**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Variabilidade espaço-temporal da precipitação e efeito sobre a
produtividade da soja**

Marco Antonio Zanatta

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia
de Sistemas Agrícolas

**Piracicaba
2019**

Marco Antonio Zanatta
Engenheiro Agrônomo

Variabilidade espaço-temporal da precipitação e efeito sobre a produtividade da soja

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011.

Orientador:

Prof. Dr. **FELIPE GUSTAVO PILAU**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Zanatta, Marco Antonio

Variabilidade espaço-temporal da precipitação e efeito sobre a produtividade da soja / Marco Antonio Zanatta. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. Piracicaba, 2019.

52 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Chuva 2. Agricultura de precisão 3. *Glycine max* L. 4. Modelagem I.
Título

DEDICATÓRIA

*Esposa Elaine, irmã
Maria Luíza e minha mãe Sonia*

AGRADECIMENTOS

Aos amigos Renato Chalita e José Carlos Salgado pelo depoimento e apoio no exame para ingresso no Mestrado.

Meu Professor Dr. Felipe Gustavo Pilau, orientador e incentivador para toda jornada.

Ao meus filhos pela compreensão nos momentos que fiquei dedicado aos estudos, trabalhos no campo experimental durante feriados e finais de semana.

Minha irmã pela orientações e incentivos durante toda jornada de estudos.

Aos membros do Grupo GEPEMA-AGRIMET, pelo fundamental apoio nas atividades de campo e pela amizade, em especial ao Daniel Alves da Veiga Grubert e Evandro.

Aos professores do PPG Engenharia de Sistemas Agrícolas pelos ensinamentos.

Aos funcionários do LEB/ESALQ pelos serviços e apoio prestados durante o experimento.

SUMÁRIO

RESUMO	6
ABSTRACT	7
1. INTRODUÇÃO.....	9
2. OBJETIVO GERAL.....	11
2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1. PRECIPITAÇÃO PLUVIAL.....	13
3.2. DISPONIBILIDADE HÍDRICA	15
3.3. MODELOS DE ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA	17
3.4. A CULTURA DA SOJA	18
3.4.1. <i>Condicionantes meteorológicos</i>	20
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	23
4.1. LOCAL DO EXPERIMENTO	23
4.2. MEDIDA ESPAÇO-TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO	23
4.3. OUTROS ELEMENTOS METEOROLÓGICOS	24
4.4. BALANÇO HÍDRICO DA CULTURA	25
4.5. MODELO AGROMETEOROLÓGICO.....	26
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5.1. VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL MENSAL DA PRECIPITAÇÃO.....	29
6. CONCLUSÃO.....	43
REFERÊNCIAS	45

RESUMO

Variabilidade espaço-temporal da precipitação e efeito sobre a produtividade da soja

O Brasil é um dos maiores produtores de grãos, considerado como celeiro mundial. Para se manter na liderança da produção agrícola, em consonância com anseios da sociedade, busca continuamente praticar uma agricultura sustentável no âmbito da preservação dos recursos naturais, mantendo-se economicamente viável. Para isso é fundamental melhorar a compreensão da climatologia e de como os elementos meteorológicos influenciam a produção agrícola. Com base nisso, o objetivo do trabalho foi avaliar a variabilidade espaço-temporal da precipitação pluvial e umidade do solo na produtividade atingível (Y_a) da soja. Para isso foi instalada uma malha com nove pluviômetros distantes 200 metros em si, totalizando uma área de 36,0 ha monitorados, a fim de identificar através de simulações o efeito sobre a produtividade da cultura da soja. Com o modelo agrometeorológico foi possível determinar a perda produtiva relativa ($Y_{g_{rel}}$, em %) causada por deficiência hídrica para cada data de semeadura simulada e pontos de amostragem da chuva. Em relação ao ciclo simulado com início em 15 de novembro de 2016, a distribuição temporal regular da chuva que determinou baixos valores de deficiência hídrica ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura da soja resultou em $Y_{g_{rel}}$ médio de 6,8%. Perdas produtivas maiores foram simuladas para as duas datas de semeadura mais tardias (15 de dezembro de 2016 e 15 de janeiro de 2017), com médias de 16,8% e 17,2%. A redução dos volumes de chuva em relação ao ciclo, em especial coincidindo com os subperíodos mais críticos da cultura à deficiência hídrica, além de acentuar as perdas produtivas expôs o efeito espacial da variabilidade de chuva.

Palavras-chave: Chuva; Agricultura de precisão; *Glycine max* L.; Modelagem

ABSTRACT

Spatio-temporal variation of precipitation and its effect on soybean yield

Brazil is one of the largest grain producers, considered as a world granary. In order to keep its leadership in agricultural production, focus on the society aspirations, it continuously seeks to practice sustainable agriculture in the context of the preservation of natural resources, while remaining economically viable. For this, it is fundamental to improve the understanding of climatology and how meteorological elements influence agricultural production. Based on this, the objective of the study was to evaluate the spatial-temporal variability of rainfall and soil moisture in the attainable yield (Y_a) of soybean. For this, a mesh with nine pluviometers distant 200 meters was installed, totaling an area of 36.0 ha monitored, in order to identify through simulations, the effect on the productivity of the soybean crop. With the agrometeorological model it was possible to determine the relative productive loss (Y_{grel} , In%) caused by water deficiency for each simulated seeding date and rain sampling points. In relation to the simulated cycle beginning on November 15, 2016, the regular rainfall distribution that determined low water deficiency throughout the soybean development cycle resulted in Y_{grel} of just 6.8%. Larger productive losses were simulated for the two later sowing dates (December 15, 2016 and January 15, 2017), with averages of 16.8% and 17.2%. The reduction of the rainfall volumes in relation to the cycle, especially coinciding with the most critical subperiods of the crop to the water deficit, increases the productive losses and exposes the spatial effect of rainfall variability.

Keywords: Rainfall; Precision agriculture; *Glycine max* L.; Modeling

1. INTRODUÇÃO

A agricultura é uma atividade que depende básica e diretamente da chuva. O sistema, denominado agricultura de sequeiro, perfaz grande parte de toda a produção agrícola do país. Em cada talhão de produção podem ser encontradas subunidades com distintas características químicas e físicas do solo, biológicas e microbiológicas e até mesmo distinções meteorológicas. Esse conjunto de elementos impõem diferentes potenciais produtivos, mesmo que as práticas de manejo sejam aplicadas uniformemente. Vislumbrar tudo isso e ponderar sobre a influência de cada um desses elementos é a base conceitual da Agricultura de Precisão.

São numerosos os trabalhos que tentam relacionar a variabilidade produtiva aos caracteres de solo, encontrando normalmente coerências entre as variáveis (CAMBARDELLA et al., 1994; MOTOMIYA et al., 2011), mas jamais explicando completamente a causa das desigualdades espaciais de produção. Outras pesquisas recaem sobre aspectos bióticos (FREITAS et al., 2016; BELAN et al., 2018), também com parcial correlação entre causa-efeito. A grande lacuna científica até aqui está na avaliação da variabilidade espacial e temporal dos elementos meteorológicos dentro da unidade produtiva. A lacuna deve-se em muito pela dificuldade de adquirir as informações. Trata-se de um exploratório contínuo, capaz de gerar uma quantidade grande de dados, que exigem trabalho intenso de análise.

A maneira mais corriqueira de analisar o efeito climático sobre a produção agrícola está associada no uso de modelos de crescimento de plantas. São ferramentas, simples ou robustas, capazes de identificar o efeito da variação de um ou mais elementos meteorológicos sobre a produtividade (JONES et al., 2003; KEATING et al., 2003). De forma geral, os modelos são capazes de identificar os níveis produtivos tidos como potencial (Y_o) e atingível (Y_a).

O Y_o é definido como a máxima produção de um material genético bem adaptado à região, sem restrição hídrica, nutricional ou fitossanitária, portanto dependente apenas da disponibilidade de energia radiante, temperatura do ar e fotoperíodo, mantida a concentração de CO_2 atmosférico constante. A Y_a descreve o quanto esse material genético produziria caso enfrenta-se deficiência hídrica parcial ou plena no ciclo (VAN ITTERSUM et al., 2013).

Vários trabalhos demonstram o uso de modelos para determinar Y_o e/ou Y_a para as mais variadas culturas e regiões agrícolas do globo. Entretanto, em sua quase totalidade, uma única simulação, que usa de apenas um único conjunto de dados de solo/clima/planta (dados

de entrada do modelo), é realizada, e seus resultados acabam por considerar a unidade de produção como homogênea, ou seja, desconsiderando os preceitos da Agricultura de Precisão (THORP et al., 2008).

Este trabalho tem como objetivo realizar uma análise agrometeorológica com foco na Agricultura de Precisão, identificando a variabilidade espacial e temporal da precipitação pluvial dentro de uma área e, com base em modelagem, identificar o efeito sobre a variabilidade de produção.

2. OBJETIVO GERAL

Avaliar a variabilidade espacial e temporal da precipitação pluvial dentro de uma área e, com base em modelagem, identificar o efeito sobre a variabilidade produtiva de soja.

2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Caracterizar a variabilidade espaço-temporal da precipitação em uma área de 36 ha.

Quantificar a variabilidade espaço-temporal da deficiência hídrica simulada para a cultura da soja em três datas de semeadura.

Quantificar a variabilidade espaço-temporal da perda produtiva relativa para a cultura da soja em três datas de semeadura.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. PRECIPITAÇÃO PLUVIAL

A precipitação varia consideravelmente no espaço e no tempo. Os sistemas agrícolas evoluíram em resposta a isso, mas na maioria das regiões do mundo a variabilidade da precipitação continua a ser uma das principais fontes de riscos para a agricultura. Eventos extremos, a exemplo de granizo, chuvas torrenciais e principalmente longas estiagens levam regiões inteiras a terem problemas econômicos e de segurança alimentar (KEPPENNE, 1995).

No Brasil, com mais de 70 milhões de hectares de área produtiva (CONAB, 2019), onde a agricultura/agronegócio representam quase $\frac{1}{4}$ do PIB (IBGE, 2016), dados de pesquisa assinalam que a variabilidade da produção decorre especialmente das condições meteorológicas (FARIAS; NEUMAIER; NEPOMUCENO, 2009).

Nas áreas agrícolas sabe-se que a produção das culturas não é homogênea e varia tanto no tempo quanto no espaço. Amado et al. (2005) afirmam que em um mesmo cultivo encontram-se subáreas com diferentes potenciais produtivos, indicando diferentes níveis de qualidade. Isso pode ocorrer mesmo que as áreas tenham sido manejadas de maneira uniforme.

Tal como a variabilidade espacial e temporal da física e química do solo e da incidência de pragas e doenças, que causam a variabilidade produtiva (MOTOMIYA et al., 2011; SANTI et al., 2012), os elementos meteorológicos, interagindo com a vegetação, também apresentam variabilidade espaço-temporal, decisivamente interferindo no crescimento, desenvolvimento e produtividade (RAY et al., 2015).

As relações entre chuva e produtividade agrícola no Brasil foram e seguem sendo analisadas (BERLATO; FONTANA, 1999; BERLATO; FARENZENA; FONTANA, 2005; DA SILVA et al., 2009; BRAIDO; TOMMASELLI, 2010; BARBOSA; LAKSHMI KUMAR, 2016; MARTORANO et al., 2017). De forma geral, aumentos pontuais de precipitação pluvial tendem a favorecer os cultivos. Ao contrário, as estiagens provocam perdas produtivas consideráveis (QUIRING; PAPAKRYIAKOU, 2003; YU et al., 2014). Nesse contexto, o monitoramento da variabilidade temporal e espacial da precipitação pluvial e outras variáveis ambientais são essenciais ao acompanhamento e gerenciamento das safras agrícolas.

