

ECOLOGIA

Yuri Silva de Souza

**UMA ANÁLISE DE MODELAGEM DO CICLO
HIDROLÓGICO E IMPACTOS DO AUMENTO DA
CONCENTRAÇÃO DE CO₂ ATMOSFÉRICO NA AMAZÔNIA**



Rio Claro
2016

YURI SILVA DE SOUZA

**UMA ANÁLISE DE MODELAGEM DO CICLO HIDROLÓGICO E
IMPACTOS DO AUMENTO DA CONCENTRAÇÃO DE CO₂
ATMOSFÉRICO NA AMAZÔNIA**

Orientador: Dr. David Montenegro Lapola

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Biociências da Universidade
Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” -
Campus de Rio Claro, para obtenção do grau de
Ecólogo.

Rio Claro, 2016

551.6 Souza, Yuri Silva de
S729a Uma análise de modelagem do ciclo hidrológico e
impactos do aumento da concentração de CO2 atmosférico na
Amazônia / Yuri Silva de Souza - Rio Claro, 2016
54 f. : il., figs., gráfs., mapas

Trabalho de conclusão de curso (Ecologia) - Universidade
Estadual Paulista, Instituto de Biociências de Rio Claro
Orientador: David Montenegro Lapola

1. Climatologia. 2. Mudanças do sistema terrestre. 3.
Mudanças climáticas. 4. Floresta Amazônica. 5. Modelagem
hídrica. 6. Aumento de CO2. I. Título.

Ficha Catalográfica elaborada pela STATI - Biblioteca da UNESP
Campus de Rio Claro/SP

*Dedico este trabalho a minha mãe,
meu irmão, minha namorada e sua família e meus
amigos. Devo muito a vocês, pois seus incentivos
tornaram possível as portas do caminho que
trilhei. Que o futuro lhe guarde grandes alegrias,
assim como fizeram ao meu presente.*

*“The world is changed,
I can feel it in the water,
I can feel it in the earth,
I can smell it in the air.”*

Galadriel - The Fellowship of the Ring I

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha mãe, pai e amiga *Gilvania*. Seu esforço, dedicação, trabalho, apoio e espírito de guerra moldaram a pessoa que me tornei, você foi e é a maior inspiração de vida que conheço. Espero um dia lhe devolver em dobro tudo o que faz por mim. Posso dizer com muito orgulho que você é a melhor mãe do mundo. Ao meu grande irmão e amigo *Juliano* por todo cuidado, ensinamento, sabedoria e brigas. Se hoje me torno um Ecólogo é porque um dia você viu a capacidade e oportunidade que eu tinha e me fez agarrá-la. Que os caminhos do Norte guiem sua vida para onde seu coração deseja. Vocês dois me mostraram que os benefícios da vida vêm após as dificuldades.

Ao meu padrasto, por cuidar da minha mãe e de mim.

Ao melhor evento histórico da minha vida, minha namorada *Lais*. Você tem sido o pilar que me mantém em pé durante os períodos de dificuldades, os quais sabemos que tem sido muitos nesses últimos 5 anos. Parabéns pelo seu trabalho e formação junto comigo, essa é apenas a primeira de muitas conquistas que vamos obter juntos. Sobre você poderia escrever um tese, mas acredito que o meu sincero *Eu Te Amo* seja o suficiente.

Ao meu amigo *Rafael*, pelos puxões de orelha e conselhos. Você sempre esteve presente nos momentos mais difíceis e sempre me alegrou. Só nós sabemos as marés altas que enfrentamos juntos nesses anos de amizade, as quais superamos da melhor maneira, com muitas noites no Sujo's e garrafas de cerveja. Em você tenho um segundo irmão e em mim você tem o mesmo "*Take a bottle drink it down. pass it around*".

A minha segunda família *Leni, Elias e Pamella*, pela dieta de frango e tilápia da qual eu não funcionaria sem.

A todos os integrantes do **Q11**. *Caiçara*, por ser o gordo mais preguiçoso que conheço, mas também por ser o companheiro mais leal. Obrigado por me aturar e por mostrar que levar a vida tão a sério não vale tanto a pena, são os momentos simples que fazem dela boa o suficiente. *Fiuk*, o pacifista do grupo, sem a sua serenidade vital e paciência não seríamos quem somos uns para os outros. *Sossego*, o brabo, o pai do grupo, sempre mostrando que a amizade pode tomar diversas formas e tons. Talvez você não saiba, mas foi a pessoa que eu mais me inspirei para seguir nos ensinamentos científicos, além de me despertar o gosto por passarinhadas e pela terra média. O curso de Ecologia me proporcionou várias coisas boas, mas a amizade de vocês foi o meu maior dos prêmios. Formamos um grande elo amadurecendo juntos nesses 4 anos. Mesmo quando os futuros caminhos nos levarem a portas diferentes vocês sempre estarão em meu coração. Nunca 'par-rem' de serem as pessoas maravilhosas que são, tanto para si mesmos quanto para os outros.

Ao meu orientador *David Lapola*, pelos conhecimentos científicos compartilhados e pelos conselhos de vida dados. Muito obrigado pela oportunidade de ter sido seu orientando e por me deixar livre guiar esse trabalho. Tivemos muitas dificuldades durante o processo, mas as comemoramos com vitórias. Você é um grande homem e o que tem feito pelo futuro será lembrado por muitos. Boa sorte nesse novo ciclo que se sucede.

Aos membros do experimento FACE, *Helena, João Darela, Bianca e Katrin*, sou um mero reflexo dos 4 anos de convivência que passamos juntos. Com vocês pude amadurecer e aprender, seus papéis foram fundamentais na minha formação como pessoa e como aluno. Desejo muito sucesso no futuro de todos e sei que grandes coisas estão guardadas para vocês.

Ao *João Biancini*, outro membro do Laboratório de Ciência do Sistema Terrestre (LabTerra), pela companhia, praticidade, disposição e pelas conversas.

Ao meu grande amigo *Diego (Sandália)*, você me deu muito apoio emocional e técnico desde quando nos conhecemos. Sua paciência excede fronteiras, pois depois do Gordo (e Laís) só você pra conseguir me aturar. Obrigado por SEMPRE deixar seus problemas de lado para dar atenção aos meus. Juntos *eu, você* e o *Biacini* esperamos o final de Hunter x Hunter.

Ao *Mauricio Humberto Vancini*. Não tenho palavras para agradecer pelas incontáveis correções e sugestões que fez sobre o meu trabalho, há uma participação grandiosa sua em muitos dos parágrafos que aqui se seguem. Você é um exemplo de que a força de vontade e bons companheiros são a melhor arma para combater qualquer dificuldade. Há um grande ecólogo e ser humano em você, não me surpreenderei quando ver os grandes feitos que irá realizar.

A um grande companheiro de turma e amigo, *Augusto*. Onde todos veem uma fraqueza para desistir, você viu um motivo para se tornar forte.

Aos companheiros da ECO 13 *Júlia, Thaiane, Anita, Papeti, Alergia, Preguiça e Lorota* pelos ótimos momentos e risadas que tivemos juntos.

A toda a turma da ECO 12, por terem me adotado durante os quatro anos.

A UNESP de Rio Claro e meus professores pela oportunidade de estudar em uma das melhores universidades. Esse trabalho, assim como parte de mim, é resultado do tempo que dedicaram a compartilhar seus conhecimentos.

Ao meu amigo *Dhemerson (mustache)*, por sempre ser meu companheiro de skate e pelas diversas ajudas com os trabalhos do curso. Continue evoluindo sempre *Mush*.

Ao UnB, *Tulio, New e Tapioka*, pelas peixeiras descarregando a energia.

Por último as minhas gatas, *Preta e Gorda*, pela companhia constante.

Obrigado a todos, sem vocês não existiriam as plantas das quais pude colher meus frutos.

RESUMO

Os sistemas de modelagem são importantes no contexto de ciências ambientais, pois conseguem ao mesmo tempo agregar e isolar diversos fatores ambientais, transformando-os em boas ferramentas para a avaliação dos impactos de mudanças climáticas futuras. Este trabalho teve como objetivo duas propostas: 1- validação e atualização de um modelo de balanço hídrico através de dados de entrada atualizados; 2- aplicação desse modelo na floresta Amazônica, em linha com o projeto Amazon-FACE, buscando melhorar o entendimento dos efeitos do aumento de CO₂ na dinâmica hídrica desse bioma. O modelo utilizado foi o submodelo de balanço hídrico do modelo CPTEC-Potential Vegetation Model 2. Os novos dados de entradas foram obtidos através da base de dados *Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project* (ISIMIP-2). A validação ocorreu através de uma comparação com os resultados gerados por outros modelos, utilizando o protocolo de validação “*The International Land Model Benchmarking Project*” (I-LAMB), e mostrou uma performance compatível para suas aplicações. As aplicações a nível regional do bioma amazônico, com CO₂ elevado, mostraram que o balanço hídrico da floresta será afetado principalmente por uma queda na evapotranspiração, devido ao menor fluxo de água nos estômatos foliares. Essa redução do retorno de água à atmosfera sucede em uma maior quantidade de água no solo, tornando-o mais propício de saturar, afetando por seguinte o escoamento superficial. Nossos resultados mostram também que essas variações tendem a se intensificar na porção Oeste da Amazônia e diminuir na porção Leste.

Palavras-chave: Mudanças Climáticas, Floresta Amazônica, Modelagem Hídrica, Aumento de CO₂.

ABSTRACT

Modeling systems are important in the context of environmental science, because they can aggregate and isolate various environmental factors, transforming them into good tools for assessing the impacts of future climate change. This study aimed to two proposals: 1- validation and update a water balance model using updated input data; 2 application of this model in the Amazon forest, in line with the Amazon-FACE project, seeking to improve understanding of the effects of increased CO₂ in the water dynamics of this biome. The model used was the water balance submodel-CPTEC Potential Vegetation Model Model 2. The new data entries were obtained through the database *Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project* (ISIMIP-2). The validation took place through a comparison with the results generated by other models, using the validation protocol "*The International Land Model Benchmarking Project*" (I-LAMB), and demonstrated a compatible performance for its applications. Applications at regional level of the Amazon biome with high CO₂ showed that the water balance of the forest will be affected primarily by a decrease in evapotranspiration due to lower water flow in leaf stomata. This reduction of the water returning the atmosphere increased a greater quantity of water in the soil, making it more conducive to saturate and affect the runoff rate. Our results also show that these variations tend to intensify in the western portion of the Amazon and decrease in the Eastern portion.

Key-words: Climate Change, Amazon Forest, Hydrological Modelling, CO₂ increase.

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1** - Etapas do ciclo hidrológico. Têm-se um sistema fechado de troca de energia e água entre a atmosfera e a superfície terrestre, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação da terra. Os processos de evaporação e transpiração da água são os responsáveis pela transferência da mesma para a atmosfera. Dependendo da pressão, temperatura e relevo, esse vapor d'água retorna à superfície da terra via precipitação, que pode ser líquida ou sólida (granizo e neve). No contato com a superfície terrestre essa água pode percolar no solo, sendo assimilada pela vegetação ou permanecendo no próprio solo; ou ainda escoar superficialmente, alimentando diretamente sistemas aquáticos como rios, lagos e oceanos. Não estão representadas influências humanas diretas no ciclo hidrológico, como o uso de água para irrigação ou abastecimento de núcleos urbanos (CARVALHO et al., 2007). **Fonte:** *Diagram from Max Planck Institute for Meteorology*.....10
- Figura 2.** (A) Média de temperatura em graus Celsius referente aos anos de 1961-1990, utilizado no PVM2; (B) Novo input de temperatura fornecido por ISIMIP-2 para os anos de 1981-2010; (C) diferença entre A e B, cores mais quentes representam os locais com maiores valores de temperatura.....22
- Figura 3.** (A) Input de precipitação anual em milímetros referente aos anos de 1961-1990, utilizado no PVM2; (B) mapa dos novos dados de precipitação anual fornecido por ISIMIP-2 para os anos de 1981-2010; (C) diferença entre os mapas, locais tendendo ao vermelho são aqueles onde as diferenças são mais acentuadas.....24
- Figura 4.** (A) Mapa referente *Parametrização da radiação fotossinteticamente ativa incidente* (I_{PAR}), utilizada como input no PVM2; (B) Radiação de ondas curtas disponibilizado pelo projeto ISIMIP-2, e em (C) diferença entre os mapas A e B com unidade em w/m^226
- Figura 5.** Em (A) mapa de evapotranspiração modelado pelo modelo PVM 2 original, (B) evapotranspiração modelada através do modelo atualizado e em (C) diferença entre modelo atualizado e original.....29
- Figura 6.** Mapas de escoamento superficial em milímetros ao ano. Em (A) escoamento modelado pelo PVM2, em (B) PVM2 com atualizações e (C) diferença entre modelo presente e o original. Cores mais claras indicam locais onde o escoamento é baixo ou que houve diminuição.....30
- Figura 7.** Mapas referentes à precipitação de neve em milímetros/ano. Cores mais quentes representa maior quantidade de neve acumulada. Mapa (A) para PVM2 sem alterações, (B) com alterações e (C) a diferença entre (B) e (A).....31
- Figura 8.** Mapas referentes ao derretimento de neve em milímetros por ano. Cores mais quentes representa maior quantidade de neve derretida. Mapa (A) para PVM2 sem alterações, (B) com alterações e (C) a diferença entre (B) e (A).....32
- Figura 9.** Mapas referentes a gelo no solo em milímetros por ano. Mapa (A) para os dados do PVM2 sem modificações, (B) com atualizações e (C) a diferença entre (B) e (A).....33

Figura 10. Mapas referentes à água no solo em milímetros por ano. Mapa (A) para os dados do PVM2 sem modificações, (B) com atualizações, e em (C) diferença entre (B) e (A).....	34
Figura 11. Gráfico referente a validação de evapotranspiração, comparativo aos outros modelos com variação mensal em $\text{kg/m}^2 \text{ d}^{-1}$	37
Figura 12. Gráfico referente aos resultados de correlação entre os modelos para os dados de evapotranspiração.....	37
Figura 13. Gráfico referente a validação da variável de escoamento superficial.....	38
Figura 14. Gráfico referente aos resultados de correlação entre os modelos para o dado de escoamento superficial.....	38
Figura 15. Gráfico referente a validação da variável de escoamento superficial.....	39
Figura 16. Gráfico referente aos resultados de correlação para água no solo.....	39
Figura 17. Gráfico da quantidade de evapotranspiração mensal durante os trinta anos modelados. Tal variação foi testada para o PVM2 original, sua versão atualizada e após o acréscimo de 200ppm de dióxido de carbono ao modelo.....	40
Figura 18. Mapas relativos ao processo de evapotranspiração para o bioma amazônico. Foram geradas quatro situações, sendo a 1 para o modelo PVM atualizado, 2 para a versão atualizada e com CO ₂ ao nível do Amazon-FACE, 3 a diferença entre 2 e 1. Cores mais quentes indicam aumento de evapotranspiração e cores mais frias diminuições.....	40
Figura 19. Gráfico da variação sazonal de água no solo em milímetros mensais durante o ano para três situações modeladas, representadas pelas linhas pretas, vermelhas e amarelas.....	42
Figura 20. Mapa representando a quantidade de água no solo em milímetros por ano para a Amazônia. Há quatro situações, sendo elas: 1 para o modelo PVM atualizado; 2 atualizado e com CO ₂ elevado a 200ppm; 3 referente as diferença entre 2 e 1. Cores mais quentes indicam maior quantidade de água no solo e cores mais menor quantidade. Na situação 3 a cor e escala foram alteradas para uma melhor representação do seu resultado, mostrando apenas as regiões com aumento da quantidade de água no solo.....	42
Figura 21. Quantidade de escoamento superficial em milímetros por mês para cada situação modelada.....	44
Figura 22. Situações referentes ao escoamento superficial, cores mais escuras representam maior quantidade de água escoada e as mais claras menor quantidade. As situações apresentadas são as mesmas descritas na figura 19 e 20.....	44

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS	14
3. MATERIAL E MÉTODOS	15
3.1. O modelo CPTEC-PVM2.....	15
3.2. O submodelo de balanço hídrico.....	16
3.3. Dados de entrada e elaboração dos mapas.....	18
3.4. Descrição dos dados de entradas do PVM2 e ISIMIP-2.....	19
3.4.1. Inputs do PVM2.....	19
3.4.2. Inputs do ISIMIP-2.....	20
3.4.3. Mapas referentes aos arquivos de inputs.....	20
3.5. Validação	27
3.6. Aplicação do experimento ao Amazon-FACE.....	27
4. RESULTADOS	28
4.1. Aplicação do modelo hidrológico com novos inputs.....	28
4.2. Resultados referentes a Validação.....	35
4.2.1 Evapotranspiração.....	35
4.2.2 Escoamento superficial.....	35
4.2.3 Água no solo.....	35
4.3. Aplicação do modelo á escala regional da Amazônia.....	39
4.3.1. Evapotranspiração.....	39
4.3.2. Água no solo	41
4.3.3. Escoamento superficial.....	43
5. DISCUSSÃO	45
5.1. Referentes aos Inputs.....	45
5.2. Valiração.....	46
5.3. Aplicação ao bioma Amazônico.....	46
6. CONCLUSÃO	49
REFERÊNCIAS	50

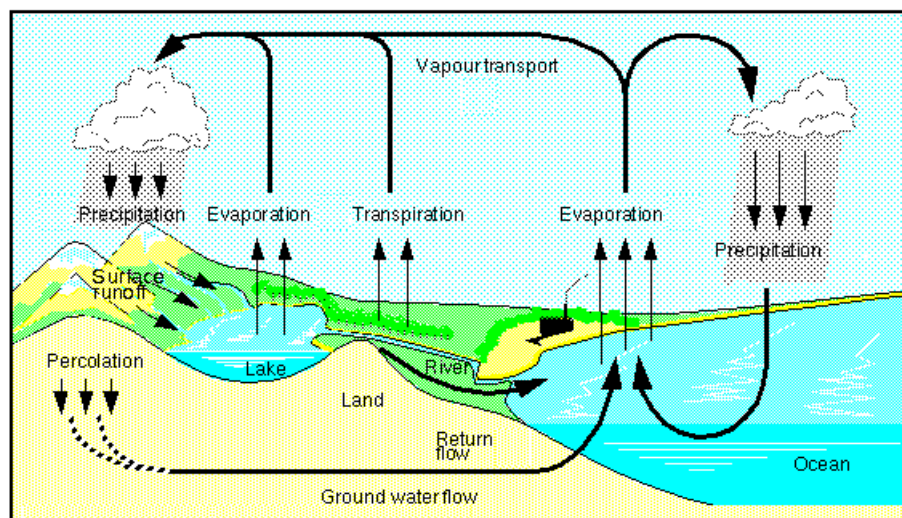
1. INTRODUÇÃO

De acordo com o Quinto Relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), o clima mudou e continua mudando em todo o planeta. Uma das principais provas dessa mudança são os registros de gelo nas calotas polares, que mostram um aumento considerável da concentração de gases do efeito estufa (GEE), como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) (IPCC, 2013). Atualmente, a concentração de CO_2 é a maior dos últimos dois milhões de anos (PORUSCHI et al., 2010).

