. VEITH et al., 2010), e ao crescimento vegetal (STRAUCH; VOLK, 2013) quando a bacia é caracterizada por intensos e inconsistentes eventos de precipitação.

Figura 2 - ET e IAF simulados para a Caatinga comparados com dados MODIS corrigidos.



Neste estudo IAF foi calibrado primeiro, e embora o IAF naturalmente possua alta covariância com ET, foram necessários novos parâmetros relacionados estritamente a ET para obter uma calibração satisfatória. Strauch e Volk (2013) encontraram a mesma dificuldade na calibração de ET. Vários parâmetros relacionados ao IAF foram incluídos na calibração. Os primeiros foram os parâmetros de manejo da vegetação (HEAT_UNITS, HUSC e HARVEFF) para garantir que os períodos de crescimento e diminuição da cobertura vegetal iriam acontecer no momento certo no ano, e na proporção adequada. Em seguida parâmetros intrínsecos da vegetação foram adicionados para aproximar o banco de dados referente à vegetação *Range Brush* já disponível no SWAT às características da Caatinga. ALAI_MIN foi utilizado para garantir que o IAF não caia para zero após o final da estação de crescimento. O uso desse parâmetros é muito importante, e mitiga uma das grandes limitações do SWAT, principalmente em ambientes tropicais, que é utilizar um único modelo para simular a dinâmica de crescimento das plantas em todos os usos, distinguindo apenas vegetações anuais e perenes (ARNOLD et al., 1998). Alguns pesquisadores já vem apontando para a dificuldade que o modelo possui em simular a dinâmica vegetal em ambientes de clima de tropical, e consequentemente a

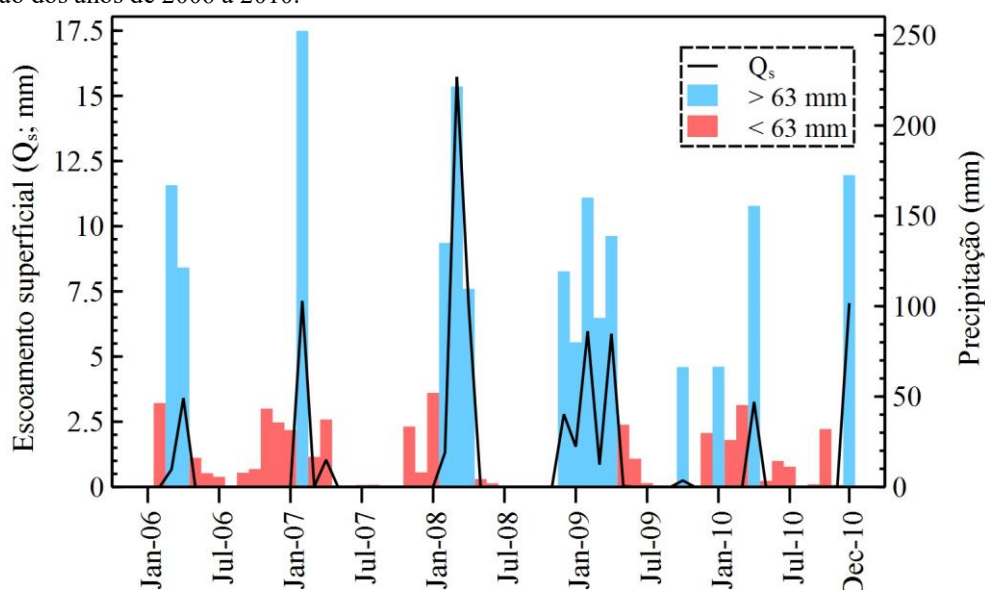
evapotranspiração (P. D. WAGNER et al., 2011; STRAUCH; VOLK, 2013). Inclusive, em alguns casos, essa deficiência não permite a calibração do modelo adequadamente. Em função disso, Strauch e Volk (2013) criaram uma versão própria, modificando o código fonte do SWAT, permitindo que o crescimento funcione corretamente. Além disso, foram selecionados quatro dos seis parâmetros que modulam o crescimento vegetal no SWAT (MAREK et al., 2016b): FRGRW1, BLAI, LAIMX1, LAIMX2. Essas modificações permitem ajustar a forma da curva da função do crescimento em relação ao período analisado. A eficiência do uso da água também foi ajustada, através de parâmetros de uso da água do solo (EPCO, ESCO) e de acesso à água subterrânea (GW_ REVAP e REVAPMN). No entanto, apesar destes ajustes, os valores simulados e observados mensais de IAF e ET indicaram para ambos uma leve subestimação, como mostrado na Figura 2. Neste estudos os valores de Nash-Sutcliffe encontrados para ET (0,61 e 0,63, para calibração e validação respectivamente) e IAF (0,67 e 0,78) são equiparáveis àqueles encontrados por Strauch e Volk (2013) para o Cerrado brasileiro quando calibraram e validaram ET (0,62 e 0,71) e IAF (0,68 e 0,72).

Tabela 1 - Parâmetros de SWAT usados para calibrações de ET e IAF.

Parâmetro	Saída	Descrição	Inicial	Calibrado
CN2 (*,mgt)	ET	Curva-número de escoamento.	31-87	28,14-78,99
HEAT_UNITS (*,mgt)	IAF	Total de unidades de calor necessárias para a planta atingir a maturidade.	1800	4446
HUSC (*,mgt)	IAF	Fração de unidades de calor acumuladas para o iniciar a estação crescimento da vegetação (%).	0,15	0,74
HARVEFF (*,mgt)	IAF	Eficiência da colheita (%).	0	0,67
ALAI_MIN (plant,dat)	IAF	Índice mínimo de área foliar que a vegetação pode atingir durante o período de dormência (m ² /m ²).	0	0,43
BLAI (plant,dat)	IAF	Índice máximo de área foliar que a vegetação pode atingir (m ² /m ²).	2	2,27
LAIMX1 (plant,dat)	IAF	Fração do índice máximo de área foliar correspondente ao 1º ponto da curva de desenvolvimento da vegetação (%).	0,1	0,25
LAIMX2 (plant,dat)	IAF	Fração do índice máximo de área foliar correspondente ao 2º ponto da curva de desenvolvimento da vegetação (%).	0,7	0,81
BIO_E (plant,dat)	IAF	Biomassa/Energia ((kg/ha)/(MJ/m ²)).	34	43
FRGRW1 (plant,dat)	IAF	Fração da estação de crescimento da planta correspondente ao 1º, Ponto na curva ótima de desenvolvimento da área foliar (%).	0,05	0,07
CHTMX (plant,dat)	IAF	Altura máxima da copa (m).	1	3,42
ESCO (*,hru)	ET	Fator de compensação da evaporação de água do solo.	0,95	0,6
EPCO (*,hru)	ET	Fator de compensação da absorção de água pelas plantas.	1	0,24
CANMX (*,hru)	ET	Armazenamento máximo de água no	0	0,42

Parâmetro	Saída	Descrição	Inicial	Calibrado
		dossel (mm).		
GW_REVAP (*,gw)	ET	Coefficiente "revap" de água subterrânea.	0,02	0,04
REVAPMN (*,gw)	ET	Limite de profundidade da água no aquífero raso para ocorrer a "revap" (mm).	750	126
ALPHA_BF (*,gw)	ET	Fator alfa do fluxo de base (dias).	0,01	0,0125
SOL_AWC (*,sol)	ET	Capacidade de água disponível nas camadas do solo (%).	0,04-0,16	0,027-0,147
EVLAI (basins,bsn)	ET	Índice de área foliar em que não ocorre evapotranspiração (m ² /m ²).	3	0,21

Figura 3 - Escoamento superficial (Q_s) simulado para a Caatinga comparados com dados observados de precipitação dos anos de 2006 a 2010.

