

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ANÁLISE E MODELAGEM
DE SISTEMAS AMBIENTAIS**

Welisson Wendel Eufrásio Gomes

**MODELAGEM ESPAÇO-TEMPORAL DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO
DE REFERÊNCIA NA BACIA AMAZÔNICA EM UM CENÁRIO DE
CRESCIMENTO NA EMISSÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA**

BELO HORIZONTE
2020

Welisson Wendel Eufrásio Gomes

**MODELAGEM ESPAÇO-TEMPORAL DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO
DE REFERÊNCIA NA BACIA AMAZÔNICA EM UM CENÁRIO DE
CRESCIMENTO NA EMISSÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Britaldo
Silveira Soares Filho

BELO HORIZONTE
2020

G633m 2020 Gomes, Welisson Wendel Eufrásio.
Modelagem espaço-temporal da evapotranspiração de referência na Bacia Amazônica em um cenário de crescimento da emissão de gases do efeito estufa [manuscrito] / Welisson Wendel Eufrásio Gomes. – 2020. 69 f., enc.: il. (principalmente color.)

Orientador: Britaldo Silveira Soares Filho.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2020.

Bibliografia: f. 39-43.
Inclui apêndice.

1. Modelagem de dados – Aspectos ambientais – Teses. 2. Evapotranspiração – Teses. 3. Mudanças climáticas – Teses. 4. Amazônia – Teses. I. Soares Filho, Britaldo Silveira. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 911.2:519.6(811)



FOLHA DE APROVAÇÃO

Modelagem espaço-temporal da evapotranspiração de referência na Bacia Amazônica em um cenário de crescimento na emissão de gases do efeito estufa

WELISSON WENDEL EUFRÁSIO GOMES

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS, como requisito para obtenção do grau de Mestre em ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS, área de concentração ANÁLISE, MODELAGEM E GESTÃO DE SISTEMAS AMBIENTAIS.

Aprovada em 30 de junho de 2020, pela banca constituída pelos membros:

Prof. Britaldo Silveira Soares Filho - Orientador
UFMG

Prof. Ubirajara de Oliveira
UFMG

Prof. Felipe Santos de Miranda Nunes
CIT

Prof. Argemiro Teixeira Leite Filho
UFMG

Belo Horizonte, 30 de junho de 2020.

Agradecimentos

Não poderia iniciar esse agradecimento de outra forma, que até mesmo para mim é uma novidade. Agradeço a Deus! Agradeço a Ele pela nutrição de meu espírito, pela paz em minha alma, pelo sossego em meu coração. Nos momentos difíceis se fez presente, nos momentos fáceis descansou comigo.

À minha mãe Ruth e ao meu pai Geraldo. O orgulho que dizem sentir de mim nem se compara ao orgulho que sinto de vocês. Trabalhadores e acima de tudo batalhadores! Me ensinaram a importância dos estudos e da educação. Mais importante que isso, me ensinaram a importância de ser bom e levar essa bondade pra onde quer que seja. À minha irmã Weslaine, o exemplo que segui!

Agradeço aos meus amigos das antigas e aos novos. Àqueles que encontrei no caminho e dividi a jornada, mesmas aflições e mesmos alívios. Àqueles que me acompanharam do lado de fora e que ainda assim sempre tinham a palavra certa pra me jogar pra cima. A todos esses, Zecastê!

Agradeço à toda equipe do CSR, que com simples conversas de corredores me deixaram tranquilo durante todo o processo, em especial a Amanda, Lilian e Debora!

Agradecimento especial ao Argemiro pelo acompanhamento e apoio! Todas as dicas e conselhos foram imprescindíveis na elaboração desse trabalho. De coração, meu muito obrigado!

À Amanda, que chegou no final desse processo e ainda assim foi importante por me incentivar e me dar forças. Espero um dia retribuir todo o seu carinho, amor e amizade.

Ao meu orientador Britaldo, por ter contribuído de tantas maneiras com minha formação acadêmica.

À coordenação e secretaria do PPG em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais. Agradeço pela compreensão, apoio e confiança durante o processo.

Aos membros da banca, Felipe Nunes e Ubirajara Oliveira, agradeço pelo interesse, aceite e disponibilidade. Suas contribuições são de grande valia para o enriquecimento desse trabalho.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela concessão da bolsa de mestrado durante os 24 meses de pesquisa que permitiu a realização desse trabalho.

***“Some may call this junk. Me, I call them
treasures”***

- Belethor, 4E 201

Resumo

As mudanças climáticas globais apresentam inúmeros riscos para os ecossistemas naturais, alterando importantes variáveis climáticas em diversas regiões do globo, entre elas a Floresta Amazônica. Detentora da maior biodiversidade do planeta, a Floresta Amazônica influencia nos padrões climáticos de outras regiões do Brasil e da América Latina. Entre as variáveis climáticas afetadas pelas mudanças climáticas na Floresta Amazônica está a evapotranspiração, importante reguladora do ciclo hidrológico amazônico. As alterações na evapotranspiração acarretam em um desequilíbrio climático não só na região amazônica, mas também em outras regiões, por isso a importância da compreensão dessas alterações. O objetivo principal foi estimar os valores de evapotranspiração na Bacia Amazônica sob um cenário rigoroso de mudanças climáticas, fornecendo uma ferramenta para a modelagem espacialmente explícita da evapotranspiração. Utilizando os *outputs* do modelo climático Hadgem2-es, proveniente do CMIP5, estimou-se os valores da evapotranspiração de referência para a Bacia Amazônica através do método de Penman-Monteith (FAO) até o ano de 2050. Sob um cenário extremo de emissão de carbono na atmosfera (RCP 8.5) identificou-se um aumento nos valores de evapotranspiração na Bacia Amazônica até a metade do século, principalmente na região nordeste da bacia se estendendo para o sudoeste. A sazonalidade anual se manteve semelhante à atual, com elevação da evapotranspiração durante a estação seca e diminuição durante a estação chuvosa, acompanhando a sazonalidade dos valores de temperatura e saldo de radiação. Uma melhor representatividade da complexa relação entre clima e floresta poderá ser atingida ao se utilizar dados espaciais de uso e ocupação do solo amazônico projetados para o futuro. O modelo desenvolvido se mostrou eficaz nos cálculos de evapotranspiração, demonstrando resultados consistentes com os observados pela bibliografia consultada. De modo a evitar o desequilíbrio climático na Floresta Amazônica e conseqüentemente em outras regiões se faz necessária as ações governamentais conjuntas no sentido de mitigar a crescente emissão de gases de efeito estufa na atmosfera.

Palavras-chave: evapotranspiração, mudanças climáticas, floresta amazônica, modelagem ambiental.

Abstract

Global climate change presents numerous risks to natural ecosystems, altering important climatic variables in several regions of the globe, including the Amazon Forest. With the greatest biodiversity on the planet, the Amazon Forest influences the climate patterns of other regions in Brazil and Latin America. Among the climatic variables affected by climate changes in the Amazon Forest is evapotranspiration, an important regulator of the Amazonian hydrological cycle. Changes in evapotranspiration may result in a climatic imbalance not only in the Amazon region, but also in other regions, which is why it is important to understand these changes. The main objective was to estimate the values of evapotranspiration in the Amazon Basin under a rigorous climate change scenario, providing a tool for the spatially explicit modeling of evapotranspiration. Using the outputs of the Hadgem2-es climate model, derived from CMIP5, the reference evapotranspiration values for the Amazon Basin were estimated using the Penman-Monteith (FAO) method until the year 2050. Under an extreme emission scenario carbon in the atmosphere (RCP 8.5), an increase in evapotranspiration values was identified in the Amazon Basin until the middle of the century, mainly in the northeast region of the basin extending to the southwest. The annual seasonality remained similar to the current one, with an increase in evapotranspiration during the dry season and a decrease during the rainy season, following the seasonality of temperature values and radiation balance. A better representation of the complex relationship between climate and forest can be achieved by using spatial data for use and occupation of the Amazonian soil projected for the future. The developed model proved to be effective in evapotranspiration calculations, showing results consistent with those observed in the consulted bibliography. In order to avoid climatic imbalance in the Amazon Forest and consequently in other regions, joint government actions are necessary in order to mitigate the growing emission of greenhouse gases into the atmosphere.

Keywords: evapotranspiration, climate change, Amazon rainforest, environmental modeling.

Lista de figuras

Figura 1. Bacia Amazônica situada no território brasileiro. Sistema de coordenadas geográficas (SIRGAS2000). Escala 1:15.000.000. Fonte: IBGE (2017); ESRI (2017). A linha pontilhada demonstra a região conhecida como o “Arco do Desmatamento da Amazônia”.	12
Figura 2. Esquema de cálculo da estimativa da ETo pixel a pixel utilizando o método de Penman-Monteith parametrizado pela FAO (ALLEN, 1998).	17
Figura 3. Desenho esquemático do modelo EER-PM.	18
Figura 4. Fatiamento temporal adotado para o processo de validação.	19
Figura 5. Médias mensais de ETo na Bacia Amazônica modeladas para o período projetado (2006-2050).	20
Figura 6. Sazonalidade da ETo advinda do modelo EER-PM comparada com (a) os valores médios mensais de temperatura advindos do modelo Hadgem2-ES e (b) saldo de radiação advindo do modelo Hadgem2-ES. Médias referentes ao período projetado (2006-2050).	21
Figura 7. Associação entre a ETo estimada pelo modelo EER-PM e os valores de (a) temperatura; (b) saldo de radiação. Os dados pertencem ao período projetado (2006 a 2050). Em vermelho a tendência linear.	22
Figura 8. Médias mensais de precipitação na Bacia Amazônica obtidas da normal climatológica 1981-2010.	23
Figura 9. Espacialização da ETo para o período projetado utilizando a base de dados do modelo Hadgem2-es. A linha pontilhada demonstra a região conhecida como o “Arco do Desmatamento da Amazônia”.	27
Figura 10. Médias mensais de ETo na Bacia Amazônica. Comparação entre as médias observadas e simuladas do modelo climático Hadgem2-es. As barras representam o desvio-padrão mensal.	31
Figura 11. Médias mensais de (a) temperatura e (b) saldo de radiação para cada um dos intervalos de tempo compreendidos no período projetado.	33
Figura 12. Associação entre a ETo obtida por Xavier et al. (2015) e os resultados do modelo EER-PM. Os dados pertencem ao período observado (1995-2005). Em vermelho a tendência linear.	36
Figura 13. Médias mensais de ETo para o período observado por Xavier et al. (2015) (1995 a 2005) e projetado pelo modelo EER-PM (1995 a 2005). As barras verticais representam o desvio-padrão.	37

Sumário

1. Introdução.....	9
2. Dados e métodos	12
2.1. Área de estudo	12
2.2. Dados	13
2.3. Modelagem da evapotranspiração de forma espacialmente explícita ...	15
2.4. Validação do modelo EER-PM	18
3. Resultados e discussão	20
3.1. Sazonalidade da ETo na Bacia Amazônica	20
3.2. Variação espacial da ETo na Bacia Amazônica	25
3.3. Projeções futuras da ETo na Bacia Amazônica sob o cenário RCP 8.5	30
3.1. Validação	35
4. Conclusões	37
5. Referências bibliográficas	39
6. Apêndice.....	44

1. Introdução

Nas últimas décadas as mudanças climáticas globais vêm causando inúmeros riscos para os ecossistemas naturais, entre eles a Floresta Amazônica (MALHI et al., 2008). Dentre outros feedbacks, tais mudanças são retroalimentadas positivamente pelo aumento do desmatamento e consequente liberação de gases do efeito estufa (GEE, principalmente gás carbônico e metano), que, aumentando em concentração conduzem a um aumento da temperatura, levando à maior mortalidade de árvores e, de forma cíclica, maior liberação destes gases (FEARNSIDE, 2008). Estas mudanças alteram importantes variáveis climatológicas, que, consequentemente, afetam a manutenção de diversos mecanismos ambientais da maior floresta tropical do mundo, desestabilizando fortemente os ecossistemas (MALHI et al., 2008; MALHI et al., 2009).

Além do aumento da temperatura, a redução da floresta amazônica (de origem antrópica ou mortalidade natural) associada ao aumento de GEE, implica em alterações na evapotranspiração da região (aumento ou diminuição) (FEARNSIDE, 1995), que por sua vez exerce influência nos padrões climáticos regionais e globais (SPRACKLEN et al., 2012). Através da evapotranspiração da floresta amazônica são bombeados grandes volumes de água da superfície para a atmosfera, que, posteriormente retornam ao sistema por meio da precipitação (SPRACKLEN et al., 2012). Com a evapotranspiração intensa da floresta, incrementada pela temperatura elevada, são formadas massas úmidas em grandes quantidades que se deslocam na orientação norte-sul da Cordilheira dos Andes, chegando aos Estados da região centro-sul do Brasil, Caribe e Oceano Pacífico (TORDIN, 2018). Além da importância nos padrões de precipitação, devido à sua associação com o fluxo de CO₂ durante o processo de transpiração das plantas, a evapotranspiração também é um importante indicador do funcionamento do ecossistema amazônico (MAEDA et al., 2017).

Uma vez que a floresta Amazônica influencia o clima em outras regiões (MARENGO, 2006; MARENGO, 2005; SPRACKLEN et al., 2012), alterações nos valores de evapotranspiração da região podem resultar em um desequilíbrio no balanço hídrico local, bem como de diversas outras localidades, alterando importantes serviços ecossistêmicos, especialmente os padrões de precipitação (O'CONNOR et al., 2019), que conseqüentemente afetarão sistemas agrícolas e de abastecimento de água dos reservatórios de diversas regiões do Brasil. As modificações na evapotranspiração da floresta amazônica também alteram o ciclo global do carbono, reforçando e criando outro *feedback* positivo às mudanças climáticas (MAEDA et al., 2017).

A diminuição da evapotranspiração também afeta a biodiversidade, uma vez que a ETo é frequentemente associada à riqueza de espécies em uma determinada região (CURRIE, 1991; DINIZ-FILHO et al., 2003). A diminuição da evapotranspiração e a conseqüente elevação na mortalidade de plantas implicará na redução de espécies animais associados a elas (MACARTHUR e MACARTHUR, 1961), aumentando assim o desequilíbrio ecológico dos ecossistemas.

Por outro lado, a elevação da evapotranspiração na Floresta Amazônica também causa impactos nos serviços ambientais e nos ecossistemas. O aumento da evapotranspiração poderá causar danos à vegetação com raízes pouco profundas, uma vez que a evapotranspiração retiraria a água das camadas mais superficiais do solo (CARVALHO, 2011). Além disso, maior evapotranspiração bombeia mais umidade para a atmosfera que, reciclada, pode aumentar a precipitação e causar eventos extremos de chuva (MARENGO, 2006). O aumento do calor latente associado ao aumento da precipitação intensificaria a circulação atmosférica, resultando em alterações na convergência de umidade (MARENGO, 2006).

Apesar desta importância para os processos ecossistêmicos, as ferramentas capazes de estimar a evapotranspiração utilizando dados *in situ* ou dados provenientes de sensoriamento remoto ainda são escassas (XU et al., 2019). Ainda mais escassas são as ferramentas capazes de apresentar as variações de evapotranspiração ao longo do tempo de modo espacialmente explícito, com notáveis aplicações na análise e modelagem de sistemas ambientais. Poucos estudos (a exemplo de XAVIER et al., 2015), apresentam um grid de alta resolução espacial com valores de evapotranspiração para a Bacia Amazônica. Ressalta-se ainda, que, ao longo das duas últimas décadas diversos trabalhos procuraram elucidar o comportamento da evapotranspiração na região Amazônica (WERTH e AVISSAR, 2004; HASLER e AVISSAR, 2007; SILVA JÚNIOR et al., 2017; MAEDA et al., 2017; O'CONNOR et al., 2019). Entretanto, nenhum deles projetou seus resultados de forma espacializada para cenários de mudanças climáticas futuras.

Diante destas lacunas, bem como, da importância da evapotranspiração para a manutenção de diversos serviços ecossistêmicos na região Amazônica e regiões climaticamente interligadas, os objetivos deste trabalho são: (I) Revisitar a sazonalidade da evapotranspiração na Amazônia de forma espacialmente explícita (II) estimar as alterações na evapotranspiração decorrentes do aumento dos gases de efeito estufa (sob o cenário RCP 8.5 definido pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas – (IPCC, sigla em inglês)); (III) Reforçar a importância da preservação da floresta amazônica para a manutenção da evapotranspiração; e (IV) Apresentar um modelo espacialmente explícito que possibilite estimativas da evapotranspiração na Bacia Amazônica.

