

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

DEBORA NASCIMENTO ROSARIO

BALANÇO HÍDRICO DA SOJA NO CERRADO MINEIRO

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2019**

DEBORA NASCIMENTO ROSARIO

BALANÇO HÍDRICO DA SOJA NO CERRADO MINEIRO

Relatório final, apresentado a Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências da disciplina ENG 491 – Trabalho de Conclusão de Curso.

Orientador: Hewlley Maria Acioli Imbuzeiro

Coorientador: Victor Hugo Benezoli

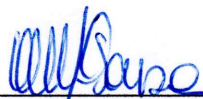
**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2019**

DEBORA NASCIMENTO ROSARIO

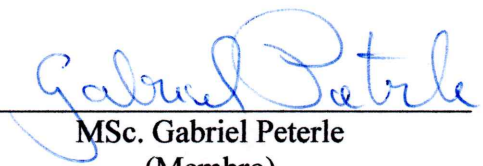
BALANÇO HÍDRICO DA SOJA NO CERRADO MINEIRO

Relatório final, apresentado a Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências da disciplina ENG 491 – Trabalho de Conclusão de Curso.

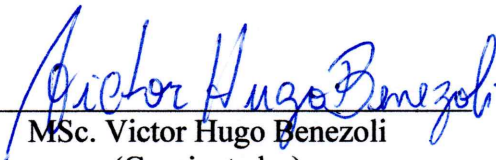
APROVADA: 29 de novembro de 2019.



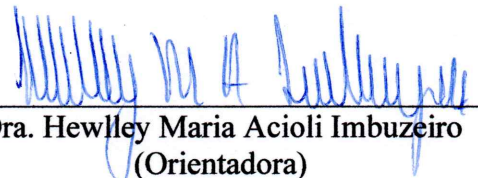
Dra. Fernanda Campos de Sousa
(Membro)
(UFV)



MSc. Gabriel Peterle
(Membro)
(UFV)



MSc. Victor Hugo Benezoli
(Coorientador)
(UFV)



Dra. Hewlley Maria Acioli Imbuzeiro
(Orientadora)
(UFV)

A Cida, Laércio, Luciana e Victor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, aos anjos e a todas as forças do universo que conspiraram ao meu favor e me fizeram trilhar os caminhos certos até aqui.

Agradeço aos meus pais, Francisca e Laércio, que sempre me incentivaram aos estudos, desde quando ainda pequena pedi para entrar na escolinha até os dias de hoje, quando me apoiaram na decisão de sair de casa aos 18 anos para estudar no lugar que sempre sonhei. Vocês dois são amor, são minha luz, minha inspiração, minha força de vontade para buscar meus sonhos.

Agradeço aos meus queridos irmãos, que amo incondicionalmente. A minha irmã Luciana pela ajuda e compreensão, por ser meu porto seguro em todos os momentos, pelas broncas que me ajudam a ser uma pessoa melhor, por todo carinho que tem por mim. Ao meu irmão Victor, o mais irritante e carinhoso dos irmãos, uma das pessoas que eu mais confio, está comigo em todos os momentos e não mede esforços para me ver bem. Vocês dois são meu tudo e eu faço qualquer coisa para ver vocês felizes.

Agradeço a minha orientadora, Hewlley, que me deu a oportunidade de estágio em 2016 e me apresentou ao Victor Hugo, meu coorientador, que em momento algum do estágio desistiu de mim e me ensinou tudo que eu sei sobre programação. A vocês dois, meu muito obrigada por terem me acompanhado na vida acadêmica por tanto tempo.

Agradeço a querida prima Rosa e toda a sua família, que mesmo sem me conhecer me deu abrigo, comida e uma nova família nos meus primeiros momentos morando em Viçosa.

Agradeço as queridas amigas Carine, Fernanda, Luna e Werônica, que foram minha família em Viçosa desde 2015 e me aceitaram em sua república, mesmo sem nem me conhecer direito. Com vocês vivi minhas maiores aventuras e as melhores memórias. A vocês o meu amor. Estarão comigo para sempre!

Agradeço aos queridos amigos Faccioli, Lucas e Marina. Apesar de não terem seguido comigo a jornada do curso de engenharia agrícola e ambiental, nada abalou a amizade que surgiu em 2014. Agradeço às queridas Clarissa e Raphaela, que sorte a nossa os nossos caminhos terem se encontrado. Agradeço à Kerly, Rafa e Dani, meus presentes da agrícola. Agradeço aos meus colegas da MICROMET por todo apoio durante meu período no grupo.

E assim agradeço a todas as pessoas maravilhosas que conheci na agrícola e em Viçosa e que estiveram comigo em algum momento da minha vida na UFV. Vocês são parte de mim.

Agradeço a todas as oportunidades que tive durante a graduação, a todas as atividades extracurriculares que fiz e a todas as pessoas que acreditaram em mim e no meu potencial.

Por fim, quero agradecer a todos os professores, orientadores e profissionais da educação que tive em minha vida e que acrescentaram no meu conhecimento. Sem vocês eu não teria chegado aonde cheguei.

Se permite!

RESUMO

A soja tem grande importância para a economia, estando presente no conjunto de atividades agrícolas que mais tem sido destaque no mercado mundial. No Brasil, o Cerrado é o bioma que mais tem se destacado no setor agropecuário, apresentando amplas áreas com o cultivo da oleaginosa. Um dos principais fatores limitantes na produção agrícola é a deficiência hídrica durante o período de cultivo, fazendo-se necessário conhecer a disponibilidade da água no solo para planejar os recursos hídricos necessários para o bom desenvolvimento das plantas. Portanto, objetivou-se elaborar o balanço hídrico climatológico da cultura soja no Cerrado Mineiro. O balanço hídrico foi determinado a partir do método de Thornthwaite e Mather com a utilização de dados de temperatura do ar e precipitação no período de 1980 a 2015, e os dados de capacidade de água disponível. A precipitação foi mais alta nos meses do período chuvoso (novembro a março) com valores entre 150 e 300 mm na maior parte do Cerrado Mineiro. Os menores valores de precipitação e maiores temperaturas mensais ocorreram na parcela do cerrado que compreende a região do Norte de Minas e Jequitinhonha. O mês mais crítico do período de cultivo da soja foi o mês de outubro, que apresentou déficit hídrico com valores até 100 mm na Região Norte. Em geral, as análises mostraram que durante os meses onde a soja necessitou de mais água (enchimento de grãos) não houve grande déficit hídrico, sendo facilmente superado com uma irrigação a fim de completar a quantidade de água demandada pela soja.

Palavras-chave: déficit hídrico, evapotranspiração, *Glycine max*.

ABSTRACT

The soybeans have great importance to the economy, being present in the set of agricultural activities that has been most prominent in the world market. In Brazil, the Cerrado is the biome that has been more prominent in the agricultural sector, presenting large areas with the cultivation of oilseed. One of the main limiting factors in agricultural production is water deficiency during the cultivation period, being necessary to know the availability of water in the soil in order to plan the water resources necessary for good plant development. Then, this study aimed to elaborate the climatic water balance of soybean crop in Cerrado in the state of Minas Gerais. Water balance was determined from the method of Thornthwaite and Mather using temperature and precipitation data from 1980 to 2015, and the total available water data. Precipitation was highest during the rainy months (November to March), with values ranging from 150 to 300 mm in most of the Minas Gerais's Cerrado. The lowest precipitation values and the highest monthly temperatures occurred in the cerrado portion that comprises the northern region of Minas and Jequitinhonha. The most critical month of soybean cultivation period is October, which presented water deficit up to 100 mm in the Northern Region. In general, the analyzes showed that during the months when the soybean needed more water (grain filling) there was no large water deficit and one irrigation was necessary to complete the amount demanded by the soybean.