Com nove pluviômetros distantes 166,7 m entre si, formando uma malha amostral quadrangular com $0,25 \text{ km}^2$, Jensen e Pedersen (2005) analisaram a variabilidade espacial da

chuva em Arhus, Dinamarca no ano de 2003. Nos 65 dias de medições a magnitude da variação dentro da área (500m x 500m) foi considerada bastante elevada. Ao separar as chuvas em eventos, um deles com média (9 medidas) de 5,4 mm chegou a apresentar um coeficiente de variação de 80,4%.

Esse mesmo conjunto de dados (JENSEN; PEDERSEN, 2005), foi reanalisado por Pedersen et al. (2010), incorporando informações coletados durante o verão e outono de 2007 e 2008 novamente em Arhus, Dinamarca. Com uma base de informações mais robusta foi confirmada a significativa variabilidade espacial da precipitação mesmo em áreas pequenas, de 0,25 km². O coeficiente de variação (CV) encontrado ficou entre 1 e 26% para dados coletados entre 2007-2008, chegando a superar o limite superior em alguns casos. Resultados mostraram a redução dos valores de CV com o aumento do volume total precipitado, indicando que a maior variabilidade ocorre quando o total precipitado foi inferior a 5,0 mm.

Graef e Haigis (2001) analisaram a variabilidade da precipitação na região semi-árida do Níger, por considerá-la um dos fatores mais limitantes para agricultura local. Os resultados mostram que a precipitação pode variar consideravelmente, mesmo dentro de alguns quilômetros de distância e em diferentes escalas de tempo, o que significa que os rendimentos das colheitas são muito imprevisíveis. Os dados de precipitação da escala de pesquisa para a região sudoeste do Níger, de 1989, mostrou que diferenças anuais de 200-300 mm podem ocorrer dentro de um raio de apenas 100 km. O mesmo trabalho avaliou a variabilidade espacial e temporal dos eventos de chuva a partir da medida de uma rede de 18 pluviômetros que recobriam área de apenas 500,0 ha. Dos eventos selecionados para esse local um caracterizou-se como de alta pluviosidade com gradiente de precipitação distinto (17 a 40 mm acumulados), enquanto outro, apesar da baixa precipitação, também apresentou alta variabilidade (2 a 8 mm). Ambos os casos indicaram que quantidade de precipitação, bem como a sua variabilidade dependem do tipo de tempestade e da localização dentro dela.

Tokay et al. (2014) realizaram um estudo sobre a variabilidade espacial da precipitação na península de Delmarva, entre o leste da Virgínia e no nordeste da Carolina do Norte, EUA. A rede consistiu em 11 locais com duplas ou trios de pluviômetros instalados, variando de 1 a 150 km de distância de separação entre os pontos. Para o período de medições as correlações (coeficiente de Pearson, r) entre os dados de cada ponto ficaram abaixo de 0,5, 0,2 e 0,1 nas distâncias de 10, 40 e 80 km entre pontos de medida, respectivamente. A maioria das correlações pareadas foi entre 20 e 60 km de distância entre pontos de medida e, nesse caso, a diferença máxima na correlação a uma determinada distância foi inferior a um r de 0,15.

Para o Brasil, de forma geral a variabilidade espacial das chuvas se acentua com predomínio de chuvas convectivas. As distribuições espaciais mais uniformes ocorrem para chuvas frontais, até mesmo para longas distâncias (STOL, 1972; CAMARGO et al., 2005).

Ao analisar a variabilidade espacial e temporal de dados diários de temperatura do ar máxima, média e mínima e da precipitação pluvial no Estado de São Paulo, utilizando dados de 19 estações agrometeorológicas do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), em um período total de 20 anos (1981/2000), sendo Campinas considerada a estação central e com estação distante até 436 km, Camargo et al. (2005) identificaram os limites máximos de distâncias admitidos para explicar mais de 90% da variação entre locais para precipitação. Os resultados foram de 12 km para o verão, 20 km para o outono e primavera e 27 km para o inverno. A maior variabilidade espacial das precipitações no verão decorre do predomínio de chuvas convectivas.

Bega et al. (2005) avaliaram os dados históricos de cinco pluviômetros instalados em Pindorama, SP, cujas distâncias entre si variam de 257 a 3900 metros. A partir da análise de correlação para determinar a variabilidade espacial constatou-se que a medida que a distância entre os pluviômetros aumentou, o coeficiente de correlação dos dados de chuvas por eles medidos diminuiu, revelando que a precipitação pluvial depende das posições onde se localizam os pluviômetros. Essa dependência espacial nas precipitações pluviais se acentua nos meses de predomínio de chuvas convectivas, à medida que aumenta a distância entre os pluviômetros.

Já Reichardt et al. (1995), concluíram que os dados de chuva não estão correlacionados com a distância entre os pontos de observação e também que a variabilidade independe do tipo de chuva. Este estudo analisou a variabilidade diária de chuva em uma escala local (1.000 ha), em Piracicaba, ao longo de um ano.

3.2. DISPONIBILIDADE HÍDRICA

A variabilidade espaço-temporal da precipitação pluvial acaba determinando heterogeneidade também da umidade do solo. Nesse caso é relativamente complexo descrever os processos ou fatores dominantes que podem influenciar na variabilidade espaço-temporal da umidade do solo, devido à grande heterogeneidade e a diversidade das condições ambientais envolvidas, como por exemplo a diversidade de cultivos e diferentes estruturas de solo e revelo, precipitação local e também os manejos agrícolas.

Através de estudo proposto por Ávila, Mello e Silva (2010), pode-se verificar a variabilidade espacial da umidade superficial do solo ao longo do tempo, em diferentes situações de uso do solo na região da Serra da Mantiqueira, MG. Os autores observaram que os pontos escolhidos para monitoramento diferiram em relação aos períodos seco e chuvoso, além de verificar diferenças da estabilidade temporal em função do uso do solo. Vieira et al. (2010), num estudo semelhante, observaram variações no intervalo entre amostragens para caracterização da variabilidade espacial e da estabilidade temporal do conteúdo de água no solo como função do seu uso.

Segundo Mello et al. (2011), na região da Serra da Mantiqueira (MG), e Western et al. (2004), em uma bacia hidrográfica com características semiáridas na Austrália, apontaram que o padrão da umidade do solo é regido em função do período analisado, com influência importante das condições edafoclimáticas.

Assim, de acordo com Moore, Burch e Mackenzie (1988), durante o período úmido, quando a precipitação excede a evapotranspiração, o padrão é dominado pelo movimento lateral da água, tanto na superfície quanto na subsuperfície, sendo a topografia o fator dominante. No entanto, Hébrard et al. (2006), verificaram que no período seco, quando a evapotranspiração excede continuamente a precipitação, as condições de demanda atmosférica são dominantes do padrão espacial do conteúdo de água no solo, sendo esse padrão reflexo das diferenças de uso e das classes de solo.

Conforme Oliver et al. (2009), na Austrália Ocidental a disponibilidade hídrica (AW) é uma das principais responsáveis por quebras produtivas. Segundo os autores, a AW é a diferença entre os limites superior (Capacidade de Campo - CC) e inferior (Ponto de Murcha Permanente (PMP) de armazenagem de água no solo, determinados pela tensão com a qual a água é mantida dentro da matriz do solo e a capacidade da cultura extrair essa água para a profundidade do enraizamento da cultura. O tipo de solo (teor de argila, estrutura) afeta a CC, pois determina a capacidade de retenção de água do solo, enquanto o tipo de solo, a profundidade do solo e as restrições químicas afetarão a capacidade da cultura de crescer raízes e extrair água. A variação espacial na AW tem sido associada à variação no rendimento das culturas em condições de alta fertilidade na Austrália (WONG; ASSENG, 2006) e regiões dos Estados Unidos (MULLA et al., 1992; MORGAN; NORMAN; LOWERY, 2003).

De acordo com Paz et al. (1998) diversos trabalhos tentaram correlacionar o rendimento da soja em pequenas seções de campos ao tipo de solo, relevo, fertilidade e outros fatores na tentativa de caracterizar a variabilidade de rendimento, com sucesso limitado. Ao acrescentarem um modelo de crescimento de culturas orientado a processos (CROPGRO-

Soybean) dedicado a caracterizar a variabilidade espacial da produtividade da soja e testar hipóteses relacionadas às causas da variabilidade de produção, o modelo apontou que a variabilidade no estresse hídrico corresponde bem à variabilidade final da produção de soja dentro de um campo. Na melhor das hipóteses, o estresse hídrico explicou 69% da variabilidade no rendimento de todas as grades ao longo de três anos. respectivamente.

3.3. MODELOS DE ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA

Segundo Jones et al. (2003) os modelos de culturas são amplamente utilizados para analisar os impactos da variabilidade climática nos sistemas agrícolas. Com base nesse preceito, capazes de prever o efeito da variabilidade espaço-temporal de elementos meteorológicos sobre a variabilidade espaço-temporal do crescimento, desenvolvimento e produtividade de uma cultura agrícola.

Uma alternativa simples para quantificar o balanço hídrico do solo (THORNTHWAITE; MATHER, 1955) e normalizar a produtividade por meio de penalizações por deficiência hídrica (DOORENBOS; KASSAM, 1994) também mostra-se capaz de quantificar o efeito da água sobre o rendimento das culturas agrícolas (ASSAD et al., 2007; BATTISTI et al., 2013). Com uso de modelos mais robustos, a exemplo dos incluídos nas plataformas DSSAT ou APSIM, Asseng et al. (1998) e Sau et al. (2004) quantificaram efeito das condições meteorológicas sobre cultivos agrícolas, inclusive com simulações de cenários climáticos futuros (LUDWIG; ASSENG, 2006; NELSON et al., 2014). Entretanto, essas pesquisas consideraram os elementos meteorológicos como espacialmente homogêneos, rejeitando a variabilidade produtiva das culturas vislumbradas em mapas de colheita.

Essa foi uma proposta de Thorp et al. (2008) ao desenvolverem um sistema de suporte à decisão (DSS) chamado Apollo, proposto para auxiliar os pesquisadores no uso de um modelo de crescimento de plantas - DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) como nova ferramenta para análise de conjuntos de dados de agricultura de precisão. O método permitiu que, com o modelo DSSAT fosse possível entender as causas da variabilidade espacial da produtividade, conduzir análise de intervalo de rendimento para fatores que limitam a produtividade e estimar as consequências econômicas da mudança da gestão uniforme para a variável espacial.

Oliver, Robertson e Wong (2010) apresentam uma abordagem similar para integrar o conhecimento do agricultor, ferramentas de agricultura de precisão e análise com base na modelagem de simulação de culturas para avaliar as opções de manejo para fragmentos com

baixo desempenho em campos de cultivo na Austrália Ocidental. Conforme autores o conhecimento da distribuição e identificação do rendimento da cultura, tipo de solo e água disponível para planta (AW) permite a exploração da variação espacial para manejo específico do local (nutriente, melhoria, mudança no sistema de cultivo, etc.). Em cinco dos nove campos, a pesquisa identificou oportunidades para aumentar o potencial de produção limitado pela água através da melhoria de uma restrição de solo identificada, via calagem para aumentar a exploração de raízes de camadas ácidas ou manejo para remover a compactação de camadas de solo que impedem o aprofundamento do sistema radicular.

