



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgf>



Processo de Renovação Generalizado baseado na distribuição Gumbel como modelo de estimativas de ocorrências de ondas de calor para auxílio no processo de tomada de decisão do cultivo de manga no Sertão de Pernambuco/Bahia

Cláudio Tadeu Cristino¹, Kimbelly Emanuelle Avelino Ferraz², José Portez Sibinde³

¹ Professor Associado do Departamento de Estatística e Informática, UFRPE. E-mail: claudio.cristino@ufrpe.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6748-209X>

¹ Graduada em Sistemas de Informação, UFRPE. E-mail: kimbellyferraz@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7453-3932>

¹ Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada, UFRPE; E-mail: ipsibonde@gmail.com. ORCID <https://orcid.org/0009-0004-9065-5330>.

Artigo recebido em 24/01/2024 e aceito em 20/05/2024

RESUMO

Processos de Renovação Generalizada (PRG's) vêm sendo utilizados em Análise de Sobrevida/Confiabilidade com bastante sucesso, particularmente para modelar tempos entre eventos indesejados de falhas em equipamentos eletromecânicos, falhas essas que acarretam enormes prejuízos para empresas. Assim, PRG's são importante ferramenta na Engenharia de Manutenção e em processos de tomada de decisão que envolvam a previsão de riscos associados a diversas operações industriais e na agropecuária. Mais recentemente, foi implementado um modelo de PRG baseado na distribuição Gumbel (GuGRP, abreviação do inglês *Gumbel (based) generalized renewal process*) na previsão de crises econômicas (ressações) no mercado estadunidense. Este fato levou os autores a verificar a usabilidade deste modelo em previsões de ocorrências de eventos meteorológicos raros, particularmente, na modelagem de ondas de calor no sertão pernambucano. De fato, aqui será apresentada a modelagem GuGRP aplicada a dados de ondas de calor na região agrícola de Petrolina (PE)/Juazeiro (BA) como base de tomada de decisão no cultivo da manga nessa localidade. Os resultados apresentam ótima aderência dos dados ao modelo proposto indicando esta metodologia como pertinente a este sistema de produção. Palavras Chave: Ondas de calor; Modelos Climáticos; Plantio da Manga; Mudanças Climáticas; Processos estocásticos especiais; Análise probabilística.

Generalized Renewal Process based on the Gumbel distribution as a model for estimating heat wave occurrences to aid in the decision-making process for mango cultivation in the Sertão of Pernambuco/Bahia

ABSTRACT

Generalized Renewal Processes (GRP's) have been used in Survival/Reliability Analysis with great success, particularly to model times between undesired events of failures in electromechanical equipment, failures that cause enormous losses for companies. Thus, GRP's are an important tool in Maintenance Engineering and in decision-making processes that involve forecasting risks associated with various industrial and agricultural operations. More recently, a GRP model based on the Gumbel distribution (GuGRP) was implemented in forecasting economic crises (recessions) in the USA market. This led the authors to verify the usability of this model in forecasting rare meteorological events, particularly in the modeling of heat waves in the backlands of Pernambuco. In fact, the GuGRP modeling applied to heat wave data in the agricultural region of Petrolina (PE)/Juazeiro (BA) will be presented here as a basis for decision-making in mango cultivation in this location. The results show excellent adherence of the data to the proposed model, indicating this methodology is relevant to this production system.

Keywords: Heat waves; Climate models; Mango planting; Climate change; Special stochastic process; Probabilistic analysis.

¹ Professor Associado do Departamento de Estatística e Informática, UFRPE. E-mail: claudio.cristino@ufrpe.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6748-209X>

² Graduada em Sistemas de Informação, UFRPE. E-mail: kimbellyferraz@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7453-3932>

³ Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada, UFRPE; E-mail: ipsibonde@gmail.com. ORCID <https://orcid.org/0009-0004-9065-5330>.