O gás carbônico (CO_2) é essencial para a manutenção dos ecossistemas, pois provê energia e massa à maioria dos seres vivos, através da fotossíntese. Como tal, o CO_2 relaciona-se à regulação atmosférica global e, conseqüentemente, ao clima (DRIESSEN, 2013). O fluxo e estoques de CO_2 na atmosfera, oceanos e ecossistemas terrestres dependem de processos biogeoquímicos e climatológicos que vão além do ciclo de carbono em si (FALKOWSKI et al., 2000; PACHECO; HELENE, 1990).

Interações importantes ocorrem entre os ciclos biogeoquímicos do carbono e da água, como os processos envolvidos na condutância estomática (explicado abaixo) e o de absorção/armazenamento de água pela vegetação. A figura 1 apresenta um panorama geral sobre o ciclo hidrológico da Terra.

Figura 4 - Etapas do ciclo hidrológico. Têm-se um sistema fechado de troca de energia e água entre a atmosfera e a superfície terrestre, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação da terra. Os processos de evaporação e transpiração da água são os responsáveis pela transferência da mesma para a atmosfera. Dependendo da pressão, temperatura e relevo, esse vapor d'água retorna à superfície da terra via precipitação, que pode ser líquida ou sólida (granizo e neve). No contato com a superfície terrestre essa água pode percolar no solo, sendo assimilada pela vegetação ou permanecendo no próprio solo; ou ainda escoar superficialmente, alimentando diretamente sistemas aquáticos como rios, lagos e oceanos. Não estão representadas influências humanas diretas no ciclo hidrológico, como o uso de água para irrigação ou abastecimento de núcleos urbanos (CARVALHO et al., 2007).



Fonte: Diagram from Max Planck Institute for Meteorology.

O vapor de água e as nuvens são considerados variáveis importantes para o entendimento das mudanças climáticas (RÁKÓCZI; IVÁNYI, 1999). Devido à sua ampla distribuição e propriedades físico-químicas, o vapor de água atua na retenção de radiação infravermelha na atmosfera (GUTZLER, 1992), sendo responsável por uma fração do efeito estufa da Terra. As dinâmicas hídricas apresenta uma importante interação com o dióxido de carbono, pois o comportamento terrestre ou atmosférico de um afeta respectivamente o comportamento do outro - por exemplo, um aumento de CO₂ pode ocasionar no aquecimento da atmosfera, gerando mais evaporação e, conseqüentemente, maior quantidade de vapor de água na atmosfera, retroalimentando o aquecimento atmosférico (ARNELL; LIU, 2001). Sendo assim, em conjunção com outros gases, como dióxido de carbono (CO₂) e aerossóis, a água determina o balanço energético do sistema climático (GUTZLER, 1992; RÁKÓCZI; IVÁNYI, 1999).

Uma interação crucial entre os ciclos d'água e do carbono dá-se através do processo de condutância estomática, definido como o fluxo de matéria e energia que transita através dos estômatos foliares (CHAVARRIA; SANTOS, 2012). Ao mesmo tempo em que a planta absorve CO₂ pela atividade fotossintética, ela libera água durante a abertura dos estômatos, que são as estruturas foliares responsáveis por estabelecer as trocas gasosas entre a planta e a atmosfera, captando CO₂ para incorporar a sua produtividade primária bruta e liberando água ao decorrer do processo, o que leva à teoria de que o processo de transpiração relaciona-se diretamente (CHAVARRIA; SANTOS, 2012) à concentração de gás carbônico atmosférico (SELLERS et al., 1996). Desse modo, a transpiração vegetal pode afetar consideravelmente a quantidade de vapor d'água atmosférico e, conseqüentemente, os níveis de precipitação, alterando os balanços hídricos e de energia à superfície em uma escala regional (SELLERS et al., 1996; ARAGÃO, 2012; NOBRE, et al., 1991).

O aumento na quantidade de CO₂ atmosférico pode, inclusive, alterar a relação de produtividade das plantas e a própria condutância estomática [vide explanação na seção Métodos] (FIELD et al., 1995). Essas variações nos padrões atmosféricos e biológicos afetam também outro setor do ciclo hidrológico, que é o escoamento superficial horizontal, influenciando e interferindo nas trocas entre a superfície terrestre e a atmosfera (DESSAY et al., 2004; ARAGÃO, 2012).

Com relação à região Amazônica, entre 25% e 56% do total de água precipitada retorna à atmosfera, através da evapotranspiração (ARAGÃO, 2012; SALATI et al., 1979). Em se tratando da interação desses ciclos neste bioma, a floresta desempenha um papel importantíssimo no ciclo hidrológico e de carbono no globo, sendo considerada região de

risco, do ponto de vista das mudanças climáticas (NOBRE; BORMA, 2009). Segundo Salati (2001), as alterações climáticas na Amazônia podem ocorrer devido a variações climáticas globais, decorrentes de causas ou por ações antrópicas naturais - como alterações do uso e ocupação da terra dentro da própria região amazônica. Essas alterações climáticas podem afetar negativamente a floresta amazônica, com aumento da temperatura e de eventos extremos, como secas prolongadas. Se a precipitação diminuir durante a estação de inverno, comumente conhecida de estação seca, o impacto das mudanças climáticas no regime hidrológico na Amazônia será mais agravado (NIJSSEN et al., 2001). Em outra perspectiva, Lapola et al. (2009) indicaram que, inicialmente, os efeitos da diminuição da chuva e do aumento da temperatura para a floresta podem ser contrabalanceados pelo aumento do gás carbônico e otimização do uso da água pelas plantas, por maximizar o ganho de carbono por unidade de água.

Diante de tal cenário, a manutenção do ciclo hidrológico na Amazônia é considerada crítica pela comunidade científica (CLEMENT; HIGUCHI, 2006), pois, além de sua importância regional e global na regulamentação do clima, esse bioma detém a bacia com maior contribuição de água doce (LAPOLA; NORBY, 2014). Por outro lado, o aumento do CO₂ atmosférico pode influenciar diretamente na fisiologia das plantas, resultando em um aumento da produtividade e resiliência da floresta frente às mudanças climáticas, o que é conhecido como “efeito de fertilização por CO₂” (LAPOLA; NORBY, 2014).

Estudos, sobretudo laboratoriais, demonstram menor atividade dos estômatos foliares sob altas concentrações de CO₂ (FIELD et al., 1995), o que teoricamente reduziria o fluxo de umidade da superfície para a atmosfera (SELLERS et al., 1996). Essa informação relaciona-se diretamente à hipótese do “*dieback*” Amazônico, que prevê – através de modelagem ecossistêmica – perda abrupta de biomassa em algumas décadas, com a floresta sendo substituída por uma vegetação de menor porte (savana), sendo essa perda associada especialmente ao aumento da frequência de eventos de El Niño (COX et al., 2000; 2004). Outros estudos de modelagem demonstraram que o efeito de fertilização por CO₂ teria uma importância decisiva para abrandar os efeitos destas mudanças climáticas e manter a estrutura e biomassa florestal relativamente intacta (LAPOLA et al., 2009; RAMMIG et al., 2010; HUNTINGFORD et al., 2013).

Entretanto, ainda existem muitas incertezas associadas com a ocorrência e magnitude da repercussão deste suposto efeito de fertilização, ainda mais considerando-se as divergências nos resultados modelados e a dificuldade de se prever qual será o futuro da floresta frente às mudanças climáticas (FRIEDLINGSTEIN, et al., 2006), acentuando assim a necessidade de

estudar mais acerca desse tema.

Nesse escopo o projeto AmazonFACE tem buscado compreender qual será a resposta da vegetação ao aumento da pressão parcial de dióxido de carbono na atmosfera, esperado para o futuro. Faz-se uso de uma estrutura com tubos de ventilação vertical, onde liberam jatos de ar enriquecido com CO₂ na periferia das parcelas de vegetação, dependendo da ação de ventos naturais e sua difusão para dispersar o CO₂ em toda a área experimental (HENDREY et al., 1999; OKADA et al., 2001). O experimento está em sua fase inicial, sendo conduzido em uma área de floresta primária ao norte de Manaus. O experimento prevê uma forte interação, desde o início, entre observações de campo e modelagem ecossistêmica. As análises com modelos, como a proposta ora apresentada, tem o potencial de fornecer hipóteses passíveis de testes sobre como o ciclo hidrológico na floresta Amazônica responderá ao aumento futuro na [CO₂], prevendo cenários climáticos e mostrando os graus de impactos positivos e/ou negativos, os quais contribuirão para os experimentos FACE, podendo inclusive contribuir com outras pesquisas que abordam a mesma temática desses experimentos, tais como BIFoR-FACE, SwedFACE e EucFACE (NORBY et al., 2015).

2. OBJETIVOS

O objetivo principal desse trabalho é avaliar os efeitos do aumento da concentração de CO₂ atmosférico sobre o ciclo hidrológico global, com foco especial na região Amazônica.

Os objetivos específicos serão:

1. Avaliar e validar o submodelo de balanço hídrico CPTEC-PVM2 através de dados observacionais entre os períodos de 1980-2010.
2. Modelar, através do CPTEC-PVM2, e analisar a forma como o ciclo hidrológico responderia a um aumento de concentração de CO₂ na Amazônia, fornecendo hipóteses para cenários futuros sobre a dinâmica hidrológica nessa região.

3. MATERIAL E MÉTODOS

As interações vegetação-clima citadas acima podem ser expressas de forma quantitativa e simplista, através de modelos de vegetação potencial (OYAMA; NOBRE, 2004). Outra forma de analisar essas interações é com o uso de modelos vegetacionais dinâmicos (*Dynamic Global Vegetation Models - DGVMs*), que são mais complexos, incluem combinações de processos biogeoquímicos/biofisiológicos/biofísicos e calculam soluções transientes do sistema clima-vegetação (CRAMER et al., 2001). Modelos hidrológicos globais são ferramentas essenciais para examinar variações em componentes do balanço hídrico em escalas maiores do que regional (ARNELL, 1999; ALCAMO et al., 2000; VÖRÖSMARTY et al., 2000; DÖLL et al., 2003).

3.1. O modelo CPTEC-PVM2

O CPTEC-PVM2 é um modelo de distribuição de biomas e trata-se de uma atualização do CPTEC-PVM. As principais diferenças residem no acréscimo da parametrização do ciclo do carbono para calcular a resistência do dossel, em termos de produtividade primária líquida (*NPP*), condutância estomática, respiração heterotrófica dos ecossistemas e estoque de carbono no solo, utilizando climatologias mensais de precipitação, radiação, pressão, temperatura e [CO₂] (além de incluir o ciclo natural de fogo) (LAPOLA et al., 2009). O funcionamento do CPTEC-PVM2 consiste na utilização de tais climatologias como *inputs*. Esses dados de entradas são a base para os cálculos que o modelo realiza, gerando resultados (*outputs*) referentes a variáveis bióticas e abióticas, utilizadas pelo PVM2 nos cálculos referentes à distribuição dos biomas.

Em geral, o desempenho do CPTEC-PVM2 é considerado bom, quando comparado ao apresentado por outros modelos atualmente utilizados em estudos climáticos, principalmente na América do Sul, devido à consideração da sazonalidade como fator determinante para a delimitação das florestas e savanas (OYAMA; NOBRE, 2004; LAPOLA et al., 2009). A quantificação da sazonalidade é feita através de variáveis hidrológicas e das respostas fisiológicas a essa sazonalidade sob variação atmosférica, sendo esse caráter mais uma diferença em relação à primeira versão (considerava apenas variáveis hidrológicas) (LAPOLA et al., 2009).

3.2. O submodelo de balanço hídrico

O modelo de balanço hídrico pode ser descrito através da seguinte fórmula (OYAMA; NOBRE, 2004; LAPOLA et al., 2009):

$$Ds = Pr - E - R + M$$

Ela faz alusão ao “modelo de balde”, onde se assume que o solo tem uma capacidade fixa de armazenamento da água disponível para a evapotranspiração. A taxa de variação da massa de água no solo por unidade de área Ds é determinada pela taxa de precipitação Pr , a taxa de evapotranspiração E , o derretimento de neve M e a taxa de escoamento superficial R (HARTMANN, 1994). Se a umidade do solo é igual à capacidade do mesmo, presume-se que ele está saturado. Se a soma de precipitação acrescida do degelo excede a evaporação quando o solo está saturado, o cálculo prevê uma taxa de escoamento suficiente para apenas mantê-lo saturado. Com diferentes valores para essas variáveis é possível ter uma ideia de como o solo se comporta (HARTMANN, 1994). É importante ressaltar que, para regiões com quedas de neve, há algumas diferenças nas variáveis (HARTMANN, 1994), mas ocorre a manutenção do princípio lógico de raciocínio inerente do modelo.

O submodelo de balanço hídrico aqui utilizado é o mesmo acoplado à segunda versão do CPTEC-PVM2, que calcula o armazenamento de água do solo e os termos do balanço de água à superfície (LAPOLA et al., 2009) baseando-se majoritariamente no modelo de Willmott (1985), sendo as principais diferenças:

- Possibilidade de congelamento do solo;
- Evapotranspiração real calculada pelo método da equação de Penman-Monteith.

Outra diferença importante entre o balanço hídrico da primeira versão do CPTEC-PVM para a versão mais recente é que a última considera o acoplamento do ciclo de carbono e da água através de dois processos:

- Absorção de água do solo pelas plantas;
- Condutância estomática do dossel (dependente da produtividade primária), calculada pela seguinte fórmula:

$$Sc = \frac{eCO2}{K.2,64.10^{-5}.p.NPP}$$

Onde Sc é a condutância estomática e NPP refere-se à produtividade primária líquida da

vegetação. O fator h representa a umidade relativa e p a pressão atmosférica. O nível de concentração de CO_2 está incorporado à variável $[CO_2]$. As variáveis restantes são duas constantes, K e $2,64.10^{-5}$, onde a primeira é um coeficiente de observação para plantas C3 (valor de 9) e a segunda atua como fator de conversão (COLLATZA et al., 1991; LAPOLA et al., 2009; SELLERS et al., 1996).

O CPTEC-PVM2 avalia a água no solo (Figura 1) em seu estado líquido e sólido, como gelo e neve, calculando-as individualmente (OYAMA; NOBRE, 2004) através de expressões matemáticas. É importante ressaltar que, durante alguns meses do ano, há regiões onde a temperatura do solo obtém valores menores do que $-2,5^{\circ}C$, cessando assim a infiltração (OYAMA; NOBRE, 2004) e o escoamento superficial devido às propriedades físicas da água e ao acúmulo de neve. Para regiões de *permafrost*, onde a água do solo permanece congelada, o modelo estima um período de seis meses. Para evitar a inclusão de regiões permanentemente cobertas de gelo, apenas áreas localizadas dentro dos $60^{\circ}S$ e $70^{\circ}N$ não são consideradas para a análise (OYAMA; NOBRE, 2004).

A evapotranspiração real é calculada através do método Penman-Monteith (OYAMA; NOBRE, 2004), que se refere à utilização de uma equação padrão para calcular a evapotranspiração a partir de dados meteorológicos (ALLEN et al., 1998). Um fator importante a se destacar é que, em regiões temperadas onde a temperatura pode alcançar temperatura de $0^{\circ}C$, o modelo considera a evapotranspiração como não nula, permitindo cálculos de balanço hídrico do solo mais realistas nas estações de transição entre o verão e o inverno (OYAMA; NOBRE, 2004).

O escoamento superficial é avaliado segundo Oyama e Nobre (2004), e permite calcular o escoamento do solo quando este estiver próximo da saturação, evitando também que o solo atinja a ideia irrealista de supersaturação.

As formas de precipitação consideradas são chuvas e neve, diferenciadas através da temperatura. Ou seja, é considerada chuva quando os valores são maiores ou iguais a $-1^{\circ}C$, e neve, quando menores do que $-1^{\circ}C$. A precipitação mensal é distribuída uniformemente sobre todos os dias do mês (OYAMA; NOBRE, 2004).

A versão atualizada no presente trabalho permitiu aumentar a acurácia e detalhamento visual do modelo em representar processos ao qual lhe competem, alterando sua resolução. Dessa forma é possível avaliar as respostas vegetativas em função das mudanças climáticas, com maior eficiência em escala regional, tornando-se ainda possível observar padrões locais que ocorram nessa escala, os quais antes eram suprimidos pela baixa representação gráfica do modelo. O atual submodelo hídrico é também parte fundamental na estrutura do DGVM

Carbon and Ecosystem Functional-Trait Evaluation Model (CAETÊ) em elaboração pelo Laboratório de Ciência do Sistema Terrestre.

3.3. Dados de entrada e elaboração dos mapas

Foram utilizados dados mensais de precipitação, temperatura e radiação pertencentes à base WATCH+WFDEI, fornecidos pelo banco de dados ISI-MIP2 (POTSDAM INSTITUTE, 2014; 2015). Os dados de concentração de CO₂ são fornecidos pelo *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*. O acréscimo de CO₂ utilizado para a Floresta Amazônica será o mesmo do Amazon-FACE, de 600 ppmv, cerca de 200 a mais que o atual (LAPOLA; NORBY, 2014).

O modelo gerou um mapa mundial da distribuição de água em seus diversos domínios: disponibilidade no solo, vapor de água que retorna à atmosfera através da evaporação e condutância estomática, aqui tratada e calculada como evapotranspiração e escoamento superficial.

Os cálculos foram realizados através da linguagem computacional FORTRAN (software Force[®] 2.0), compilados através do programa Cygwin64 Terminal[®]. Este permite, posteriormente, a representação dos dados em forma de mapas, elaborados no programa ArcGIS[®] versão 10.3. Tais mapas foram gerados em escala global, quando destinados à validação dos processos hidrológicos, e em escala regional, quando para a avaliação dos impactos do aumento da concentração de CO₂ para a Floresta Amazônica. Com isso, pode-se fazer uma comparação entre a interação da concentração de CO₂ atual e elevada, comparando e analisando as semelhanças e diferenças nos dois ciclos dentro da floresta. Foram elaborados mapas *raster* com células de grade com resolução de 0,5° x 0,5°, o que equivale a aproximadamente 55 km x 55 km da superfície terrestre.

3.4. Descrição dos dados de entradas do PVM2 e ISIMIP-2

A presente sessão busca descrever, de forma sucinta, as informações bibliográficas disponíveis na internet sobre a composição dos dados de entrada utilizados pelo modelo CPTEC- PVM2 e os novos dados disponibilizados pelo projeto *Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project* (ISIMIP-2), expondo suas confiabilidades como modelos de representações reais e suas principais diferenças. Os dados de pressão não são abordados nesse tópico, pois o modelo utiliza apenas a média dessa variável para realizar seus cálculos.

3.4.1. *Inputs Originais do PVM2*

A base de dados utilizada no *CPTEC-PVM2* foi desenvolvida através de observações terrestres de temperatura e precipitação. Para temperatura, há 17.986 mil registros de estações terrestres independentes e 6.955 mil registros oceânicos. A compilação das médias climáticas foi feita por Wernstedt (1972), Willmott et al., (1981) e pelo *National Center for Atmospheric Research* (SPANGLER; JENNE, 1984) e, posteriormente, estes dados foram interpolados a uma latitude de $0,5^\circ$ x $0,5^\circ$ de longitude.