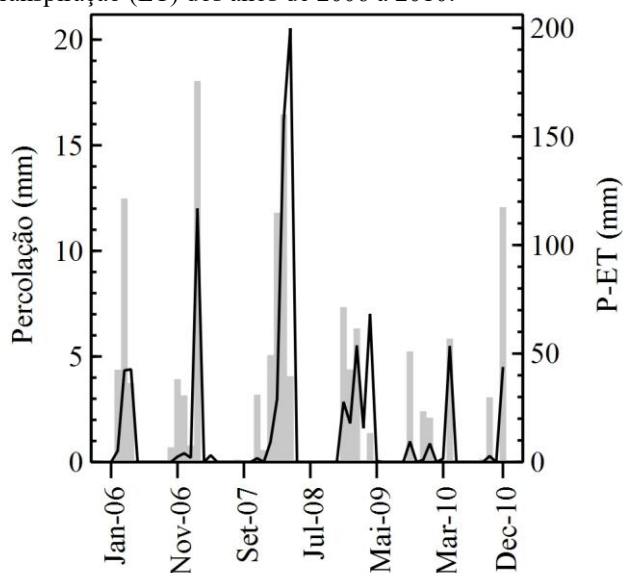


Avaliação espaço temporal do balanço hídrico

O escoamento superficial (Q_s) para período de 2006 a 2010 apresentou forte covariância com a precipitação ($r^2 = 0,71$; $p < 0,05$), embora em geral só tenha havido Q_s quando os valores de precipitação ultrapassaram os 63 mm de chuva (Figura 3). Q_s foi definido pela primeira vez por Horton (1933) como sendo a quantidade de água precipitada que não infiltra no solo, mas flui acima dele em riachos ou córregos, e é naturalmente dependente da intensidade das chuvas, sendo infiltração, por sua vez, passagem da água pela superfície do solo. A partir desse ponto, o movimento da água no solo para camadas mais profundas é conhecido como percolação (W_s). A ausência de Q_s na Caatinga em meses de baixa precipitação sugere que a capacidade de infiltração do solo não havia sido excedida pela taxa de precipitação. Horton (1933) atribui à infiltração uma máxima e uma mínima capacidade. A máxima capacidade diminui rapidamente após um evento de precipitação devido a mudanças na estrutura do solo, e aumento de sua umidade, se estabilizando gradualmente em valores mínimos. A capacidade mínima está

relacionada com as taxas de W_s . A estabilização só acontece devido a manutenção via W_s . Essa hipótese é corroborada por Pilgrim et al. (1988), quando dizem que em regiões áridas e semiáridas, o mecanismo governante do escoamento é o escoamento Hortoniano. Contudo, neste estudo W_s apresentou o mesmo padrão de ocorrência que Q_s ($r^2 = 0,82$; $p < 0,05$). Inclusive, em meses de baixa precipitação, W_s e Q_s não ocorreram. Valores positivos de W_s e Q_s só foram observados quando a precipitação foi maior que ET (Figura 4), e isso se deve ao forte controle que ET possui sobre o balanço hídrico como um todo em ambientes semiáridos. Pereira et al. (2014) encontraram resultados similares ao analisar componentes do balanço hídrico de uma bacia na costa leste brasileira.

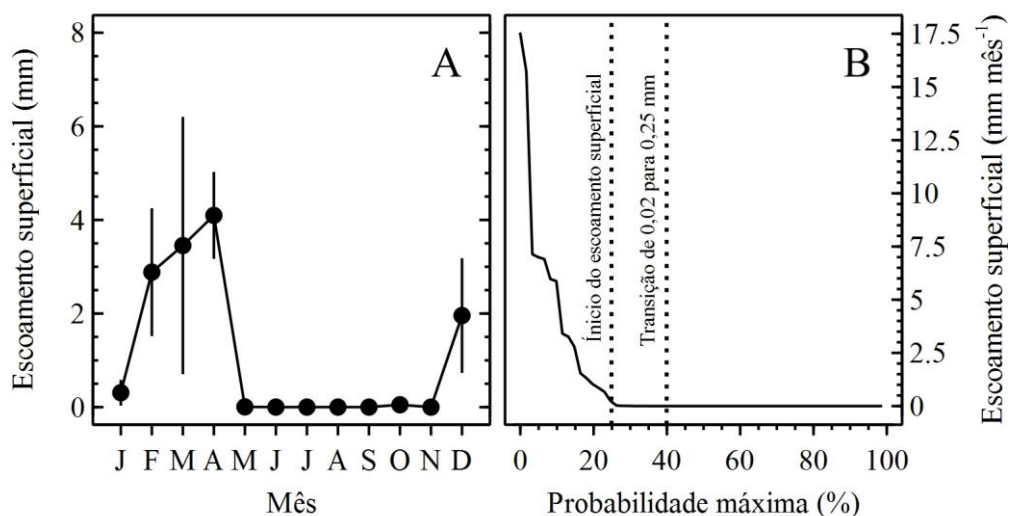
Figura 4 - Percolação (W_s) simulada para a Caatinga comparada com a diferença entre os dados observados de precipitação (P) e de evapotranspiração (ET) dos anos de 2006 a 2010.



Na Caatinga, os meses de fevereiro a abril apresentaram os maiores valores médios de escoamento, sendo abril o clímax da curva com $4,09 \pm 0,92$ mm de Q_s (Figura 5A), e o mês de maior variação foi março com 2,74 mm de desvio padrão. Este comportamento é enquadrado no período para o qual ocorre maiores volumes de precipitação pluviométrica, sobretudo entre março e abril, quando os principais sistemas atmosféricos que atuam na região, a Zona e Convergência Intertropical (ZCIT) e Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN), provocam linhas de instabilidade no Semiárido, resultando em chuvas intensas e bem concentradas (FERREIRA; MELLO, 2005). Inclusive, abril foi único mês em que Q_s supera W_s (+14%), sugerindo que este é o mês com maior probabilidade de não apenas a quantidade de chuvas (mm), mas a taxa de precipitação (mm/s) exceder a capacidade mínima de infiltração e a taxa

de percolação. A Figura 5B indica que há 40% de probabilidade de haver Q_s maior que 0,025 mm, e 25% para um Q_s maior que 0,25 mm. Em regiões semiáridas, a interceptação pela vegetação é frequentemente significativa, pois muitas das espécies são adaptadas ao baixo potencial hídrico do solo (PILGRIM; CHAPMAN; DORAN, 1988). Além disso, os resultados sugerem que para a ocorrência de escoamento na Caatinga é necessário um volume de precipitação pluvial médio mensal de 20 mm. A resposta do escoamento superficial a intensidade da precipitação está associada, entre outros fatores, ao potencial de interceptação de água da chuva pela vegetação. Tal resultado é ratificado pelo estudo conduzido por Izidio et al. (2013), que avaliaram o grau de interceptação de água precipitada na Caatinga. De acordo com os autores, para eventos de precipitação ≤ 10 mm, a vegetação é capaz de reter, em média, 27,6% deste volume. Para eventos ≥ 20 mm, a média de chuva interceptada cai para cerca de 14%, o que representa maior quantidade de água que entra no sistema para infiltrar, percolar ser transformada em escoamento superficial, entre outros.