3.4. A CULTURA DA SOJA

A soja (*Glycine max* (L) Merrill) originária da região noroeste da China (Manchúria) foi introduzida no Brasil precisamente na Bahia (1882), tomando proporções econômicas em 1949 aparecendo com estatística mundial com a produção de 25 mil toneladas e 1960 estabeleceu como uma cultura de grande importância econômica atingindo 1 milhão de toneladas (FARIAS; NEUMAIER; NEPOMUCENO, 2009). Conforme Conab (2019) na safra (2017/18) a área plantada com soja chegou aos 35 milhões de hectares, com produção de 119 milhões de toneladas.

O ciclo da cultura é descrito por fases, estádios e subperíodos (FEHR; CAVINESS, 1977). Os estádios vegetativos são designados pela letra V, enquanto os reprodutivos designados pela letra R. Com exceção dos estádios VE (emergência) e VC (cotilédone), as letras V e R são seguidas de índices numéricos que identificam estádios específicos (Tabela 1).

A partir do VC (Tabela 1), as subdivisões dos estádios vegetativos são numeradas, sequencialmente, V1, V2, V3, V4, V5, V6,...,Vn, onde n é o número de nós acima do nó cotiledonar, com folha completamente desenvolvida. A letra R, que representa os estádios reprodutivos, acrescido de numeral descreve detalhadamente o florescimento (R1 e R2), desenvolvimento da vagem (R3 e R4), desenvolvimento do grão (R5 e R6) e maturação da planta (R7 e R8). As cultivares de soja, em relação ao hábito de crescimento, são descritas como determinadas (crescimento vegetal paralisado na ocasião da floração) ou indeterminadas (contínuo crescimento vegetal).

Em razão da sensibilidade da soja ao fotoperíodo, a adaptabilidade de cada cultivar varia com a latitude, ou seja, à medida que se desloca o seu cultivo em direção ao sul ou ao

norte. Portanto, cada cultivar tem uma faixa limitada de adaptação em função do seu Grupo de Maturidade Relativa (ALLIPRANDINI et al., 2009).

Tabela 1. Estádio fenológicos da cultura da soja conforme Fehr e Caviness (1977).

Período	Estádio	Descrição
Vegetativo	VE	Cotilédones acima da superfície do solo
	VC	Cotilédones ompletamente aberto
	V1	Folhas unifolioladas completamente desenvolvida
	V2	Primeira folha trifoliolada completamente desenvolvida
	V3	Segunda folha trifoliolada completamente desenvolvida
	Vn	Ante-enésima folha trifoliolada completamente desenvolvida
Reprodutivo	R1	Início do florescimento- Uma flor aberta em qualquer nó do caule
	R2	Florescimento pleno- Uma flor aberta,num dos 2 ultimos nós do caule,com folha completamente desenvolvida.
	R3	Início da formação da vagem- vagem com 5 mm de comprimento, num dos 4 últimos nós do caule,com folha completamente desenvolvida
	R4	Vagem completamente desenvolvida-Vagem com 2 cm de comprimento, num dos 4 últimos nós do caule, com folha completamente desenvolvida.
	R5	Início do enchimento do grão - Grão com 3 mm de comprimento em vagem, num dos 4 ultimos nós do caule, com folha completamente desenvolvida
	R6	Grão cheio ou completo- vagem contendo grãos verdes, preenchendo as cavidades da vagem de um dos 4 últimos nós do caule, com folha completamente desenvolvida
	R7	Início da maturação - uma vagem normal no caule,com coloração madura
	R8	Maturação plena - 95% das vagens com coloração de Madura
Obs; Caule significa a haste principal da planta;ultimos nós se referem aos últimos nós superiores; uma folha é considerada completamente desenvolvida quando as bordas dos trifólios da folha seguinte (acima) não mais se tocam.		

Adaptado de Farias, Neumaier e Nepomuceno (2009).

Dessa forma, a produção da soja no Brasil é descrita por macrorregiões que alojam as cultivares de diferentes GMR (Figura 1). Cada uma das cinco Macrorregiões (Figura 1) foi subdividida em regiões Edafoclimáticas, totalizando 20 diferentes unidades. O município de Piracicaba (SP) está incluso na região Edafoclimática 203.

Figura 1. Macroregiões sojícolas no Brasil. Fonte: (KASTER; FARIAS, 2011). Elaboração SPA/MAPA.

3.4.1. Condicionantes meteorológicos

Estresses climáticos como estiagem, chuva excessiva, temperaturas extremas e baixa disponibilidade de radiação solar podem reduzir significativamente a produtividade das lavouras e restringir os locais de cultivo, as estações e os solos onde a soja poderia ser cultivada. Temperatura, fotoperíodo e disponibilidade de água são os elementos mais importantes que afetam o crescimento e a produtividade da cultura (CONSTABLE; ROSE, 1988; FARIAS; NEUMAIER; NEPOMUCENO, 2009).

A soja melhor se adapta as temperaturas entre 20°C e 30°C, sendo que a temperatura ideal para germinação e a emergência é de 25°C (FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007). Para a produção de sementes de soja, com qualidades fisiológica e sanitária, recomendam-se regiões com temperaturas do ar mais amenas, inferiores a 22°C, durante a fase de maturação da cultura (COSTA et al., 1994). No florescimento altas temperaturas podem adiantar o florescimento. Isso, somado ao déficit hídrico, pode ocasionar redução de porte aéreo e consequentemente da produtividade. Nos estádios de maturação altas temperaturas aceleram o processo, especialmente quando combinado com baixa umidade do ar, causando até mesmo o enrugamento dos grãos.

Outro importante componente é a radiação solar, que além de fornecer energia luminosa para a fotossíntese também fornece sinais ambientais para uma gama de processos fisiológicos da soja (SHIBLES; WEBER, 1966). Nesse contexto, além da intensidade da radiação, a duração e a qualidade do espectro luminoso são determinantes para respostas

morfológicas e fenotípicas marcantes, tais como estatura da planta, indução ao florescimento e ontogenia (EGLI; BRUENING, 2002).

Mathew et al. (2000) demonstrou que um aumento da disponibilidade da radiação solar na fase vegetativa e início do florescimento proporcionou aumento de produtividade, 144 e 252%, respectivamente. Tais resultados positivos devem-se, principalmente, ao maior número de vagens por planta. O aumento da disponibilidade de radiação solar no início da formação das vagens também resultou no acréscimo do tamanho da semente, de 8 a 23%, resultando de 32 até 115% de aumento em produtividade.

O fotoperíodo está estreitamente relacionado à adaptação das cultivares a uma determinada região. Apesar de o melhoramento genético ter adaptado a soja a baixas latitudes, tornando os materiais genéticos quase insensíveis em função do longo período de juvenilidade (HARTWIG; KIIHL, 1979), o florescimento, na grande maioria das cultivares ainda é determinado por esse elemento meteorológico, num processo acentuado ou não pela temperatura.

Por esta razão, a soja é considerada Planta de Dias Curtos (PDC), com resposta quantitativa e não absoluta, isto é, o florescimento ocorre de qualquer forma, mais rapidamente a medida que os dias se tornam mais curtos e, atrasa, progressivamente ao inverso. Os cultivares possuem fotoperíodos críticos distintos, ficando, em média, ao redor de 13 a 14 h (FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007).

Ao redor de 90% do total da soja (biomassa) é água, e a água atua em todos os processos fisiológicos e bioquímicos da planta, funcionando como solvente, transportando gases, minerais e outros solutos na planta, atuando como um regulador térmico, atuando no resfriamento e manutenção do calor (FARIAS; NEUMAIER; NEPOMUCENO, 2009). As necessidades de água pela cultura da soja aumentam gradualmente com o desenvolvimento das plantas, com um pico de 6 a 8 mm dia⁻¹ durante o enchimento de grãos (BERLATO; MATZENAUER; BERGAMASCHI, 1986; OLIVEIRA et al., 2016). Segundo Farias, Neumaier e Nepomuceno (2009), nos trabalhos de zoneamento de risco climático, os coeficientes de cultura (Kc) empregados e, que melhor expressaram o consumo hídrico em cada fase fenológica da cultura, foram adaptados daqueles obtidos por Berlato, Matzenauer e Bergamaschi (1986) e Doorenbos e Kassam (1979), resultando nos seguintes valores por período fenológico: 0,56 (S-V2); 1,21(V2-R1); 1,50 (R1-R5/R6) e 0,90 (R6-R8).

O efeito da deficiência de água na produção depende do tempo de ocorrência, da severidade e do material genético (CUNHA et al., 1998; PURCELL; SPECHT, 2004). Caso a deficiência coincida com os estádios de germinação e emergência, o estande de planta é

reduzido. Em floração a falta de água provoca o abortamento de flores ou inibe a antese, enquanto sua ocorrência nos estádios de enchimento de grãos afeta o peso dos grãos e, conseqüentemente, a produção (BERLATO; MATZENAUER; BERGAMASCHI, 1986; FAGERIA, 1989).

Berlato (1987) relacionou o rendimento de grãos da soja com o consumo relativo de água para diversas localidades do RS. Concluiu que o consumo relativo de água explicou 89, 86 e 85% da variação do rendimento de grãos de soja dos grupos de maturação precoce, médio e tardio, respectivamente, durante o período crítico da cultura (do início da floração até o início do enchimento de grãos R1-R5).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. LOCAL DO EXPERIMENTO

A pesquisa foi realizada em uma área experimental da Fazenda Areão - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo (ESALQ/USP), no município de Piracicaba, SP. O clima local é o Cwa – tropical de altitude (Köppen) (STAPE et al., 2014), com inverno seco e temperatura média do mês mais quente de 22°C. De acordo com os dados históricos do Posto Meteorológico “Professor Jesus Marden dos Santos” da ESALQ - USP a precipitação média anual é de 1.278 mm. As classes de solos predominantes no local (Figura 2) eram Nitossolo Vermelho distroférico (NVd), Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico (PVAe) e Argissolo Vermelho distrófico (PVD) de acordo com a classificação brasileira de solos (EMBRAPA, 2013).

Figura 2. Mapa de solos da ESALQ (Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”). Fonte: Departamento de Ciência do solo, ESALQ/USP.

4.2. MEDIDA ESPAÇO-TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO

Para quantificar a variabilidade espacial e temporal da precipitação na área experimental foram utilizados nove pluviômetros modelo “Tipping Bucket”, marca Vaisala, com superfície de coleta de 380 cm². Cada pluviômetro foi posicionado a 1,5 m acima da superfície, nivelado, e ligado a um sistema de aquisição de dados marca/modelo Log Chart II, armazenando medidas a cada minuto. Os nove sensores foram espacialmente distribuídos com

objetivo de formar uma malha amostral com área de abrangência de 36,0 ha. Para tanto uma distribuição quadrangular foi adotada, com distância de 200 m entre pontos de medida (Figura 3). Em função das dimensões da área experimental e interferência da vegetação o ponto 7 (P7) foi deslocado, mas sem alterar a distância entre pluviômetros.

Figura 3. Distribuição dos nove pluviômetros formando a malha amostral quadrangular com 36,0 ha.

A variabilidade espaço-temporal da precipitação foi analisada nas escalas mensal, de Novembro de 2016 a mês de Maio de 2017), a fim de comparar o período analisado com dados históricos locais, e também na escala diária, ao longo de três períodos de 120 dias, a partir das datas 15 de novembro de 2016, 15 de dezembro de 2016 e 15 de janeiro de 2017, períodos coincidentes com épocas de produção de soja em Piracicaba (SP).

4.3. ELEMENTOS METEOROLÓGICOS

Além da precipitação, dados de temperatura e umidade do ar, velocidade do vento (2m), radiação solar global (Q_g) e saldo de radiação (R_n) também foram coletados. As medidas dessas variáveis foram feitas no Posto Meteorológico “Professor Jesus Marden dos Santos” da ESALQ - USP, distante 2,25km do centro da área experimental. Dados meteorológicos históricos (1917-2018) do “Professor Jesus Marden dos Santos” da ESALQ - USP também foram usados.

