

Pedro Vinícius da Silva Brito

Análise de Correlação entre a produção primária bruta do sensor MODIS e balanço hídrico do SWAT para bacia hidrográfica do Riacho do Pontal, Pernambuco

Recife

2021



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICA

Análise de Correlação entre a produção primária bruta do sensor MODIS e balanço hídrico do SWAT para bacia hidrográfica do Riacho do Pontal, Pernambuco

Monografia de graduação apresentada ao Departamento de Matemática da Universidade Federal Rural de Pernambuco como componente optativo para obtenção de grau de licenciado, defendida e aprovada por unanimidade em 19/07/2021 pela banca examinadora.

**Orientador: Prof. Dr. Antonio Samuel
Alves da Silva**

Recife

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

B862a

Brito, Pedro Vinícius da Silva

Análise de Correlação entre a produção primária bruta do sensor MODIS e balanço hídrico do SWAT para bacia hidrográfica do Riacho do Pontal, Pernambuco / Pedro Vinícius da Silva Brito. - 2021.
52 f. : il.

Orientador: Antonio Samuel Alves da Silva.
Inclui referências e apêndice(s).

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Licenciatura em Matemática, Recife, 2021.

1. Pontal.. 2. Produção primária bruta.. 3. Sensoriamento remoto.. 4. Correlação.. I. Silva, Antonio Samuel Alves da, orient. II. Título

CDD 510

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICA

Análise de Correlação entre a produção primária bruta do sensor MODIS e balanço hídrico do SWAT para bacia hidrográfica do Riacho do Pontal, Pernambuco

Pedro Vinícius da Silva Brito

Monografia de graduação apresentada ao Departamento de Matemática da Universidade Federal Rural de Pernambuco como componente optativo para obtenção de grau de licenciado, defendida e aprovada por unanimidade em 19/07/2021 pela banca examinadora.

Orientador:

**Prof. Dr. Antonio Samuel Alves da
Silva**
Orientador

Banca examinadora:

Prof. Dr. Guilherme Rocha Moreira
**Universidade Federal Rural de
Pernambuco**

**Prof. Dra. Josiclêda Domiciano
Galvíncio**
Universidade Federal de Pernambuco

*Este trabalho é dedicado aos meus pais,
pois é graças aos seus esforços que hoje estou
concluindo esse curso.*

Agradecimentos

Esses anos de graduação foram marcados por muitos desafios, construções, conquistas e amadurecimento. Aprendi que nem tudo acontece como planejado, mas, tudo tem um motivo de acontecer. O caminho até aqui não foi fácil, porém, com perseverança e uma grande pitada de fé, nunca pareceu impossível.

Gostaria de começar agradecendo a Deus por me dar força e ânimo para seguir na busca dos meus objetivos, tranquilidade nos momentos de aflição e colocar pessoas incríveis no meu caminho, que me deram oportunidades, contribuíram para o meu conhecimento e dispuseram as suas amizades.

Agradeço aos meus pais, Maria Valdejane e Cicero Figueiredo, os maiores mestres da minha vida, que nunca deixaram de acreditar em mim, e que mesmo diante das dificuldades, mantiveram a fé na minha formação e mostraram a importância do estudo, mesmo não tendo eles as mesmas oportunidades no passado.

A minha tia, Maria das Graças, que sempre esteve presente como uma segunda mãe.

A todos os meus familiares, em especial as minhas irmãs, que foram as minhas primeiras inspirações no estudo, por todo apoio e acreditar em minha jornada acadêmica.

À minha namorada, Herica Carvalho, que me motivou nos momentos difíceis dessa caminhada, foi companheira e compreensível nos momentos que estive ausente.

Aos professores Antonio Samuel Alves da Silva e Josiclêda Domiciano Galvínio pelas oportunidades, confiança, ensinamentos e paciência.

Ao professor, Demóstenes Soares Pessoa, que me apresentou a matemática de forma divertida, sempre me motivou e acreditou no meu potencial como estudante, professor e pesquisador.

A todas as pessoas que, ao longo da minha trajetória, se tornaram amigos. Em especial, Bruno Fonseca, que sempre se mostrou prestativo, esteve presente nos meus momentos de dificuldade e celebrou os de felicidade.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco e, em especial, ao Departamento de Matemática, seus professores, estudantes e técnicos administrativos, pelo ambiente acolhedor e conhecimentos compartilhados.

À Universidade Federal de Pernambuco e, em particular, ao Laboratório de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento, seus docentes e discentes pela oportunidade e confiança. Em especial, quero agradecer a Professora Valeria Costa, Henrique Ferreira, Ygor Cristiano, Rodrigo Miranda, Jadson Freire, João Antonio, Luciana França, Josimar Reis, Elisabeth Cavalcanti e Sidney Campelo, pelo companheirismo e amizade.

*“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar,
não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma
como nos acostumamos a ver o mundo.”
(Albert Einstein)*

Resumo

Avaliou-se a correlação entre produção primária bruta e o balanço hídrico da bacia hidrográfica do Riacho do Pontal, localizada no estado de Pernambuco, Brasil. Para isso, utilizou-se as componentes de precipitação (PRECIP), produção de água (WYLD), armazenamento de água no solo (SW), escoamento superficial (SURQ), evapotranspiração potencial (PET) e evapotranspiração real (ET) do balanço hídrico simuladas pelo modelo SWAT e o produto de sensoriamento remoto MOD17A2H de produção primária bruta (Gross Primary Productivity - GPP) do sensor MODIS (MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer). Os dados obtidos pelo sensor MODIS e o modelo SWAT, foram analisados, e em seguida, correlacionados utilizando o coeficiente de correlação de Spearman. Os resultados mostram que a GPP mínima com o escoamento superficial obteve o menor valor de correlação de toda a análise (de 0,13), uma correlação negativa com a evapotranspiração potencial (de -0,63) e positiva com as demais componentes do balanço hídrico, variando de 0,22 com a precipitação a 0,38 com a evapotranspiração real. Com a GPP média, obteve-se correlação negativa para a evapotranspiração potencial (de -0,74), e com as demais componentes do balanço hídrico, teve-se correlação positiva, variando de 0,36 com o escoamento superficial a 0,6 com a evapotranspiração real. Na GPP máxima, ocorreu novamente correlação negativa com a evapotranspiração potencial (de -0,76), e correlação positiva com todas as outras componentes do balanço hídrico, variando de 0,28 com o escoamento superficial a 0,46 com a evapotranspiração real e produção de água. Foi observado a existência de correlação entre a produção primária bruta e o balanço hídrico, mesmo que seja baixa, como ocorreu entre a GPP mínima e o escoamento superficial. A correlação entre GPP e evapotranspiração real e potencial, foi maior do que a correlação da GPP com as demais componentes do balanço hídrico, com exceção da GPP máxima com a produção de água, que teve o mesmo valor da GPP máxima com a evapotranspiração real. Desta forma, o monitoramento da evapotranspiração, em regiões semiáridas, é de grande importância para a previsão da produção primária bruta. E de acordo com os prognósticos do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, sigla em inglês), que prevê o aumento de eventos extremos em regiões semiáridas, é possível afirmar que se os cenários das mudanças climáticas vierem ocorrer, há uma forte tendência da produção primária bruta, em regiões semiáridas, diminuir.

Palavras-chaves: Pontal. Produção primária bruta. Sensoriamento remoto. Correlação.

Abstract

The correlation between gross primary production and the water balance of the Riacho do Pontal watershed, located in the state of Pernambuco, Brazil, was evaluated. For this, the components of precipitation (PRECIP), water production (WYLD), soil water storage (SW), surface runoff (SURQ), potential evapotranspiration (PET) and actual evapotranspiration (ET) of the water balance were used simulated by the SWAT model and the MOD17A2H remote sensing product of Gross Primary Productivity (GPP) from the MODIS (MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer) sensor. The data obtained by the MODIS sensor and the SWAT model were analyzed and then correlated using Spearman correlation coefficient. The results show that the minimum GPP with runoff had the lowest correlation value of the entire analysis (of 0.13), a negative correlation with the potential evapotranspiration (of -0.63) and positive with the other components of the balance water, ranging from 0.22 with precipitation to 0.38 with actual evapotranspiration. With the average GPP, there was a negative correlation for potential evapotranspiration (from -0.74), and with the other components of the water balance, there was a positive correlation, ranging from 0.36 with runoff to 0.6 with real evapotranspiration. At maximum GPP, there was again a negative correlation with potential evapotranspiration (from -0.76), and a positive correlation with all other components of the water balance, ranging from 0.28 with runoff to 0.46 with actual evapotranspiration and water production. The existence of a correlation between the gross primary production and the water balance was observed, even if it is low, as occurred between the minimum GPP and the runoff. The correlation between GPP and real and potential evapotranspiration was greater than the correlation between GPP and the other components of the water balance, with the exception of the maximum GPP with water production, which had the same value as the maximum GPP with the real evapotranspiration. Thus, monitoring evapotranspiration in semiarid regions is of great importance for predicting gross primary production. And according to the predictions of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), which predicts the increase of extreme events in semiarid regions, it is possible to say that if climate change scenarios come to occur, there is a strong trend in production primary gross, in semiarid regions, decrease.

Key-words: Pontal. Gross Primary Production. Remote sensing. Correlation.

Lista de Figuras

Figura 1 – Localização geográfica da bacia hidrográfica do Riacho do Pontal-Pernambuco.	11
Figura 2 – Mapa de uso e cobertura do solo gerado a partir de imagem de satélite, para a bacia hidrográfica do Riacho do Pontal-Pernambuco.	12
Figura 3 – Fluxograma das etapas do processamento dos dados de satélite.	14
Figura 4 – Precipitação pluviométrica média anual para o período de 2001 a 2016 estimada pelo SWAT para a bacia hidrográfica do Riacho do Pontal-PE.	21
Figura 5 – Precipitação pluviométrica média mensal para o período de 2001 a 2016 estimada pelo SWAT para a bacia hidrográfica do Riacho do Pontal-PE.	22
Figura 6 – Produção de água, água armazenada no solo e escoamento superficial média mensal para o período de 2001 a 2016 estimada pelo SWAT para a bacia hidrográfica do Riacho do Pontal-PE.	23
Figura 7 – Evapotranspiração real e evapotranspiração potencial média mensal para o período de 2001 a 2016 estimada pelo SWAT para a bacia hidrográfica do Riacho do Pontal-PE.	25
Figura 8 – Variabilidade da produção primária bruta anual para o período de 2001 a 2016 estimada pelo MODIS para a bacia hidrográfica do Riacho do Pontal-PE.	26
Figura 9 – Variabilidade da produção primária bruta mensal para o período de 2001 a 2016 estimada pelo MODIS para a bacia hidrográfica do Riacho do Pontal-PE.	27
Figura 10 – Correlação anual entre GPP do MODIS e balanço hídrico derivado do modelo SWAT de 2001 a 2016 para a bacia hidrográfica do Riacho do Pontal-PE.	28

Lista de tabelas

Tabela 1 – Bandas do produto MOD17A2H, suas respectivas descrições, unidades de medida e fatores de escala. 9

Sumário

1	Introdução	1
2	Revisão de Literatura	3
2.1	O bioma Catinga	3
2.2	Ciclo hidrológico	4
2.3	Modelos hidrológicos	5
2.4	Modelo SWAT	6
2.5	SWAT-CUP e o algoritmo SUFI2	7
2.6	Produção primária bruto (Gross Primary Productivity – GPP)	8
3	Objetivos	10
3.1	Objetivo Geral	10
3.2	Objetivos Específicos	10
4	Material e Métodos	11
4.1	Localização e caracterização da área de estudo	11
4.2	Coleta e processamento de dados de satélite	13
4.3	Obtenção de dados do modelo SWAT	16
4.3.1	Precipitação	16
4.3.2	Evapotranspiração real	17
4.3.3	Escoamento superficial	18
4.4	Obtenção dos dados de correlação entre GPP e balanço hídrico derivado do modelo SWAT	19
5	Resultados e discussão	21
5.1	Avaliação dos dados estimados pelo modelo SWAT para a área da bacia hidrográfica do Riacho do Pontal	21
5.1.1	Precipitação estimada pelo modelo SWAT	21
5.1.2	Produção de água, água armazenada no solo e escoamento superficial estimados pelo modelo SWAT	23
5.1.3	Evapotranspiração real e evapotranspiração potencial estimadas pelo modelo SWAT	24
5.2	Avaliação da produção primária bruta derivada do MODIS na área da bacia hidrográfica do Riacho do Pontal	26
5.3	Avaliação de correlação entre GPP e balanço hídrico derivado do modelo SWAT para a área da bacia hidrográfica do Riacho do Pontal	28

6 Conclusão	30
Referências Bibliográficas	31

1 Introdução

Embora as mudanças climáticas do planeta terra em escala de tempo geológico sejam apontadas como processos naturais, têm preocupado tanto o âmbito da ciência, quanto as políticas mundiais, por conta da sua intensidade e velocidade de ocorrência, em especial, quando reunidas às diversas ações antrópicas danosas (KOEHLER; WATZLAWICK; KIRCHNER, 2002; GALVÍNCIO et al., 2011; SPIELHAGEN, 2012; MORAIS et al., 2017).

Essas mudanças decorrem especialmente pela ocorrência de gases do efeito estufa (GEF) na atmosfera, como o óxido nitroso (N₂O), metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), que são associados ao vapor de água, sendo capaz de causar mudanças permanentes e irreversíveis na circulação da atmosfera, nos oceanos, pluviosidade e clima (MARENGO, 2001; SOLOMON et al., 2007; GRANDIS; GODOI; BUCKERIDGE, 2010).