A cobertura espacial recobre a maior parte da superfície terrestre, com exceções da Antártida, Austrália, Nova Guiné, China e partes do Extremo Oriente, as quais necessitaram de dados adicionais obtidos de 81 estações na Antártida, 48 na Austrália e Nova Guiné e 417 na China e Extremo Oriente. Para a precipitação foram utilizados 24.635 registros terrestres e 2.223 oceânicos. Segundo Legates & Willmott (1990a; 1990b) e Willmott & Matsuura (2001) houve acréscimo de dados de 208 estações para a Austrália, Nova Guiné e Indonésia, 508 para China e outras partes do Extremo Oriente e 10 para a Antártida, os quais contribuíram com melhorias em suas representações espaciais. Para tornar os dados mais consistentes, tais autores fizeram correções utilizando a proximidade das estações, o que resultou em campos de temperatura do ar e precipitação visualmente mais realistas.

Um terceiro elemento utilizado como dado de entrada no PVM2 é a parametrização da radiação incidente fotossinteticamente ativa (IPAR), cedida ao público pelo *International Satellite Land-Surface Climatology Project II* (ISLSCP-II), com resolução de $1,0^\circ$ x $1,0^\circ$ e registros diários com intervalo de três horas. Os dados foram obtidos a partir de agências internacionais dos Estados Unidos da América, juntamente com instituições universitárias (JET PROPULSION LABORATORY, 2013; STACKHOUSE; GUPTA, 2013).

3.4.2. *Novos inputs do ISIMIP-2*

Os novos arquivos de climatologia foram obtidos pela fonte *Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project*, formado por especialistas em modelagem e responsáveis pela reunião de modelos que abrangem todos os setores terrestres. Os dados aqui utilizados são referentes à base de dados *Water and Global Change Forcing Data ERA-Interim* (WATCH+WFDEI), disponibilizadas pela equipe ISIMIP-2, e compreende uma nova base com registros de precipitação, temperatura e radiação. Tal base faz uso de modelos de superfície terrestre (*LSMs - Land Surface Models*) e modelos hidrológicos gerais (*GHMs - General Hydrological Models*) para calcular as mudanças nas variáveis hidrológicas

importantes e permitir uma melhor compreensão do ciclo hidrológico global. Os dados são armazenados para 94.742 mil pontos terrestres (incluindo a Antártida), com intervalos de tempo de três horas e uma resolução de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$, sendo válido para o período de 1979 a 2010 (WEEDON et al, 2010; 2011; 2014).

3.4.3. Mapas referentes aos arquivos de inputs

Nas figuras 2, 3 e 4 estão representadas as variáveis de precipitação, temperatura e radiação referentes aos inputs utilizados no PVM2 e disponibilizados pelo ISIMIP-2. Merecem destaque para a interpretação dos dados as seguintes informações: **i)** a escala temporal e **ii)** espacial utilizada por cada modelo; **iii)** a temperatura e radiação são médias anuais e a precipitação é uma somatória anual e **iv)** todas as figuras apresentam os inputs antigos, identificados como letras **A**. Inputs novos são representados pela letra **B**, assim como a subtração entre ambos (novos menos antigos), pela letra **C**. A escala numérica dos inputs novos foi adequada a escala dos inputs antigos.

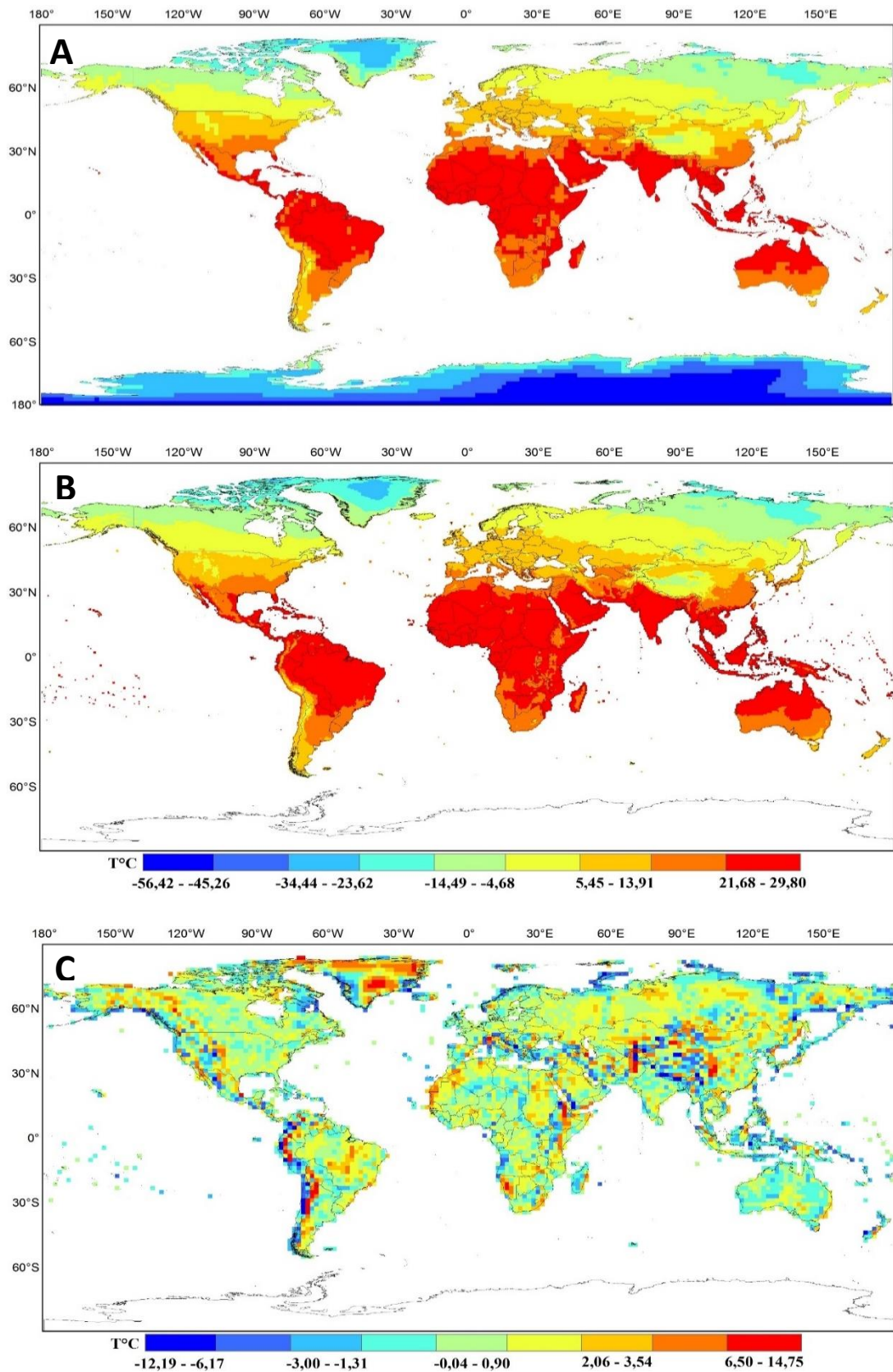
O intervalo de tempo usado no PVM2 é de 1961-1990, enquanto os novos dados analisarão o período de 1981-2010. Em relação à escala espacial, o ISIMIP-2 possui uma resolução espacial de $0,5^\circ$, com detalhamento maior se comparada ao PVM2 de $1,8^\circ$ (WEEDON et al, 2010; 2011; 2014; LEGATES; WILLMOTT, 1990a; 1990b; WILLMOTT; MATSUURA, 2001). Por esses dois motivos, durante a formulação dos mapas, foram feitos ajustes de escala, onde todos originados do ISIMIP-2 foram ajustados à escala do PVM2. Para verificar as diferenças, foi feita a subtração entre os mapas de mesma variável (ISIMIP2 - PVM2).

Para temperatura, as medições oceânicas de temperatura do ar na superfície foram combinadas com os registros das estações terrestres e interpoladas para a resolução de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ de latitude/longitude, sendo feito um ajuste de altitude para o nível do mar, com o uso de DEM-assisted (*digital elevation model*) (LEGATES; WILLMOTT, 1990a). Assim, como mostrado na figura 2 (**A**) e descrito por Legates e Willmott (1990a), a temperatura média anual do ar na superfície é geralmente mais elevada em baixas latitudes, diminuindo em direção aos polos. A altitude é um fator que também afeta os valores de temperatura do ar na superfície, evidenciando anomalias, por exemplo, ao longo dos Andes, Himalaia e Alpes. Os menores valores de temperatura geralmente aparecem em latitudes elevadas e os maiores ao longo da região equatorial, onde o desvio-padrão de temperatura está próximo de $0,5^\circ\text{C}$. As taxas de variação de temperatura podem exceder $12,0^\circ\text{C}$ quando próximas às regiões polares da América do Norte, Ásia e Antártida, pois apresentam maior extensão de terra. Valores de

temperatura são relatados também em ilhas, devido à resolução dos dados e altitude, como visto em Madagascar e Nova Zelândia (LEGATES; WILLMOTT, 1990a).

As diferenças mostradas no mapa (C), figura 2, demonstram uma variação global nas médias de temperatura, com tendência do seu aumento a nível global. Locais gélidos como Groelândia, Himalaia, sul da Argentina e China apresentam os maiores registros de temperaturas com variação positiva. No Brasil, visualizou-se o aumento entre 0,9 e 3,54°C em localidades do centro-oeste, nordeste e ao longo da costa oriental. A carência de registros meteorológicos em áreas de difícil acesso (como as de altas altitudes e baixas temperaturas) podem influenciar os resultados demonstrados, justificando-se assim certas anomalias visualizadas, como valores em torno de -12°C observados na divisa do Equador com a Colômbia.

Figura 2. (A) Média de temperatura em graus Celsius referente aos anos de 1961-1990, utilizado no PVM2; (B) Novo input de temperatura fornecido por ISIMIP-2 para os anos de 1981-2010; (C) diferença entre A e B, cores mais quentes representam os locais com maiores valores de temperatura.



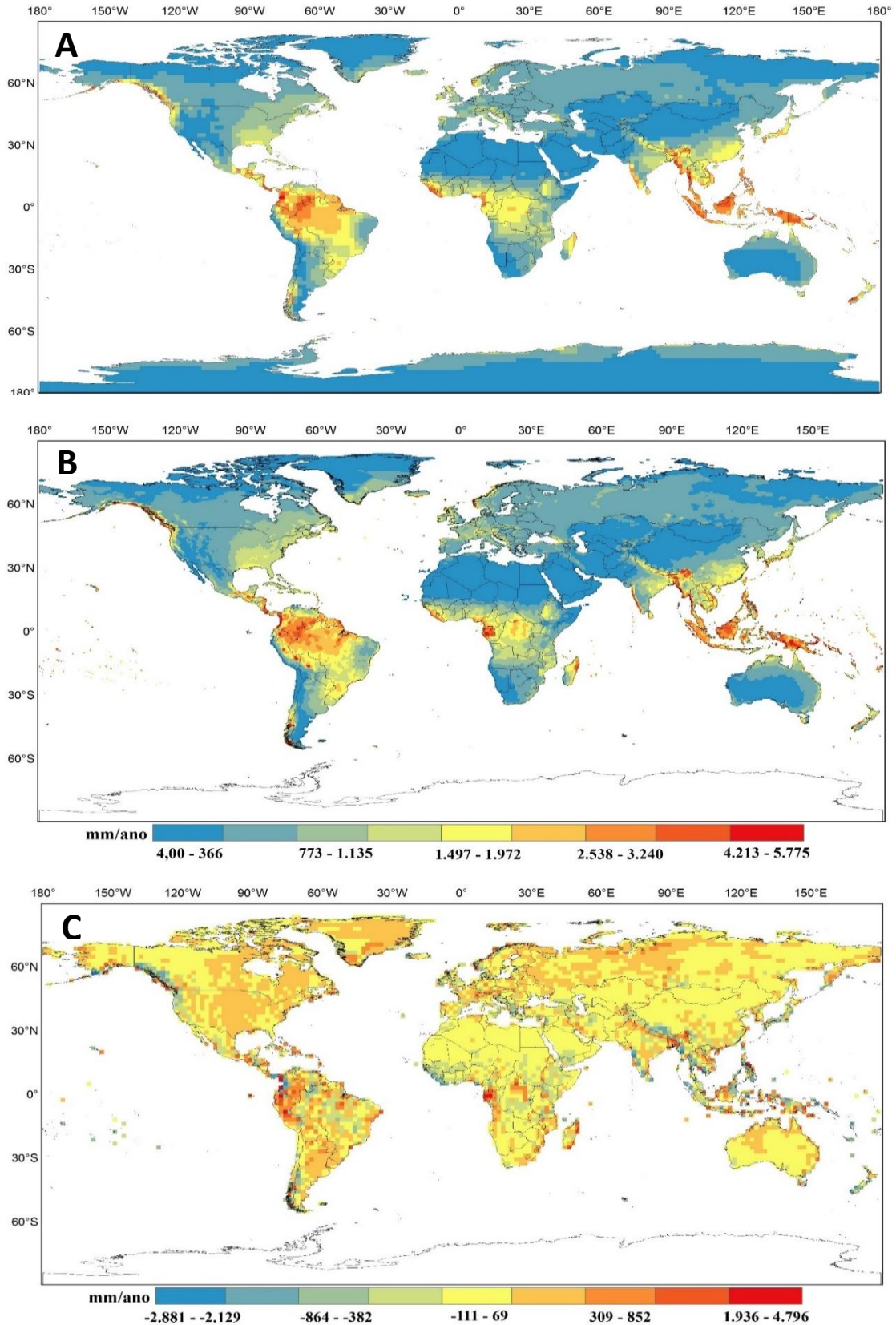
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A figura 3 (mapa A) representa a precipitação usada no PVM2. Conforme citado por Legates e Willmott (1990b), as maiores concentrações de precipitação ocorrem na Zona de Convergência Intertropical, devido ao intenso aquecimento das águas e à convergência de ventos tropicais. Uma elevada precipitação também ocorre sobre as florestas tropicais da América do Sul, África, Ásia e ao longo dos lados ocidentais dos continentes, nas latitudes médias da porção norte. Regiões desérticas do Saara, Gobi, Kalahari, Atacama e deserto Australiano recebem as menores taxas de precipitação diária. Valores reduzidos também aparecem em regiões polares (desertos frios), em grande parte pela diminuição da capacidade de reter umidade quando em contato com ar frio. Regiões montanhosas apresentam taxas que variam ao longo de pequenas escalas espaciais, enquanto que em regiões ao nível do mar os valores são relativamente homogêneos (por exemplo, sobre o interior australiano, o planalto tibetano e a porção central da América do Norte) (LEGATES; WILLMOTT, 1990b).

O conjunto de dados do ISIMIP-2 é especialmente recomendado para modelar os impactos hidrológicos em grandes zonas de captação, uma vez que a correção de polarização preserva a continuidade espacial em larga-escala. Além disso, as taxas de neve são fornecidas separadamente (WEEDON et al., 2010).

O resultado da diferença entre os mapas é mostrado na figura 3 (C). De modo geral, houve pouca diferença na concentração de precipitação anual a nível global, sendo o continente Sul Americano, Sul da Groelândia, Leste do continente Africano e região central dos Estados Unidos os que presenciaram mudanças mais consideráveis, com aumento da precipitação em torno de 69-309 mm/ano. Diminuição das taxas de precipitação são observadas em alguns locais, com valores negativos, principalmente na região equatorial.

Figura 3. (A) Input de precipitação anual em milímetros referente aos anos de 1961-1990, utilizado no PVM2; (B) mapa dos novos dados de precipitação anual fornecido por ISIMIP-2 para os anos de 1981-2010; (C) diferença entre os mapas, locais tendendo ao vermelho são aqueles onde as diferenças são mais acentuadas.

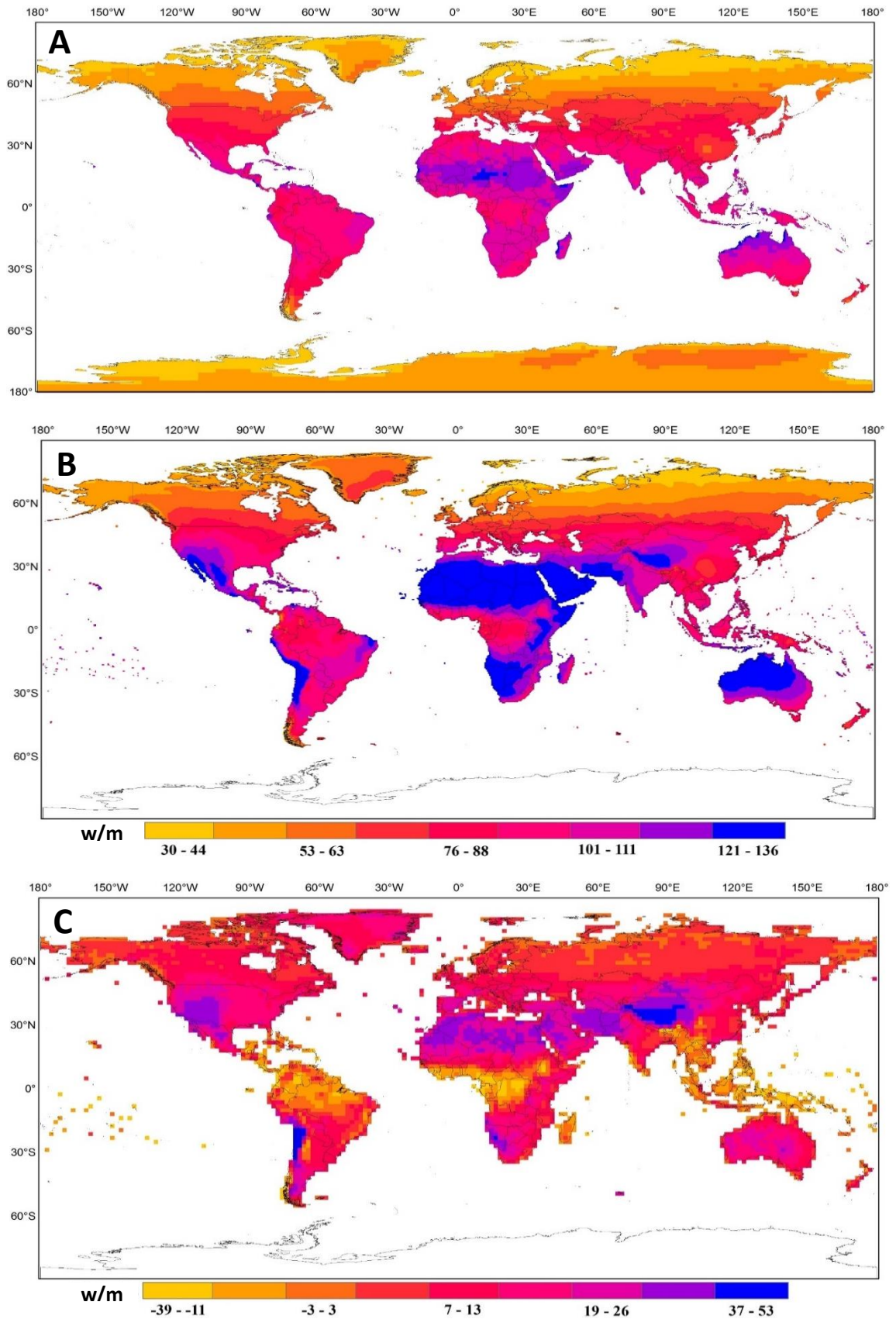


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Os inputs de radiação de ondas curtas foram multiplicados pela metade, para assim representá-lo como IPAR, a qual é utilizada como input no PVM2. Weedon et al. (2011) cita o fluxo de radiação de ondas curtas do ISIMIP-2 como ajustados para os efeitos das mudanças referentes às cargas de aerossóis atmosféricos, sendo maiores na região Africana e ao centro Europeu. Como visto na figura 4, ambos os arquivos representam a porção norte do planeta de forma semelhante, com valores aumentando em direção ao hemisfério sul.