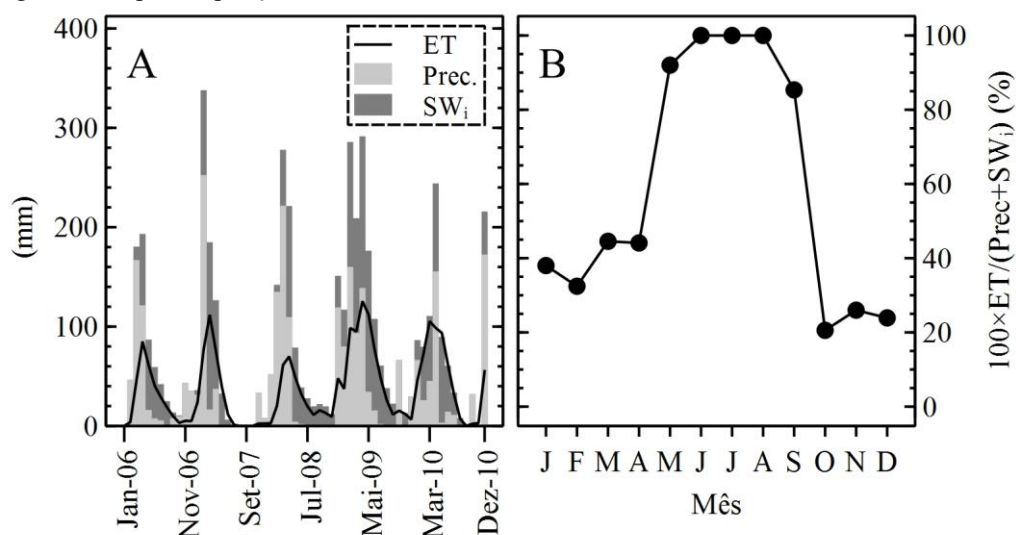
Figura 5 - (A) Média seguida de desvio padrão do escoamento superficial para o período de 2006 a 2010; e (B) curva de permanência do escoamento superficial mensal do período de 2006 a 2010.



No modelo SWAT, a água advinda da precipitação pode (i) atingir o solo ou (ii) ser interceptada pela vegetação. Ao cair no solo, a água infiltrará na superfície até o perfil do solo ou produzirá Q_s . A água infiltrada pode ser retida no solo e evapotranspirar ou lentamente percolar para camadas mais profundas. Ao ser interceptada pela vegetação, a água é retida e disponibilizada diretamente para evaporação. A interação entre vegetação e hidrologia é mais acentuada em regiões áridas do que em regiões úmidas (PILGRIM; CHAPMAN; DORAN, 1988). Em regiões semiáridas, ET é responsável pela maior parte do fluxo de água no balanço hídrico (MAREK et al., 2016a; PILGRIM; CHAPMAN; DORAN, 1988). Na Caatinga, 85,03%

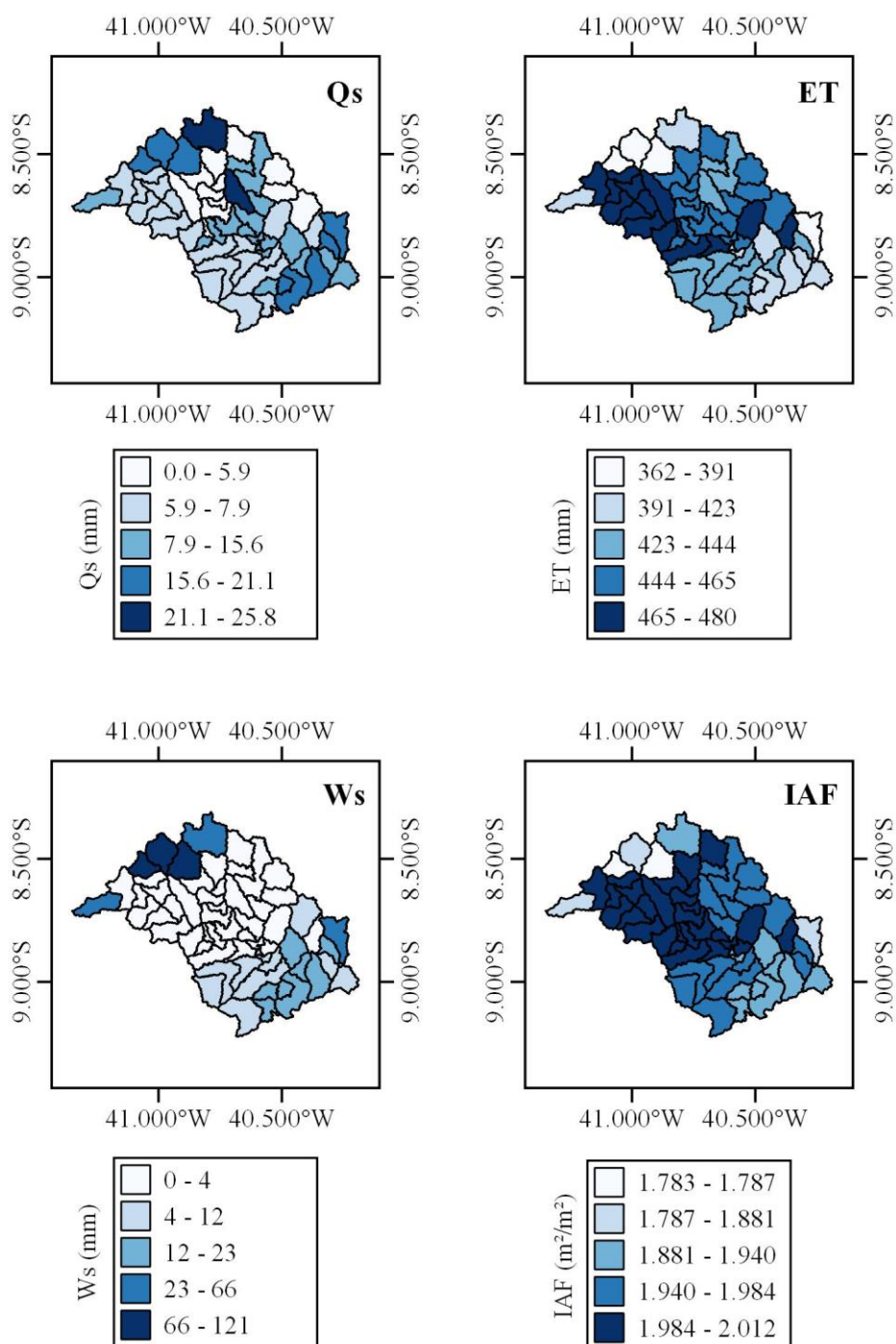
da água da chuva é evapotranspirada contra 2,45% para escoamento superficial, 3,58% para percolação, e apenas 0.41% para fluxo de base. A Figura 6A apresenta ET em uma escala mais elevada Q_s . Além disso, SW_i também está representado na figura, uma vez que a precipitação sozinha não reflete a quantidade de água disponível para evapotranspiração. A baixa contribuição da ET em períodos chuvosos é compensada no período seco onde quase 100% da água precipitada e já disponível no solo no início das simulações é evapotranspirada (Figura 6B).

