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

**Variabilidade espacial e temporal da precipitação em Piracicaba (SP) e
influência sobre a produtividade estimada da Soja**

Thais Leticia dos Santos

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

**Piracicaba
2020**

Thais Leticia dos Santos
Bacharela em Ciências Atmosféricas

**Variabilidade espacial e temporal da precipitação em Piracicaba (SP) e influência
sobre a produtividade estimada 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 Mestra
em Ciências. Área de concentração: Engenharia de
Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2020

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

Santos, Thais Leticia dos

Variabilidade espacial e temporal da precipitação em Piracicaba (SP) e influência sobre a produtividade estimada da Soja / Thais Leticia dos Santos.
- - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - -
Piracicaba, 2020.

63 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

*Ao meus pais
Silvana e Paulo*

AGRADECIMENTOS

À Deus.

Aos meus pais, Silvana e Paulinho, por me incentivarem e darem todo o suporte para que eu pudesse concluir essa etapa. À minha irmã Karina, pelo apoio e carinho, mesmo longe.

Ao meu orientador Felipe Pilau, pelo apoio, incentivo, confiança, otimismo e amizade.

Aos meus amigos da Esalq Alinne, Cleverson, Déborah, Luiza e Rodolfo. Obrigada por serem meus maiores incentivadores, por me ajudarem em todos os momentos e pela amizade ímpar.

Ao meu namorado João, por estar sempre ao meu lado em todas as decisões.

A empresa Agrosystem por confiar no meu trabalho e me apoiar nessa etapa, especialmente à Isadora pela compreensão.

Aos membros do Grupo GEPEMA-AGRIMET, pelo apoio nas atividades de campo e pela amizade, em especial ao Gustavo Felipe.

Aos professores do PPG Engenharia de Sistemas Agrícolas pelos ensinamentos.

Ao professor Klaus Reichard e demais autores do artigo, cujos dados foram utilizados neste trabalho.

Aos funcionários da ESALQ pelos serviços e apoio prestados.

À CAPES pelo auxílio financeiro fornecido neste projeto.

À FAPESP pela concessão dos equipamentos por meio do projeto SOS CHUVA.

E a todos, que de forma direta e indireta, contribuíram para minha formação pessoal e profissional.

SUMÁRIO

RESUMO	6
ABSTRACT	7
1. INTRODUÇÃO GERAL	9
2. OBJETIVO GERAL.....	12
2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
REFERÊNCIAS.....	12
3.VARIABILIDADE ESPACIAL DA PRECIPITAÇÃO BASEADA EM DENSAS MALHAS PLUVIOMÉTRICAS	17
RESUMO.....	17
ABSTRACT.....	17
3.1. INTRODUÇÃO.....	17
3.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	21
3.2.1. LOCAL DO EXPERIMENTO.....	21
3.2.2. MEDIDA DA PRECIPITAÇÃO.....	23
3.2.3. CONSISTÊNCIA DAS SÉRIES DE DADOS E ANÁLISE DA VARIABILIDADE ESPACIAL DA PRECIPITAÇÃO.....	23
3.2.4. DADOS HISTÓRICOS DE PRECIPITAÇÃO DE PIRACICABA (SP).....	25
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
3.3.1. CARACTERÍSTICAS DOS DADOS PLUVIOMÉTRICOS.....	26
3.3.2. VARIABILIDADE ESPACIAL DA PRECIPITAÇÃO NA ESCALA MENSAL.....	29
3.3.3. VARIABILIDADE ESPACIAL DA PRECIPITAÇÃO NA ESCALA DIÁRIA.....	33
3.3.4. VARIABILIDADE EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE PLUVIÔMETROS.....	36
3.4. CONCLUSÃO.....	37
REFERÊNCIAS.....	38
4.VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO E A INFLUÊNCIA NA VARIABILIDADE DA PRODUTIVIDADE SOJA.....	43
RESUMO.....	43
ABSTRACT.....	43
4.1. INTRODUÇÃO.....	44
4.2. METODOLOGIA.....	46
4.2.1. LOCAL DO EXPERIMENTO.....	46
4.2.2. MEDIDA ESPAÇO-TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO.....	47
4.2.3. CORREÇÃO DA SÉRIE DE DADOS PLUVIOMÉTRICOS.....	46
4.2.4. MODELOS DE SIMULAÇÃO DE CULTURAS.....	47
4.2.5. SIMULAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DA SOJA.....	47
4.2.6. ANÁLISE DA VARIABILIDADE ESPACIAL DA PRECIPITAÇÃO E DA PRODUTIVIDADE DA SOJA.....	48
4.3. RESULTADOS.....	49
4.3.1. VARIABILIDADE TEMPORAL DA TEMPERATURA E RADIAÇÃO SOLAR PARA CADA ÉPOCA DE SEMEADURA.....	49
4.3.2. CARACTERÍSTICA DOS DADOS PLUVIOMÉTRICOS NA ESCALA MENSAL.....	51
4.3.3. VARIABILIDADE ESPAÇO TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO.....	53
4.3.4. VARIABILIDADE ESPACIAL DA PRODUTIVIDADE SIMULADA DA SOJA.....	56
4.4. CONCLUSÕES.....	60
REFERÊNCIAS.....	59

RESUMO

Variabilidade espacial e temporal da precipitação em Piracicaba (SP) e influência sobre a produtividade estimada da Soja

O Brasil é o segundo maior produtor de soja do mundo e um dos maiores produtores grãos. No entanto, ainda existem lacunas de rendimento a serem superadas, visando atender as necessidades alimentares da crescente população. A compreensão dos limites biofísicos de cada local e a maneira como os elementos meteorológicos influenciam a produção agrícola, é fundamental para alcançar altos rendimentos, de maneira sustentável. Sendo assim, o objetivo do trabalho foi 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. Para tanto, foram instaladas duas malhas pluviométricas de diferentes dimensões (36 ha e 1000 ha) na região de Piracicaba, SP. A primeira malha (1000 ha) compreendeu o período de 1993 a 1994, com 10 pluviômetros e a segunda malha corresponde ao período de 2016 a 2018, com 9 pluviômetros amostrando 36 ha. Com base em uma abordagem multi-modelo foi possível determinar a perda produtiva relativa (Y_{rel} , em %), causada por deficiência hídrica, para 3 datas de semeadura e para cada ponto amostral da primeira malha. Com relação a variabilidade espacial na malha de 1000 ha, o coeficiente de variação apresentou valores de até 169,3% no acumulado diário e 51,7% no mensal. Para a segunda malha (36 ha) a variabilidade foi de até 300% para os 9 pontos no acumulado diário, e 8,71% no acumulado mensal. Os resultados mostraram que variabilidade espacial da precipitação influenciou diretamente a produtividade. No entanto, a ordem de grandeza da variabilidade da precipitação não se aplica diretamente em produtividade. Já a variabilidade temporal, entre as diferentes épocas de semeadura apresentou maior influência na produtividade da soja.

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

ABSTRACT

Spatial and temporal variability of precipitation in Piracicaba (SP) and influence on estimated soybean yield

Brazil is the second largest producer of soybeans in the world and one of the largest producers of grains. However, there are still income yield gaps to be overcome to meet growing food demand. Understanding the biophysical limits of each location and how weather elements influence agricultural production is critical to achieve high yields in a sustainable way. Thus, the objective of this work was to evaluate the spatial and temporal variability of rainfall within an area and, based on modeling, to identify the effect on soybean yield variability. For that, two rain gauges of different dimensions (36 ha and 1000 ha) were installed in the Piracicaba region, SP. The first mesh (1000 ha) comprised the period from 1993 to 1994, with 10 rainfall meters and the second mesh corresponds to the period from 2016 to 2018, with 9 rain gauges measuring 36 ha. Based on a multi-model approach it was possible to determine the relative yield gap (Y_{grel.}, %) caused by water deficit for 3 sowing dates and for each sampling point of the first mesh. Regarding the spatial variability in the 1000 ha mesh, the coefficient of variation presented values of up to 169.3% in the daily accumulated and 51.7% in the monthly. For the second network (36 ha) the variability was up to 300% for the 9 points in the daily accumulated, and 8.71% in the monthly accumulated. The results showed that spatial variability of precipitation directly influenced the final yield. However, the order of magnitude of precipitation variability does not apply to yield. The temporal variability between the different sowing seasons had the greatest influence on soybean yield.

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

1. INTRODUÇÃO GERAL

Um dos grandes desafios da humanidade, ainda nesse século, é atender às necessidades alimentares da crescente população mundial (DAVIS et al., 2016). As projeções indicam 9,735 bilhões de habitantes para o ano de 2050 e 10,875 bilhões em 2100 (ONU, 2019).

Para alimentar esses adicionais futuros será preciso aumentar a produção agrícola mundial em até 60% (LOBELL; CASSMAN; FIELD, 2009; ALEXANDRATOS; BRUINSMA, 2012). Essa necessidade implica, contudo, em um desafio adicional, uma vez que o aumento da produção não poderá ser unicamente baseado no aumento da área cultivada. A maior parte do acréscimo da produção agrícola do mundo precisará vir do aumento da produtividade da área agrícola consolidada (VAN REES et al., 2014). Tudo feito com alta eficiência de uso de insumos, especialmente água, com impacto mínimo sobre o clima global.

Nesse sentido, compreender as restrições biofísicas de cada local torna-se ainda mais importante, direcionando estrategicamente o manejo e a tomada de decisão (LOBELL; CASSMAN; FIELD, 2009). Alguns estudos mencionam técnicas, como a “Agricultura de Precisão”, como soluções para diminuir as lacunas de rendimento em âmbito global (FOLEY et al., 2011; YOST et al., 2019).

As culturas agrícolas, em todo ciclo, têm o crescimento e desenvolvimento influenciados pelos fatores ambientais, principalmente pelas variações do tempo e do clima (FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007). Em áreas de produção de soja, milho e arroz, 60% da variabilidade da produção é explicada pela variabilidade dos elementos meteorológicos. Mundialmente as condições meteorológicas explicam um terço da variabilidade de rendimento observada (RAY et al., 2015).

No Brasil, apesar dos avanços em genótipos mais tolerantes ao estresse hídrico e emprego de novas técnicas de manejo, as perdas produtivas continuam relacionadas ao déficit hídrico. A escassez de água nas lavouras é responsável por 73,8% das perdas em produção da soja, 75,6% da cana-de-açúcar e 80% do milho (SENTELHAS et al., 2015a).

A produtividade, quando condicionada apenas pelo déficit hídrico, representa um patamar teórico denominado de produção limitada pela água (LOBELL et al. 2009), ou produtividade atingível (PA) (SENTELHAS et al., 2015a). O déficit hídrico de uma cultura está atrelado a fatores como características físico-hídricas do solo, sensibilidade da cultivar à seca, evapotranspiração e variações nos padrões de precipitação (GILBERT et al., 2011; BATTISTI; SENTELHAS, 2017). Dentre estes fatores, a sensibilidade da cultivar à seca é o único que pode

ser manejado, selecionando-se genótipos adaptados ao ambiente (SINCLAIR et al., 2010; GILBERT et al., 2011). A variabilidade espacial das características químicas, físicas e biológicas do solo e dos elementos meteorológicos são, portanto, fatores importantes que devem ser considerados para o entendimento pleno dos sistemas agrícolas.

Em uma mesma área de produção agrícola podem ser encontradas subunidades que, mesmo sendo manejadas uniformemente, apresentam diferentes potenciais produtivos (AMADO et al., 2007; MOLIN; DI; FAULIN, 2013). Nas áreas que seguem as técnicas da “Agricultura de Precisão”, os campos de produção têm as características de solo, químicas e físicas, espacialmente identificadas. Essas variáveis, delineadas por meio de mapas, são importantes para o entendimento da variabilidade espacial da produtividade (AMADO et al., 2009; MOLIN et al., 2016).

Contudo, apenas a caracterização do solo não se mostra suficiente para um entendimento completo do sistema de produção, exigindo que a variabilidade dos elementos meteorológicos, especialmente da precipitação, também seja definida (MOLIN et al., 2016). As lavouras de sequeiro, que representam a maior parte da produção nacional, são as mais afetadas pela variabilidade nos padrões de precipitação (BERLATO; FARENZENA; FONTANA, 2005; DA SILVA et al., 2009). Sendo a chuva um fenômeno meteorológico irregular, altamente variável no espaço e no tempo, torna-se complexo compreender sua influência direta na produtividade agrícola. A ocorrência de variações espaciais das chuvas em pequenas escalas, por exemplo, dentro de uma mesma propriedade, pode indicar a necessidade de manejos diferenciados. Para quantificar a variabilidade da precipitação em alta resolução espaço-temporal é necessário estabelecer uma malha de pluviômetros em superfície ou adotar tecnologias que permitam estimar a chuva, como radares e satélites meteorológicos (PEDERSEN et al., 2010; SALIO et al., 2015; TAWDE; SINGH, 2015).

A identificação da variabilidade espaço-temporal da precipitação, definida por malhas pluviométricas (SCHILLING, 1991; JENSEN; PEDERSEN, 2005; GIRES et al., 2014), radares meteorológicos (EMMANUEL et al., 2012; DELAHAYE et al., 2015) ou satélites (TAWDE; SINGH, 2015), vinculada aos aspectos físicos pertinentes à capacidade de retenção de água do solo (CHO; CHOI, 2014), tornam possível mapear a disponibilidade de água às culturas agrícolas e seus efeitos sobre a produtividade (DE LANNOY et al., 2006; SCHWANTES et al., 2016).

Para avaliar esses efeitos, modelos de crescimento de culturas (MCC's) são as opções mais indicadas (HOOGENBOOM, 2000; JONES et al., 2003). Os MCC's consistem em ferramentas que possibilitam a simulação do crescimento e desenvolvimento das culturas, descrevendo os

processos biofísicos e as interações que ocorrem entre a planta e o ambiente (JONES et al. 2003).

Em geral, as simulações são pontuais, dentro das chamadas “zonas homogêneas”, que consistem em áreas com elementos edafoclimáticos similares, ou seja, características de solo e elementos meteorológicos teoricamente invariáveis no espaço (SHELIA et al., 2019a). No entanto, como previamente abordado, muitos estudos identificam e quantificam a não uniformidade das características de solo e elementos meteorológicos em escalas espaciais menores que 1 km (BÁRDOSSY; LEHMANN, 1998; COOPER, 2003; CAMARGO et al., 2005; EMMANUEL et al., 2012; ALVARES et al., 2013b).

Por isso, a partir de medidas de chuva em alta resolução espacial, e a utilização de modelos de crescimento de culturas, podem surgir ferramentas de previsão espacial de rendimento de culturas (SHELIA et al., 2019a). Isso permite acrescentar o fator meteorológico na Agricultura de Precisão, a fim de melhor compreender sobre a influência da variabilidade da chuva nas variações de produtividade, visando melhorar a gestão dos recursos na atividade agrícola e, consequentemente, aumentar os rendimentos.