Segundo a Organização Meteorológica Mundial (WMO, sigla em inglês), as concentrações médias globais de CO₂ alcançaram 405,5 partes por milhão (ppm) em 2017, acima dos 403,3 ppm de 2016 e 400,1 ppm de 2015 (WATER, 2019). Este aumento é principalmente ocasionado pelo crescimento da queima de combustíveis fósseis, desmatamentos, queimadas e a pecuária extensiva (KOEHLER; WATZLAWICK; KIRCHNER, 2002; BAUMERT; HERZOG; PERSHING, 2005).

Pesquisas que visam procurar entender o aumento desses números citados acima são de extrema relevância, buscando alternativas para tentar minimizar esse aumento, métodos que diminua as fontes desses gases, como por exemplo, o reflorestamento, a produção de biocombustíveis em larga escala e a melhoria na eficiência energética, para que aumente o potencial de sequestro de carbono (SCHAEFFER et al., 2006; CARVALHO et al., 2010; MORAIS et al., 2017)

Segundo Epiphany e Araújo (2011), as florestas são de grande importância como parte ecológica da biosfera, contribuindo para o decréscimo de CO₂ na atmosfera, na qual faz uma troca de grandes quantidades de gases, e armazena carbono, como por exemplo, nas árvores e solos. Para Morais et al. (2017), é de fundamental importância compreender os fluxos e armazenamento de carbono nos principais biomas do Brasil, em especial, os que possuem maior vulnerabilidade. Em particular, temos o bioma Caatinga, que predomina a zona semiárida e representa cerca de 70% da região Nordeste e 11% de todo território nacional (FILHO, 2004; COE; SOUSA, 2014).

Em busca de um maior entendimento do comportamento do bioma Caatinga, são desenvolvidos estudos adequados, por outro lado, esses estudos se deparam com dificuldades de aquisição de dados em campo, além dos custos elevados que os envolvem (GOMES, 2017). Com o objetivo de solucionar este problema, pesquisadores têm desenvolvido diversos modelos matemáticos para definir o método de manejo mais adequado a ser utilizado em cada região (MIRANDA, 2017).

Os modelos matemáticos demonstram enorme potencial para serem utilizados como ferramenta de suporte ao planejamento de uso da terra, com o objetivo de melhorar a qualidade da água e do solo (UZEIKA et al., 2012). Por outro lado, muitas das vezes, não é possível adquirir dados de boa qualidade espaço-temporal no Brasil, até mesmo para modelos matemáticos que necessitam de um mínimo de parâmetros ambientais medidos. Desta forma, o sensoriamento remoto mostra-se como alternativa de determinação direta de parâmetros gerando as informações fundamentais para calibrar o modelo (MIRANDA, 2017).

De acordo com (NOVO, 2010), o sensoriamento remoto é a união de técnicas que possibilita a caracterização de processos químicos, físicos e biológicos por meio da análise de suas interações com a radiação eletromagnética (REM) usando sensores, e quando se refere a monitoramento de recursos hídricos e florestais, previsão do tempo e produtividade agrícola em escala regional, o sensor MODIS se mostra como ótima alternativa pelo fato de fornecer dados diários da superfície terrestre em variadas resoluções espaciais (MIRANDA, 2017).

Pensando nesta problemática, este trabalho tem como objetivo avaliar a correlação entre a produção primária bruta e o balanço hídrico na bacia hidrográfica do Riacho do Pontal localizada no estado de Pernambuco, Brasil. Para alcançar tal objetivo, o trabalho foi dividido em duas etapas, das quais a primeira trata de avaliar a produção primária bruta utilizando imagens do sensor MODIS, e a segunda de estimar e avaliar o balanço hídrico utilizando o modelo SWAT.

2 Revisão de Literatura

2.1 O bioma Catinga

A Caatinga é o único bioma exclusivamente brasileiro, atualmente, tem uma área de 844.453 km^2 , o equivalente a 11% do território nacional. Embora seja um bioma de grande importância para a região e o país, tem passado por um acelerado desmatamento, que chega a 46% de toda sua área, ocasionado pelo consumo de lenha nativa explorada de maneira ilegal e insustentável, para uso doméstico e industrial, ao sobrepastoreio e a conversão para pastagens e agricultura (MMA, 2021). Segundo [Coutrim e Souza \(2018\)](#), 15% dos seus animais e um terço de suas plantas são espécies exclusivas, ou seja, não são encontradas em qualquer região do mundo, apresentando uma importância fundamental a biodiversidade do planeta. Por outro lado, apenas 1% da Caatinga é protegida por unidades de conservação.

O bioma Caatinga, é um mosaico de florestas sazonalmente secas e arbustos espinhosos, que cobre maior partes das áreas dos estados do Ceará, Piauí, Paraíba, Sergipe, Alagoas, Bahia, Rio Grande do Norte, região nordeste de Minas Gerais e Pernambuco ([LEAL et al., 2005](#)). A sua cobertura vegetal predominante é xerófila, decídua e geralmente apresenta três diferentes estratos, sendo eles, arbustivo, herbáceo e arbóreo, com plantas caducifólias que durante o período de estiagem perdem as suas folhas ([FILHO et al., 2010](#)).

A área formada pelo bioma Caatinga, apresenta terrenos cristalinos quase impermeáveis e terrenos sedimentares com bom volume de água subterrânea acumulada. Com raras exceções, os solos são escassamente desenvolvidos, pedregosos, mineralmente ricos, pouco espessos, e com fraca capacidade de retenção da água, que é um fator limitante a produção primária na região ([ALVES; ARAÚJO; NASCIMENTO, 2009](#)). A maior parte do bioma Caatinga dispõe do clima semiárido, marcado por temperaturas médias elevadas que variam entre 25° e 30°C e precipitação baixa variando entre 400 e 1200 mm ao ano ([TABARELLI et al., 2018](#)). De acordo com [Monteiro et al. \(2015\)](#), o clima da Caatinga é uma anomalia, e serve como um importante laboratório para estudar o processo de adaptação das plantas em relação ao estresse ambiental e as chuvas com altas variações.

Com a grande falta de conhecimento acerca do bioma, a caatinga vem sistematicamente sendo devastada, pois durante vários séculos o homem tem usado a área recoberta pela caatinga para a agricultura, pecuária intensiva, extração de lenha e madeira e outras

atividades de menor interesse sócio-económico (SANTANA; SOUTO, 2006; VITÓRIAS et al., 2015). Segundo Vitórias et al. (2015), um dos mais importantes problemas a serem considerados a respeito do uso e mudanças no uso da terra, são as emissões de gases do efeito estufa, pois influenciam diretamente o balanço energético da atmosfera.

2.2 Ciclo hidrológico

O ciclo hidrológico, também conhecido como ciclo da água, refere-se ao movimento contínuo da água abaixo, sobre e acima da superfície terrestre. É um modelo conceitual que descreve o armazenamento e movimento que a água faz pela biosfera, atmosfera, criosfera, litosfera, antroposfera e hidrosfera (COLLIER, 2016). Para Edwards, Williard e Schoonover (2015) ele caracteriza como é deslocada e armazenada a água dentro e entre as bacias hidrográficas. O ciclo hidrológico contém processos físicos como precipitação, evaporação, condensação, fluxo subterrâneo, infiltração e escoamento superficial (CUI et al., 2018).

Bacia hidrográfica, bacia de drenagem ou área de captação, caracteriza toda área ou terreno que drena as chuvas e riachos em direção a uma mesma saída, que pode ser a foz de uma baía, um reservatório, ou um ponto sobre um canal de riacho (GAIKADI, 2019). Edwards, Williard e Schoonover (2015) definem uma bacia hidrográfica como uma área de terra em que quaisquer precipitações de entrada são drenadas para um mesmo lugar a caminho do mesmo corpo de água ou mesma área topográfica baixa por decorrência de sua topografia. É simples identificar bacias hidrográficas quando o terreno é montanhoso ou acidentado, pois os seus limites são determinados por cristas. Por outro lado, pode ser desafiador identificar pontos topográficos altos nas bacias hidrográficas planas, visto que as elevações mais baixas e mais altas podem ter apenas alguns centímetros de diferença.

O balanço hídrico contabiliza as entradas e saídas de água. Deste modo, uma equação do balanço hídrico pode ser utilizada para representar o fluxo de água dentro e fora de um sistema, no qual este sistema pode ser de diversos domínios hidrológicos, como uma bacia de drenagem ou uma coluna de solo (SHARMA; KANWAR; KANDRA, 2019). Segundo Davie e Quinn (2019), a equação do balanço hídrico é uma representação matemática dos processos hidrológicos que estão operando no interior de um intervalo de tempo e incorpora princípios de continuidade de massa e energia. Embora existam diversas formas de representar a equação do balanço hídrico, a sua forma mais fundamental é apresentada pela equação 2.1.

$$P \pm E \pm \Delta S \pm Q = 0 \quad (2.1)$$

na qual a variável P representa a precipitação, a variável E representa a evaporação, a variável ΔS representa a mudança no armazenamento e a variável Q representa o escoamento. O termo matemático \pm representa o fato de que cada termo pode ser positivo ou negativo, como por exemplo, a precipitação, que é um ganho (positivo) para a terra, porém é uma perda (negativa) para a atmosfera.

A precipitação, por via de chuva ou neve, é o maior termo de fluxo do balanço hídrico e pode acarretar em modificações na umidade do solo e armazenamento de calor, calor latente, calor sensível e fluxo de calor do solo, motivando a evaporação do solo e a transpiração de plantas (RODRIGUES et al., 2013). Para Fekete et al. (2004), como a precipitação é a fonte definitiva da parcela de água terrestre que entra na bacia hidrográfica para constituir o ciclo hidrológico, então é considerada a variável climática de maior relevância para determinar os cálculos do balanço hídrico.

2.3 Modelos hidrológicos

Modelos hidrológicos são representações simplificadas do ciclo hidrológico da terra, e exercem uma função importante nos diversos campos da hidrologia, como agricultura, gestão e alerta de cheias, projeto de barragens, estudos de impacto das mudanças climáticas, etc (SOLOMATINE; WAGENER, 2011). Segundo Lima (2011), a modelagem hidrológica é fundamentada no desenvolvimento de representações matemáticas que tem o objetivo de simular processos relativos ao ciclo hidrológico. Esses modelos matemáticos têm sido aplicados por pesquisadores e agentes do governo do mundo todo, com o intuito de simular processos biológicos e físicos que por causa de sua complexidade, ou alto custo associado, principalmente no caso de monitoramentos constantes em grande escala, enfrentam dificuldades analíticas (ARNOLD et al., 1998).

De acordo com Tucci (1998), usualmente os modelos são classificados como análogos, físicos e matemáticos. Os modelos analógicos são validos pela analogia de equações que regem diferentes fenômenos para modelar o processo pretendido no sistema mais apropriado, enquanto os modelos físicos representam o sistema por um protótipo em escala menor, na maior parte dos casos. Por outro lado, os modelos matemáticos representam por meio de equações matemáticas, a natureza de um sistema. Portanto, os modelos matemáticos são mais versáteis, podendo ser mutáveis facilmente modificando a sua lógica, adquirindo-se resultados de diferentes situações de um mesmo sistema ou diferentes sistemas, além da alta velocidade de resposta. O autor, ainda afirma que os modelos podem ser classificados como:

- (i) Contínuo ou discreto: um modelo é dito contínuo quando os fenômenos são

contínuos no tempo, discreto quando as mudanças de estado se apresentam em intervalos discretos. Os sistemas hidrológicos, em sua maioria, são contínuos e podem ser representados por modelos discretos.

(ii) Concentrado ou distribuído: um modelo é dito concentrado quando a sua variabilidade espacial não é levada em conta. Em geral, estes modelos utilizam como variável independente, apenas o tempo. Já um modelo distribuído, apresenta parâmetros e variáveis dependendo do tempo e do espaço.

(iii) Estocástico ou determinístico: enquanto os modelos estocásticos possuem saídas que são no mínimo parcialmente aleatórias, os modelos determinísticos não consideram a aleatoriedade. Isto é, para os modelos determinísticos uma dada entrada sempre gera a mesma saída.

(iv) Conceitual ou empírico: um modelo é considerado conceitual se as funções usadas na sua elaboração consideram os processos físicos. Por outro lado, os modelos são ditos empíricos quando se ajustam os dados simulados aos valores observados por meio de funções ausentes de relações com os processos físicos envolvidos.

Segundo [Devia, Ganasri e Dwarakish \(2015\)](#), o modelo mais adequado, é o que fornece os resultados mais próximos da realidade, reduzindo a complexidade e simplificando parâmetros. Para [Merritt, Letcher e Jakeman \(2003\)](#), a escolha do modelo para simulação, depende da finalidade da pesquisa, características da área estudada, capacidade do modelo, requisitos de dados do modelo, precisão e validade do modelo, componentes do modelo, facilidade na utilização do modelo e requisitos de hardware do modelo.

Na atualidade, um dos modelos hidrológicos mais utilizados, é o SWAT (Soil and Water Assessment Tool). O modelo SWAT detém um perfil de modelagem aos interesses tanto dos órgãos públicos como também das empresas privadas, o que faz as suas fronteiras serem ampliadas gradualmente ([BRESSIANI et al., 2015](#)).