Figura 6 - (A) Evapotranspiração (ET) simulada para a Caatinga comparada com dados observados de precipitação e simulados de quantidade de água no solo (SW_i) dos anos de 2006 a 2010; e (B) média mensal da contribuição da perda de água via evapotranspiração.



A respeito da análise espacial, a mesma dinâmica encontrada na análise temporal pode ser observada no mapeamento das variáveis do balanço hídrico (Figura 7). ET e IAF apresentaram padrão semelhante. No centro da bacia, a Caatinga é mais densa, e ET é maior. Variações em IAF afetam não só gradientes micrometeorológicos, *e.g.* luz, temperatura e umidade (MEYERS; PAW, 1987), mas também os fluxos de água entre a floresta e a atmosfera (MIRANDA et al., 2017). No geral, Q_s foi maior nas áreas norte e sul, onde a densidade da Caatinga também é menor. Esse aumento está associado a maiores valores de CN para as áreas com floresta esparsa, ou menor interceptação (PEREIRA et al., 2014). Normalmente, esse padrão seria inversamente proporcional a W_s devido à pobre infiltração de água no solo em áreas de vegetação esparsa, mas devido à forte influência de ET nas áreas de vegetação mais densa, a maior parte do volume de água é direcionado para atender as demandas de transpiração, resultante do alto consumo de água para trocas gasosas (AGAM; BERLINER, 2006), e de evaporação da água no solo, resultante da alta ET_0 .

Figura 7 - Espacialização da média temporal do escoamento superficial (Q_s), evapotranspiração (ET), percolação (W_s), e Índice de Área Foliar (IAF) simulados para a Caatinga nos anos de 2006 a 2010.



Conclusão

Neste estudo, o SWAT foi calibrado com dados adquiridos através de técnicas de sensoriamento remoto para suprir a baixa disponibilidade de dados mensurados em campo, apresentando valores de Nash-Sutcliffe obtidos para ET (0,61 e 0,63, para calibração e

validação respectivamente) e IAF (0,67 e 0,78) equiparáveis a outros estudos em vegetações similares. Além disso, foi realizada a análise do balanço hídrico da Caatinga na bacia do Rio Pontal utilizando o SWAT. O escoamento superficial (Q_s) para período de 2006 a 2010 apresentou forte covariância com a precipitação ($r^2 = 0,71$; $p < 0,05$), embora em geral só tenha havido Q_s quando os valores de precipitação ultrapassaram os 63 mm de chuva total e uma máxima mensal de 20 mm. Na Caatinga, 85,03% da água da chuva é evapotranspirada contra 2,45% para escoamento superficial, 3,58% para percolação, e apenas 0.41% para fluxo de base. A compreensão do balanço hídrico, em especial em florestas nativas de regiões áridas e semiáridas, é fundamental para a resolução de muitos problemas relacionados à agricultura e ao planejamento municipal, uma vez que estas áreas naturalmente servem de tampão para o escoamento superficial, que está intimamente relacionado com perda de safras inteiras e deslizamentos de terra em áreas residenciais. Além disso, floresta nativas também são conhecidas como exportadoras de água devido a suas altas taxas de infiltração em relação a outros usos da terra, e consequente maior fluxo de base.

Referências

- ABBASPOUR, K. C.; JOHNSON, C. A.; VAN GENUCHTEN, M. T. Estimating Uncertain Flow and Transport Parameters Using a Sequential Uncertainty Fitting Procedure. **Vadose Zone Journal**, v. 3, n. 4, p. 1340, 2004.
- AGAM, N.; BERLINER, P. R. Dew formation and water vapor adsorption in semi-arid environments—A review. **Journal of Arid Environments**, v. 65, n. 4, p. 572–590, jun. 2006.
- ALBUQUERQUE, U. P. et al. Caatinga Revisited: Ecology and Conservation of an Important Seasonal Dry Forest. **The Scientific World Journal**, v. 2012, p. 1–18, 2012.
- ARNOLD, J. G. et al. Large-area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model development. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 34, n. 1, p. 73–89, fev. 1998.
- ARNOLD, J. G. et al. Swat: Model Use, Calibration, and Validation. **Asabe**, v. 55, n. 4, p. 1491–1508, 2012.
- AWOTWI, A.; YEBOAH, F.; KUMI, M. Assessing the impact of land cover changes on water balance components of White Volta Basin in West Africa. **Water and Environment Journal**, v. 29, n. 2, p. 259–267, jun. 2015.
- BENNETT, E. M.; CARPENTER, S. R.; CARACO, N. F. Human Impact on Erovable Phosphorus and Eutrophication: A Global Perspective. **BioScience**, v. 51, n. 3, p. 227, 2001.
- BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin

hydrology / Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. **Hydrological Sciences Bulletin**, v. 24, n. 1, p. 43–69, mar. 1979.

BIEGER, K. et al. Development and Evaluation of Bankfull Hydraulic Geometry Relationships for the Physiographic Regions of the United States. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 51, n. 3, p. 842–858, jun. 2015.

BOSSA, A. Y. et al. Analyzing the effects of different soil databases on modeling of hydrological processes and sediment yield in Benin (West Africa). **Geoderma**, v. 173–174, p. 61–74, mar. 2012.

BRESSIANI, D. DE A. et al. Effects of different spatial and temporal weather data resolutions on the stream flow modeling of a semi-arid basin, Northeast Brazil. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 8, n. 3, p. 1–16, 2015a.

BRESSIANI, D. DE A. et al. Review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 8, n. 3, p. 1–27, 2015b.

CHIEN, H.; YEH, P. J.-F.; KNOUFT, J. H. Modeling the potential impacts of climate change on streamflow in agricultural watersheds of the Midwestern United States. **Journal of Hydrology**, v. 491, n. 1, p. 73–88, maio 2013.

EWEN, J.; PARKIN, G.; O'CONNELL, P. E. SHETRAN: Distributed River Basin Flow and Transport Modeling System. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 5, n. 3, p. 250–258, jul. 2000.

FARAMARZI, M. et al. Modeling impacts of climate change on freshwater availability in Africa. **Journal of Hydrology**, v. 480, p. 85–101, fev. 2013.

FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. DA S. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região Nordeste do Brasil e a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, n. 1, p. 15–28, 31 dez. 2005.

FOLEY, J. A. et al. Global consequences of land use. **Science (New York, N.Y.)**, v. 309, n. 5734, p. 570–574, 2005.

HARGREAVES, G. L.; HARGREAVES, G. H.; RILEY, J. P. Agricultural Benefits for Senegal River Basin. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 111, n. 2, p. 113–124, jun. 1985.

HATTERMANN, F. et al. Integrating groundwater dynamics in regional hydrological modelling. **Environmental Modelling and Software**, v. 19, n. 11, p. 1039–1051, 2004.

HORTON, R. E. The Rôle of infiltration in the hydrologic cycle. **Transactions, American Geophysical Union**, v. 14, n. 1, p. 446, 1933.