Keywords: Evaprrtranspiration, *Glycine max*, water deficit.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	(a) Mapa do Cerrado no Brasil, com destaque para o Cerrado em Minas Gerais. (b) Mapa do Cerrado Mineiro subdividido em 4 regiões principais.....	14
Figura 2	Banco de dados utilizados nos cálculos. (a) Mapa de capacidade de disponibilidade de água no estado de Minas Gerais. (b) Calendário de plantio da soja. Azul: início do plantio em outubro. Vermelho: início do plantio em novembro	15
Figura 3	Distribuição espacial e temporal da precipitação pluviométrica ao longo do período de cultivo de soja no cerrado mineiro.....	21
Figura 4	Temperatura do ar média mensal ao longo do período de cultivo de soja no cerrado mineiro	22
Figura 5	Mapas de evapotranspiração potencial ao longo do período de cultivo de soja no cerrado mineiro	23
Figura 6	Mapas de Precipitação subtraído a Evapotranspiração ($P - ETP$) ao longo do período de cultivo de soja no cerrado mineiro.....	24
Figura 7	Mapas da variação de negativo acumulado ao longo do período de cultivo de soja no cerrado mineiro.....	25
Figura 8	Mapas da variação de armazenamento de água no solo ao longo do período de cultivo de soja no cerrado mineiro	26
Figura 9	Mapas da alteração de armazenamento de água no solo ao longo do período de cultivo de soja	27
Figura 10	Mapas da evapotranspiração real ao longo do período de cultivo de soja no cerrado mineiro	28
Figura 11	Mapas de déficit hídrico ao longo do período de cultivo de soja no cerrado mineiro	29
Figura 12	Mapas de excesso hídrico ao longo do período de cultivo de soja no cerrado mineiro	29
Figura 13	Mapas da evapotranspiração de cultura da soja ao longo do período de cultivo de soja no cerrado mineiro	30
Figura 14	Gráficos do balanço hídrico climatológico para as regiões com climatologia similares do Cerrado Mineiro durante o semestre de produção da soja, onde P é precipitação, ETP é a evapotranspiração potencial e ETC é a evapotranspiração de cultura da soja. (a) Gráfico do BHC para a região do Triângulo Mineiro; (b) Gráfico do BHC para a Região Norte; (c) Gráfico do BHC para a região do Noroeste de Minas; (d) Gráfico do BHC para a Região Central	31

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	MATERIAL E MÉTODOS	14
2.1	ÁREA DE ESTUDO	14
2.2	DADOS METEOROLÓGICOS.....	14
2.3	BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO.....	16
2.3.1	Análise da temperatura em cada mês.....	16
2.3.2	Cálculo da evapotranspiração potencial	16
2.3.3	Fator de correção.....	17
2.3.4	Evapotranspiração potencial corrigida	17
2.3.5	Análise da precipitação em cada mês	18
2.3.6	Cálculo de precipitação menos evapotranspiração	18
2.3.7	Cálculo do negativo acumulado e armazenamento de água no solo.....	18
2.3.8	Cálculo de alteração do armazenamento de água no solo	19
2.3.9	Cálculo de evapotranspiração real	19
2.3.10	Cálculo de déficit de água.....	19
2.3.11	Cálculo de excesso hídrico	19
2.3.12	Cálculo de evapotranspiração da cultura soja.....	20
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
3.1	VARIÁVEIS CLIMATOLÓGICAS.....	21
3.2	COMPONENTES DO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO	23
3.3	INFLUÊNCIA DO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO NA SOJA.....	30
3.4	ANÁLISE DO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO REGIONAL	31
4	CONCLUSÕES	33
5	REFERÊNCIAS	34

1 INTRODUÇÃO

A agricultura sempre foi e sempre será dependente das condições ambientais, gerando ao longo dos anos grandes desafios para a sociedade, principalmente para os agricultores, a fim de romper barreiras e lutar por uma vida mais digna e saudável. Estes desafios se ampliam de acordo com a força do impacto das mudanças climáticas e com as novas demandas impostas pela população urbanizada em busca de uma alimentação saudável unida à prática de uma agricultura moderna e sustentável. No futuro próximo espera-se que a modernização da gestão da informação via sensoriamento, automação e monitoramento digital mude radicalmente a paisagem rural do mundo, atingindo não só os grandes, mas o pequeno e o médio produtor também (SEAPA, 2018).

No cenário brasileiro atual temos o Cerrado como destaque no setor agropecuário. O Cerrado é o segundo maior bioma brasileiro, menor apenas que o bioma Floresta Amazônia e ocupa cerca de um quarto (aproximadamente 204 milhões de hectares) do território do país, está localizado em maior parte no Planalto Central e se estende por onze estados, além do Distrito Federal (RUDORFF; RISSO; et al., 2015). O clima e solos favoráveis, com sua capacidade de armazenar água, mantendo grandes reservatórios hídricos, e outras características que o transformam em um ambiente único, tornam o Cerrado a mais importante região de produção agropecuária, possuindo uma área com grande potencial de expansão (FILHO; COSTA, 2016; RUDORFF; RISSO; et al., 2015).

Entre o conjunto de atividades agrícolas que mais tem se destacado no mercado mundial tem-se a soja (SEAPA, 2018). No Brasil, entre os anos de 2014 e 2016 a soja expandiu 1,41 milhões de hectares no Cerrado, passando a ocupar uma área de 17,07 milhões de hectares no bioma. As projeções futuras estimam que para os próximos 10 anos no estado de Minas Gerais a produção deve apresentar um aumento de 14,3%, o equivalente a 5,8 milhões de toneladas de soja a serem produzidas no estado (BALDI; BACK; RODRIGUES, 2017; SEAPA, 2018). Minas Gerais produziu um volume de 5 milhões de toneladas de soja na safra 2016/2017, representando 4,4% da produção total do país, ocupando o 7º lugar no ranking dos estados produtores de soja. Apesar do incremento de 6,7% na produção, a área colhida foi estimada em 1,5 milhão de ha, representando uma redução de 0,9% em comparação com a safra passada. O aumento de produção foi resultado da produtividade média de 3,5 t ha⁻¹, superior em 7,6% em comparação com a safra anterior (SEAPA, 2018).

Um dos principais fatores limitantes do cultivo de soja é a deficiência hídrica durante o seu período de cultivo, já que a água constitui 90% do peso da soja (KUDREV, 1994). A água está diretamente relacionada aos processos fisiológicos e bioquímicos da planta e possui papel fundamental na regulação térmica, agindo tanto no resfriamento como na manutenção e distribuição do calor (RUVIARO et al., 2011; VIVAN, 2010). Para uma germinação eficiente é essencial que a semente consiga absorver, no mínimo, 50% de seu peso em água, e isso é obtido quando o conteúdo de água no solo varia entre 50% e 85% do total de água disponível (EMBRAPA, 2009).

Thornthwaite e Mather (1955) propuseram um método para calcular o balanço hídrico climatológico (BHC). Com o balanço hídrico é possível definir as condições climáticas predominantes de determinada área e assim pode-se estabelecer estratégias necessárias para o manejo mais adequado dos recursos naturais, almejando um desenvolvimento sustentável com a implementação de práticas agropecuárias possíveis e seguras no bioma onde será cultivado (SOUSA et al., 2009). Uma vez definida as condições limitantes à preservação ambiental e ao cultivo é possível realizar uma exploração racional dos recursos, tecnicamente correta, economicamente viável, socialmente justa e ambientalmente sustentável.

Os principais parâmetros obtidos com o BHC são a evapotranspiração potencial, a evapotranspiração real e a evapotranspiração de cultura. A evapotranspiração é a soma da evaporação de água no solo e a transpiração de água nas plantas (ALLEN et al., 1998).

A evapotranspiração potencial é definida como a quantidade de água transpirada, em um intervalo de tempo, a partir de uma vegetação rasteira e verde, cobrindo totalmente o solo, com altura uniforme e considerando condições hídricas ideais, e representa o processo de perda de água para a atmosfera e a chuva necessária que o solo e planta necessitam para manter o equilíbrio, sem restrição hídrica para atender às necessidades da evaporação do solo e da transpiração. A evapotranspiração real é a quantidade de água evapotranspirada quando é considerado as condições reais dos fatores atmosféricos e também da umidade do solo, e pode ser maior ou igual à evapotranspiração potencial. (EMBRAPA, 2010). A evapotranspiração de cultura é definida a partir da evapotranspiração potencial e as necessidades reais da cultura, com ótimas condições de umidade e fertilidade do solo.

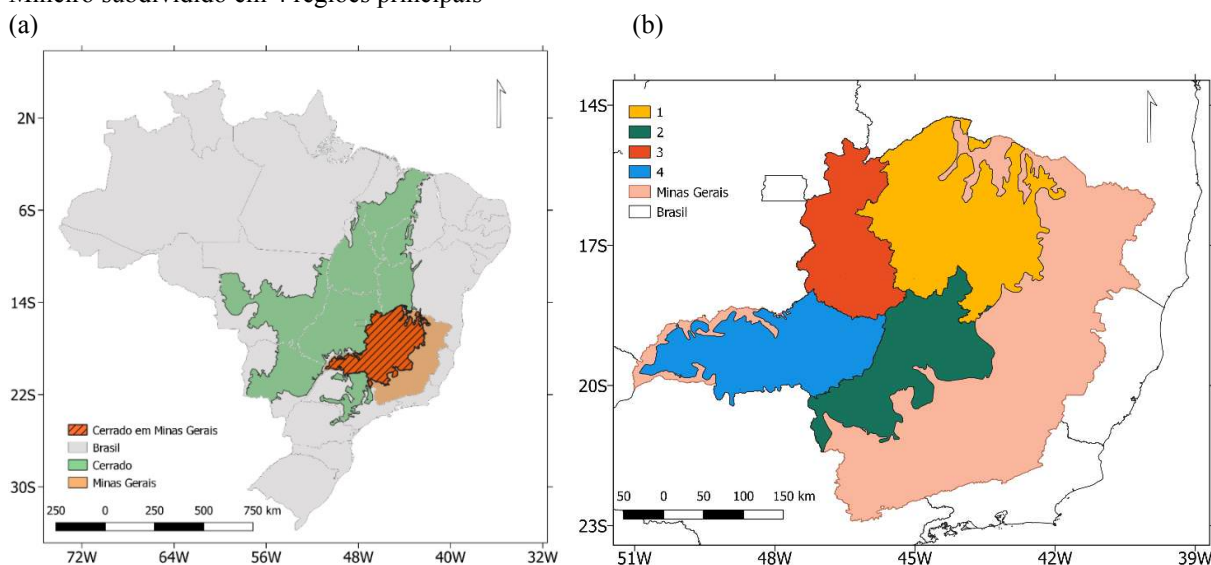
Assim objetiva-se com esse trabalho realizar um balanço hídrico climatológico da cultura soja nas cidades que compõem o Cerrado mineiro durante o período de 1980 a 2015, visando estimar quais as épocas de excedente e deficiência hídrica no período de cultivo da soja.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

O foco neste trabalho foi a área de Cerrado no estado de Minas Gerais, onde ele ocupa aproximadamente 33 milhões de hectares (~57% da área do estado) e está presente na maior parte dos municípios da porção centro-ocidental do estado (Figura 1a).