2.4 Modelo SWAT

O SWAT é um modelo hidrológico semi-distribuído em tempo contínuo, no qual, opera em uma escala diária e divide uma dada bacia hidrográfica em diversas sub-bacias, sendo estas, decompostas em unidades de resposta hidrológica (HRUs) ([ARNOLD et al., 2012](#)). Segundo ([ARNOLD et al., 1998](#)), o modelo SWAT tem como objetivo estimar o impacto de uso e ocupação do solo nos recursos hídricos e a produção de sedimentos e aplicação de produtos químicos nas plantações no interior dos grandes complexos de bacias hidrográficas, inúmeros tipos de solo, condições de gestão, e uso do terreno ao longo de um extenso período de tempo.

De acordo com [Baker e Miller \(2013\)](#), o SWAT é também um modelo determinístico, ou seja, todo modelo sucessivo gerará os mesmos resultados de saída se utilizarem as mesmas entradas. Geralmente, este tipo de modelo é escolhido com o intuito de isolar a uma única variável, a resposta hidrológica, possibilitando assim separar o impacto de qualquer mudança e analisar na resposta hidrológica a intensidade do seu efeito.

Os dados de entrada para o modelo, incluem o Digital Elevation Model (DEM), cobertura da terra, vazão, solo e clima (umidade relativa, velocidade do vento, radiação solar, temperatura e precipitação) ([RUSLI et al., 2016](#)). Segundo [Arnold et al. \(2012\)](#), o modelo SWAT dispõe de cinco componentes principais, sendo elas, manejo da terra, vegetação, solo, clima e hidrológica, e pode gerar resultados diários, sub-diários, mensais e anuais.

Assim como outros modelos hidrológicos, o SWAT também necessita de calibração, uma vez que possui variáveis e coeficientes simulados a partir de submodelos ([ARNOLD et al., 2012](#)). Ainda de acordo com os autores, a estimativa de parâmetros ou calibração, é o ajuste dos parâmetros do modelo. Para [Yu \(2015\)](#), a calibração do modelo é uma prova de que o modelo é capaz de reproduzir valores observados em campo de várias variáveis hidrológicas. A realização de calibração do modelo é indispensável, e quanto maior for o nível de sofisticação do modelo, maior também será o número de calibrações necessárias ([KOBAYAMA; MANFROI, 1999](#)).

A calibração do modelo SWAT pode ser executada manualmente ou com a utilização de softwares de calibração, como o SWAT-CUP (SWAT Calibration Uncertainty Procedure) ([FRANCO; BONUMÁ, 2017](#)), indicado pelos próprios desenvolvedores do SWAT.

2.5 SWAT-CUP e o algoritmo SUFI2

O SWAT-CUP (SWAT Calibration and Uncertainty Programs) é um software de domínio público desenvolvido por [Abbaspour et al. \(2007\)](#), utilizado para realizar a calibração, validação, análise de sensibilidade e análise de incerteza. O programa comporta em um único ambiente de interação, as saídas do modelo SWAT e os algoritmos de calibração SUFI2 (Sequential Uncertainty Fitting 2) ([ABBASPOUR et al., 2007](#)), PSO (Particle Swarm Optimization) ([KENNEDY; EBERHART, 1995](#)), GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation) ([BEVEN; BINLEY, 1992](#)), ParaSol (Parameter Solution) ([GRIENSVEN; MEIXNER, 2007](#)) e MCMC (Markov chain Monte Carlo) ([GILKS, 2005](#)), descritos de forma detalhada por [Abbaspour \(2008\)](#).

O algoritmo SUFI2, é utilizado até o momento por pesquisadores, para a calibração e análise de incertezas dos parâmetros do modelo SWAT ([SALIMI et al., 2016](#)). No SUFI2,

a incerteza nos parâmetros é responsável por todas as fontes de incertezas, como incerteza nas variáveis de condução, parâmetros, dados medidos e modelo conceitual. O aumento do número de incertezas nos parâmetros, gera incertezas nas variáveis de saída do modelo, as quais são expressas como distribuições de probabilidade de 95% (denominada como incerteza de previsão de 95% ou 95PPU), calculada nos níveis de 2.5% e 97.5% da função de distribuição cumulativa das variáveis de saída (ABBASPOUR et al., 2015).

No algoritmo SUFI2, é desejado que o resultado da 95PPU inclua a maior parte das observações. As observações são valores obtidos no sistema natural, e tem grande importância, pois é o culminar de todos os processos que acontecem na área de estudo. Um problema com as observações, é que muitas das vezes uma combinação de processos errados no modelo, também é capaz de gerar bons resultados na simulação. Diante disso, quanto maior o número de variáveis que representem processos diferentes forem incluídas na função objetivo, maior será a probabilidade de evitar processos errados (ABBASPOUR et al., 2015).

2.6 Produção primária bruta (Gross Primary Productivity – GPP)

A produção primária bruta (GPP, sigla em inglês), é o valor total de carbono fixado no processo de fotossíntese pelas plantas de um ecossistema em um dado intervalo de tempo (WANG et al., 2018). Para Yuan et al. (2010), a GPP é a representação da fixação bruta de carbono pelos ecossistemas terrestres, e portanto, é o início do ciclo do carbono biogeoquímico e o indicador principal dos fluxos de carbono da biosfera. Segundo Zhang et al. (2017), uma estimativa precisa da GPP não apenas dará informações a respeito da resposta do ecossistema a eventos extremos, como ondas de calor, secas, inundações, geadas e outros tipos de distúrbios, como também irá ajudar a prever a dinâmica futura do ciclo do carbono. Ainda de acordo com Zhang et al. (2017), nas últimas décadas foram criadas diversas abordagens para estimar a GPP em escala global.

Os métodos mais usados para estimar os fluxos de carbono nas regiões terrestres, de acordo com Wang et al. (2018), são:

i) Ampliação da observação de campo: que estima o fluxo de carbono da região com base em observações de campo, como medição de fluxo de carbono de covariância turbulenta e inventários florestais, é um dos métodos típicos de baixo para cima. Contudo, este método tem a desvantagem de que os pontos de observação espaçados, são incapazes de apresentar a variação espacial dos fluxos de carbono e o trabalho de campo consome dinheiro e tempo.

ii) Modelos de ecossistemas baseados em processos, como CLM (OLESON et

al., 2010), LPJ (SITCH et al., 2003) e Biome-BGC (RUNNING; GOWER, 1991): que possui transferência de carbono detalhada em ecossistemas, porém necessitam de diversos parâmetros e enormes dados de força, que podem gerar grandes incertezas nos resultados da simulação na área de estudo.

iii) Modelos de eficiência de uso de luz baseados em sensoriamento remoto, como o algoritmo VPM (XIAO et al., 2004), EC-LUE (YUAN et al., 2010), C-FIX (VEROUSTRA-ETE; SABBE; EERENS, 2002) e MOD17 (RUNNING et al., 2000): que são ferramentas eficientes na estimativa de fluxos de carbono em regiões, pois necessitam de poucos parâmetros, dados forçantes e também possuem formulas matemáticas simples.

O primeiro conjunto de dados de produção primária, com base em dados de satélites, foi o produto MOD17 (SJÖSTRÖM et al., 2013). O MOD17 é composto por três camadas, a produção primaria bruta, a fotossíntese líquida (PSN, na sigla em inglês) e a controle de qualidade da PSN (QC, na sigla em inglês), ambas disponíveis com uma resolução espacial de 500 metros tamanho do pixel e uma resolução temporal de 8 dias, embora que a GPP seja calculada em uma escala diária. Mais detalhes da descrição do produto estão disponíveis na [Tabela 1](#).

Tabela 1 – Bandas do produto MOD17A2H, suas respectivas descrições, unidades de medida e fatores de escala.

Banda	Descrição	Unidades	Fator de escala
GPP	Produção Primária Bruta	KgC/m^2	0,0001
PSN	Fotossíntese Líquida	KgC/m^2	0,0001
QC	Controle de Qualidade	N/D	N/D

3 Objetivos

3.1 Objetivo Geral

Avaliar a correlação entre a produção primária bruta e o balanço hídrico na bacia hidrográfica do Riacho do Pontal localizada no estado de Pernambuco, Brasil.

3.2 Objetivos Específicos

1. Avaliar a produção primária bruta da bacia hidrográfica do Riacho do Pontal utilizando imagens do sensor MODIS.
2. Estimar e avaliar o balanço hídrico da bacia hidrográfica do Riacho do Pontal utilizando o modelo SWAT.

4 Material e Métodos

4.1 Localização e caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado na Unidade de Planejamento Hídrico UP13, que equivale à bacia hidrográfica do Riacho do Pontal (Figura 1), composta por 59 sub-bacias, situada no extremo Oeste do estado de Pernambuco (entre 08°19'00" e 09°13'24" de latitude sul e 40°11'42" e 41°20'39" de longitude oeste), região Semiárida pernambucana do Nordeste brasileiro, inserida na mesorregião do São Francisco, composta pelos municípios de Afrânio, Dormentes, Lagoa Grande e Petrolina, com uma área de 6.015,33 Km², o equivalente a 6,12% da total área do estado e com distância de 734 Km de sua capital Recife (APAC, 2021).

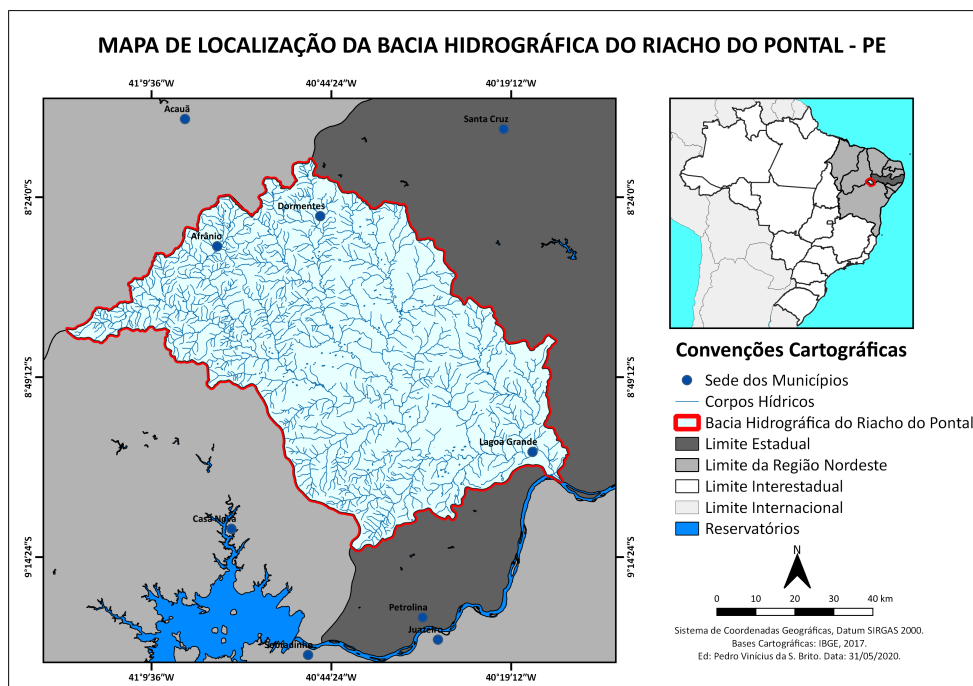


Figura 1 – Localização geográfica da bacia hidrográfica do Riacho do Pontal-Pernambuco.

O clima da região é classificado como semiárido quente (BSwh), com precipitação histórica de aproximadamente 557 mm ao ano, maior concentração de chuvas entre os meses de dezembro e março (SOUZA et al., 2016) e temperatura média anual de 27°C (MIRANDA et al., 2018). Em conformidade das características de clima e temperatura relacionadas à localização geográfica intertropical e à limpidez atmosférica em maior

período do ano, a evapotranspiração potencia é bastante elevada, principalmente na área norte do vale, com valores de 3.000 mm ao ano (SILVA et al., 2012).

A figura 2 traz o mapa de uso e cobertura do solo, gerado a partir de imagem de satélite. Na região, a vegetação de caatinga é a predominante, tal qual é constituída por formações xerófilas, decíduas, lenhosas, geralmente espinhosas, com existência de plantas de suculentas, tanto com padrão arbóreo quanto arbustivo, densa a pouco densa e com estrado herbáceo tradicional (ANDRADE-LIMA, 1981; ANDRADE-LIMA, 1992; CUNHA et al., 2008). Na região, predomina o solo exposto e/ou área urbana, e tem forte destaque nas áreas de agricultura irrigada, que segundo Miranda et al. (2018), cresce de forma acelerada com o cultivo de manga, uva e goiaba, ameaçando grande parte das áreas de vegetação nativa.