4.4. BALANÇO HÍDRICO DA CULTURA

Para o cálculo do balanço hídrico (BH cultura) em cada ponto de medição (Figura 2) da área foi usada uma metodologia adaptada de Thornthwaite e Mather (1955). Os dados meteorológicos exigidos pelo modelo foram a precipitação (P) e os necessários para a estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o). Para o cálculo da ET_o foi utilizado o modelo de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998) (Equação 1).

$$ET_o = \frac{0,408s(Rn-G) + \frac{\gamma 900U_2(es-ea)}{T+273}}{s + \gamma(1+0,34U_2)} \quad (1)$$

onde: Rn é o saldo de radiação (MJ m⁻² d⁻¹), G o fluxo de calor no solo (MJ m⁻² d⁻¹) considerado como zero, es e ea respectivamente as pressões saturante e parcial de vapor d'água (KPa), T a temperatura média do ar (°C) e U₂ a velocidade do vento medida a 2m de altura da superfície (m s⁻¹).

Para o balanço hídrico da cultura a ET_o foi convertida em evapotranspiração de cultura (ET_c), a partir da ponderação realizada pelo coeficiente de cultura (K_c), no caso definido em função do desenvolvimento da cultura (MARTORANO, 2007) (Eq. 2).

$$K_c = -0,0001(DAE)^2 + 0,0168(DAE) + 0,4269 \quad (2)$$

em que: DAE significa dias após a emergência da cultura.

Dessa forma, a evapotranspiração da cultura da soja foi estimada pela Equação 3.

$$ET_c = ET_o \cdot K_c \quad (3)$$

A partir desse método de BH cultura a estimativa do armazenamento de água no solo (Arm) dependente do denominado negativo acumulado (NA). Portanto, as variáveis devem ser contabilizadas simultaneamente, conforme normas:

Se $P-ET_c$ igual ou superior a zero:

$$Arm = Arm_{i-1} + (P-ET_c), \text{ 'até CAD máxima' }.$$

$$NA = CAD \ln (Arm/CAD)$$

Se $P-ET_c$ menor que zero:

$$NA = NA_{i-1} + (P-ET_c)$$

$$Arm = CAD e (NA/CAD)$$

Onde: P é a precipitação (mm) e ET_c é a evapotranspiração da cultura (mm).

Em seguida são definidas as demais variáveis:

Alteração do armazenamento de água no solo (ALT), onde $ALT = ARM_i - ARM_{i-1}$

Evapotranspiração real (ET_r), em que $(P-ET_c) \geq 0$, $ET_r = ET_c$, ou se $(P-ET_c) \leq 0$, $ET_r = P + |ALT|$

Cálculo da deficiência hídrica (DEF), em que $DEF = ET_r - ET_c$

Definição do excedente hídrico (EXC), em que se $ARM < CAD$, $EXC = 0$, ou se $ARM = CAD$, o $EXC = (P-ET_c) - ALT$

4.5. MODELO AGROMETEOROLÓGICO

Para a estimativa da perda produtiva relativa da cultura da soja ($Y_{g_{rel}}$, %), causada por deficiência hídrica, foi utilizado o método da Zona Agroecológica – FAO (DOORENBOS; KASSAM, 1994):

$$Y_{g_{rel}} = \left(1 - \frac{Y_a}{Y_o}\right) * 100 \quad (4)$$

Onde: Y_o é a produtividade potencial e Y_a é a produtividade atingível da cultura da soja.

Como a finalidade foi quantificar o efeito da variabilidade da precipitação e do solo sobre a cultura, ou seja, analisar o efeito hídrico sobre a soja através de um índice de perda produtiva percentual, optou-se por definir o valor unitário como potencial produtivo máximo ($Y_o = 1$), fazendo com que a produtividade atingível oscilasse entre a igualdade com Y_o em caso de ausência plena de deficiência hídrica à zero ($0 \leq Y_a \leq 1$), através da equação:

$$Y_a = \left[1 - k_y \left(1 - \frac{ET_r}{ET_c}\right)\right] Y_o \quad (5)$$

Onde: k_y é o fator de sensibilidade ao estresse hídrico ou fator de resposta da cultura, variável com o estágio de desenvolvimento da cultura; ET_c é a evapotranspiração da cultura em cada

subperíodo de desenvolvimento, estimado conforme a equação 3, E_{Tr} é a evapotranspiração real da cultura, determinada a partir do balanço hídrico. Y_o é a produtividade potencial da cultura (unitária).

Para a simulação do efeito hídrico sobre a variabilidade espaço-temporal da perda produtiva relativa foi adotado um valor único de capacidade de armazenamento de água no solo (CAD) (Eq. 6) para todos os nove pontos, variando apenas os dados de precipitação, medida em cada um dos nove pontos. Para o cálculo da CAD foram usados os valores de umidade do solo em capacidade de campo ($\theta_{cc} = 0,46 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e em ponto de murcha permanente (θ_{pmp}) obtidos a partir da curva de retenção de água do solo (Figura 3) feita para o ponto amostral 4 (Figura 2), considerando uma profundidade (z) de 0,85m. Para isso foram simulados três balanços hídricos de cultura, considerando as datas de semeadura de 15 de Novembro de 2016, 15 de Dezembro de 2016 e 15 de Janeiro de 2017, conforme indicado no zoneamento agrícola de risco climático da soja (MAPA, 2018).

$$CAD = (\theta_{cc} - \theta_{pmp}) z \quad (6)$$

Onde: CAD é a capacidade de armazenamento de água no solo; θ_{cc} é a umidade do solo em capacidade de campo; θ_{pmp} é o ponto de murcha permanente; z é a profundidade do sistema radicular

Para representar as cultivares do grupo de maturação 6.2, recomendadas para a região edafoclimática 203 (KASTER; FARIAS, 2011), foi adotado um ciclo médio de 120 dias (EMBRAPA, 2008) (Tabela 2).

Os valores do coeficiente de sensibilidade a deficiência hídrica (K_y) foram calibrados e validados por (BATTISTI, 2013).

Tabela 2. Subperíodos da soja, dias de desenvolvimento, coeficiente de cultivo médio (Kc) e coeficiente de sensibilidade à deficiência hídrica por subperíodo de desenvolvimento da cultura da soja.

	Subperíodo	Dias	Kc médio	Ky
S-V1	Estabelecimento	12	0,52	0,05
V2-R1	Vegetativo	40	0,86	0,2
R1-R5.5	Reprodutivo	40	1,1	0,9
R6-R8	Maturação	28	1,08	0,05

A letra S simboliza a semeadura da cultura. As demais letras, conforme escala fenológica da cultura da soja (Fehr & Caviness, 1977), identificam: V1 – primeiro nó: folhas unifoliadas completamente desenvolvidas, V2 – segundo nó: primeira folha trifoliada completamente desenvolvida, R1 – início do florescimento: uma flor aberta em qualquer nó do caule (haste principal), R5.5 – enchimento de grão: granação de 76 a 100%, R6 – grão cheio ou completo: vagem contendo grãos verdes preenchendo as cavidades da vagem de um dos 4 últimos nós do caule, com folha completamente desenvolvida e R8 – maturação plena: 95% das vagens com coloração de madura (FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL MENSAL DA PRECIPITAÇÃO

Conforme dados de chuva coletados entre os meses de novembro de 2016 e maio de 2017 apresentam variabilidade espaço-temporal entre os nove pontos de coleta (Tabela 3). Em relação à média de chuva da malha amostral o mês de janeiro, com 311,8 mm acumulados, foi o maior volume mensal, com um coeficiente de variação de 9%, relativo a uma amplitude máxima de 30,4 mm.

O máximo valor de amplitude, ou seja, diferença o mínimo e máximo valor acumulado por ponto de medida foi de 46,8 mm, registrado em março de 2017, causando valores máximos de desvio padrão (13,2) e coeficiente de variação (12,1%) na escala mensal. Tais resultados destacam a variação espacial da chuva em um grid pequeno, de 36 hectares, comparativamente a grande parte das áreas de produção agrícola. De acordo com Bega et al. (2005), utilizando uma série histórica de 32 anos para estudar a variabilidade espacial das precipitações pluviais diárias em uma estação experimental em Pindorama, SP, a variabilidade espacial é maior nos meses em que predominam chuvas convectivas, principalmente no período de novembro a março, correspondente ao período da pesquisa (Tabela 3).

Valores médios acumulados pela malha para os meses de dezembro/16, fevereiro/17 e março/17 foram inferiores aos valores médios históricos de chuva de Piracicaba, chegando ao extremo de redução de 54,2% em fevereiro/17. Apesar do valor médio de chuva da malha, para novembro/16, também ser inferior ao dado histórico, ressalta-se que o período de medição não contemplou todos os meses do mês. Ao contabilizar o acumulado por tempo, nesse caso, o dado da malha praticamente igualasse ao dado histórico (Tabela 3). Já as medições dos meses de janeiro/17, abril/17 e maio/17 superaram os valores médios históricos, com excedentes de 29,4%, 152% e 302%, respectivamente.

A comparação dos dados medidos e históricos dos sete meses caracteriza um período atípico em relação ao regime médio de chuvas local. O curto período analisado, entretanto, não permite concluir sobre uma diferença anual de chuva. Silva et al. (2003), ao avaliarem a variabilidade da precipitação pluvial mensal e anual na estação meteorológica de Uberaba-MG, observaram que a medida que se avalia o acumulado de precipitação no tempo, de mensal para anual, a tendência é de diminuição do coeficiente de variação. O mesmo fato foi observado por Reichardt et al. (1995) em estudo sobre variabilidade temporal e espacial da chuva em 10 pluviômetros, distribuídos em uma área de 1000 ha em Piracicaba-SP. Os

autores observaram variabilidade dos eventos de precipitação na escala diária na ordem de 2,2 e 169,3%, enquanto que para a escala anual a variação do acumulado de chuva reduziu para 3,06%. Os resultados do presente estudo corroboram com tais autores, uma vez que, a variabilidade de chuva entre os 9 pluviômetros foi menor na escala mensal que na diária (Figura 4).

Tabela 3. Chuva média histórica (1917-1998) e totais acumulados na malha amostral para os meses de Novembro de 2016 a Maio de 2017.

Ponto	Nov/2016*	Dez/16	Jan/17	Fev/17	Mar/18	Abr/17	Mai/17
Chuva mensal (mm)							
Méd.Hist. (1917-2018)	126,0**	192,0	241,0	190,0	131,0	52,0	38,0
P1	81,1	159,2	317,4	89,5	115,0	126,7	154,2
P2	86,4	174,9	315,1	98,5	138,7	150,6	160,6
P3	84,2	168,5	310,6	78,5	116,3	130,1	155,8
P4	88,1	159,8	310,8	75,3	103,6	127,7	154,2
P5	84,6	161,0	317,0	90,4	107,2	131,8	151,4
P6	86,5	164,3	315,2	92,8	105,9	123,7	147,8
P7	86,9	159,1	311,3	90,0	103,2	128,3	149,8
P8	86,3	166,8	319,6	86,6	101,6	135,1	156,9
P9	82,3	165,6	289,2	82,1	91,9	126,2	146,6
Média mensal (P1-P9)	85,2	164,4	311,8	87,1	109,3	131,1	153,0
D.P.	2,3	5,3	9,0	7,3	13,2	8,0	4,5
C.V. (%)	2,7	3,2	2,9	8,4	12,1	6,1	3,0

* Medidas entre os dias 10 e 30 de Novembro de 2016; **Média mensal histórica do mês de Novembro

A separação do período total em três segmentos de 120 dias, com inícios nos dias 15 de novembro de 2016, 15 de dezembro de 2016 e 15 de janeiro de 2017, a fim de avaliar a variabilidade espacial e temporal da chuva em períodos coincidentes com a produção de soja na região de Piracicaba/SP, revelou distinção na distribuição, com proeminência para as diferenças temporais (Figura 4).