2. Dados e métodos

2.1. Área de estudo

A área de estudo compreende toda a extensão da Bacia Amazônica situada no território brasileiro (Figura 1). Localizada entre as coordenadas 47° a 75° de longitude oeste e 6° de latitude norte a 17° de latitude sul, a Bacia Amazônica brasileira possui aproximadamente 4 milhões de km², cobrindo totalmente os estados do Acre, Amazonas, Rondônia, Roraima, Amapá e parcialmente os estados do Pará e Mato Grosso.

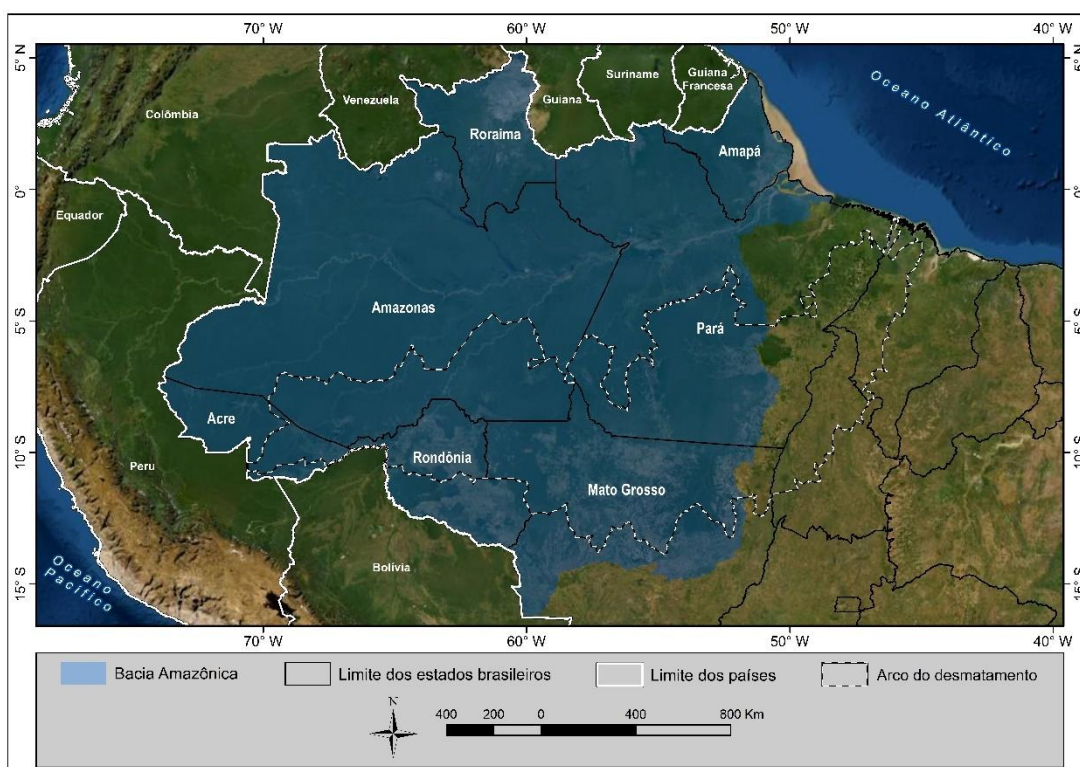


Figura 1. Bacia Amazônica situada no território brasileiro. Sistema de coordenadas geográficas (SIRGAS2000). Escala 1:15.000.000. Fonte: IBGE (2017); ESRI (2017); MMA (2019). A linha pontilhada demonstra a região conhecida como o “Arco do Desmatamento da Amazônia”.

A escolha desta região para estudo foi baseada em alguns pontos fundamentais que dão maior relevância ao trabalho desenvolvido e que reforçam a importância

da conservação florestal para a evapotranspiração, são eles: (I) a Floresta Amazônica desempenha um importante papel na regulação do clima sul-americano devido à sua influência no ciclo hidrológico regional (MARENGO e SOUZA, 2018; SPRACKLEN et al., 2012). Cerca de 30% a 50% da precipitação na bacia Amazônica consiste da água reciclada através da evapotranspiração (SALATI et al, 1979; DIRMEYER et al., 2014), sendo parte desta umidade transportada para outras localidades (MARENGO e SOUZA, 2018). (II) Devido ao forte acoplamento do clima e uso do solo na região, mudanças na cobertura do solo alteram a evapotranspiração, afetando significativamente o balanço de energia e o ciclo hidrológico regional (MARENGO, 2006). Nos últimos anos a principal mudança na cobertura do solo amazônico se deu através do desmatamento que retira porções da floresta dando lugar a áreas de agropecuária, ocorrendo com maior intensidade na região conhecida como Arco do Desmatamento (Figura 1); (III) Projeções demonstram que o aumento da concentração de gases de efeito estufa produzirão mudanças na vegetação, conduzindo a Floresta Amazônica a um processo de savanização, o que tornará a região mais seca e quente (MARENGO, 2006). Portanto, compreender a ETo na Bacia Amazônica sob cenários de mudanças climáticas é imprescindível para a elaboração de estratégias de mitigação.

2.2. Dados

Para modelar a ETo sob um cenário de mudanças climáticas globais foram utilizadas variáveis climáticas espacialmente explícitas, em formato raster, provenientes da Fase 5 do *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP5), integrante do *Fifth Assessment Report* (AR5) elaborado pelo IPCC (Tabela 1).

Tabela 1 - Variáveis CMIP5 utilizadas para o cálculo da ETo e respectivas unidades.

Variável	Unidade
----------	---------

Umidade relativa (UR)	%
Radiação solar incidente (Rs)	$W m^{-2}$
Radiação solar incidente na ausência de nuvens (Rso)	$W m^{-2}$
Velocidade do vento próxima à superfície (U_2)	$M s^{-1}$
Temperatura do ar (T)	Kelvin
Temperatura do ar mínima (Tmin)	Kelvin
Temperatura do ar máxima (Tmax)	Kelvin

A base de dados histórica proveniente do CMIP5 compreende o período de 1995 a 2005. Após esse período, os dados são projetados até o ano de 2050. Todas as variáveis possuem resolução espacial de $\sim 140km \times 140km$. Os dados provenientes do CMIP5 são resultantes de simulações de modelos climáticos globais (GCM's). No presente trabalho foram utilizados os dados provenientes do modelo climático Hadgem2-es, desenvolvido pelo *Met Office Hadley Center* (Reino Unido. Este modelo foi escolhido devido ao bom desempenho em simular os padrões climáticos na América do Sul (GULIZIA e CAMILLONI, 2014; ALVES et al., 2012).

As projeções climáticas utilizadas no CMIP5 foram desenvolvidas utilizando a nova geração de cenários forçantes denominados Representative Concentration Pathways (RCP's). No AR5 foram apresentados quatro cenários RCP's que descrevem diferentes cenários climáticos de acordo com a variação da concentração de GEE na atmosfera até o ano de 2100. Os quatro cenários contemplam um cenário de mitigação rigoroso (RCP 2.6), dois cenários intermediários (RCP 4.5 e RCP 6.0) e um cenário de altas emissões (RCP 8.5). Neste estudo foi utilizado o cenário RCP 8.5, visto que existe uma probabilidade igual ou superior a 35% das concentrações de emissões excederem o cenário RCP 8.5 (CHRISTENSEN et al., 2018), demonstrando assim que os demais cenários estão se tornando irrealistas.

Foram utilizados ainda os dados de ETo provenientes do banco de dados *Daily gridded meteorological variables in Brazil* (1980–2013) (XAVIER et al, 2015), para validação dos resultados obtidos. Estes dados são formados por grades com resolução espacial de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (27,8km x 27,8km). Para o cálculo da pressão atmosférica local, variável necessária para as estimativas da ETo, foi utilizado o *raster* de altimetria SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), compilado pela EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), com a resolução espacial de 90m (MIRANDA, 2005).

Para a análise da variação sazonal da evapotranspiração foram utilizados ainda os dados de precipitação relativos à normal climatológica atual (1981-2010) das 34 estações meteorológicas do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) instaladas na região de estudo.

2.3. Modelagem da evapotranspiração de forma espacialmente explícita

A modelagem foi desenvolvida através do DINAMICA EGO, uma sofisticada e avançada plataforma para modelagem ambiental, inicialmente concebida como um instrumento para investigação de trajetórias de paisagens e dinâmica de fenômenos espaciais (RODRIGUES et al. 2007; SOARES-FILHO et al. 2019), mas que, ao longo do seu desenvolvimento englobou uma série de aplicações em diversos campos das ciências ambientais

Para estimativa dos valores da evapotranspiração de referência (ETo) pixel a pixel foi utilizado o método de Penman-Monteith (MONTEITH, 1965) parametrizado pela *Food and Agriculture Organization of the United States* (FAO) (Equação 1) (ALLEN, 1998). Este método foi selecionado por dois motivos principais: (I) Por ser uma representação dos fatores físicos e fisiológicos que comandam o processo de evapotranspiração e (II) Por ser um dos métodos mais apropriados para a estimativa da ETo na região amazônica (SILVA JÚNIOR et al., 2017).

$$ET_o = \frac{0.408\Delta (Rn - G) + \frac{\gamma 900 u_2 (e_s - e_a)}{T + 273}}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad \text{Equação 1}$$

Onde,

Δ = declividade da curva de pressão de vapor em relação à temperatura [kPa °C⁻¹]

R_n = saldo de radiação diário [MJ m⁻² dia⁻¹]

G = fluxo total diário de calor do solo [MJ m⁻² dia⁻¹]

γ = coeficiente psicrométrico [kPa °C⁻¹]

u_2 = velocidade do vento a 2m de altura do solo [m s⁻¹]

T = temperatura média do ar [°C]

e_s = pressão de saturação de vapor [kPa]

e_a = pressão atual de vapor [kPa]

As principais variáveis para a estimativa da ET_o através do método selecionado são: temperatura, radiação solar, velocidade do vento em baixas altitudes e umidade relativa (XAVIER et al., 2015). A partir delas é possível o cálculo das demais variáveis necessárias para a obtenção da ET_o . Na Figura 2 são apresentadas as formas de cálculo das variáveis e seus respectivos *inputs*. Ressalta-se que, devido aos baixos valores de G normalmente registrados, por não haver medições disponíveis o pelo fluxo de calor do solo ser pequeno em comparação com R_n , o mesmo foi considerado igual a zero Allen et al. (1998).

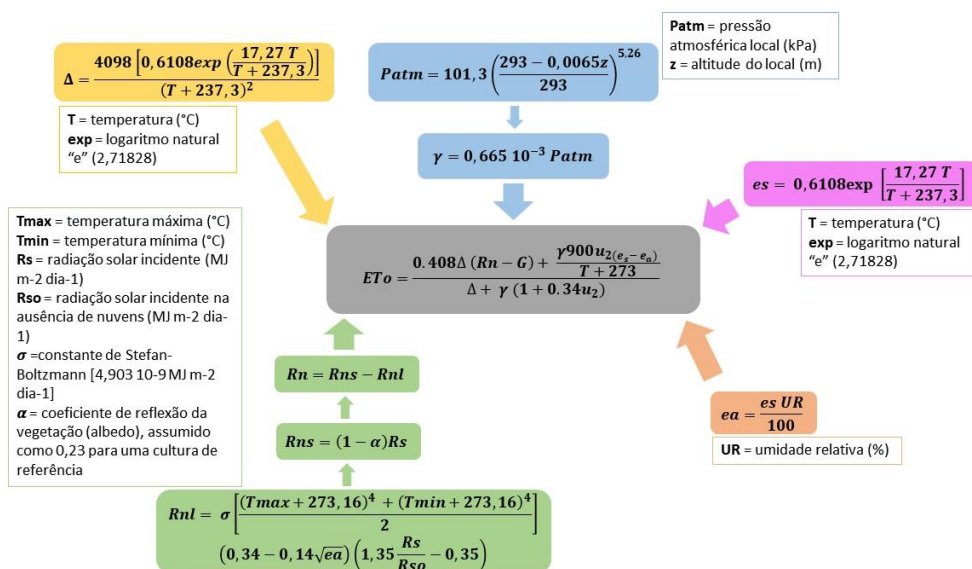


Figura 2. Esquema de cálculo da estimativa da ETo pixel a pixel utilizando o método de Penman-Monteith parametrizado pela FAO (ALLEN, 1998).

Como as variáveis de radiação (Rs e Rso) e temperatura (temperatura média, temperatura máxima e mínima) provenientes do modelo climático Hadgem2-es ainda não se encontravam nas unidades de medidas requeridas para o cálculo através do método selecionado, foi necessário o desenvolvimento de submodelos para as suas conversões. Todas as variáveis foram espacialmente recortadas para a área de estudo e tiveram sua resolução espacial reamostradas para 500 metros, permitindo e facilitando suas aplicações em outros modelos ambientais, como por exemplo, modelo o FISC (Fire Ignition, Spread and Carbon componentes)(SOARES-FILHO et al., 2012; BRANDO et al., 2020).

O modelo aqui desenvolvido para estimativa da ETo (denominado a partir de então como de EER-PM), é constituído por dez submodelos: dois submodelos para a conversão das unidades de medida e sete submodelos para o cálculo das variáveis e input (Figura 2), além do modelo principal que utiliza a equação de Penman-Monteith (Figura 3).

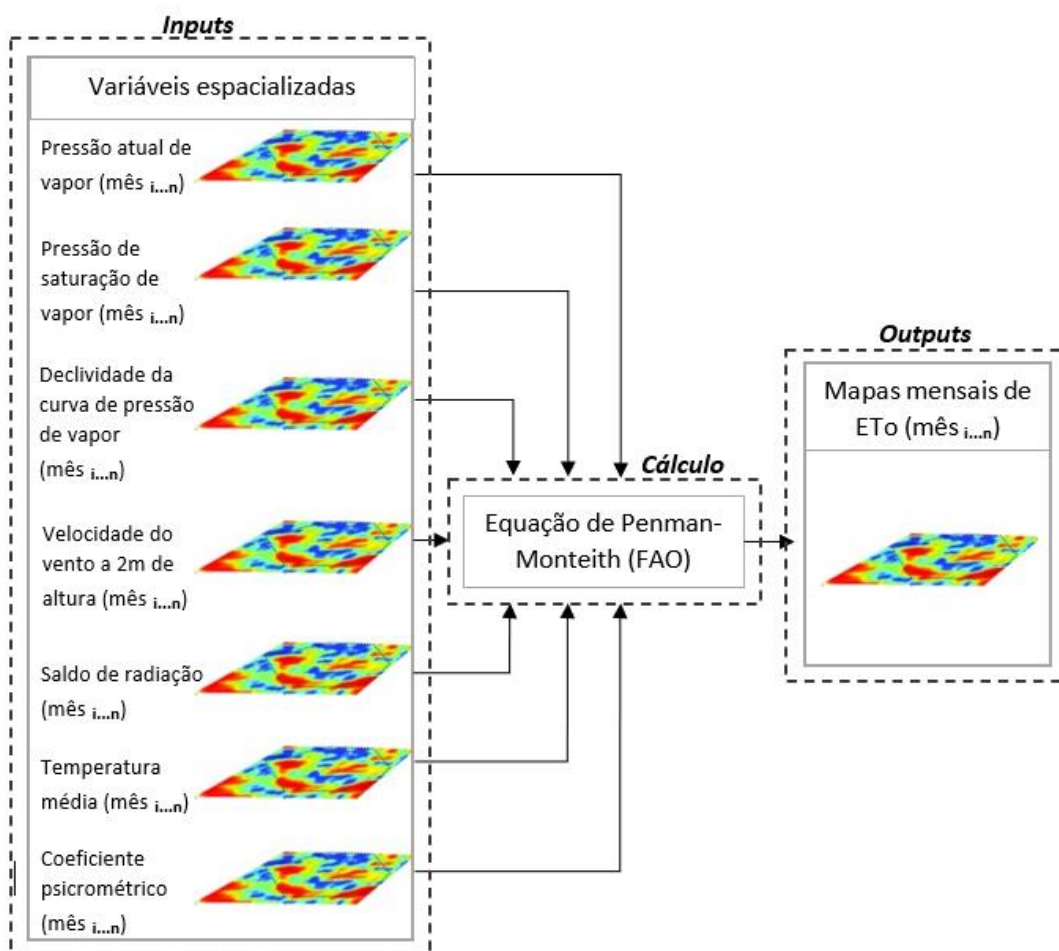


Figura 3. Desenho esquemático do modelo EER-PM.

2.4. Validação do modelo EER-PM

O modelo EER-PM foi validado em dois momentos. Primeiramente, para avaliar a precisão dos cálculos realizados foram utilizados como *inputs* valores hipotéticos fornecidos pela EMBRAPA (CONCEIÇÃO, 2006). Esses valores previamente validados foram inseridos no modelo EER-PM e os resultados finais para cada uma das variáveis comparados com os resultados apresentados pela EMBRAPA.