Considerando o Brasil, em posição de destaque mundial na produção e exportação de grãos (CONAB, 2019) e a existência, ainda, de grandes lacunas de rendimentos (SENTELHAS et al., 2015b), é imprescindível que as pesquisas estejam direcionadas para este cenário.

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 duas áreas no município de Piracicaba (SP).

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.

REFERÊNCIAS

- ALEXANDRATOS, N.; BRUINSMA, J. World Agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. WORLD AGRICULTURE. 2012.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, v. 22, n. 6, p. 711–728, 1 dez. 2013.
- AMADO, T.; BOLSON PONTELLI, C.; LUÍS SANTI, A.; VIANA, J.; AUGUSTO DE SOUZA SULZBACH, L. Spatial and temporal variability of grain yield under no-tillage cropping system. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 42, p. 1101–1110, 1 ago. 2007.
- AMADO, T. J. C.; PES, L. Z.; LEMAINSKI, C. L.; SCHENATO, R. B. Atributos químicos e físicos de latossolos e sua relação com os rendimentos de milho e feijão irrigados. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 33, n. 4, p. 831–843, ago. 2009.
- BÁRDOSSY, A.; LEHMANN, W. Spatial distribution of soil moisture in a small catchment. Part 1: geostatistical analysis. Journal of Hydrology, v. 206, n. 1, p. 1–15, 1998.
- BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C. Improvement of soybean resilience to drought through deep root system in Brazil. Agronomy Journal, 2017.

- 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.
- 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.
- CHO, E.; CHOI, M. Regional scale spatio-temporal variability of soil moisture and its relationship with meteorological factors over the Korean peninsula. *Journal of Hydrology*, v. 516, p. 317–329, 2014.
- COOPER, R. L. A delayed flowering barrier to higher soybean yields. *Field Crops Research*, v. 82, n. 1, p. 27–35, 20 mar. 2003.
- 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.
- DAVIS, K. F.; GEPHART, J. A.; EMERY, K. A.; LEACH, A. M.; GALLOWAY, J. N.; D'ODORICO, P. Meeting future food demand with current agricultural resources. *Global Environmental Change*, v. 39, p. 125–132, 1 jul. 2016.
- DE LANNOY, G. J. M.; VERHOEST, N. E. C.; HOUSER, P. R.; GISH, T. J.; VAN MEIRVENNE, M. Spatial and temporal characteristics of soil moisture in an intensively monitored agricultural field (OPE3). *Journal of Hydrology*, v. 331, n. 3–4, p. 719–730, dez. 2006.
- DELAHAYE, F.; KIRSTETTER, P. E.; DUBREUIL, V.; MACHADO, L. A. T.; VILA, D. A.; CLARK, R. A consistent gauge database for daily rainfall analysis over the Legal Brazilian Amazon. *Journal of Hydrology*, v. 527, p. 292–304, 2015.
- EMMANUEL, I.; ANDRIEU, H.; LEBLOIS, E.; FLAHAUT, B. Temporal and spatial variability of rainfall at the urban hydrological scale. *Journal of Hydrology*, v. 430–431, p. 162–172, 2 abr. 2012.
- FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. *Ecofisiologia da soja Londrina Embrapa (Circular Técnica 48)*, , 2007. .
- FOLEY, J. A.; RAMANKUTTY, N.; BRAUMAN, K. A.; CASSIDY, E. S.; GERBER, J. S.; JOHNSTON, M.; MUELLER, N. D.; O'CONNELL, C.; RAY, D. K.; WEST, P. C.; BALZER, C.; BENNETT, E. M.; CARPENTER, S. R.; HILL, J.; MONFREDA, C.; POLASKY, S.; ROCKSTRÖM, J.; SHEEHAN, J.; SIEBERT, S.; TILMAN, D.; ZAKS, D. P. M. Solutions for a cultivated planet. *Nature*, v. 478, n. 7369, p. 337–342, 12 out. 2011.

- GILBERT, M. E.; HOLBROOK, N. M.; ZWIENIECKI, M. A.; SADOK, W.; SINCLAIR, T. R. Field confirmation of genetic variation in soybean transpiration response to vapor pressure deficit and photosynthetic compensation. *Field Crops Research*, v. 124, n. 1, p. 85–92, 9 out. 2011.
- GIRES, A.; TCHIGUIRINSKAIA, I.; SCHERTZER, D.; SCHELLART, A.; BERNE, A.; LOVEJOY, S. Influence of small scale rainfall variability on standard comparison tools between radar and rain gauge data. *Atmospheric Research*, v. 138, p. 125–138, 1 mar. 2014.
- HOOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its application. [s.l: s.n.]v. 103
- 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, 1 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, 1 jan. 2003.
- LOBELL, D. B.; CASSMAN, K. G.; FIELD, C. B. Crop Yield Gaps: Their Importance, Magnitudes, and Causes. *Annual Review of Environment and Resources*, v. 34, n. 1, p. 179–204, 15 nov. 2009.
- MOLIN, J. P.; DI, G.; FAULIN, C. Molin & Faulin Soil moisture and soil electrical conductivity *Scientia Agricola* Spatial and temporal variability of soil electrical conductivity related to soil moisture. *Sci. Agric.* v. 70, n. 1, p. 1–5, 2013.
- MOLIN, J. P.; VEIGA, J. P. S.; MOLIN, J. P.; VEIGA, J. P. S. Spatial variability of sugarcane row gaps: measurement and mapping. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 40, n. 3, p. 347–355, jun. 2016.
- PEDERSEN, L.; JENSEN, N. E.; CHRISTENSEN, L. E.; MADSEN, H. Quantification of the spatial variability of rainfall based on a dense network of rain gauges. *Atmospheric Research*, v. 95, n. 4, p. 441–454, 1 mar. 2010.
- 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, 22 jan. 2015.
- SALIO, P.; HOBOUCHIAN, M. P.; GARCÍA SKABAR, Y.; VILA, D. Evaluation of high-resolution satellite precipitation estimates over southern South America using a dense rain gauge network. *Atmospheric Research*, v. 163, p. 146–161, 15 set. 2015.
- SCHILLING, W. Rainfall data for urban hydrology: what do we need? *Atmospheric Research Elsevier Science Publishers B.V*, v. 27, p. 5–21, 1991.

- SCHWANTES, A. P.; REICHARDT, K.; NETO, D. D.; DURIGON, A.; PINTO, V. M. Soil Water Storage in Soybean Crop Measured by Polymer Tensiometers and Estimated by Agrometeorological Methods. *Journal of Agricultural Science*, v. 8, n. 7, p. 30, 8 jun. 2016.
- SENTELHAS, P. C.; BATTISTI, R.; CÂMARA, G. M. S.; FARIAS, J. R. B.; HAMPF, A. C.; NENDEL, C. The soybean yield gap in Brazil – magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. *The Journal of Agricultural Science*, v. 153, n. 08, p. 1394–1411, 24 nov. 2015a.
- SENTELHAS, P. C.; BATTISTI, R.; CÂMARA, G. M. S.; FARIAS, J. R. B.; HAMPF, A. C.; NENDEL, C. The soybean yield gap in Brazil – magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. *The Journal of Agricultural Science*, v. 153, n. 8, p. 1394–1411, 24 nov. 2015b.
- SHELIA, V.; HANSEN, J.; SHARDA, V.; PORTER, C.; AGGARWAL, P.; WILKERSON, C. J.; HOOGENBOOM, G. A multi-scale and multi-model gridded framework for forecasting crop production, risk analysis, and climate change impact studies. *Environmental Modelling and Software*, p. 144–154, 1 maio 2019.
- SINCLAIR, T. R.; MESSINA, C. D.; BEATTY, A.; SAMPLES, M. Assessment across the United States of the Benefits of Altered Soybean Drought Traits. *Agronomy Journal*, v. 102, n. 2, p. 475, 2010.
- TAWDE, S. A.; SINGH, C. Investigation of orographic features influencing spatial distribution of rainfall over the Western Ghats of India using satellite data. *International Journal of Climatology*, v. 35, n. 9, p. 2280–2293, jul. 2015.
- VAN REES, H.; MCCLELLAND, T.; HOCHMAN, Z.; CARBERRY, P.; HUNT, J.; HUTH, N.; HOLZWORTH, D. Leading farmers in South East Australia have closed the exploitable wheat yield gap: Prospects for further improvement. *Field Crops Research*, v. 164, n. 1, p. 1–11, 1 ago. 2014.
- YOST, M. A.; KITCHEN, N. R.; SUDDUTH, K. A.; MASSEY, R. E.; SADLER, E. J.; DRUMMOND, S. T.; VOLKMANN, M. R. A long-term precision agriculture system sustains grain profitability. *Precision Agriculture*, p. 1–22, 18 mar. 2019.

3. VARIABILIDADE ESPACIAL DA PRECIPITAÇÃO BASEADA EM DENSAS MALHAS PLUVIOMÉTRICAS

Resumo

Os sistemas convectivos atmosféricos, predominantes em muitas regiões do Brasil no verão austral, caracterizam-se por alta variabilidade espaço-temporal da precipitação. Essa variabilidade, por sua vez, tem impacto tanto em setores urbanos quanto rurais. O objetivo do estudo foi caracterizar a variabilidade espacial da precipitação, utilizando duas malhas pluviométricas de diferentes dimensões, 36 ha e 1000 ha. O estudo foi realizado para a região de Piracicaba, SP, e compreendeu dois períodos de observações com redes pluviométricas distintas. O primeiro, de 1993 a 1994, com 10 pluviômetros na malha de 1000 ha e o segundo, de 2016 a 2018, com 9 pluviômetros amostrando 36 ha e um pluviômetro distante 2250 m da segunda malha. A variabilidade foi avaliada para acumulados diários e mensais. Para a malha de 1000 ha, o coeficiente de variação apresentou valores de até 169,3% no acumulado diário e 51,7% no mensal. Para a segunda malha (36 ha) a variabilidade foi de até 300% para os 9 pontos no acumulado diário, e 8,71% no acumulado mensal. Em ambas as malhas a variabilidade da precipitação apresentou uma relação inversa com acumulados de precipitação e com a distância entre pluviômetros.

Palavras-chave: Chuva; Distribuição irregular; Pluviômetros; Tempo; Espaço.

Abstract

Atmospheric convective systems, predominant in many regions of Brazil in the southern summer, are characterized by high spatiotemporal variability of rainfall. This variability, in turn, impacts both urban and rural sectors. The objective of the study was to characterize the spatial variability of precipitation using two rain gauges networks of different dimensions, 36 ha and 1000 ha. The study was conducted for the Piracicaba region, SP, and comprised two observation periods with distinct rain gauges networks. The first, from 1993 to 1994, with 10 rain gauges in the 1000 ha mesh and the second, from 2016 to 2018, with 9 rain gauges with the 36ha mesh. The variability was evaluated for daily and monthly accumulated. For the 1000 ha mesh, the coefficient of variation presented values of up to 169.3% in the daily accumulated, 51.7% in the monthly. For the second network (36 ha) the variability was up to 300% to 9 points in the daily accumulated, and 8.71% in the monthly accumulated. In both networks the precipitation variability presented an inverse relationship with precipitation accumulations and the distance between rain gauges.

Keywords: Rain; Irregular distribution; Rain gauges; Time; Space.

3.1. Introdução

O regime pluviométrico de uma região influencia a forma de ocupação e os tipos de atividades socioeconômicas no espaço. O planejamento das principais atividades de setores importantes como a indústria, a agricultura e o turismo dependem das variações nas condições

meteorológicas, sobretudo da variabilidade da chuva (REICHARDT et al., 1995; BERLATO; FONTANA, 1999; EMMANUEL et al., 2012).

A atividade agrícola, além de depender diretamente das variações da precipitação, é a responsável pela utilização de grande parte da água doce disponível (TILMAN et al., 2011). Portanto, estudos regionais sobre as variações da precipitação permitem um planejamento eficiente da utilização dos recursos hídricos (BERLATO; FONTANA, 1999; DELAHAYE et al., 2015; EMMANUEL et al., 2015).

A variabilidade espacial da chuva aumenta com a predominância de sistemas convectivos, sendo menos pronunciada em sistemas estratiformes. Algumas características do ambiente, como orografia, vegetação, bacias hidrográficas ou a presença de corpos hídricos, também podem estar relacionadas com a irregularidade espacial da chuva (STOL, 1972; CAMARGO; HUBBARD, 1999; JENSEN; PEDERSEN, 2005; PEDERSEN et al., 2010; EMMANUEL et al., 2015). A variabilidade temporal geralmente é caracterizada nas escalas sazonais ou interanuais, sendo a primeira uma resposta direta das estações do ano e a segunda uma consequência de fenômenos oceânico-atmosféricos ou de anomalias nos padrões climáticos globais.

O estado de São Paulo está localizado no Sudeste do Brasil, região de grande importância econômica, responsável por 53,3% do PIB nacional (IBGE 2018). Por ser uma região de transição entre as latitudes tropicais e subtropicais, e por estar próxima ao oceano, apresenta elevado fluxo de energia ao longo do ano e altas taxas de evaporação. Como consequência, a distribuição de precipitação é altamente irregular no tempo e no espaço (REBOITA et al., 2010).

As variações intra-anuais nessa região são afetadas pelo regime de monção da América do Sul (MARENGO et al., 2010), apresentando um ciclo anual bem definido na precipitação, com uma estação chuvosa e a outra com decréscimo de pluviosidade.

A estação chuvosa (outubro-março) está associada aos padrões de circulação de mesoescala e com atuação de frentes frias e da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (ZHOU; LAU, 1998; LIEBMANN; JONES; DE CARVALHO, 2001; REBOITA et al., 2010).

Já no período com menor pluviosidade (abril-setembro), devido ao arranjo da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), que nesta estação alcança sua posição mais a oeste, a chuva provém principalmente da entrada de sistemas frontais e de ciclones subtropicais e extratropicais que conseguem se sobrepor a ASAS (REBOITA et al., 2010; PAMPUCH et al., 2016).

A influência de fenômenos de escalas maiores, como El Niño-Oscilação Sul (ENOS), sobre as variações nas precipitações no sudeste do Brasil são diversas e a relação não é linear, pois depende de outros fatores como a condição do Oceano Atlântico Sul, posição do Jato Subtropical, convergência ou divergência de umidade pelo Jato de Baixos Níveis entre outros (GRIMM; FERRAZ; GOMES, 1998).

Para identificar e quantificar a variabilidade espaço-temporal da precipitação pluvial, podem ser usadas malhas pluviométricas (SCHILLING, 1991; JENSEN; PEDERSEN, 2005; GIRES et al., 2014), radares meteorológicos (EMMANUEL et al., 2012; DELAHAYE et al., 2015) ou satélites (SALIO et al., 2015; TAWDE; SINGH, 2015). Dados de precipitação oriundos de radares e satélites, por se tratarem de estimativas, carecem de calibrações que são realizadas por meio de malhas pluviométricas (TAPIADOR et al., 2012).