No primeiro período (15/11/16 a 14/03/2017) foram registrados 75 dias chuvosos, sendo 26 dias com chuvas superiores a 10,0 mm. O volume total acumulado foi de 694,9 mm. O desvio padrão médio da chuva medida na malha foi de apenas 0,7mm. Mesmo valor de D.P. máximo foi baixo, de 4,3mm. Ao analisar o total de chuva acumulada em cada ponto da malha amostral, e novamente quantificar as diferenças entre pontos, observa-se um aumento temporal do desvio padrão, que ao final do ciclo chegou aos 25,3mm, valor que pode

representar 5% da demanda de água de um cultivo de soja na região de estudo (OLIVEIRA, 2018).

Já no segundo (15/12/2016 a 13/04/2017) foram 68 dias chuvosos, sete a menos que no primeiro período. Desses, 25 dias tiveram chuva acumulada superior a 10 mm. O total acumulado no segundo período foi de 669,8 mm, 25,1 mm a menos que no primeiro período (Figura 4). Em relação as diferenças espaciais, o desvio padrão também foi de apenas 0,7 mm, porém com D.P. máximo de 8,1 mm, o dobro do registrado para o primeiro período (Figura 4). No tempo, ao fim dos 120 dias de medidas, o desvio padrão foi de 31,4 mm, superando a diferença temporal observada no primeiro período, corroborando para uma variabilidade espacial da produtividade por causa hídrica.

Embora a diferença entre os totais de chuva nos dois primeiros períodos (Figura 4) tenha sido inferior a 5%, as distribuições temporais mostraram-se distintas, com distribuição temporal mais regular no primeiro que no segundo período, que apresentou maior incremento no início dos 120 dias, com posterior redução e maior quantidade de dias secos.

Um terceiro período, bem mais seco, foi registrado ao simular um ciclo de produção de soja de 120 dias iniciado em 15 de janeiro até 14 de maio de 2017 (Figura 4). Nesse momento foram registrados 56 dias chuvosos, 22 dias com mais de 10 mm acumulados. O total do terceiro período foi de 576,2 mm, 17,1% a menos que no primeiro ao 14,0% em relação ao segundo período. Em relação a variação espacial diária da chuva, o desvio padrão médio para o ciclo foi de 0,6mm, com valor máximo de 8,1mm. Temporalmente, o desvio padrão em relação ao acumulado em cada ponto nos 120 dias de medição ficou em 25,34 mm, ratificando a variabilidade espaço-temporal da disponibilidade hídrica mesmo em uma área pequena e uma provável implicação na produção de cada ponto.

As médias diárias de precipitação do primeiro, segundo e terceiro períodos foram respectivamente de 5,8 mm, 5,6 mm e 4,8 mm (Figura 4), indicando redução no número de eventos e volume precipitado. Em relação aos três períodos, os maiores valores de desvio padrão entre pontos de medida ocorreram para eventos de chuva de baixo volume acumulado, no caso menores que 5,0 mm. Em relação a chuvas de maior intensidade e acumulado, no dia 06 de abril foi registrado 72,9 mm (média da malha), maior acumulado diário da série. Nessa ocasião o desvio padrão foi de 8,0mm.

A escassez de chuva no terceiro ciclo foi mais acentuada que nos demais, mesmo com os valores médios de chuva entre os 9 pontos tenham sido superiores à média histórica nos meses de abril e maio. Isso pode ser explicado em razão da maior desuniformidade da

distribuição da chuva no último ciclo, com períodos de seca maiores e grandes volumes de chuva concentrados em poucos dias.

Figura 4. Precipitação pluvial diária e acumulada durante os três períodos de 120 dias, iniciados nas datas de 15/11/2016, 15/12/2016 e 15/01/2017, coincidentes a períodos de produção de soja em Piracicaba (SP).

A redução do volume acumulado do primeiro para o terceiro período coincide com os resultados apresentados por Battisti (2016), em relação ao atraso da data de semeadura da soja em Piracicaba (SP). Os resultados desse trabalho definem exatamente a redução do potencial de produção em relação ao atraso da semeadura devido à deficiência hídrica. Portanto, mesmo que o período tenha se caracterizado, na escala mensal, como atípico em relação aos dados históricos (Tabela 3), as simulações coincidirem com os resultados desses autores.

Além disso, as diferenças observadas no espaço, causando diferenças marcantes no tempo, nesse caso simulando um ciclo de produção de soja de 120 dias, certamente acarretariam diferenças espaciais produtivas.

Além da precipitação pluvial, a temperatura do ar e disponibilidade de energia radiante (Q_g) também foram analisadas nos três períodos de 120 dias. Porém, diferente da precipitação, medida em cada um dos 9 pontos, esses dois elementos meteorológicos não tiveram a variabilidade espaço-temporal quantificada dentro da malha amostral, existindo apenas um dado diário de temperatura do ar e radiação solar global (Figura 5).

A temperatura média do ar no primeiro ciclo foi de $24,2^{\circ}\text{C}$, com tendência positiva ao longo do ciclo, ao contrário do segundo e terceiro ciclos quando a tendência foi de redução temporal da temperatura média do ar, com valores médios de $24,1^{\circ}\text{C}$ e $23,0^{\circ}\text{C}$ (Figura 5), valores enquadrados como favoráveis ao crescimento e desenvolvimento da cultura da soja (FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007).

A radiação solar global, que desempenha um papel fundamental no crescimento e desenvolvimento vegetal, também apresentou valores acumulados distintos ao longo dos períodos. A radiação solar global acumulada no primeiro e segundo período foi similar, chegando aos $2573,3$ e $2502,1 \text{ MJ m}^{-2}$, respectivamente. No terceiro período, apesar do menor volume de chuva e provável maior tempo de céu claro (Figura 4), a redução do fotoperíodo e consequentemente disponibilidade de energia radiante (Q_g) resultou em $2233,1 \text{ MJ m}^{-2}$ acumulados, média de 12% a menos energia radiante em relação aos dois períodos anteriores. Essa redução mais acentuada de Q_g acumulado do terceiro em relação ao primeiro e segundo períodos também remete a redução do potencial de produção da cultura da soja (Y_o) determinado a partir da modelagem.

Figura 5. Temperatura média do ar e radiação solar global acumulada ao longo dos 120 dias dos períodos iniciados em 15/11/2016, 15/12/ 2016 e 15/01/ 2017.

O consumo hídrico máximo da cultura da soja (ETc) em relação aos três períodos de produção, de 597,4 (15/11), 579,1 (15/12) e 517,2 (15/01) (Tabela 3), exhibe a influência da disponibilidade energética (Figura 4) também decrescente com o atraso da semeadura na região de Piracicaba.

Comparando com os resultados descritos por Suyker e Verma (2009), obtidos para a região de Nebraska nos Estados Unidos, verifica-se que os resultados (Tabela 3) superam a demanda da soja americana, já que os autores descrevem valores médios de ETc entre 452 mm e 431 mm para a cultura irrigada e em sequeiro, respectivamente. Já Karam et al. (2005) observaram valores totais médios de ETc entre 725 e 800 mm para a cultura da soja cultivada no Líbano. Esse comparativo, que contempla a maior parte das informações dentro da faixa relatada na literatura, entre 450 e 700 mm (DOORENBOS; KASSAM, 1979), justamente descreve a correlação entre condição atmosférica e consumo hídrico da planta de soja ao longo do seu ciclo (Tabela 3).

Apesar dos dois primeiros períodos terem apresentado ETc para cada ciclo muito similares, o consumo hídrico máximo da cultura acaba se distinguindo nos subperíodos

reprodutivo e de maturação. Durante o reprodutivo o valor de ETc do segundo foi 36,5mm maior, enquanto posteriormente, na maturação, 26mm menor.

A partir da simulação observa-se que o atraso da semeadura da soja interferiu mais expressivamente na ETc no subperíodo maturação (R6-R8) em função da menor disponibilidade energética e de temperatura média do ar em que a cultura da soja é submetida nesses estádios fenológicos. De maneira geral, essas condições meteorológicas também explicam o menor valor acumulado total de ETc resultante no terceiro período de produção (Tabela 4).

Tabela 4. Evapotranspiração de cultura (ETc) da soja em cada subperíodo e no ciclo de produção em relação aos períodos de 120 dias iniciados em 15 de novembro de 2016, 15 de dezembro de 2016 e 15 de janeiro de 2017.

Período	Subperíodo Soja				Ciclo
	S-V1	V2-R1	R1-R5.5	R6-R8	
15/11/2016	36,8	198,5	239,8	122,3	597,4
15/12/2016	38,0	180,7	276,3	96,3	591,3
15/01/2017	22,3	200,3	224,9	69,6	517,2
Média	33,8	192,7	246,7	95,8	569,0
D.P.	10,3	11,7	25,9	26,3	44,9
C.V.(%)	30,5	6,1	10,5	27,5	7,9

No primeiro período de produção simulada de soja (Tabela 5) 64,7% do total de chuva acumulada concentrou-se nos subperíodos reprodutivos. No segundo (Tabela 6) e terceiro (Tabela 7) os resultados foram distintos, e do total acumulado no ciclo somente 32,2% e 36,3% coincidiram com os subperíodos reprodutivos, respectivamente. Com a diminuição da ocorrência da precipitação pluvial ao longo do período avaliado (Figura 4), os eventos de seca que coincidiam com período final de produção, ou seja maturação da soja, no ciclo simulado a partir de 15 de novembro de 2016, passaram a ocorrer mais precocemente e coincidindo com subperíodos mais sensíveis ao estresse hídrico nos ciclos mais tardios (Tabelas 6 e 7).

Para subperíodo R1-R5.5, contemplando floração e formação de grãos, a chuva acumulada (Tabela 5) em relação a semeadura simulada de 15 de novembro de 2016 foi superior a ETc (Tabela 3), enquanto no segundo e terceiro ciclos da soja a ETc (Tabela 4) supera em mais de 150 mm a chuva acumulada (Tabelas 6 e 7), indicando possíveis momentos de deficiência hídrica coincidente à momentos de maior sensibilidade à falta de água da cultura da soja.

A variabilidade de chuva registrada entre os 9 pontos no ciclo 1 (Tabela 5) foi superior no subperíodo R6-R8, com coeficiente de variação de 10,6%. Para os demais subperíodos o total acumulado de chuva entre os nove pontos de medição da chuva apresenta valores próximos, com pouca variabilidade. Nos ciclos iniciados em 15 de dezembro de 2016 e 15 de janeiro de 2017 (Tabelas 5 e 6) houve maior variabilidade de chuva nos estádios reprodutivos da soja, ou seja, os de maior sensibilidade da cultura à deficiência hídrica (FOROUD et al., 1993; KOKUBUN; SHIMADA; TAKAHASHI, 2001). Nesse subperíodo, o estresse hídrico que ocorre entre o início do florescimento e o enchimento de grãos diminui o rendimento total de grãos, principalmente pela redução do crescimento vegetativo dos ramos, o que reduz o número e o rendimento de grãos por haste da planta (FREDERICK; CAMP; BAUER, 2001). Berlato et al. (1992), em estudo sobre a influência da precipitação pluvial na produtividade de grãos de soja no Rio Grande do Sul, observaram correlação significativa entre a chuva e a produtividade de soja somente nos estádios reprodutivos. Os autores ressaltam ainda, que nos demais subperíodos a precipitação pluvial não apresentou correlação significativa com a produtividade de grãos, pois não houve limitação hídrica, com valores de chuva adequados ao desenvolvimento da cultura.