Posteriormente, foi realizada a comparação entre o período simulado (1995 a 2005) com os valores observados obtidos por Xavier *et al* (2015), conforme

apresentado na Figura 4. A validação foi realizada por meio da análise comparativa entre os valores das (I) estatísticas de ajustamento (R^2); (II) do teste t de Student para comparação entre médias (utilizando o p-valor); (III) da correlação de Spearman (R_s); e (iv) da análise gráfica do comportamento sazonal entre as médias mensais de ETo encontradas no estudo de Xavier et al. (2015) e as obtidas pelo modelo EER-PM.

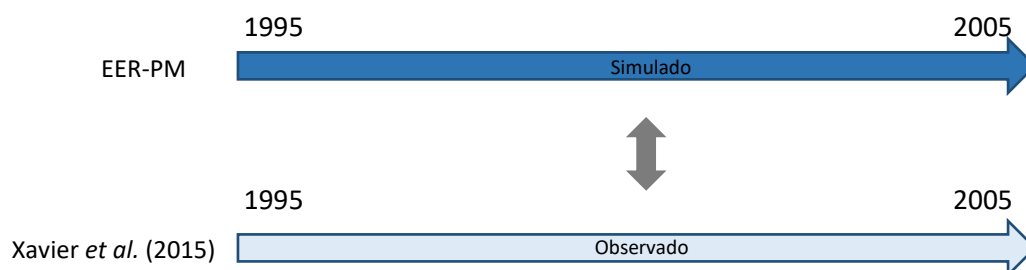


Figura 4. Agrupamento temporal adotado para o processo de validação.

3. Resultados e discussão

3.1. Sazonalidade da ETo na Bacia Amazônica

Os resultados do modelo EER-PM demonstraram uma marcante sazonalidade nos valores de ETo, com um aumento durante a estação seca e diminuição durante a estação chuvosa (Figura 5). Para a definição das estações foram utilizados os estudos de Figueroa e Nobre (1990) e Marengo (1995a, 1995b), que demonstraram que a estação chuvosa na região Amazônica compreende os meses de novembro a março; enquanto que a estação seca (de baixa atividade convectiva) compreende os meses de maio a setembro.

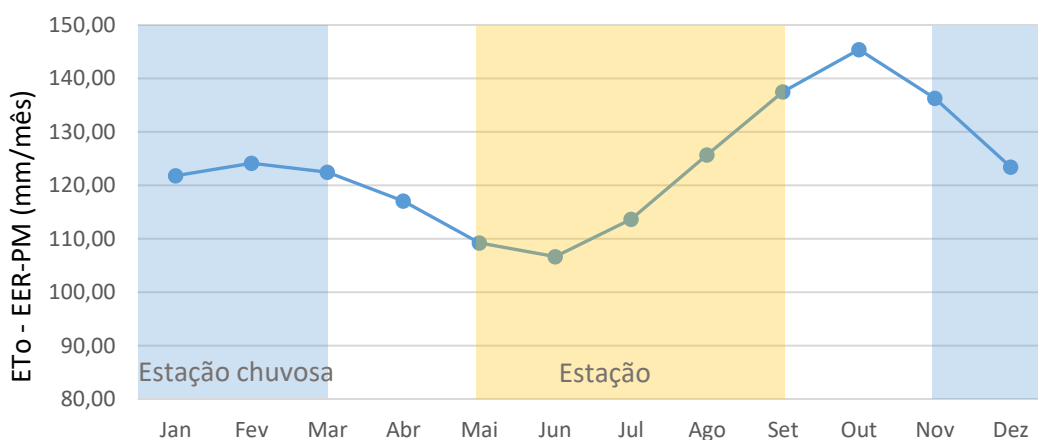


Figura 5. Médias mensais de ETo na Bacia Amazônica modeladas para o período projetado (2006-2050).

O aumento da ETo durante a estação seca está relacionado principalmente à radiação solar e à temperatura, as duas principais variáveis responsáveis pela sazonalidade da ETo na região amazônica (WERTH e AVISSAR, 2004; SILVA JÚNIOR et al., 2017; MAEDA et al., 2017). Comparando os valores médios mensais de ETo com os valores médios mensais de radiação solar e temperatura durante o período projetado (Figura 6) é possível notar que as séries possuem sazonalidade semelhantes, principalmente quando comparado com o saldo de radiação.

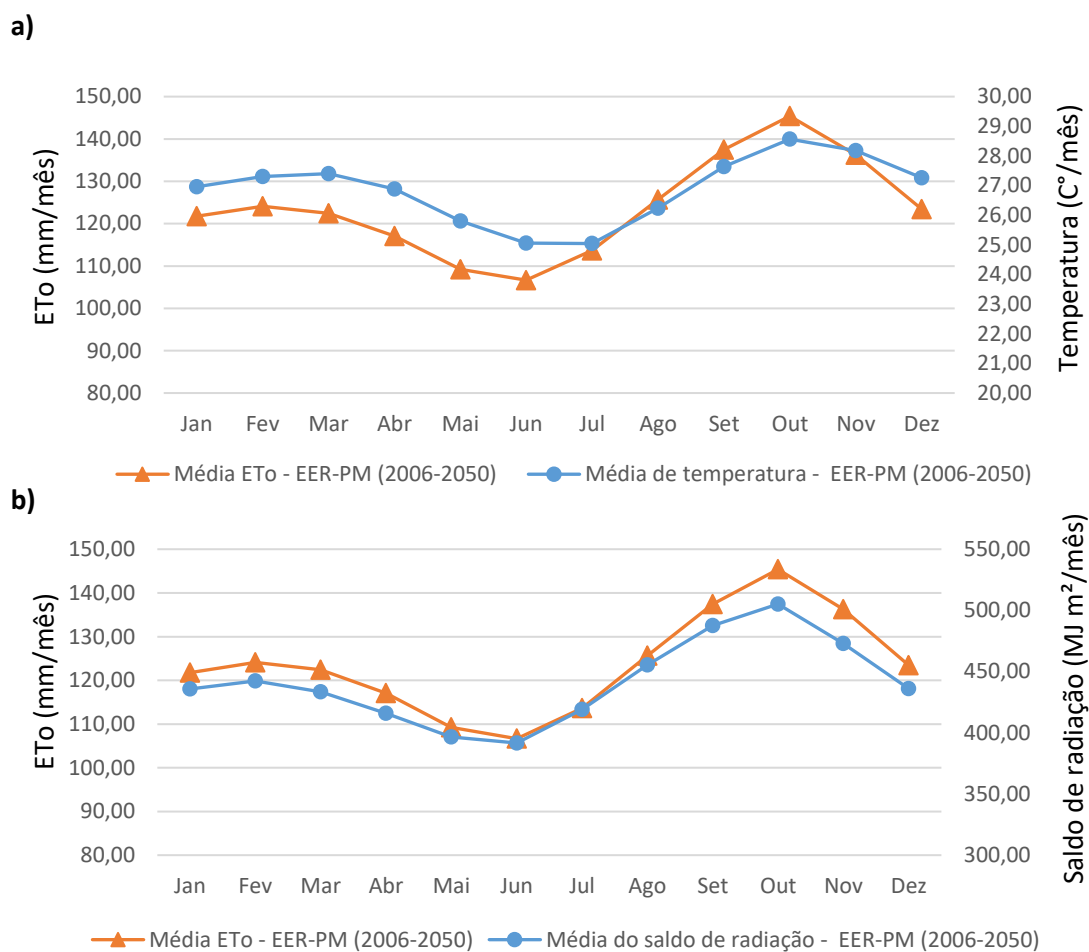


Figura 6. Sazonalidade da ETo advinda do modelo EER-PM comparada com (a) os valores médios mensais de temperatura advindos do modelo Hadgem2-ES e (b) saldo de radiação advindo do modelo Hadgem2-ES. Médias referentes ao período projetado (2006-2050).

De fato, o saldo de radiação é a variável que melhor explica a variação da ETo ($R^2 = 0,9657$), seguido pela temperatura ($R^2 = 0,6792$). Para estimar a correlação entre as variáveis temperatura e saldo de radiação com a ETo, foi utilizado também o coeficiente de correlação de Spearman (R_s) (SPEARMAN, 1904). Os resultados da correlação de Spearman indicaram que houve uma associação positiva (estatisticamente significativa) entre o saldo de radiação e a ETo

(0,9817), o mesmo ocorrendo para a correlação entre a temperatura e a ETo (0,8215) (Figura 7).

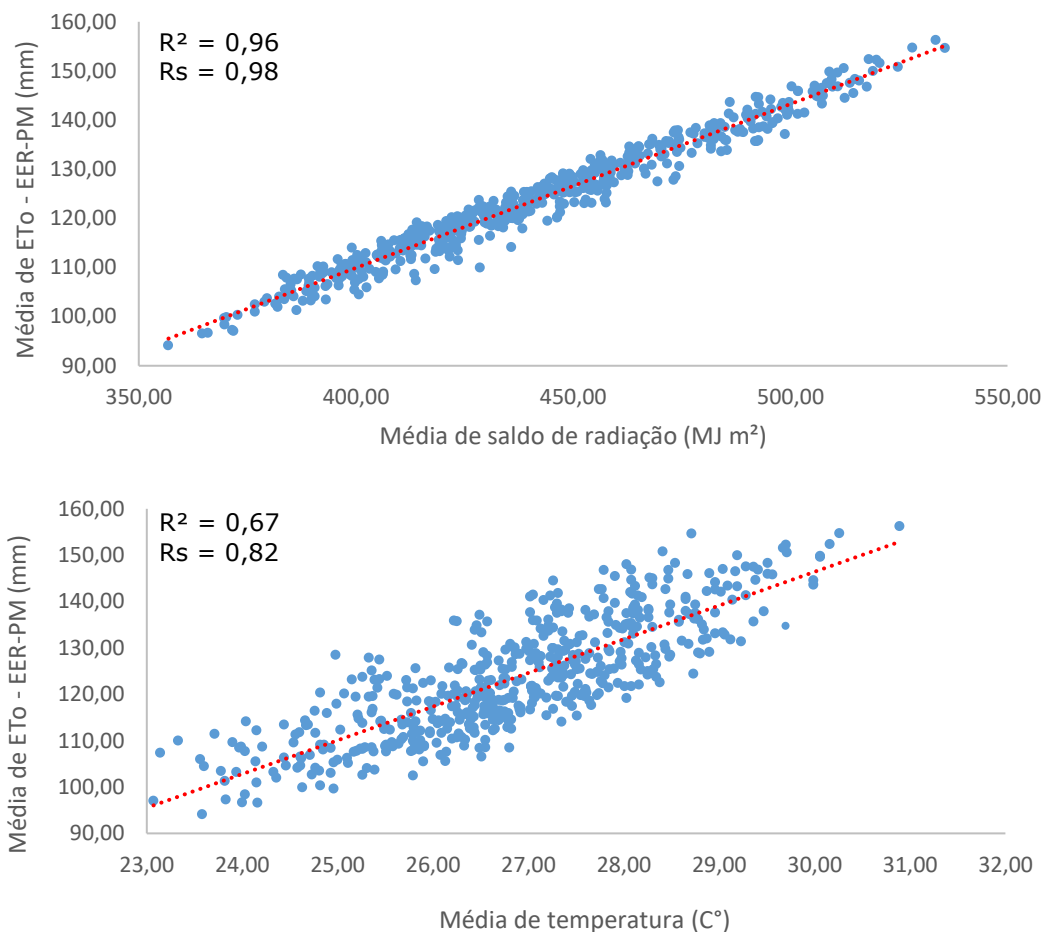


Figura 7. Associação entre a ETo estimada pelo modelo EER-PM e os valores de (a) temperatura; (b) saldo de radiação. Os dados pertencem ao período projetado (2006 a 2050). Em vermelho a tendência linear.

Em outras palavras, maiores valores de temperatura e maior saldo de radiação levam à maior ETo. O aumento da radiação solar sob a superfície da Floresta Amazônica se dá justamente durante a estação seca, devido a baixa cobertura de nuvens sob a região neste período (ROSSOW et al., 1991). A radiação não refletida pela superfície (devido ao baixo albedo) é absorvida pelo solo e pela vegetação e posteriormente transformada em calor latente. Portanto, quanto

maior a radiação solar incidente, maior a quantidade de energia disponível para a evapotranspiração (KATUL et al., 2012). Associado à radiação solar tem-se a umidade do solo como importante fator na elevação da ETo durante a estação seca (WERTH e AVISSAR, 2004). As características da vegetação amazônica, em especial suas raízes profundas, garantem a retenção e absorção da água no solo mesmo durante o período de estiagem (MAEDA et al., 2017; COUTINHO et al., 2018), mantendo as condições necessárias para a ETo durante esse período.

Observando os resultados do modelo EER-PM percebeu-se que juntamente com o início da estação chuvosa no mês de novembro e o contínuo aumento da precipitação, ocorre uma queda na ETo (Figura 8). O início da elevação da ETo no mês de julho ocorre enquanto a precipitação ainda está diminuindo. Esse resultado sugere que, apesar dos crescentes valores de precipitação e o consequente aumento na umidade do solo, a cobertura de nuvens durante o período dificulta a incidência de raios solares sob a superfície, impedindo o efetivo processo de ETo (ROSSOW et al., 1991).

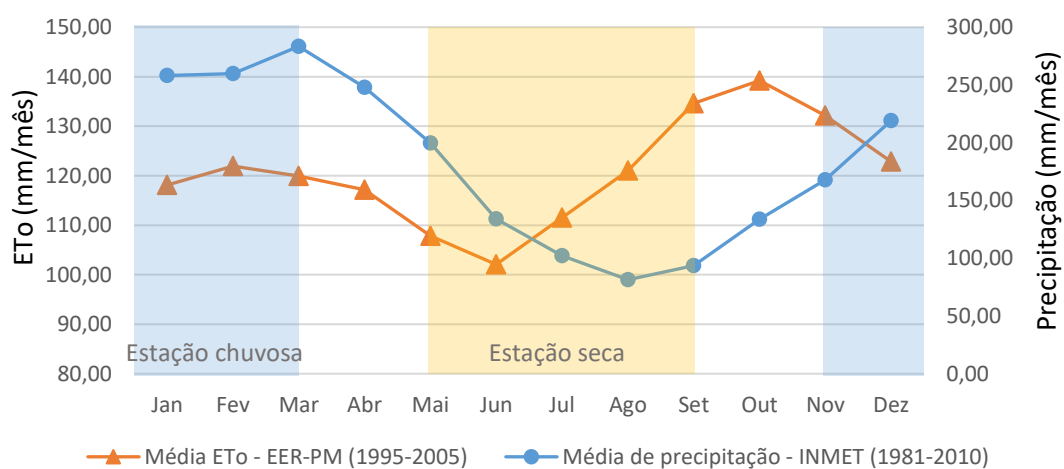
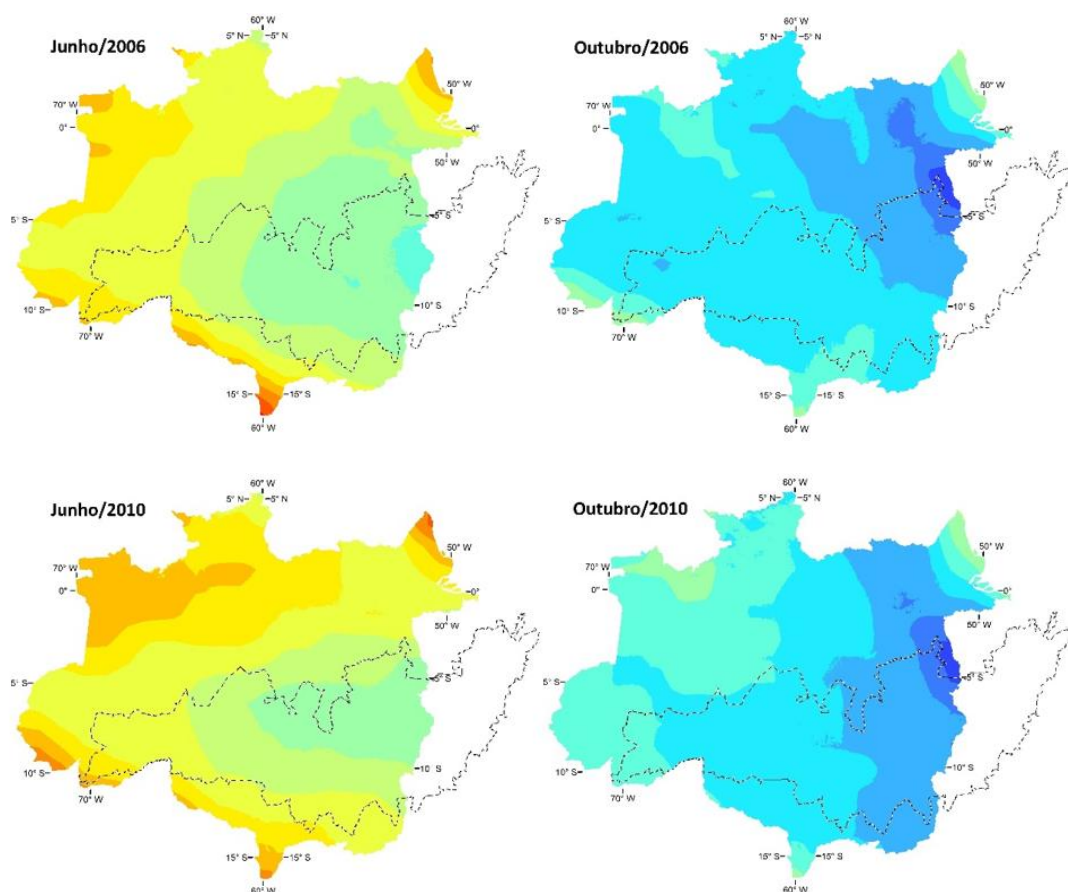