Introdução

A Manga é um dos frutos mais apreciados pelo mercado nacional e internacional e foi a fruta mais exportada pelo Brasil em 2021, as informações são da Associação Brasileira dos Produtores e Exportadores de Frutas e Derivados (ABRAFRUTAS, 2019). O sistema agrícola do Vale do São Francisco entre os estados de Pernambuco e Bahia produziu 87% do volume embarcado (Globo Rural, 2021).

A alta produção de Manga na região do Vale do São Francisco teve como contribuinte o clima, que é favorável a sua produção. Em entrevista a Georgina Maynart do CORREIO⁴, o pesquisador da Embrapa Semiárido, João Ricardo Ferreira de Lima foi questionado sobre até que ponto as condições climáticas do Vale do São Francisco e da região sudoeste da Bahia favorecem o cultivo de manga. Em resposta, o pesquisador João Ricardo respondeu:

“Estas duas regiões possuem condições climáticas extremamente favoráveis, como a alta radiação solar, a luminosidade, baixa pluviosidade, que leva a menores problemas com praga e doenças. Estes fatores, em união com um conjunto de tecnologias disponibilizadas ao produtor, fazem com que se possa produzir mangas de elevado padrão de qualidade ao longo de todo o ano, de forma escalonada. Assim, é possível abastecer o mercado em qualquer período do ano.” (Maynart, *op.cit.*)

Embora a Manga seja um fruto bastante adaptável ao clima de Petrolina com alta radiação solar, as condições ideais para seu cultivo são temperaturas médias entre 24°C a 30°C (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária [EMBRAPA], 2015). Em condições não rotineiras e ideais, a Mangueira tolera temperaturas entre -6°C e 40°C, existindo variedades que suportam até 48°C, mas em etapas específicas da produção da manga. Fora deste intervalo, ocorrem danos em plantas adultas e morte de plantas jovens (de Oliveira, Moreira, de Carvalho & dos Santos, 2022; Pandey, Bahadur, Yadav, & Lall, 2022). Por exemplo, temperaturas acima de 33 °C prejudicam a etapa da formação do

grão de pólen, reduzindo em 50% sua viabilidade (Sankaran, 2021). Temperaturas elevadas também podem provocar altas taxas de partenocarpia (frutos que se desenvolvem sem o embrião), originando frutos pequenos e sem valor comercial (Lima Filho & Teixeira, 2021).

Na etapa de frutificação da mangueira, por exemplo, sendo a etapa de formação e crescimento dos frutos, temperaturas acima ou muito abaixo da faixa recomendada são prejudiciais ao crescimento, ao desenvolvimento e à frutificação (Soares Filho, 2022). Temperaturas elevadas também facilitam o aparecimento de tripés e outras doenças.

O cultivo da Manga, portanto, tem alta relação com as temperaturas da região, sendo sensível a eventos raros como por exemplo inundações e ondas de frio ou de calor. Esse último evento se caracteriza como um fenômeno climático prolongado com temperaturas extremamente altas para a época e região observada, persistindo durante vários dias ou até semanas. Para a identificação desse evento cada agência meteorológica possui seus critérios, não possuindo uma fórmula literalmente global para tal identificação. O Escritório de Meteorologia do Reino Unido⁵, por exemplo, uma *onda de calor* é definida como temperaturas máximas diárias elevadas para a época e a região, considerando limiares definidos, que tenham duração de no mínimo três dias consecutivos. Já pela Organização Meteorológica Mundial, esse evento se caracteriza quando num intervalo de pelo menos seis dias, a temperatura máxima diária é 5°C superior ao valor médio diário do período de referência (Masson-Delmotte *et al.*, 2021). Para Barriopedro, García-Herrera, Ordóñez, Miralles & Salcedo-Sanz (2023) utilizando percentil 90 nas temperaturas máximas da região para a caracterização do evento.