No ciclo de 15 de dezembro de 2016, a amplitude máxima de chuva acumulada entre os 9 pluviômetros no subperíodo R1-R5 foi de 47 mm (Tabela 6) e para o ciclo de 15 de janeiro de 2017 (Tabela 7) foi de 52,8 mm. Considerando que esse subperíodo é o mais sensível ao déficit hídrico, a diferença observada de precipitação pluvial entre os pluviômetros pode resultar em variabilidade produtiva na área. A máxima amplitude de chuva acumulada total nos ciclos simulados de produção de soja, proveniente da diferença entre o maior (P2, ciclo 15/11/2016) e o menor valor (P9, ciclo 15/01/2017) registrado pelos pluviômetros, foi de 210,5 mm. Esse resultado evidencia a variabilidade espaço-temporal em um período de tempo e área relativamente pequenos. Nesse sentido, a utilização de apenas um ponto de coleta de chuva parece ser insuficiente para representar a variabilidade espacial de chuva e seu impacto na produtividade agrícola. Krajewski et al. (2003), ao avaliarem a variabilidade espacial da chuva acumulada diária em áreas inferiores a 5 km² em diferentes regiões do mundo, concluíram que, devido à extrema variabilidade da precipitação, as redes tradicionais baseadas em um único pluviômetro podem não fornecer dados de precipitação confiáveis nesta escala.

Tabela 5. Precipitação acumulada nos subperíodos e ciclo de 120 dias de produção da soja com semeadura simulada para 15 de novembro de 2016.

Ponto	Subperíodo Soja				Ciclo
	S-V1	V2-R1	R1-R5.5	R6-R8	
P1	31,2	209,2	334,0	125,6	700,0
P2	30,5	232,9	326,1	157,0	746,4
P3	29,9	215,6	317,4	132,0	694,9
P4	30,3	213,5	312,7	117,4	673,9
P5	29,5	211,8	333,0	123,7	698,0
P6	28,9	213,6	336,1	122,4	701,0
P7	27,8	215,5	326,2	120,0	689,5
P8	27,6	219,9	332,8	118,8	699,1
P9	25,9	210,7	303,8	110,6	651,1
Chuva Média	29,1	215,9	324,7	125,3	694,9
Desvio Padrão (mm)	1,7	7,1	11,1	13,3	25,3
C.V. (%)	5,8	3,3	3,4	10,6	3,6
Chuva Média/ETc (%)	78,9	108,7	135,4	102,4	116,3

Tabela 6. Precipitação acumulada nos subperíodos e ciclo de 120 dias de produção da soja com semeadura simulada para 15 de dezembro de 2016.

Ponto	Subperíodo Soja				Ciclo
	S-V1	V2-R1	R1-R5.5	R6-R8	
P1	62,9	403,5	126,3	85,4	678,2
P2	62,9	397,2	158,0	118,6	736,8
P3	66,2	381,0	133,5	89,1	669,7
P4	68,3	380,3	118,9	85,6	653,2
P5	61,0	398,5	124,7	88,1	672,4
P6	59,2	399,2	123,5	81,3	663,2
P7	62,2	395,5	120,8	85,6	664,2
P8	60,3	401,5	119,3	87,8	668,9
P9	61,7	365,0	111,6	82,6	620,9
Chuva Média	62,8	391,3	126,3	89,4	669,7
Desvio Padrão (mm)	2,9	12,9	13,3	11,3	30,2
C.V. (%)	4,6	3,3	10,5	12,6	4,5
Chuva Média/ETc (%)	148,3	218,4	45,9	93,6	113,1

Tabela 7. Precipitação acumulada nos subperíodos e ciclo de 120 dias de produção da soja com semeadura simulada para 15 de janeiro de 2017.

Ponto	Subperíodo Soja				Ciclo
	S-V1	V2-R1	R1-R5.5	R6-R8	
P1	200,4	169,6	121,0	91,3	582,3
P2	199,6	189,4	161,8	78,0	628,7
P3	195,7	163,8	124,5	89,4	573,3
P4	196,7	155,8	112,1	89,9	554,5
P5	205,7	168,9	121,4	91,7	587,8
P6	204,8	173,3	112,4	79,3	569,8
P7	198,6	168,1	115,2	89,1	571,0
P8	207,4	163,3	116,4	95,2	582,3
P9	187,4	152,6	109,0	86,9	535,9
Chuva Média	199,6	167,2	121,5	87,9	576,2
Desvio Padrão (mm)	6,1	10,6	15,9	5,7	25,3
C.V. (%)	3,1	6,4	13,1	6,5	4,4
Chuva Média/ETc (%)	895,0	83,5	54,0	126,2	111,4

A deficiência hídrica, considerando apenas a variabilidade de chuva entre os nove pluviômetros, seguiu tendência oposta à precipitação pluvial durante os ciclos de produção simulada (Tabelas 8, 9 e 10). No primeiro ciclo, iniciado em 15 de novembro de 2016, foi o subperíodo R6-R8 que registrou maior valor de deficiência de água, enquanto que, para os ciclos iniciados mais tardiamente, em 15 de dezembro de 2016 e 15 de janeiro de 2017 o subperíodo mais seco foi justamente o mais sensível ao estresse hídrico, o R1-R5.5.

O primeiro ciclo de produção simulada (Tabela 8) apresentou menor variabilidade entre valores de deficiência hídrica acumulada por subperíodos e, devido a melhor distribuição de chuva, exibiu valores de deficiência hídrica inferiores aos demais ciclos (Tabelas 9 e 10), indicando que a semeadura mais precoce mostrou-se mais adequada ao desenvolvimento da cultura. Fietz e Urchei (2002), utilizando um período de 20 anos para avaliar a deficiência hídrica da cultura da soja em duas épocas de semeadura, na região de Dourados, MS, constataram que na maioria dos anos agrícolas, a maior deficiência hídrica ocorreu no subperíodo reprodutivo de R1 a R5. Os autores atribuíram esse resultado à grande demanda hídrica da cultura nesse subperíodo, sendo que em média, a precipitação pluvial não atende plenamente as exigências hídricas da cultura durante seus estádios reprodutivos nesta localidade. Os mesmos autores observaram ainda, que a deficiência hídrica em S-V1 é inferior

aos demais subperíodos, em razão da menor área foliar da cultura, o que confirma os resultados obtidos no presente estudo, independentemente da época de semeadura.

Tabela 8. Deficiência hídrica acumulada nos subperíodos e ciclo de 120 dias de produção da soja com semeadura simulada para 15 de novembro de 2016.

Ponto	Subperíodo Soja				Ciclo
	S-V1	V2-R1	R1-R5.5	R6-R8	
P1	3,7	26,3	38,0	45,9	113,9
P2	3,7	23,7	37,7	42,8	107,9
P3	3,7	25,0	38,7	45,3	112,7
P4	3,6	23,9	39,0	45,9	112,4
P5	3,6	24,8	38,7	45,5	112,6
P6	3,5	24,7	38,6	45,5	112,3
P7	3,5	23,5	38,7	45,9	111,6
P8	3,4	23,6	38,6	46,2	111,9
P9	3,5	25,1	39,6	47,7	115,9
Média	3,6	24,5	38,6	45,6	112,4
D.P.	0,1	0,9	0,5	1,3	2,1
C.V.(%)	2,8	3,8	1,4	2,8	1,9

Tabela 9. Deficiência hídrica acumulada nos subperíodos e ciclo de 120 dias de produção da soja com semeadura simulada para 15 de dezembro de 2016.

Ponto	Subperíodo Soja				Ciclo
	S-V1	V2-R1	R1-R5.5	R6-R8	
P1	0,6	11,9	113,2	40,4	166,1
P2	0,6	11,2	102,2	32,0	146,0
P3	0,6	11,9	109,5	39,7	161,8
P4	0,6	12,3	115,9	43,8	172,6
P5	0,7	12,7	113,5	42,6	169,4
P6	0,7	12,5	114,2	43,2	170,6
P7	0,7	12,3	115,4	44,3	172,7
P8	0,7	12,0	116,0	44,3	173,1
P9	0,8	12,9	120,4	48,0	182,0
Média	0,7	12,2	113,4	42,0	168,3
D.P.	0,1	0,5	5,1	4,5	10,0
C.V.(%)	9,1	4,0	4,5	10,7	5,9

Tabela 10. Deficiência hídrica acumulada nos subperíodos e ciclo de 120 dias de produção da soja com semeadura simulada para 15 de janeiro de 2017.

Ponto	Subperíodo Soja				Ciclo
	S-V1	V2-R1	R1-R5.5	R6-R8	
P1	0,0	64,5	81,2	12,4	158,2
P2	0,0	60,7	73,6	13,9	148,2
P3	0,0	63,1	84,1	13,1	160,3
P4	0,0	63,6	85,6	13,1	162,3
P5	0,0	63,8	83,1	12,9	159,8
P6	0,0	63,4	87,9	14,1	165,4
P7	0,0	64,2	86,0	13,4	163,6
P8	0,0	64,1	86,2	13,1	163,4
P9	0,0	65,6	93,4	13,5	172,5
Média	0,0	63,7	84,6	13,3	161,5
D.P.	0,0	1,3	5,3	0,5	6,5
C.V.(%)	0,0	2,1	6,3	3,8	4,0

Com o modelo agrometeorológico foi possível determinar a perda produtiva relativa ($Y_{g_{rel}}$, em %) causada por deficiência hídrica (Tabelas 8, 9 e 10) para cada data de semeadura simulada e pontos de amostragem da chuva (Tabela 11). Em relação ao ciclo simulado com início em 15 de novembro de 2016, a distribuição temporal regular da chuva (Tabela 8) que determinou baixos valores de deficiência hídrica ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura da soja (Tabela 8) resultou em $Y_{g_{rel}}$ médio de 6,8%, com desvio padrão de apenas 0,1% em relação aos valores individuais dos nove pontos amostrais.

Perdas produtivas maiores foram simuladas para as duas datas de semeadura mais tardias, com médias de 16,8% e 17,2% (Tabela 11). Os resultados são consequências de menores valores acumulados de chuva (Tabelas 6 e 7) coincidentes com períodos de maior demanda de água (Tabela 4) que acentuaram a deficiência hídrica nos momentos de maior sensibilidade ao estresse hídrico (Tabelas 9 e 10). Ainda, em relação a data de semeadura mais precoce, as simulações realizadas para 15 de dezembro de 2016 e 15 de janeiro de 2017 apresentaram valores de desvio padrão superiores, gerando coeficientes de variação de 4,7% e 5,5% (Tabelas 9 e 10).

Ao comparar os resultados dos nove pontos amostrais, por data simulada de semeadura, a partir apenas dos valores do coeficiente de variação, observa-se que para simulação de semeadura em 15 de novembro de 2016 a chuva acumulada no ciclo apresentou CV de 3,6%, a deficiência acumulada no ciclo um CV de 1,9% e a perda produtiva relativa um CV de apenas 1,6%. Nesse caso, volumes de chuva suficientes para atender a demanda

hídrica ao longo de grande parte do ciclo causam perdas produtivas pequenas, além de reduzir a diferença de produção ou quebra produtiva entre pontos (Tabela 11).