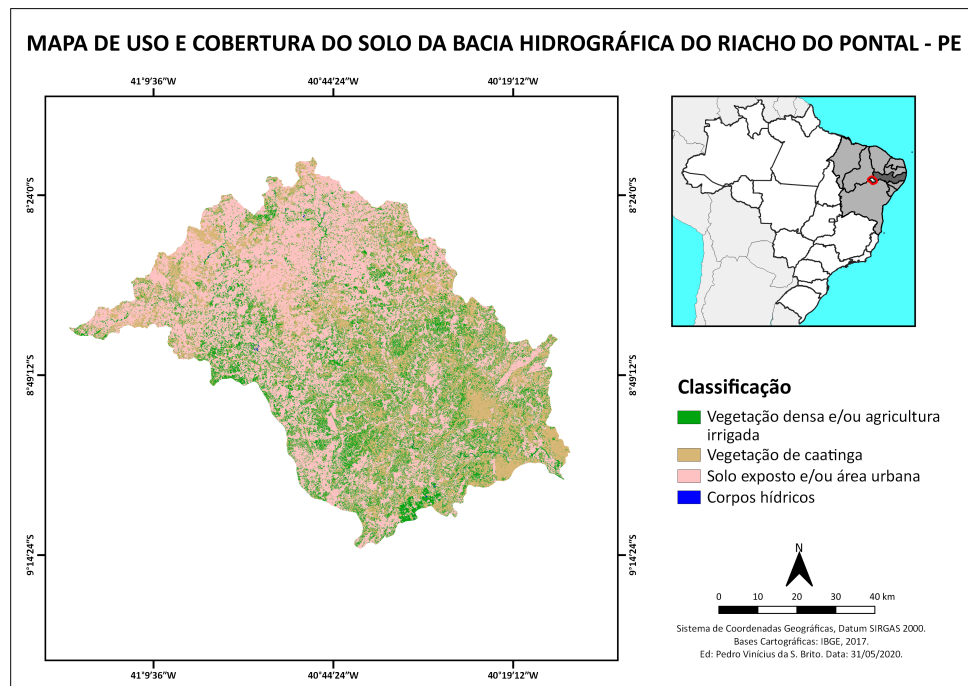


Figura 2 – Mapa de uso e cobertura do solo gerado a partir de imagem de satélite, para a bacia hidrográfica do Riacho do Pontal-Pernambuco.

A bacia do Riacho Pontal é composta por solos que pertencem as classes Argilossolos Vermelho-Amarelo Eutroficis, Neossolos Litólicos Eutroficis, Latossolo Vermelho-Amarelo Eutroficis, Luvisolos Cromicos Orticos, Luvisolos Cromicos Palicos e Planossolos Haplícos Eutroficis (SANTOS et al., 2018), com a primazia de serem rasos a medianamente profundos e intensa frequência de afloramentos rochosos e de chãos pedregosos (DESERTIFICAÇÃO, 2016), podendo atingir até 60° de temperatura no período seco (CAATINGA, 2021).

4.2 Coleta e processamento de dados de satélite

Os dados de produção primária bruta, do dia 01 de janeiro de 2001 a 31 de dezembro de 2016 foram obtidos utilizando o produto do sensor MODIS, MOD17A2 versão 6 abordo do satélite Terra, disponível gratuitamente no site do serviço Geológico dos Estados Unidos USGS/NASA (<https://earthdata.nasa.gov/>). O produto foi baixado, mosaicado e convertido para o formato GeoTiff utilizando o pacote MODISTsp do software R, que possibilita automatizar a criação de séries temporais raster decorrente dos produtos terrestres MODIS (BUSETTO; RANGHETTI, 2016).

Para obter a GPP mensal, primeiro foi calculado o seu valor diário, dividindo cada uma das primeiras 45 imagens de cada ano por oito e a última imagem por cinco (ou por seis quando bissexto), como é apresentado por Running e Zhao (2015). Em seguida, utilizando o Software ArcGIS 9.3, que possui licença do Departamento de Ciências Geográficas da Universidade Federal de Pernambuco, as imagens com valores diários obtidas foram somadas em cada mês para cada ano, e assim, foram calculados os valores mensais. Para obter a GPP anual, foi realizada a soma das imagens dos meses de cada ano. Utilizando o Software ArcGIS 9.3 novamente, foi realizado o recorte das imagens no formato da bacia hidrográfica de estudo.

Posteriormente, utilizou-se os pacotes tidyverse (WICKHAM; WICKHAM, 2017), raster (HIJMANS et al., 2015), sf (PEBESMA, 2018) e ggplot2 (WICKHAM; CHANG; WICKHAM, 2016) do software R para realizar a criação de mapas temáticos, e assim, se ter uma melhor visão espacial dos valores em toda a região da bacia. Em seguida, foram extraídos os valores de produção primária bruta mínima, média e máxima dos anos de 2001 a 2016 e apresentados por meio de gráficos que foram elaborados utilizando o pacote ggplot2 (WICKHAM; CHANG; WICKHAM, 2016). As etapas do processamento estão apresentadas na Figura 3.

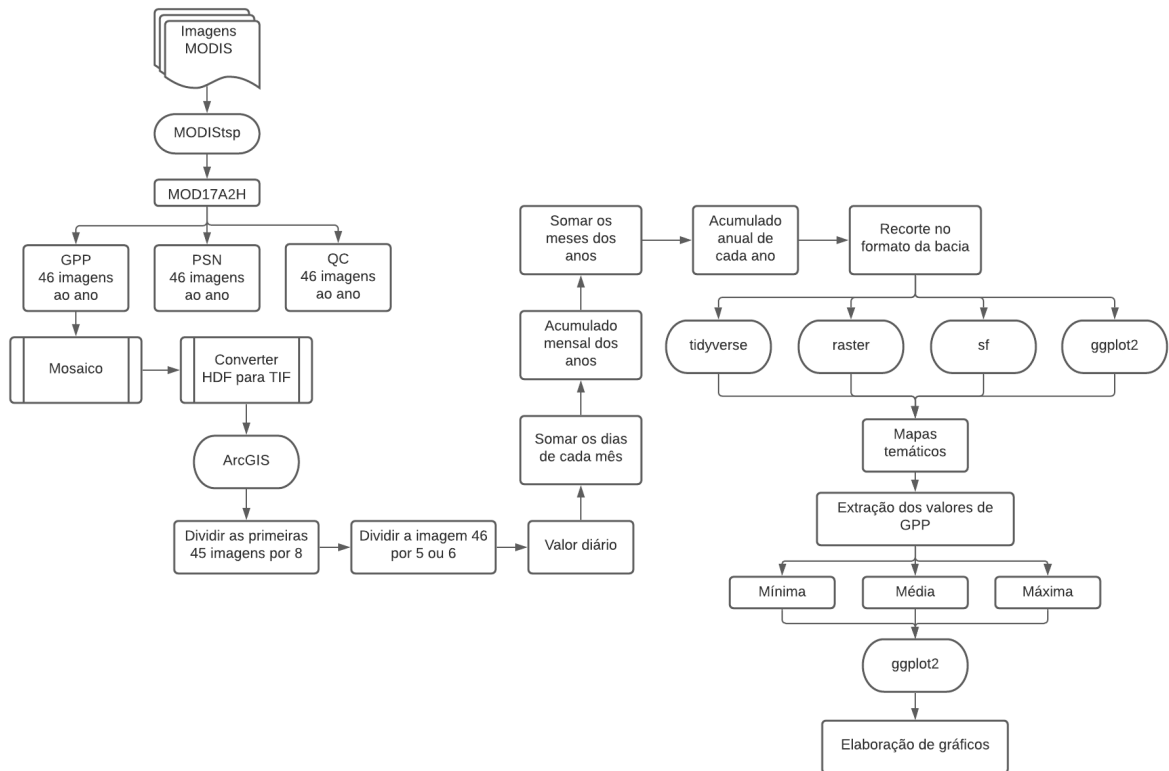


Figura 3 – Fluxograma das etapas do processamento dos dados de satélite.

O cálculo da GPP decorrente do algoritmo MOD17 é baseado na teoria de [Monteith \(1972\)](#), que relaciona de forma linear a eficiência do uso da luz (LUE, na sigla em inglês) em $gC.MJ^{-1}$ e a radiação fotossinteticamente ativa absorvida (APAR, na sigla em inglês) expressa em W/m^2 , dado por:

$$GPP = \varepsilon \cdot APAR \quad (4.1)$$

onde ε é a eficiência do uso da luz obtida pela multiplicação dos valores de eficiência máxima de uso da luz (ε_{max}) em $gC.MJ^{-1}$, fração mínima de temperatura ($TMIN_{scalar}$) em °C e fração de déficit de pressão de vapor (VPD_{scalar}) em °C, como escrita na equação 4.2, e o APAR é a radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela vegetação, dada pelo produto da radiação fotossinteticamente ativa incidente (PAR, na sigla em inglês) e a fração de PAR absorvida ($fPAR$), ambas em MJm^{-2} , como apresenta a equação 4.5.

$$\varepsilon = \varepsilon_{max} \cdot TMIN_{scalar} \cdot VPD_{scalar} \quad (4.2)$$

As variáveis $TMIN_{scalar}$ e VPD_{scalar} são multiplicadores que diminuem a eficiência máxima de conversão do uso da luz em condições de baixas temperaturas e alto VPD_{scalar} , deste modo, inibindo a fotossíntese. Os mesmos variam em uma escala de zero a um, no qual zero indica total inibição e um caracteriza a ausência de inibição da fotossíntese

(MORAIS, 2019). O cálculo desses redutores escalares para as limitações de temperatura e umidade é obtido como:

$$f(TMIN_{scalar}) = \begin{cases} 1 & \text{se } TMIN > TMIN_{max} \\ \frac{TMIN - TMIN_{min}}{TMIN_{max} - TMIN_{min}} & \text{se } TMIN_{min} < TMIN < TMIN_{max} \\ 0 & \text{se } TMIN < TMIN_{min} \end{cases} \quad (4.3)$$

$$f(VPD_{scalar}) = \begin{cases} 0 & \text{se } VPD > VPD_{max} \\ \frac{VPD_{min} - VPD}{VPD_{max} - VPD_{min}} & \text{se } VPD_{min} < VPD < VPD_{max} \\ 1 & \text{se } VPD < VPD_{min} \end{cases} \quad (4.4)$$

onde $TMIN$, $TMIN_{min}$ e $TMIN_{max}$ representam respectivamente a temperatura mínima diária, a temperatura mínima na qual a LUE vale zero e o limite máximo de temperatura considerando que o LUE é máximo, em condição ótima de temperatura. O VDP simboliza o deficit de pressão de vapor médio diário, VPD_{min} o limite mínimo em que o valor de LUE é igual a ε_{max} e VPD_{max} o limite máximo onde LUE tem valor zero (MORAIS, 2019; ZHANG et al., 2019; LIANG, 2017).

As variáveis ε_{max} , $TMIN_{min}$, $TMIN_{max}$, VPD_{min} e VPD_{max} tem valores que variam de acordo com os tipos de uso da terra, sendo extraídos da tabela de propriedades do bioma (BPLUT) disponível pela Universidade de Boston (UMD) (MORAIS, 2019; ZHANG et al., 2019). Por outro lado, os dados de $TMIN$ e VPD são obtidos por meio do Global Modeling and Assimilaation Office (GMAO/NASA) e $fPAR$ pelo produto MOD15A2.

$$APAR = PAR \cdot fPAR \quad (4.5)$$

O valor de PAR é calculado pelo produto da radiação de ondas curtas incidentes sobre a superfície (SWR_{ad}) em MJm^{-2} adquirida pelo GMAO/NASA por 0,45, como mostra a equação 4.6:

$$PAR = SWR_{ad} \cdot 0,45 \quad (4.6)$$

onde 0,45 é o fator de aproveitamento da luz solar.

A estimativa de $fPAR$ decorrente do MODIS15Q1 é fundamentada na teoria da transferência radioativa tridimensional, que identifica a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela vegetação através do processo de fotossíntese, possibilitando avaliar o armazenamento total de biomassa e trocas de energia na área de análise.

4.3 Obtenção de dados do modelo SWAT

Nesse estudo foi utilizado o modelo SWAT, já calibrado por [MIRANDA \(2017\)](#), com o intuito de simular o balanço hídrico na bacia hidrográfica do Riacho do Pontal no decorrer dos últimos 16 anos consecutivos, com início em 01 de janeiro de 2001 e final em 31 de dezembro de 2016. A calibração do SWAT é necessária, uma vez que assim como outros modelos hidrológicos dispõe de variáveis e coeficientes simulados por meio de sub-modelos ([ARNOLDE et al., 2012](#)).

Ao finalizar a simulação utilizando o software SWAT-CUP, os dados de precipitação (PRECIP), produção de água (WYLD), armazenamento de água no solo (SW), escoamento superficial (SURQ), evapotranspiração potencial (PET) e evapotranspiração real (ET) que compõem o balanço hídrico, foram abertos no Software SWAT Output Viewer e extraídos do mesmo. O SWAT Output Viewer é uma ferramenta totalmente gratuita desenvolvida para visualizar e analisar rapidamente as saídas de um modelo SWAT em tempo real. Por fim, com a utilização do Software R, foi criado um gráfico de cada componente do balanço hídrico para comparar os seus valores mensais e anuais.

Por trás de todos os processos do modelo SWAT, tem-se o balanço hídrico como principal força motriz, uma vez que afeta tanto o desenvolvimento das plantas, como também o movimento de sedimentos, pesticidas, patógenos e nutrientes ([SINGH; SARASWAT; SHARPLEY, 2018](#); [ARNOLD et al., 2012](#)). O balanço hídrico dos reservatórios inclui entrada, desvios, vazão, infiltração do fundo do reservatório, precipitação na superfície e evaporação ([NEITSCH et al., 2011a](#)), sendo a equação 4.7 a base para o modelo hidrológico no SWAT ([MIRANDA, 2017](#)).

$$SW_t = SW_o + \sum_{i=1}^t (P_i - Q_i - ET_i - W_i - QR_i) \quad (4.7)$$

onde, SW_t é a quantidade final de água no solo (em mm), SW_o é a quantidade inicial de água no solo em um dado dia i (em mm), t é o tempo (em número de dias), P_i é o volume de precipitação diária de i (em mm), Q_i o valor do escoamento superficial diária de i (em mm), ET_i é o volume de evapotranspiração diária i (em mm), W_i é o valor de percolação diária i (em mm) e QR_i é o valor do fluxo de base diária i (em mm).