Figura 1 – (a) Mapa do Cerrado no Brasil, com destaque para o Cerrado em Minas Gerais. (b) Mapa do Cerrado Mineiro subdividido em 4 regiões principais



Fonte: Autores.

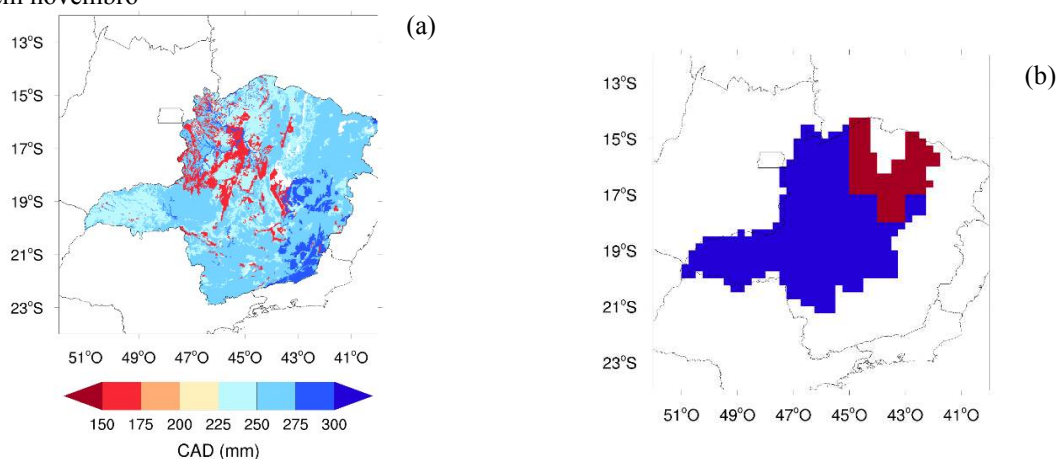
A Figura 1b contém o mapa do Cerrado Mineiro dividido em quatro partes principais com intuito de auxiliar nas análises realizadas, sendo elas: Região Norte, que compreende grande parte da mesorregião Norte de Minas e uma parcela a oeste do Jequitinhonha; Região Central, que compreende a Central Mineira, parte da mesorregião Oeste de Minas e da mesorregião Metropolitana de Belo Horizonte; Noroeste de Minas; e Triângulo Mineiro. Essas regiões foram divididas de acordo com as variações de temperatura e precipitação apresentadas espacialmente; as regiões que apresentaram temperatura e precipitação parecidas podem representar um clima parecido.

2.2 DADOS METEOROLÓGICOS

Para calcular o balanço hídrico proposto por Thornthwaite e Mather (1955) são necessários dados climáticos e solo. Foi utilizado o banco de dados de reanálise disponibilizados por Xavier et al. (2016) contendo as informações de temperatura e precipitação entre o período de 1980 a 2015, necessárias para o cálculo de evapotranspiração potencial, real e da cultura. Estes dados possuem resolução espacial de $0,25^\circ$ (~30 km no Equador) e resolução temporal diária. Foi necessário transformar esses dados diários em dados mensais para o enquadramento nas equações de Thornthwaite e Mather (1955). Para isso, os dados foram processados, onde calculou-se a média mensal da temperatura do ar e a soma mensal da precipitação para todos os anos do intervalo analisado, e em seguida calculou-se a média de cada mês do ano para as duas variáveis.

Os dados da capacidade de água disponível no solo (CAD) foram obtidos do trabalho de Filpi (2019). O banco de dados consiste em uma reconstrução espacial dos valores de CAD para o estado de Minas Gerais, produzidos a partir de informações de classes texturais de solo e valores típicos de capacidade (θ_{FC}), ponto de murcha (θ_{WP}) e profundidade do sistema radicular de espécies florestais. Esses dados foram corrigidos a fim de adequar a profundidade do sistema radicular utilizado por Filpi (2019) para a profundidade do sistema radicular da soja, e foi considerado a partir da FAO56 (ALLEN et al., 1998) igual a 0,95 m.

Figura 2 – Banco de dados utilizados nos cálculos. (a) Mapa de capacidade de disponibilidade de água no estado de Minas Gerais. (b) Calendário de plantio da soja. Azul: início do plantio em outubro. Vermelho: início do plantio em novembro



Fonte: (a) Filpi (2019). (b) Adaptado de Abrahão (2018).

Também foi utilizado o banco de dados de Abrahão et al. (2018) que em sua pesquisa definiu datas importantes do cultivo da soja em todo o Brasil. Para este trabalho foram utilizadas as datas de plantio precoce da soja, considerando que os produtores irão plantar no primeiro dia da janela de plantio. Em seguida, a partir da FAO56 (ALLEN et al., 1998) foi

obtido que a duração aproximada do cultivo da soja foi de 120 dias, de acordo com os dados apresentado pelo boletim sobre quanto tempo dura cada fase fenológica da planta, desde o plantio até a colheita.

Os dados de Abrahão et al. (2018) demonstraram que as datas de plantio da soja variam do final de outubro até novembro. Considerando a data contida nos dados foi gerado o mapa dividido entre os dias que o plantio começou em outubro e em novembro. A variação da localização do cultivo pode observada na Figura 3b.

2.3 BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO

Para realizar o balanço hídrico foi utilizado o seguinte roteiro, descrito por Vianello e Alves (2012), fazendo-se uma análise mensal dos dados mencionados anteriormente:

2.3.1 Análise da temperatura em cada mês

Foi calculada a partir dos dados de Xavier et al. (2016) a média mensal da temperatura, a fim de observar qual foi a temperatura média do ar durante os anos de estudo e, a partir desses valores, calcular o BHC.

2.3.2 Cálculo da evapotranspiração potencial

A evapotranspiração potencial foi obtida pela Equação 1:

$$ETP = 1,6 \times \left(10 \times \frac{T}{I}\right)^a \quad \text{Equação 1}$$

Em que ETP é a evapotranspiração potencial (cm), T é a temperatura média mensal (°C), I é o índice térmico anual (adimensional); a é uma constante que varia de local para local. A constante a e o índice I foram obtidos pelas Equações 2 e 3, respectivamente:

$$a = 6,75 \times 10^{-7} \times I^3 - 7,71 \times 10^{-5} \times I^2 + 1,792 \times 10^{-2} \times I + 0,49239 \quad \text{Equação 2}$$

O índice térmico mensal foi obtido pela Equação 3:

$$I_n = \left(\frac{T_n}{5}\right)^{1,514} \quad \text{Equação 3}$$

Em que I_n são os índices térmicos mensais e T_n é a temperatura média do mês analisado ($^{\circ}\text{C}$).

O índice térmico anual (I) foi obtido através do somatório do índice térmico anual.

2.3.3 Fator de correção

É necessário realizar a correção dos valores de ETP com propósito de adequar o resultado com a duração média máxima possível de brilho solar no hemisfério sul. O fator de correção foi calculado pela Equação 4:

$$\text{Corr} = \left(\frac{N_{15^{\circ}}}{12}\right) \times \left(\frac{n_{\text{dias}}}{30}\right) \quad \text{Equação 4}$$

Em que $N_{15^{\circ}}$ é a duração do período diurno em horas do 15° dia do mês e n_{dias} é o número de dias do mês. A duração do período diurno foi obtida a partir da declinação solar (δ) de cada mês do ano e de cada latitude (Φ) do local analisado, de acordo com a Equação 5:

$$N_{15^{\circ}} = \left(\frac{2}{15}\right) \times \cos^{-1}(-\tan \delta \times \tan \Phi) \quad \text{Equação 5}$$

Em que a declinação solar e latitude são dadas em graus. A declinação solar foi obtida pela Equação 6, onde n_{ano} é o dia do ano:

$$\delta = 23,45 \times \sin\left(\frac{360}{365} \times (284 + n_{\text{ano}})\right) \quad \text{Equação 6}$$

2.3.4 Evapotranspiração potencial corrigida

A correção da evapotranspiração potencial foi obtida pela multiplicação da ETP obtida pela Equação 1 pelo fator de correção obtido na Equação 4.