A figura 4 (C) mostra a subtração entre tais dados. Observa-se que os valores de radiação inerente aos dados disponibilizados pelo ISIMIP-2 apresentam, de maneira geral, aumentos na região equatorial, onde ocorrem florestas tropicais, e diminuições em desertos e regiões gélidas, como Saara, Atacama, Groelândia, Cordilheira dos Andes e Himalaia. Para o restante do globo ocorrem poucas mudanças expressivas.

Figura 4. (A) Mapa referente *Parametrização da radiação fotossinteticamente ativa incidente* (I_{PAR}), utilizada como input no PVM2; (B) Radiação de ondas curtas disponibilizado pelo projeto ISIMIP-2, e em (C) diferença entre os mapas A e B com unidade em w/m^2 .



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

3.5. Validação

O CPTEC-PVM2 funciona em uma base comparativa, ou seja, as saídas do modelo compõem um mapa em potencial que deve ser comparado com um mapa de referência (LAPOLA et al., 2009). A validação do modelo ocorreu seguindo as normas e diretrizes impostas pelo “*The International Land Model Benchmarking Project*” (I-LAMB), que se trata de um projeto de intercomparação e integração de dados de modelagem terrestre, com intuito de melhorar o desempenho deste e reduzir incertezas. Assim foi possível saber se sua capacidade de representação está dentro dos parâmetros internacionalmente aceitos para a execução dos modelos terrestres (disponível em <http://ilamb.org/>). A validação ocorreu através da comparação dos resultados gerados por esse trabalho, com os resultados gerados por outros sistemas de modelagem dos sistemas terrestre.

Comparamos os resultados oriundos do PVM2 atualizado, com os resultados de outros três modelos: *Beijing Climate Center Climate System Model* (BCC-SM1-1) – um modelo climático global interativo entre vegetação, oceano, atmosfera e o ciclo global do carbono (LI et al., 2014); GISS-E2-H-CC; e o modelo MRI-CGCM3 desenvolvido pelo “*The Meteorological Research Institute*” (YUKIMOTO et al., 2012). Das variáveis gerados pelo modelo de balanço hídrico, foram utilizadas evapotranspiração, água no solo e escoamento superficial, por serem as únicas disponíveis no “*Benchmarking*” do ILAMB relativas ao sistema hidrológico.

3.6. Aplicação do experimento ao Amazon-FACE

A concentração de CO₂ utilizada no modelo do PVM2 atualizado é relativa à média anual desse gás no ano de 2010 (= 363.00 ppmv). O PVM2 original considera uma concentração de 350 ppmv.

Após a validação do modelo, foi alterado o valor da concentração de CO₂ para a mesma concentração utilizada nos experimentos Amazon-FACE (200 ppmv a mais que a do período avaliado), visando a uma análise preliminar simples acerca do efeito deste aumento no ciclo hidrológico da vegetação Amazônica (vide sessão 4.3). Os resultados oriundos desta extrapolação servirão como um primeiro rol de hipóteses a serem verificadas observacionalmente no experimento de campo.

4. RESULTADOS

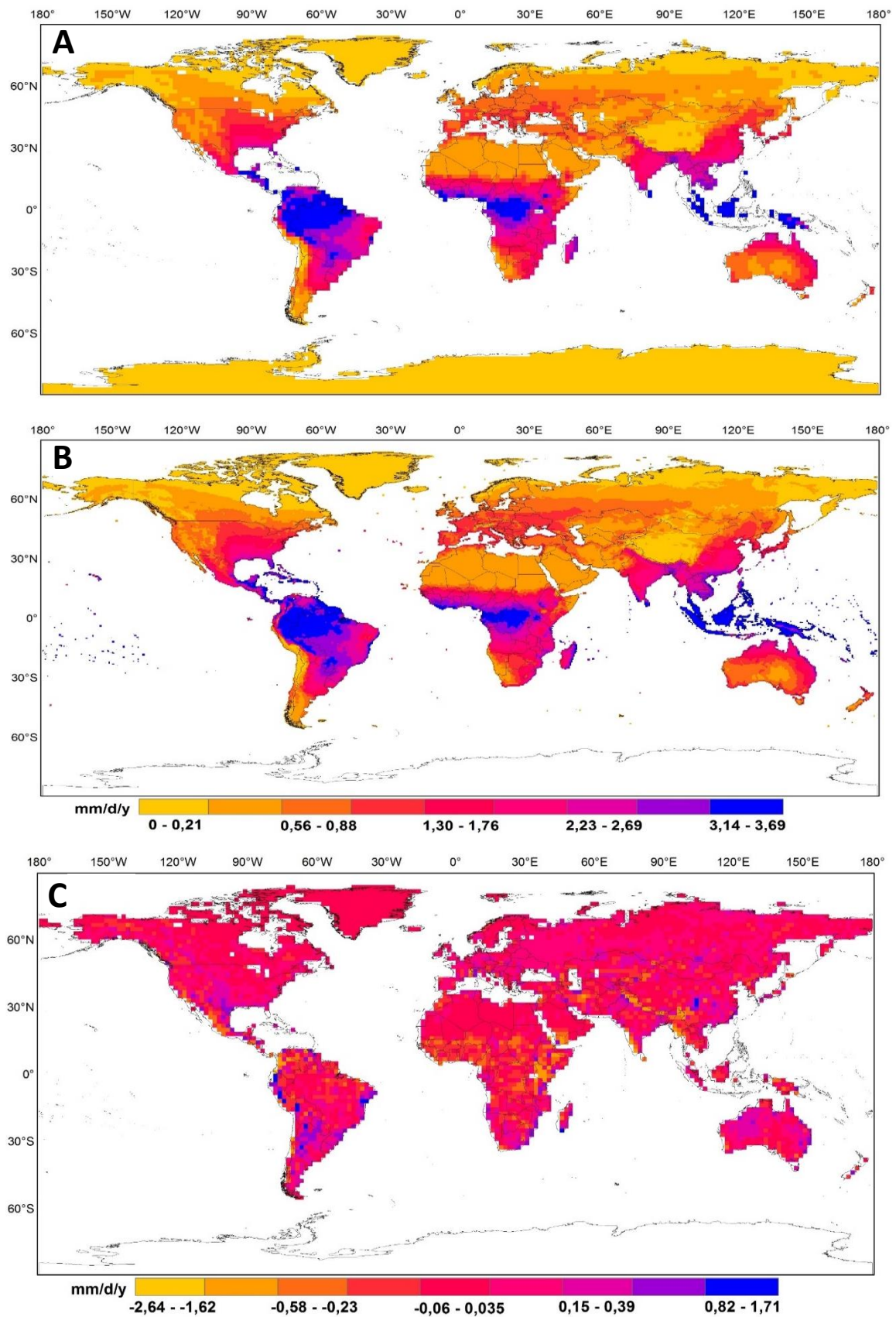
4.1. Aplicação do modelo hidrológico com novos inputs

Os *outputs* gerados são relacionados aos usos diretos da água no modelo, sendo eles evapotranspiração, escoamento superficial, precipitação de neve, derretimento de neve, solos congelados e água no solo - apresentados aqui nessa mesma sequência.

As figuras a seguir representam a média anual, em milímetros, dos *outputs* gerados através do PVM2. Foi feita uma adequação da escala entre os mapas resultantes, os quais gerados pelo PVM2 atualizado foram adequados aos gerados pelo original, sendo apresentado apenas uma única escala numérica representando ambos os arquivos.

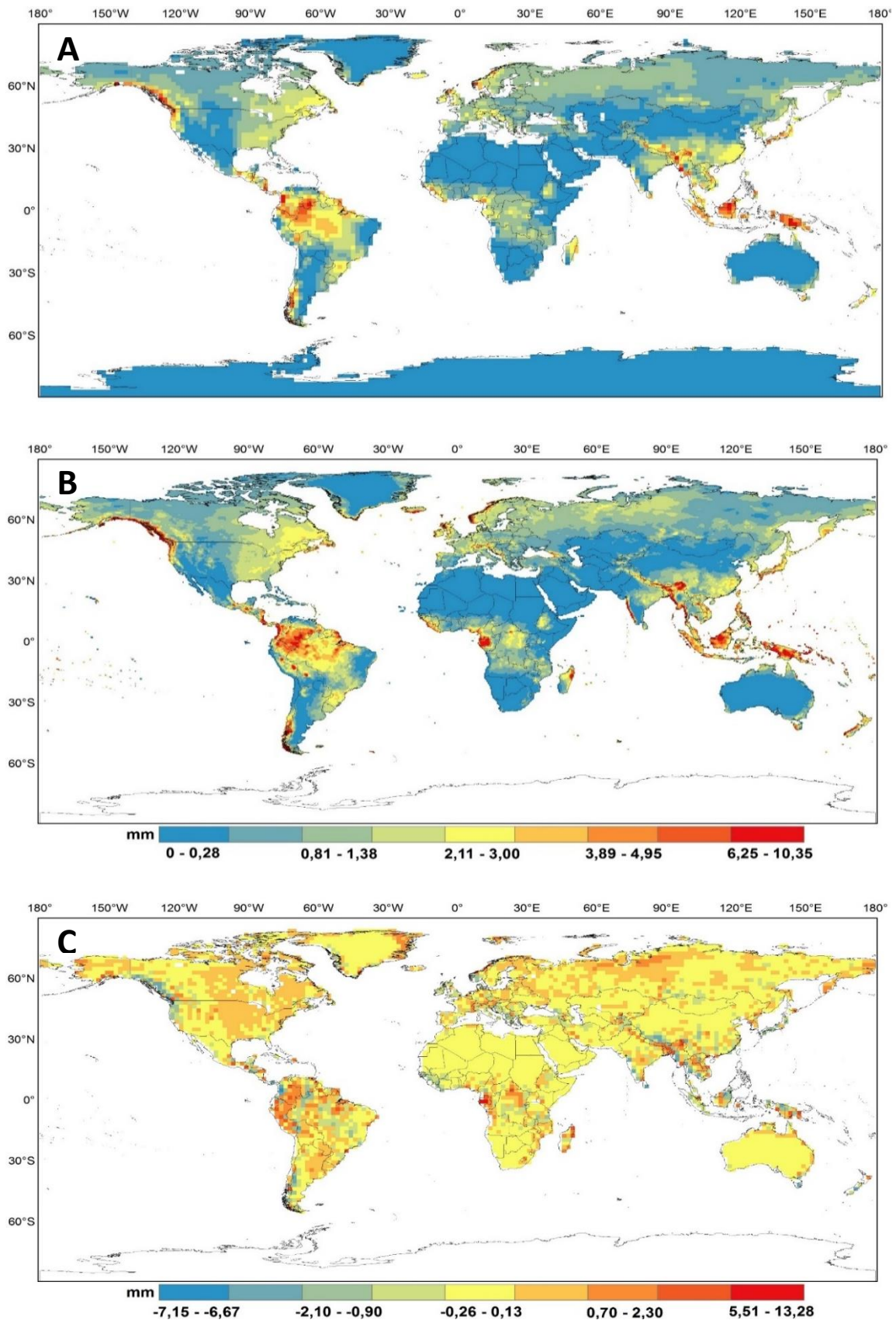
As figuras de número 5 a 10 mostram mapas de *outputs* gerados com inputs antigos (resolução de 1,875°) - mapas de letra **A** - e mapas modelados com uso dos novos inputs (1981-2010), na resolução de 0,5° - mapas de letra **B**. Os *outputs* elaborados pela versão atualizada do modelo foram subtraídos pelos arquivos produzidos na versão original do PVM2 (**B** menos **A**), gerando um arquivo onde mostra-se a diferença entre ambos, representados por todos os seguintes mapas de letra **C**, contidos nas figuras 5, 6, 7, 8, 9 e 10.

Figura 5. Em (A) mapa de evapotranspiração modelado pelo modelo PVM 2 original, (B) evapotranspiração modelada através do modelo atualizado e em (C) diferença entre modelo atualizado e original.



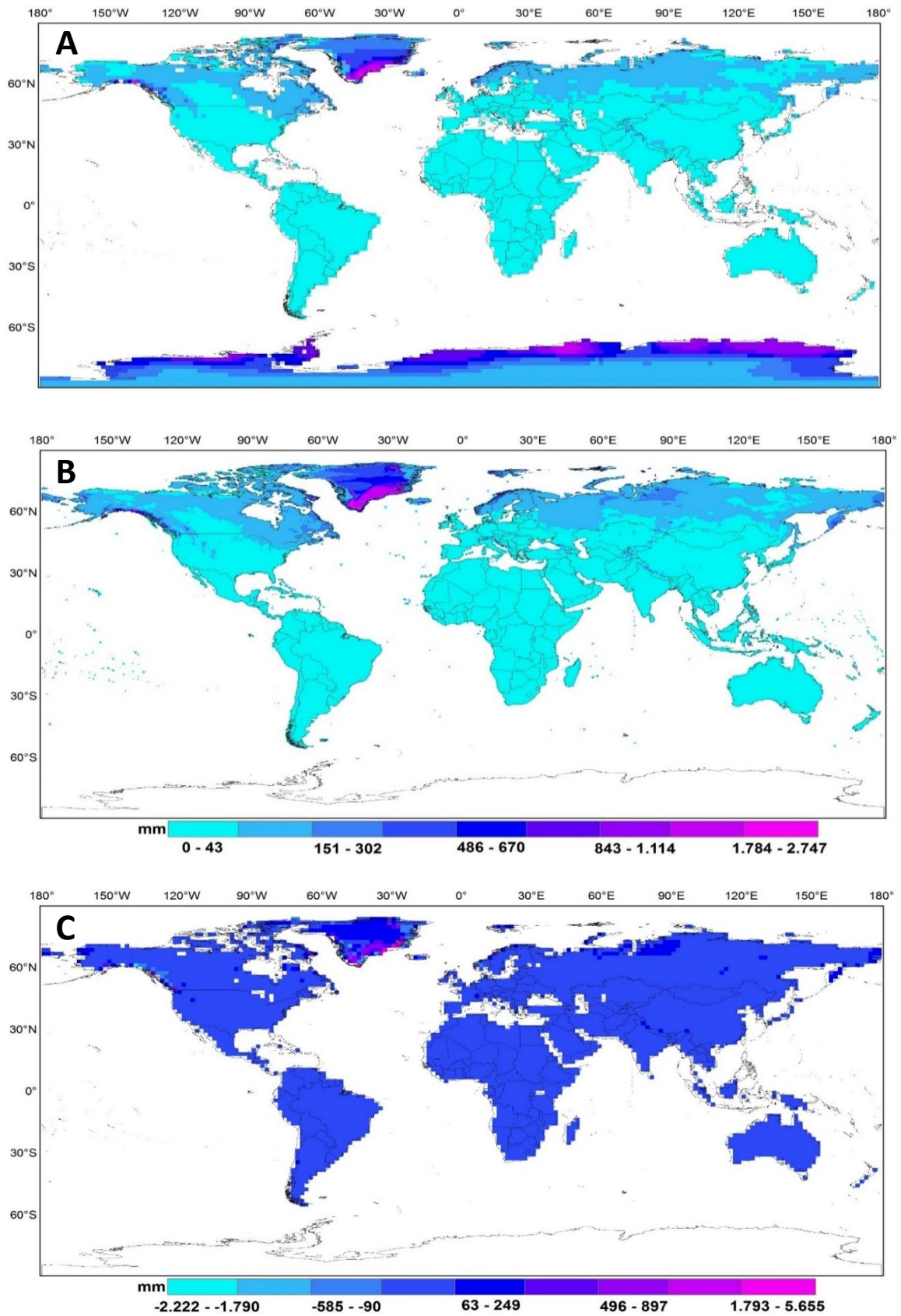
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 6. Mapas de escoamento superficial em milímetros ao ano. Em (A) escoamento modelado pelo PVM2, em (B) PVM2 com atualizações e (C) diferença entre modelo presente e o original. Cores mais claras indicam locais onde o escoamento é baixo ou que houve diminuição.



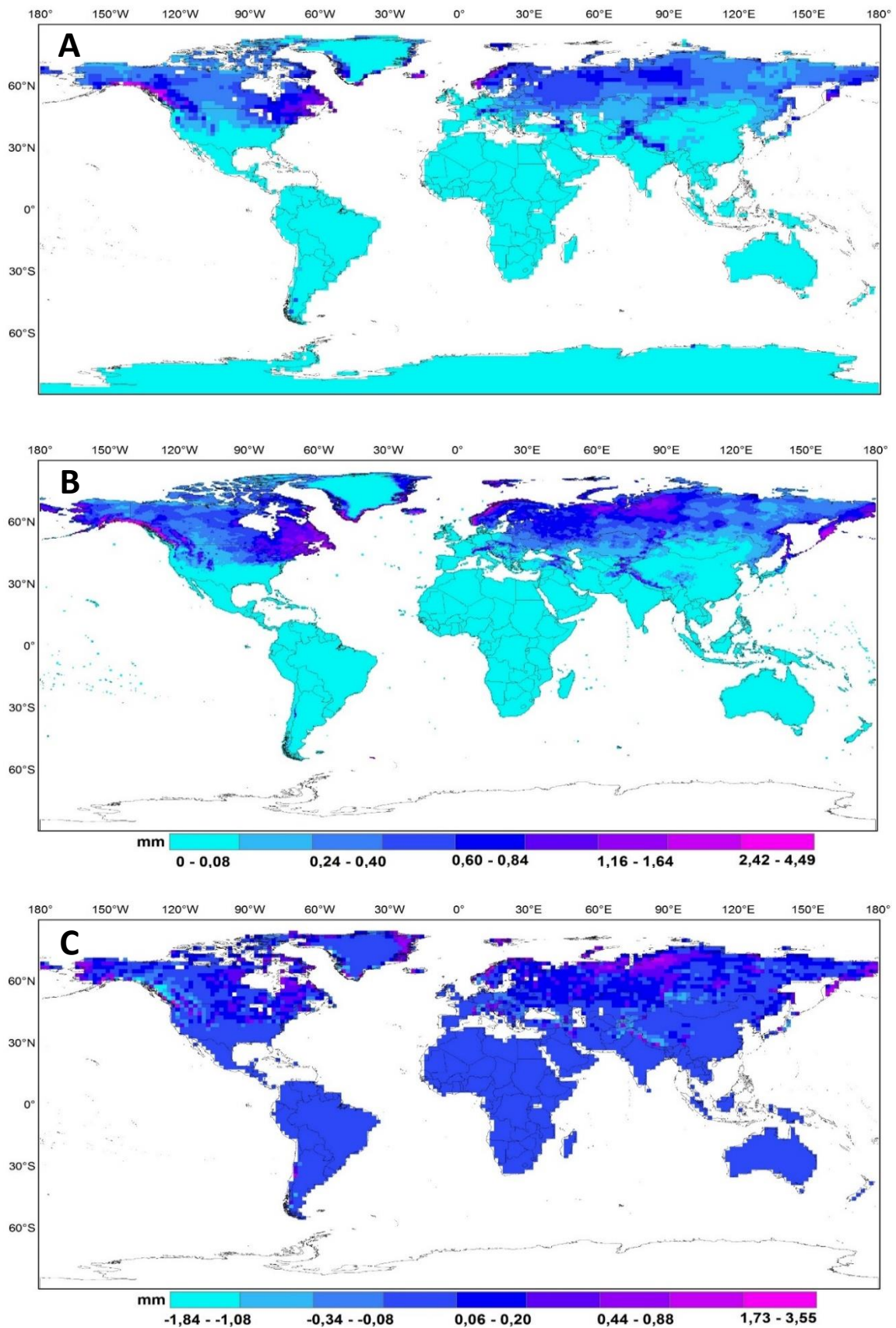
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 7. Mapas referentes à precipitação de neve em milímetros/ano. Cores mais quentes representa maior quantidade de neve acumulada. Mapa (A) para PVM2 sem alterações, (B) com alterações e (C) a diferença entre (B) e (A).