Nas últimas décadas, avanços consideráveis na estimativa da precipitação devem-se às novas tecnologias, em especial a radares meteorológicos (LEIJNSE et al., 2007; VAN DE BEEK et al., 2010). No entanto, no Brasil, devido principalmente a insuficiência de dados pluviométricos, ainda existem poucos estudos que exploraram a variabilidade espacial das chuvas, principalmente em escalas menores.

Nesse sentido, encontra-se o estudo de Reichardt et al. (1995), que analisaram a variabilidade diária de chuva em uma escala local de 10 km², em Piracicaba, SP, ao longo de um ano. O coeficiente de variação (CV), para dez pontos de observação pluviométrica, variou de 2,2 a 169,3%, e os totais anuais apresentaram um CV de 3,06%. Nesse estudo, os autores não encontraram relação entre a variabilidade da chuva e o tipo de sistema precipitante, e nem correlação com as distâncias entre pluviômetros.

Também para o estado de São Paulo, a partir de dados de 19 estações meteorológicas (período 1981-2000), com distância máxima entre estações de 436 km, Camargo et al. (2005) identificaram uma variabilidade da precipitação pluviométrica a partir de 1 km nos meses de verão. Porém, na média, as distâncias de até 12 km explicam 90% da variação para os meses de verão, até 20 km para os meses de primavera e outono e de até 27 km para os meses de inverno. A maior variabilidade observada no verão foi atribuída ao predomínio de chuvas convectivas. A análise do erro-padrão da estimativa (SEE) diária indicou valores muito altos durante os meses do verão, (14,5 mm) e reduzidos durante o inverno (4,0 mm), considerando a distância de 150 km.

Ao analisar dados coletados por cinco pluviômetros, ao longo de 32 anos, Bega et al. (2005) analisaram a variabilidade espacial de chuvas diárias em Pindorama, estado de São Paulo. Com equipamentos distantes 257 a 3900 metros entre si, a análise de correlação mostrou que a

medida em que a distância entre os pluviômetros aumenta a correlação entre os dados diminui, indicando uma dependência espacial nos dados de precipitação pluvial local. Eles concluíram também que variações na altitude e predomínio de sistemas convectivos têm influência na variabilidade da chuva.

No estudo realizado por Schilling (1991), ao avaliar a densidade das redes pluviométricas com escalas espaço-temporais consistentes com o tempo de resposta e dimensões de bacias hidrográficas urbanas, sugere-se uma densidade espacial de um pluviômetro por quilômetro quadrado, com uma resolução temporal de medição de um minuto, a fim de quantificar com precisão a variabilidade da chuva. Com objetivos similares, porém utilizando dados de precipitação de radar (resolução espacial de 250 km²), Emmanuel et al. (2012b) avaliaram 24 eventos de chuva obtidos em 12 dias no ano de 2009. O estudo classificou os eventos de chuva em quatro tipos de acordo com a variabilidade espaço-temporal, mostrando que existe uma relação entre o volume precipitado e a variabilidade da chuva. Para escalas consistentes com bacia hidrográficas os autores indicam uma resolução espacial mínima de 2,5 km durante chuvas fortes e 6,5 km durante eventos de chuva de menores intensidades.

Com o objetivo de prover uma estimativa de incerteza ao usar um único pluviômetro para calibrar as estimativas de precipitação de radar meteorológico, Jensen e Pedersen (2005) e Pedersen et al. (2010), avaliaram a variabilidade de evento de chuva menores que 60 min em uma escala espacial menor que 1 km em Arhus na Dinamarca, durante o ano de 2003. O primeiro estudo utilizou uma malha de nove pluviômetros, equidistantes 166,7 m, e observaram variações de até 80,4% no volume precipitado. Para o mesmo local, acrescentando uma série mais longa da dados, encontraram valores de coeficiente de variação de 1 a 77%, considerando todo o conjunto de dados, e de 1 a 26% com base na nova malha pluviométrica.

Gires et al. (2014) avaliaram a representatividade da medição pontual de precipitação, considerando que pluviômetros geralmente possuem um diâmetro de área de coleta de 20 cm, que disdrômetros têm área amostral de 50 cm², enquanto resoluções espaciais de radares meteorológicos são, em geral, de 1 km². O estudo avaliou a variabilidade da precipitação com 16 pluviômetros em uma área de 1 km² na Universidade de Bradford (Reino Unido). Foram utilizados também dados de 16 disdrômetros com distância máxima de 800 m. Os resultados mostraram diferenças significativas entre as informações dentro das malhas, ou seja, no subpixel do radar, mostrando que mesmo em pequena escala o efeito da variabilidade deve ser considerado.

Krajewski et. al (2003) avaliaram a variabilidade espacial da chuva em uma escala menor que 5 km em cinco localidades no mundo: na cidade de Ji Paraná, estado e Rondônia - Brasil,

nos Estados Unidos, na região central da Flórida, na cidade de Iowa, em Iowa e na bacia de Little Washita em Oklahoma, além da Ilha de Rotas em Guam, no oeste do Oceano Pacífico. A justificativa do estudo foi de embasar as pesquisas em sensoriamento remoto da atmosfera e modelagem meteorológica. O estudo mostrou que em regiões como Guam, Flórida e Brasil foram observadas as menores correlações de Pearson entre os dados pluviométricos (de 0,3 a 0,9 para acumulados de chuva de 1 hora) indicando maior variabilidade espacial. Os autores relacionaram esse fator a predominância de células convectivas e localizadas, típicas dessas regiões. Já em Iowa e Oklahoma, estados nos quais há uma predominância de sistemas estratiformes, as correlações foram próximas de 1 para acumulados de chuva horário.

Apesar dos avanços nas estimativas de precipitação por sensoriamento remoto, informações precisas, obtidas por redes pluviométricas, seguem sendo essenciais para aplicações que vão desde melhorias nos modelos meteorológicos até validações das estimativas de radares e satélites (DELAHAYE et al., 2015). Sendo assim, o objetivo do estudo foi caracterizar a variabilidade espacial da chuva em uma área agrícola na região de Piracicaba, utilizando duas malhas pluviométricas.

3.2. Material e métodos

3.2.1. Local do experimento

A pesquisa foi realizada na Escola Superior de “Agricultura Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo (ESALQ/USP), no município de Piracicaba, SP. Para quantificar a variabilidade espacial da precipitação foram usados dados de duas malhas pluviométricas.

A primeira malha pluviométrica (MP1) foi instalada por Reichardt et al. (1995), em 1993, para mensurar a variabilidade diária da chuva em uma escala local de 1000 ha.

A segunda malha de pluviômetros (MP2) foi instalada em 2016, em uma área experimental da Fazenda Areão (ESALQ/USP), com o objetivo de quantificar a variabilidade de precipitação em uma escala menor, de 36 hectares (Figura 1).

Figura 1. Localização do município de Piracicaba e da área de estudo no Estado de São Paulo, e posicionamento das duas malhas pluviométricas (MP1 e MP2) na área experimental da Esalq/USP.

O clima da região de Piracicaba, segundo a classificação de Köppen, é o Cwa- Tropical úmido, com chuvas concentradas entre os meses de outubro a março e período seco no outono-inverno (ALVARES et al., 2013a) A normal climatológica de precipitação anual é de 1350 mm.

Os tipos de solo mais frequentes no campus da ESALQ/USP são os nitossolos vermelhos e os argissolos vermelho-amarelos (EMBRAPA, 2013), com frequência de aparecimento de 55,05% e 13,76%, respectivamente (TORRADO et al., 2004).

A partir da descrição dos locais de instalação dos pluviômetros da MP1 (REICHARDT et al., 1995), foi realizada a coleta do posicionamento geográfico de cada equipamento. Para isso foi utilizado um aplicativo para dispositivos móveis, disponibilizado pelo Laboratório de Geomática da Universidade Federal de Santa Maria, denominado GPS C7 Dados. O aplicativo possui receptor de sinal GLONASS (Sistema de Navegação Global por Satélites) e receptor GNSS (Sistemas Globais de Navegação por Satélite).

Na ocasião da instalação dos pluviômetros para formação da MP2, como o objetivo era definir distância lateral exata entre sensores, de 200 m, a marcação dos pontos de instalação foi

previamente determinada também com receptores de sinal GNSS da marca *Garmin*, modelo GPSMap® 62s. Todos os dados possuem coordenadas geográficas e coordenadas plano-retangulares do tipo UTM (projeção UTM), tendo como referência espacial o sistema WGS 84 e zona 23 S.

3.2.2. Medida da precipitação

Os nove pluviômetros que formaram a primeira malha (REICHARDT et al., 1995) foram aleatoriamente distribuídos na área da ESALQ/USP. A menor distância entre pontos de medida era de 990 m, enquanto a maior ficou em 2550 m. As medições foram feitas entre os meses de novembro de 1993 até outubro de 1994, na escala diária, somando 364 dias de informações pluviométricas. Os equipamentos eram manuais e possuíam área de coleta de 300 cm² e precisão de medição é de 0,1 mm. As instalações foram realizadas a 1,5 m acima da superfície do solo, estando livre de qualquer obstáculo em um círculo de pelo menos 20 m de raio. Um décimo ponto de coleta foi o pluviômetro da estação meteorológica oficial da ESALQ/USP, atualmente denominado Posto Meteorológico "Professor Jesus Marden dos Santos". Mais detalhes estão descritos em Reichardt et al. (1995).

Na área experimental da Fazenda Areão da ESALQ/USP foi instalada a segunda malha pluviométrica. Nove pluviômetros foram distribuídos com mesma distância entre si, de 200 m, formando uma malha quadricular (Figura 2). Em função das dimensões da área experimental e interferência da vegetação o ponto 7 foi deslocado, mas sem alterar a distância entre pluviômetros. Para essa malha foram coletados dados no período de 8 de novembro de 2016 a 22 de janeiro de 2018.

Assim como realizado em Reichardt et al. (1995), a segunda malha também contou com um pluviômetro instalado no Posto Meteorológico "Professor Jesus Marden dos Santos" da ESALQ/USP, distante 2250 m do centro da MP2.

Figura 2- Mapa do posicionamento geográfico da MP2 na Fazenda Areão, ESALQ/USP.

Os pluviômetros da MP2 eram do modelo “*Tipping Bucket*”, marca Vaisala, com superfície de coleta de 380 cm². Os equipamentos foram instalados a 1,5 m acima da superfície, nivelados, calibrados e conectados a um sistema de aquisição de dados Log Chart II, armazenando medidas a cada minuto.

3.2.3. Consistência das séries de dados e análise da variabilidade espacial da precipitação

As séries temporais de dados de precipitação da MP1 (REICHARDT et al., 1995) e da MP2 foram preliminarmente avaliadas incluindo os períodos com funcionamento simultâneo de todos os pluviômetros de cada malha amostral.

A avaliação do desempenho dos medidores requer a identificação dos volumes reais dos eventos de chuva, que é desconhecida. No entanto, como cada malha era composta por nove medidores, além do pluviômetro instalado no posto meteorológico da ESALQ/USP, foi possível estimar a incerteza das medições de cada instrumento a partir dos desvios da média, obtida dos pluviômetros em operação. Assim, as medições foram avaliadas a fim de se identificar dados errôneos e faltantes.

Para a análise da variabilidade espacial da precipitação das malhas MP1 e MP2 foram utilizados, somente registros com pelo menos seis pluviômetros em operação sem qualquer imputação de dados faltantes (Figura 3).

Dos 364 dias de medição da MP1, 353 dias tiveram seis ou mais pluviômetros em operação, correspondendo a 96,9% do período. Já para a MP2, dos 441 dias consecutivos de medição, em apenas três dias houve registro de funcionamento de apenas cinco pluviômetros e em apenas um dia somente quatro pluviômetros estiveram operando normalmente. Portanto, por 419 dias, seis ou mais pluviômetros estavam funcionando normalmente. Os dados pluviométricos mensurados na área do Posto Meteorológico da ESALQ/USP, pela MP1 e MP2, não apresentaram falhas.

Figura 3 - Relação entre o número de pluviômetros em operação e o número de dias de coleta de dados das malhas MP1 e MP2.

A variabilidade espacial da precipitação, para as escalas diária e mensal, foi quantificada a partir do desvio padrão (Eq. 1) e do coeficiente de variação (Eq. 2).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1)$$

onde σ é o desvio padrão da amostra (mm), n é o tamanho da amostra, e $\bar{x}$ é a média aritmética (mm).

$$Cv = 100 \cdot \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (2)$$

sendo Cv o coeficiente de variação de Pearson (%), σ o desvio padrão (mm) e $\bar{x}$ a média aritmética (mm) da precipitação entre os pluviômetros.

Também foi avaliada a correlação de Pearson (ρ) em relação às distâncias entre os pluviômetros.

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{cov(X, Y)}{\sqrt{var(X) \cdot var(Y)}} \quad (3)$$

em m que ρ é a correlação de Pearson, $\bar{x}$ e $\bar{y}$ são as médias aritméticas (mm) de cada variável, n é o tamanho da amostra, $cov(X, Y)$ é a covariância entre as duas variáveis e $var(X, Y)$ é a variância (mm²) da amostra.

Dados de precipitação registrados em áreas que variam de alguns metros quadrados a 8 km são escalas típicas para produtos de radar utilizados em aplicações hidrológicas. Em tais escalas, os dados das chuvas podem ser consideravelmente distorcidos e, portanto, devem ser transformados (HABIB et al., 2001).

O teste de Shapiro-Wilk (SHAPIRO; WILK, 1965) foi escolhido para análise da normalidade dos dados.

Para o cálculo da correlação de Pearson os dados foram normalizados com a transformação de Box-Cox, utilizando logaritmo neperiano na base e ($\ln$). A transformação Box-Cox é amplamente usada para transformar dados hidrológicos em aproximadamente gaussianos (THYER; KUCZERA; WANG, 2002). A ideia geral é restringir a atenção para transformações indexadas para parâmetros λ desconhecidos e depois estimar λ e outros parâmetros do modelo por métodos padronizados de inferência (BOX; COX, 1964). Para determinação da transformação dos dados aplica-se a Equação 4:

$$y(\lambda) = \frac{(y^\lambda - 1)}{\lambda} \quad \lambda \neq 0$$

$$y(\lambda) = \log y \quad \lambda = 0$$
(4)

3.2.4. Dados históricos de precipitação de Piracicaba (SP)

Dados de precipitação coletados diariamente entre 1 de janeiro de 1917 e 31 de dezembro de 2018, no Posto Meteorológico “Professor Jesus Marden dos Santos” da ESALQ/ USP foram usados para elaborar a base histórica de chuva mensal local.

3.3. Resultados e discussão

3.3.1. Características da série de dados pluviométricos

Dados de precipitação mensal registrados pela MP1, comparados aos dados médios históricos (1917-2018), caracterizam um período de anomalias negativas de precipitação. Com exceção dos meses de março e abril de 1994, em todos os demais o volume de chuva média da MP1 foi sempre inferior à média histórica. O mês de agosto de 1994 foi o mais seco, sem qualquer registro de precipitação. Em relação aos meses da estação chuvosa, novembro de 1993 a março de 1994, e o mês de outubro de 1994, as maiores diferenças foram registradas em dezembro de 1993, com $-125,3 \text{ mm mês}^{-1}$ e janeiro de 1994, com $-149,8 \text{ mm mês}^{-1}$ (Figura 3). Em média, os totais mensais registrados de novembro de 1993 a outubro de 1994 equivaleram a apenas 51% das médias mensais históricas (Figura 4).