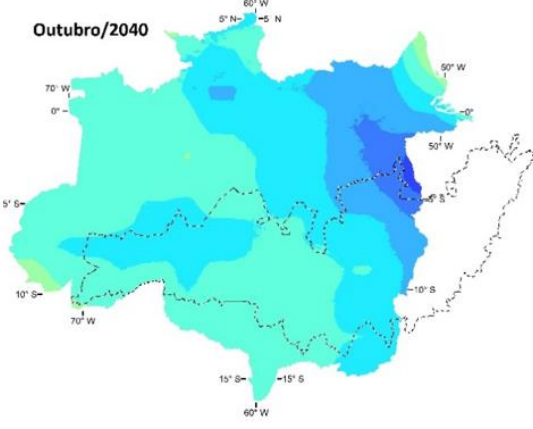
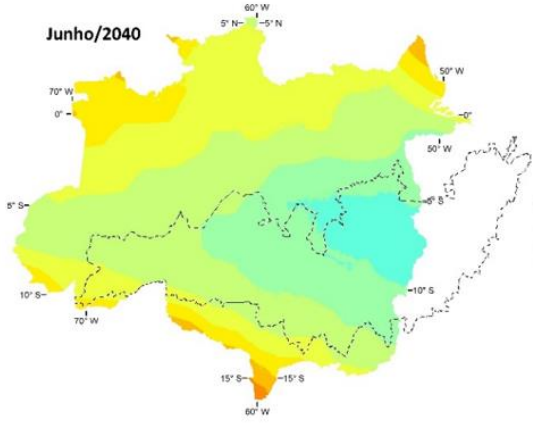
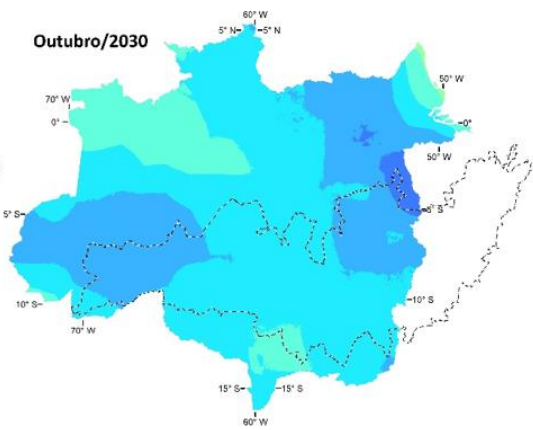
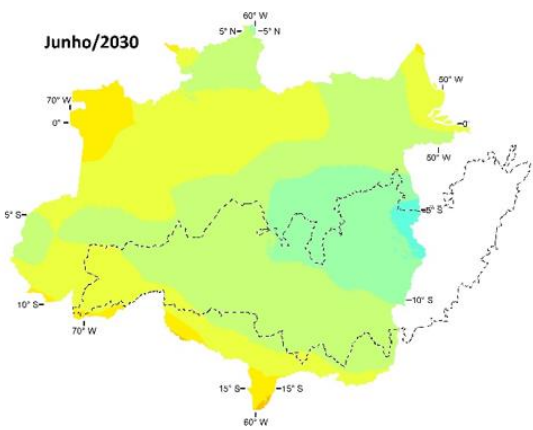
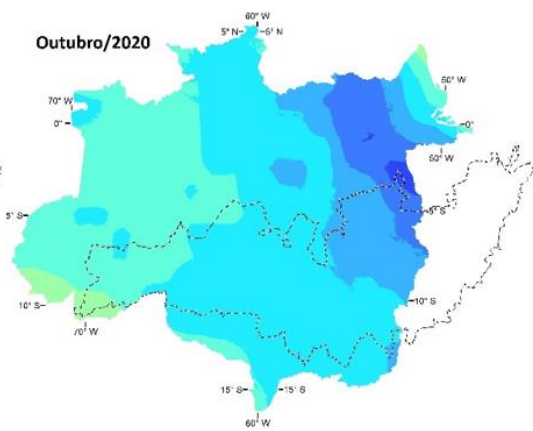
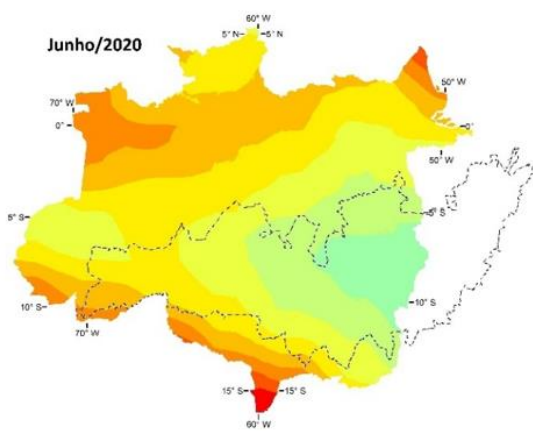
Figura 8. Médias mensais de precipitação na Bacia Amazônica obtidas da normal climatológica 1981-2010.

Ressalta-se que os elevados índices de precipitação na Bacia Amazônica apresentam grandes variações no tempo e no espaço (SILVA DIAS et al., 2005), influenciando fortemente nos padrões de ETo. Verifica-se ainda diferenças nos ciclos anuais de precipitação, evaporação, escoamento e da convergência de umidade nas regiões norte e sul da Bacia Amazônica (MARENCO, 2005). De fato, os valores de ETo estimados corroboram estes estudos.

3.2. Variação espacial da ETo na Bacia Amazônica

Devido à grande extensão da Bacia Amazônica, além das variações sazonais verifica-se marcantes gradientes espaciais das variáveis climáticas ao longo da região (MAEDA et al., 2017), resultando em variações espaciais da ETo. Os maiores valores foram observados na região leste durante os meses de junho, e na região nordeste durante os meses de outubro (com exceção do ano de 2050, quando se estende para as regiões leste e sudeste). Os menores valores foram observados na região noroeste, se estendendo para o sudoeste e sul durante os meses de junho e outubro (Figura 9).





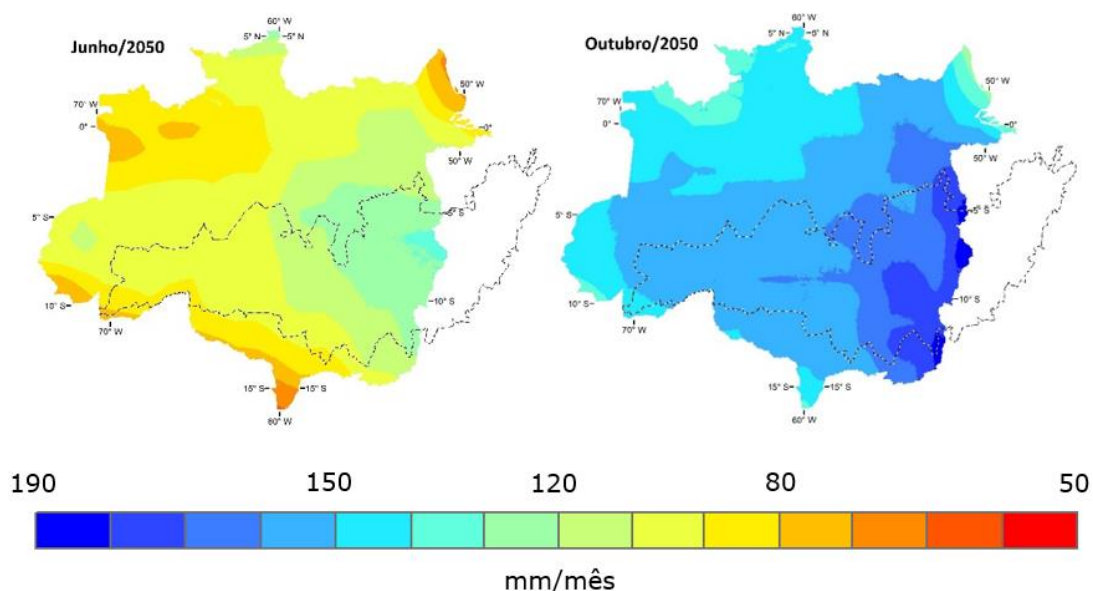


Figura 9. Espacialização da ETo para o período projetado utilizando a base de dados do modelo Hadgem2-es. A linha pontilhada demonstra a região conhecida como o “Arco do Desmatamento da Amazônia”.

No mês de junho/2006, cerca de 38,8% da área da Bacia Amazônica que evapotranspirou entre 100 a 150mm/mês estava compreendida dentro do Arco do Desmatamento. Esse valor, que chegou a ser estimado em 60,3 % em junho/2020, foi igual a 41,9% em junho/2050 (Tabela 2).

Durante os meses de outubro o aumento da evapotranspiração dentro do Arco do Desmatamento foi ainda mais perceptível. Em 2006 foi estimado que cerca de 29,9% da Área da Bacia Amazônica que evapotranspirou entre 150 a 190mm/mês estava compreendido dentro do Arco do Desmatamento. Já em 2050 esse valor aumentou para cerca de 47,4%.

Tabela 2 - Distribuição espacial da ETo na Bacia Amazônica e dentro da área do Arco do Desmatamento durante os meses de junho.

Classes	ETo (mm)	Área total da	Área dentro do	% da área total	Área total da	Área dentro do	% da área total	Área total da	Área dentro do	% da área total
		Bacia Amazônica (km²)	Arco do Desmatamento (km²)	dentro do Arco do Desmatamento	Bacia Amazônica (km²)	Arco do Desmatamento (km²)	dentro do Arco do Desmatamento	Bacia Amazônica (km²)	Arco do Desmatamento (km²)	dentro do Arco do Desmatamento
		jun/06			jun/10			jun/20		
1	50-60	305,25	-		-	-		15.059,25	-	
2	60-70	6.906,25	-		1.883,50	-		24.473,50	-	
3	70-80	10.957,00	-	5,32	25.692,75	-	2,88	265.834,00	5.122,25	12,83
4	80-90	94.098,50	61,00		410.942,00	4.666,25		764.019,50	53.517,25	
5	90-100	531.694,50	34.216,00		847.763,25	32.424,50		1.117.882,25	221.959,25	
6	100-110	1.180.680,75	183.995,00		1.363.785,50	331.671,25		839.295,00	334.242,25	
7	110-120	931.431,75	329.770,25		709.429,25	500.147,00		545.787,00	409.005,00	
8	120-130	998.378,25	649.088,75	38,82	467.756,25	400.989,25	48,52	254.902,00	246.052,25	60,32
9	130-140	72.800,25	72.767,25		-	-		-	-	
10	140-150	-	-		-	-		-	-	
11	150-160	-	-		-	-		-	-	
12	160-170	-	-		-	-		-	-	
13	170-180	-	-		-	-		-	-	
14	180-190	-	-		-	-		-	-	
		jun/30			jun/40			jun/50		
1	50-60	-	-		-	-		-	-	
2	60-70	-	-		31,75	-		759,75	-	
3	70-80	-	-	0,92	7.301,50	-	0,97	22.406,25	-	6,96
4	80-90	4.144,25	-		42.798,25	-		180.629,75	3.419,50	
5	90-100	192.819,00	1.804,25		321.232,75	3.615,00		754.685,25	63.285,50	
6	100-110	1.280.621,00	139.929,75		1.042.697,00	68.804,00		1.600.964,00	502.200,00	
7	110-120	1.731.216,25	738.652,00		1.374.949,00	434.713,50		747.566,50	307.103,25	
8	120-130	578.785,50	357.590,50	34,93	763.431,25	522.270,50	36,64	487.036,25	360.686,75	41,94
9	130-140	39.666,50	31.921,75		274.811,00	240.495,25		33.205,00	33.203,25	
10	140-150	-	-		-	-		-	-	
11	150-160	-	-		-	-		-	-	
12	160-170	-	-		-	-		-	-	
13	170-180	-	-		-	-		-	-	
14	180-190	-	-		-	-		-	-	

Tabela 3 - Distribuição espacial da ETo na Bacia Amazônica e dentro da área do Arco do Desmatamento durante os meses de outubro.

Classes	ETo (mm)	out/06			out/10			out/20		
		Área total da Bacia Amazônica (km ²)	Área dentro do Arco do Desmatamento (km ²)	% da área total dentro do Arco do Desmatamento	Área total da Bacia Amazônica (km ²)	Área dentro do Arco do Desmatamento (km ²)	% da área total dentro do Arco do Desmatamento	Área total da Bacia Amazônica (km ²)	Área dentro do Arco do Desmatamento (km ²)	% da área total dentro do Arco do Desmatamento
1	50-60	-	-		-	-		-	-	
2	60-70	-	-		-	-		-	-	
3	70-80	-	-		-	-		-	-	
4	80-90	-	-		-	-		-	-	
5	90-100	-	-		-	-		-	-	
6	100-110	-	-		-	-		-	-	
7	110-120	739,00	-		648,00	-		665,50	-	
8	120-130	60.356,25	4.934,50	34,25	119.220,50	-	27,08	88.617,50	20.814,50	32,14
9	130-140	377.127,50	65.305,75		1.200.230,00	91.110,25		1.141.302,00	183.931,25	
10	140-150	2.440.009,25	915.666,00		1.457.667,25	661.107,00		1.789.839,25	765.923,25	
11	150-160	794.944,25	246.026,00		931.460,25	464.710,50		502.678,25	246.113,75	
12	160-170	130.181,50	34.962,00	29,92	95.823,00	48.841,50	49,33	279.535,75	49.843,00	37,09
13	170-180	23.894,75	3.004,00		22.203,50	4.129,00		24.614,25	3.272,50	
14	180-190	-	-		-	-		-	-	

Classes	ETo (mm)	out/30			out/40			out/50		
		Área total da Bacia Amazônica (km ²)	Área dentro do Arco do Desmatamento (km ²)	% da área total dentro do Arco do Desmatamento	Área total da Bacia Amazônica (km ²)	Área dentro do Arco do Desmatamento (km ²)	% da área total dentro do Arco do Desmatamento	Área total da Bacia Amazônica (km ²)	Área dentro do Arco do Desmatamento (km ²)	% da área total dentro do Arco do Desmatamento
1	50-60	-	-		-	-		-	-	
2	60-70	-	-		-	-		-	-	
3	70-80	-	-		-	-		-	-	
4	80-90	-	-		-	-		-	-	
5	90-100	-	-		-	-		-	-	
6	100-110	-	-		-	-		-	-	
7	110-120	-	-		49,25	-		-	-	
8	120-130	7.918,25	-	31,22	51.271,25	986,50	34,14	10.550,75	-	1,15
9	130-140	530.687,75	28.865,25		1.882.384,75	579.057,25		162.831,50	-	
10	140-150	2.098.693,00	794.486,00		1.301.328,00	524.306,00		1.003.192,00	13.550,75	
11	150-160	1.126.741,75	433.125,00		455.897,50	127.549,75		1.773.049,25	679.866,00	
12	160-170	63.211,75	13.422,00	37,53	122.922,75	37.859,50	27,95	569.590,25	345.450,00	47,40
13	170-180	-	-		13.399,00	139,25		275.975,00	208.974,00	
14	180-190	-	-		-	-		32.064,00	22.057,50	

Cabe ressaltar que embora os cenários RCP (incluindo o cenário 8.5 utilizado neste estudo) não incluam taxas de desmatamento ou outras mudanças de uso do solo em suas configurações (MARENGO & SOUZA, 2018), os resultados aqui apresentados ilustram uma relação entre as regiões com elevadas temperaturas e saldo de radiação (consequentemente com maior ETo), e o gradiente de desmatamento da Bacia Amazônica. Com base neste estudo não se pode afirmar que a dinâmica de desmatamento da região seja responsável por este gradiente de ETo, visto que, mecanismos climáticos de larga escala e outros fatores meteorológicos também se encontram bem correlacionados com este gradiente. Porém, este fato serve como um alerta e uma abertura de discussões mais amplas, visto que as mudanças no uso e ocupação do solo podem interagir com os mecanismos de larga escala na região (LEITE-FILHO et al., 2019), intensificando ou reduzindo a ETo, visto que áreas desmatadas possuem maior albedo, levando à uma perda de calor latente e provocando uma maior aquecimento da superfície (FOLEY et al., 2003). As possíveis relações do desmatamento com os padrões de ETo são melhor discutidas posteriormente.