Ainda sobre temperaturas elevadas, recentemente aconteceram temperaturas não usuais na região de Petrolina em setembro de 2021, chegando a temperaturas máximas de 41°C (FolhaPE, 2005). Infelizmente, eventos como este

4

<https://www.correio24horas.com.br/economia/excesso-de-mangas-faz-precos-cairem-ate-40-no-mercado-0919>

⁵ <https://www.metoffice.gov.uk/weather/learn-about/weather/types-of-weather/temperature/heatwave>

tendem a ser cada vez mais comuns, confirmado inclusive pelo secretário-geral da Organização Mundial de Meteorologia (OMM), Petteri Taalas⁶, ao dizer que as ocorrências de Ondas de calor “serão normais e, inclusive, mais fortes”.

Segundo o relatório publicado pelo IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas), a frequência de certos tipos de eventos climáticos extremos está crescendo devido às alterações climáticas globais antrópicas do ser humano (IPCC, 2022). Por estar cada vez mais acontecendo, as altas temperaturas estão ocasionando incêndios e mortes na região da Europa e frutos danificados ou que vegetaram antes de florir, como ocorreu na safra em Monte Alto/Taquaritinga (SP) com a manga Palmer (Castillo, Vargas, Gilles & Wehner, 2021).

Tendo em vista cada vez mais a possibilidade do aparecimento de eventos extremos, ocorre a necessidade de aprimorar e estabelecer sistemas de alertas para minimizar impactos negativos, fato citado inclusive pela Organização Mundial da Saúde (Fernandes, Souza Hacon & Novais, 2021). Particularmente para a agricultura, o cenário da produção pode ser descrito como sendo a de tomadas de decisão que visem ter a maior lucratividade possível das lavouras. Primeiramente, verifica-se que época o produto de uma lavoura em particular tem melhor preço para um determinado mercado. Com este marco em mente, passa-se a estabelecer critérios para que a produção coincida com este marco. Assim, as ações de manejo das culturas visam obter o ciclo de plantio, crescimento, maturação e colheita de estão alinhados a períodos de maior lucratividade da produção. Porém, existem eventos que devem ser considerados para todas as etapas da produção. Excesso ou escassez de chuvas, temperaturas muito altas ou muito baixas, disponibilidade de insumos de produção e de mão de obra. Obviamente todos esses fatores estão relacionados às condições geográficas das plantações.

Novamente, os eventos extremos podem ser cruciais no mal desempenho das produções

agrícolas, observadas as etapas dessas produções. Nesse caso, os agricultores devem considerar tais eventos como possibilidades para o planejamento de suas atividades. Ora, a produção em média de grande escala requer a construção de estruturas de investimentos que garantam a segurança financeira e econômica dos negócios envolvidos.

Buscando, portanto, entender e prever eventos tais como os até agora descritos, este trabalho testou a aplicação de modelagem de tempos entre eventos extremos ou raros, utilizando-se do Processo de Renovação Generalizada baseado na distribuição de probabilidade Gumbel (Cristino, Zebrowski & Wildemeersch, 2020), nas estimativas e previsões de temperaturas elevadas e Ondas de calor na região do Vale do São Francisco, em Petrolina. Buscando-se com esse possível modelo, apoiar o agricultor da manga na decisão da melhor época de plantio, de venda ou cuidados especiais com o fruto. Pode-se aqui definir um cenário em Teoria dos Jogos nas quais se teriam os seguintes jogadores ou *players*: (i) produtores de manga, que se disponibilizam a garantir toda a operação agrícola e de logística da produção; (ii) bancos financiadores das operações de produção, que antecipam pagamentos aos produtores, tendo como garantia negócios futuros; (iii) seguradoras e resseguradoras para cobrir os financiamentos e operações; (iv) compradores dos produtos agrícolas, basicamente, indústrias alimentícias e atravessadores de redes de abastecimento de produtos em natura; e (v) consumidores. Deve-se notar que se torna fundamental a eficácia não só da produção e distribuição como um todo, mas que os contratos aqui envolvidos sejam justos e baseados em pressupostos coerentes com a realidade. Nesse caso, os contratos (de financiamento, de seguros, de resseguros, de compra e venda) sejam ajustados com todas as possíveis ocorrências, principalmente, aquelas relacionadas à perda de produção.