Figura 3 – Precipitação média mensal para a MP1 e média histórica (1917-2018) em Piracicaba, SP.

Figura 4. Relação entre a precipitação mensal média da malha amostral 1 (MP1) e a precipitação mensal histórica de Piracicaba (1917-2018).

Dados de precipitação coletados pela MP2 também apresentaram acentuadas diferenças em comparação aos dados históricos de Piracicaba (1917-2018). Os meses de janeiro, fevereiro, abril, junho, julho, agosto e outubro de 2017, que tiveram registros pluviométricos diários completos, apresentaram diferenças de $-17,9 \text{ mm mês}^{-1}$ (agosto) a $96,0 \text{ mm mês}^{-1}$ (fevereiro) em relação aos dados históricos. Diferenças observadas entre os demais meses e dados históricos não devem ser considerados como anomalias pois, tais períodos, apresentam 1 dia (março, setembro, novembro e dezembro de 2017), dois dias (maio de 2017) e até sete dias (dezembro de 2016) com ausência de dados coletados. Ressalta-se ainda que a campanha de coleta de dados da MP2 foi iniciada e finalizada sem compreender todos os dias dos meses de novembro de 2016 e janeiro de 2018. Portanto, as diferenças entre os dados de precipitação mensal desses meses não caracterizam desvio em relação ao dado histórico. A comparação, realizada apenas entre meses com série de dados completa, mostrou precipitação acumulada mensal da MP2 mais próximas a média histórica (Figura 6), em relação aos registrados para a MP1 (Figura 4).

Figura 5. Precipitação média mensal para a MP2 e média histórica (1917-2018) em Piracicaba, SP.

Figura 6 - Relação entre a precipitação mensal média da malha amostral 2 (MP2) e a precipitação mensal histórica de Piracicaba (1917-2018).

As causas das diferenças em relação à precipitação média mensal histórica podem ser diversas, podendo estar relacionadas a fenômenos atmosféricos de escalas planetárias, como mudanças na temperatura dos oceanos (PAMPUCH et al., 2016). Vale destacar que para o ano de 1993 não foi registrado a presença do fenômeno El Niño Oscilação Sul - ENSO (NOAA, 2019) e, que no ano de 2017, esse também era o cenário na avaliação feita até o trimestre agosto-

setembro-outubro. Após, do trimestre setembro-outubro-novembro a novembro-dezembro-janeiro, foi registrado a presença da fase fria do fenômeno, a La Niña (-0,6 a -0,7°C).

Em relação a uma possível influência do ENSO no regime pluviométrico local, ao comparar os dados médios dos meses de outubro de 2017 (sem falhas de dados diários) e novembro de 2017 (com um dia de informação faltante) da MP2 aos dados históricos, têm-se diferenças de -34,2 mm mês⁻¹ para o primeiro e de 103,2 mm mês⁻¹ para o segundo mês. Mais uma vez evidenciando a fraca influência do ENSO sobre o regime de chuva no estado de São Paulo (CARVALHO; JONES; LIEBMANN, 2002).

3.3.2. Variabilidade espacial da precipitação na escala mensal

Para avaliação da variabilidade espacial da precipitação mensurada pelas malhas pluviométricas MP1 e MP2, ressalta-se que todos os dados faltantes da MP1 e MP2 foram identificados, a fim de excluir dados de pluviômetro(s) faltantes, em qualquer contabilidade temporal, para análise da variabilidade da precipitação (Tabelas 1 e 2).

Dos 364 dias de medição da precipitação por meio da MP1, 93,9% apresentaram dados consistentes em todos os pontos de coleta (Tabela 1). O mês de novembro de 1993 foi o que apresentou o maior número de falhas, com 10,3% de dados nulos, seguido do mês de janeiro de 1994, com 3,5%. Todos os outros meses tiveram falhas inferiores a 2%, cinco deles sem qualquer dado faltante (Tabela 1).

Tabela 1- Precipitação (mm) e falhas de registro de dados (%) mensal e precipitação média (mm), desvio padrão (mm) e coeficiente de variação (%) entre os pluviômetros para cada mês da MP1.

Período	Precipitação (mm mês ⁻¹)										Falhas %	Prec. med. mm mês ⁻¹	DP mm mês ⁻¹	CV %
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10				
Nov./93	83,7	63,8	64,8	95,3	44,1	59,8	64,4	22,6	26,6	91,6	10,3	90,2	5,9	6,6
Dez/93	127,4	96,9	113,0	119,1	181,3	129,9	118,4	172,0	129,7	146,1	1,3	134,7	18,8	14,0
Jan/94	121,9	127,8	76,9	124,1	137,4	127,3	131,4	132,5	144,1	133,3	3,5	132,2	6,3	4,8
Fev./94	130,3	125,2	145,0	153,1	153,9	158,7	160,9	172,8	116,6	154,8	1,1	149,6	16,9	11,3
Mar/94	244,8	126,3	229,9	206,4	197,9	231,4	232,0	223,5	192,7	222,2	1,3	223,5	15,0	6,7
Abr./94	89,5	78,2	115,7	94,5	96,4	107,5	83,9	118,6	91,0	114,2	0,0	90,0	14,6	16,2
Mai/94	49,2	54,9	55,1	60,3	52,7	56,8	50,5	52,9	49,5	55,8	0,0	48,9	3,3	6,8
Jun./94	35,3	36,0	38,2	35,7	38,7	37,1	34,0	35,5	37,3	36,7	0,0	33,1	1,5	4,4
Jul./94	17,9	22,1	41,5	41,1	24,6	36,8	35,4	22,4	27,6	24,7	0,0	26,7	8,0	29,9
Ago/94	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Set/94	1,2	0,0	0,0	1,5	0,0	0,0	0,0	0,5	1,7	0,5	1,7	1,1	0,6	51,7
Out/94	127,4	104,5	140,2	144,7	118,1	129,5	128,0	125,8	140,5	125,6	0,7	131,1	8,7	6,7

Falhas %: quantidade de dados diários ausentes em relação ao total de medidas dos nove pluviômetros da MP1.

Prec. med. A precipitação média mensal foi composta pelos pluviômetros que apresentaram sempre a mesma sequência de medições válidas.

Dados grifados não compõem a média, desvio padrão e coeficiente de variação.

Para os 441 dias de registro de dados pluviométricos coletados pela MP2, considerando somente os nove pluviômetros da área experimental da Fazenda Areão, foram totalizados 10,6% de dados nulos (Tabela 2). Nessa segunda malha (MP2) em 62,3% dos dias todos os pluviômetros estiveram em pleno funcionamento. Os meses de novembro e dezembro de 2016 e fevereiro e março de 2017 foram os que tiveram as maiores falhas de registro de dados, sendo de 25,8% para dezembro de 2016. Somente no mês de julho de 2017 não foram observadas falhas de coleta.

Krajewski et al. (2003); Jensen e Pedersen (2005); Pedersen et al., (2010) são alguns dos trabalhos que destacam as dificuldades impostas quando são utilizados pluviômetros, principalmente por conta do entupimento do coletor e, especialmente no caso de sensores automáticos, problemas relacionados ao fornecimento de energia ao sistema de coleta. Isso justifica porque malhas compostas por sensores autônomos, assim como a MP2, podem apresentar maior quantidade de dados falhos se comparado ao uso de sensores manuais, como feito na MP1 (Tabelas 1 e 2).

Tabela 2- Precipitação e falhas de registro de dados (%) mensal e precipitação média, desvio padrão e coeficiente de variação entre os pluviômetros para cada mês da MP2.

Período	Precipitação (mm mês ⁻¹)										Falhas %	Prec. med. mm mês ⁻¹	DP mm mês ⁻¹	CV %
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10				
Nov/16 ^a	103,8	110,5	108,8	112,2	108,0	111,3	109,8	110,2	105,6	110,3	21,7	108,9	2,73	2,51
Dez/16	159,2	99,8	168,5	159,6	161,3	164,0	159,1	166,5	165,6	178,1	25,8	163,0	3,68	2,26
Jan/17	323,8	27,9	94,4	299,4	322,8	321,5	317,0	324,2	294,5	295,9	14,6	317,3	11,48	3,62
Fev/17	82,8	26,7	0,0	0,0	84,6	87,5	84,2	81,9	77,0	88,6	23,0	83,0	3,48	4,20
Mar/17	115,0	91,9	7,6	9,5	107,2	61,5	103,2	101,6	91,7	111,5	19,0	103,7	8,48	8,18
Abr/17	69,2	3,3	75,9	95,2	131,8	69,5	128,3	135,1	126,2	131,8	13,7	130,4	3,88	2,98
Mai/17	146,4	1,3	147,8	144,2	143,8	1,2	139,1	145,9	136,8	150,6	12,2	141,9	3,83	2,70
Jun/17	0,0	0,8	15,7	16,6	16,8	8,3	16,6	8,9	17,0	15,3	6,7	16,5	0,51	3,08
Jul/17	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	-
Ago/17	49,4	0,0	49,3	49,5	47,8	47,4	45,6	46,5	43,4	51,3	3,2	47,9	1,54	3,22
Set/17	34,1	0,0	41,5	41,7	41,7	44,0	40,3	38,6	38,9	46,7	4,1	40,1	2,96	7,39
Out/17	68,7	89,2	77,7	71,2	74,4	75,8	70,8	9,8	70,8	73,2	2,9	74,8	6,52	8,71
Nov/17	238,1	222,3	234,3	270,6	233,4	226,2	224,0	20,7	192,2	228,9	8,9	237,8	16,92	7,12
Dez/17	94,4	122,7	134,8	131,3	144,5	140,0	129,8	61,3	134,6	143,4	4,7	135,8	5,52	4,06
Jan/18 ^b	65,6	166,1	139,7	78,1	151,6	144,3	72,7	131,6	153,1	154,5	15,7	151,0	10,08	6,68

Pmed. A precipitação média mensal foi composta pelos pluviômetros que apresentaram sempre a mesma sequência de medições válidas.

Dados grifados não compõem a média, desvio padrão e coeficiente de variação.

Falhas %: quantidade de dados diários ausentes em relação ao total de medidas dos nove pluviômetros da MP2

Com relação a variabilidade espacial da precipitação na escala mensal, a malha MP1 apresentou maiores variações entre os pontos do que a MP2, especialmente devido às maiores distâncias entre os pluviômetros nessa malha. A maior diferença observada entre os acumulados médios mensais, ou seja, diferença entre o máximo e o mínimo valor acumulado por ponto de medida, foi de 56,2 mm mês⁻¹, registrado em fevereiro de 1994, com desvio padrão de 15 mm mês⁻¹ e coeficiente de variação (CV) de 6,7 %. Tais resultados destacam a variação espacial da chuva em uma área de 1000 ha.

Em geral, o desvio padrão da MP1 variou de 18,8 a 0,6 mm mês⁻¹ e o coeficiente de variação ficou entre os 4,4% e os 51,7%. Reichardt et al. (1995) analisaram a variabilidade espacial dessa série de dados para acumulados diários e anuais, o que resultou em coeficiente de variação entre de 2,2% a 169,3% para acumulados diários e 3,06% no acumulado anual. Pedersen et al. (2010) analisando dados acumulados de 5 minutos, portanto em maior resolução temporal, encontraram coeficiente de variação de até 212% em uma área de somente 25 ha.

Silva et al. (2003) avaliaram a variabilidade da precipitação pluvial mensal e anual na estação meteorológica de Uberaba (MG), e destacaram 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. Villarini et al., (2008), analisando dados de 50 pluviômetros durante 6 anos em uma área de 135 km² também relatou uma diminuição da variabilidade à medida que se acumula a precipitação no tempo. Isso ocorre pois, no acumulado, as diferenças entre os pontos são compensadas, indicando que a variabilidade da chuva nesse caso não está relacionada a posição geográfica dos pontos. Já para locais em que a geografia exerce influência sobre a variabilidade espacial e temporal da chuva, por exemplo a presença de corpos hídricos, essa compensação ao longo do tempo nos acumulados de chuva pode não ocorrer e a variabilidade se manter (VILLARINI et al., 2008).

Na MP1 os meses de julho e setembro de 1994 foram os que apresentaram maiores valores de CV, de 29,9% e 51,7%, respectivamente. Em julho, a média mensal entre os pluviômetros foi de 26,7 mm mês⁻¹, com desvio padrão de 8 mm mês⁻¹. Já em setembro, apesar do valor alto de CV, os acumulados mensais registrados pelos sensores não chegaram aos 2 mm mês⁻¹, com desvio padrão de 0,6 mm mês⁻¹.

Da mesma forma, os dados de chuva coletados pela MP2 entre os meses de novembro de 2016 e janeiro de 2018 apresentam variabilidade espaço-temporal entre os nove pontos de coleta e também com o ponto referencial (P10) localizado a 2550 m do centro da MP2, no posto meteorológico ESALQ/USP (Tabela 3). Ressalta-se que essa segunda malha, abrangendo uma área de apenas 36 ha, corresponde a apenas 3,6% dos 1000 ha da MP1. Mesmo assim, na MP2, foram observadas diferenças entre pontos de medição, como o que ocorreu em novembro de 2017 quando a precipitação média mensal da malha ficou em 237,8 mm mês⁻¹ com um desvio padrão de 16,92 mm mês⁻¹ (CV de 7,12 %). Esses resultados evidenciam as diferenças significativas de precipitação pluvial no acumulado mensal mesmo em distâncias menores que 1 km.

Coefficientes de variação maiores do que 5% foram observados para os meses de março, setembro, outubro e novembro de 2017 e janeiro de 2018.

Devido à pequena variação entre as distâncias dos 9 pontos da MP2 (158 a 612 metros) a comparação com os dados do pluviômetro do Posto Meteorológico foi realizada com a média dos 9 pontos. A maior diferença entre a média de chuva mensal dos 9 pontos e o acumulado no posto foi de 21,4 mm mês⁻¹ (CV de 5%) para janeiro de 2017. Na escala mensal houve pouca variabilidade da precipitação entre a média dos 9 pontos da MP2 e o posto meteorológico, com coeficiente de determinação de 0,99 (Figura 7).

No geral, os valores altos de amplitude e os elevados coeficientes de variação encontrados nas duas malhas, mesmo na escala mensal, evidenciam que existe uma variabilidade espacial da precipitação observada em curtas distâncias.

Figura 7- Comparação das médias de precipitação diária obtidas dos 9 pluviômetros da MP2 e o posto meteorológico (MP10).