O mesmo não foi observado para os dois ciclos mais tardios. Com valores de CV de 4,4% e 4,5% em relação aos totais acumulados de chuva, ambos inferiores ao do primeiro ciclo de produção simulada (Tabelas 5, 6 e 7) e mais irregularmente distribuídos nos 120 dias de ciclo simulados, os valores de CV mantiveram-se elevados em relação a deficiência hídrica (5,9% e 4,0%) (Tabelas 9 e 10) propagando-se à perda produtiva relativa, cujos CV foram de 4,7% e 5,5% (Tabela 11).

Tabela 11. Perda produtiva relativa simulada para a cultura soja, causada por deficiência hídrica, para as datas de semeadura de 15 de novembro de 2016, 15 de dezembro de 2016 e 15 de janeiro de 2017.

Ponto	Data de Semeadura (NDA)		
	15/11/16 (319)	15/12/16 (350)	15/01/17 (15)
	Y _{grel} (%)		
P1	6,78	16,77	16,59
P2	6,57	15,05	15,19
P3	6,78	16,13	17,06
P4	6,78	17,20	17,29
P5	6,78	16,77	17,06
P6	6,78	16,99	17,76
P7	6,78	16,99	17,52
P8	6,78	17,20	17,52
P9	6,99	17,85	18,69
Media	6,8	16,8	17,2
D.P.	0,1	0,8	0,9
CV	1,6	4,7	5,5

6. CONCLUSÃO

Nessa dissertação exploramos a variabilidade espaço-temporal da precipitação pluvial em uma área experimental, a partir da medida de nove pluviômetros instalados equidistantes 200m entre si, formando uma malha de 36 ha. Os resultados destacaram diferenças nos totais acumulados entre os pontos de medição, desde a escala de evento chuva até o acumulado mensal. As medições feitas entre os meses de Novembro de 2016 e Maio de 2017 apontaram para desvio-padrão de até 12,1% em relação ao acumulado mensal (média de 109,3mm). Em decorrência disso, simulações resultaram em valores diferenciados de perdas produtivas da soja por conta da deficiência hídrica. O caso destaca a importância de avaliar a distribuição espacial da precipitação pluvial a fim de vislumbrar seu efeito na produtividade das culturas agrícolas.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. **FAO**, 1998. 300 p.
- ALLIPRANDINI, L. F.; ABATTI, C.; BERTAGNOLLI, P. F.; CAVASSIM, J. E.; GABE, H. L.; KUREK, A.; MATSUMOTO, M. N.; DE OLIVEIRA, M. A. R.; PITOL, C.; PRADO, L. C.; STECKLING, C. Understanding Soybean Maturity Groups in Brazil: Environment, Cultivar Classification, and Stability. **Crop Science**, v. 49, n. 3, p. 801, 2009.
- AMADO, T. J. C.; NICOLOSO, R. S.; LANZANOVA, M. E.; SANTI, A. L.; LOVATO, T. A compactação pode comprometer os rendimentos de áreas sob plantio direto. **Revista Plantio Direto**, n. 89, p. 34–42, 2005.
- ASSAD, E. D.; MARIN, F. R.; EVANGELISTA, S. R.; PILAU, F. G.; FARIAS, J. R. B.; PINTO, H. S.; ZULLO JÚNIOR, J. Sistema de previsão da safra de soja para o Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 5, p. 615–625, maio 2007.
- ASSENG, S.; KEATING, B. A.; FILLERY, I. R. P.; GREGORY, P. J.; BOWDEN, J. W.; TURNER, N. C.; PALTA, J. A.; ABRECHT, D. G. Performance of the APSIM-wheat model in Western Australia. **Field Crops Research**, v. 57, p. 163–179, 1998.
- ÁVILA, L. F.; MELLO, C. R. de; SILVA, A. M. da. Continuidade e distribuição espacial da umidade do solo numa Bacia Hidrográfica da Serra da Mantiqueira. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 12, p. 1257–1266, 2010.
- BARBOSA, H. A.; LAKSHMI KUMAR, T. V. Influence of rainfall variability on the vegetation dynamics over Northeastern Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 124, p. 377–387, jan. 2016.
- BATTISTI, R. **Épocas de semeadura da cultura da soja com base no risco climático e na rentabilidade líquida para as principais regiões produtoras do Brasil**. 2013. Dissertação de Mestrado (Programa de pós graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 2013.
- BATTISTI, R. **Calibration, uncertainties and use of soybean crop simulation models for evaluating strategies to mitigate the effects of climate change in Southern Brazil**. 2016. Tese de Doutorado (Programa de pós graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 2016.
- BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C.; PILAU, F. G.; WOLLMANN, C. A. Eficiência

- climática para as culturas da soja e do trigo no estado do Rio Grande do Sul em diferentes datas de semeadura. **Ciência Rural**, v. 43, n. 3, p. 390–396, mar. 2013.
- BEGA, R. M.; VIEIRA, S. R.; DE MARIA, I. C.; DECHEN, S. C. F.; CASTRO, O. D. M. Variabilidade espacial das precipitações pluviais diárias em uma estação experimental, em Pindorama, SP. v. 64, n. 1, p. 149–156, 2005.
- BELAN, L. L.; POZZA, E. A.; ALVES, M. de C.; FREITAS, M. L. de O. Geostatistical analysis of bacterial blight in coffee tree seedlings in the nursery. **Summa Phytopathologica**, v. 44, n. 4, p. 317–325, dez. 2018.
- BERLATO, M. A. **Modelo de relação entre o rendimento de grãos de soja e o déficit hídrico para o Estado do Rio Grande do Sul**. 1987. 1987.
- BERLATO, M. A.; FARENZENA, H.; FONTANA, D. C. Associação entre El Niño Oscilação Sul e a produtividade do milho no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 5, p. 423–432, maio 2005.
- BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C. Variabilidade interanual da precipitação pluvial e rendimento da soja no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 7, n. 1, p. 119–125, 1999.
- BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C.; GONÇALVES, H. M. Relação entre o rendimento de grãos de soja e variáveis meteorológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 27, n. 5, p. 695–702, 1992.
- BERLATO, M. A.; MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H. Evapotranspiração máxima da soja e relações com a evapotranspiração calculada pela equação de Penman, evaporação do tanque “classe A” e radiação solar global. **Agronomia Sulriogradense**, v. 22, n. 2, p. 251–259, 1986.
- BRAIDO, L. M. H.; TOMMASELLI, J. T. G. Caracterização climática e dos anos extremos (chuvoso e seco): seus efeitos na produção de cana-de-açúcar, milho e soja para a região do pontal do Paranapanema – SP. **Revista Formação**, v. 1, n. 17, p. 13–34, 2010.
- CAMARGO, M. B. P.; BRUNINI, O.; JUNIOR, M. J. P.; BARDIN, L. Variabilidade espacial e temporal de dados termopluviométricos diários da rede de estações agrometeorológicas do instituto agrônomo (AIC). **Bragantia**, v. 64, n. 3, p. 473–483, 2005.
- CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; NOVAK, J. M.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-Scale Variability of Soil Properties in Central Iowa Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 5, p. 1501, 1994.
- CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: quinto levantamento**. Brasília, DF, v. 6, n. 5, 2019.

- CONSTABLE, G. A.; ROSE, I. A. Variability of soybean phenology response to temperature, daylength and rate of change in daylength. **Field Crops Research**, v. 18, n. 1, p. 57–69, 1 fev. 1988.
- COSTA, N. P.; PEREIRA, L. A. G.; FRANÇA NETO, J. B.; HENNING, A. A.; KRZYZANOWSKI, F. C. Zoneamento ecológico do estado do Paraná para a produção de sementes de cultivares precoces de soja. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 16, n. 1, p. 12–19, 30 jun. 1994.
- CUNHA, G. R.; HAAS, J. C.; DALMAGO, G. A.; PASINATO, A. Perda de rendimento potencial em soja no Rio Grande do Sul por deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 6, n. 1, p. 111–119, 1998.
- DA SILVA, L. L.; DA COSTA, R. F.; DA, J. H. B.; CAMPOS, C.; DANTAS, R. T. Influência das precipitações na produtividade agrícola no Estado da Paraíba 1. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 4, p. 454–461, 2009.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba. (Estudos da FAO, Irrigação e Drenagem, 33), 1994.
- EGLI, D. .; BRUENING, W. . Flowering and fruit set dynamics at phloem-isolated nodes in soybean. **Field Crops Research**, v. 79, n. 1, p. 9–19, 2002.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Tecnologias de produção de soja: região central do Brasil**Londrina(Sistemas de produção/ Embrapa Soja, n. 12), 2008.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos 3ª edição revista e ampliada**. 3 ed. rev. ed. Embrapa, 2013.
- FAGERIA, N. K. **Solos tropicais e aspectos fisiológicos das culturas**. Brasília: Embrapa-DPU, (Embrapa-CNPAF. Documentos, 18), 1989.
- FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja**LondrinaEmbrapa (Circular Técnica 48), , 2007.
- FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L. Soja. In: MONTEIRO, J. E. B. A. (Ed.). **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília: INMET, 2009. p. 263–277.
- FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development**AmesIowa State University. (Special Report, 80), , 1977.
- FIETZ, C. R.; URCHEI, M. A. Deficiência hídrica da cultura da soja na região de Dourados,

- MS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 2, p. 262–265, 2002.
- FOROUD, N.; MUNDEL, H. H.; SAINDON, G.; ENTZ, T. Effect of level and timing of moisture stress on soybean plant development and yield components. **Irrigation Science**, v. 13, n. 4, p. 149–155, mar. 1993.
- FREDERICK, J. R.; CAMP, C. R.; BAUER, P. J. Drought-Stress Effects on Branch and Mainstem Seed Yield and Yield Components of Determinate Soybean. **Crop Science**, v. 41, n. 3, p. 759, 2001.
- FREITAS, A. S.; POZZA, E. A.; ALVES, M. C.; COELHO, G.; ROCHA, H. S.; POZZA, A. A. Spatial distribution of Yellow Sigatoka Leaf Spot correlated with soil fertility and plant nutrition. **Precision Agriculture**, n. 17, p. 93–107, 2016.
- GRAEF, F.; HAIGIS, J. Spatial and temporal rainfall variability in the Sahel and its effects on farmers' management strategies. **Journal of Arid Environments**, v. 48, n. 2, p. 221–231, 1 jun. 2001.
- HARTWIG, E. E.; KIIHL, R. A. S. Identification and utilization of a delayed flowering character in soybeans for short-day conditions. **Field Crops Research**, v. 2, p. 145–151, 1979.
- HÉBRARD, O.; VOLTZ, M.; ANDRIEUX, P.; MOUSSA, R. Spatio-temporal distribution of soil surface moisture in a heterogeneously farmed Mediterranean catchment. **Journal of Hydrology**, v. 329, n. 1–2, p. 110–121, 2006.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produto interno bruto dos municípios**. Rio de Janeiro. IBGE, Coordenação de Contas Nacionais, 2016.
- JENSEN, N. E.; PEDERSEN, L. Spatial variability of rainfall: Variations within a single radar pixel. **Atmospheric Research**, v. 77, n. 1–4, p. 269–277, set. 2005.
- JONES, J. .; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C. .; BOOTE, K. .; BATCHELOR, W. .; HUNT, L. .; WILKENS, P. .; SINGH, U.; GIJSMAN, A. .; RITCHIE, J. . The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 3–4, p. 235–265, 2003.
- KARAM, F.; MASAAD, R.; SFEIR, T.; MOUNZER, O.; ROUPHAEL, Y. Evapotranspiration and seed yield of field grown soybean under deficit irrigation conditions. **Agricultural Water Management**, v. 75, n. 3, p. 226–244, 25 jul. 2005.
- KASTER, M.; FARIAS, J. R. B. **Regionalização dos testes de Valor de Cultivo e Uso e da indicação de cultivares de soja – Terceira Aproximação**. (Documento ed. Londrina: Embrapa Soja, 2011.