- IZIDIO, N. S. D. C. et al. Interceptação da chuva pela vegetação da caatinga em microbacia no semiárido cearense. **Revista Agro@mbiente On-Line**, v. 7, n. 1, p. 44, 2 maio 2013.
- KALNAY, E.; CAI, M. Impact of urbanization and land-use change on climate. **Nature**, v. 423, n. 6939, p. 528–531, 29 maio 2003.
- KOCH, S.; BAUWE, A.; LENNARTZ, B. Application of the SWAT Model for a Tile-Drained Lowland Catchment in North-Eastern Germany on Subbasin Scale. **Water Resources Management**, v. 27, n. 3, p. 791–805, 28 fev. 2013.
- MALAGÒ, A. et al. Comparing calibrated parameter sets of the SWAT model for the Scandinavian and Iberian peninsulas. **Hydrological Sciences Journal**, v. 60, n. 5, p. 1–19, 20 abr. 2015.
- MARCHANT, R.; KELLMAN, M.; TACKABERRY, R. Tropical Environments: The Functioning and Management of Tropical Ecosystems. **The Geographical Journal**, v. 165, n. 3, p. 331, nov. 1999.
- MAREK, G. W. et al. Estimating Evapotranspiration for Dryland Cropping Systems in the Semiarid Texas High Plains Using SWAT. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 52, n. 2, p. 298–314, abr. 2016a.
- MAREK, G. W. et al. Modeling long-term water use of irrigated cropping rotations in the Texas High Plains using SWAT. **Irrigation Science**, p. 1–13, 23 set. 2016b.
- MENEZES, R. S. C. et al. Biogeochemical cycling in terrestrial ecosystems of the Caatinga Biome. **Brazilian Journal of Biology**, v. 72, n. 3 Suppl, p. 643–53, 2012.
- MEYERS, T. P.; PAW, K. T. Modelling the plant canopy micrometeorology with higher-order closure principles. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 41, n. 1–2, p. 143–163, 1987.
- MIRANDA, R. D. Q. et al. Reliability of MODIS Evapotranspiration Products for Heterogeneous Dry Forest: A Study Case of Caatinga. **Advances in Meteorology**, v. 2017, n. 14, p. 1–14, 2017.
- N. PAI; D. SARASWAT. SWAT2009_LUC: A Tool to Activate the Land Use Change Module in SWAT 2009. **Transactions of the ASABE**, v. 54, n. 5, p. 1649–1658, 2011.
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282–290, abr. 1970.
- NDOMBA, P.; MTALO, F.; KILLINGTVEIT, A. SWAT model application in a data scarce tropical complex catchment in Tanzania. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, v. 33, n. 8–13, p. 626–632, jan. 2008.
- NUNES, J. P.; SEIXAS, J.; PACHECO, N. R. Vulnerability of water resources, vegetation productivity and soil erosion to climate change in Mediterranean watersheds. **Hydrological**

- Processes**, v. 22, n. October 2007, p. 3115–3134, 2008.
- OEURNIG, C.; SAUVAGE, S.; SÁNCHEZ-PÉREZ, J.-M. Assessment of hydrology, sediment and particulate organic carbon yield in a large agricultural catchment using the SWAT model. **Journal of Hydrology**, v. 401, n. 3–4, p. 145–153, maio 2011.
- P. D. WAGNER et al. Technical Note: Hydrological Modeling with SWAT in a Monsoon-Driven Environment: Experience from the Western Ghats, India. **Transactions of the ASABE**, v. 54, n. 5, p. 1783–1790, 2011.
- PEREIRA, D. DOS R. et al. Impacts of deforestation on water balance components of a watershed on the Brazilian East Coast. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 4, p. 1350–1358, ago. 2014.
- PILGRIM, D. H.; CHAPMAN, T. G.; DORAN, D. G. Problems of rainfall-runoff modelling in arid and semiarid regions. **Hydrological Sciences Journal**, v. 33, n. 4, p. 379–400, ago. 1988.
- PIMM, S. L.; RAVEN, P. Biodiversity: Extinction by numbers. **Nature**, v. 403, n. 6772, p. 843–845, 24 fev. 2000.
- POUYAN NEJADHASHEMI A, I. M. Evaluation of Swat Performance on a Mountainous Watershed in Tropical Africa. **Journal of Waste Water Treatment & Analysis**, v. s3, n. 1, p. 1–7, 2011.
- RALLISON, R. E.; MILLER, N. Past, present and future SCS runoff procedure. In: SINGH, V. P. (Ed.). **Rainfall runoff relationship**. Littleton, USA: Water Resources Publication, 1981. p. 353–364.
- RITCHIE, J. T. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. **Water Resources Research**, v. 8, n. 5, p. 1204–1213, out. 1972.
- ROUHOLAHNEJAD, E. et al. A parallelization framework for calibration of hydrological models. **Environmental Modelling & Software**, v. 31, p. 28–36, maio 2012.
- SANTOS, J. C. et al. Caatinga: the scientific negligence experienced by a dry tropical forest. **Tropical Conservation Science**, v. 4, n. 3, p. 276–286, 2011.
- SELLAMI, H. et al. Uncertainty analysis in model parameters regionalization: a case study involving the SWAT model in Mediterranean catchments (Southern France). **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, v. 10, n. 4, p. 4951–5011, 18 abr. 2013.
- STRAUCH, M.; VOLK, M. SWAT plant growth modification for improved modeling of perennial vegetation in the tropics. **Ecological Modelling**, v. 269, p. 98–112, nov. 2013.
- T. L. VEITH et al. Parameter Sensitivity and Uncertainty in SWAT: A Comparison Across Five USDA-ARS Watersheds. **Transactions of the ASABE**, v. 53, n. 5, p. 1477–1486, 2010.

- TAYLOR, S. D.; HE, Y.; HISCOCK, K. M. Modelling the impacts of agricultural management practices on river water quality in Eastern England. **Journal of Environmental Management**, v. 180, p. 147–163, set. 2016.
- TODINI, E. Hydrological catchment modelling: past, present and future. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, n. 1, p. 468–482, 17 jan. 2007.
- VOROSMARTY, C. J. Global Water Resources: Vulnerability from Climate Change and Population Growth. **Science**, v. 289, n. 5477, p. 284–288, 14 jul. 2000.
- WELDERUFAEL, W. A.; WOYESSA, Y. E.; EDOSSA, D. C. Impact of rainwater harvesting on water resources of the modder river basin, central region of South Africa. **Agricultural Water Management**, v. 116, p. 218–227, jan. 2013.
- WIGMOSTA, M. S.; VAIL, L. W.; LETTENMAIER, D. P. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. **Water Resources Research**, v. 30, n. 6, p. 1665–1679, jun. 1994.
- ZAR, J. H. **Biostatistical Analysis**. 3. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996.