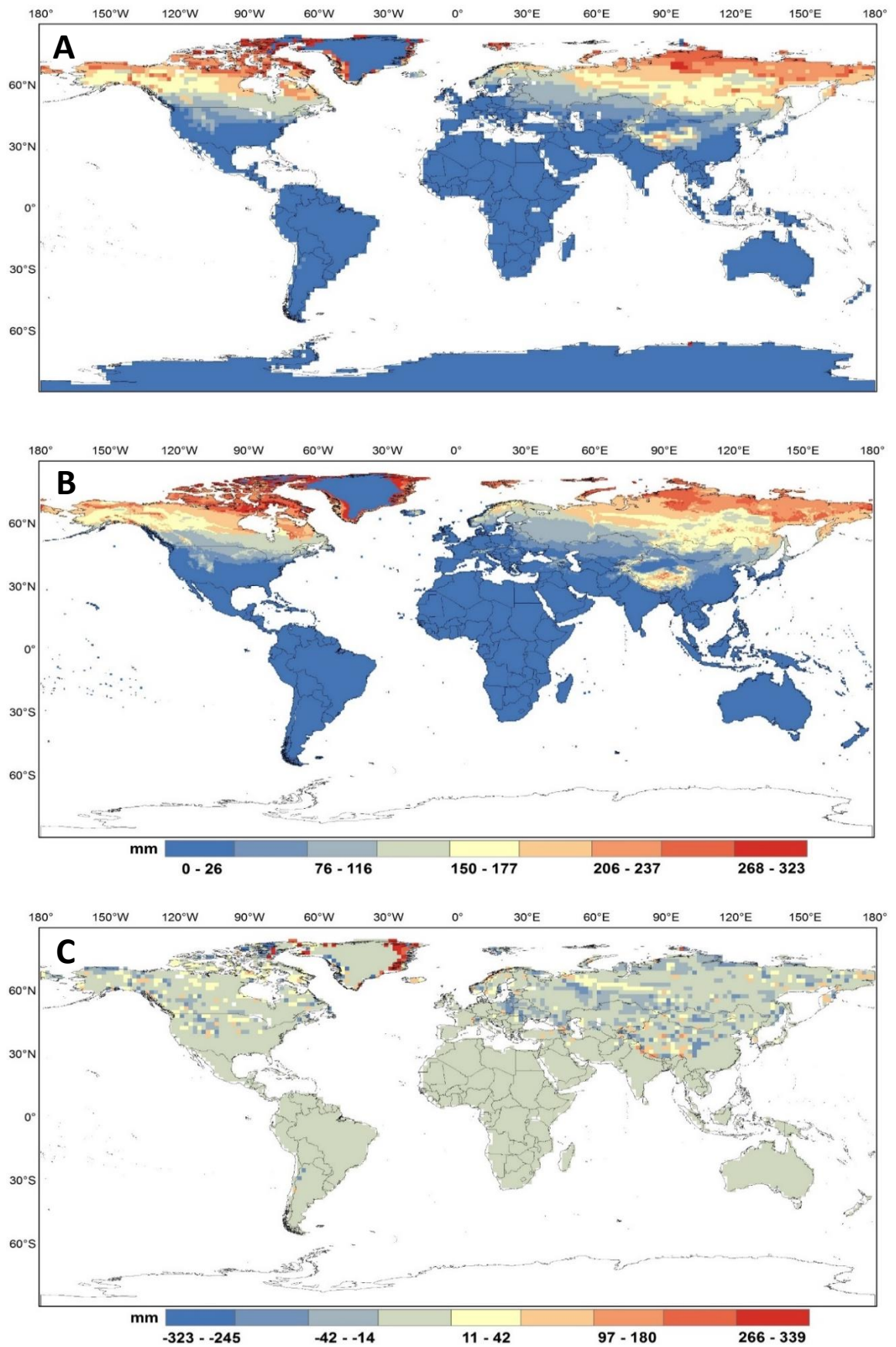
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 8. Mapas referentes ao derretimento de neve em milímetros por ano. Cores mais quentes representa maior quantidade de neve derretida. Mapa (A) para PVM2 sem alterações, (B) com alterações e (C) a diferença entre (B) e (A).



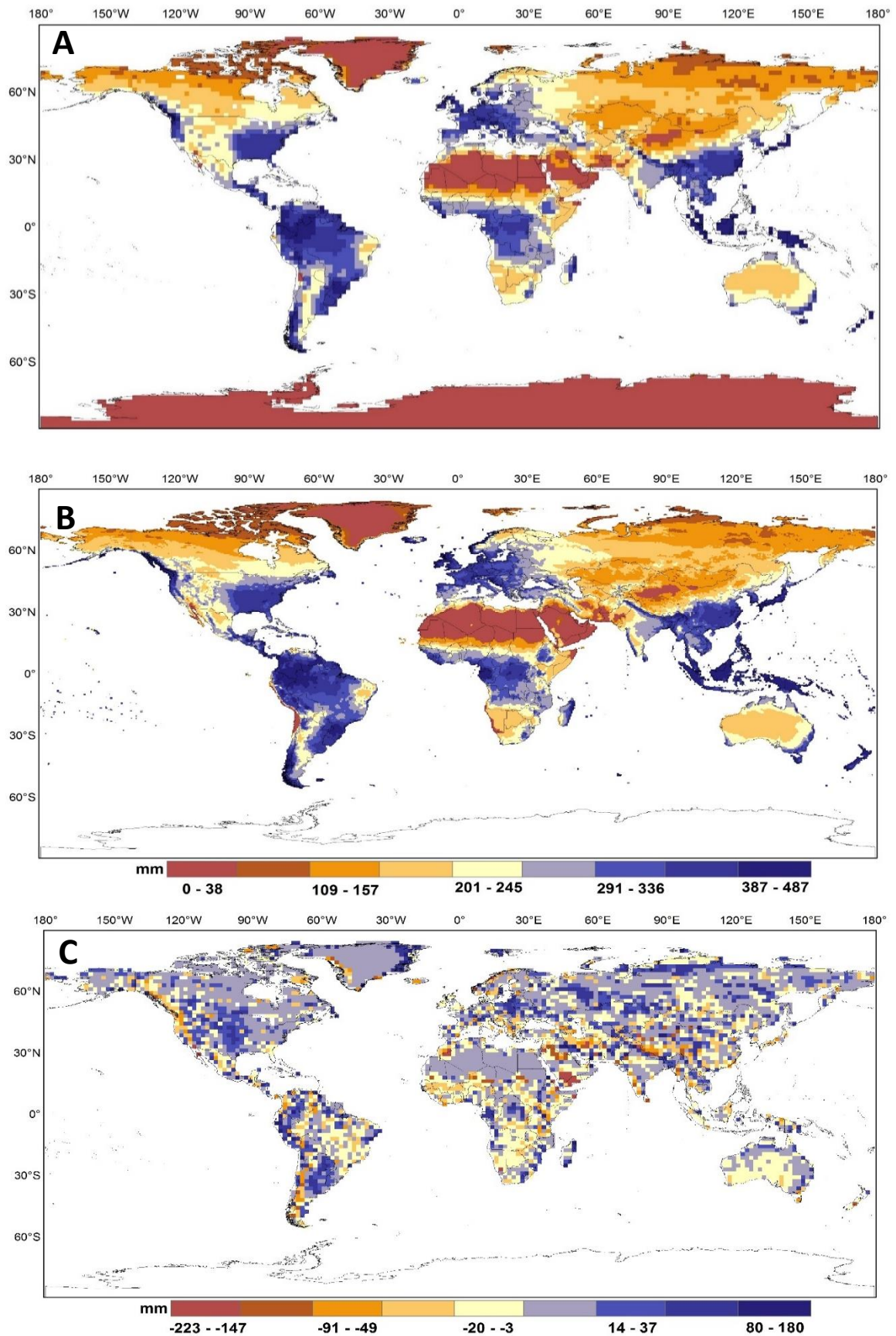
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 9. Mapas referentes a gelo no solo em milímetros por ano. Mapa (A) para os dados do PVM2 sem modificações, (B) com atualizações e (C) a diferença entre (B) e (A).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 10. Mapas referentes à água no solo em milímetros por ano. Mapa (A) para os dados do PVM2 sem modificações, (B) com atualizações, e em (C) diferença entre (B) e (A).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.2. Resultados referentes à Validação

Como resultados da validação obtivemos um gráfico das variações sazonais por mês de cada modelo e um gráfico de correlação desses modelos para cada variável utilizada. Os dados referentes ao PVM2 atualizado são representados pelas linhas verdes.

4.2.1. Evapotranspiração

Nas figuras 11 pode-se ver os resultados da comparação do dado de evapotranspiração modelado pela versão atualizada do PVM2 com os modelos citados anteriormente. Observamos que nosso modelo se assemelha muito ao MRI-CGCM3 (linha roxa) em quantidade de água evapotranspirada por $\text{kg/m}^2 \text{ d}^{-1}$, e diferencia em cerca de 40% dos outros modelos. Ambos os modelos seguem o mesmo padrão sazonal, com aumento na taxa de evapotranspiração no período dos meses de Abril a Outubro. Dentre os modelos o PVM2 foi o mais semelhante da média obtida pelo “*Benchmark*” (linha cinza). No resultado de correlação (figura 12) também observamos a proximidade do PVM2 com MRI-CGCM3, ambos apresentam uma correlação baixa com os outros modelos.

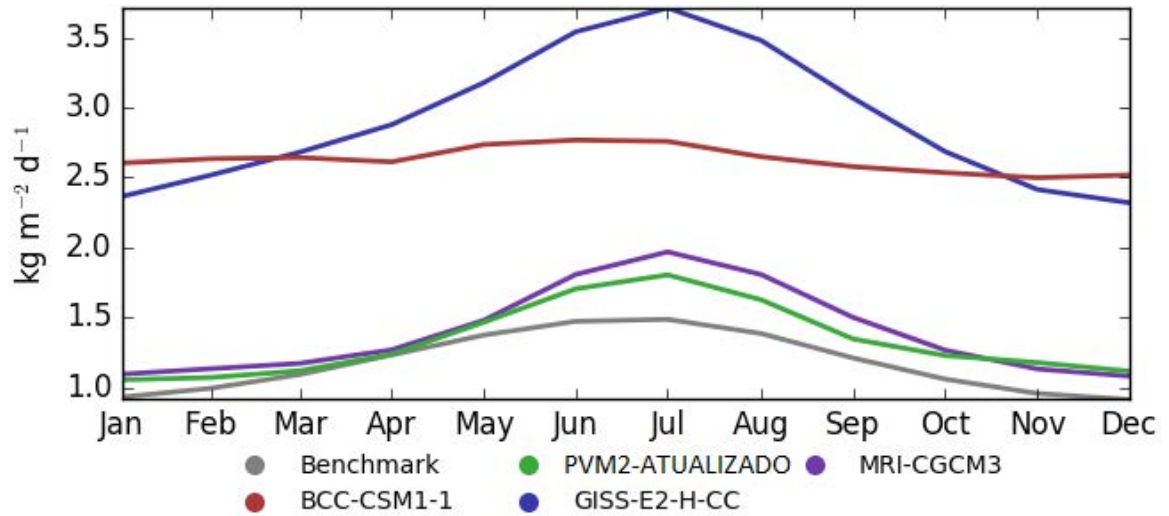
4.2.2. Escoamento superficial

Para o escoamento superficial (figura 13) também observamos uma semelhança do nosso modelo com aqueles utilizados na validação. Observamos também que há uma diferença na quantidade de água escada por $\text{kg/m}^2 \text{ d}^{-1}$, a qual é maior no PVM2. Para todos os modelos as taxas são maiores entre os meses de Março a Julho, e ambos apresentam o mesmo padrão sazonal. O PVM2 também apresentou uma correlação alta com MRI-CGCM3 e GISS-E2-H-CC, como visto na figura 14, enquanto o BCC-CSM1-1 foi o que apresentou menor correlação.

4.2.3. Água no solo

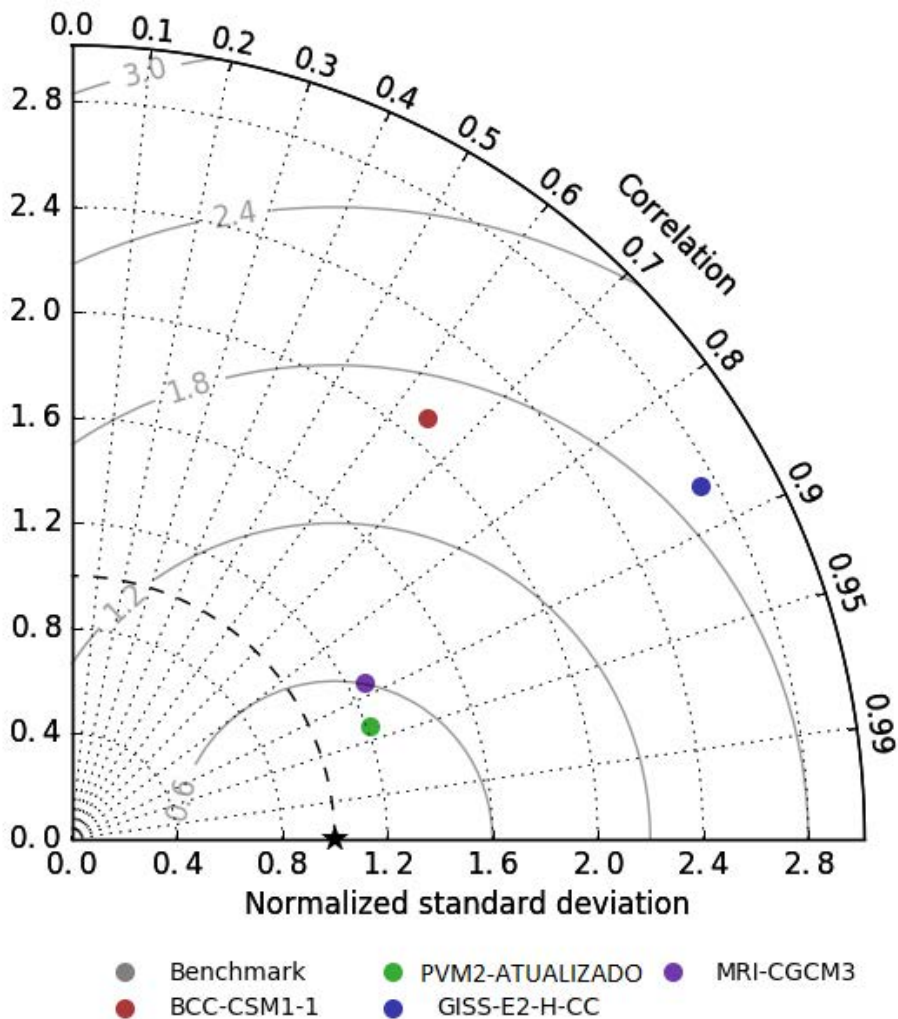
Para água no solo não houve semelhanças entre o atual PVM2 e os outros modelos, sendo que nele o valor da quantidade de água no solo chega a ser 50% menor durante todo o ano em comparação com outros resultados modelados. Também não se observa padrões de distribuição, com aumentos e diminuições, dessa variável durante o ano. Apesar de não se assemelhar aos outros modelos, o PVM2 se manteve na faixa média do “*Benchmark*” da validação de água no solo (figura 15). Essa também foi a variável que apresentou menor correlação quando comparada aos de outros modelos (figura 16).

Figura 11. Gráfico referente a validação de evapotranspiração, comparativo aos outros modelos com variação mensal em $\text{kg/m}^2 \text{d}^{-1}$.



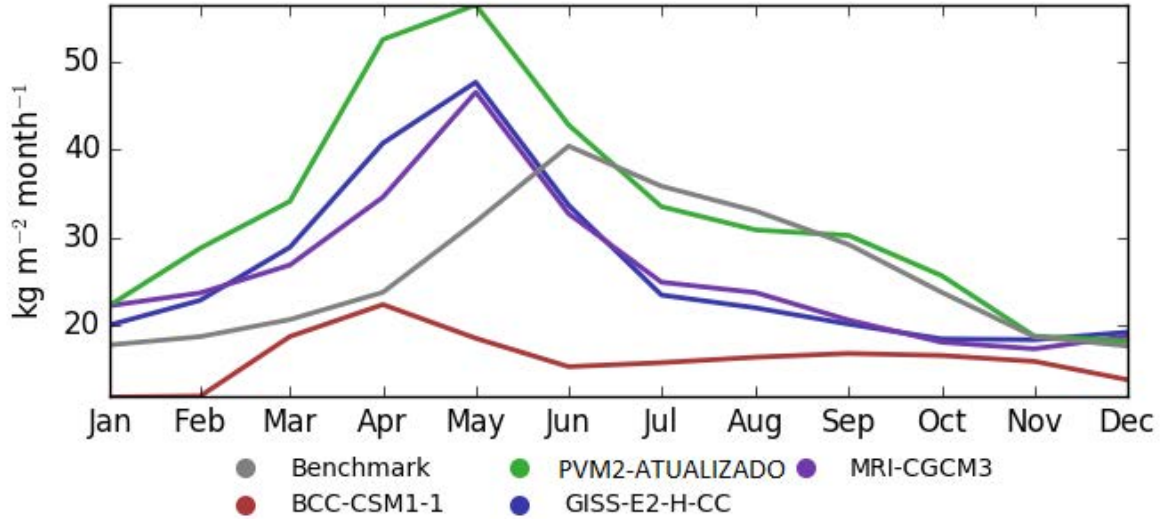
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 12. Gráfico referente aos resultados de correlação entre os modelos para os dados de evapotranspiração.