4.3.1 Precipitação

Para descrever a distribuição de probabilidade da quantidade de chuva no SWAT, foram utilizadas outras diversas funções de distribuição de probabilidade. O modelo SWAT dispõe para o usuário, duas opções: distribuição exponencial e distribuição assimétrica. A

segunda opção foi proposta por Nicks (1974), e é baseada em uma distribuição também assimétrica usada por Fiering (1967) com o objetivo de gerar fluxos representativos (NEITSCH et al., 2011b). Desta forma, o cálculo da quantidade de precipitação diária, em um dia chuvoso, é realizado pela equação 4.8:

$$P = \mu + 2 \cdot \sigma \cdot \left\{ \frac{\left[\left(SND - \frac{g}{6} \right) \cdot \left(\frac{g}{6} \right) + 1 \right]^3 - 1}{g} \right\} \quad (4.8)$$

onde P é o volume de chuva em um determinado dia (em mm), μ é a média de precipitação diária para o mês (em mm), σ é o desvio padrão de precipitação diária para o mês (em mm), SND é o desvio padrão normal calculado para o dia e g é o coeficiente de inclinação para a precipitação diária no mês.

O cálculo do desvio padrão normal é realizado como mostra a equação 4.9 abaixo:

$$SND = \cos(6,283 \cdot rnd_2) \cdot \sqrt{-2 \ln(rnd_1)} \quad (4.9)$$

sendo rnd_1 e rnd_2 números aleatórios entre 0 e 1.

O cálculo da precipitação diária utilizando a distribuição exponencial é gerado pela equação 4.10.

$$P = \mu \cdot (-\ln(rnd_1))^{rexp} \quad (4.10)$$

em que P é a quantidade de chuva em uma dado dia (em mm), μ é a média de precipitação diária para o mês (em mm), rnd_1 é um número aleatório entre 0 e 1, e $rexp$ é um expoente que deve ser definido entre 1 e 2.

De acordo com Neitsch et al. (2011b), a distribuição exponencial é dada como alternativa à distribuição enviesada, requer menos entradas e é geralmente mais utilizada em áreas em que dados limitados sobre eventos de precipitação estão disponíveis.

4.3.2 Evapotranspiração real

A evapotranspiração real do modelo SWAT, é determinada após obter os valores de evapotranspiração potencial total, que é a taxa em que a evapotranspiração ocorreria em uma região extensa totalmente e uniformemente coberta por vegetação em crescimento, com suprimento de água não limitado no solo. Primeiro o modelo evapora toda chuva interceptada pelo dossel da planta, em seguida, calcula o valor máximo de transpiração e o valor máximo de sublimação/evapotranspiração do solo usando abordagem semelhante à

de Ritchie (1972), e então a quantidade real de sublimação e evapotranspiração do solo é calculada (NEITSCH et al., 2011b). Se o valor de evapotranspiração potencial (PET) for inferior ao valor de água livre retirada do dossel (R_{INT}), temos que

$$ET = ED = PET \quad (4.11)$$

$$R_{INT(f)} = R_{INT(i)} - ED \quad (4.12)$$

onde ET é o valor de evapotranspiração real que ocorre na bacia hidrográfica em um determinado dia (em mm), ED é a quantidade de água livre evaporada do dossel em um determinado dia (em mm), PET é o valor de evapotranspiração potencial em um determinado dia (em mm), $R_{INT(i)}$ é o valor inicial de água livre retirada do dossel em um determinado dia (em mm) e $R_{INT(f)}$ é o valor final de água livre retida no dossel em um determinado dia (em mm).

4.3.3 escoamento superficial

O escoamento superficial do modelo SWAT é estimado utilizando o método do número da curva SCS (USDA, 1972) e o método de infiltração Green & Ampt (GREEN; AMPT, 1911). O cálculo do número de curvas é dado pela equação 4.13

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)} \quad (4.13)$$

onde Q_{surf} é o escoamento acumulado ou excesso de precipitação (em mm), R_{day} é a intensidade de precipitação diária (em mm), I_a é a abstração inicial que inclui armazenamento superficial, interceptação e infiltração antes do escoamento (em mm) e S é o parâmetro de retenção (em mm). Sendo o parâmetro de retenção obtido pela equação 4.14.

$$S = 25 \cdot 4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (4.14)$$

no qual NC é o número da curva para o dia.

As abstrações iniciais (I_a), é geralmente aproximada por $0,2S$, e pela equação 4.13 obtemos a equação 4.15.

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0,2S)^2}{(R_{day} + 0,8S)} \quad (4.15)$$

O escoamento superficial apenas ocorre quando $R_{day} > I_a$.

Para fornecer uma opção alternativa de estimar o escoamento superficial, o modelo SWAT utiliza o método de excesso de chuvas Green & Ampt Mein-Larson, desenvolvido por [Mein e Larson \(1973\)](#), a partir da equação de Green & Ampt. Este método necessita de dados de precipitação sub-diário disponibilizado pelo usuário e o seu cálculo é dado pela equação 4.16.

$$f_{inf,t} = K_e \cdot \left(1 + \frac{\Psi_{wf} \cdot \Delta\Theta_v}{F_{inf,t}} \right) \quad (4.16)$$

onde $f_{inf,t}$ é a taxa de infiltração no tempo t (em mm/h), K_e é a condutividade hidráulica efetiva (em mm/h), Ψ_{wf} é o potencial matricial da frente de umedecimento (em mm), $\Delta\Theta_v$ é a alteração na umidade volumétrica do solo através da frente de umedecimento (mm/mm) e F_{inf} é a infiltração cumulativa no instante t (em mm).

Quando o volume de precipitação é inferior a taxa de infiltração, toda a chuva irá infiltrar durante um período de tempo, e a infiltração cumulativa para esse período de tempo é obtido pela equação 4.17:

$$F_{inf,t} = F_{inf,t-1} + R_{\Delta t} \quad (4.17)$$

onde $F_{inf,t}$ é a infiltração cumulativa para um determinado intervalo de tempo (em mm), $F_{inf,t-1}$ é a infiltração acumulada para o intervalo de tempo anterior (em mm) e $R_{\Delta t}$ é a quantidade de chuva que cai durante o intervalo de tempo (em mm).

4.4 Obtenção dos dados de correlação entre GPP e balanço hídrico derivado do modelo SWAT

Para a análise de correlação, foram utilizados os dados de GPP mínima, GPP média e GPP máxima obtidos do sensor MODIS, e também os dados do modelo SWAT, de precipitação (PRECIP), escoamento superficial (SURQ), produção de água (WYLD) e evapotranspiração real (ET), considerados componentes fundamentais do balanço hídrico. A análise foi realizada utilizando o pacote corrplot ([WEI et al., 2017](#)) do software R, que apresenta os resultados em um gráfico de matriz de correlação com coeficientes de correlação coloridos de acordo com os valores obtidos, o que possibilita uma melhor visualização e interpretação dos resultados. Cada célula da matriz exibe a correlação entre duas variáveis.

O cálculo do coeficiente de correlação é realizado pela função `cor()` do próprio software R, que pode ser usada para calcular o coeficiente de correlação de Pearson, o coeficiente de

correlação de kendall e o coeficiente de correlação de Spearman. O coeficiente de correlação de Spearman é representado pela letra ρ e apresenta valores que variam de -1 a 1 , sendo $\rho = 1$ a representação de correlação forte e positiva entre duas variáveis. Por outro lado, $\rho = -1$ é a representação de correlação forte negativa entre duas variáveis, isto é, ao mesmo tempo em que uma aumenta a outra diminui. Conforme se aproxima do 1 a correlação vai ficando perfeita. Se os resultados encontrados na análise estiverem próximos de 0 , então significa que não existe correlação entre as variáveis analisadas.

O cálculo do coeficiente de correlação de Spearman é realizado utilizando a equação 4.18, apresentada abaixo:

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n^3 - n} \quad (4.18)$$

em que d_i é a diferença do posto de x_i dentre os valores de x com os postos de y_i dentre os valores de y , e n é o número de pares (x_i, y_i) .

5 Resultados e discussão

5.1 Avaliação dos dados estimados pelo modelo SWAT para a área da bacia hidrográfica do Riacho do Pontal

5.1.1 Precipitação estimada pelo modelo SWAT

Na região semiárida do Brasil a precipitação é bastante variada, condicionando, assim, o comportamento fenológico da vegetação. Diante disso, é fundamental entender a mesma, para compreender a mudança sazonal/temporal da captura de carbono na caatinga (MORAIS et al., 2017). Desta forma, a figura 4 apresenta a variação anual da precipitação pluviométrica para os anos de 2001 a 2016 de acordo com a estimativa realizada pelo modelo SWAT, para a bacia hidrográfica do Riacho do Pontal.

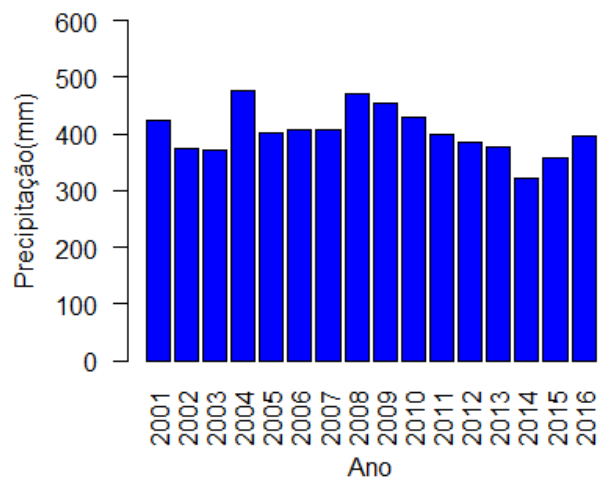


Figura 4 – Precipitação pluviométrica média anual para o período de 2001 a 2016 estimada pelo SWAT para a bacia hidrográfica do Riacho do Pontal-PE.

Em todo o período de estudo, de 2001 a 2016, a precipitação esteve abaixo da média histórica (de 557 mm), sendo 2004 o ano com o valor mais alto de todo o período, com uma média anual de 475 mm. Por outro lado, podemos observar uma queda progressiva nos valores de 2008 a 2014, sendo eles 469 mm, 454 mm, 428 mm, 397 mm, 386 mm, 378 mm, 320 mm, respectivamente. O ano de 2014 teve o menor valor de chuva de todo o período de estudo, e fez parte dos anos de seca prolongada, que ocorreu de 2012 a 2015,

tendo o seu último ano uma média de 357 mm.

Quando tem ocorrência de chuva na caatinga, a paisagem muda rapidamente, as plantas renascem, ficam cobertas de folhas verdes, e o que parecia está morto e feio, cobre-se de beleza e vida, a vegetação volta a ter o seu aspecto verde (ALVES; ARAÚJO; NASCIMENTO, 2009). Diante disso, é importante estudar o comportamento das chuvas em curto intervalo de tempo, como por exemplo, em intervalos mensais. Assim, na Figura 5 tem-se a variação mensal da precipitação pluviométrica para os anos de 2001 a 2016 de acordo com a estimativa realizada pelo modelo SWAT, para a área de estudo.

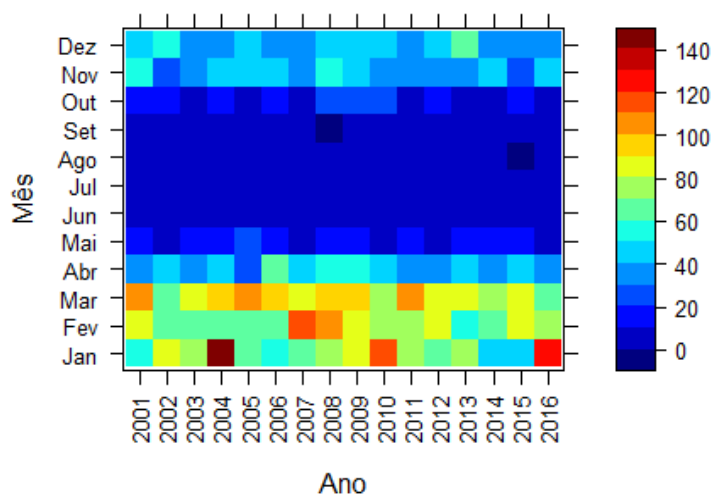


Figura 5 – Precipitação pluviométrica média mensal para o período de 2001 a 2016 estimada pelo SWAT para a bacia hidrográfica do Riacho do Pontal-PE.

O valor máximo de precipitação foi registrado em janeiro de 2004 (com 140 mm), que como mostra a figura 4, foi também o ano de maior volume de chuva da nossa série. O segundo maior valor de precipitação ocorreu em janeiro de 2016 (com 122 mm), sendo precedido por fevereiro de 2007 (com 118 mm) e janeiro de 2010 (com 113 mm). Embora os valores sejam considerados elevados, valores altos são esperados nesses meses do ano, pois estão entre os meses que são considerados de chuva na região (de novembro a março).

Do mesmo modo como os valores mais elevados estão localizados no período chuvoso da região, os menores valores de chuva estão localizados no período de estiagem (de abril a outubro). As menores quantidade de precipitação pluviométrica aconteceram em setembro de 2008 e agosto de 2015, ambos com 0 mm, indicando que não ocorreu chuva nesses meses. Podemos observar também, que os valores de junho a setembro são bastante próximos, não havendo variação de coloração do gráfico na maior parte dos anos.

A variação dos valores aumentam nos meses de outubro a dezembro, que é quando está se iniciando o período chuvoso, e começa a ocorrer pancadas de chuva na região.