2.3.5 Análise da precipitação em cada mês

Foi calculada a soma mensal da precipitação, a fim de observar qual foi a precipitação mensal durante os anos de estudo e, a partir desses valores, calcular o BHC.

2.3.6 Cálculo de precipitação menos evapotranspiração

Foi realizada a subtração da precipitação e da evapotranspiração potencial, representada por $P - ETP$, a fim de determinar se a quantidade de água precipitada foi o suficiente para ser convertida em ETP.

2.3.7 Cálculo do negativo acumulado e armazenamento de água no solo

De acordo com Thornthwaite e Mather (1955) a variação de negativo acumulado (NEG) e armazenamento de água no solo (ARM) ocorre da seguinte forma: durante o ano, considerando que no mês de janeiro é período chuvoso, o armazenamento de água é o máximo que o solo consegue armazenar, considerando que chove o suficiente para que isso ocorra, fazendo também que o NEG assumo valor zero. Quando chega o período de estiagem a frequência de chuva diminui e a ETP começa a ser maior que a precipitação significando que o solo está perdendo água. Essa quantidade de água perdida é medida a partir do negativo acumulado, então nesse momento o NEG aumenta e ARM diminui. Em seguida, começa novamente no ano o período chuvoso, o ARM aumenta até atingir a CAD e o NEG diminui até tornar-se zero.

Sendo assim, NEG e ARM foram calculados da seguinte forma: considerou inicialmente para janeiro NEG igual a zero e ARM igual à CAD. A partir do primeiro mês onde $P - ETP$ foi negativo, NEG passou a ser a soma de $P - ETP$ e o NEG do mês anterior, como mostra a Equação 7, ARM foi calculada subtraindo ARM do mês anterior e o módulo de NEG, Equação 8, e isso ocorreu até o último mês onde o valor de $P - ETP$ foi menor que zero.

$$NEG = (P - ETP) + NEG_{mês anterior} \quad \text{Equação 7}$$

$$ARM = ARM_{mês anterior} - |NEG| \quad \text{Equação 8}$$

Quando os valores de P-ETP tornaram a ficar positivos foi calculado ARM, somando ARM do mês anterior e P – ETP, e a partir da Equação 9 foi calculado NEG. Esses cálculos foram feitos até quando ARM atingiu o valor máximo igual a CAD e NEG assumiu novamente valor igual a zero.

$$NEG = CAD \times \ln \frac{ARM}{CAD} \quad \text{Equação 9}$$

2.3.8 Cálculo de alteração do armazenamento de água no solo

A alteração foi obtida pela subtração do ARM do mês atual pelo ARM do mês anterior (Equação 10), representando se o conteúdo de água no solo no mês aumentou ou diminuiu em relação ao mês anterior.

$$ALT = ARM - ARM_{\text{mês anterior}} \quad \text{Equação 10}$$

2.3.9 Cálculo de evapotranspiração real

Quando o ARM = CAD e P-ETP > 0, a ETR deveria ser igual à ETP. Quando P-ETP < 0, ETR foi dado pela soma da precipitação com o ALT (Equação 11).

$$ETR = \begin{cases} ETP, & ARM = CAD \text{ e } P - ETP > 0 \\ P + ALT, & P - ETP < 0 \end{cases} \quad \text{Equação 11}$$

2.3.10 Cálculo de déficit de água

A deficiência hídrica (DEF) acontece quando a evapotranspiração real é maior que a evapotranspiração potencial e foi obtida pela diferença entre a ETP corrigida e a ETR, quando essa subtração foi maior que zero, de acordo com a Equação 12.

$$DEF = \begin{cases} ETP - ETR, & ETR > ETP \\ 0 & \end{cases} \quad \text{Equação 12}$$

2.3.11 Cálculo de excesso hídrico

O excesso hídrico (EXC) representa a água que não foi absorvida pelo sistema radicular da planta e percola no solo. Esse excesso acontece quando $(P-ETP) > 0$ e o ARM for igual a CAD. Então, com essas condições satisfeitas, o excesso foi igual a $(P-ETP)$ menos ALT (Equação 13).

$$EXC = \begin{cases} P - ETP - ALT, & P - ETP > 0 \text{ e } ARM = CAD \\ 0 & \end{cases} \quad \text{Equação 13}$$

2.3.12 Cálculo de evapotranspiração da cultura soja

Para estimar a evapotranspiração de cultura da soja (ETC) foi multiplicado ao valor de ETR o coeficiente da cultura (kc), obtido utilizando a FAO56 (Allen et al., 1998), de acordo com o período fenológico da soja, sendo o kc igual a 1 no período de desenvolvimento e germinação da soja (primeiro mês), 1,15 nos meses de crescimento vegetativo e reprodutivo (segundo e terceiro mês), e 0,50 para a fase de maturação e colheita dos grãos, o último mês do ciclo.

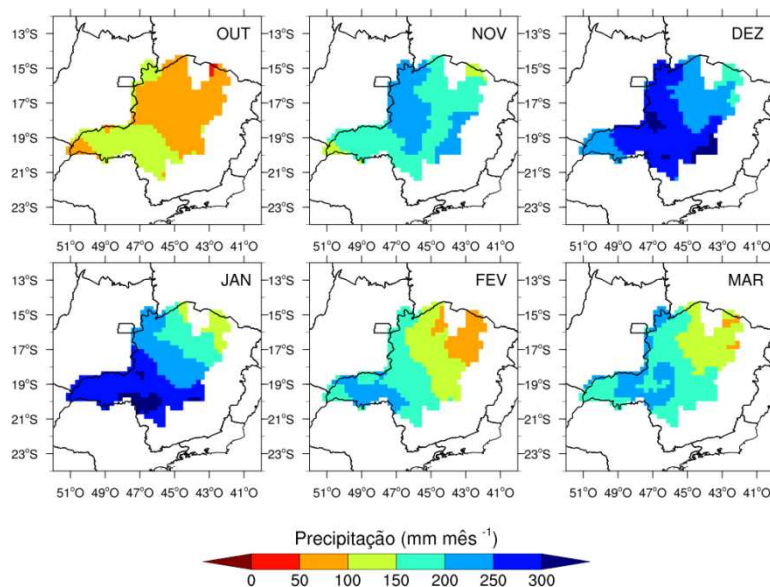
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 VARIÁVEIS CLIMATOLÓGICAS

Com o banco de dados de Xavier et al. (2016) foi possível obter a variação média de temperatura do ar e a soma mensal de precipitação durante o semestre de cultivo da soja em todo o território do cerrado mineiro. Os mapas gerados encontram-se uma resolução de 0,25° (~30 km no Equador).

Os mapas de distribuição espacial e mensal da precipitação (Figura 3) indicam que os menores totais ocorrem nos meses de outubro, início do plantio da soja, e em fevereiro e março na Região Norte, com valores em torno de 50 mm a 150 mm. O plantio da soja não pode ser feito em solo encharcado, sendo mais recomendado que o solo esteja friável, ou seja, o solo esteja mais solto a fim de facilitar a mecanização agrícola. Então essas condições climáticas no mês de outubro favorecem o plantio mecanizado, com a vantagem que logo em seguida inicia-se um período chuvoso, reduzindo a quantidade de água a ser utilizada para irrigação. Em relação à toda região analisada, os maiores valores de precipitação aconteceram na Região Central, Noroeste de Minas e Triângulo Mineiro.

Figura 3 – Distribuição espacial e temporal da precipitação pluviométrica ao longo do período de cultivo de soja no cerrado mineiro

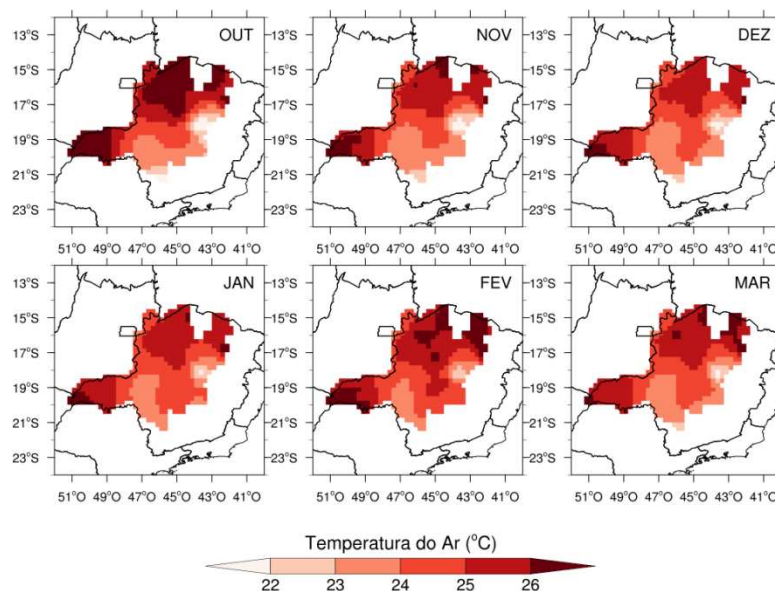


Fonte: Autores.