ANEXO A



APRESENTAÇÃO E PREPARO DOS MANUSCRITOS

Os artigos submetidos à Revista Caatinga devem ser originais, ainda não relatados ou submetidos à publicação em outro periódico ou veículo de divulgação. **A Revista Caatinga publica ARTIGO, NOTA TÉCNICA E REVISÃO DE LITERATURA.**

FORMAS DE ENVIO

Os artigos são submetidos, apenas eletronicamente, na página da Revista Caatinga. Podem ser ENVIADOS em Português, Inglês ou Espanhol. Porém, após a aprovação do manuscrito pelo Comitê Editorial, o autor será contactado para traduzir o artigo para a língua inglesa. Caso o trabalho seja submetido em inglês, após a aprovação desse pelo comitê editorial, o autor será comunicado para que realize a revisão do idioma inglês. **A publicação será exclusivamente em Inglês.** Fica a critério do autor a escolha da empresa ou pessoa física que irá realizar a tradução do manuscrito. Porém, é **obrigatória** a realização da **REVISÃO do idioma inglês** por umas das empresas indicadas pela Revista Caatinga. Abaixo seguem as indicações:

<http://www.proof-reading-service.com>

<http://www.academic-editing-services.com/>

<http://www.publicase.com.br/formulario.asp>

<http://www.editage.com.br/manuscriptediting/index.html>

<http://www.journalexperts.com>

<http://www.webshop.elsevier.com/languageservices>

<http://wsr-ops.com>

<http://www.journaleditorsusa.com>

<http://www.queensenglishediting.com/>

<http://www.canalpage.com>

<http://www.stta.com.br/servicos.php>

<http://americanmanuscripteditors.com/>

PREPARO DO MANUSCRITO

- **Digitação:** o texto deve ser composto em programa Word (DOC) ou compatível e os gráficos em programas compatíveis com o Windows, como Excel, e formato de imagens: Figuras (GIF) e Fotos (JPEG). Deve ter no máximo 20 páginas, tamanho A4, digitado com espaçamento 1,5, fonte Times New Roman, estilo normal, tamanho 12 e parágrafo recuado por 1 cm. Todas as margens deverão ter 2,5 cm. Páginas e linhas devem ser numeradas; os números de páginas devem ser colocados na margem inferior, à direita e as linhas numeradas de forma contínua. Se forem necessárias outras orientações, entre em contato com o Comitê Editorial. As Notas Técnicas devem apresentar até 12 páginas, incluindo tabelas e figuras.
- **Tamanho:** o manuscrito não deverá ultrapassar 2,0 MB.
- **Organização:** o artigo científico deverá ser organizado em título, nome do(s) autor(es), resumo, palavras-chave, título em inglês, abstract, keywords, introdução, material e métodos, resultados e discussão, conclusão, agradecimentos (opcional), e referências.

Título: deve ser escrito em maiúsculo, negrito, centralizado na página, no **máximo com 15 palavras**, não deve ter subtítulo e abreviações. O nome científico deve ser indicado no título apenas se a espécie for desconhecida. Os títulos das demais seções da estrutura (resumo, abstract, introdução, material e métodos, resultados e discussão, conclusão, agradecimentos e referências) deverão ser escritos em letra maiúscula, negrito e justificado à esquerda.

Autores(es): nomes completos, sem abreviaturas, em letra maiúscula, um após o outro, separados por vírgula e centralizados. Essas informações deverão constar apenas na versão final do artigo. **Na primeira versão do artigo submetido, os nomes dos autores e a nota de rodapé com os endereços deverão ser omitidos.**

Para a inclusão do(s) nome(s) do(s) autor(es) e do(s) endereço(s) na **versão final do artigo** deve-se, como nota de rodapé na primeira página, indicar, para cada autor, afiliação completa (Unidade/Setor, Instituição, Cidade, Estado, País), endereço completo e e-mail de todos os autores. O autor correspondente deverá ser indicado por um “*”.

No rodapé devem constar informações sobre a natureza do trabalho (se extraído de tese/dissertação) e referências às instituições colaboradoras. Exemplo:

*Autor para correspondência

¹Recebido para publicação em xx/xx/xxxx ; aceito em xx/xx/xxxx.

Especificação (natureza) do trabalho (ex.: Pesquisa apoiada pela FAPESP e pelo CNPq; Trabalho de Mestrado,...)

²Unidade/Setor (por extenso), Instituição (por extenso e sem siglas), Cidade, Estado(sigla), País; E-mail (s).

OBS.: Caso dois ou mais autores tenham as mesmas especificações, não precisa repetir as informações, basta acrescentar, apenas, o e-mail ao final.

Só serão aceitos, no máximo, 5(cinco) autores por artigo submetido: ressaltamos que, salvo algumas condições especiais, poderá ser incluído um sexto autor (não mais que isso) mediante apresentação de justificativas. A justificativa deverá ser anexada, no ato da submissão, em “Documentos Suplementares”, para que o Comitê Editorial proceda com a devida análise. Caso isso não ocorra, a submissão de artigo com número superior a 5 (cinco) autores não será aceita.

** Não serão permitidas mudanças nos nomes de autores *a posteriori*.

** Todos os autores deverão, OBRIGATORIAMENTE, cadastrarem-se no sistema.

Resumo e Abstract: no mínimo 100 e no máximo 250 palavras.

Palavras-chave e Keywords: a primeira letra maiúscula. Devem ter, no mínimo, três e, no máximo, cinco palavras, não constantes no Título/Title e separadas por ponto (consultar modelo de artigo).

Obs.: Em se tratando de artigo escrito em idioma estrangeiro (Inglês ou Espanhol), o título, resumo e palavras-chave deverão, também, constar em Português, mas com a sequência alterada, vindo primeiro no idioma estrangeiro.

Introdução: no máximo, 550 palavras, contendo citações atuais que apresentem relação com o assunto abordado na pesquisa.

Conclusão: deve ser em texto corrido, sem tópicos.

Agradecimentos: logo após as conclusões, poderão vir os agradecimentos a pessoas ou instituições, indicando, de forma clara, as razões pelas quais os faz.

- **Tabelas:** sempre **com orientação em “retrato”**. Serão numeradas consecutivamente com algarismos arábicos na parte superior. **Não usar linhas verticais**. As linhas horizontais devem ser usadas para separar o título do cabeçalho e este do conteúdo, além de uma no final da tabela. Cada dado deve ocupar uma célula distinta. Não usar negrito ou letra maiúscula no cabeçalho. Recomenda-se que **as tabelas apresentem 8,2 cm de largura, não ultrapassando 17 cm**.

- **Figuras:** sempre **com orientação em “retrato”**. Gráficos, fotografias ou desenhos levarão a denominação geral de **Figura** sucedida de numeração arábica crescente e legenda na parte inferior. Para a preparação dos gráficos deve-se utilizar “softwares” compatíveis com “Microsoft Windows”. A resolução deve ter qualidade máxima com pelo menos 300 dpi. **As figuras devem apresentar 8,5 cm de largura, não ultrapassando 17 cm**. A fonte empregada deve ser a Times New Roman, corpo 10 e não usar negrito na identificação dos eixos. As linhas dos eixos devem apresentar uma espessura de 1,5 mm de cor preta. A Revista Caatinga reserva-se ao direito de não aceitar tabelas e/ou figuras com ORIENTAÇÃO na forma “paisagem” ou que apresentem mais de 17 cm de largura. **Tabelas e Figuras devem ser inseridas logo após a sua primeira citação.**

- **Equações:** devem ser digitadas usando o editor de equações do Word, com a fonte Times New Roman. As equações devem receber uma numeração arábica crescente. As equações devem apresentar o seguinte padrão de tamanho:

Inteiro = 12 pt

Subscrito/sobrescrito = 8 pt

Sub-subscrito/sobrescrito = 5 pt

Símbolo = 18 pt

Subsímbolo = 14 pt

Estas definições são encontradas no editor de equação no Word.