3.3. Projeções futuras da ETo na Bacia Amazônica sob o cenário RCP 8.5

Os resultados apontaram uma elevação gradual da média mensal de ETo para o período projetado (2006-2050) em relação ao período histórico simulado (1995-2005) (Figura 10). O maior aumento (+6,18 mm/mês) foi identificado no mês de outubro. Ao passo que o menor aumento foi identificado em dezembro (+0,62 mm/mês). A exceção ocorre apenas no mês de abril, o qual apresenta uma pequena diminuição (-0,11 mm/mês).

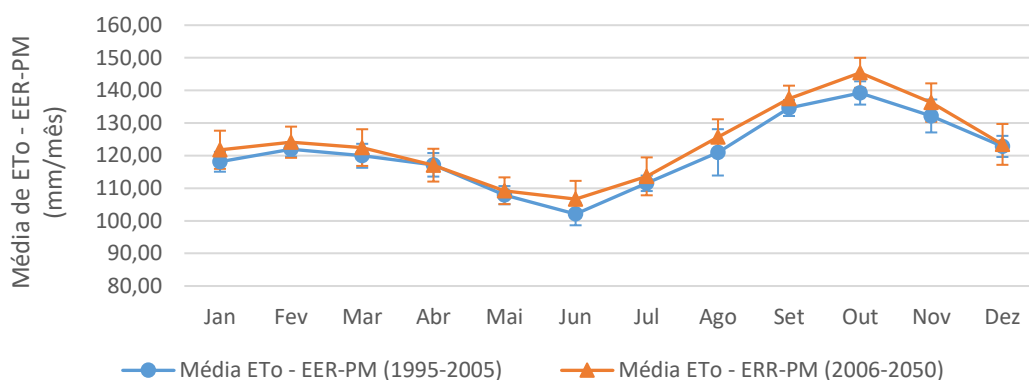


Figura 10. Médias mensais de ETo na Bacia Amazônica. Comparação entre as médias observadas e simuladas do modelo climático Hadgem2-es. As barras representam o desvio-padrão mensal.

Devido à diferença existente entre o tamanho das amostras (132 meses para o período simulado, contra 540 meses do período projetado) há uma perda de poder estatístico ao se utilizar o teste t de Student para comparação das médias (WILCOX, 1992). Buscando reverter esse problema, o período projetado (2006 a 2050) foi dividido em quatro intervalos de tempo. Os três primeiros intervalos continham 132 meses (11 anos) enquanto que o último intervalo continha 144 (12 anos), dessa forma a quantidade de meses abarcados entre as duas amostras se aproximam. Na Tabela 4 são apresentados os p-valores calculado para cada intervalo de tempo em relação ao período simulado.

Tabela 4. Valores de significância (p-valor) entre cada um dos intervalos de tempo em relação ao período simulado.

Intervalos	p-valor
Intervalo 1 (2006 a 2016)	0,75
Intervalo 2 (2017 a 2027)	0,34
Intervalo 3 (2028 a 2038)	0,01
Intervalo 4 (2039 a 2050)	$1,98.10^{-5}$

Diferenças estatisticamente significativas entre as médias de ETo ocorrem somente a partir do terceiro intervalo de tempo (2028 a 2038). A principal

justificativa para esse fato é o aumento gradual e contínuo dos valores de temperatura projetados para o cenário RCP 8.5 ao longo do século XXI. De acordo com os relatórios do IPCC AR5 (IPCC, 2013; IPCC, 2014) e do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC, 2014), a temperatura na Amazônia deverá aumentar progressivamente de 1°C a 1,5°C até 2040 e entre 3°C e 3,5°C no período de 2041 a 2070. Através da Figura 11 é possível perceber a influência da temperatura na elevação gradual da ETo durante os quatro intervalos de tempo analisados.

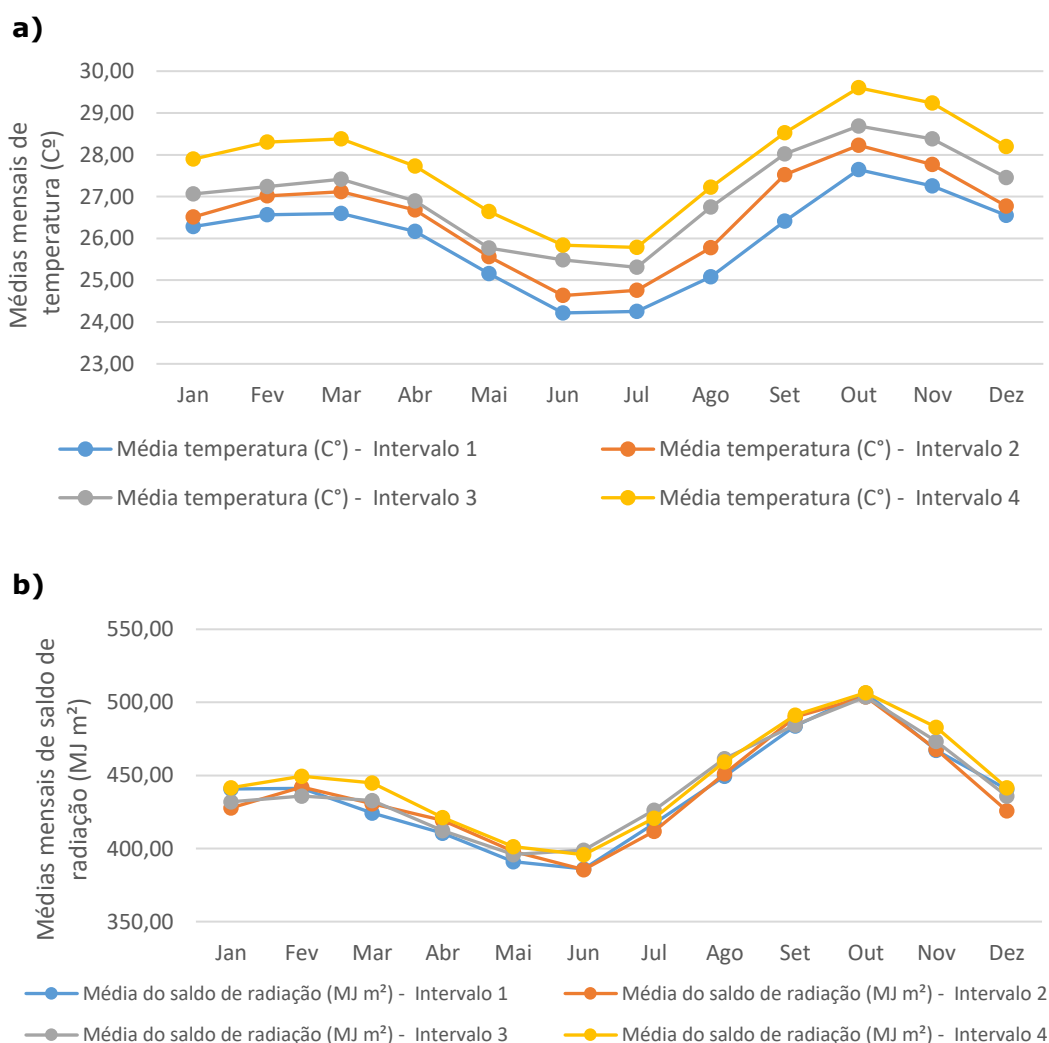


Figura 11. Médias mensais de (a) temperatura e (b) saldo de radiação para cada um dos intervalos de tempo compreendidos no período projetado.

Assim como a variação sazonal da ETo na Bacia Amazônica, a elevação na ETo sob o cenário RCP 8.5 pode também ser explicada pelas mudanças nos padrões de temperatura e no salto de radiação (Tabela 5 e Tabela 6).

Tabela 5. Valores de temperatura para a Bacia Amazônica entre os períodos simulado e projetado do modelo climático Hadgem2-es.

Mês	Média de temperatura - EER-PM (1995-2005) (C°)	Média de temperatura - EER-PM (2006-2050) (C°)	Diferença (C°)
Janeiro	25,66	26,96	1,30
Fevereiro	25,94	27,30	1,36
Março	26,10	27,40	1,29
Abril	25,84	26,89	1,05
Maio	24,82	25,80	0,98
Junho	23,48	25,06	1,58
Julho	23,79	25,04	1,26
Agosto	24,52	26,23	1,71
Setembro	26,28	27,64	1,36
Outubro	26,89	28,56	1,68
Novembro	26,75	28,18	1,44
Dezembro	26,08	27,26	1,18

Estação chuvosa
 Estação seca

Tabela 6. Valores de saldo de radiação para a Bacia Amazônica entre os períodos simulado e projetado do modelo climático Hadgem2-es.

Mês	Média do saldo de radiação - EER-PM (1995-2005) (MJ m ²)	Média do saldo de radiação - EER-PM (2006-2050) (MJ m ²)	Diferença (MJ m ²)
Janeiro	432,35	435,71	3,36
Fevereiro	444,01	442,34	-1,66
Março	433,82	433,48	-0,34
Abril	423,56	415,92	-7,64

Maio	398,22	396,65	-1,57
Junho	388,86	391,65	2,79
Julho	420,37	419,07	-1,30
Agosto	452,42	455,52	3,10
Setembro	486,76	487,53	0,77
Outubro	495,51	505,21	9,69
Novembro	468,75	473,08	4,33
Dezembro	443,26	436,15	-7,11

Estação chuvosa
 Estação seca

Para as áreas agrícolas na Amazônia o aumento da ETo acarretaria numa acentuação do estresse hídrico durante o período seco, uma vez que a umidade nas camadas mais superficiais do solo seria retirada e as raízes pouco profundas dos cultivos não conseguiriam acessar a umidade nas camadas mais profundas do solo (CARVALHO, 2011).

Ressalta-se que não foi realizado o acoplamento de dados projetados de uso e ocupação do solo na Bacia Amazônica junto à modelagem da estimativa da ETo sob o cenário RCP 8.5. Porém, como mencionado anteriormente, as características do uso e ocupação de solo interferem no processo de evapotranspiração através da alteração de parâmetros importantes, como a temperatura e saldo de radiação (que segundo os resultados aqui demonstrados são as variáveis climáticas com maior influência na ETo). Na continuidade deste estudo, essas informações de uso e ocupação do solo, especialmente do desmatamento para cenários futuros poderão conferir ao modelo EER-PM uma maior precisão nos resultados, uma vez que seria melhor representada a complexidade do acoplamento floresta-clima na Amazônia.

Trabalhos como o Dias et al. (2015), Laipelt et al. (2019) e Serrão et al. (2019) identificaram a diminuição dos valores de evapotranspiração nas áreas afetadas por desmatamento, especialmente no arco do desmatamento da Amazônia. Nesta região (destacada na figura 9), a substituição da floresta por áreas de pastagem e

agricultura acarreta na diminuição da área foliar, levando a uma redução da área potencial de superfície para evaporação e transpiração e também ao aumento do albedo. Complementarmente, a compactação do solo pelas atividades agropecuárias aumenta o escoamento superficial e diminui a infiltração vertical, ocasionando uma redução na disponibilidade hídrica do solo. As raízes dos cultivos são curtas em comparação com as raízes da vegetação florestal e não conseguem alcançar a umidade do solo em grandes profundidades (O' Connor et al., 2019). Ou seja, embora as projeções futuras tenham indicado um aumento da ETo estatisticamente significativo sob o cenário RCP 8.5, o aumento do desmatamento pode anular este efeito, trazendo grandes problemas para as práticas agrícolas na Amazônia e especialmente no arco do desmatamento, onde grande parte da agricultura é de sequeiro, ou seja, dependentes das chuvas, que por sua vez são dependentes da ETo.

O aumento do desmatamento em conjunto com o aumento nas concentrações de gases do efeito estufa, refletindo em alterações na ETo conforme demonstradas pelo modelo ERR-PM, acarretariam em uma desregulação do balanço hídrico regional. O aumento previsto da ETo adicionaria umidade na atmosfera que posteriormente, através do ciclo hidrológico amazônico, seria inserida novamente no sistema por meio da precipitação (MARENGO, 2006), elevando os níveis de chuva. Concomitantemente, elevada umidade seria transportada para outras regiões através dos chamados “rios voadores” (TORDIN, 2018) podendo causar eventos extremos de chuva.

3.1. Validação

O resultado do teste t de Student indicou que as médias são significativamente diferentes entre o período observado por Xavier et al. (2015) e simulado pelo modelo EER-PM (1995 a 2005), no nível de confiança de 95%. O índice de correlação de Spearman foi de 0,65 e o ajustamento entre as médias (R^2) de 0,45.

A Figura 11 apresenta a dispersão dos valores mensais de ETo em relação a linha da tendência linear.

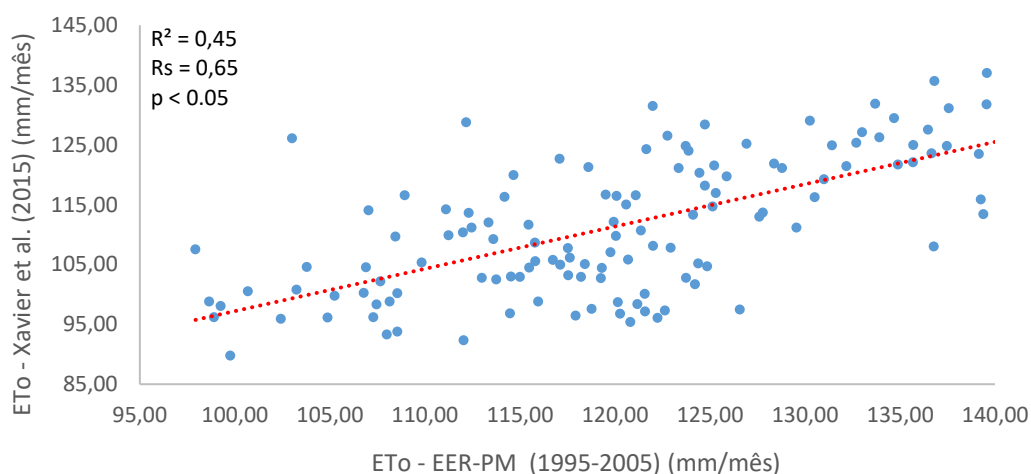


Figura 12. Associação entre a ETo obtida por Xavier et al. (2015) e os resultados do modelo EER-PM. Os dados pertencem ao período observado (1995-2005). Em vermelho a tendência linear.

Tal resultado pode ser explicado pelos diferentes métodos de obtenção dos dados utilizados pelo CMIP5 e por Xavier et al. (2015). A base de dados histórica e projetada do CMIP5 é formada através dos *outputs* de modelos climáticos globais enquanto que a base de dados de Xavier et al. (2015) foi formada através da interpolação de dados *in loco* fornecidos pela ANA (Agência Nacional de Águas), INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo).

Entretanto, a sazonalidade simulada pelo modelo EER-PM é similar à sazonalidade demonstrada por Xavier et al. (2015) (Figura 13). Os dados de Xavier et al. (2015) apontaram o início da elevação da ETo no mês de junho, ao passo que o modelo EER-PM apontou esse mesmo crescimento no mês de julho. Observou-se que ambos os resultados detectaram a queda da ETo a partir do mês de novembro. A rápida elevação da ETo detectada por Xavier et al. (2015) no mês de março foi identificada pelo modelo EER-PM no mês fevereiro.

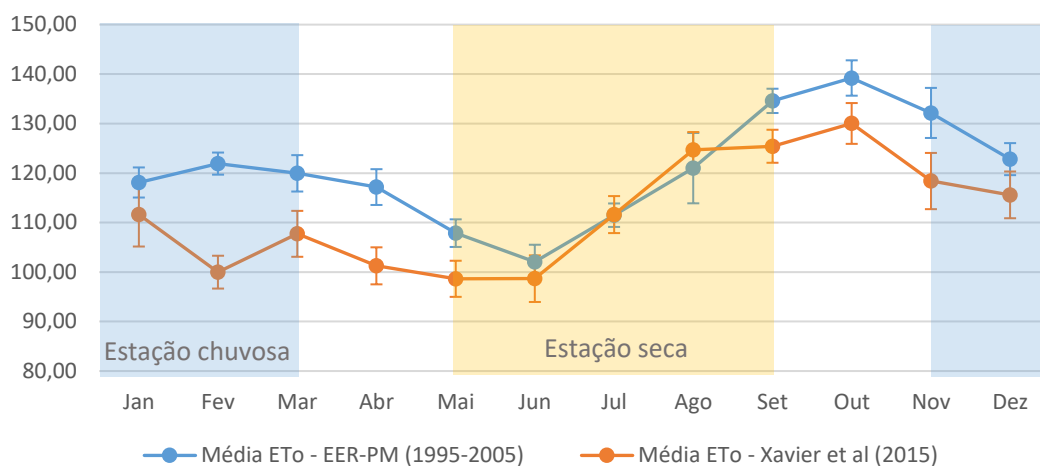


Figura 13. Médias mensais de ETo para o período observado por Xavier et al. (2015) (1995 a 2005) e projetado pelo modelo EER-PM (1995 a 2005). As barras verticais representam o desvio-padrão.