A temperatura do ar média mensal apresentou uma leve variação, com valores mais altos durante a primavera e verão e valores mais baixos no início do outono. A Região Central

do Cerrado Mineiro apresentou valores de temperatura pouco mais baixos que nas outras duas regiões (Figura 4), variando durante todo o período de plantio entre 22 e 24 °C. As maiores temperaturas foram registradas na Região Norte e no oeste do Triângulo Mineiro, com valores maiores que 26 °C.

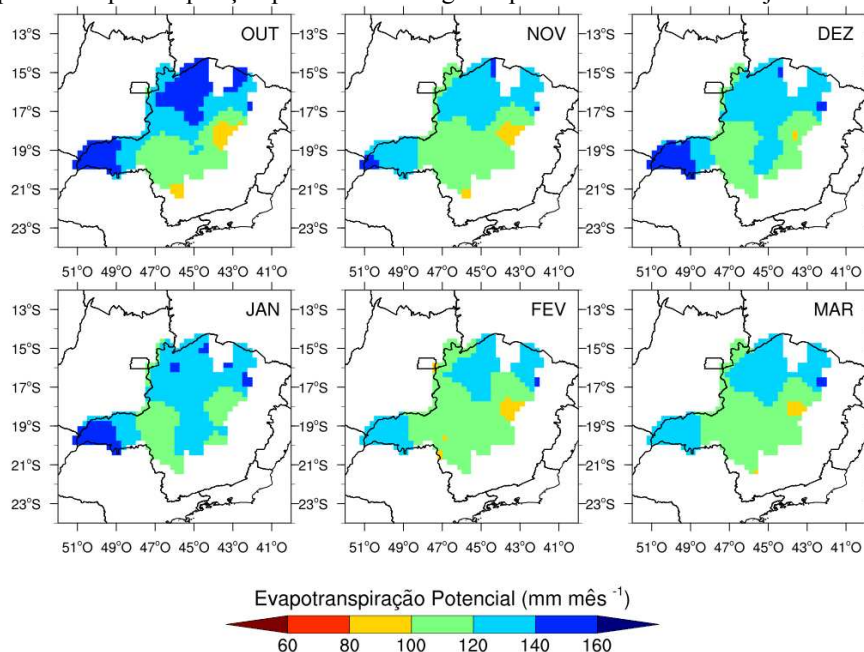
Figura 4 – Temperatura do ar média mensal ao longo do período de cultivo de soja no cerrado mineiro



Fonte: Autores.

A ETP depende apenas de variáveis meteorológicas, sendo ela uma variável meteorológica também. Os resultados obtidos para ETP (Figura 5) mostram que a evapotranspiração é maior na Região Norte e Noroeste de Minas, indicando que para as condições climáticas deste local existe um alto potencial de evapotranspiração, podendo atingir valores entre 120 e 150 mm mensais. Pode ser observado comparando as Figuras 5 e 6 que a ETP elevada ocorre quando a temperatura do ar também é mais alta, devido a interação entre essas variáveis, indicando que existe um maior déficit de pressão de vapor.

Figura 5 – Mapas de evapotranspiração potencial ao longo do período de cultivo de soja no cerrado mineiro



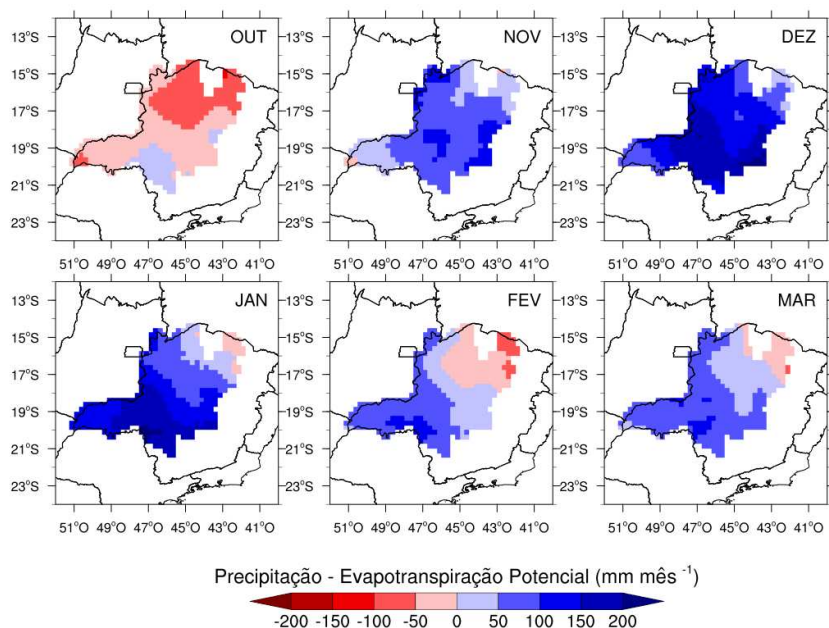
Fonte: Autores.

3.2 COMPONENTES DO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO

Nas figuras a seguir encontram-se os resultados do cálculo de BHC, mostrando uma variação espacial e mensal de Precipitação menos Evapotranspiração Potencial, Negativo Acumulado, Armazenamento de Água no Solo, Alteração de Conteúdo de Água no Solo, Evapotranspiração Real, Déficit Hídrico e Excesso Hídrico.

A distribuição espacial e mensal de P-ETP mostrou em quais meses a ETP foi superior à precipitação (Figura 6). Em geral, pode ser observado que a ETP sobressaiu a precipitação principalmente na Região Norte e no mês de outubro.

Figura 6 – Mapas de Precipitação subtraído a Evapotranspiração (P – ETP) ao longo do período de cultivo de soja no cerrado mineiro

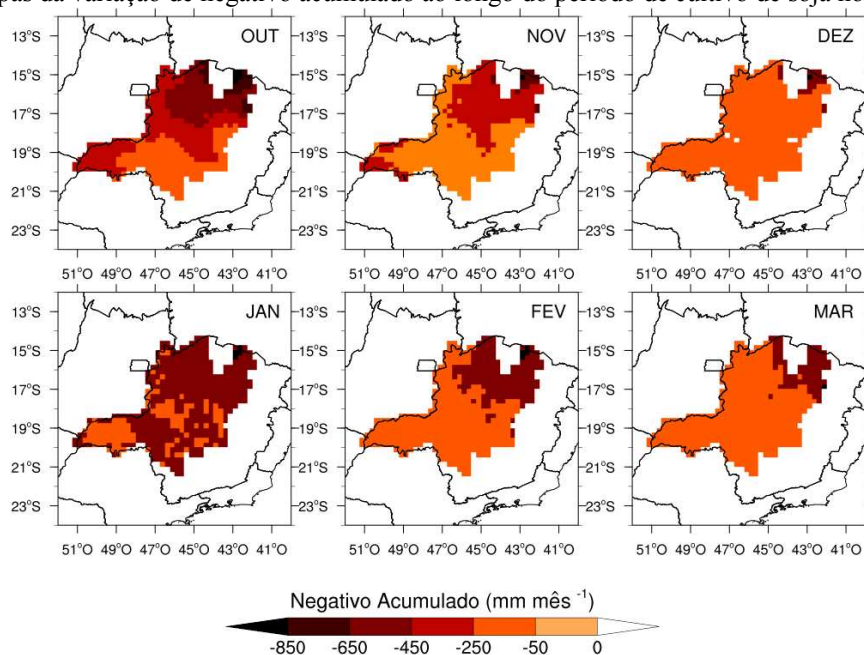


Fonte: Autores.

A Região Norte apresentou valores mais críticos, com resultados negativos nos meses de outubro, janeiro, fevereiro e março. Outubro não apresentou valores altos de precipitação sendo provavelmente o final do período de estiagem, e foi o mês que praticamente em toda área a ETP foi maior que P. Apesar disso, o aumento da ocorrência de chuvas a partir do mês de novembro foi o suficiente para que na maior parte do tempo a precipitação fosse maior que a evapotranspiração. Os meses de novembro, dezembro e janeiro obtiveram os maiores resultados, com P – ETP variando entre 50 mm a 200 mm.