- KEATING, B. .; CARBERRY, P. .; HAMMER, G. .; PROBERT, M. .; ROBERTSON, M. .; HOLZWORTH, D.; HUTH, N. .; HARGREAVES, J. N. .; MEINKE, H.; HOCHMAN, Z.; MCLEAN, G.; VERBURG, K.; SNOW, V.; DIMES, J. .; SILBURN, M.; WANG, E.; BROWN, S.; BRISTOW, K. .; ASSENG, S.; CHAPMAN, S.; MCCOWN, R. .; FREEBAIRN, D. .; SMITH, C. . An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 3–4, p. 267–288, 1 jan. 2003.
- KEPPENNE, C. L. An ENSO Signal in Soybean Futures Prices. **Journal of Climate**, v. 8, n. 6, p. 1685–1689, 1 jun. 1995.
- KOKUBUN, M.; SHIMADA, S.; TAKAHASHI, M. Flower Abortion Caused by Preanthesis Water Deficit Is Not Attributed to Impairment of Pollen in Soybean. **Crop Science**, v. 41, n. 5, p. 1517, 2001.
- KRAJEWSKI, W. F.; CIACH, G. J.; HABIB, E. An analysis of small-scale rainfall variability in different climatic regimes. **Hydrological Sciences Journal**, v. 48, n. 2, p. 151–162, abr. 2003.
- LUDWIG, F.; ASSENG, S. Climate change impacts on wheat production in a Mediterranean environment in Western Australia. **Agricultural Systems**, v. 90, n. 1–3, p. 159–179, 1 out. 2006.
- MAPA - Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. **Zoneamento Agrícola de Risco Climático: Instrumento de Gestão de Risco Utilizado pelo Seguro Agrícola do Brasil**. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br>>.
- MARTORANO, L. G. **Padrões de resposta da soja a condições hídricas do sistema solo-planta-atmosfera, observados no campo e simulados no sistema de suporte à decisão DSSAT**. 2007. Tese de Doutorado (Programa de pós graduação em Fitotecnia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.
- MARTORANO, L. G.; VITORINO, M. I.; SILVA, B. P. P. C. DA; MORAES, J. R. D. S. C. DE; LISBOA, L. S.; SOTTA, E. D.; REICHARDT, K. Climate conditions in the eastern amazon: Rainfall variability in Belem and indicative of soil water deficit. **African Journal of Agricultural Research**, v. 12, n. 21, p. 1801–1810, 25 maio 2017.
- MATHEW, J. P.; HERBERT, S. J.; ZHANG ANDREAS F RAUTENKRANZ, S. A.; LITCHFIELD, G. V. Differential Response of Soybean Yield Components to the Timing of Light Enrichment. **Agronomy journal**, n. 92, p. 1156–1161, 2000.
- MELLO, C. R. de; ÁVILA, L. F.; NORTON, L. D.; SILVA, A. M. da; MELLO, J. M. de; BESKOW, S. Spatial distribution of top soil water content in an experimental catchment of

- Southeast Brazil. **Scientia Agricola**, v. 68, n. 3, p. 285–294, jun. 2011.
- MOORE, I. D.; BURCH, G. J.; MACKENZIE, D. H. Topographic Effects on the Distribution of Surface Soil Water and the Location of Ephemeral Gullies. **Transactions of the ASAE**, v. 31, n. 4, p. 1098–1107, 1988.
- MORGAN, C. L. S.; NORMAN, J. M.; LOWERY, B. Estimating Plant-Available Water Across a Field with an Inverse Yield Model. **Soil Science Society of America Journal**, v. 67, n. 2, p. 620, 2003.
- MOTOMIYA, A. V. A.; MOLIN, J. P.; MOTOMIYA, W. R.; VIEIRA, S. R. Spatial variability of soil properties and cotton yield in the Brazilian Cerrado. **Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v. 15, n. 10, p. 996–1003, 2011.
- MULLA, D. J.; BHATTI, A. U.; HAMMOND, M. W.; BENSON, J. A. The water requirement of plants versus spatially variable fertilizer management. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 38, p. 301–311, 1992.
- NELSON, G. C.; VAN DER MENSBRUGGHE, D.; AHAMMAD, H.; BLANC, E.; CALVIN, K.; HASEGAWA, T.; HAVLIK, P.; HEYHOE, E.; KYLE, P.; LOTZECAMPEN, H.; VON LAMPE, M.; MASON D'CROZ, D.; VAN MEIJL, H.; MÜLLER, C.; REILLY, J.; ROBERTSON, R.; SANDS, R. D.; SCHMITZ, C.; TABEAU, A.; TAKAHASHI, K.; VALIN, H.; WILLENBOCKEL, D. Agriculture and climate change in global scenarios: why don't the models agree. **Agricultural Economics**, v. 45, p. 85–101, 2014.
- OLIVEIRA, E. C. de; QUARTEZANI, W. Z.; NEVES, L. D. O.; AGUIAR, L. J. G.; FISCHER, G. R.; ROBERTI, D. R.; COSTA, G. S.; COSTA, J. M. N. da. Evapotranspiration soybean: comparison between eddy covariance method and the estimate of cropgro-soybean model. **Ciência e Natura**, v. 38, n. 0, p. 28, 20 jul. 2016.
- OLIVEIRA, R. K. **Fluxos de CO₂, água e energia em áreas de renovação de canavial com cultivo de soja**. 2018. Dissertação de Mestrado (Programa de pós graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 2018.
- OLIVER, Y. M.; ROBERTSON, M. J.; STONE, P. J.; WHITBREAD, A. Improving estimates of water-limited yield of wheat by accounting for soil type and within-season rainfall. **Crop and Pasture Science**, v. 60, n. 12, p. 1137, 2009.
- OLIVER, Y. M.; ROBERTSON, M. J.; WONG, M. T. F. Integrating farmer knowledge, precision agriculture tools, and crop simulation modelling to evaluate management options for poor-performing patches in cropping fields. **European Journal of Agronomy**, v. 32, n.

- 1, p. 40–50, jan. 2010.
- PAZ, J. O.; BATCHELOR, W. D.; COLVIN, T. S.; LOGSDON, S. D.; KASPAR, T. C.; KARLEN, D. L. Analysis of water stress effects causing spatial yield variability in soybeans. **Transactions of the ASAE**, v. 41, n. 5, p. 1527–1534, 1998.
- PEDERSEN, L.; JENSEN, N. E.; CHRISTENSEN, E.; MADSEN, H. Quantification of the spatial variability of rainfall based on a dense network of rain gauges. **Atmospheric Research**, v. 95, p. 441–454, 2010.
- PURCELL, L. C.; SPECHT, J. E. Physiological Traits for Ameliorating Drought Stress. In: BOERMA, H. R.; SPECHT, J. E. (Ed.). **Soybeans: Improvement, Production, and Uses**. 3. ed. Madison: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America, 2004. p. 569–620.
- QUIRING, S. M.; PAPAKRYIAKOU, T. N. An evaluation of agricultural drought indices for the Canadian prairies. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 118, n. 1–2, p. 49–62, ago. 2003.
- RAY, D. K.; GERBER, J. S.; MACDONALD, G. K.; WEST, P. C. Climate variation explains a third of global crop yield variability. **Nature Communications**, v. 6, p. 5989, jan. 2015.
- REICHARDT, K.; ANGELOCCI, L. R.; BACCHI, O. O. S.; PILOTTO, J. E. Daily rainfall variability at a local scale (1,000 ha), in Piracicaba, SP, Brazil, and its implications on soil water recharge. **Scientia Agricola**, v. 52, n. 1, p. 43–49, abr. 1995.
- SANTI, A. L.; CARNEIRO AMADO, T. J.; DA SILVA, V. R.; BASSO, C. J.; DELLA FLORA, L. P.; CHERUBIN, M. R.; EITELWEIN, M. T. Infiltração De Água No Solo, Determinada por diferentes Métodos, Como Indicador Do Potencial Produtivo Em Dois Latossolos Manejados Com Agricultura De Precisão. **Interciência**, 2012.
- SAU, F.; BOOTE, K. J.; BOSTICK, W. M.; JONES, J. W.; MÍNGUEZ, M. I. Testing and Improving Evapotranspiration and Soil Water Balance of the DSSAT Crop Models. **Agronomy Journal**, v. 96, n. 5, p. 1243, 2004.
- SHIBLES, R. M.; WEBER, C. R. Interception of Solar Radiation and Dry Matter Production by Various Soybean Planting Patterns. **Crop Science**, v. 6, n. 1, p. 55, 1966.
- SILVA, J. W.; GUIMARÃES, E. C.; TAVARES, M. Variabilidade temporal da precipitação mensal e anual na estação climatológica de Uberaba-MG. **Ciênc. agrotec.**, v. 27, n. 3, p. 665–674, 2003.
- STAPE, L.; SENTELHAS, P. C.; ALVARES, C. A.; GONC, L. D. M. Köppen s climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2014.
- STOL, P. T. The relative efficiency of the density of rain-gage networks. **Journal of**

- Hydrology**, v. 15, n. 3, p. 193–208, mar. 1972.
- SUYKER, A. E.; VERMA, S. B. Evapotranspiration of irrigated and rainfed maize–soybean cropping systems. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, n. 3–4, p. 443–452, 11 mar. 2009.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. **Publication in Climatology**, v. Laboratory, n. 1, 1955.
- THORP, K. R.; DEJONGE, K. C.; KALEITA, A. L.; BATCHELOR, W. D.; PAZ, J. O. Methodology for the use of DSSAT models for precision agriculture decision support. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 64, n. 2, p. 276–285, dez. 2008.
- TOKAY, A.; ROCHE, R. J.; BASHOR, P. G.; TOKAY, A.; ROCHE, R. J.; BASHOR, P. G. An Experimental Study of Spatial Variability of Rainfall. **Journal of Hydrometeorology**, v. 15, n. 2, p. 801–812, 10 abr. 2014.
- VAN ITTERSUM, M. K.; CASSMAN, K. G.; GRASSINI, P.; WOLF, J.; TITTONELL, P.; HOCHMAN, Z. Yield gap analysis with local to global relevance-A review. **Field Crops Research**, v. 143, p. 4–17, 2013.
- VIEIRA, S. R.; GARCIA, M. A. G.; GONZÁLEZ, A. P.; SIQUEIRA, G. M. Variabilidade espacial e temporal do teor de água do solo sob duas formas de uso. **Bragantia**, v. 69, n. 1, p. 181–190, 2010.
- WESTERN, A. W.; ZHOU, S.-L.; GRAYSON, R. B.; MCMAHON, T. A.; BLÖSCHL, G.; WILSON, D. J. Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrological processes. **Journal of Hydrology**, v. 286, n. 1–4, p. 113–134, 30 jan. 2004.
- WONG, M. T. F.; ASSENG, S. Determining the Causes of Spatial and Temporal Variability of Wheat Yields at Sub-field Scale Using a New Method of Upscaling a Crop Model. **Plant and Soil**, v. 283, n. 1–2, p. 203–215, 2006.
- YU, C.; LI, C.; XIN, Q.; CHEN, H.; ZHANG, J.; ZHANG, F.; LI, X.; CLINTON, N.; HUANG, X.; YUE, Y.; GONG, P. Dynamic assessment of the impact of drought on agricultural yield and scale-dependent return periods over large geographic regions. **Environmental Modelling & Software**, v. 62, p. 454–464, dez. 2014.