3.3.3. Variabilidade espacial da precipitação na escala diária

A variabilidade espacial da chuva para os acumulados diários, como esperado, foi maior do que na escala mensal em ambas as malhas (Tabelas 1 e 2 e Figuras 8 e 9). A MP1, novamente, apresentou maior variabilidade espacial da precipitação em comparação à MP2, determinada pelos valores elevados de desvio padrão e coeficiente de variação, relativos a eventos com pequenos e grandes volumes acumulados de chuva (Figuras 8, 9 e 10).

Para a MP1 a maior diferença entre dados de precipitação diária foi de 42,8 mm dia⁻¹, verificado entre os pontos P2 (0,0 mm dia⁻¹) e o P8 (42,8 mm dia⁻¹), pluviômetros distantes 1,89 km entre si (Figura 8). Essa diferença foi registrada em 3 de dezembro de 1993.

Na MP1 o desvio padrão médio foi de 0,74 mm dia⁻¹ e o máximo foi de 13,08 mm dia⁻¹ para o dia 9 de fevereiro de 1994; nesse dia a média de precipitação entre pluviômetros foi de 18,32 mm dia⁻¹. No geral, para volumes médios maiores que 30 mm dia⁻¹ o desvio variou de 2,62 mm dia⁻¹ a 9,8 mm dia⁻¹. Já para volumes médios menores que 10 mm dia⁻¹ os desvios ficaram entre 0,15 a 11,49 mm dia⁻¹ (Figura 8).

Para a MP2 a maior diferença nos acumulados diários de chuva foi de 19,4 mm dia⁻¹, entre o P4 e o P9, distantes 454 m entre si, no dia 4 de novembro de 2017. O desvio médio foi de 0,41 mm dia⁻¹, sendo o máximo valor encontrado na malha de 6,81 mm dia⁻¹ para o

dia 4 de novembro de 2017, no qual a média diária entre pluviômetros chegou a 57,34 mm dia⁻¹. Nessa malha, para acumulados diários acima de 30 mm dia⁻¹ os desvios variaram de 0,98 a 6,81 mm dia⁻¹ e para volumes menores do que 10 mm dia⁻¹ o desvio ficou entre 0,08 e 3,57 mm dia⁻¹ (Figura 9).

Figura 8 - Precipitação pluviométrica diária e desvio padrão para MP1.

Figura 9 - Precipitação pluviométrica diária e desvio padrão para MP2.

O coeficiente de variação apresentou uma relação inversa com o volume de chuva acumulado diário para ambas as malhas (Figura 10). Na MP1 para volumes baixos de precipitação, inferiores a 3 mm dia⁻¹, o CV superou os 100%, chegando a 169,3% (Figura 10). Daí em diante, com volumes diários crescentes, têm-se valores de CV continuamente menores (Figura 10). Os resultados concordam com aqueles apresentados por Pedersen et al. (2010), que para Arhus na Dinamarca também observaram relação inversa entre dados diários de precipitação e o coeficiente de variação. Os dados foram obtidos em uma malha

de 9 pluviômetros, abrangendo área de 25 ha, e o CV só foi superior a 50% para eventos chuvosos menores que 5 mm dia^{-1} .

Em geral, nos 87 dias com registros de chuva na MP1, em 82,8% desses o coeficiente de variação superou os 10%, sendo que em 36,8% das vezes o CV excedeu os 50%. Esses resultados evidenciam a alta variabilidade espacial da chuva diária durante período de medição na área de 1000 ha.

Para a MP2 ficou mais claro a relação inversa entre o volume acumulado de chuva e o CV, nesse caso muito similar aos resultados descritos por Pedersen et al. (2010). Apesar de volumes de chuva inferiores a 1 mm dia^{-1} apresentarem CV variando de 15% a 300%, no geral, CV acima de 57% só foram observados para volumes menores que $1,2 \text{ mm dia}^{-1}$. Já para volumes superiores a 10 mm dia^{-1} o máximo valor do coeficiente de variação encontrado foi de 29% (Figura 10).

Apesar do coeficiente de variação máximo da MP2 superar aqueles determinados para a MP1, de forma geral os dados registrados diariamente na MP1 apresentaram maior variabilidade em comparação a MP2 (Figura 10).

Figura 10. Relação entre o coeficiente de variação e o volume diário precipitado na MP1 e na MP2.

Assim como na escala mensal, a média dos dados pluviométricos na malha MP2 foi comparada com a precipitação observada no posto meteorológico (P10). A maior diferença encontrada entre a média da MP2 e o posto foi de $38,42 \text{ mm dia}^{-1}$ para o dia 14 de janeiro de 2017. Comparando a variabilidade entre a média dos 9 pontos na escala mensal, novamente a média na escala diária foi maior, com R^2 de 0,78 (Figura 11).

Figura 11. Regressão linear entre a precipitação (mm dia^{-1}) média na malha MP2 e a precipitação (mm dia^{-1}) no posto meteorológico da ESALQ/USP.

3.3.4. Variabilidade em função da distância entre pluviômetros

Os acumulados diários de precipitação (mm dia^{-1}) das duas malhas foram submetidos a uma transformação log normal ($\ln$) a fim de obter uma série de dados com distribuição gaussiana e assim calcular a correlação de Pearson. A correlação de Pearson foi gerada para cada par de pluviômetros dentro das malhas e confrontada com as respectivas distâncias entre eles (Figura 12).

A correlação nas duas malhas variou de 0,885 a 0,995 indicando uma forte correlação entre os dados. Isso mostra, também, que nenhum pluviômetro nas malhas estava tendencioso. A medida em que as distâncias entre os pluviômetros aumentam a correlação entre eles diminui (Figura 12). Tais resultados indicam uma dependência espacial da precipitação, evidenciando que, quanto maior a distância entre pluviômetros, menor a correlação entre eles.

Para a MP1 as correlações de Pearson ficaram acima de 0,97 para todas as combinações de pontos. Vários estudos relatam os altos valores de correlação entre dados pluviométricos em curtas distâncias. Ciach e Krajewski (2006) analisando 24 pontos pluviométricos, cobrindo uma área de 900 ha, durante dois verões em Oklahoma, verificaram correlações acima de 0,7 com a mesma dependência espacial para diferentes períodos de acumulação (5 min, 15 min, 1 hora e 3 horas).

Para distâncias maiores a correção tende a diminuir ainda mais, Delahaye et al., 2015 analisando 57 pluviômetros com distâncias que variaram de 10 a 500 km encontraram correlações variando de 0,1 a 0,4 para chuvas acumuladas diárias.

A partir do modelo empírico, para Piracicaba, SP (Figura 12), pode-se determinar que pluviômetros com distâncias entre si superiores a 4,5 km tendem a ter correlação (r) com valor de 0,9.

Figura 12 – Correlação de Pearson para cada par de pluviômetro e as respectivas distâncias entre ele para as malhas MP1 e MP2.

3.4. Conclusões

A variabilidade espacial da precipitação pluvial foi avaliada em duas malhas pluviométricas com dimensões distintas, para a escala mensal e diária nos períodos de novembro de 1993 a outubro de 1994 e de novembro de 2016 a janeiro de 2018.

A primeira malha (1993-1994) cobriu 1000 ha com pluviômetros com distâncias que variaram de 990 a 2550 m. Nessa malha para acumulados mensais o coeficiente de variação ficou entre 4,4% e 51,7%, e na escala diária a variabilidade foi maior, com CV de 2,2% a 169,3%. Tais resultados indicam uma alta variabilidade espacial nessa malha, mesmo na escala mensal.

A segunda malha (2016-2018) cobriu uma área de 36 ha, com distâncias entre pluviômetros variando de 158 a 612 m. O CV foi de 2,51% a 8,71% para escala mensal e 2,18% a 300% na diária e, assim como na MP1, a variabilidade foi maior para acumulados diários de precipitação. O alto valor do CV na escala diária ocorreu apenas para volumes de chuva muito baixos, inferiores a 1,2 mm dia⁻¹. A comparação da média dos dados da MP2 com o ponto de referência do Posto Meteorológico (P10) apresentou diferenças da ordem de 21,9 mm mês⁻¹ e 38,42 mm dia⁻¹.

Em ambas as malhas a variabilidade da precipitação apresentou uma relação inversa entre os acumulados de precipitação e a distância entre pluviômetros. Os resultados mostram que um aumento da distância entre pluviômetros, mesmo para curtas distâncias (menores que 1 km) ocasiona uma diferença significativa nos registros pluviométricos.

Referências

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- 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.
- CAMARGO, M. B. P.; BRUNINI, O.; JUNIOR, M. J. P.; BARDIN, L. Variabilidade espacial e temporal de dados termopluiométricos diários da rede de estações agrometeorológicas do instituto agrônômico (AIC). *Bragantia*, v. 64, n. 3, p. 473–483, 2005.
- CAMARGO, M. B. P.; HUBBARD, K. G. Spatial and temporal variability of daily weather variables in sub-humid and semi-arid areas of the united states high plains. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 93, p. 141–148, 1999.
- CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. Extreme Precipitation Events in Southeastern South America and Large-Scale Convective Patterns in the South Atlantic Convergence Zone. *Journal of Climate*, v. 15, n. 17, p. 2377–2394, 1 set. 2002.
- CIACH, G. J.; KRAJEWSKI, W. F. Analysis and modeling of spatial correlation structure in small-scale rainfall in Central Oklahoma. *Advances in Water Resources*, v. 29, n. 10, p. 1450–1463, out. 2006.
- DELAHAYE, F.; KIRSTETTER, P. E.; DUBREUIL, V.; MACHADO, L. A. T.; VILA, D. A.; CLARK, R. A consistent gauge database for daily rainfall analysis over the Legal Brazilian Amazon. *Journal of Hydrology*, v. 527, p. 292–304, 2015.
- EMBRAPA, E. B. D. P. A. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos 3a edição revista e ampliada. 3 ed. rev. ed. [s.l.] Embrapa, 2013.
- EMMANUEL, I.; ANDRIEU, H.; LEBLOIS, E.; FLAHAUT, B. Temporal and spatial variability of rainfall at the urban hydrological scale. *Journal of Hydrology*, v. 430–431, p. 162–172, 2 abr. 2012.

- EMMANUEL, I.; ANDRIEU, H.; LEBLOIS, E.; JANEY, N.; PAYRASTRE, O. Influence of rainfall spatial variability on rainfall–runoff modelling: Benefit of a simulation approach? *Journal of Hydrology*, v. 531, p. 337–348, 1 dez. 2015.
- GIRES, A.; TCHIGUIRINSKAIA, I.; SCHERTZER, D.; SCHELLART, A.; BERNE, A.; LOVEJOY, S. Influence of small scale rainfall variability on standard comparison tools between radar and rain gauge data. *Atmospheric Research*, v. 138, p. 125–138, 1 mar. 2014.
- GRIMM, A. M.; FERRAZ, S. E. T.; GOMES, J. Precipitation Anomalies in Southern Brazil Associated with El Niño and La Niña Events. *Journal of Climate*, v. 11, n. 11, p. 2863–2880, nov. 1998.
- 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, 1 set. 2005.
- 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.
- LIEBMANN, B.; JONES, C.; DE CARVALHO, L. M. V. Interannual Variability of Daily Extreme Precipitation Events in the State of São Paulo, Brazil. *Journal of Climate*, v. 14, n. 2, p. 208–218, jan. 2001.
- MARENGO, J. A.; LIEBMANN, B.; GRIMM, A. M.; MISRA, V.; SILVA DIAS, P. L.; CAVALCANTI, I. F. A.; CARVALHO, L. M. V.; BERBERY, E. H.; AMBRIZZI, T.; VERA, C. S.; SAULO, A. C.; NOGUES-PAEGLE, J.; ZIPSER, E.; SETH, A.; ALVES, L. M. Recent developments on the South American monsoon system. *International Journal of Climatology*, v. 32, n. 1, p. 1–21, 1 jan. 2010.
- MERIGHI BEGA, R.; ROSA VIEIRA, S.; CLERICI MARIA, I. DE; CARMELA FALCI DECHEN, S.; MELO CASTRO, O. DE. VARIABILIDADE ESPACIAL DAS PRECIPITAÇÕES PLUVIAIS DIÁRIAS EM UMA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL, EM PINDORAMA, SP. *Bra*, v. 64, n. 1, p. 149–156, 2005.
- PAMPUCH, L. A.; DRUMOND, A.; GIMENO, L.; AMBRIZZI, T. Anomalous patterns of SST and moisture sources in the South Atlantic Ocean associated with dry events in southeastern Brazil. *International Journal of Climatology*, v. 36, n. 15, p. 4913–4928, 1 dez. 2016.
- PEDERSEN, L.; JENSEN, N. E.; CHRISTENSEN, L. E.; MADSEN, H. Quantification of the spatial variability of rainfall based on a dense network of rain gauges. *Atmospheric Research*, v. 95, n. 4, p. 441–454, 1 mar. 2010.

- REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P. da; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 25, n. 2, p. 185–204, jun. 2010.
- 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, p. 43–49, 1995.
- SALIO, P.; HOBOUCHIAN, M. P.; GARCÍA SKABAR, Y.; VILA, D. Evaluation of high-resolution satellite precipitation estimates over southern South America using a dense rain gauge network. *Atmospheric Research*, v. 163, p. 146–161, 15 set. 2015.
- SCHILLING, W. Rainfall data for urban hydrology: what do we need? *Atmospheric Research Elsevier Science Publishers B.V*, v. 27, p. 5–21, 1991.
- 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.
- STOL, P. T. The relative efficiency of the density of rain-gage networks. *Journal of Hydrology*, v. 15, n. 3, p. 193–208, 1 mar. 1972.
- TAPIADOR, F. J.; TURK, F. J.; PETERSEN, W.; HOU, A. Y.; GARCÍA-ORTEGA, E.; MACHADO, L. A. T.; ANGELIS, C. F.; SALIO, P.; KIDD, C.; HUFFMAN, G. J.; DE CASTRO, M. Global precipitation measurement: Methods, datasets and applications. *Atmospheric Research*, v. 104–105, p. 70–97, 1 fev. 2012.
- TAWDE, S. A.; SINGH, C. Investigation of orographic features influencing spatial distribution of rainfall over the Western Ghats of India using satellite data. *International Journal of Climatology*, v. 35, n. 9, p. 2280–2293, jul. 2015.
- THYER, M.; KUCZERA, G.; WANG, Q. J. Quantifying parameter uncertainty in stochastic models using the Box-Cox transformation. *Journal of Hydrology*, v. 265, n. 1–4, p. 246–257, 30 ago. 2002.
- TILMAN, D.; BALZER, C.; HILL, J.; BEFORT, B. L. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 108, n. 50, p. 20260–4, 13 dez. 2011.
- VILLARINI, G.; MANDAPAKA, P. V.; KRAJEWSKI, W. F.; MOORE, R. J. Rainfall and sampling uncertainties: A rain gauge perspective. *Journal of Geophysical Research*, v. 113, n. D11, p. D11102, 4 jun. 2008.