Os mapas de negativo acumulado (Figura 7) representam a perda potencial da água no solo devido a evapotranspiração. O mês de outubro apresentou valores de negativo acumulado chegando a até -850 mm, possivelmente por ainda estar no período de estiagem, sendo na Região Norte os valores mais acentuados. No decorrer do período de cultivo apresentou valores variando principalmente entre -400 e -200 mm. Os meses fevereiro, março e dezembro apresentaram os valores de negativo acumulado entre -250 e -50 mm e foram os resultados que mais se aproximaram à zero. Isso mostra que são os meses em que a perda por evapotranspiração potencial é compensada pela precipitação. Os mapas de negativo acumulado mostram que mesmo sendo o período chuvoso a precipitação não foi suficiente para que a água retida no solo atingisse sua capacidade máxima da CAD.

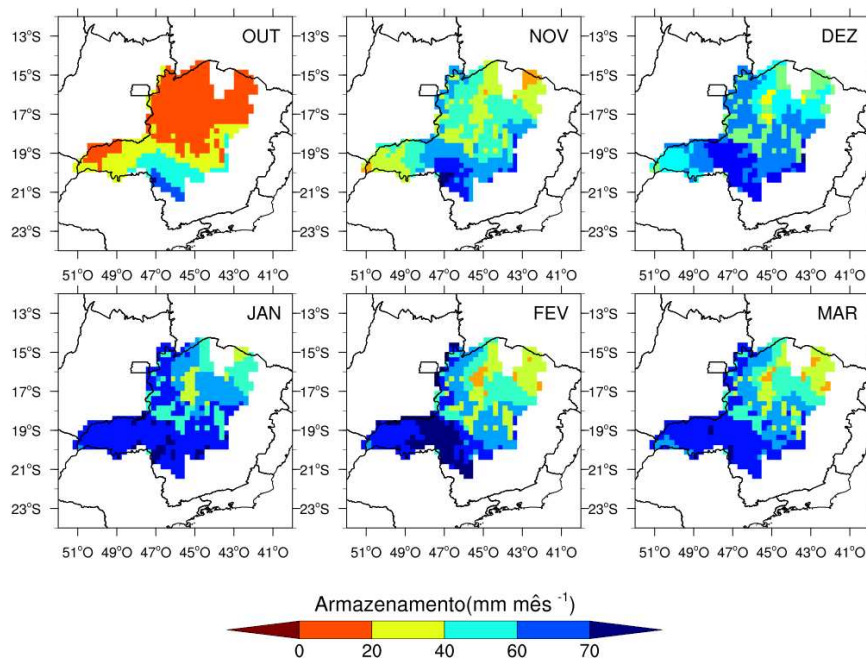
Figura 7 – Mapas da variação de negativo acumulado ao longo do período de cultivo de soja no cerrado mineiro



Fonte: Autores.

Os resultados de armazenamento de água no solo estão descritos na Figura 8. O mês de outubro apresentou valores entre 0 e 20 mm de armazenamento de água no solo, principalmente na Região Norte. Segundo o calendário de início de plantio (Figura 2b), nessa região o plantio de soja começa em novembro, enquanto nos demais locais do mapa o plantio começa em outubro. Os meses de dezembro a março apresentaram os maiores valores de ARM, variando entre 80 a 200 mm. O mês de outubro apresentou os valores mais baixos de ARM, variando de 0 a 80 mm.

Figura 8 – Mapas da variação de armazenamento de água no solo ao longo do período de cultivo de soja no cerrado mineiro

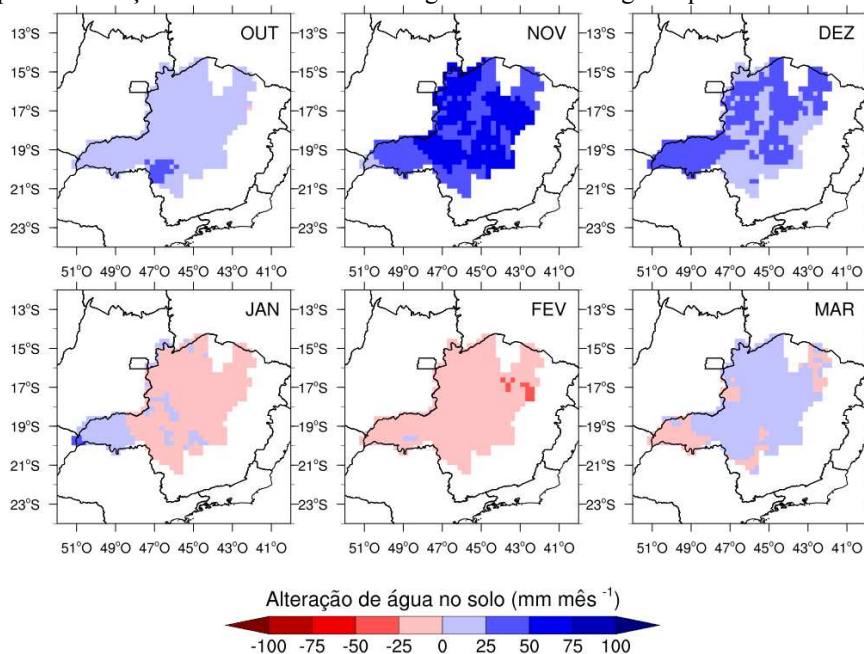


Fonte: Autores.

Segundo informações obtidas pela EMBRAPA (2006) a soja precisa, no seu período de plantio, que o solo possua conteúdo de água entre 50 a 85 % da CAD, e para que se obtenha os maiores rendimentos de grão da soja é necessário que seja disponibilizado à planta de 450 a 800 mm de água distribuídos durante todo o seu ciclo de forma a melhor atender a demanda de cada estado fenológico. Portanto, a partir dos mapas de ARM já é possível observar que no mês de outubro é necessário realizar uma correção da quantidade de água no solo através da irrigação, a fim de assegurar uma boa germinação das sementes.

Os mapas de alteração de armazenamento de água no solo, Figura 9, mostram em quais momentos esse armazenamento aumentou ou diminuiu no mês seguinte. Nesses mapas, a cor azul representa os meses onde houve reposição da água no solo e a cor vermelha representa onde correu perda de água. Pode se observar que entre os meses onde ocorre o plantio da soja, o mês de fevereiro apresentou maior alteração negativa, significando que em relação ao mês anterior o solo perdeu água. Fevereiro também foi o mês que diminuiu o volume precipitado, passando de 100 a 300 mm em janeiro, para até 50 a 100 mm em partes da Região Norte. De outubro a março os valores foram todos positivos, significando reposição de água no solo.

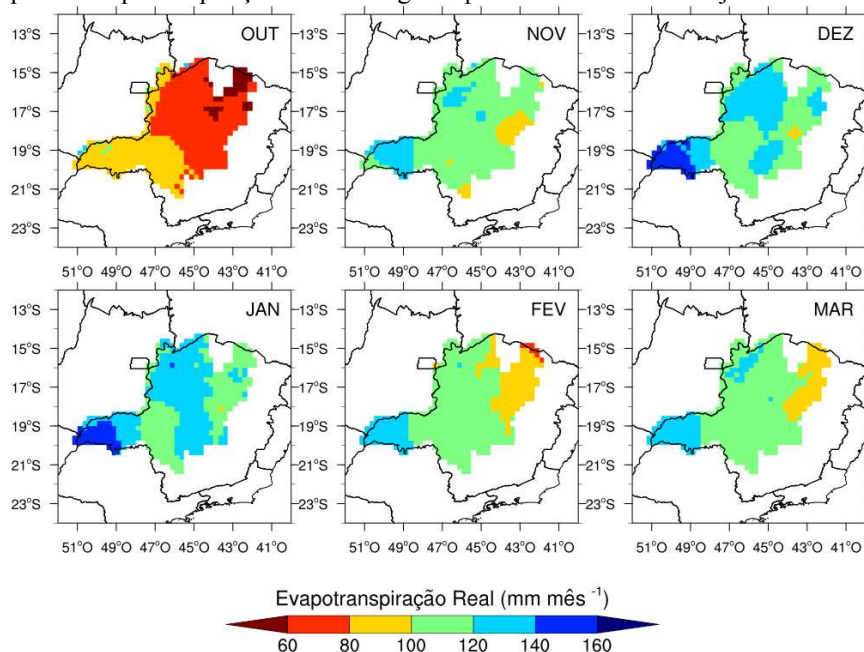
Figura 9 – Mapas da alteração de armazenamento de água no solo ao longo do período de cultivo de soja



Fonte: Autores.

A evapotranspiração real (Figura 10) foi obtida da mesma forma que a ETP, considerando as situações em que ocorrem restrições hídricas. A ETR é a própria evapotranspiração potencial quando a relação P-ETP é maior do que zero. Caso essa subtração seja negativa os valores de ETR são dados pela precipitação mais a alteração de água no solo. Observou-se que, ao comparar a evapotranspiração potencial com a real, nos meses de outubro, novembro e dezembro a ETR apresentou valores bem menores que ETP. Esses foram os meses que obtiveram os valores de precipitação entre 250 e 300mm.