4. Conclusões

A sazonalidade da ETo simulada para os períodos observado e projetado mostraram-se consistentes com a recente literatura da área. Para os anos de 2006 a 2050 a sazonalidade projetada se manteve estatisticamente similar à observada, com o aumento da ETo durante a estação seca (maio a setembro) e redução durante a estação chuvosa (novembro a março). A ETo na Bacia Amazônica apresentou um padrão de distribuição espacial ao longo do período projetado com maiores valores de ETo na porção leste da Bacia Amazônica, se estendendo no sentido norte-sul. Tal padrão acompanha a distribuição espacial dos valores de temperatura e do saldo de radiação e coincide com os padrões de desmatamento da região

O modelo EER-PM mostrou-se adequado para a estimativa da ETo de forma espacialmente explícita utilizando o método de Penman-Monteith parametrizado pela FAO. O modelo demonstrou potencial para auxiliar pesquisadores no desenvolvimento de estudos e análises ambientais para a região amazônica. A sua aplicação em outras áreas de estudos também é viabilizada diante da

versatilidade do método adotado para as estimativas. Os resultados gerados poderão subsidiar os agentes públicos e tomadores de decisão na elaboração na compreensão dos efeitos das mudanças climáticas na Amazônia, subsidiando medidas para a mitigação destes efeitos tendo em vista a importância da ETo na manutenção do ciclo hidrológico amazônico e a consequente influência do mesmo no clima regional.

Identificou-se um aumento da ETo na Bacia Amazônica durante o período projetado, resultado da elevação da temperatura e do saldo de radiação solar. Tal aumento poderá acarretar em mudanças significativas no balanço hídrico da área de estudo que por sua vez pode alterar o equilíbrio climático em outras regiões do Brasil e América do Sul. Importante ressaltar que, embora as projeções futuras tenham indicado um aumento da ETo estatisticamente significativo sob o cenário RCP 8.5, o aumento do desmatamento pode anular este efeito, trazendo grandes problemas para as práticas agrícolas na Amazônia e especialmente no arco do desmatamento.

Estudos futuros devem considerar explorar as alterações na ETo sob cenários de mudanças climáticas separadamente nas estações seca e chuvosa na região amazônica visando complementar os resultados obtidos. Ressalta-se ainda que no presente trabalho não foi realizado o *downscaling* dos dados climáticos provenientes do modelo Hadgem2-ES, porém, estudos futuros são encorajados à esta prática, uma vez que isto proporcionaria o refinamento das informações em escala local. Por fim, o acoplamento de dados espacialmente explícitos de uso e ocupação do solo (observados e futuros) ao modelo EER-PM poderá fornecer uma melhor representação da complexa interação clima, desmatamento e mudanças climáticas na Amazônia (e seu efeito na ETo).

5. Referências bibliográficas

ALLEN, R. G. et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO – Irrigation and Drainage Paper, 56).

ALVES, L. M. et al. Assessment of a present-day climate simulation of precipitation in south america from CMIP5 climate models. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 17, 2012, Gramado. Anais do XVII Congresso Brasileiro de Meteorologia.

BRANDO, P. M. et al. The gathering firestorm in southern Amazonia. *Science Advances*. 6. 2020.

CARVALHO, F. H. (2011). Aquecimento Global – efeitos do aumento da temperatura sobre a evapotranspiração de referência no Brasil. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 19, 2011, Maceió. Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.

CHRISTENSEN, P. et al. Uncertainty in forecasts of long-run economic growth. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 115. 2018.

CONCEIÇÃO, M. A. F. Roteiro de cálculo da evapotranspiração de referência pelo método de Penman- Monteith-FAO. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2006, 8 p. (Embrapa Uva e Vinho. Circular Técnica, 65).

COUTINHO, E. C. et al. Variabilidade climática da precipitação na bacia amazônica brasileira. *Revista Brasileira de Climatologia*, [S.l.], v. 22, 2018. ISSN 2237-8642. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/46074>>. Acessado em: janeiro de 2020.

CURRIE, D.J. Energy and large-scale patterns of animal-and plant-species richness. *The American Naturalist*, 137, p. 27–49, 1991.

DIAS, L. et al. Effects of land cover change on evapotranspiration and streamflow of small catchments in the Upper Xingu River Basin, Central Brazil. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 4, Part B. p. 108-122, 2015.

DINIZ-FILHO, J.A.F. et al. Spatial autocorrelation and red herrings in geographical ecology. *Global Ecology and Biogeography*, 12, p. 53–64, 2003.

DIRMEYER, P.A. et al. Comparing evaporative sources of terrestrial precipitation and their extremes in MERRA using relative entropy. *Journal of Hydrometeorology* v. 15(1), p. 102–116, 2014.

FEARNSIDE, P. M. Mudanças climáticas globais e a floresta amazônica. In: Marcos Buckeridge. (Org.). *Biologia e Mudanças Climáticas Globais no Brasil*. São Paulo: RiMa Editora, 2008, p. 131-150.

FEARNSIDE, P.M. Potential impacts of climatic change on natural forests and forestry in Brazilian Amazonia. *Forest Ecology and Management*, v. 78(1-3): p. 51-70, 1995.

FIGUEROA, S.N.; NOBRE, C.A. Precipitation distribution over central and western tropical South America. *Climanálise*, v. 5, p. 36-45, 1990.

FOLEY, J. et al. Green surprise? How terrestrial ecosystems could affect earth's climate. *Frontiers in Ecology and the Environment*, v.1, 2003, p.38-44.

GULIZIA, C.; CAMILLONI, I. Comparative analysis of the ability of a set of CMIP3 and CMIP5 global climate models to represent precipitation in South America. *International Journal of Climatology*, v. 35, p. 583-595, 2005.

HASLER, N.; AVISSAR, R. What Controls Evapotranspiration in the Amazon Basin? *Journal of Hydrometeorology*, v. 8, p. 380-395, 2007.

IPCC. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013, 1535 p.

IPCC. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland, 2014, 151 p.

KATUL, G. G. et al. Evapotranspiration: A process driving mass transport and energy exchange in the soil-plant-atmosphere-climate system. *Reviews of Geophysics*, v. 50, 2012.

LAIPELT, L. et al. Impactos das mudanças do uso da terra na evapotranspiração em área transicional entre os biomas Amazônia e Cerrado. In: *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Foz do Iguaçu, PR. Anais do XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. 2019.

LEITE-FILHO, A.T. et al. The southern Amazon rainy season: The role of deforestation and its interactions with large-scale mechanisms. *International Journal of Climatology*, p. 1-14, 2019.

MACARTHUR, R.H. and MACARTHUR, J.W. On Bird Species Diversity. *Ecology*, v. 42, p. 594-598, 1961.

MAEDA, E. et al. Evapotranspiration seasonality across the Amazon Basin. *Earth System Dynamics*, v. 8, p. 439-454, 2017.

MALHI, Y. et al. Climate Change, Deforestation, and the Fate of the Amazon. *Science*, v. 319, p. 169-172, 2008.

MALHI, Y. et al. (2009). Exploring the likelihood and mechanism of a climate-change-induced dieback of the Amazon rainforest. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 106, p. 20610-20615, 2009.

MARENGO J. A.; SOUZA M. Mudanças Climáticas: impactos e cenários para a Amazônia. São Paulo, 2018, 33 p.

MARENGO, J A. Interannual variability of deep convection in the tropical South American sector as deduced from ISCCP C2 data. *International Journal of Climatology*, n. 9, v. 15, p. 995-1010, 1995a.

MARENGO, J. A. Variations and change in South American streamflow. *Climate Change*, n. 1, v. 31, p. 99–117, 1995b.

MARENGO, J. A. On the hydrological cycle of the Amazon Basin: A historical review and current. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 21, p. 1-19, 2006.

MARENGO, J.A. The characteristics and variability of the atmospheric water balance in the Amazon basin: Spatial and temporal variability. *Climate Dynamics*, v. 24, p. 11-22, 2005.

MIRANDA, E. E. de; (Coord.). Brasil em Relevô. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 24 Ago. 2020.

MONTEITH, J.L. Evaporation and environment. In G.E. Fogg (ed.) *Symposium of the Society for Experimental Biology. The State and Movement of Water in Living Organisms*, v. 19, p. 205-234, 1965.

O'CONNOR, J. et al. The influence of water table depth on evapotranspiration in the Amazon arc of deforestation. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, p. 1-22, 2019.

PBMC. Mitigação das mudanças climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 3 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2014, 463 p.

RODRIGUES, H. O. et al. Dinâmica EGO, uma plataforma para modelagem de sistemas ambientais. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13, Florianópolis. Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, INPE, p. 3089-3096, 2007.

ROSSOW, W. B. et al. International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP) documentation of cloud data. World Meteorological Organization, n. 266, 1991, 76 p.

SALATI, E. et al. Recycling of water in the Amazon Basin: An isotopic study. *Water Resources Research*, n. 5, v. 15, p. 1250–1258, 1979.

SERRÃO, E. A. O. et al. Influência do uso e cobertura da terra na variabilidade espacial e temporal da evapotranspiração no sudeste da Amazônia, utilizando o modelo SWAT. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, n. 4, v. 10, p. 134-148, 2019.

SILVA DIAS, M.A.F. et al. Interações entre nuvens, chuvas e a biosfera na Amazônia. *Acta Amazônica*, n. 2, v. 35, p. 215–222, 2005.

SILVA JÚNIOR, R. O. DA et al. Three decades of reference evapotranspiration estimates for a tropical watershed in the eastern Amazon. *Anais da Academia Brasileira de Ciência*, Rio de Janeiro, v. 89, n. 3, p. 1985-2002, 2017.

SOARES-FILHO et al. Forest fragmentation, climate change and understory fire regimes on the Amazonian landscapes of the Xingu headwaters. *Landscape Ecology*, v. 27, p. 585–598, 2012.

SOARES-FILHO et al. Modeling environmental dynamics with dinamica EGO. Centro de Sensoriamento Remoto, Belo Horizonte, Brasil, 2019. Disponível em: <https://www.csr.ufmg.br/dinamica/dokuwiki/doku.php?id=guidebook_start>. Acesso em: maio de 2020.

SPEARMAN, C.E. The proof and measurement of association between two things. *American Journal of Psychology*, v. 15, p. 72–101, 1904.

SPRACKLEN, D. V. et al. Observations of increased tropical rainfall preceded by air passage over forests. *Nature*, v. 489, p. 282–285, 2012.

TORDIN, C. Rios Voadores e Floresta Amazônica influenciam nas chuvas de boa parte do território nacional. EMBRAPA, DF, 2018. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/32923145/rios-voadores-e-floresta-amazonica-influenciam-nas-chuvas-de-boa-parte-do-territorio-nacional>>. Acesso em: fevereiro de 2020.

WERTH, D.; AVISSAR, R. The regional evapotranspiration of the Amazon. *Journal of Hydrometeorology*, n. 1, v. 5, p. 100–109, 2004.

WILCOX, R. R. Why Can Methods for Comparing Means Have Relatively Low Power, and What Can You Do to Correct the Problem? *Current Directions in Psychological Science*, n. 3, v. 1, p. 101–105, 1992.

XAVIER, A. C. et al. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). *International Journal of Climatology*, n. 6, v. 36, p. 2644-2659, 2015.

XU, D. et al. Estimation of evapotranspiration of Amazon rainforest using the maximum entropy production method. *Geophysical Research Letters*, n. 3, v. 46, p. 1402-1412, 2019.

6. Apêndice

Tabela 1. Médias mensais de ETo estimadas por Xavier et al. (2015) para o período observado (1995-2005)

Mês	Ano	Média ETo - Xavier et al (2015) (mm)
janeiro	1995	114,98
fevereiro	1995	101,66
março	1995	112,94
abril	1995	96,41
maio	1995	92,31
junho	1995	93,28
julho	1995	113,63
agosto	1995	128,37
setembro	1995	125,32
outubro	1995	128,28
novembro	1995	111,12
dezembro	1995	112,09
janeiro	1996	106,14
fevereiro	1996	102,72
março	1996	104,65
abril	1996	97,14
maio	1996	96,10
junho	1996	98,03
julho	1996	109,23
agosto	1996	121,11
setembro	1996	123,53
outubro	1996	125,47
novembro	1996	113,41
dezembro	1996	113,67
janeiro	1997	105,15
fevereiro	1997	97,54
março	1997	95,34
abril	1997	98,78
maio	1997	98,81
junho	1997	104,59
julho	1997	116,29
agosto	1997	121,10
setembro	1997	129,43

Mês	Ano	Média ETo - Xavier et al (2015) (mm)
outubro	1997	129,43
novembro	1997	115,83
dezembro	1997	120,28
janeiro	1998	116,41
fevereiro	1998	107,77
março	1998	109,73
abril	1998	105,32
maio	1998	98,33
junho	1998	96,18
julho	1998	109,63
agosto	1998	121,28
setembro	1998	123,47
outubro	1998	124,85
novembro	1998	107,98
dezembro	1998	116,67
janeiro	1999	105,75
fevereiro	1999	96,07
março	1999	105,02
abril	1999	96,83
maio	1999	93,74
junho	1999	96,16
julho	1999	111,16
agosto	1999	119,70
setembro	1999	121,70
outubro	1999	131,76
novembro	1999	119,24
dezembro	1999	110,66
janeiro	2000	105,51
fevereiro	2000	98,70
março	2000	102,93
abril	2000	97,30
maio	2000	100,23
junho	2000	98,79
julho	2000	102,89
agosto	2000	125,14
setembro	2000	122,04
outubro	2000	124,88
novembro	2000	116,24
dezembro	2000	118,16

Mês	Ano	Média ETo - Xavier et al (2015) (mm)
janeiro	2001	103,15
fevereiro	2001	97,45
março	2001	107,00
abril	2001	104,39
maio	2001	100,16
junho	2001	89,73
julho	2001	109,84
agosto	2001	131,47
setembro	2001	127,09
outubro	2001	134,42
novembro	2001	123,96
dezembro	2001	113,30
janeiro	2002	116,54
fevereiro	2002	102,73
março	2002	111,60
abril	2002	105,79
maio	2002	102,16
junho	2002	100,78
julho	2002	114,17
agosto	2002	126,05
setembro	2002	131,85
outubro	2002	135,62
novembro	2002	126,24
dezembro	2002	114,69
janeiro	2003	122,62
fevereiro	2003	100,08
março	2003	107,74
abril	2003	104,92
maio	2003	102,72
junho	2003	100,48
julho	2003	114,03
agosto	2003	124,76
setembro	2003	124,78
outubro	2003	127,52
novembro	2003	121,84
dezembro	2003	126,51
janeiro	2004	111,99
fevereiro	2004	98,36
março	2004	108,09

Mês	Ano	Média ETo - Xavier et al (2015) (mm)
abril	2004	104,47
maio	2004	95,92
junho	2004	99,77
julho	2004	110,32
agosto	2004	124,23
setembro	2004	121,40
outubro	2004	131,08
novembro	2004	124,93
dezembro	2004	116,92
janeiro	2005	119,93
fevereiro	2005	96,73
março	2005	102,94
abril	2005	102,46
maio	2005	104,52
junho	2005	107,51
julho	2005	116,56
agosto	2005	128,72
setembro	2005	129,01
outubro	2005	137,01
novembro	2005	121,50
dezembro	2005	108,63

Tabela 2. Médias mensais de ETo estimadas pelo modelo EER-PM através da base de dados do modelo climático Hadgem2-es para o período simulado (1995-2005)

Mês	Ano	Média ETo – EER-PM (mm)
janeiro	1995	120,60
fevereiro	1995	124,22
março	1995	127,61
abril	1995	117,93
maio	1995	112,04
junho	1995	108,00
julho	1995	112,32
agosto	1995	124,74
setembro	1995	132,71
outubro	1995	140,45
novembro	1995	129,56
dezembro	1995	119,95
janeiro	1996	117,65
fevereiro	1996	119,28
março	1996	124,87
abril	1996	121,59
maio	1996	104,88
junho	1996	99,26
julho	1996	113,61
agosto	1996	123,37
setembro	1996	136,67
outubro	1996	146,34
novembro	1996	139,40
dezembro	1996	127,79
janeiro	1997	124,40
fevereiro	1997	118,78
março	1997	120,81
abril	1997	115,97
maio	1997	108,16
junho	1997	103,79
julho	1997	114,21
agosto	1997	128,80
setembro	1997	134,71
outubro	1997	140,27