REFERÊNCIAS

Devem ser digitadas em espaço 1,5 cm e separadas entre si pelo mesmo espaço (1,5 cm). Precisam ser apresentadas em ordem alfabética de autores; justificar (Ctrl + J). Este periódico utiliza a **NBR 6023 de agosto/2002 da ABNT. UM PERCENTUAL DE 60% DO TOTAL DAS REFERÊNCIAS DEVERÁ SER ORIUNDO DE PERIÓDICOS CIENTÍFICOS INDEXADOS COM DATA DE PUBLICAÇÃO INFERIOR A 10 ANOS.**

O título do periódico não deve ser abreviado e recomenda-se um total de 20 a 30 referências. **EVITE CITAR RESUMOS E TRABALHOS APRESENTADOS E PUBLICADOS EM CONGRESSOS E SIMILARES.**

Citações de autores no texto: devem ser observadas as normas da ABNT, NBR 10520 de agosto/2002.

Ex: Com 1(um) autor, usar Torres (2008) ou (TORRES, 2008); com 2 (dois) autores, usar Torres e Marcos Filho (2002) ou (TORRES; MARCOS FILHO, 2002); com 3 (três) autores, usar França, Del Grossi e Marques (2009) ou (FRANÇA; DEL GROSSI; MARQUES, 2009); com mais de três, usar Torres et al. (2002) ou (TORRES et al., 2002).

REGRAS DE CITAÇÕES DE AUTORES

**** Até 3 (três) autores**

Mencionam-se todos os nomes, na ordem em que aparecem na publicação, separados por ponto e vírgula.

Ex: TORRES, S. B.; PAIVA, E. P. PEDRO, A. R. Teste de deterioração controlada para avaliação da qualidade fisiológica de sementes de jiló. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 0, n. 0, p. 00-00, 2010.

**** Acima de 3 (três) autores**

Menciona-se apenas o primeiro nome, acrescentando-se a expressão **et al.**

Ex: BAKKE, I. A. et al. Water and sodium chloride effects on *Mimosa tenuiflora*(Willd.) poiret seed germination. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 19, n. 3, p. 261-267, 2006.

**** Grau de parentesco**

HOLANDA NETO, J. P. **Método de enxertia em cajueiro-anão-precoce sob condições de campo em Mossoró-RN**. 1995. 26 f. Monografia (Graduação em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura de Mossoró, Mossoró, 1995.

COSTA SOBRINHO, João da Silva. Cultura do melão. **Cuiabá**: Prefeitura de Cuiabá, 2005.

MODELOS DE REFERÊNCIAS

a) Artigos de Periódicos: Elementos essenciais:

AUTOR. Título do artigo. **Título do periódico**, Local de publicação (cidade), n.º do volume, n.º do fascículo, páginas inicial-final, ano.

Ex: BAKKE, I. A. et al. Water and sodium chloride effects on *Mimosa tenuiflora*(Willd.) poiret seed germination. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 19, n. 3, p. 261-267, 2006.

b) Livros ou Folhetos, no todo: Devem ser referenciados da seguinte forma:

AUTOR. **Título**: subtítulo. Edição. Local (cidade) de publicação: Editora, data. Número de páginas ou volumes.(nome e número da série)

Ex: RESENDE, M. et al. **Pedologia**: base para distinção de ambientes. 2. ed. Viçosa, MG: NEPUT, 1997. 367 p.

OLIVEIRA, A. I.; LEONARDOS, O. H. **Geologia do Brasil**. 3. ed. Mossoró: ESAM, 1978. 813 p. (Coleção mossoroense, 72).

c) Livros ou Folhetos, em parte (Capítulo de Livro):

AUTOR DO CAPÍTULO. Título do capítulo. In: AUTOR DO LIVRO. **Título**: subtítulo do livro. Número de edição. Local de publicação (cidade): Editora, data. Indicação de volume, capítulo ou páginas inicial-final da parte.

Ex: BALMER, E.; PEREIRA, O. A. P. Doenças do milho. In: PATERNIANI, E.; VIEGAS, G. P. (Ed.). **Melhoramento e produção do milho**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. 2, cap. 14, p. 595-634.

d) Dissertações e Teses: (somente serão permitidas citações recentes, PUBLICADAS NOS ÚLTIMOS TRÊS ANOS QUE ANTECEDEM A REDAÇÃO DO ARTIGO). Referenciam-se da seguinte maneira:

AUTOR. **Título**: subtítulo. Ano de apresentação. Número de folhas ou volumes. Categoria (grau e área de concentração) - Instituição, local.

Ex: OLIVEIRA, F. N. **Avaliação do potencial fisiológico de sementes de girassol (*Helianthus annuus* L.)**. 2011. 81 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia: Área de Concentração em Tecnologia de Sementes) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2011.

e) Artigos de Anais ou Resumos: (DEVEM SER EVITADOS)

NOME DO CONGRESSO, n.º, ano, local de realização (cidade). Título... subtítulo. Local de publicação (cidade): Editora, data de publicação. Número de páginas ou volumes.

Ex: BALLONI, A. E.; KAGEYAMA, P. Y.; CORRADINI, I. Efeito do tamanho da semente de *Eucalyptus grandis* sobre o vigor das mudas no viveiro e no campo. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 3., 1978, Manaus. **Anais...** Manaus: UFAM, 1978. p. 41-43.

f) Literatura não publicada, mimeografada, datilografada etc.:

Ex: GURGEL, J. J. S. **Relatório anual de pesca e piscicultura do DNOCS**. Fortaleza: DNOCS, 1989. 27 p. Datilografado.

g) Literatura cuja autoria é uma ou mais pessoas jurídicas:

Ex: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: informação e documentação – referências – elaboração. Rio de Janeiro, 2002. 24 p.

h) Literatura sem autoria expressa:

Ex: NOVAS Técnicas – Revestimento de sementes facilita o plantio. **Globo Rural**, São Paulo, v. 9, n. 107, p. 7-9, jun. 1994.

i) Documento cartográfico:

Ex: INSTITUTO GEOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO (São Paulo, SP). **Regiões de governo do Estado de São Paulo**. São Paulo, 1994. 1 atlas. Escala 1:2.000.

J) Em meio eletrônico (CD e Internet): Os documentos /informações de **acesso exclusivo por computador** (online) compõem-se dos seguintes elementos essenciais para sua referência:

AUTOR. Denominação ou título e subtítulo (se houver) do serviço ou produto, indicação de responsabilidade, endereço eletrônico entre os sinais <> precedido da expressão – Disponível em: – e a data de acesso precedida da expressão – Acesso em:.

Ex: BRASIL. Ministério da Agricultura e do abastecimento. **SNPC – Lista de Cultivares protegidas**. Disponível em:<<http://agricultura.gov.br/scpn/list/200.htm>>. Acesso em: 08 set. 2008.

GUNCHO, M. R. A educação à distância e a biblioteca universitária. In: SEMINÁRIO DE BIBLIOTECAS UNIVERSITÁRIAS, 10., 1998, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: Tec Treina, 1998. 1 CD-ROM.