Aqui, o foco será a probabilidade de ocorrência de eventos naturais e que afetem

⁶

<https://www.cmjornal.pt/sociedade/clima/detalhe/ondas>

-de-calor-serao-mais-frequentes-e-intensas-pelo-menos-ate-2060

diretamente a produção, mais especificamente, a região citada. Tal distribuição de probabilidade ancora os percentuais envolvidos de seguridade e financiamento (Chehade, Savargaonkar & Krivtsov, 2022; Bellemare, Lee & Novak, 2021), e podem ser fundamentais nas tomadas de decisão dos *players* envolvidos.

Deve-se destacar que a principal hipótese desse trabalho é de que os tempos entre os eventos de ondas de calor pode ser modelado pelo processo de renovação generalizado, baseado na distribuição de probabilidade Gumbel, GuGRP, apresentando, portanto, importante indicador de tomada de decisão para todos nos negócios relacionados. A confirmação dessa hipótese e a aplicação dessa metodologia é inédita, relativamente ao uso de processos de renovação generalizadas ao caso descrito, o que permite a expansão de aplicação dessa teoria a outros eventos naturais ou a outras regiões.

Para a realização das análises para as previsões foi escolhido o banco de dados de temperaturas máximas disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia, INMET, em detrimento do Laboratório de Meteorologia da Universidade Federal do Vale do São Francisco, por possuir um número maior pontos amostrais. Arelado a isso, foi utilizado o método de máxima verossimilhança e Log-verossimilhança para estimar os parâmetros do processo de renovação generalizada baseada na distribuição de probabilidade Gumbel, combinação GuGRP. O algoritmo escolhido para a otimização dos parâmetros sendo o enxame de partículas, mas utilizando também a função `FindMaximum` do Wolfram Mathematica[®]. Para testar à aderência dos dados à distribuição, o teste de Kolmogorov-Smirnov foi utilizado. Por último, algumas análises de preços de venda da manga Tommy e Palmer, em cima dos dados disponibilizados no *site* da HFBrasil⁷, para possíveis situações do agricultor na escolha da melhor época para venda, considerando possíveis riscos de temperaturas elevadas que possam danificar o fruto.

O modelo GuGRP se mostrou aderente para modelar a chegada dos eventos de ondas de calor a um nível de significância de 0,05 do

Kolmogorov-Smirnov, o *P*-valor obteve 0,28 ou 28% de aderência aos dados transformados e adaptados para o teste.

A caracterização e identificação do evento basearam-se em encontrar as temperaturas máximas acima do percentil 90 para a região de Petrolina. Também foram realizados alguns testes utilizando temperaturas máximas acima das normais climatológicas à título de conhecimento. Para o processo de tomada de decisão para o agricultor, com as estimativas das probabilidades e possíveis épocas de ocorrências do evento em mãos, é possível auxiliá-lo na tomada de decisão com base nos riscos.

Metodologia

Área de estudo

O Vale do São Francisco compreende a região drenada pelo rio São Francisco e seus afluentes localizado nos estados de Minas Gerais, Bahia, Pernambuco, Sergipe e Alagoas. Já o Submédio do Vale do São Francisco é mais delimitado na região sertaneja, no semiárido do Nordeste do Brasil e norte do estado da Bahia, compreendido, portanto entre o estado de Pernambuco, estado do qual faz parte a cidade de Petrolina, e o estado da Bahia (Figura 1).

Como no presente trabalho foi escolhido analisar os dados de temperatura da região de Petrolina e essa está contida no Vale, foi preferido contextualizar os resultados do Vale do São Francisco.

No Vale do São Francisco, pode-se verificar que cerca de 90% das grandes empresas do setor e que cultivam manga, atuam para exportar, ficando apenas uma fatia de 10% para atender ao mercado interno⁸.