Mês	Ano	Média ETo – EER-PM (mm)
novembro	1997	139,26
dezembro	1997	124,46
janeiro	1998	120,09
fevereiro	1998	122,94
março	1998	120,06
abril	1998	109,84
maio	1998	107,46
junho	1998	98,91
julho	1998	108,46
agosto	1998	118,61
setembro	1998	139,16
outubro	1998	140,70
novembro	1998	136,79
dezembro	1998	119,52
janeiro	1999	116,75
fevereiro	1999	122,25
março	1999	118,43
abril	1999	114,49
maio	1999	108,55
junho	1999	107,30
julho	1999	112,46
agosto	1999	125,89
setembro	1999	134,91
outubro	1999	139,57
novembro	1999	131,01
dezembro	1999	121,38
janeiro	2000	115,82
fevereiro	2000	120,16
março	2000	118,22
abril	2000	122,64
maio	2000	106,79
junho	2000	98,65
julho	2000	115,01
agosto	2000	126,94
setembro	2000	135,69
outubro	2000	131,44
novembro	2000	130,53
dezembro	2000	124,75
janeiro	2001	117,55

Mês	Ano	Média ETo – EER-PM (mm)
fevereiro	2001	126,59
março	2001	119,77
abril	2001	119,33
maio	2001	108,57
junho	2001	99,76
julho	2001	111,26
agosto	2001	121,99
setembro	2001	133,02
outubro	2001	142,08
novembro	2001	123,89
dezembro	2001	124,12
janeiro	2002	121,11
fevereiro	2002	123,75
março	2002	115,46
abril	2002	120,70
maio	2002	107,67
junho	2002	103,25
julho	2002	111,11
agosto	2002	103,01
setembro	2002	133,70
outubro	2002	136,83
novembro	2002	133,93
dezembro	2002	125,15
janeiro	2003	117,10
fevereiro	2003	121,58
março	2003	117,53
abril	2003	117,14
maio	2003	113,01
junho	2003	100,69
julho	2003	107,04
agosto	2003	123,74
setembro	2003	137,48
outubro	2003	136,48
novembro	2003	128,39
dezembro	2003	122,77
janeiro	2004	113,35
fevereiro	2004	121,20
março	2004	122,03
abril	2004	115,51

Mês	Ano	Média ETo - EER-PM (mm)
maio	2004	102,43
junho	2004	105,25
julho	2004	112,01
agosto	2004	121,66
setembro	2004	132,19
outubro	2004	137,58
novembro	2004	135,71
dezembro	2004	125,32
janeiro	2005	114,67
fevereiro	2005	120,29
março	2005	114,54
abril	2005	113,77
maio	2005	106,91
junho	2005	97,93
julho	2005	108,95
agosto	2005	112,18
setembro	2005	130,27
outubro	2005	139,59
novembro	2005	125,24
dezembro	2005	115,79

Tabela 3. Médias mensais de ETo estimadas pelo modelo ERR-PM através da base de dados do modelo climático Hadgem2-es para o período projetado (2006-2050)

Mês	Ano	Média ETo – EER-PM (mm)
janeiro	2006	118,52
fevereiro	2006	118,38
março	2006	118,32
abril	2006	113,94
maio	2006	108,45
junho	2006	111,33
julho	2006	111,51
agosto	2006	125,16
setembro	2006	135,90
outubro	2006	146,79
novembro	2006	134,74
dezembro	2006	121,25
janeiro	2007	126,17
fevereiro	2007	120,22
março	2007	115,02
abril	2007	112,02
maio	2007	107,84
junho	2007	94,15
julho	2007	105,99
agosto	2007	110,00
setembro	2007	127,88
outubro	2007	141,08
novembro	2007	128,16
dezembro	2007	118,74
janeiro	2008	125,74
fevereiro	2008	126,72
março	2008	121,86
abril	2008	111,46
maio	2008	105,91
junho	2008	106,60
julho	2008	108,51
agosto	2008	114,18
setembro	2008	125,62
outubro	2008	141,87
novembro	2008	131,29

Mês	Ano	Média ETo – EER-PM (mm)
dezembro	2008	125,38
janeiro	2009	114,68
fevereiro	2009	120,25
março	2009	118,79
abril	2009	119,78
maio	2009	108,21
junho	2009	99,92
julho	2009	107,76
agosto	2009	116,47
setembro	2009	133,32
outubro	2009	142,68
novembro	2009	128,70
dezembro	2009	130,04
janeiro	2010	120,84
fevereiro	2010	128,13
março	2010	117,22
abril	2010	113,94
maio	2010	110,75
junho	2010	104,51
julho	2010	111,80
agosto	2010	119,48
setembro	2010	141,28
outubro	2010	144,69
novembro	2010	141,30
dezembro	2010	131,56
janeiro	2011	126,87
fevereiro	2011	128,10
março	2011	126,44
abril	2011	121,35
maio	2011	110,12
junho	2011	103,05
julho	2011	116,12
agosto	2011	120,10
setembro	2011	133,91
outubro	2011	137,60
novembro	2011	136,15
dezembro	2011	121,28
janeiro	2012	123,19
fevereiro	2012	117,17

Mês	Ano	Média ETo – EER-PM (mm)
março	2012	117,63
abril	2012	112,18
maio	2012	104,15
junho	2012	101,00
julho	2012	112,22
agosto	2012	123,31
setembro	2012	134,86
outubro	2012	141,50
novembro	2012	126,37
dezembro	2012	109,71
janeiro	2013	122,42
fevereiro	2013	120,08
março	2013	116,59
abril	2013	107,73
maio	2013	104,15
junho	2013	97,08
julho	2013	107,38
agosto	2013	128,54
setembro	2013	135,76
outubro	2013	144,52
novembro	2013	130,90
dezembro	2013	120,77
janeiro	2014	118,15
fevereiro	2014	123,42
março	2014	115,20
abril	2014	112,83
maio	2014	102,72
junho	2014	108,73
julho	2014	115,95
agosto	2014	123,24
setembro	2014	130,65
outubro	2014	140,77
novembro	2014	134,38
dezembro	2014	125,45
janeiro	2015	123,06
fevereiro	2015	125,32
março	2015	125,05
abril	2015	119,43
maio	2015	109,02

Mês	Ano	Média ETo – EER-PM (mm)
junho	2015	104,64
julho	2015	121,38
agosto	2015	128,31
setembro	2015	139,54
outubro	2015	154,67
novembro	2015	135,63
dezembro	2015	126,92
janeiro	2016	118,90
fevereiro	2016	119,44
março	2016	112,66
abril	2016	111,71
maio	2016	100,39
junho	2016	106,36
julho	2016	108,71
agosto	2016	127,52
setembro	2016	135,71
outubro	2016	148,03
novembro	2016	132,71
dezembro	2016	121,54
janeiro	2017	119,11
fevereiro	2017	118,60
março	2017	126,14
abril	2017	121,09
maio	2017	108,60
junho	2017	104,67
julho	2017	113,32
agosto	2017	123,96
setembro	2017	135,90
outubro	2017	150,84
novembro	2017	133,21
dezembro	2017	132,60
janeiro	2018	112,25
fevereiro	2018	128,74
março	2018	124,41
abril	2018	117,25
maio	2018	111,77
junho	2018	96,69
julho	2018	103,48
agosto	2018	126,50

Mês	Ano	Média ETo – EER-PM (mm)
setembro	2018	135,98
outubro	2018	142,70
novembro	2018	130,84
dezembro	2018	119,32
janeiro	2019	113,76
fevereiro	2019	125,22
março	2019	118,28
abril	2019	120,25
maio	2019	110,31
junho	2019	106,23
julho	2019	114,34
agosto	2019	120,38
setembro	2019	138,73
outubro	2019	145,53
novembro	2019	137,67
dezembro	2019	130,12
janeiro	2020	120,10
fevereiro	2020	120,05
março	2020	110,75
abril	2020	111,64
maio	2020	108,56
junho	2020	98,44
julho	2020	103,27
agosto	2020	123,79
setembro	2020	140,36
outubro	2020	144,99
novembro	2020	134,93
dezembro	2020	115,95
janeiro	2021	119,19
fevereiro	2021	121,75
março	2021	120,57
abril	2021	116,57
maio	2021	105,21
junho	2021	108,11
julho	2021	109,64
agosto	2021	117,93
setembro	2021	138,28
outubro	2021	148,36
novembro	2021	135,09

Mês	Ano	Média ETo – EER-PM (mm)
dezembro	2021	122,90
janeiro	2022	123,47
fevereiro	2022	118,68
março	2022	116,49
abril	2022	107,60
maio	2022	108,27
junho	2022	109,12
julho	2022	116,84
agosto	2022	121,26
setembro	2022	144,94
outubro	2022	146,10
novembro	2022	141,05
dezembro	2022	119,59
janeiro	2023	129,29
fevereiro	2023	129,27
março	2023	130,95
abril	2023	125,39
maio	2023	111,02
junho	2023	112,37
julho	2023	114,73
agosto	2023	134,17
setembro	2023	133,68
outubro	2023	142,08
novembro	2023	136,52
dezembro	2023	108,60
janeiro	2024	115,67
fevereiro	2024	129,61
março	2024	121,84
abril	2024	115,91
maio	2024	108,31
junho	2024	97,32
julho	2024	118,44
agosto	2024	127,27
setembro	2024	138,14
outubro	2024	138,63
novembro	2024	130,72
dezembro	2024	116,09
janeiro	2025	116,12
fevereiro	2025	117,61

Mês	Ano	Média ETo – EER-PM (mm)
março	2025	114,47
abril	2025	114,62
maio	2025	113,19
junho	2025	96,61
julho	2025	109,66
agosto	2025	123,08
setembro	2025	139,69
outubro	2025	143,69
novembro	2025	134,21
dezembro	2025	123,20
janeiro	2026	112,86
fevereiro	2026	119,34
março	2026	125,62
abril	2026	119,19
maio	2026	109,41
junho	2026	107,70
julho	2026	111,66
agosto	2026	119,88
setembro	2026	138,19
outubro	2026	138,94
novembro	2026	128,46
dezembro	2026	119,47
janeiro	2027	122,33
fevereiro	2027	130,19
março	2027	122,47
abril	2027	120,55
maio	2027	102,67
junho	2027	106,31
julho	2027	109,13
agosto	2027	121,52
setembro	2027	137,94
outubro	2027	146,85
novembro	2027	132,63
dezembro	2027	108,89
janeiro	2028	106,93
fevereiro	2028	120,65
março	2028	118,91
abril	2028	110,44
maio	2028	108,88

Mês	Ano	Média ETo – EER-PM (mm)
junho	2028	105,32
julho	2028	113,51
agosto	2028	120,20
setembro	2028	138,50
outubro	2028	141,68
novembro	2028	137,47
dezembro	2028	118,81
janeiro	2029	112,06
fevereiro	2029	117,47
março	2029	116,32
abril	2029	113,52
maio	2029	103,72
junho	2029	101,99
julho	2029	113,46
agosto	2029	123,13
setembro	2029	137,18
outubro	2029	145,16
novembro	2029	137,25
dezembro	2029	118,20
janeiro	2030	122,94
fevereiro	2030	128,25
março	2030	114,56
abril	2030	111,68
maio	2030	103,24
junho	2030	112,39
julho	2030	119,48
agosto	2030	130,89
setembro	2030	136,62
outubro	2030	146,80
novembro	2030	138,42
dezembro	2030	129,71
janeiro	2031	122,79
fevereiro	2031	120,76
março	2031	129,70
abril	2031	120,18
maio	2031	109,30
junho	2031	107,94
julho	2031	113,84
agosto	2031	125,29

Mês	Ano	Média ETo – EER-PM (mm)
setembro	2031	137,42
outubro	2031	140,95
novembro	2031	135,33
dezembro	2031	121,72
janeiro	2032	113,40
fevereiro	2032	120,45
março	2032	123,66
abril	2032	116,13
maio	2032	105,57
junho	2032	109,11
julho	2032	101,34
agosto	2032	125,42
setembro	2032	131,19
outubro	2032	137,93
novembro	2032	129,54
dezembro	2032	125,81
janeiro	2033	125,55
fevereiro	2033	124,88
março	2033	119,60
abril	2033	124,54
maio	2033	116,18
junho	2033	112,54
julho	2033	115,59
agosto	2033	127,34
setembro	2033	138,22
outubro	2033	150,02
novembro	2033	125,37
dezembro	2033	120,96
janeiro	2034	129,36
fevereiro	2034	124,09
março	2034	123,64
abril	2034	115,60
maio	2034	109,32
junho	2034	109,94
julho	2034	121,79
agosto	2034	136,70
setembro	2034	142,59
outubro	2034	147,60
novembro	2034	144,22

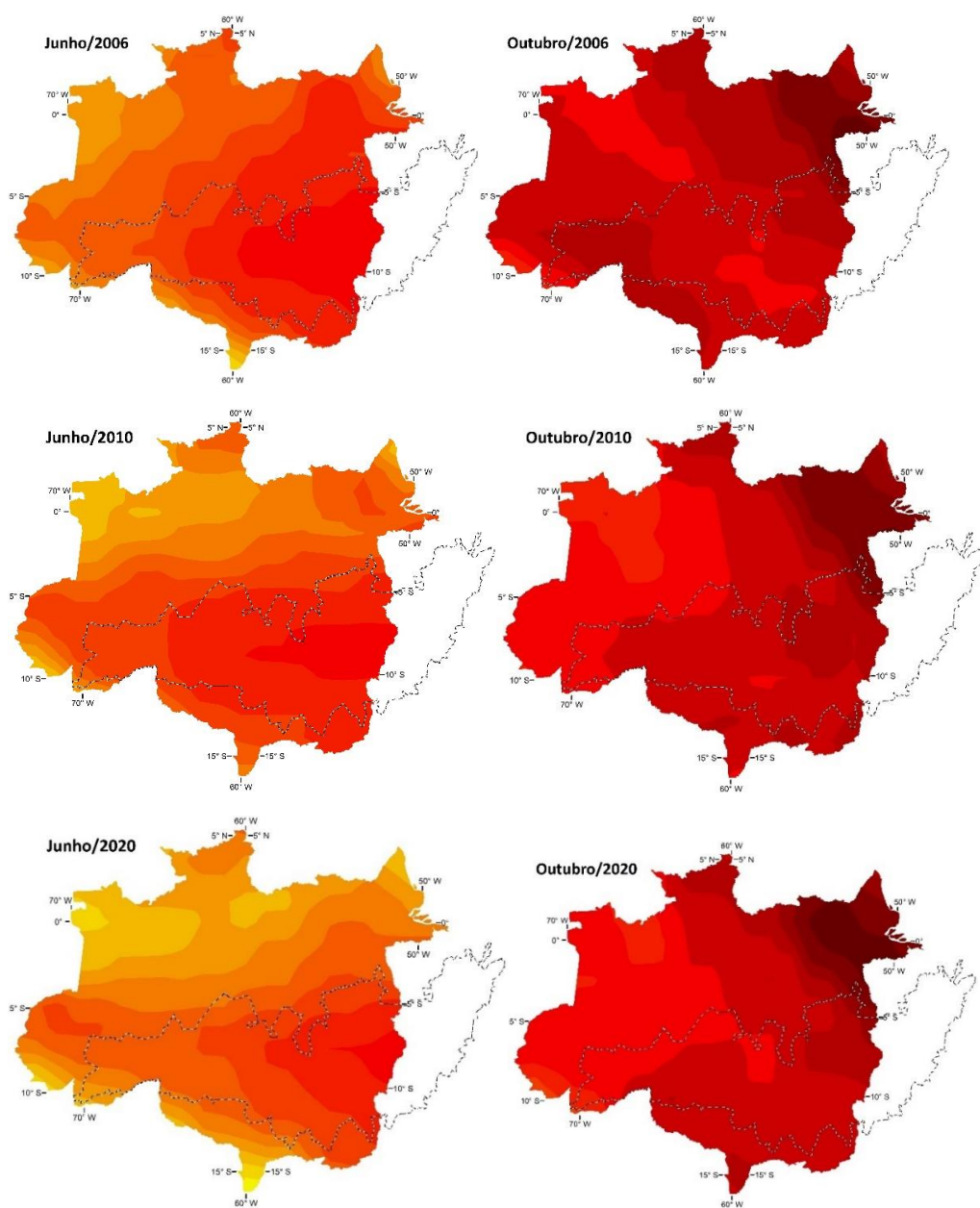
Mês	Ano	Média ETo – EER-PM (mm)
dezembro	2034	126,38
janeiro	2035	125,56
fevereiro	2035	124,86
março	2035	125,43
abril	2035	117,57
maio	2035	108,10
junho	2035	117,47
julho	2035	129,96
agosto	2035	133,09
setembro	2035	137,28
outubro	2035	147,50
novembro	2035	152,43
dezembro	2035	132,87
janeiro	2036	125,44
fevereiro	2036	125,01
março	2036	122,56
abril	2036	119,80
maio	2036	110,17
junho	2036	114,40
julho	2036	114,20
agosto	2036	128,88
setembro	2036	139,36
outubro	2036	146,55
novembro	2036	131,57
dezembro	2036	117,49
janeiro	2037	124,28
fevereiro	2037	119,25
março	2037	125,53
abril	2037	112,93
maio	2037	114,17
junho	2037	107,61
julho	2037	119,65
agosto	2037	133,53
setembro	2037	136,03
outubro	2037	147,03
novembro	2037	137,63
dezembro	2037	126,45
janeiro	2038	125,96
fevereiro	2038	119,66