UNIDADES E SÍMBOLOS DO SISTEMA INTERNACIONAL ADOTADOS PELA REVISTA CAATINGA

Grandezas básicas	Unidades	Símbolos	Exemplos
Comprimento	metro	m	
Massa quilograma	quilograma	kg	
Tempo	segundo	s	
Corrente elétrica	amper	A	
Temperatura termodinâmica	Kelvin	K	
Quantidade de substância	mol	mol	
Unidades derivadas			
Velocidade	---	m s^{-1}	343 m s^{-1}
Aceleração	---	m s^{-2}	$9,8 \text{ m s}^{-2}$
Volume	Metro cúbico, litro	M^3, L^*	$1 \text{ m}^3, 1\,000 \text{ L}^*$
Frequência	Hertz	Hz	10 Hz
Massa específica	---	Kg m^{-3}	1.000 kg m^{-3}
Força	newton	N	15 N
Pressão	pascal	pa	$1,013.10^5 \text{ Pa}$
Energia	joule	J	4 J

Potência	watt	W	500 W
Calor específico	---	J (kg °C) ⁻¹	4186 J (kg °C) ⁻¹
Calor latente	---	J kg ⁻¹	2,26.10 ⁶ J kg ⁻¹
Carga elétrica	coulomb	C	1 C
Potencial elétrico	volt	V	25 V
Resistência elétrica	ohm	Ω	29Ω
Intensidade de energia	Watts/metros quadrado	W m ⁻²	1.372 W m ⁻²
Concentração	Mol/metro cúbico	Mol m ⁻³	500 mol m ⁻³
Condutância elétrica	siemens	S	300 S
Condutividade elétrica	desiemens/metr o	dS m ⁻¹	5 dS m ⁻¹
Temperatura	Grau Celsius	°C	25 °C
Ângulo	Grau	°	30°
Porcentagem	---	%	45%

Números mencionados em sequência devem ser separados por **ponto e vírgula (;)**. Ex: 2,5; 4,8; 5,3

ANEXO B

04/02/2017

Advances in Meteorology — An Open Access Journal

Author Guidelines

Language editing

Hindawi has partnered with Editage to provide an English-language editing service to authors prior to submission. Authors that wish to use this service will receive a 10% discount on all editing services provided by Editage. To find out more information or get a quote, please [click here](#).

Submission

Manuscripts should be submitted by one of the authors of the manuscript through the online [Manuscript Tracking System](#). Regardless of the source of the word-processing tool, only electronic PDF (.pdf) or Word (.doc, .docx, .rtf) files can be submitted through the MTS. There is no page limit. Only online submissions are accepted to facilitate rapid publication and minimize administrative costs. Submissions by anyone other than one of the authors will not be accepted. The submitting author takes responsibility for the paper during submission and peer review. If for some technical reason submission through the MTS is not possible, the author can contact amete@hindawi.com for support.

Terms of Submission

Papers must be submitted on the understanding that they have not been published elsewhere and are not currently under consideration by another journal published by Hindawi or any other publisher. The submitting author is responsible for ensuring that the article's publication has been approved by all the other coauthors. It is also the authors' responsibility to ensure that the articles emanating from a particular institution are submitted with the approval of the necessary institution. Only an acknowledgment from the editorial office officially establishes the date of receipt. Further correspondence and proofs will be sent to the author(s) before publication unless otherwise indicated. It is a condition of submission of a paper that the authors permit editing of the paper for readability. All inquiries concerning the publication of accepted papers should be addressed to amete@hindawi.com.

Peer Review

All manuscripts are subject to peer review and are expected to meet standards of academic excellence. If approved by the editor, submissions will be considered by peer-reviewers, whose identities will remain anonymous to the authors.

Concurrent Submissions

In order to ensure sufficient diversity within the authorship of the journal, authors will be limited to having two manuscripts under review at any point in time. If an author already has two manuscripts under review in the journal, he or she will need to wait until the review process of at least one of these manuscripts is complete before submitting another manuscript for consideration. This policy does not apply to Editorials or other non-peer reviewed manuscript types.

Article Processing Charges

Advances in Meteorology is an open access journal. Open access charges allow publishers to make the published material available for free to all interested online visitors. For more details about the article

processing charges of Advances in Meteorology, please visit the [Article Processing Charges](#) information page.

Units of Measurement

Units of measurement should be presented simply and concisely using System International (SI) units.

Title and Authorship Information

The following information should be included

- Paper title
- Full author names
- Full institutional mailing addresses
- Email addresses

Abstract

The manuscript should contain an abstract. The abstract should be self-contained and citation-free and should not exceed 200 words.

Introduction

This section should be succinct, with no subheadings.

Materials and Methods

This part should contain sufficient detail so that all procedures can be repeated. It can be divided into subsections if several methods are described.

Results and Discussion

This section may each be divided by subheadings or may be combined.

Conclusions

This should clearly explain the main conclusions of the work highlighting its importance and relevance.

Acknowledgments

All acknowledgments (if any) should be included at the very end of the paper before the references and may include supporting grants, presentations, and so forth.

References

Authors are responsible for ensuring that the information in each reference is complete and accurate. All references must be numbered consecutively and citations of references in text should be identified using numbers in square brackets (e.g., “as discussed by Smith [9]”; “as discussed elsewhere [9, 10]”). All references should be cited within the text; otherwise, these references will be automatically removed.

Preparation of Figures

Upon submission of an article, authors are supposed to include all figures and tables in the PDF file of the manuscript. Figures and tables should not be submitted in separate files. If the article is accepted, authors will be asked to provide the source files of the figures. Each figure should be supplied in a separate electronic file. All figures should be cited in the paper in a consecutive order. Figures should be supplied in either vector art formats (Illustrator, EPS, WMF, FreeHand, CorelDraw, PowerPoint, Excel, etc.) or bitmap formats (Photoshop, TIFF, GIF, JPEG, etc.). Bitmap images should be of 300 dpi resolution at least unless the resolution is intentionally set to a lower level for scientific reasons. If a bitmap image has labels, the image and labels should be embedded in separate layers.

Preparation of Tables

Tables should be cited consecutively in the text. Every table must have a descriptive title and if numerical measurements are given, the units should be included in the column heading. Vertical rules should not be used.

Proofs

Corrected proofs must be returned to the publisher within 2-3 days of receipt. The publisher will do everything possible to ensure prompt publication. It will therefore be appreciated if the manuscripts and figures conform from the outset to the style of the journal.

Copyright

Open Access authors retain the copyrights of their papers, and all open access articles are distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided that the original work is properly cited.

The use of general descriptive names, trade names, trademarks, and so forth in this publication, even if not specifically identified, does not imply that these names are not protected by the relevant laws and regulations.

While the advice and information in this journal are believed to be true and accurate on the date of its going to press, neither the authors, the editors, nor the publisher can accept any legal responsibility for any errors or omissions that may be made. The publisher makes no warranty, express or implied, with respect to the material contained herein.

Disclosure Policy

A competing interest exists when professional judgment concerning the validity of research is influenced by a secondary interest, such as financial gain. We require that our authors reveal any possible conflict of interest in their submitted manuscripts.

If there is no conflict of interest, authors should state that “The author(s) declare(s) that there is no conflict of interest regarding the publication of this paper.”