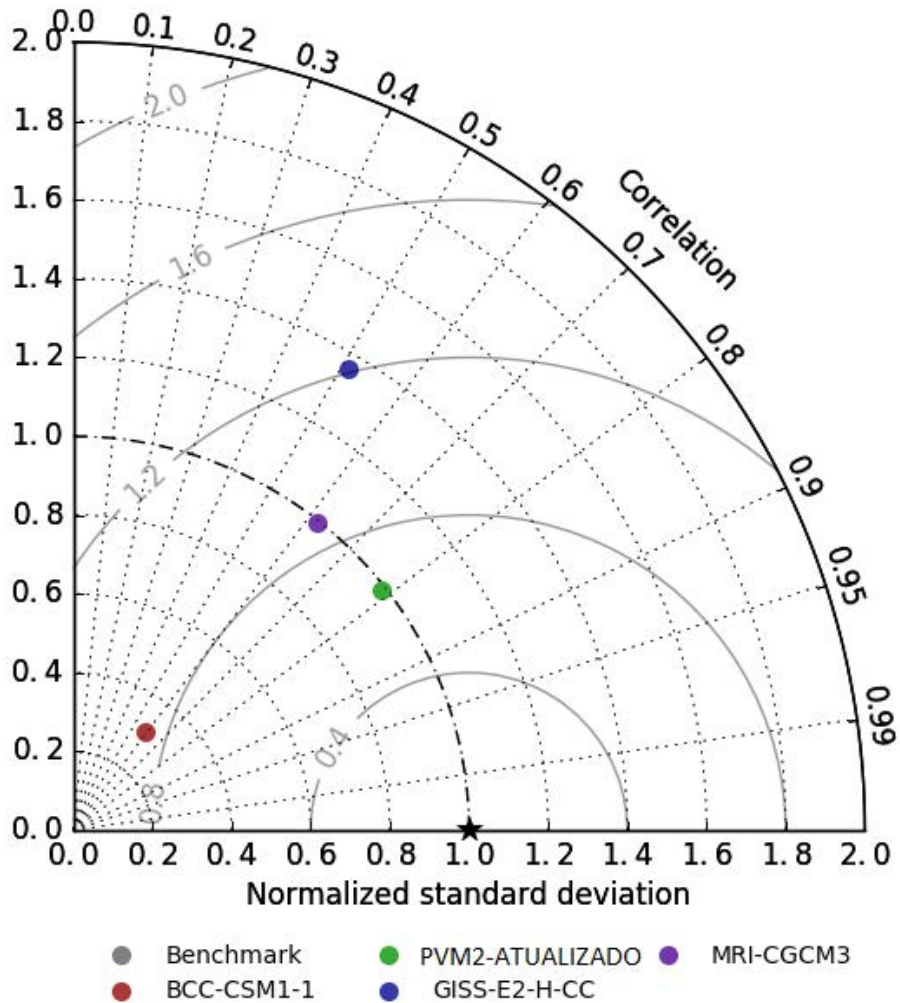
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 13. Gráfico referente a validação da variável de escoamento superficial, comparativo aos outros modelos com variação mensal em $\text{kg/m}^2 \text{d}^{-1}$.



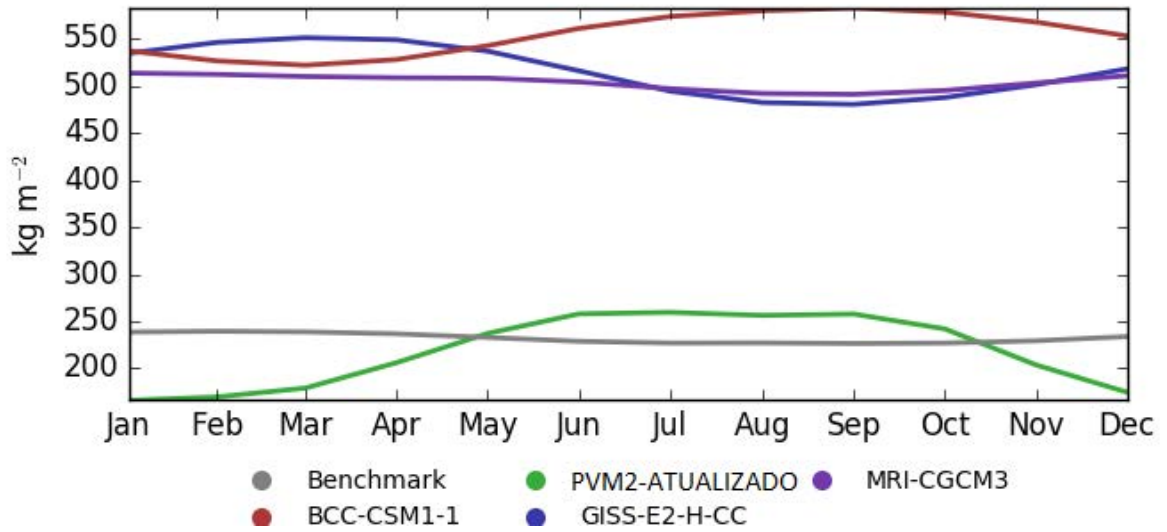
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 14. Gráfico referente aos resultados de correlação entre os modelos para o dado de escoamento superficial.



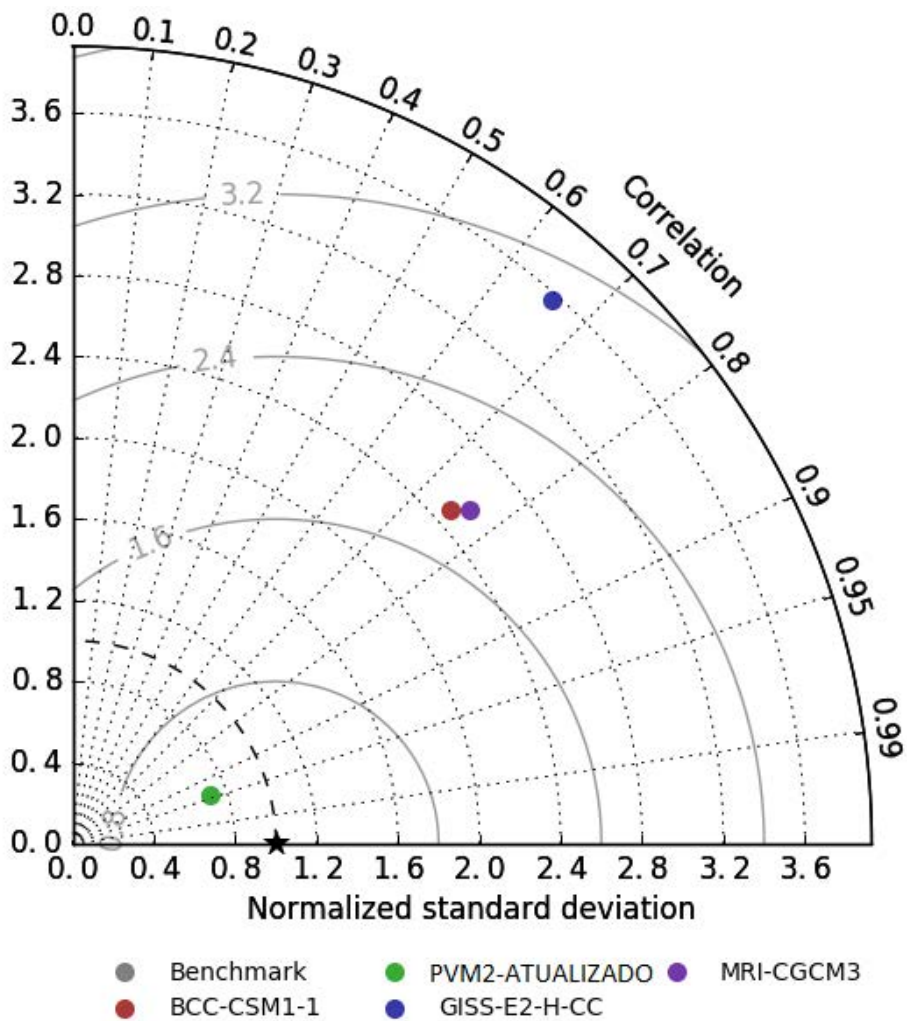
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 15. Gráfico referente a validação da variável de escoamento superficial, comparativo aos outros modelos com variação mensal em $\text{kg/m}^2 \text{d}^{-1}$.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 16. Gráfico referente aos resultados de correlação entre os modelos para água no solo.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.3. Aplicação do modelo à escala regional: Amazônia

Após a atualização do modelo, foi feita a aplicação para o bioma amazônico. Considerou-se apenas essas três variáveis na região: água no solo; evapotranspiração e escoamento superficial. Avaliou-se o efeito de CO₂ na variação hídrica sazonal da floresta, através de médias mensais para o período temporal analisado, comparando o modelo PVM2 original com os inputs atualizados, e no nível de concentração de CO₂ teste do Amazon-FACE - os mesmos são apresentados em gráficos pelas figuras 12, 14 e 16.

Os valores plotados nestes gráficos são relativos à média da somatória de todos os pixels para a delimitação da Amazônia. Também foram elaborados mapas com médias anuais para cada variável em questão, dentro do limite da floresta, visto nas figuras 13, 15 e 17. Todos esses mapas apresentam 4 situações, onde a primeira sempre se refere ao modelado pelo PVM2 atualizado; a segunda, ao PVM2 atualizado e com CO₂ elevado; a terceira, à diferença entre ambos; e a quarta, ao modelado pelo PVM2 original.

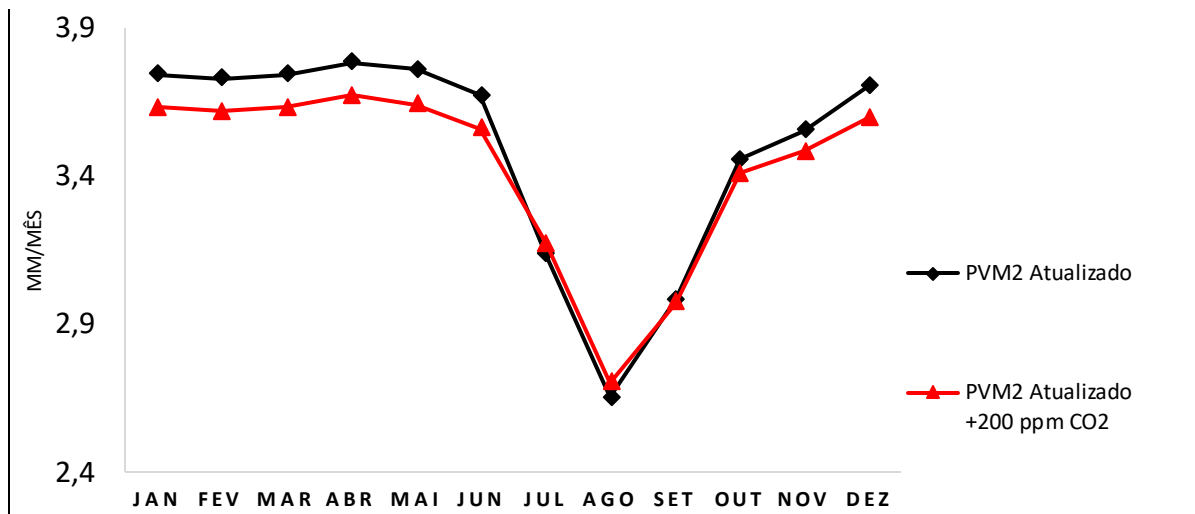
Ao compararmos os outputs referentes às atualizações com a versão sem modificações do PVM2, observa-se uma representatividade mais apurada e uma diminuição das generalizações dos processos, devido à nova resolução espacial adotada.

4.3.1. Evapotranspiração

Em relação à evapotranspiração, pode-se observar um efeito notável do aumento de CO₂ atmosférico sobre o comportamento desse seguimento. De maneira geral, ambas as versões demonstram comportamento semelhante ao longo do ano, com diminuições acentuadas entre os meses de junho e setembro, característicos da estação de inverno no hemisfério sul (figura 12). Comparando-se a evapotranspiração modelada pelo PVM2 original à versão atualizada - porém sem a simulação com CO₂ elevado -, observa-se um aumento na quantidade de retorno do vapor de água para à atmosfera neste último, com uma média 0,24 mm/mês. Ao comparar-se o PVM2 atualizado com o modelado à concentração de CO₂ elevada, observou-se uma diminuição da quantidade de água evapotranspirada, com variação média de -0,07 mm/mês, para a segunda situação.

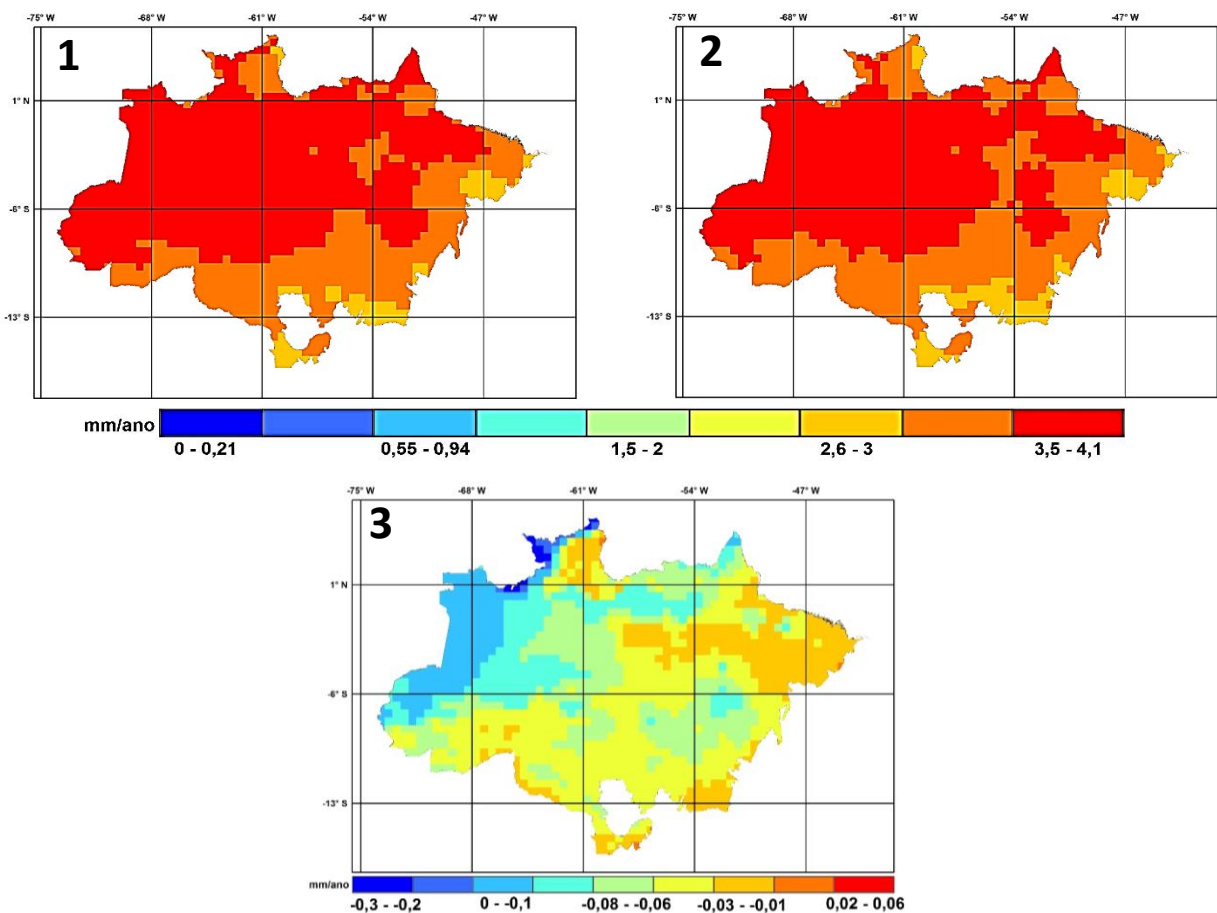
Na figura 12 estão os mapas da quantidade de água evapotranspirada na região amazônica. No mapa 3 desta figura representa-se a diferença entre o PVM2 atualizado com PVM2+200 ppmv de CO₂, sendo observado para tal região diminuições na quantidade de evapotranspiração, fato acentuado em um gradiente leste-oeste da floresta.

Figura 17. Gráfico da quantidade de evapotranspiração mensal durante os trinta anos modelados. Tal variação foi testada para o PVM2 original, sua versão atualiza e após o acréscimo de 200ppm de dióxido de carbono ao modelo.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 18. Mapas relativos ao processo de evapotranspiração para o bioma amazônico. Foram geradas quatro situações, sendo a 1 para o modelo PVM atualizado, 2 para a versão atualizada e com CO₂ ao nível do Amazon-FACE, 3 a diferença entre 2 e 1. Cores mais quentes indicam aumento de evapotranspiração e cores mais frias diminuições.



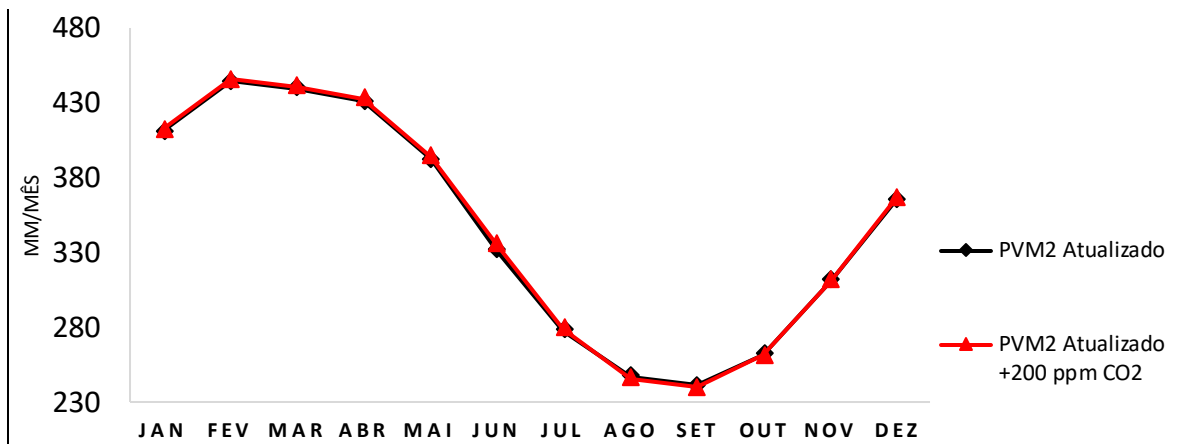
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

4.3.2. Água no solo

Na figura 14 apresenta-se o balanço sazonal de água no solo. A diferença mais notável ocorre entre o PVM2 e o mesmo atualizado, sendo ela pronunciada no período que se sucede os meses de junho a dezembro, onde houve diminuição da quantidade de água presente no solo - em torno de 10,4 mm/mês. Ao aplicar-se uma concentração elevada de CO₂, observa-se pequena diferença entre as versões, com variação milimetricamente baixa em relação à quantidade total de água presente no solo.