Mês	Ano	Média ETo – EER-PM (mm)
março	2038	126,10
abril	2038	115,51
maio	2038	110,75
junho	2038	108,80
julho	2038	114,32
agosto	2038	129,10
setembro	2038	134,35
outubro	2038	145,92
novembro	2038	134,50
dezembro	2038	125,39
janeiro	2039	135,01
fevereiro	2039	134,01
março	2039	129,00
abril	2039	128,37
maio	2039	108,43
junho	2039	110,26
julho	2039	114,51
agosto	2039	127,72
setembro	2039	140,53
outubro	2039	141,35
novembro	2039	137,97
dezembro	2039	128,94
janeiro	2040	120,51
fevereiro	2040	126,54
março	2040	131,78
abril	2040	118,68
maio	2040	112,56
junho	2040	113,47
julho	2040	114,80
agosto	2040	128,84
setembro	2040	139,39
outubro	2040	142,12
novembro	2040	134,62
dezembro	2040	127,07
janeiro	2041	124,32
fevereiro	2041	121,13
março	2041	120,41
abril	2041	108,48
maio	2041	112,61

Mês	Ano	Média ETo – EER-PM (mm)
junho	2041	103,55
julho	2041	118,66
agosto	2041	129,83
setembro	2041	137,57
outubro	2041	152,28
novembro	2041	135,06
dezembro	2041	123,57
janeiro	2042	116,86
fevereiro	2042	122,88
março	2042	127,91
abril	2042	121,59
maio	2042	115,66
junho	2042	104,08
julho	2042	105,53
agosto	2042	128,65
setembro	2042	143,38
outubro	2042	148,31
novembro	2042	149,66
dezembro	2042	122,10
janeiro	2043	119,83
fevereiro	2043	122,21
março	2043	122,41
abril	2043	116,76
maio	2043	114,54
junho	2043	114,52
julho	2043	119,69
agosto	2043	129,99
setembro	2043	135,30
outubro	2043	137,46
novembro	2043	146,85
dezembro	2043	121,48
janeiro	2044	127,78
fevereiro	2044	127,27
março	2044	124,59
abril	2044	128,14
maio	2044	112,56
junho	2044	109,57
julho	2044	117,43
agosto	2044	125,90

Mês	Ano	Média ETo – EER-PM (mm)
setembro	2044	136,57
outubro	2044	151,59
novembro	2044	136,21
dezembro	2044	121,77
janeiro	2045	119,72
fevereiro	2045	124,14
março	2045	127,08
abril	2045	117,66
maio	2045	102,48
junho	2045	99,69
julho	2045	106,95
agosto	2045	122,97
setembro	2045	142,65
outubro	2045	150,58
novembro	2045	137,65
dezembro	2045	118,42
janeiro	2046	127,63
fevereiro	2046	130,71
março	2046	129,15
abril	2046	118,37
maio	2046	116,70
junho	2046	111,52
julho	2046	120,65
agosto	2046	134,54
setembro	2046	145,85
outubro	2046	156,28
novembro	2046	137,88
dezembro	2046	129,79
janeiro	2047	121,78
fevereiro	2047	124,26
março	2047	120,21
abril	2047	118,08
maio	2047	115,69
junho	2047	114,67
julho	2047	120,70
agosto	2047	131,19
setembro	2047	136,29
outubro	2047	145,96
novembro	2047	143,30

Mês	Ano	Média ETo – EER-PM (mm)
dezembro	2047	135,60
janeiro	2048	128,54
fevereiro	2048	130,89
março	2048	131,44
abril	2048	119,20
maio	2048	114,07
junho	2048	114,23
julho	2048	121,95
agosto	2048	131,19
setembro	2048	140,39
outubro	2048	142,25
novembro	2048	144,70
dezembro	2048	128,80
janeiro	2049	127,95
fevereiro	2049	133,15
março	2049	129,12
abril	2049	123,76
maio	2049	105,62
junho	2049	108,78
julho	2049	115,97
agosto	2049	127,42
setembro	2049	139,36
outubro	2049	149,87
novembro	2049	144,64
dezembro	2049	131,86
janeiro	2050	133,38
fevereiro	2050	135,71
março	2050	134,71
abril	2050	124,44
maio	2050	115,43
junho	2050	106,59
julho	2050	107,66
agosto	2050	126,87
setembro	2050	143,45
outubro	2050	154,77
novembro	2050	143,67
dezembro	2050	132,06



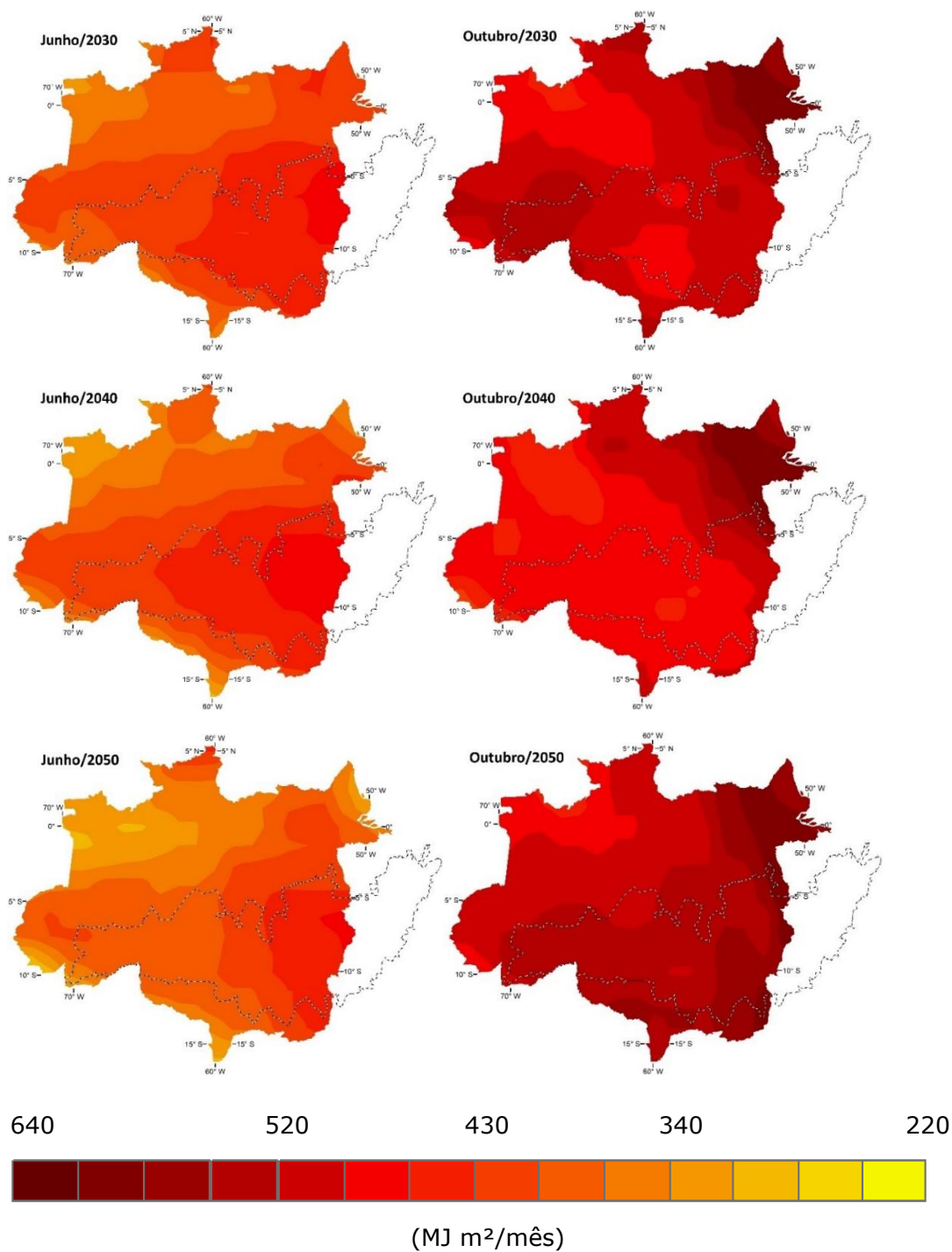
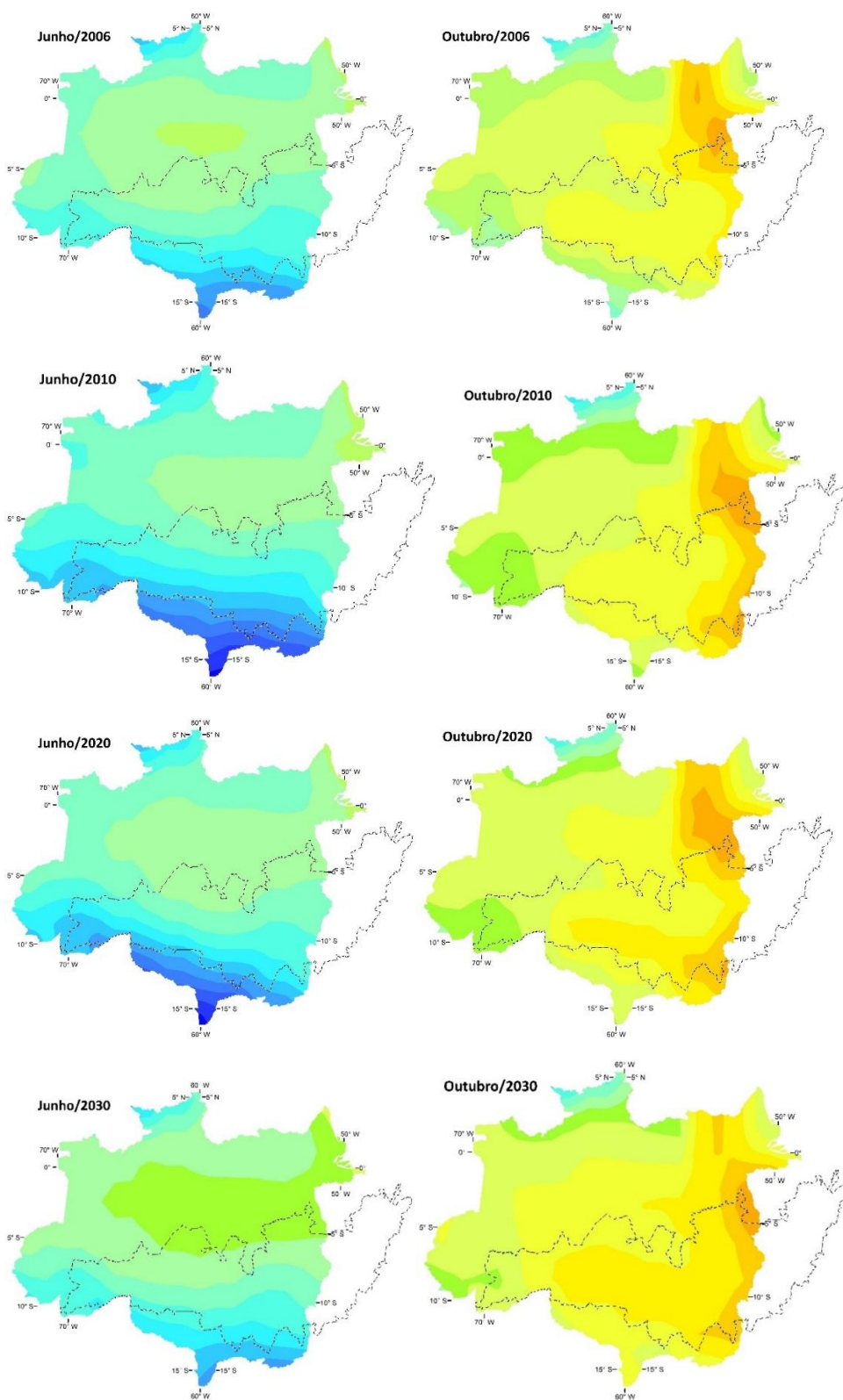


Figura 14. Espacialização da média de saldo de radiação para o período projetado utilizando a base de dados do modelo Hadgem2-es. A linha pontilhada demonstra a região conhecida como o “Arco do Desmatamento da Amazônia”.



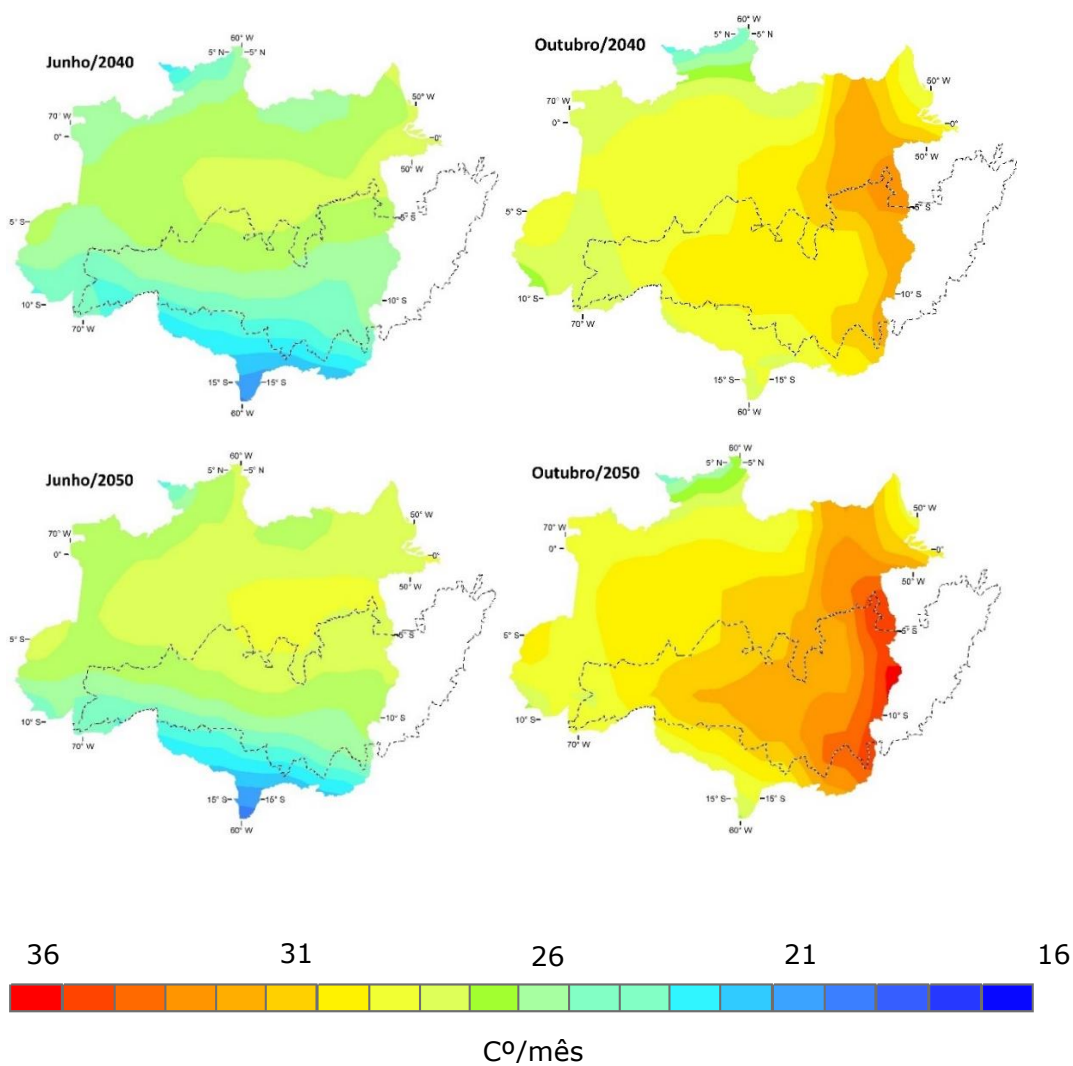


Figura 15. Espacialização da média de temperatura para o período projetado utilizando a base de dados do modelo Hadgem2-es. A linha pontilhada demonstra a região conhecida como o “Arco do Desmatamento da Amazônia”.