De janeiro a maio, os valores apresentam grandes variações, o que mostra a grande variabilidade nos volumes de chuva nesses meses e a passagem do período chuvoso para o período de estiagem. Isso mostra que as chuvas foram regulares para todos os anos de 2001 a 2016, se concentrando nos meses da estação chuvosa da região.

5.1.2 Produção de água, água armazenada no solo e escoamento superficial estimados pelo modelo SWAT

Há uma grande dependência entre a atmosfera e a superfície da terra, que pode ser observada quando se estuda o comportamento da umidade do solo. A chuva é o meio mais comum de umedecimento do solo, e é possível observar que nem toda a água que alcança à superfície do solo, infiltra, e ainda, parte dela é perdida por evapotranspiração e escoamento superficial (MENEZES et al., 2013). Desta forma, é muito importante estudar a produção de água (volume de água que é propagado pelos canais da rede de drenagem até o exutório da bacia), a água que é armazenada no solo e o escoamento que ocorre na superfície da bacia. Sendo assim, a Figura 6 mostra a variação mensal da produção de água, da água armazenada no solo e do escoamento superficial para os anos de 2001 a 2016 de acordo com a estimativa realizada pelo modelo SWAT, para a bacia hidrográfica de estudo.

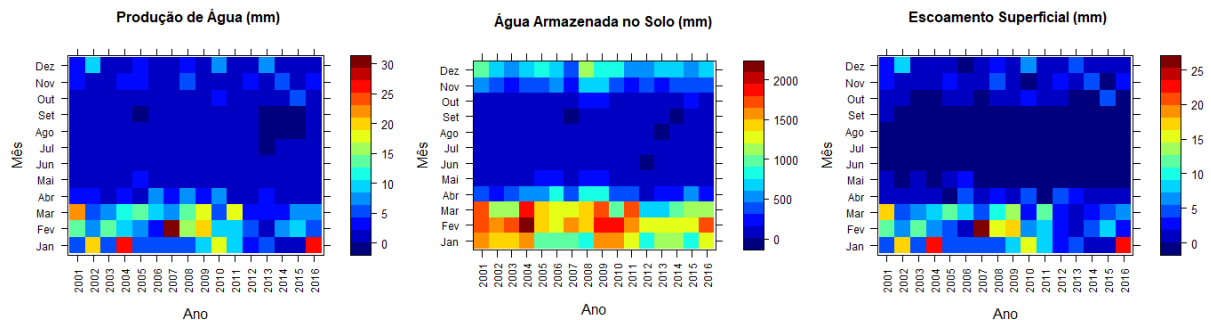


Figura 6 – Produção de água, água armazenada no solo e escoamento superficial média mensal para o período de 2001 a 2016 estimada pelo SWAT para a bacia hidrográfica do Riacho do Pontal-PE.

A produção de água teve os seus maiores valores em fevereiro de 2007 (com 29 mm), janeiro de 2004 (com 25 mm) e janeiro de 2016 (com 25 mm). Estes meses também tiveram os maiores valores de escoamento superficial, sendo eles, 25 mm em fevereiro de 2007, 22 mm em janeiro de 2004 e 22 mm em janeiro de 2016. Por outro lado, os maiores valores de água armazenada no solo estão em fevereiro de 2004 (com 2093 mm), fevereiro de 2009 (com 1930 mm), março de 2004 (com 1852 mm) e fevereiro de 2010 (com 1821 mm).

As menores quantidades de produção de água ocorreram em setembro de 2005, julho a setembro de 2013, agosto a setembro de 2014 e agosto a setembro de 2015, ambos os meses com 0 mm. Embora esses meses tenham os mesmos valores de escoamento superficial, em quase todos os anos o escoamento superficial é 0 mm para os meses de maio a setembro. No entanto, as menores quantidades de água armazenada no solo são apresentadas em setembro de 2007 (com 3 mm), junho de 2012 (com 3 mm), agosto de 2013 (com 5 mm) e setembro de 2014 (com 6 mm).

Pode-se observar que os valores mensais de produção de água e escoamento superficial variam de forma semelhante de novembro a abril, o que demonstra respeitarem o período de chuva da região. Por outro lado, o escoamento superficial apresenta uma melhor distribuição dos valores e números ainda mais baixos no período seco (de abril a outubro), comparado a produção de água. Assim como essas variáveis, a água armazenada no solo também mostra respeitar os períodos de chuva e estiagem da região, tendo valores bem distribuídos, considerados elevados de novembro a março, e baixos de abril a outubro.

Nos meses em que os valores de precipitação foram baixos, os de escoamento superficial foi ainda menor, tendo 0 mm na sua maioria. Segundo (SILVA, 2017), chuvas com menor intensidade, de 1.3 - 13 mm, não geram escoamento superficial no solo das regiões de caatinga, por causa da interceptação da chuva pela vegetação.

5.1.3 Evapotranspiração real e evapotranspiração potencial estimadas pelo modelo SWAT

A evapotranspiração é a combinação dos processos de evaporação direta na superfície do solo, evaporação direta na superfície das plantas e transpiração (FITTS, 2013). A evapotranspiração real equivale à perda de vapor de água da superfície da atmosfera que de fato acontece (BOULET et al., 2020), por outro lado, a evapotranspiração potencial é a taxa de evapotranspiração que ocorreria na superfície do solo se ocorresse um suprimento contínuo e ilimitado de umidade no solo (FITTS, 2013). Com isso, é notória a importância de analisarmos o comportamento da evapotranspiração real e a potencial da nossa região de estudo. Assim, na figura 7, temos a variação mensal da evapotranspiração real e potencial para os anos de 2001 a 2016, de acordo com a estimativa gerada pelo modelo SWAT para a bacia hidrográfica de estudo.

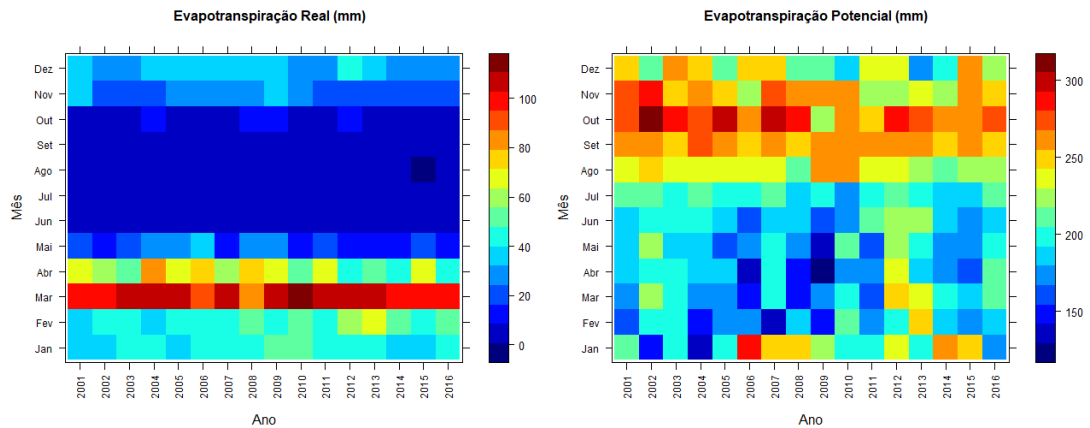


Figura 7 – Evapotranspiração real e evapotranspiração potencial média mensal para o período de 2001 a 2016 estimada pelo SWAT para a bacia hidrográfica do Riacho do Pontal-PE.

Os maiores valores de evapotranspiração real estão concentrados no mês de março, variando dos 81 mm, obtidos em março de 2008, aos 110 mm, obtidos em março de 2010. Por outro lado, a evapotranspiração potencial apresenta um destaque de valores elevados entre os meses de setembro a novembro, com os seus três maiores valores em outubro de 2002 (com 300 mm), outubro de 2007 (com 296 mm) e outubro de 2005 (com 293 mm). Podemos também, observar que em janeiro de 2006, ocorreu um valor considerado alto de evapotranspiração potencial, sendo ele, 281 mm. As menores quantidades de evapotranspiração real estão centralizadas entre os meses de maio e outubro, sendo o seu menor valor em agosto de 2015 (com 0 mm). Na evapotranspiração potencial, os baixos valores são encontrados entre janeiro e junho, sendo o menor valor obtido em abril de 2009 (com 128 mm).

Como é possível observar, a evapotranspiração real se comporta de maneira semelhante a da precipitação, respeitando os períodos de chuva e estiagem da região. Por outro lado, a evapotranspiração potencial se comporta de forma bastante distribuída, não apresentando fortes relações com os períodos de estiagem e chuva do local.

Observa-se também, que os valores de evapotranspiração real e precipitação estão bastante próximos, o que faz existir um déficit hídrico na região. Desta maneira, é indispensável a utilização de métodos de irrigação para um melhor uso das terras e crescimento da produção agrícola na região. No entanto, os valores de evapotranspiração potencial, são maiores do que os de precipitação. Segundo [Moura et al. \(2007\)](#), os valores elevados de evapotranspiração potencial, acarreta em uma baixa disponibilidade de água para a vegetação.

5.2 Avaliação da produção primária bruta derivada do MODIS na área da bacia hidrográfica do Riacho do Pontal

O estudo da dinâmica da produção primária bruta em florestas tropicais sazonalmente secas é essencial para compreender o equilíbrio do dióxido de carbono (CO_2) neste ecossistema, auxiliando na redução dos seus potenciais impactos nos níveis regional e global (FERREIRA et al., 2021). Diante disso, a Figura 8 apresenta a produção primária bruta acumulada das diferentes coberturas vegetais/solo existentes na bacia hidrográfica do Riacho do Pontal, dos anos de 2001 a 2016.

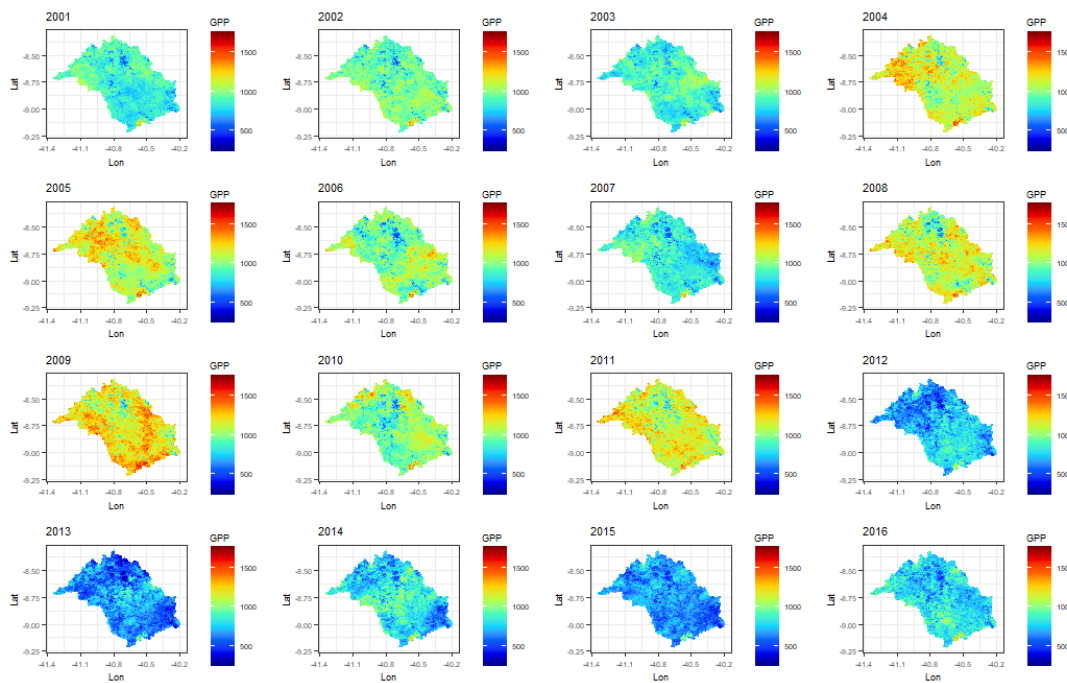


Figura 8 – Variabilidade da produção primária bruta anual para o período de 2001 a 2016 estimada pelo MODIS para a bacia hidrográfica do Riacho do Pontal-PE.

Percebe-se que os maiores valores de GPP ocorreram nos anos de 2009 (variando de 591 a 1762 gC/m^2), 2011 (variando de 575 a 1626 gC/m^2), 2005 (variando de 545 a 1624 gC/m^2), 2004 (variando de 528 a 1595 gC/m^2) e 2008 (variando de 500 a 1526 gC/m^2). Por outro lado, os menores valores de GPP apresentam-se nos anos de 2013 (variando de 238 a 1172 gC/m^2), 2015 (variando de 306 a 1219 gC/m^2), 2012 (variando de 319 a 1228 gC/m^2), 2016 (variando de 403 a 1441 gC/m^2) e 2014 (variando de 341 a 1380 gC/m^2).

Nota-se que o maior e menor valor de GPP ocorreu em 2009 e 2013, já o maior e menor volume de chuva ocorreu em 2004 e 2014, respectivamente. Assim, podemos observar que um maior volume de chuva durante o ano não acarreta em uma maior GPP anual. No entanto, uma boa distribuição de chuva durante todo o ano, pode gerar uma maior

GPP anual. Como em 2004 a chuva se concentrou em janeiro, e em 2009 a chuva teve uma melhor distribuição no decorrer do ano, então foi em 2009 que se teve uma maior GPP. Por outro lado, embora não tenha ocorrido uma grande concentração de chuva em um único mês de 2013, os valores mensais foram baixos e o ano teve um longo período de estiagem, ao contrário de 2009, o que pode ter produzido um valor baixo de GPP. Essa variação anual de GPP na vegetação de caatinga ocorrida pela variabilidade das chuvas, também foi observada por [Morais et al. \(2017\)](#).