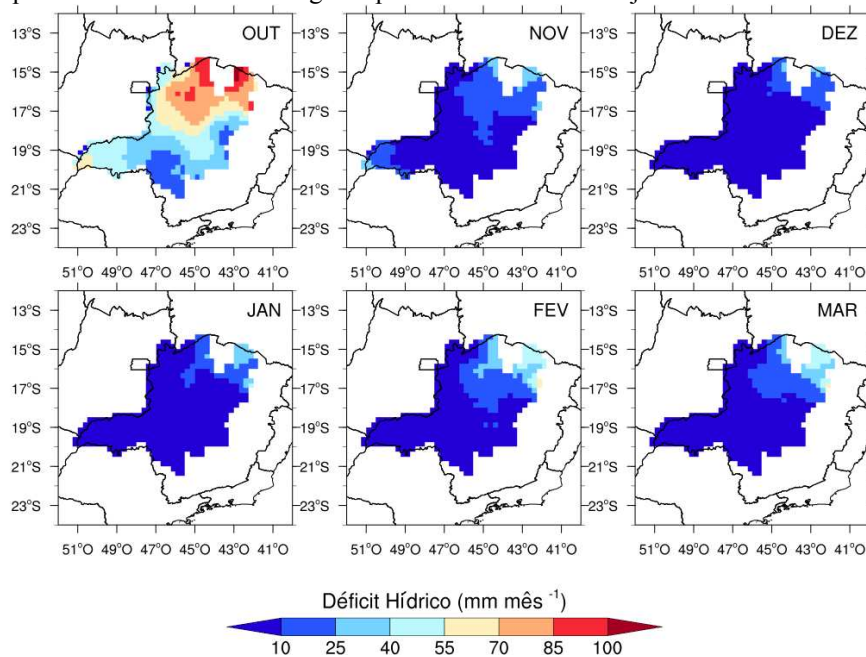
Figura 10 – Mapas da evapotranspiração real ao longo do período de cultivo de soja no cerrado mineiro



Fonte: Autores.

A Figura 11 contém os resultados de déficit hídrico do conteúdo de água necessária para a realizar a evapotranspiração potencial durante o período de cultivo da soja. Essa deficiência é dada pela diferença entre a evapotranspiração potencial menos a evapotranspiração real, e significa o quanto o sistema solo-planta deixou de evapotranspirar. O mês de outubro, época de semeadura, apresentou valores significativos de DEF, atingindo valores entre 40 a 100 mm. Os outros meses apresentaram valores de déficit hídrico menor que 10 mm na maior parte do tempo.

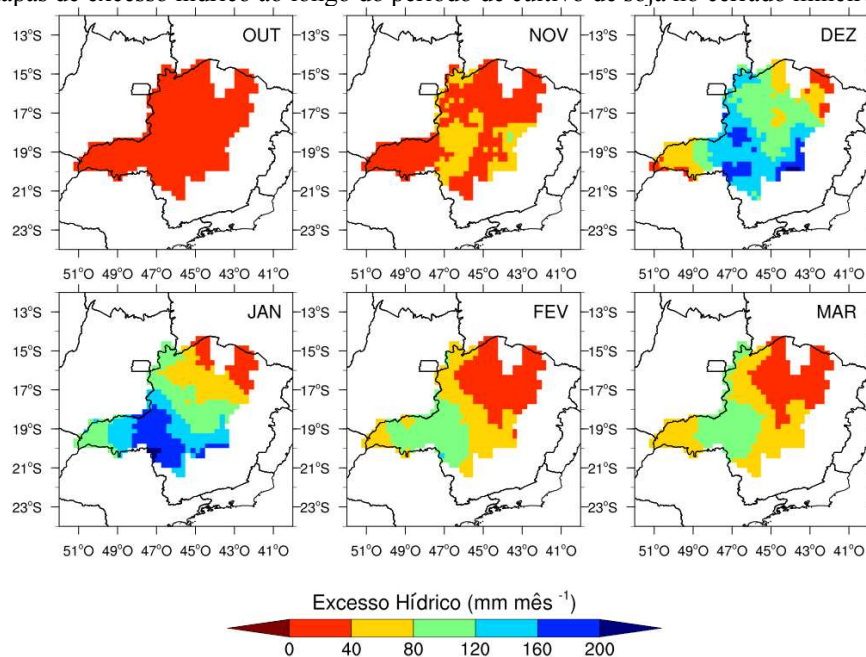
Figura 11 – Mapas de déficit hídrico ao longo do período de cultivo de soja no cerrado mineiro



Fonte: Autores.

Os mapas de excesso hídrico encontram-se na Figura 12. O excedente hídrico representa a quantidade de água que não está sendo absorvida pelas plantas e está sendo perdida na drenagem. Os meses de dezembro a março foram os que apresentaram maiores valores de excesso hídrico, chegando a alcançar valores acima de 200 mm na Região Central.

Figura 12 – Mapas de excesso hídrico ao longo do período de cultivo de soja no cerrado mineiro



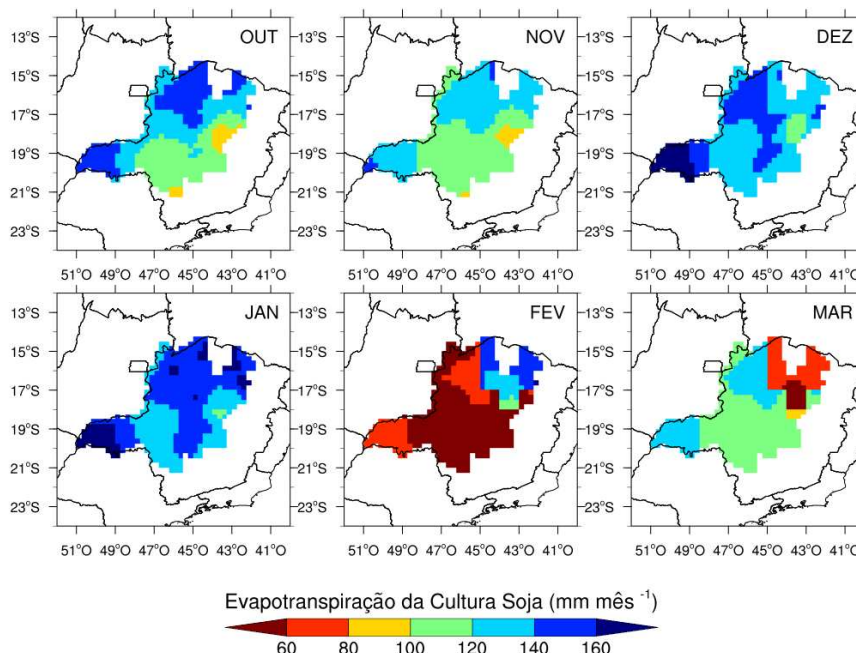
Fonte: Autores.

Os meses de início do plantio, outubro e novembro, praticamente não apresentaram excedente, com valores abaixo de 40 mm. A Região Norte também apresentou valores de excesso de água entre 0 e 40 na maioria dos meses.

3.3 INFLUÊNCIA DO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO NA SOJA

O mapa de ETC da soja (Figura 13) mostra os locais onde ocorreram o plantio de soja na Região Norte, demonstrando a diferença da necessidade hídrica da soja nos dois períodos de cultivo. Pode-se observar que a evapotranspiração da soja foi maior no mês de dezembro e janeiro em relação aos outros meses do período de cultivo da soja, com a ETC variando entre 120 a 200 mm. Esses dois meses foram também os que apresentaram maior valor de precipitação.

Figura 13 – Mapas da evapotranspiração de cultura da soja ao longo do período de cultivo de soja no cerrado mineiro



Fonte: Autores.

O enchimento de grãos ocorre entre dezembro e janeiro, e na Região Norte, onde o plantio começa em novembro, esse período se estende até fevereiro. Nesse período a planta necessita de maior quantidade de água.