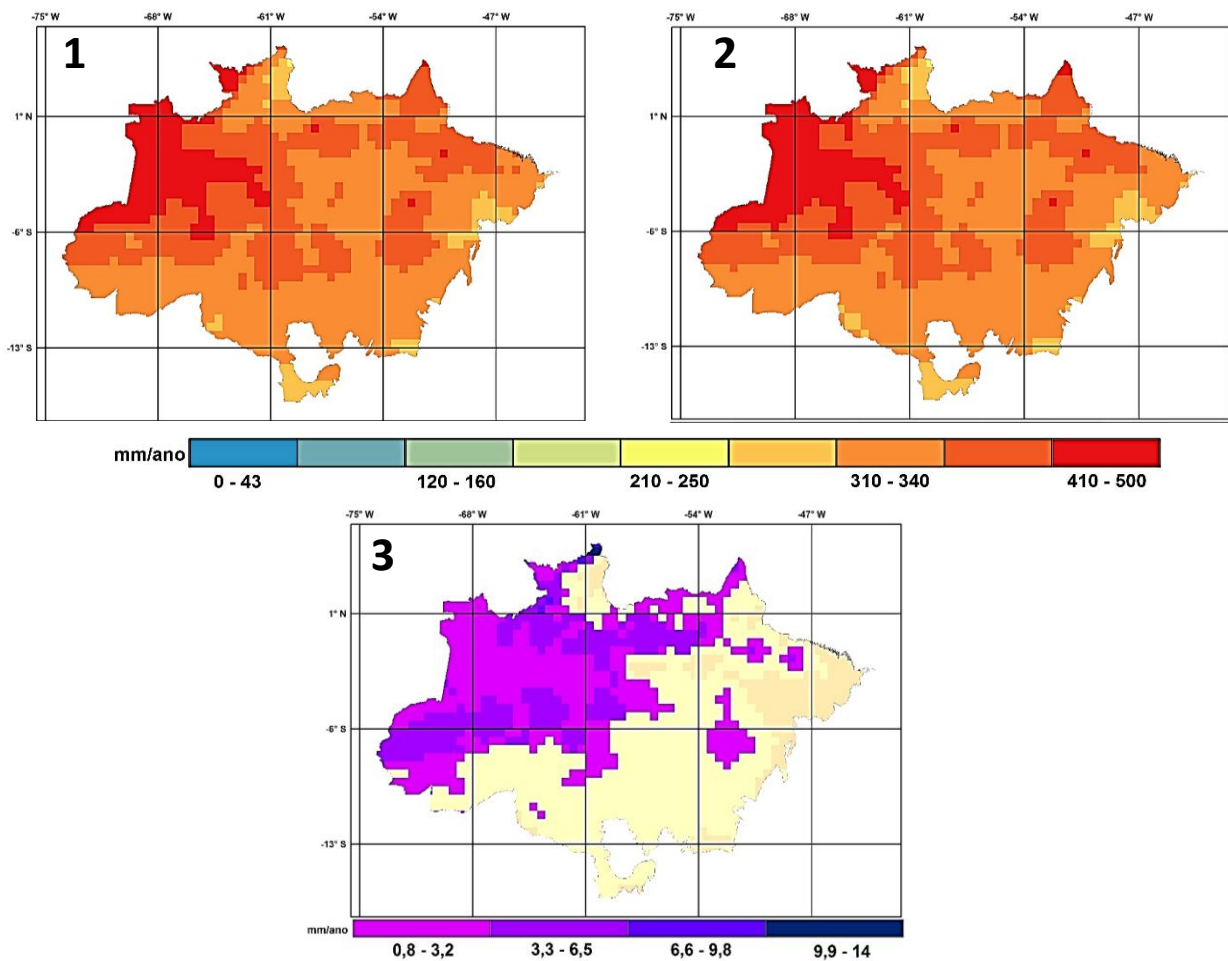
Ao avaliar a quantidade de água no solo, considerando apenas uma média anual (figura 15), observa-se que a porção oeste da Amazônia apresenta uma tendência de aumento da mesma ao elevar-se a concentração de CO₂, sendo essa relação contrária para a parte leste da mesma, onde a diminuição predomina. Os valores positivos encontrados oscilam entre 0,8 e 14 milímetros anuais.

Figura 19. Gráfico da variação sazonal de água no solo em milímetros mensais durante o ano para três situações modeladas, representadas pelas linhas pretas, vermelhas e amarelas.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 20. Mapa representando a quantidade de água no solo em milímetros por ano para a Amazônia. Há quatro situações, sendo elas: 1 para o modelo PVM atualizado; 2 atualizado e com CO₂ elevado a 200ppm; 3 referente a diferença entre 2 e 1. Cores mais quentes indicam maior quantidade de água no solo e cores mais menor quantidade. Na situação 3 a cor e escala foram alteradas para uma melhor representação do seu resultado, mostrando apenas as regiões com aumento da quantidade de água no solo, suprimindo assim os valores relativos as diminuições.



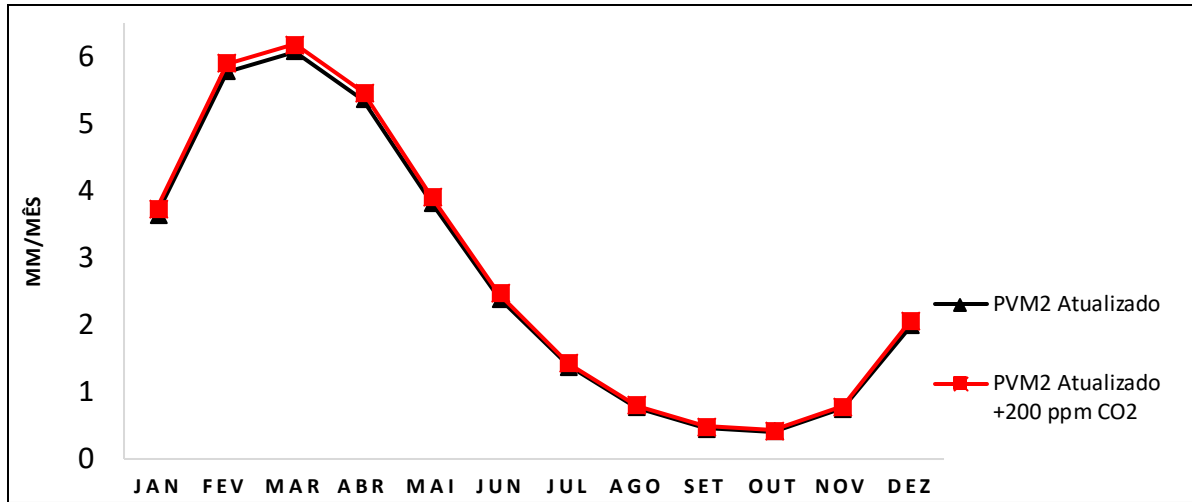
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

4.3.3. Escoamento Superficial

O escoamento superficial também apresentou pouca variação entre as três modelagens, com a versão atual (a qual aplicou-se um valor elevado de CO₂) mostram variação média de 0,07 mm/mês, como visto na figura 16. As variações mais expressivas residem na comparação das atualizações com o PVM2 original, onde prevê-se, em média, um aumento de 0,17 mm/mês entre os meses de fevereiro e abril; e diminuição média de 0,19 mm/mês para o restante dos meses, na nova versão.

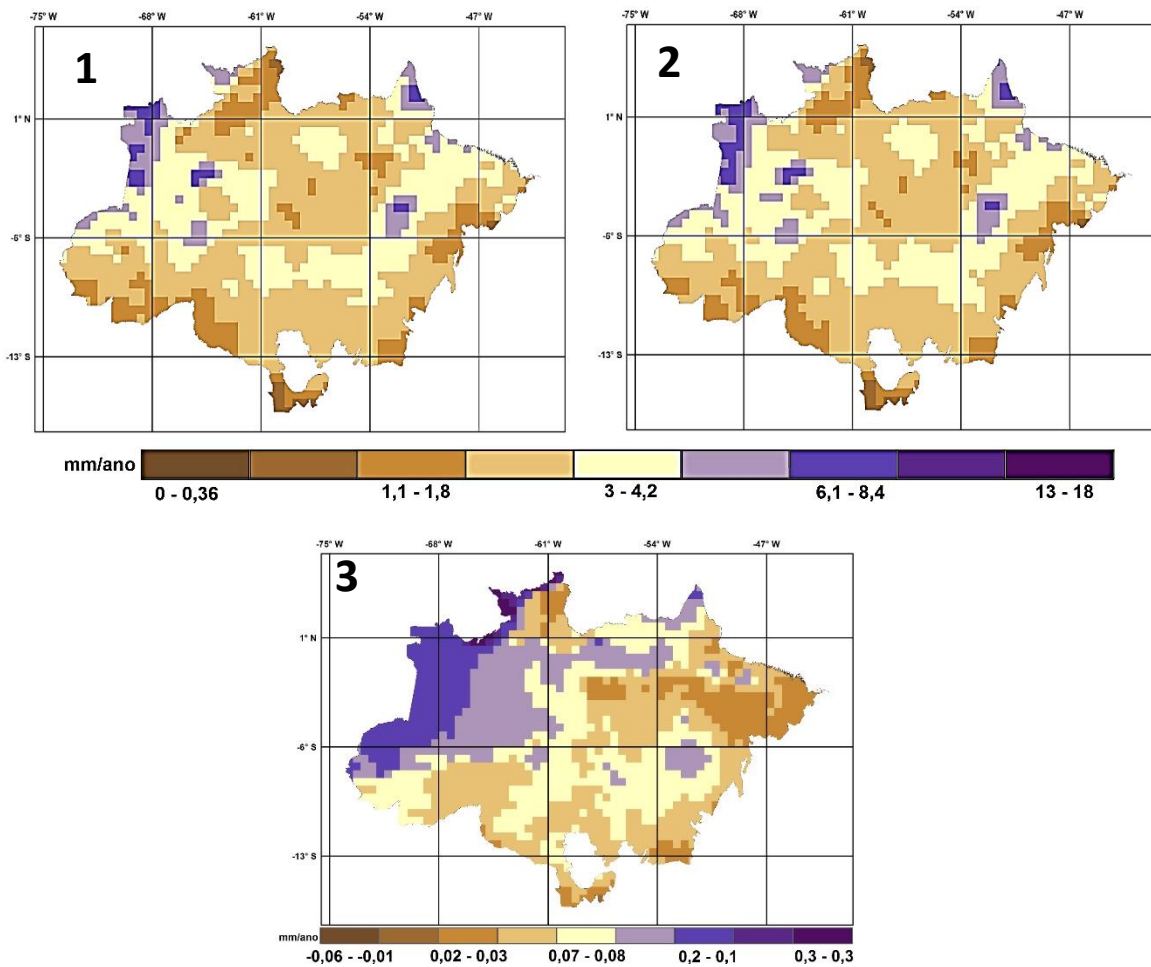
Considerando a média anual exibida pelos mapas da figura 17, modelada pela diferença entre eles (situação 3), observa-se a existência de uma relação positiva entre o aumento de CO₂ atmosférico e a quantidade de água escoada superficialmente. Tais resultados também demonstram um gradiente de aumento conforme se avança em direção à porção oeste do bioma.

Figura 21. Quantidade de escoamento superficial em milímetros por mês para cada situação modelada.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 22. Situações referentes ao escoamento superficial, cores mais escuras representam maior quantidade de água escoada e as mais claras menor quantidade. As situações apresentadas são as mesmas descritas na figura 19 e 20.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

5. DISCUSSÃO

5.1. Referentes aos Inputs

Os dados sobre as variáveis hidrológicas exibidos pelas figuras 5, 6, 7, 8, 9 e 10 mostram-se em concordância com informações disponibilizadas pelo quinto relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2013). Assim como observado na figura 2 (C), a biosfera experimenta um aumento na temperatura média, durante o novo período analisado, com tendência de aquecimento mais intenso sobre os continentes do hemisfério norte.

Aumentos na quantidade de água precipitada são registrado desde 1901 para o hemisfério norte (IPCC, 2013). Para as demais regiões, têm-se observado aumentos e reduções da mesma, podendo-se dizer que esse fenômeno tem sido compensado ao longo dos anos. Ainda segundo o IPCC (2013), a Terra tem sofrido um desequilíbrio radiativo, com aumento da quantidade de energia solar que entra no sistema terrestre e diminuição da quantidade que deveria sair pela parte superior da atmosfera, principalmente entre os períodos de 1970-2010. Esse aumento de temperatura e as mudanças nos novos *inputs* são responsáveis por ocasionar as mudanças nos *outputs*, resultando em alterações no balanço energético terrestre.

Com relação ao gelo no solo, a maior discrepância concentra-se no Canadá e em algumas regiões do continente Asiático, onde - de acordo com os dados demonstrados pela figura 9 (C) - observa-se diminuição do mesmo. Conforme apresentado pelo quinto relatório do IPCC (2013), as temperaturas do permafrost aumentaram em diversas regiões desde o começo dos anos 80, com considerável redução em sua espessura e extensão durante o período de 1975-2005, em regiões ao norte do Alasca e Rússia. Eventos semelhantes ocorrem ao se considerar a cobertura de neve no hemisfério norte, que vem apresentando grandes reduções de derretimento a partir de 1980, devido ao aumento nas temperaturas de inverno (IPCC, 2013), seguindo o mesmo padrão gerado pelo nosso modelo para derretimento de neve, figura 7 (C). Essas mudanças apresentadas pelo IPCC (2013) alertam ainda sobre como a duração da temporada de neve nessas localidades tem sido afetada devido à quantidade que é derretida antes da primavera.

Os resultados globais gerados para a evapotranspiração (figura 5.C) mostram que houve pouca variação durante o período de 1981-2010, com aumentos e diminuições sucintos em todos os continentes, com destaque para pequenos aumentos no hemisfério norte, os quais também foram observados em outros trabalhos (WILD; GRIESER; SCHAER, 2008; JUNG et

al., 2010;. WANG et al., 2010). Nas regiões de florestas tropicais, onde grande parte da evapotranspiração advém da transpiração, observa-se diminuições. Isso pode estar relacionado ao fato de que, com o aumento da concentração de CO₂ atmosférico, os estômatos reduzem sua abertura, acarretando em uma diminuição da perda de água (IDSO; BRAZEL, 1984; LEAKEY et al., 2006). Fu *et al.*, (2009) e Roderick *et al.*, (2007) sugerem que fatores como mudanças na velocidade do vento, umidade, radiação solar e eventos regionais também podem influenciar nas taxas de evapotranspiração.

Como visto na figura 6 (C), o escoamento superficial tem apresentado aumento nas altas e médias latitudes do hemisfério norte, com algumas exceções. No continente Sul Americano, os aumentos concentram-se na porção oeste, enquanto nas porções leste e interior verifica-se locais com acréscimo e decréscimo do mesmo. O continente Africano e a Oceania são os que apresentam menor variação nessa taxa. Nos resultados gerados para umidade no solo (figura 10 C), mostra-se que houve aumento notáveis entre as latitudes de 60° e 30° em ambos os hemisférios. Decréscimos são relatados em nível global, sendo eles mais comum no Brasil, Austrália e grande parte da África.

5.2. Validação

O PVM2 atualizado se manteve adequado aos resultados obtidos por outros modelos, seguindo as mesmas distribuição mensal, devido aos efeitos de sazonalidade, se mantendo dentro do posicionamento de correlação entre os modelos utilizado em sua comparação. Apenas a variável de água no solo apresentou inconsistências, muito provavelmente pelo fato de o PVM2 representar esse fator de forma simplista, utilizando uma única camada de cinquenta centímetros de profundidade para representar toda a cobertura de solos dos continentes.

5.3. Aplicação ao bioma Amazônico

Para os resultados relativos à aplicação do modelo ao bioma amazônico, observa-se que o incremento de CO atmosférico impacta a dinâmica hídrica da floresta, especialmente nos processos de evapotranspiração. Tal efeito era esperado, pois, em uma atmosfera rica em CO₂, o modelo prevê que as plantas diminuam a perda de água por transpiração, devido a menor frequência com que seus estômatos são abertos para captar CO₂, conseqüentemente diminuindo as taxas de transporte hídrico entre planta-atmosfera. Resultados semelhantes são vistos pelo modelo *Lund–Potsdam–Jena model DGVM* (GERTEN et al., 2004; SITCH et al., 2003), *Dynamic Land Ecosystem Model* (PAN et al., 2015) e pelo *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (APARICIO et al., 2015), mostrando uma tendência dos

modelos de considerar um aumento na eficiência do uso da água, em situação de acréscimo de CO₂. Aparicio et al. (2015) atenta ainda que as variações negativas de água evapotranspirada serão mais intensas nas baixas latitudes, onde se concentram as florestas tropicais. Em suas observações, Gerten et al. (2004) afirmam que essas mudanças são atenuadas em escalas regionais, com o desmatamento - na Amazônia - sendo o principal responsável por implicações marcantes no clima regional. Os mesmos autores sugerem, ainda, que as variações na perda de água pelas plantas sejam em torno de 0,6 mm/dia. Outros autores sugerem uma taxa de supressão de 6% de evapotranspiração em ecossistemas tropicais, ao se dobrar a quantidade de CO₂ (LEIPPRAND; GERTEN 2006; CAO; WOODWARD, 1998). Ambos os resultados são próximo da média dos resultados mensais modelados no presente trabalho (figura 12 e 13 C).

Os dados de água no solo e escoamento superficial apresentaram respostas que foram conduzidas pela aplicação de CO₂ elevado. Observa-se que há uma inclinação na intensificação desses processos, caso os futuros cenários de emissões aqui simulados sejam concretizados. Porém, tais respostas tendem a ser pouco expressivos. O principal motivo para essas observações é o fato de o CO₂ afetar esses processos indiretamente, através das respostas de evapotranspiração do modelo. Outros trabalhos têm encontrado relações semelhantes, relatando que a supressão da transpiração das plantas devido ao fechamento dos estômatos induzido por CO₂ resulta em aumento do escoamento em uma escala continental – com aumento dessa taxa de 6%, desde a revolução industrial (GEDNEY et al., 2006; BETTS et al., 2007; PAN et al., 2015; LABAT et al., 2004; GERTEN et al., 2004; CRAMER et al., 2001). O mapa de escoamento gerado (figura 16 C) apresenta resposta similar, pois, a nível regional, visualiza-se aumento médio próximo a 0,88% para o período teste. Para água no solo, exclusivamente, constata-se um relativo aumento na porção oeste da Amazônia, com diminuição ao leste (figura 15 C).