Em todos os anos, a vegetação de caatinga e agricultura irrigada obtiveram os maiores valores de GPP ($> 600gC/m^2$), porém, podemos notar que a agricultura irrigada sempre apresenta um maior destaque na região, pois não depende diretamente da chuva, mas da água que corre no rio São Francisco.

Na Figura 9 são apresentados os valores de produção primária bruta acumulada da bacia hidrográfica do Riacho do Pontal, no decorrer dos anos de 2001 a 2016. Como observado, os maiores valores de GPP mínima, máxima e média ocorreram em abril de 2011 (com $61.42 gC/m^2$), março de 2004 (com $321.48 gC/m^2$) e maio de 2008 (com $196.31 gC/m^2$), respectivamente. Por outro lado, os menores valores de GPP mínima, máxima e média foram obtidos em novembro de 2015, com os respectivos valores, $2.40 gC/m^2$, $57.20 gC/m^2$ e $16.19 gC/m^2$.

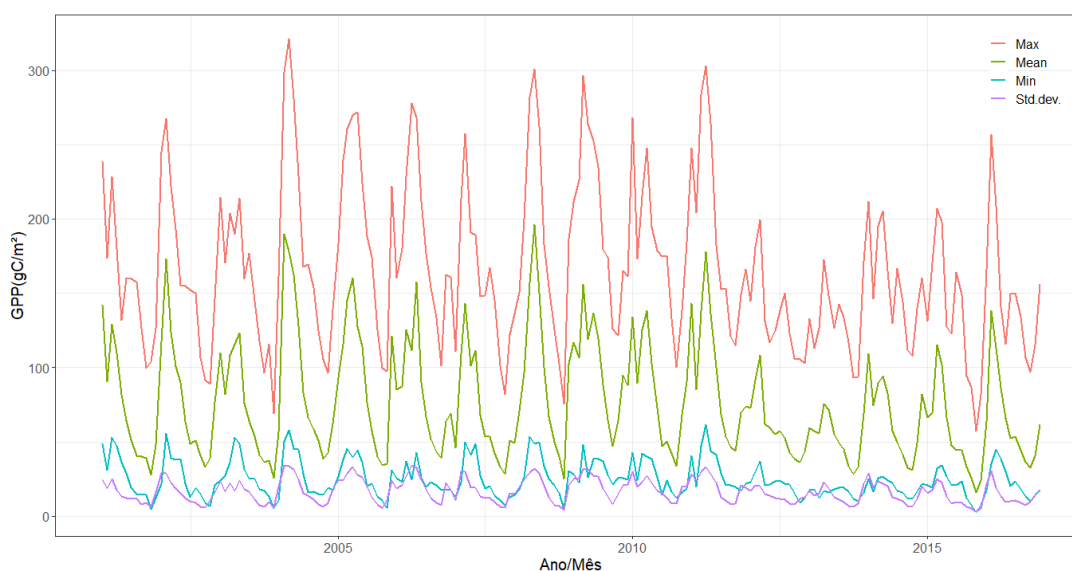


Figura 9 – Variabilidade da produção primária bruta mensal para o período de 2001 a 2016 estimada pelo MODIS para a bacia hidrográfica do Riacho do Pontal-PE.

O desvio padrão varia de modo semelhante a GPP mínima, máxima e média, tendo os seus valores entre 3.20 (obtido em novembro de 2015) e 34.10 (obtido em abril de 2006). Desta maneira, pelo intervalo de valores do desvio padrão, é visto que não há uma grande

incerteza associada.

5.3 Avaliação de correlação entre GPP e balanço hídrico derivado do modelo SWAT para a área da bacia hidrográfica do Riacho do Pontal

Na figura 10, encontram-se as análises referentes a correlação de Spearman para a GPP (mínima, média e máxima), obtida do MODIS, e as principais componentes do balanço hídrico decorrentes do modelo SWAT. Com a utilização dessa análise, pode-se identificar correlações entre as variáveis estudadas.

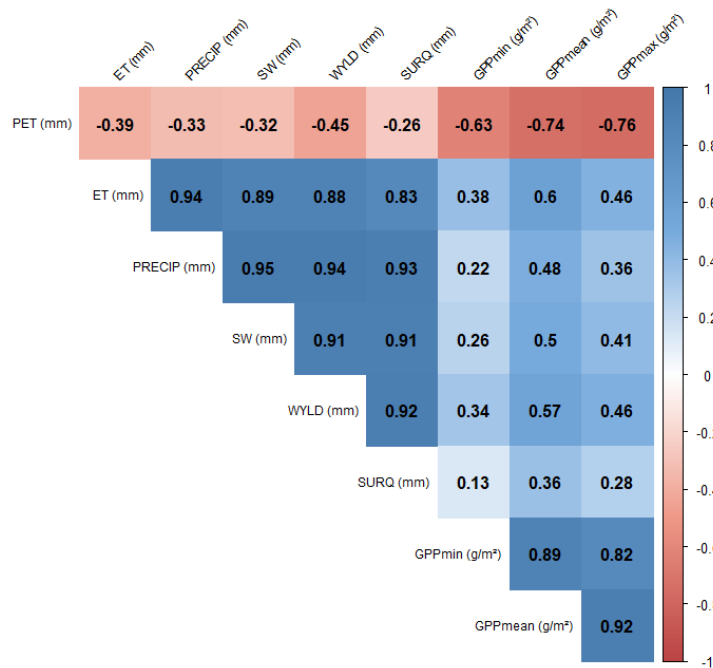


Figura 10 – Correlação anual entre GPP do MODIS e balanço hídrico derivado do modelo SWAT de 2001 a 2016 para a bacia hidrográfica do Riacho do Pontal-PE.

A GPP mínima com o escoamento superficial obteve o menor valor de correlação de toda a análise (de 0,13), uma correlação negativa com a evapotranspiração potencial (de -0,63) e positiva com as demais componentes do balanço hídrico, variando de 0,22 com a precipitação a 0,38 com a evapotranspiração real. Com a GPP média, obteve-se correlação negativa para a evapotranspiração potencial (de -0,74), e com as demais componentes do balanço hídrico, teve-se correlação positiva, variando de 0,36 com o escoamento superficial a 0,6 com a evapotranspiração real. Na GPP máxima, ocorreu novamente correlação negativa com a evapotranspiração potencial (de -0,76), e correlação positiva com todas as

outras componentes do balanço hídrico, variando de 0,28 com o escoamento superficial a 0,46 com a evapotranspiração real e produção de água.

O destaque nos valores de correlação entre a produção primária bruta e a evapotranspiração potencial, pode ocorrer pelo fato da evapotranspiração potencial simular a região nas suas condições ideais. Como afirma [Camargo e Camargo \(2000\)](#), evapotranspiração potencial representar a chuva que a região necessita, é o processo de perda de água para a atmosfera por meio de uma superfície natural coberta de grama, padrão, e sem restrições hídrica para atender às necessidades de transpiração e evaporação do solo.

Os valores de correlação entre a produção primária bruta e a precipitação foram baixos, embora que a precipitação exerça uma forte influencia na assimilação de carbono pela vegetação de caatinga. O baixo valor de correlação entre a produção primária bruta e a precipitação, também ocorre no trabalho de [Morais et al. \(2017\)](#).

6 Conclusão

Há correlação entre a produção primária bruta e o balanço hídrico, mesmo que seja baixa, como ocorreu entre a GPP mínima e o escoamento superficial. A correlação entre GPP e evapotranspiração real e potencial, foi maior do que a correlação da GPP com as demais componentes do balanço hídrico, com exceção da GPP máxima com a produção de água, que teve o mesmo valor da GPP máxima com a evapotranspiração real. Assim, o monitoramento da evapotranspiração, em regiões semiáridas, é de grande importância para a previsão da produção primária bruta.

Os prognósticos do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, sigla em inglês) prevê o aumento de eventos extremos em regiões semiáridas. Assim, é possível afirmar que se os cenários das mudanças climáticas vierem a ocorrer, há uma forte tendência da produção primária bruta, em regiões semiáridas, diminuir.

Referências Bibliográficas

- ABBASPOUR, C. K. Swat calibration and uncertainty programs. **A User Manual**. Eawag Zurich, Switzerland, v. 20, 2008.
- ABBASPOUR, K. C. et al. A continental-scale hydrology and water quality model for europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale swat model. **Journal of Hydrology**, Elsevier, v. 524, p. 733–752, 2015.
- ABBASPOUR, K. C. et al. Swat-cup calibration and uncertainty programs for swat. In: **MODSIM 2007 international congress on modelling and simulation, modelling and simulation society of Australia and New Zealand**. [S.l.: s.n.], 2007. p. 1596–1602.
- ALVES, J. J. A.; ARAÚJO, M. A. de; NASCIMENTO, S. S. do. Degradação da caatinga: uma investigação ecogeográfica. **Revista Caatinga**, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, v. 22, n. 3, p. 126–135, 2009.
- ANDRADE-LIMA, D. d. The caatingas dominium. **Revista brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 4, n. 2, p. 149–153, 1981.
- ANDRADE-LIMA, D. d. O domínio das caatingas. **Recife: UFRPE: IPA**, p. 48, 1992.
- APAC. **Agência Pernambucana de Águas Climáticas**. 2021. Disponível em: <http://old.apac.pe.gov.br/pagina.php?page_id=5&subpage_id=25>. Acesso em: 21/06/2021.
- ARNOLD, J. G. et al. Swat: Model use, calibration, and validation. **Transactions of the ASABE**, American Society of Agricultural and Biological Engineers, v. 55, n. 4, p. 1491–1508, 2012.
- ARNOLD, J. G. et al. Large area hydrologic modeling and assessment part i: model development 1. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, Wiley Online Library, v. 34, n. 1, p. 73–89, 1998.
- BAKER, T. J.; MILLER, S. N. Using the soil and water assessment tool (swat) to assess land use impact on water resources in an east african watershed. **Journal of hydrology**, Elsevier, v. 486, p. 100–111, 2013.
- BAUMERT, K.; HERZOG, T.; PERSHING, J. Navigating the numbers: Greenhouse gas data and international climate policy—part 1. 01 2005.
- BEVEN, K.; BINLEY, A. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. **Hydrological processes**, Wiley Online Library, v. 6, n. 3, p. 279–298, 1992.

- BOULET, G. et al. Chapter 2 - evapotranspiration in the mediterranean region. In: ZRIBI, M. et al. (Ed.). **Water Resources in the Mediterranean Region**. Elsevier, 2020. p. 23–49. ISBN 978-0-12-818086-0. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128180860000029>>.
- 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. 9–35, 2015.
- BUSETTO, L.; RANGHETTI, L. Modistsp: An r package for automatic preprocessing of modis land products time series. **Computers & geosciences**, Elsevier, v. 97, p. 40–48, 2016.
- CAATINGA, A. **Bioma Caatinga**. 2021. Disponível em: <<https://www.acaatinga.org.br/sobre-a-caatinga/>>. Acesso em: 21/06/2021.
- CAMARGO, â. P. d.; CAMARGO, M. B. P. d. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. **Bragantia**, SciELO Brasil, v. 59, p. 125–137, 2000.
- CARVALHO, J. L. N. et al. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, SciELO Brasil, v. 34, n. 2, p. 277–290, 2010.
- COE, H. H. G.; SOUSA, L. The brazilian"caatinga": Ecology and vegetal biodiversity of a semiarid region. **Dry forests: Ecology, species diversity and sustainable management**, Nova Science New York, v. 1, p. 81–103, 2014.
- COLLIER, C. The hydrological cycle. In: _____. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–10. ISBN 9781118414989.
- COUTRIM, R. L.; SOUZA, L. H. Identificação de árvores de potencial medicinal nativas dos biomas caatinga e cerrado na bahia. **GEOPAUTA**, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, v. 2, n. 2, p. 38–45, 2018.
- CUI, Y. et al. Global water cycle and remote sensing big data: Overview, challenge, and opportunities. **Big Earth Data**, Taylor & Francis, v. 2, n. 3, p. 282–297, 2018.
- CUNHA, T. et al. Solos do submédio do vale do são francisco: potencialidades e limitações para uso agrícola. **Embrapa Semiárido-Documentos (INFOTECA-E)**, Petrolina: Embrapa Semi-Árido, 2008., 2008.
- DAVIE, T.; QUINN, N. **Fundamentals of Hydrology**. Routledge, 2019. (Routledge fundamentals of physical geography series). ISBN 9780415858700. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=D4b3oAEACAAJ>>.
- DESERTIFICAÇÃO, C. degradação da terra e secas no brasil. **Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos**, 2016.
- DEVIA, G. K.; GANASRI, B. P.; DWARAKISH, G. S. A review on hydrological models. **Aquatic Procedia**, Elsevier, v. 4, p. 1001–1007, 2015.

EDWARDS, P. J.; WILLIARD, K. W.; SCHOONOVER, J. E. Fundamentals of watershed hydrology. **Journal of contemporary water research & education**, Wiley Online Library, v. 154, n. 1, p. 3–20, 2015.

EPIPHANIO, P. P. D.; ARAÚJO, H. B. As florestas e produtos madeiros como agentes mitigadores dos efeitos do aquecimento global. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, v. 17, p. 16–35, 2011.

FEKETE, B. M. et al. Uncertainties in precipitation and their impacts on runoff estimates. **Journal of Climate**, v. 17, n. 2, p. 294–304, 2004.