ZHOU, J.; LAU, K.-M. Does a Monsoon Climate Exist over South America? *Journal of Climate*, v. 11, n. 5, p. 1020–1040, maio 1998.

4. VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO E INFLUÊNCIA NA VARIABILIDADE DA PRODUTIVIDADE ESTIMADA DA SOJA

Resumo

O Brasil é um dos maiores produtores soja do mundo; no entanto, ainda se encontram lacunas de rendimentos nas lavouras, atreladas principalmente à variabilidade das condições climáticas. Com base nisso, o objetivo do trabalho foi avaliar a variabilidade espaço-temporal da precipitação pluvial na produtividade atingível (PA) e no *Yield Gap* relativo (Y_{grel}) da cultura da soja. Para isso, foi utilizada uma malha pluviométrica com dez pontos de medição distribuídos em uma área de 1000 ha em Piracicaba, SP, com distância máxima entre pontos de 2550 m. As medições foram feitas entre os meses de novembro de 1993 até outubro de 1994, completando um ano de registros pluviométricos. Para avaliar a influência da variabilidade da precipitação na produtividade da soja utilizou-se simulação multi-modelos, com três modelos de crescimento de culturas distintos. A simulação foi realizada para 3 datas de semeadura – 15 de novembro, 15 de dezembro e 15 de janeiro, e para cada ponto de amostragem de precipitação. Na simulação ponto a ponto todas as variáveis de solo e meteorológicas, exceto a precipitação, foram consideradas invariáveis espacialmente. Os resultados mostraram que variabilidade espacial da precipitação influenciou diretamente a produtividade final. No entanto, a ordem de grandeza da variabilidade da precipitação não se aplica em produtividade. Já a variabilidade temporal, entre as diferentes épocas de semeadura, apresentou maior influência na produtividade da soja.

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

Abstract

Brazil is one of the largest soybean producers in the world, but there are still yields gap in crops, mainly linked to weather conditions. Based on this, the objective of this work was to evaluate the spatiotemporal variability of rainfall in soybean attainable yields (PA). For this, a rainfall network was installed with ten measuring points distributed over an area of 1000 ha, with maximum distance between points of 2550 m. Measurements were taken from November 1993 to October 1994, completing one year of recording. To evaluate the influence of rainfall variability on soybean yield, we used a multi-model simulation with three crop growth models. The relative yield loss (Y_{grel} , %) caused by water deficit was simulated for 3 sowing dates and for each precipitation sampling point. The results showed that spatial variability of precipitation directly influenced the final productivity. However, the order of magnitude of precipitation variability does not apply to yield. The temporal variability between the different sowing seasons had the greatest influence on soybean yield.

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

4.1. Introdução

O Brasil é o segundo principal produtor mundial de soja (*Glycine max* L.), produzindo 119,3 milhões de toneladas a partir de 35 milhões de hectares na safra 2017/18. O estado de São Paulo ocupa o oitavo lugar entre os estados produtores de soja, com 2,9% da produção brasileira. Para safra 2018/19, no estado, houve um crescimento da área plantada de 3,6% com relação à safra anterior (CONAB, 2019). O município de Piracicaba (SP) que por décadas se destaca pela produção canavieira tem presenciado a expansão da cultura da oleaginosa como alternativa à produção de cana-de-açúcar.

A produtividade das lavouras de soja, assim como de qualquer outra cultura, é ponderada pelas limitações biofísicas do local, a exemplo da heterogeneidade espacial e temporal dos caracteres de solo e das variáveis meteorológicas, sobretudo a precipitação pluvial. No Brasil a lacuna de rendimento de soja em sistemas de sequeiro está relacionada, principalmente, ao déficit hídrico (SENTELHAS et al., 2015).

A soja, também, possui respostas diferentes ao estresse hídrico. Os estádios fenológicos que compreendem a floração e formação de vagens e grãos são os mais sensíveis a falta de água (BATTISTI; SENTELHAS, 2015). A deficiência hídrica coincidindo com a floração acarreta o abortamento de flores e/ou inibição da antese, enquanto a falta de água nos estádios de enchimento de grãos afeta o peso dos grãos e, consequentemente, a produtividade final (BERLATO; MATZENAUER; BERGAMASCHI, 1986; FAGERIA, 1989). Em outros estádios a deficiência hídrica também pode ser prejudicial à produção, especialmente se coincidir com os estádios de germinação e emergência, pois influencia diretamente o estande de plantas na lavoura.

O material genético da soja e a deficiência hídrica, detalhada pela severidade do evento e o tempo de ocorrência, são fatores a serem considerados ao se planejar a produção da soja. Portanto, quantificar a influência desses fatores no crescimento e desenvolvimento da cultura (LOBELL et al. 2009; GRASSINI et al. 2015) é a base para se proceder o melhor manejo possível e atingir altas produtividades.

A região de Piracicaba no estado de São Paulo, tem a climatologia definida por uma estação quente e chuvosa (primavera-verão) e outra com temperatura mais baixa e poucas chuvas (outono-inverno) (CARVALHO; JONES; LIEBMANN, 2002). Entre os meses de setembro e março (primavera-verão), momento de cultivo da soja, a precipitação pluvial tem origem predominantemente convectiva. Essa interferência meteorológica, associado a

variabilidade natural do solo nas áreas de produção, acarretam variabilidade de disponibilidade de água as plantas.

Em áreas onde as técnicas de agricultura de precisão são aplicadas, os mapas de colheita poderão integrar o efeito meteorológico. Entretanto, na maioria das vezes esses resultados são basicamente correlacionados à mapas de fertilidade, de caracteres físicos do solo ou aos mapas de aplicação de produtos químicos, muitas vezes realizados à taxas variáveis (SANTI et al., 2012; MOLIN et al., 2016), desconsiderando assim o efeito meteorológico sobre a produtividade. Essa negligência à questão meteorológica não se deve, muitas vezes, a desinformação ou a presunção de ausência de correlação, mas sim pela dificuldade de procedê-la.

Para identificar a influência das variáveis meteorológicas às culturas, sem a necessidade de estudos de campo, modelos de crescimento de culturas, que simulam os efeitos das variações climáticas na produção vegetal, são as opções mais indicadas (HOOGENBOOM, 2000; JONES et al., 2003). Tradicionalmente essas ferramentas são usadas para quantificar o potencial produtivo, especialmente pela definição dos níveis de produção potencial (PP) ou atingível (PA), seguindo com a desconsideração da variabilidade espaço-temporal dos elementos meteorológicos (MARIN, 2014; ZANON; STRECK; GRASSINI, 2016).

Essa questão vem sendo abordada por Shelia et al., (2019) que descrevem um sistema especial de modelagem de culturas denominado CCAFS *Regional Agricultural Forecasting Toolbox* (CRAFT), que permite executar os modelos de cultura pré-instalados: *The Decision Support System for Agrotechnology Transfer* (DSSAT) (JONES et al., 2003), *Agricultural Production Systems Simulator* (APSIM) (HOLZWORTH et al., 2014) e *System for Regional Analysis of Agro-Climatic Risks* (SARRA-H) (BARON et al., 2003). O CRAFT requer dados de entrada em grade para executar as simulações de culturas em escalas espaciais de 5 e 30 minutos de arco. Estudos de caso para o Sul Ásia para duas culturas, incluindo trigo e arroz, mostram sua potencial aplicação para avaliação de riscos e na estação previsão de rendimento (SHELIA et al., 2019b).

A previsão regional, ou mesmo local, da produção agrícola vem ganhando cada vez mais importância; modelos e dados coletados na maior resolução espacial e temporal possível podem ser ferramenta essenciais para os usuários finais em diferentes níveis. Com base nisso, o estudo busca quantificar a variabilidade espaço-temporal da precipitação e inferir sobre a influência desta sobre a produtividade atingível (PA) da cultura da soja por meio de modelagem de crescimento de plantas.

4.2. Metodologia

4.2.1. Local do experimento

O estudo foi realizado na Escola Superior de “Agricultura Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo (ESALQ/USP), no município de Piracicaba, SP. Para quantificar a variabilidade espacial da precipitação foram usados dados de 10 pluviômetros distribuídos em uma malha. A malha pluviométrica (MP) foi instalada em 1993 por Reichardt et al. (1995), para mensurar a variabilidade diária da chuva em uma escala local de 1000 ha.

A partir da descrição dos locais de instalação dos pluviômetros da MP (REICHARDT et al., 1995), foi realizada a coleta do posicionamento geográfico de cada equipamento. Para isso foi utilizado um aplicativo para dispositivos móveis, disponibilizado pelo Laboratório de Geomática da Universidade Federal de Santa Maria, denominado GPS C7 Dados. O aplicativo possui receptor de sinal GLONASS (Sistema de Navegação Global por Satélites) e receptor GNSS (Sistemas Globais de Navegação por Satélite).

Figura 1. Mapa da localização e distribuição dos pluviômetros na área experimental da ESALQ/USP.

O clima da região de Piracicaba, segundo a classificação de Köppen, é o Cwa- Tropical úmido, com chuvas concentradas entre os meses de outubro a março e período seco no outono-inverno (ALVARES et al., 2013a). A normal climatológica de precipitação anual é de 1350 mm.

Os tipos de solo mais frequentes no campus da ESALQ/USP são os nitossolos vermelhos e os argissolos vermelho-amarelos (EMBRAPA, 2013), com frequência de aparecimento de 55,05% e 13,76%, respectivamente (TORRADO et al., 2004).

4.2.2. Medida espaço-temporal da precipitação

Os dez pluviômetros que formaram a malha foram aleatoriamente distribuídos na área da ESALQ/USP (REICHARDT et al., 1995). A menor distância entre pontos de medida era de 990 m, enquanto a maior ficou em 2550 m. As medições foram feitas entre os meses de novembro de 1993 até outubro de 1994, completando um ano de informações pluviométricas. Para esse estudo foram utilizados apenas dados até maio de 1994.

Os equipamentos possuíam área de coleta de 300 cm² e foram instalados a 1,5 m acima da superfície do solo, estando livre de qualquer obstáculo em um círculo de pelo menos 20 m de raio e a precisão de medição é de 0,1 mm. Maiores detalhes podem ser encontrados em Reichardt et al. (1995).

Para os 10 pluviômetros da malha, dos 212 dias de medição, em 193 dias todos os pluviômetros estavam em operação, correspondendo a 91% do período (Figura 3).

Figura 3 - Relação entre o número de pluviômetros em operação e o número de dias de coleta de dados das malhas MP1 e MP2.

4.2.3. Correção da série de dados pluviométricos

A avaliação do desempenho dos medidores requer a identificação dos volumes reais dos eventos de chuva, que é desconhecida. No entanto, como a malha era composta por nove medidores, além do pluviômetro instalado no posto meteorológico da ESALQ/USP, foi possível estimar a incerteza das medições de cada instrumento a partir dos desvios da média, obtida dos pluviômetros em operação. Assim, as medições foram avaliadas a fim de se identificar dados errôneos e faltantes.

Para realização das simulações os dados pluviométricos faltantes foram estimados utilizando a média dos pluviômetros em operação mais próximos, assim como feito por Reichardt et al. (1995). No total, foi necessário estimar apenas 1,1% do total de registros.

4.2.4. Modelos de simulação de culturas

Com a finalidade de reduzir as incertezas nas simulações foi utilizada uma abordagem em conjunto, isto é, realizar simulações de crescimento de plantas com diferentes modelos, como proposto por Asseng et al., (2013) e Martre et al., (2015). Essa abordagem foi validada por Battisti et al., (2017b) para a cultura da soja em várias regiões do Brasil sob diferentes níveis de disponibilidade de água (sequeiro, irrigado total e parcial) durante o ciclo da soja, cultivar BRS 284, plantada em diferentes datas de outubro a janeiro. O conjunto resultou em um desempenho estatístico melhor que qualquer um dos modelos de soja utilizados individualmente, com Erro Absoluto Médio (MAE) de 218 kg ha^{-1} e Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE) de 262 kg ha^{-1} (Battisti et al., 2017b).

Com base nisso, foram realizadas simulações de produtividade da soja para a área de estudo em Piracicaba-SP, com três modelos diferentes: FAO - Modelo da Zona Agroecológica (KASSAM et al.; RAO; SARMA; CHANDER, 1988); Modelo de Simulação de Culturas - CROPGRO – do Sistema de Suporte à Decisão para Transferência de Agrotecnologia - plataforma DSSAT (BOOTE et al., 2003; JONES et al., 2003) e Modelo de nitrogênio e carbono em Agroecossistemas v. 2.11 -MONICA (NENDEL et al., 2011). O conjunto de resultados multi-modelo foi então obtido a partir da média aritmética dos rendimentos simulados pelos três modelos. Todos esses modelos foram calibrados para a região de Piracicaba (SP) por Battisti et al. (2017b).

A fim de comparar o efeito hídrico sobre a produtividade da soja foi também usado o conceito de *Yield Gap* relativo (Y_{grel}), definido pela razão entre as produtividades atingível (PA) e potencial (PP).

4.2.5. Simulação da produtividade da soja

As simulações foram realizadas para três datas de semeadura diferentes: 15 de outubro, 15 de novembro e 15 de dezembro, seguindo recomendação do Zoneamento de Risco Climático para a Cultura da Soja (MAPA, 2018).

As simulações, para cada uma das três datas de semeadura, foram processadas para cada ponto amostral de precipitação da malha (Figura 1), portanto, incorporando a variabilidade espacial e temporal da precipitação em uma área de 1000 ha. Todos os demais elementos meteorológicos exigidos como dados de entrada pelos modelos usados foram obtidos a partir do Posto Meteorológico Prof. Jesus Marden dos Santos, da ESALQ/USP, e considerados uniformes para todos os pontos de simulação.

O solo também foi considerado invariável entre pontos de simulação. A partir de uma única amostra, coletada junto ao ponto P1, foram determinadas a granulometria (336,36 g kg⁻¹ de argila, 210,47 g kg⁻¹ de silte e 453,17 g kg⁻¹ de areia), além de, a partir da curva de retenção de água, a umidade em saturação (θ_{sat}), de 0,407 cm³ cm⁻³, umidade em capacidade de campo (θ_{cc}), de 0,338 cm³ cm⁻³ e a umidade em ponto de murcha permanente (θ_{pmp}), de 0,249 cm³ cm⁻³. A condutividade hidráulica para solo saturado foi de 56,3 mm dia⁻¹.

As simulações buscaram avaliar a produtividade atingível de uma cultivar de GMR 6.5, a exemplo da BRS 284 que foi usada para calibrar os modelos testados por Battisti et al. (2017b). O ciclo médio da cultivar foi de 120 dias.

Para a execução desses modelos, o conteúdo inicial de água no solo foi definido com base no balanço hídrico iniciado seis meses antes da semeadura, considerando a cultura anterior como pousio.