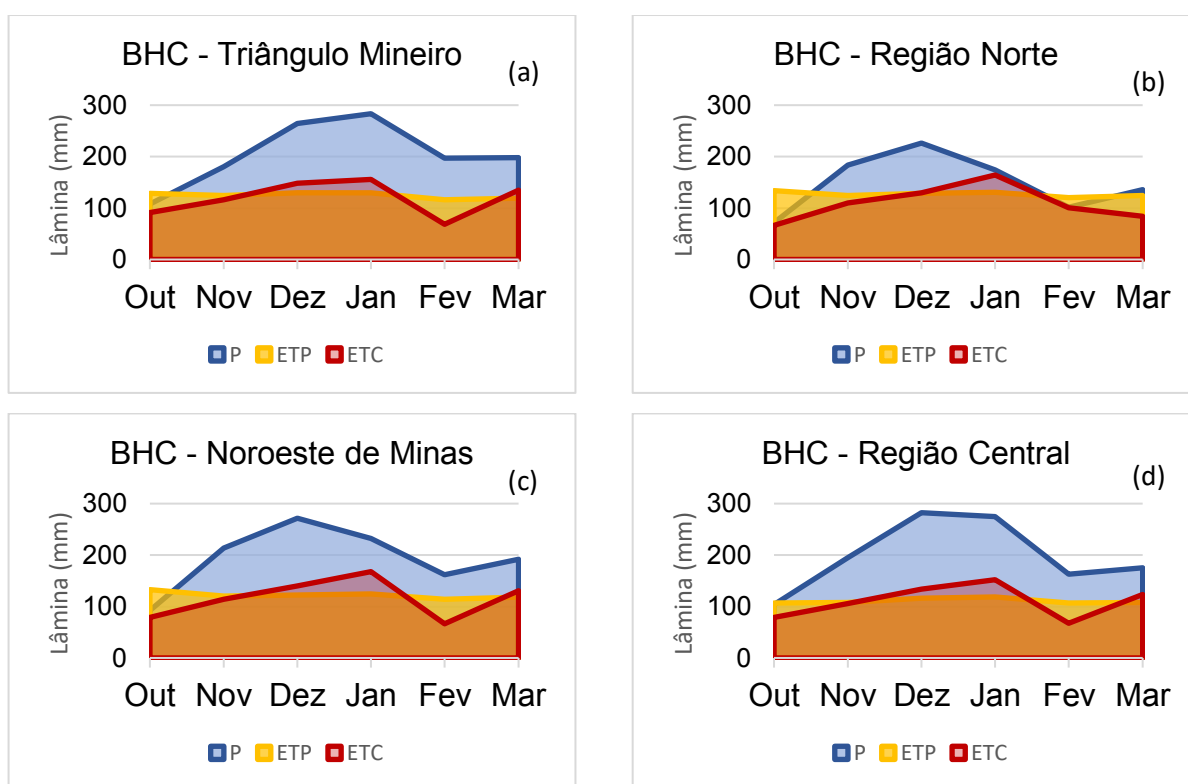
Em fevereiro e março foi possível observar que a evapotranspiração apresentou valores reduzidos entre 40 a 60 mm. Neste período a soja está sendo colhida, então o ideal é

que nesse momento a umidade do grão esteja reduzida, a fim de obter uma menor perda na colheita.

3.4 ANÁLISE DO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO REGIONAL

Os gráficos de balanço hídrico para as 4 regiões do Cerrado Mineiro são determinados nos gráficos a, b, c e d da Figura 14. Para estas 4 regiões foi calculada a média mensal dos componentes climatológicos e dos componentes do BHC. Esses gráficos demonstram como ocorre a variação de precipitação, evapotranspiração potencial e evapotranspiração real no decorrer do período de cultivo da soja.

Figura 14 – Gráficos do balanço hídrico climatológico para as regiões com climatologia similares do Cerrado Mineiro durante o semestre de produção da soja, onde P é precipitação, ETP é a evapotranspiração potencial e ETC é a evapotranspiração de cultura da soja. (a) Gráfico do BHC para a região do Triângulo Mineiro; (b) Gráfico do BHC para a Região Norte; (c) Gráfico do BHC para a região do Noroeste de Minas; (d) Gráfico do BHC para a Região Central



Fonte: Autores.

Pode-se considerar que nas 4 regiões a precipitação excedeu a ETP e ETR em praticamente toda a época de plantio, excetuando apenas o mês de outubro no Triângulo Mineiro, Região Norte e Noroeste de Minas, em que a evapotranspiração potencial foi maior

que a precipitação e a evapotranspiração real, caracterizando um déficit hídrico nesse mês. Outro período que apresentou déficit hídrico foi o mês de fevereiro na Região Norte. Esses gráficos mostram que em geral houve mais excesso hídrico do que déficit. A evapotranspiração de cultura aumentou no decorrer que a lâmina precipitada foi mais alta. Em teoria, a evapotranspiração potencial é obtida considerando que a planta está em condições ótimas para o cultivo, sendo a temperatura a única variável que influencia a produção, e quando adiciona-se o coeficiente de cultura é possível determinar se essas condições realmente satisfazem às necessidades reais da cultura. Com isso, é possível observar que a soja necessita de uma maior evapotranspiração nos meses de dezembro e janeiro, meses em que é sua fase fenológica de floração e enchimento de grãos, necessitando de uma maior troca de gases atmosféricos e de mais nutrientes do solo para o seu bom desenvolvimento.

4 CONCLUSÕES

Com o desenvolvimento do presente estudo conclui-se que o mês mais crítico do período de cultivo da soja é o mês de outubro, que apresentou déficit hídrico com valores até 100 mm. Em geral, as análises mostraram que durante os meses onde a soja necessitou de mais água (enchimento de grãos) não houve grande déficit hídrico e sim excedente hídrico, em exceção da Região Norte, que apresentou um déficit no mês de fevereiro.

Em geral, a evapotranspiração de cultura da soja é menor que a precipitação durante o seu período de cultivo, indicando que as condições climáticas do local de estudo são favoráveis à produção da soja.

5 REFERÊNCIAS

ABRAHAO, G.M.; COSTA, M.H., 2018, Evolution of rain and photoperiod limitations on the soybean growing season in Brazil: The rise (and possible fall) of double-cropping systems. **Agricultural and Forest Meteorology**, 256-257C (2018) pp. 32-45, DOI:10.1016/j.agrformet.2018. 02.031

ALLEN, R.G.; et al. **Crop evapotranspiration**. Rome: FAO, 1998. 300p. (FAO Irrigation and Drainage Paper).

BALDI, C.; BACK, C.; RODRIGUES, S. Análise Geoespacial da Dinâmica da Soja no Bioma Cerrado: 2014 a 2017., 2017.9788554011000.

BRASIL, IBGE. **Biomass**, 2019. Disponível em < <https://cnae.ibge.gov.br>>. Acesso em 10 set. 2019.

CARVALHO, H.P et al. Balanço hídrico climatológico, armazenamento efetivo da água no solo e transpiração na cultura de café. **Bioscience Journal** v. 27, n. 2, p. 221–229, 2011.

EMBRAPA. Evapotranspiração: uma revisão sobre os métodos empíricos / Diego Simões Fernandes ... [et al.]. - Santo Antônio de Goiás : **Embrapa Arroz e Feijão**, 2010. 44 p. - (Documentos / Embrapa Arroz e Feijão, ISSN 1678-9644 ; 263)

EMBRAPA. Cultivo de Soja no Cerrado de Roraima – Exigências climáticas. **Embrapa Roraima**, 2009. (Sistemas de Produção, 1ª edição).

FILHO, A.C.; COSTA, K. A expansão da soja no Cerrado - caminhos para a ocupação territorial, uso do solo e produção sustentável. **Agroicone** p. 30, 2016.

FILPI, H.E.F.C. Zoneamento edafoclimático em cenários de mudanças climáticas para a seleção de espécies em projetos de recomposição florestal em minas gerais, Brasil. 2019. 57f. **Dissertação (Mestrado em Meteorologia Aplicada)**. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 2019

KUDREV, T. G. **Água**: vida das plantas. São Paulo: Cone, 1994. 178 p.

RUDORFF, B.; RISSO, J.; et al. Análise Geoespacial da Dinâmica das Culturas Anuais no

Bioma Cerrado: 2000 a 2014. **Agrosatélite** p. 8–10, 2015.

RUVIARO, C. et al. Comportamento da soja submetida a diferentes regimes hídricos e viabilidade da irrigação suplementar na região do vale do Jaguari-RS. **Perspectiva** v. 35, n. 131, p. 79–90, 2011.

SEAPA. **Projeções do Agronegócio Minas Gerais 2017 a 2027**. p. 1–98, 2018.

SOUSA, E. S. et al. **Balanço hídrico e classificação climática de Thornthwaite para a cidade de Palmas** – TO. n. August, 2009.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. The water balance. Centerton, NJ: **Drexel Institute of Technology** - Laboratory of Climatology, 1955. 104p. (Publications in Climatology, vol. VIII, n.1)

VIANELLO, R. L.; ALVES, A.R. **Meteorologia básica e aplicações**. 2 ed. Viçosa, MG: Ed. UFV, p. 366-388. 2012

VIVAN, G.A. **Resposta Da Irrigação Suplementar Em Diferentes Cenários Para a Cultura Da Soja Na Microrregião De Passo Fundo**, Rs. p. 87, 2010. Disponível em: <http://cascavel.cpd.ufsm.br/tede/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=3399>.

Xavier, A. C., King, C. W. & Scanlon, B. R. **Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013)**. Int. J. Climatol. n/a-n/a (2015). doi:10.1002/joc.4518