FERREIRA, R. R. et al. An assessment of the mod17a2 gross primary production product in the caatinga biome, brazil. **International Journal of Remote Sensing**, Taylor & Francis, v. 42, n. 4, p. 1275–1291, 2021.

FIERING, M. **Streamflow Synthesis**. Harvard University Press, 1967. (Streamflow Synthesis). ISBN 9780608115665. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=iPu6AAAIAAJ>>.

FILHO, J. M. P. et al. Efeito da altura de corte no controle da jurema-preta [mimosa tenuiflora (wild) poir.]. **Revista Caatinga**, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, v. 23, n. 2, p. 51–58, 2010.

FILHO, J. M. P. L. Ecofisiologia de plantas da caatinga. In: IN: REUNIÃO NORDESTINA DE BOTÂNICA, 27., 2004, PETROLINA. ANAIS... PETROLINA **Embrapa Semiárido-Artigo em anais de congresso (ALICE)**. [S.l.], 2004.

FITTS, C. R. 1 - groundwater: The big picture. In: FITTS, C. R. (Ed.). **Groundwater Science (Second Edition)**. Second edition. Boston: Academic Press, 2013. p. 1–22. ISBN 978-0-12-384705-8. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123847058000017>>.

FRANCO, A. C. L.; BONUMÁ, N. B. Multi-variable swat model calibration with remotely sensed evapotranspiration and observed flow. **RBRH**, SciELO Brasil, v. 22, 2017.

GAIKADI, S. Morphometric analysis and prioritization of microwatershed of bisalpur reservoir using geospatial techniques. In: _____. [S.l.: s.n.], 2019. p. 2991. ISBN 2278-3075.

GALVÍNCIO, J. D. et al. Vitis vinifera spectral response to the increase of co2. **Embrapa Semiárido-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, Journal of Hyperspectral Remote Sensing, Recife, v. 1, n. 1, p. 1-18, 2011., 2011.

GILKS, W. R. M arkov chain m onte c arlo. **Encyclopedia of biostatistics**, Wiley Online Library, v. 4, 2005.

GOMES, V. P. **Avaliação espacial de espécies vegetais em áreas de caatinga com dados LiDAR**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2017.

GRANDIS, A.; GODOI, S.; BUCKERIDGE, M. S. Respostas fisiológicas de plantas amazônicas de regiões alagadas às mudanças climáticas globais. **Brazilian Journal of Botany**, SciELO Brasil, v. 33, n. 1, p. 1–12, 2010.

- GREEN, W. H.; AMPT, G. Studies on soil physics. **The Journal of Agricultural Science**, Cambridge University Press, v. 4, n. 1, p. 1–24, 1911.
- GRIENSVEN, A. V.; MEIXNER, T. A global and efficient multi-objective auto-calibration and uncertainty estimation method for water quality catchment models. **Journal of Hydroinformatics**, IWA Publishing, v. 9, n. 4, p. 277–291, 2007.
- HIJMANS, R. J. et al. Package ‘raster’. **R package**, v. 734, 2015.
- KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle swarm optimization. In: IEEE. **Proceedings of ICNN’95-international conference on neural networks**. [S.l.], 1995. v. 4, p. 1942–1948.
- KOBIYAMA, M.; MANFROI, O. Importância da modelagem e monitoramento em bacias hidrográficas. **Curso de Extensão: Manejo de bacias hidrográficas sob a perspectiva florestal**. Curitiba: Curso de Eng. Florestal–UFPR, p. 111–118, 1999.
- KOEHLER, H.; WATZLAWICK, L.; KIRCHNER, F. Fontes e níveis de erros nas estimativas do potencial de fixação de carbono. **As florestas e o carbono**. Curitiba: UFPR, p. 251–264, 2002.
- LEAL, I. R. et al. Mudando o curso da conservação da biodiversidade na caatinga do nordeste do Brasil. **Megadiversidade**, Conservação Internacional do Brasil Belo Horizonte, Brazil, v. 1, n. 1, p. 139–146, 2005.
- LIANG, S. **Comprehensive Remote Sensing**. [S.l.]: Elsevier, 2017.
- LIMA, L. S. de. Implementação de um modelo hidrológico distribuído na plataforma de modelagem dinâmica ego. Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.
- MARENGO, J. A. Mudanças climáticas globais e regionais: Avaliação do clima atual do Brasil e projeções de cenários climáticos do futuro. 2001.
- MEIN, R. G.; LARSON, C. L. Modeling infiltration during a steady rain. **Water resources research**, Wiley Online Library, v. 9, n. 2, p. 384–394, 1973.
- MENEZES, J. A. L. de et al. Comportamento temporal da umidade do solo sob caatinga e solo descoberto na bacia experimental do Jatobá, Pernambuco. **Water Resources and Irrigation Management-WRIM**, v. 2, n. 1, p. 45–51, 2013.
- MERRITT, W. S.; LETCHER, R. A.; JAKEMAN, A. J. A review of erosion and sediment transport models. **Environmental Modelling & Software**, Elsevier, v. 18, n. 8-9, p. 761–799, 2003.
- MIRANDA, R. D. Q. Avaliação integrada da variação espacial e temporal do balanço hídrico na caatinga. Universidade Federal de Pernambuco, 2017.
- MIRANDA, R. D. Q. et al. Dry forest deforestation dynamics in Brazil’s Pontal basin. **Revista Caatinga**, v. 31, p. 385–395, 04 2018.

- MONTEIRO, E. R. et al. Genetic diversity and structure of populations in pilosocereus gounellei (fac weber ex k. schum.)(cactaceae) in the caatinga biome as revealed by heterologous microsatellite primers. **Biochemical Systematics and Ecology**, Elsevier, v. 58, p. 7–12, 2015.
- MONTEITH, J. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. **Journal of applied ecology**, JSTOR, v. 9, n. 3, p. 747–766, 1972.
- MORAIS, Y. C. B. Variação espacial e temporal da produção primária bruta no bioma caatinga. Universidade Federal de Pernambuco, 2019.
- MORAIS, Y. C. B. et al. Análise do sequestro de carbono em áreas de caatinga do semiárido pernambucano. **Revista Brasileira de Meteorologia**, SciELO Brasil, v. 32, n. 4, p. 585–599, 2017.
- MOURA, M. de et al. Clima e água de chuva no semi-árido. **Embrapa Semiárido-Capítulo em livro científico (ALICE)**, In: BRITO, LT de L.; MOURA, MSB de; GAMA, GFB (Ed.). Potencialidades da água . . . , 2007.
- NEITSCH, S. L. et al. **Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009**. [S.l.], 2011.
- NEITSCH, S. L. et al. **Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009**. [S.l.], 2011.
- NICKS, A. Stochastic generation of the occurrence, pattern, and location of maximum amount of daily rainfall. In: USDA WASHINGTON, DC. **Proc. symp. statistical hydrology**. [S.l.], 1974. p. 154–171.
- NOVO, E. M. de M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. [S.l.]: Editora Blucher, 2010.
- OLESON, K. W. et al. Technical description of version 4.0 of the community land model (clm). Citeseer, 2010.
- PEBESMA, E. J. Simple features for r: standardized support for spatial vector data. **R J.**, v. 10, n. 1, p. 439, 2018.
- RITCHIE, J. T. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. **Water resources research**, Wiley Online Library, v. 8, n. 5, p. 1204–1213, 1972.
- RODRIGUES, T. R. et al. Temporal patterns of energy balance for a brazilian tropical savanna under contrasting seasonal conditions. **International Journal of Atmospheric Sciences**, Hindawi, v. 2013, 2013.
- RUNNING, S. W.; GOWER, S. T. Forest-bgc, a general model of forest ecosystem processes for regional applications. ii. dynamic carbon allocation and nitrogen budgets. **Tree physiology**, Heron Publishing, v. 9, n. 1-2, p. 147–160, 1991.
- RUNNING, S. W. et al. Global terrestrial gross and net primary productivity from the earth observing system. In: **Methods in ecosystem science**. [S.l.]: Springer, 2000. p. 44–57.

- RUNNING, S. W.; ZHAO, M. Daily gpp and annual npp (mod17a2/a3) products nasa earth observing system modis land algorithm. **MOD17 User's Guide**, v. 2015, p. 1–28, 2015.
- RUSLI, N. et al. Integrating manual calibration and auto-calibration of swat model in muar watershed, johor. In: IEEE. **2016 7th IEEE Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC)**. [S.l.], 2016. p. 197–202.
- SALIMI, E. T. et al. Runoff simulation using swat model and sufi-2 algorithm (case study: Shafaroud watershed, guilan province, iran). **Caspian Journal of Environmental Sciences**, University of Guilan, v. 14, n. 1, p. 69–80, 2016.
- SANTANA, J. A. da S.; SOUTO, J. S. Diversidade e estrutura fitossociológica da caatinga na estação ecológica do seridó-rn. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Universidade Estadual da Paraíba, v. 6, n. 2, p. 232–242, 2006.
- SANTOS, H. G. dos et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. [S.l.]: Brasília, DF: Embrapa, 2018., 2018.
- SCHAEFFER, M. et al. Co2 and albedo climate impacts of extratropical carbon and biomass plantations. **Global Biogeochemical Cycles**, Wiley Online Library, v. 20, n. 2, 2006.
- SHARMA, N.; KANWAR, V. S.; KANDRA, H. Water balance evaluation of chandigarh region, india. In: . [S.l.: s.n.], 2019.
- SILVA, D. C. d. **Interceptação da chuva e escoamento superficial de água no solo no semiárido Pernambucano**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2017.
- SILVA, M. T. et al. Análise de risco de degradação na bacia hidrográfica do riacho do pontal-pe. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, n. 3, p. 646–660, 2012.
- SINGH, G.; SARASWAT, D.; SHARPLEY, A. A sensitivity analysis of impacts of conservation practices on water quality in l'anguille river watershed, arkansas. **Water**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 10, n. 4, p. 443, 2018.
- SITCH, S. et al. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the lpj dynamic global vegetation model. **Global change biology**, Wiley Online Library, v. 9, n. 2, p. 161–185, 2003.
- SJÖSTRÖM, M. et al. Evaluation of modis gross primary productivity for africa using eddy covariance data. **Remote Sensing of Environment**, Elsevier, v. 131, p. 275–286, 2013.
- SOLOMATINE, D.; WAGENER, T. 2.16 - hydrological modeling. In: _____. [S.l.: s.n.], 2011. p. 435 – 457. ISBN 9780444531995.
- SOLOMON, S. et al. **Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change**. [S.l.]: Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.

- SOUZA, P. et al. Análise fisiográfica da bacia hidrográfica do riacho do pontal-pe. In: _____. [S.l.: s.n.], 2016. p. 8. ISBN 978-85-922143-0-2.
- SPIELHAGEN, R. F. Hotspots in the arctic: Natural archives as an early warning system for global warming. **Geology**, Geological Society of America, v. 40, n. 11, p. 1055–1056, 2012.
- TABARELLI, M. et al. Caatinga: legado, trajetória e desafios rumo à sustentabilidade. **Ciência e Cultura**, Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, v. 70, n. 4, p. 25–29, 2018.
- TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. [S.l.]: Editora da UFRGS Porto Alegre, 1998.
- USDA, S. National engineering handbook, section 4: Hydrology. **Washington, DC**, 1972.
- UZEIKA, T. et al. Use of the swat model for hydro-sedimentologic simulation in a small rural watershed. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, SciELO Brasil, v. 36, n. 2, p. 557–565, 2012.
- VEROUSTRAETE, F.; SABBE, H.; EERENS, H. Estimation of carbon mass fluxes over europe using the c-fix model and euroflux data. **Remote sensing of environment**, Elsevier, v. 83, n. 3, p. 376–399, 2002.
- VITÓRIAS, M. Maria das et al. Emissões de co2 provenientes do uso e mudanças no uso da terra no bioma caatinga no nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n. 01, p. 144–155, 2015.
- WANG, X. et al. **Photosynthesis (NPP, NEP, Respiration)**. [S.l.]: Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2018. 1–30 p.
- WATER, W. C. Wmo greenhouse gas bulletin. 2019.
- WEI, T. et al. Package ‘corrplot’. **Statistician**, v. 56, n. 316, p. e24, 2017.
- WICKHAM, H.; CHANG, W.; WICKHAM, M. H. Package ‘ggplot2’. **Create Elegant Data Visualisations Using the Grammar of Graphics. Version**, v. 2, n. 1, p. 1–189, 2016.
- WICKHAM, H.; WICKHAM, M. H. Package tidyverse. **Easily Install and Load the ‘Tidyverse**, 2017.
- XIAO, X. et al. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest. **Remote sensing of environment**, Elsevier, v. 89, n. 4, p. 519–534, 2004.
- YU, Z. Hydrology, floods and droughts | modeling and prediction. In: NORTH, G. R.; PYLE, J.; ZHANG, F. (Ed.). **Encyclopedia of Atmospheric Sciences (Second Edition)**. Second edition. Oxford: Academic Press, 2015. p. 217–223. ISBN 978-0-12-382225-3. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123822253001729>>.

YUAN, W. et al. Global estimates of evapotranspiration and gross primary production based on modis and global meteorology data. **Remote Sensing of Environment**, Elsevier, v. 114, n. 7, p. 1416–1431, 2010.

ZHANG, L. et al. Contrasting the performance of eight satellite-based gpp models in water-limited and temperature-limited grassland ecosystems. **Remote Sensing**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 11, n. 11, p. 1333, 2019.

ZHANG, Y. et al. A global moderate resolution dataset of gross primary production of vegetation for 2000–2016. **Scientific data**, Nature Publishing Group, v. 4, n. 1, p. 1–13, 2017.