4.2.6. Análise da variabilidade espacial da precipitação e da produtividade da soja

A variabilidade espaço-temporal da precipitação foi analisada nas escalas mensal, a fim de comparar o período analisado com dados históricos locais, e também na escala diária, ao longo de três períodos de 120 dias, com a finalidade de explorar o período de tempo relativo ao ciclo médio das lavouras de soja em Piracicaba, SP. As séries temporais de dados de precipitação (REICHARDT et al., 1995) foram preliminarmente avaliadas incluindo os períodos com funcionamento simultâneo de todos os pluviômetros da malha amostral.

A avaliação do desempenho dos medidores demandou a identificação dos volumes reais dos eventos de chuva, que é desconhecida. No entanto, como a malha era composta nove medidores, além do pluviômetro instalado no posto meteorológico da ESALQ/USP, foi possível estimar a incerteza das medições de cada instrumento a partir dos desvios da média, obtida dos pluviômetros em operação. Assim, as medições foram avaliadas a fim de se identificar dados errôneos e faltantes.

A variabilidade espacial da precipitação, para as escalas diária e mensal, foi quantificada a partir do desvio padrão (Eq. 1) e do coeficiente de variação (Eq. 2).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1)$$

em que σ é o desvio padrão da amostra (mm), n é o tamanho da amostra. e $\bar{X}$ é a média aritmética (mm).

$$Cv = 100 \cdot \frac{\sigma}{\bar{X}} \quad (2)$$

sendo Cv o coeficiente de variação de Pearson (%), σ o desvio padrão (mm) e $\bar{X}$ a média aritmética (mm) da precipitação entre os pluviômetros.

Também foi avaliada a correlação de Pearson (ρ) em relação as distâncias entre os pluviômetros.

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{cov(X,Y)}{\sqrt{var(X) \cdot var(Y)}} \quad (3)$$

em m que ρ é a correlação de Pearson, $\bar{x}$ e $\bar{y}$ são as médias aritméticas de cada variável, n é o tamanho da amostra, $cov(X,Y)$ é a covariância entre as duas variáveis e $var(X,Y)$ é a variância da amostra.

4.3. Resultados e discussão

4.3.1. Variabilidade temporal da temperatura e radiação solar para cada época de semeadura

A temperatura do ar (°C) e disponibilidade de energia radiante (Qg) foram analisadas ao longo dos três ciclos (120 dias), sendo que essas não foram avaliadas espacialmente, ou seja,

houve apenas um dado diário de temperatura do ar e radiação solar global para cada ciclo e pontos de simulação (Figura 2).

A temperatura média do ar não variou significativamente entre os três ciclos. No primeiro a média foi de 24,2°C, com uma pequena tendência negativa ao longo do ciclo. O segundo ciclo foi termicamente muito similar ao primeiro, com temperatura média de 24,6°C e leve tendência negativa. Já o terceiro ciclo, apesar da temperatura média não variar muito (24,4°C) houve uma tendência negativa mais expressiva ao longo do ciclo (-0,041°C dia⁻¹) (Figura 4). Os valores de temperatura média nos 3 ciclos correspondem aos valores favoráveis ao crescimento e desenvolvimento da cultura da soja (FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007). Durante os ciclos também não foram observadas temperaturas críticas que, abaixo ou acima delas, poderiam afetar o crescimento e desenvolvimento da cultura.

A radiação solar global (MJ m⁻²) desempenha um papel fundamental no crescimento e desenvolvimento vegetal, fornecendo energia para o processo da fotossíntese. Ao longo do ciclo a radiação apresentou maior variabilidade do que a temperatura do ar. No primeiro ciclo a radiação solar acumulada foi de 2177,3 MJ m⁻², no segundo de 2058,6 MJ m⁻² e no terceiro de 1952,4 MJ m⁻². A diferença de um ciclo para o outro foi aproximadamente de 5%, sendo que do primeiro para o terceiro a redução de energia radiante foi de 10,33%. Essa redução mais acentuada de Q_g acumulado do terceiro em relação ao primeiro e segundo períodos remete a redução do potencial de produção da cultura da soja determinado a partir da modelagem.

Figura 4. Temperatura do ar (°C) e Radiação Solar Global (MJ m⁻²) ao longo do ciclo da soja para cada data de semeadura (15 de janeiro, 15 de novembro e 15 de dezembro).

4.3.2. Característica dos dados pluviométricos na escala mensal

A comparação dos dados de precipitação medidos pela malha amostral (novembro de 1993 a maio de 1994) e dados históricos (1917-2018) de Piracicaba, caracteriza um período de anomalias de precipitação em relação ao regime médio de chuvas local. Exceto para os meses de março e abril de 1994, todos os outros meses apresentaram chuvas abaixo da média histórica da região. A maior discrepância foi para o mês de janeiro de 1994, com $-98,4 \text{ mm mês}^{-1}$ de diferença. No acumulado a diferença chegou a $-121,1 \text{ mm}$ com relação a chuva acumulada histórica do período (Tabela 2).

Em relação à média de chuva da malha, o mês de março, com $222,3 \text{ mm mês}^{-1}$ acumulados, apresentou o maior volume mensal, com um coeficiente de variação de 7%, relativo a uma amplitude máxima de $47,1 \text{ mm mês}^{-1}$. O mês de maio de 1994 foi o que

apresentou menor volume acumulado de precipitação, com 53,8 mm mês⁻¹ (CV de 7%) amplitude máxima de 11,1 mm mês⁻¹.

A maior diferença observada entre os acumulados médios mensais, ou seja, diferença entre o máximo e o mínimo valor acumulado por ponto de medida, foi de 68,6 mm mês⁻¹, registrado em dezembro de 1993, com desvio padrão (σ) de 24,2 mm mês⁻¹ e coeficiente de variação (CV) de 18%. Tais resultados destacam a variação espacial da chuva em uma área de 1000 ha.

Em geral, o desvio padrão dentro da malha variou de 24,2 mm mês⁻¹ a 3,5 mm mês⁻¹, para os meses de dezembro de 1993 e maio de 1994, respectivamente. Já o coeficiente de variação ficou entre os 5% (janeiro de 1994) e os 18% (dezembro de 1993). Para o total acumulado nos sete meses, o desvio padrão foi de 37,8 mm mês⁻¹ e o coeficiente de variação de 4%. Reichardt et al. (1995) analisaram a variabilidade espacial da série de dados completa (1 ano de dados) para acumulados diários e anuais, o que resultou em coeficiente de variação entre de 2,2% a 169,3% para acumulados diários e 3,06% no acumulado anual. Pedersen et al. (2010), analisando dados acumulados de 5 minutos, portanto em maior resolução temporal, encontraram coeficiente de variação de até 212% em uma área de somente 25 ha.

Silva et al. (2003) avaliaram a variabilidade da precipitação pluvial mensal e anual na estação meteorológica de Uberaba (MG), e destacaram 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. Villarini et al., (2008), analisando dados de 50 pluviômetros durante 6 anos em uma área de 135 km², também relataram uma redução da variabilidade à medida que se acumulou a precipitação no tempo. Isso ocorre pois, no acumulado as diferenças entre os pontos são compensadas, indicando que a variabilidade da chuva nesse caso não está relacionada a posição geográfica dos pontos. Já para locais em que a geografia exerce influência sobre a variabilidade espacial e temporal da chuva, por exemplo a presença de corpos hídricos, essa compensação ao longo do tempo nos acumulados de chuva pode não ocorrer e a variabilidade se manter (VILLARINI et al., 2008).

Tabela 2. Precipitação média mensal para cada ponto de medição na malha e a média histórica de cada mês (1917-2018).

Ponto	Precipitação (mm mês ⁻¹)							Acum. Período
	nov/1993	dez/93	jan/94	fev/94	mar/94	abr/94	mai/94	
Méd.Hist. (1917-2018)	134,6	196,7	229,2	179	143	66,0	56,0	1004,5
P1	83,7	127,4	121,9	130,3	244,8	89,5	49,2	846,8
P2	92,6	119,3	127,8	166,8	197,7	78,2	54,9	837,3
P3	92,7	117,6	127,7	145,0	229,9	115,7	55,1	883,7
P4	95,3	119,1	124,1	153,1	206,4	94,5	60,3	852,8
P5	80,6	186,1	137,4	153,9	197,9	96,4	52,7	905,1
P6	91,7	129,9	127,3	158,7	231,4	107,5	56,8	903,3
P7	95,5	118,4	131,4	160,9	232,0	83,9	50,5	872,6
P8	85,8	172,0	132,5	172,8	223,5	118,6	52,9	958,1
P9	89,2	129,7	144,1	116,6	236,7	91,0	49,5	856,8
P10	91,6	146,1	133,3	154,8	222,2	114,2	55,8	918,0
Média mensal (P1-P9)	89,9	136,6	130,8	151,3	222,3	99,0	53,8	883,4
σ	5,0	24,2	6,5	16,9	16,3	14,2	3,5	37,8
C.V. (%)	6%	18%	5%	11%	7%	14%	7%	4%

4.3.3. Variabilidade espaço temporal da precipitação

Foi realizada uma divisão do período total em três segmentos de 120 dias, com inícios nos dias 15 de novembro de 2015, 15 de dezembro de 2016 e 15 de janeiro de 2016, a fim de avaliar a variabilidade espacial e temporal da chuva em períodos coincidentes com as datas usadas para simular a produção de soja na região de Piracicaba, SP. Os resultados mostraram que houve diferenças nos períodos, principalmente na escala temporal (Figura 5).

No primeiro período (15/11/93 a 14/03/1994) foram registrados 41 dias chuvosos, sendo 18 dias com chuvas superiores a 10,0 mm. O volume total acumulado médio foi de 562,6 mm. O desvio padrão médio da chuva medida na malha foi de apenas 1,3 mm. O valor de σ máximo foi de 13,1 mm. 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 27,8 mm, valor que pode representar em torno de 5% da demanda de água de um cultivo de soja na região de estudo (OLIVEIRA, 2018).

Já no segundo (15/12/1993 a 13/04/1994) foram 42 dias chuvosos, um a mais que no primeiro período. Desses, 18 dias tiveram chuva acumulada superior a 10 mm. O total acumulado no segundo período foi de 600,5 mm, 37,9 mm a mais que no primeiro período

(Figura 5). Em relação as diferenças espaciais, o desvio padrão também foi de apenas 1,2 mm, porém com σ máximo de 13,1 mm, o mesmo registrado para o primeiro período (Figura 5). Na análise temporal, ao fim dos 120 dias de medidas, o desvio padrão foi de 21,7 mm, menor que o observado no primeiro período.

Embora a diferença entre os totais de chuva nos dois primeiros períodos (Figura 5) tenha sido inferior a 7%, as distribuições temporais mostraram-se distintas, com distribuição temporal mais irregular no segundo período, que apresentou maior incremento no início dos 120 dias, com posterior redução e maior quantidade de dias secos (Figura 5).

Um terceiro período, mais seco, foi registrado ao simular o ciclo de produção de soja de 120 dias iniciado em 15 de janeiro até 14 de maio de 1994 (Figura 5). Nesse período foram registrados 42 dias chuvosos, 15 dias com mais de 10 mm acumulados. O total do terceiro período foi de 557,7. Em relação a variação espacial diária da chuva, o desvio padrão médio para o ciclo foi de 16,7 mm, com valor máximo de 26,3 mm. Temporalmente, o desvio padrão em relação ao acumulado em cada ponto nos 120 dias de medição ficou em 26,2 mm, confirmando a variabilidade espaço-temporal da disponibilidade hídrica mesmo em curtas distâncias e uma provável implicação na produtividade simulada para cada ponto de medição.

Figura 5. Precipitação pluvial diária e desvios (A) e acumulada (B) durante os três períodos de 120 dias, iniciados nas datas de 15/11/1993, 15/12/1993 e 15/01/1994, coincidentes a períodos de produção de soja em Piracicaba (SP).

4.3.4. Variabilidade espacial da produtividade simulada da soja

Com a média dos modelos de produtividade determinaram-se as perdas produtivas relativas ($Y_{g_{rel}}$, em %) em função apenas da deficiência hídrica para cada data de semeadura simulada e pontos de amostragem da chuva (Tabelas 3 e 4).

Em relação ao ciclo simulado com semeadura em 15 de novembro de 1993, o $Y_{g_{rel}}$ médio foi de 63%, com desvio padrão de apenas 2% e CV de 3,1% em relação aos valores individuais dos dez pontos amostrais. Nesse período o desvio padrão da precipitação foi de 27,8 mm e o CV de 4,9%. Nesse primeiro caso, considerando-se os resultados de CV, verifica-se que a variabilidade da precipitação não se propagou plenamente à produtividade, já que a variabilidade na produtividade entre os 10 pontos foi inferior.

A segunda data de semeadura (15 de dezembro) foi similar a primeira, apresentando média de $Y_{g_{rel}}$ também de 62,9%, com desvio padrão também similar, de 2,4%, e similaridade também em CV, de 3,7%. A precipitação para esse segundo período apresentou menor variabilidade que no primeiro ciclo simulado, com D.P de 20,7 mm e CV de 3,5%.

As perdas produtivas simuladas para o terceiro ciclo de produção (mais tardio) foram maiores que para os dois primeiros, com de $Y_{g_{rel}}$ médio de 65,6% desvio de 2,3% e CV de 3,6%. Essa época coincidiu com o maior valor de desvio padrão da precipitação na malha, de 25,9 mm e CV de 4,6%.

Ao reproduzir a mesma análise entre a variabilidade da precipitação e da perda produtiva relativa, com base nos resultados do coeficiente de variação, mais uma vez verificou-se que a variabilidade de chuva não se traduz, em mesma ordem de grandeza, em variabilidade de produção, no caso específico o $Y_{g_{rel}}$. Ressalta-se aqui que, para as simulações (Tabela 3), o solo foi considerado uniforme entre pontos, desconsiderando a sua natural variabilidade associada também a capacidade de armazenamento de água, que poderia reduzir ou aumentar os desvios entre dados de produtividade frente aos mesmos dados de precipitação.

Em relação a produtividade atingível (PA), o máximo valor de desvio padrão foi de 132,3 kg ha⁻¹ (semeadura 15/12/1993), com CV de 3,7%. A primeira e terceira época de produção apresentaram resultados muito semelhantes (Tabela 3). A variabilidade temporal da chuva e os totais acumulados em relação às três épocas de produção de soja foram semelhantes, com a presença de apenas um período mais prolongado de estiagem, de cerca de 20 dias, entre 15/03 e 15/04/1994, que acabou influenciando apenas a terceira época, cujos valores de PA foram inferiores (Tabela 3). Isso torna claro a importância da variabilidade temporal da precipitação e de como exerce influência distinta entre datas de semeadura.

Tabela 3. Média, desvio padrão e coeficiente de variação para a produtividade atingível, *Yield Gap* relativo (Y_{grel}) e precipitação acumulada para 120 dias após as datas de semeadura (15 de novembro de 1993, 15 de dezembro de 1993 e 15 de janeiro de 1993) para os 9 pontos de registros pluviométricos.