Há uma tendência clara de diminuição dos processos hídricos no sentido leste-oeste da Amazônia, sendo as diminuições concentradas na porção leste, como observados pela figura 14 e 16 - exceto para evapotranspiração. Essa observação está diretamente relacionada aos efeitos gerados pelo aumento de CO₂ sobre a vegetação. Ao calcular a quantidade de água no solo disponível para evapotranspiração, espera-se que esse esteja próximo de seu ponto de saturação nos lugares onde a evapotranspiração é baixa, pois, ao se diminuir a abertura dos estômatos, decresce o fluxo de água da terra para a atmosfera (GERTEN et al., 2004). O mesmo acontece para a variável de escoamento superficial. Por ser uma variável dependente de água no solo, seus valores tendem a ser maior nos lugares onde é esperado um solo

saturado (GEDNEY et al., 2006).

Comparando a variação sazonal dos dois componentes de escoamento e água no solo, modelados pelo PVM2 e atualizado ao PVM2 original, observa-se que predominam as diminuições por conta da versão atualizada, principalmente durante os períodos de seca. Esse resultado não foi o mesmo com o esperado e observado por outros modelos. Por se tratar de médias mensais em um intervalo de 30 anos, é possível que haja uma homogeneização dos valores devido à supressão de valores extremos, sendo necessária uma análise estatística mais apurada acerca da distribuição dos valores mensais dos *inputs*, para assim reduzir as incertezas e tirar conclusões mais precisas.

6. CONCLUSÃO

A atualização dos inputs climáticos, juntamente com a adequação para maior resolução, permite uma representação mais refinada da superfície terrestre, incluindo também ilhas antes ignoradas no PVM2 original. Esse efeito também foi observado por outros pesquisadores e modelos de vegetação, como o *LPJ*, o qual afirma que as atualizações dos dados de entrada são importantes para reforçar a precisão dos estoques de água modelado, o que tem sido comprometido em outros modelos, devido à baixa qualidade e resolução espacial dos dados de entrada. Em contrapartida, o continente Antártico não contém informações para ser representado nesses novos dados. Como visto pela aplicação do modelo em nível da floresta amazônica, o aumento da concentração de dióxido de carbono na atmosfera tem efeitos consideráveis sobre a evapotranspiração, acarretando em diminuição em suas taxas. Tais impactos podem, por consequente, afetar o balanço de água no solo e o escoamento superficial, causando seu potencial aumento. As observações referentes aos resultados da validação mostraram que o modelo CPTEC-PVM2 atualizado se manteve dentro dos padrões constatados em outros modelos dos sistema terrestre, demonstrando assim sua eficácia em representar os sistemas hídricos a níveis globais. Dessa forma, pode-se concluir que o sub-modelo de balanço hídrico adequou-se bem às modificações realizadas, seguindo o mesmo padrão de distribuição dos valores para todas as variáveis apresentadas, quando comparadas a versão original e a atualizada. Também apresentou desempenho compatível para as aplicações a que ele se propõe, sendo passível de compor o DGVM *Carbon and Ecosystem functional-Trait Evaluation model* (CAETÊ), ainda em desenvolvimento pelo Laboratório de Ciência do Sistema Terrestre (LabTerra) da UNESP de Rio Claro.

REFERÊNCIAS

- ALCAMO, J.; HERICHS, T.; RÖSCH, T. World water in 2025. Global modelling and scenario analysis for the World Commission on Water for the 21st Century. **Kassel World Water Series 2**, p. 1-49, fev. 2000.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. **FAO Irrigation and Drainage Paper**, n. 56, Rome, 1998.
- APARÍCIO, S.; CARVALHAIS, N.; SEIXAS, J. Climate change impacts on the vegetation carbon cycle of the Iberian Peninsula—Intercomparison of CMIP5 results. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 120, n. 4, p. 641-660, 2015.
- ARAGÃO, L. E. O. C. Environmental Science: The rainforest's water pump. **Nature**, London, v. 489, n. 7415, p. 217-218, 13 sep. 2012.
- ARNELL, N. W. Climate change and global water resources. **Global Environmental Change**, Southampton, v.9, p. 31-49, jun. 1999.
- ARNELL, N.; LIU, C. Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. *Chapter 4: Hydrology and Water Resources*. 2001. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg2/index.php?idp=165>. Acessado em: 17 jul. 2015.
- BETTS, R. A. et al. Projected increase in continental runoff due to plant responses to increasing carbon dioxide. **Nature**, v. 448, n. 7157, p. 1037-1041, 2007.
- CAO, M.; WOODWARD, F. I. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. **Nature**, v. 393, n. 6682, p. 249-252, 1998.
- CHAVARRIA, G.; SANTOS, H. P. Plant Water Relations: Absorption, Transport and Control Mechanisms. *Advances in Selected Plant Physiology Aspects*. The University of Passo Fundo, Brazil. 2012. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/59779/1/InTech-Plant-water-relations-absorption-transport-and-control-mechanisms.pdf>. Acessado em: 17 jul. 2015.
- CLEMENT, C. R.; HIGUCHI, N. A floresta amazônica e o futuro do Brasil. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 58, n. 3, p. 44-49, set. 2006.
- COLLATZA, G. J., et al. Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration: a model that includes a laminar boundary layer. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 54, n. 2-4, p. 107-136, apr. 1991.
- COX, P. M. et al. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. **Nature**, London, v. 408, p. 184-187, 26 sep. 2000.
- COX, P. M. et al. Amazonian forest dieback under climate-carbon cycle projections for the 21st century. **Theoretical and Applied Climatology**, Austria, n. 78, pag. 137-156, 2004.

CPC Soil Moisture data provided by the NOAA/OAR/ESRL PSD, 1980, Boulder, Colorado, USA, from their Web site at <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>. Acessado em: 15 set. 2016.

CRAMER, W. et al. Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO₂ and climate change: results from six dynamic global vegetation models. **Global Change Biology**, England, v.7, e.4, p. 357–373. apr. 2001.

CUBASCH, U.; WUEBBLES, D. Introduction. In: STOCKER, T.F.; QIN, D.; PLATTNER, G-K.; TIGNOR, M.M.B; ALLEN, S.K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; Vincent BEX, V.; MIDGLEY, P.M. (Ed(s)). **IPCC: Intergovernmental Panel On Climate Change: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. New York: Cambridge University Press, 2013. p. 119–158.

DESSAY, N. et al. Comparative study of the 1982–1983 and 1997–1998 El Niño events over different types of vegetation in South America. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 25, p. 4063-4077, Set 2004.

Diagram from Max Planck Institute for Meteorology. Disponível em: http://www-k12.atmos.washington.edu/k12/pilot/water_cycle/grabber2.html. Acessado em 17 jul. 2015.

DÖLL, P.; KASPAR, F.; LEHNER, B. A global hydrological model for deriving water availability indicators: model tuning and validation. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 270, p. 105-134, jan. 2003.

DRIESSEN, P. Carbon Dioxide: The Gas of Life Tiny amounts of this miracle molecule make life on Earth possible. A Special Report for the Committee For A Constructive Tomorrow. 2013. Disponível em: <<http://www.cfact.org/pdf/CO2-TheGasOfLife.pdf>>. Acessado em: 17 jul. 2015.

FALKOWSKI, P. et al. The Global Carbon Cycle: A Test of Our Knowledge of Earth as a System, **Science**, Washington DC, v. 290, p. 291-296, out. 2000.

FAN, Y; VAN DEN DOOL, H. Climate Prediction Center global monthly soil moisture data set at 0.5 resolution for 1948 to present. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 109, n. D10, 2004.

FIELD, C. B.; JACKSON, R. B.; MOONEY, H. A. Stomatal responses to increased CO₂: implications from the plant to the global scale. **Plant, Cell and Environment**, United Kingdom, v. 18, n. 10, p. 1214-1225, 1995.

FIELD, C. B.; RANDERSON, J. T.; MALMSTRONG, C. M. “Global net primary production: combining ecology and remote sensing”. **Rem. Sens. Environ**, New York, v.51, n. 1, p. 74-88, jan. 1995.

FRIEDLINGSTEIN, P. P. et al. Climate–carbon cycle feedback analysis: results from the c4mip model intercomparison. **J. Climate**, Boston, Mass, v. 19, n. 14, p. 3337–3353, jul. 2006.

- FU, G. B.; CHARLES, S. P.; YU, J. J. A critical overview of pan evaporation trends over the last 50 years. **Clim. Change**, v. 97, p. 193–214, 2009.
- GEDNEY, N. et al. Continental Runoff: A quality-controlled global runoff data set (Reply). **Nature**, v. 444, n. 7120, p. E14-E15, 2006.
- GERTEN, D. et al. Terrestrial vegetation and water balance—hydrological evaluation of a dynamic global vegetation model. **Journal of Hydrology**, v. 286, n. 1, p. 249-270, 2004.
- GUTZLER, D. S.; Uncertainties in climatological tropical humidity profiles: Some implications for estimating the greenhouse effect. **Journal of Climate**, Cambridge, v. 6, n. 5, p. 978-982, jul 1993.
- HARTMANN, D. L. Global Physical Climatology. Vol. 56. EUA: **Academic Press**, 1994. 525 p.
- HENDREY, G. R. et al. A free-air enrichment system for exposing tall forest vegetation to elevated atmospheric CO₂. **Global Change Biology**, v. 5, n. 3, p. 293-309, 1999.
- HUNTINGFORD et al. Simulated resilience of tropical rainforests to CO₂-induced climate change. **Nature**, v. 6, p.268-273, 2013.
- IDSO, S. B.; BRAZEL, A. J. Rising atmospheric carbon-dioxide concentrations may increase streamflow. **Nature**, v. 312, p. 51–53, 1984.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013: Annex V: Contributors to the IPCC WGI Fifth Assessment Report. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. **Cambridge University Press**, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- JET PROPULSION LABORATORY. ISLSCP II terra e da água Máscaras com Auxiliar de Dados. Conjunto de dados. Disponível on-line [<http://daac.ornl.gov/>] de Oak Ridge National Laboratory distribuído do Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, EUA, 2013. Acessado em: 6 mar. 2016. Disponível em: <Http://dx.doi.org/10.3334/ORNLDAAAC/1200>
- JUNG, M., et al., 2010: Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. **Nature**, 467, 951–954.
- LAPOLA, D. M.; OYAMA, M. D.; NOBRE, C. A. Exploring the range of climate biome projections for tropical South America: the role of CO₂ fertilization and seasonality. **Global Biogeochemical Cycles**, Washington, US, v. 23, n. 3, 2009.
- LAPOLA, D. M.; NORBY, R. J. Amazon-FACE: Assessing the effects of increased atmospheric CO₂ on the ecology and resilience of the Amazon forest. **Brasília: Ministério de Ciências, Tecnologia e Inovação**, 2014. 51p.
- LABAT, D. et al. Evidence for global runoff increase related to climate warming. **Advances in Water Resources**, v. 27, n. 6, p. 631-642, 2004.

LEGATES, D. R.; WILLMOTT, C. J. Mean Seasonal and Spatial Variability Global Surface Air Temperature. **Theoretical and Applied Climatology**, v.41, n.11-21, 1990a.

LEGATES, D. R.; WILLMOTT, C. J. Mean Seasonal and Spatial Variability in Gauge-Corrected, Global Precipitation. **International Journal of Climatology**, v. 10, p. 111-127, 1990b.

LEAKEY, A. D. B., et al. Photosynthesis, productivity, and yield of maize are not affected by open-air elevation of CO₂ concentration in the absence of drought. **Plant Physiol.**, v. 140, p. 779–790, 2006.

LEIPPRAND, A.; GERTEN, D. Global effects of doubled atmospheric CO₂ content on evapotranspiration, soil moisture and runoff under potential natural vegetation. **Hydrological Sciences Journal**, v. 51, n. 1, p. 171-185, 2006.

LI, L. et al. An overview of BCC climate system model development and application for climate change studies. *Journal of Meteorological Research*, v. 28, n. 1, p. 34-56, 2014.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA) USA. Concentrations of CO₂ in the Earth's atmosphere (part per million) derived from in situ air measurement at the Mauna Loa Observatory. Hawaii, 2014. Apresenta dados de concentrações atmosféricas de CO₂. Disponível em: <<http://co2now.org/images/stories/data/co2-mlo-monthly-noaa-esrl.pdf>>. Acesso em: 12 nov. 2014.

NIJSSSEN, B. et al. “Hydrologic sensitivity of global rivers to climate change”. *Climate Change*, **Springer Netherlands**, v.50, n. 1-2, p.143-175, jul. 2001.

NOBRE, C. A. BORMA, L. S. ‘Tipping points’ for the Amazon forest. Center for Earth System Science, **National Institute for Space Research – INPE**, São José dos Campos, SP, Brazil, v. 1, n. 1, p. 28-36, 8 aug 2009.

NOBRE, C. A.; SAMPAIO, G.; SALAZAR, L. Mudanças climáticas e Amazônia. **Cienc. Cult.**, São Paulo, v. 59, n. 3, set. 2007.

NOBRE, C. A.; SELLERS, P. J.; SHUKLA, J. Amazonian deforestation and regional climate change. **Journal of Climate**, v. 4, p. 957-987. 1991.

NORBY, R. J. et al. Model–data synthesis for the next generation of forest free-air CO₂ enrichment (FACE) experiments. **New Phytologist**, Inglaterra, p. 1-12, 06 aug. 2015. <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/nph.13593/full>>. Acessado em: 07 aug. 2015.

OKADA, M. et al. Free-air CO₂ enrichment (FACE) using pure CO₂ injection: system description. **New Phytologist**, Cambridge-Inglaterra, v. 150, n. 2, p. 251-260, may. 2001.

OYAMA, M. D.; NOBRE C. A. A simple potential vegetation model for coupling with the simple biosphere model (SIB). **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v19, n.2, 203–216, 2004.

PACHECO, M. R. P. S.; HELENE, M. E. M. Atmosfera, fluxos de carbono e fertilização por CO₂. **Estudos Avançados**, São Paulo, vol.4, n.9, p. 204-220, ago. 1990.

PAN, S. et al. Responses of global terrestrial evapotranspiration to climate change and increasing atmospheric CO₂ in the 21st century. **Earth's Future**, v. 3, n. 1, p. 15-35, 2015.

PORUSCHI, L.; DHAKAL, S.; CANADELL, J. Ten Year sof Advancing Knowledge on the Global Carbon Cycle and its Management. Global Carbon Project. 2010. Papper disponibilizado pelo Global Carbon Project, avanços no conhecimento do Ciclo do Carbono. Disponível em:<http://www.globalcarbonproject.org/global/pdf/GCP_10years_med_res.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2014.

POTSDAM INSTITUTE FOR CLIMATE IMPACT RESEARCH. News from ISI-MIP. Banco de dados. Disponível em <<https://www.pik-potsdam.de/research/climate-impacts-and-vulnerabilities/research/rd2-cross-cutting-activities/isi-mip>>. Acesso em: 14 nov. 2014.

POTSDAM INSTITUTE FOR CLIMATE IMPACT RESEARCH. News from ISI-MIP. Banco de dados. Disponível em: <http://vire1.dkrz.de:8080/thredds/catalog/isi_mipEnhanced/ISIMIP2/Input_Hist_obs/WATC_H+WFDEI.combined/catalog.html>. Acesso em: 07 jul. 2015.

RÁKÓCZI, F.; IVÁNYI, Z.; Water vapour and green house effect. **Geofizika**, Budapeste, v. 16, n. 17, p. 65-72, Jun 1999.

RAMMIG, A. et al. Estimating the risk of Amazonian forest dieback. **New Phytologist**, v. 187, n. 3, p. 694-706, 2010.

RODERICK, M. L., et al. On the attribution of changing pan evaporation. **Geophys. Res. Lett.**, v. 34, 2007.

SALATI, E. “Mudanças climáticas e o ciclo hidrológico na Amazônia”. Em: Causas e dinâmica do desmatamento na Amazônia. **Ministério do Meio Ambiente**, São Paulo, p.153-172, 2001.

SALATI, E. et al. Recycling of water in the Amazon basin: an isotopic study. **Water Resources Research**, Washington, US, v. 15, n. 5, p. 1250-1258, oct. 1979.

SELLERS, P. J., et.al. “Comparison of radiative and physiological effects of doubled atmospheric CO₂ on climate”. **Science**, v. 271, n. 5254, p. 1402-1406, 1996.

SELLERS, P. J. et al. Comparison of radiative physiological effects of doubled atmospheric CO₂ on climate. **Science**, Lancaster, v. 271, n. 5254, p. 1402-1406, mar. 1996a.

SELLERS, P. J. et al. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I: Model formulation. **Journal of climate**, Boston, Mass., US, v. 9, n. 4, p. 676-705, 1996.

SITCH, S. et al. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. **Global Change Biology**, v. 9, n. 2, p. 161-185, 2003.

STACKHOUSE, P. W; GUPTA. ISLSCP II Surface Radiation Budget (SRB) Radiation Data. Data set. Available on-line [<http://daac.ornl.gov/>] from Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, USA, 2013. Acessado em: 6 mar.

2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3334/ORNLDAAAC/1201>

THE INTERNATIONAL LAND MODEL BENCHMARKING PROJECT. Welcome to ILAMB. Modelo de validação. Disponível em: <http://ilamb.org/>. Acesso em: 13 nov. 2014.

VÖRÖSMARTY, C. J.; PAMELA, G.; JOSEPH, S.; Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. **Science**, Washington DC, n. 289, p. 284–288, jul. 2000.

WANG, K. C. et al. Evidence for decadal variation in global terrestrial evapotranspiration between 1982 and 2002: 2. Results. **J. Geophys. Res. Atmos.**, v. 115, 2010.

WEEDON, G. P. *et al.* Creation of the watch forcing data and its use to assess global and regional reference crop evaporation over land during the twentieth century. **J. Hydrometeorol**, Boston, v. 12, e. 5, p. 823–848, 2011.

WEEDON, G. P. *et al.* The WFDEI meteorological forcing data set: WATCH Forcing Data methodology applied to ERA-Interim reanalysis data. **Water Resour. Res.**, v. 50, n.9, p. 7505–7514, 2014.

WEEDON, G. P. *et al.* The Watch Forcing Data 1958-2001: A Meteorological Forcing Data For Land Surface And Dydrological Models. **Technical Report** n. 22, 2010.

WILD, M., J.; GRIESER, J; SCHAER, C. Combined surface solar brightening and increasing greenhouse effect support recent intensification of the global landbased hydrological cycle. **Geophys. Res. Lett.**, v. 35, 2008.

WILLMOTT, C. J; MATSUURA, K. Terrestrial Air Temperature and Precipitation: Monthly and Annual Time Series (1950-1999), 2001. Acessado em: 10 mai. 2016. Disponível em: http://climate.geog.udel.edu/~climate/html_pages/README_ghcn_ts2.html.

WILLMOTT, C. J; ROWE, C. M.; MINTZ, Y. Climatology of the terrestrial seasonal water cycle. **Journal of Climatology**, v. 5, n. 6, p. 589-606, 1985.

YUKIMOTO, S. et al. A new global climate model of the Meteorological Research Institute: MRI-CGCM3—model description and basic performance—. **気象集誌. 第2輯**, v. 90, n. 0, p. 23-64, 2012.