Produtividade simulada									
Ponto	15/nov			15/dez			15/jan		
	PA	Y_{grel}	Prec. Acum	PA	Y_{grel}	Prec. Acum	PA	Y_{grel}	Prec. Acum
	kg ha ⁻¹	%	mm	kg ha ⁻¹	%	mm	kg ha ⁻¹	%	mm
1	3365,4	59,5	523,4	3464,6	61,6	583,4	3017,0	65,7	542,7
2	3669,8	64,9	551,1	3638,0	64,7	586,3	3072,9	66,9	524,3
3	3586,7	63,4	542,0	3581,3	63,7	594,7	3109,5	67,7	573,0
4	3567,2	63,1	547,3	3385,4	60,2	571,6	2839,8	61,8	533,6
5	3465,0	61,3	601,8	3404,1	60,6	599,4	2861,8	62,3	541,3
6	3632,0	64,2	571,7	3535,6	62,9	615,4	3114,4	67,8	580,6
7	3646,5	64,5	568,8	3560,2	63,3	617,1	3020,9	65,8	562,6
8	3571,7	63,2	606,7	3673,3	65,3	641,2	3079,2	67,0	604,4
9	3420,2	60,5	535,0	3356,8	59,7	584,7	2907,3	63,3	536,5
10	3702,0	65,5	578,1	3755,9	66,8	610,9	3124,8	68,0	578,3
Média	3562,7	63,0	562,6	3535,5	62,9	600,5	3014,8	65,6	557,7
Desv.Pad.	111,6	2,0	27,8	132,3	2,4	20,7	107,6	2,3	25,9
CV (%)	3,1	3,1	4,9	3,7	3,7	3,5	3,6	3,6	4,6

Desvio padrão PA: kg ha⁻¹

Desvio padrão Prec.Acum.: mm

Ao comparar os resultados dos dez pontos amostrais, por data de semeadura, observa-se uma variabilidade maior do que a variabilidade espacial entre os dez pontos (Tabela 4). Os coeficientes de variação da produtividade atingível entre as datas de semeadura ficaram entre 7,16% (P1) e 11,6% (P4). O Y_{grel} também teve uma maior variabilidade entre as datas de semeadura do que entre os pontos. O maior valor de CV foi de 5%, com desvio padrão de 3,1% (Y_{grel} de 62,3% para o ponto 1). Essa variabilidade correspondeu a uma variabilidade de precipitação da ordem de 30,6 mm (σ) e 5,6% (CV).

No geral, não há uma relação direta entre a variabilidade da precipitação e a variabilidade da produtividade limitada pela água (PA) (Tabela 4). Nesse caso, ocorrências de CV para PA de 11,6% em relação a um CV de 3,5% na precipitação, ou CV de precipitação de 5,9 % correlacionado a um CV alto de PA de 10,24%, são devidos a variabilidade temporal dos eventos chuvosos relativos ao diferentes estádios fenológicos da cultura, podendo exercer maior ou menor influência sobre a produtividade final pois a sensibilidade da cultura a deficiência hídrica também é temporalmente variável.

Os resultados, mais uma vez, descrevem a importância da variabilidade temporal da precipitação, que no caso superou a influência da variabilidade espacial em uma área de produção de 1000 ha.

Diferenças de produtividade da cultura da soja, entre diferentes datas de semeadura, também foram avaliadas por (NÓIA JÚNIOR; SENTELHAS, 2019) utilizando três modelos de simulação de culturas em uma abordagem multi-modelo para 29 locais em 12 estados brasileiros, com datas de semeadura que variam do final de setembro ao início de janeiro por um período de 34 anos (1980–2013). O estudo mostrou que para a maioria das regiões brasileiras, a produção de soja atingiu os maiores valores quando plantada no final de outubro. A antecipação da semeadura para setembro e o atraso para novembro e dezembro causaram perdas de rendimento. Em alguns locais (por exemplo, Nova Xavantina, MT, e Barretos, SP), a perda média de produção de soja causada pela antecipação ou atraso da semeadura excedeu 500 kg ha⁻¹. Os rendimentos limitados pela água, também apresentaram maiores lacunas de produtividade causada pelo déficit hídrico quando plantados em setembro.

Tabela 4. Média, desvio padrão e coeficiente de variação para a produtividade atingível, *Yield Gap* relativo e precipitação acumulada para 120 dias após as datas de semeadura 15 de novembro de 1993, 15 de dezembro de 1993 e 15 de janeiro de 1993

Ponto	Produtividade Atingível 3 datas			Y _{grel} 3 datas			Precipitação média		
	Média	D.P	CV	Média	D.P	CV	Média	D.P	CV
	kg ha ⁻¹		%		%		mm		%
1	3282	235	7,16	62,3	3,1	5,0	549,8	30,6	5,6
2	3460	336	9,70	65,5	1,2	1,8	553,9	31,1	5,6
3	3426	274	8,00	64,9	2,4	3,7	569,9	26,5	4,7
4	3264	379	11,60	61,7	1,4	2,3	550,8	19,2	3,5
5	3244	332	10,24	61,4	0,9	1,4	580,8	34,3	5,9
6	3427	275	8,03	65,0	2,5	3,9	589,2	23,1	3,9
7	3409	339	9,95	64,5	1,2	1,9	582,8	29,8	5,1
8	3441	318	9,23	65,2	1,9	3,0	617,4	20,6	3,3
9	3228	280	8,66	61,2	1,9	3,1	552,1	28,3	5,1
10	3528	350	9,92	66,8	1,3	1,9	589,1	18,9	3,2

4.4. Conclusões

A variabilidade espaço-temporal da precipitação pluvial foi comparada à variabilidade da produtividade atingível (PA) simulada para a cultura da soja. As simulações foram realizadas para três datas de semeadura, 15 de novembro e 15 de dezembro de 1993 e 15 de janeiro de 1994. Para cada uma dessas datas variou-se apenas a precipitação como dado de entrada dos modelos. Os resultados mostraram que a variabilidade espacial da precipitação influenciou diretamente a produtividade final, causando variabilidade entre pontos de simulação. Entretanto, a ordem de grandeza da variabilidade de precipitação não se repete em produtividade. Já a variabilidade temporal da precipitação, ou seja, entre as épocas de semeadura apresentou influência maior sobre a produtividade, confirmando a importância de análises temporais para a determinação de datas de menor risco climático para semeadura e produção da soja.

Referências

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ASSENG, S.; EWERT, F.; ROSENZWEIG, C.; JONES, J. W.; HATFIELD, J. L.; RUANE, A. C.; BOOTE, K. J.; THORBURN, P. J.; RÖTTER, R. P.; CAMMARANO, D.; BRISSON, N.; BASSO, B.; MARTRE, P.; AGGARWAL, P. K.; ANGULO, C.; BERTUZZI, P.; BIERNATH, C.; CHALLINOR, A. J.; DOLTRA, J.; GAYLER, S.; GOLDBERG, R.; GRANT, R.; HENG, L.; HOOKER, J.; HUNT, L. A.; INGWERSEN, J.; IZAURRALDE, R. C.; KERSEBAUM, K. C.; MÜLLER, C.; NARESH KUMAR, S.; NENDEL, C.; O'LEARY, G.; OLESEN, J. E.; OSBORNE, T. M.; PALOSUO, T.; PRIESACK, E.; RIPOCHE, D.; SEMENOV, M. A.; SHCHERBAK, I.; STEDUTO, P.; STÖCKLE, C.; STRATONOVITCH, P.; STRECK, T.; SUPIT, I.; TAO, F.; TRAVASSO, M.; WAHA, K.; WALLACH, D.; WHITE, J. W.; WILLIAMS, J. R.; WOLF, J. Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. *Nature Climate Change*, v. 3, n. 9, p. 827–832, 9 set. 2013.
- BARON, C.; BONNAL, V.; DINGKUHN, M.; MARAUX, F.; SARR, M. SARRA-H: Système d'Analyse Régional des Risques Agroclimatiques-Habillé (System for Regional Analysis of Agro-Climatic Risks). 2003.
- BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C.; BOOTE, K. J. Inter-comparison of performance of

- soybean crop simulation models and their ensemble in southern Brazil. *Field Crops Research*, v. 200, p. 28–37, 1 jan. 2017.
- 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 Sulriograndense*, v. 22, n. 2, p. 251–259, 1986.
- BOOTE, K. J.; JONES, J. W.; BATCHELOR, W. D.; NAFZIGER, E. D.; MYERS, O. Genetic coefficients in the CROPGRO-soybean model: Links to field performance and genomics. In: *Agronomy Journal*, 1, Anais...jan. 2003.
- CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. Extreme Precipitation Events in Southeastern South America and Large-Scale Convective Patterns in the South Atlantic Convergence Zone. *Journal of Climate*, v. 15, n. 17, p. 2377–2394, 1 set. 2002.
- EMBRAPA, E. B. D. P. A. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos 3a edição revista e ampliada. 3 ed. rev. ed. [s.l.] Embrapa, 2013.
- FAGERIA, N. K. Solos tropicais e aspectos fisiológicos das culturas. Brasília: Embrapa-DPU, (Embrapa-CNPAP. Documentos, 18), 1989.
- FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. Ecofisiologia da soja Londrina Embrapa (Circular Técnica 48), , 2007. .
- HOLZWORTH, D. P.; HUTH, N. I.; DEVOIL, P. G.; ZURCHER, E. J.; HERRMANN, N. I.; MCLEAN, G.; CHENU, K.; VAN OOSTEROM, E. J.; SNOW, V.; MURPHY, C.; MOORE, A. D.; BROWN, H.; WHISH, J. P. M.; VERRALL, S.; FAINGES, J.; BELL, L. W.; PEAKE, A. S.; POULTON, P. L.; HOCHMAN, Z.; THORBURN, P. J.; GAYDON, D. S.; DALGLIESH, N. P.; RODRIGUEZ, D.; COX, H.; CHAPMAN, S.; DOHERTY, A.; TEIXEIRA, E.; SHARP, J.; CICHOTA, R.; VOGELER, I.; LI, F. Y.; WANG, E.; HAMMER, G. L.; ROBERTSON, M. J.; DIMES, J. P.; WHITBREAD, A. M.; HUNT, J.; VAN REES, H.; MCCLELLAND, T.; CARBERRY, P. S.; HARGREAVES, J. N. G.; MACLEOD, N.; MCDONALD, C.; HARSDORF, J.; WEDGWOOD, S.; KEATING, B. A. APSIM - Evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. *Environmental Modelling and Software*, v. 62, p. 327–350, 1 dez. 2014.
- HOOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its application. [s.l: s.n.]v. 103
- 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, 1 jan. 2003.

- KASSAM A.H. Net biomass production and yields of crops. Consultant's Report. **Agroecological Zones project**. AGL, FAO, Rome. 1977
- LUIS SANTI, A.; AMADO, T.; CHERUBIN, M.; NEWTON MARTIN, T.; PIRES, J.; PINTO DELLA FLORA, L.; JOSÉ BASSO, C. Análise de componentes principais de atributos químicos e físicos do solo limitantes à produtividade de grãos. [s.l: s.n.]v. 47
- MARIN, F. R. Eficiência de produção da cana-de-açúcar brasileira: estado atual e cenários futuros baseados em simulações multimodelos. 5 ago. 2014.
- MARTRE, P.; WALLACH, D.; ASSENG, S.; EWERT, F.; JONES, J. W.; RÖTTER, R. P.; BOOTE, K. J.; RUANE, A. C.; THORBURN, P. J.; CAMMARANO, D.; HATFIELD, J. L.; ROSENZWEIG, C.; AGGARWAL, P. K.; ANGULO, C.; BASSO, B.; BERTUZZI, P.; BIERNATH, C.; BRISSON, N.; CHALLINOR, A. J.; DOLTRA, J.; GAYLER, S.; GOLDBERG, R.; GRANT, R. F.; HENG, L.; HOOKER, J.; HUNT, L. A.; INGWERSEN, J.; IZAURRALDE, R. C.; KERSEBAUM, K. C.; MÜLLER, C.; KUMAR, S. N.; NENDEL, C.; O'LEARY, G.; OLESEN, J. E.; OSBORNE, T. M.; PALOSUO, T.; PRIESACK, E.; RIPOCHE, D.; SEMENOV, M. A.; SHCHERBAK, I.; STEDUTO, P.; STÖCKLE, C. O.; STRATONOVITCH, P.; STRECK, T.; SUPIT, I.; TAO, F.; TRAVASSO, M.; WAHA, K.; WHITE, J. W.; WOLF, J. Multimodel ensembles of wheat growth: many models are better than one. *Global Change Biology*, v. 21, n. 2, p. 911–925, fev. 2015.
- MOLIN, J. P.; VEIGA, J. P. S.; MOLIN, J. P.; VEIGA, J. P. S. Spatial variability of sugarcane row gaps: measurement and mapping. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 40, n. 3, p. 347–355, jun. 2016.
- NENDEL, C.; BERG, M.; KERSEBAUM, K. C.; MIRSCHEL, W.; SPECKA, X.; WEGEHENKEL, M.; WENKEL, K. O.; WIELAND, R. The MONICA model: Testing predictability for crop growth, soil moisture and nitrogen dynamics. *Ecological Modelling*, v. 222, n. 9, p. 1614–1625, 10 maio 2011.
- OLIVEIRA, R. K. Fluxos de CO₂, água e energia em áreas de renovação de canavial com cultivo de soja. 2018. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 2018.
- PEDERSEN, L.; JENSEN, N. E.; CHRISTENSEN, L. E.; MADSEN, H. Quantification of the spatial variability of rainfall based on a dense network of rain gauges. *Atmospheric Research*, v. 95, n. 4, p. 441–454, 1 mar. 2010.
- RAO, N. H.; SARMA, P. B. S.; CHANDER, S. A simple dated water-production function for use in irrigated agriculture. *Agricultural Water Management*, v. 13, n. 1, p. 25–32, 1988.

- 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, p. 43–49, 1995.
- SHELIA, V.; HANSEN, J.; SHARDA, V.; PORTER, C.; AGGARWAL, P.; WILKERSON, C. J.; HOOGENBOOM, G. A multi-scale and multi-model gridded framework for forecasting crop production, risk analysis, and climate change impact studies. *Environmental Modelling and Software*, p. 144–154, 1 maio 2019a.
- SHELIA, V.; HANSEN, J.; SHARDA, V.; PORTER, C.; AGGARWAL, P.; WILKERSON, C. J.; HOOGENBOOM, G. A multi-scale and multi-model gridded framework for forecasting crop production, risk analysis, and climate change impact studies. *Environmental Modelling and Software*, v. 115, p. 144–154, 1 maio 2019b.
- 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.
- VILLARINI, G.; MANDAPAKA, P. V.; KRAJEWSKI, W. F.; MOORE, R. J. Rainfall and sampling uncertainties: A rain gauge perspective. *Journal of Geophysical Research*, v. 113, n. D11, p. D11102, 4 jun. 2008.
- ZANON, A. J.; STRECK, N. A.; GRASSINI, P. Climate and Management Factors Influence Soybean Yield Potential in a Subtropical Environment. *Agronomy Journal*, v. 108, n. 4, p. 1447, 6 fev. 2016.