⁷ <https://www.hfbrasil.org.br/br/banco-de-dados-precos-medios-dos-hortifruticolas.aspx>

⁸ <https://www.todafruta.com.br/manga-exportacao-gera-mais-lucro-ao-produtor-mas-exige-investimento-e-atencao>



Figura 1 Região do Vale do São Francisco. Fonte: imagem retirada do site da Embrapa.

O Submédio do Vale do São Francisco é o maior exportador de uvas finas de mesa e mangas do Brasil. Sendo inclusive a manga a fruta mais exportada do Brasil em 2021, com mais de 270 mil toneladas exportadas (ABRAFRUTAS, 2022). Em virtude do desenvolvimento tecnológico e da disponibilidade hídrica, a região se destaca na produção de frutas, gerando emprego e renda na parte central do Semiárido brasileiro, contribuindo, assim, para a redução da pobreza.

Estima-se que a fruticultura do Vale do São Francisco é responsável por gerar cerca de 60 mil empregos diretos e 200 mil indiretos (ABRAFRUTAS, 2023): Paulo Roberto Lima, diretor presidente da Agência de Defesa e Fiscalização Agropecuária do Estado de Pernambuco, ADAGRO, em sua fala também reforçou a grande importância do Vale na economia (ABRAFRUTAS, *op cit.*): “A produção é exportada para mais de 30 países e gera uma receita média anual de 180 milhões de dólares, impactando positivamente no PIB agrícola de Pernambuco e do Brasil”.

Especificando mais algumas condições favoráveis que fazem a região do Submédio do Vale do São Francisco ter destaque na produção de frutas segundo a Revista A Lavoura⁹: “Insolação anual de três mil horas – equivalentes a 300 dias de sol por ano, temperatura média de 26° C, umidade

relativa de 50%, e precipitação média anual de 450 mm fazem do Vale do Submédio São Francisco uma região única para a produção de frutas”.

Além disso, devido ao desenvolvimento da agricultura irrigada e aplicação no Vale do Submédio São Francisco, foi possibilitado a produção da manga o ano todo, o que os dá uma grande vantagem competitiva pois podem vender para diferentes localidades.

Época de floração colheita da manga - Brasil

A floração natural da mangueira na região do Vale do São Francisco ocorre com maior intensidade entre junho e agosto, mas por indução floral pode acontecer em diferentes períodos como no período de maio a agosto (Mouco e Albuquerque, 2021). A época, portanto, pode variar de acordo com o plantio e a época em que o agricultor quer colher as mangas.

A época de colheita da manga pode variar se utiliza-se tecnologia de indução da floração, das condições naturais ou da variedade da manga, além do objetivo do agricultor para produção para exportação ou importação. No geral, no Nordeste a colheita ocorre de outubro a fevereiro (em condições naturais) e de agosto a outubro (com indução artificial da floração), e no Centro-Sul, de novembro a dezembro (de Lima, de Lima, de Oliveira & Silva, 2023).

Ondas de calor

A identificação de uma onda de calor varia de uma agência meteorológica para outra, cada uma possuindo seus critérios para tal identificação. Em geral, uma definição genérica, comum entre todas as agências é a caracterização da onda de calor como um fenômeno meteorológico prolongado e relativamente incomum com temperaturas extremamente altas para região e persistentes durante vários dias ou até semanas.

9

https://issuu.com/sociedadenedacionaldeagricultura/docs/a_lavoura_703

Ondas de calor intensas podem levar a diversos problemas, tais como secas, desequilíbrio de biomas, incêndios florestais, desidratação e mortes¹⁰. Na Europa, por exemplo, a população está sentindo cada vez mais a intensidade de ondas de calor, que gera focos de incêndio e alertas máximos. No ano de 2022, o Reino Unido excedeu 40°C pela primeira vez na história¹¹. A problemática é tão grave, que se estima que ondas de calor provocaram mais de 15.000 mortes na Europa¹² em 2022 e 72 mil mortes em 2003¹³.

O fenômeno da onda de calor não é algo exclusivo da Europa e é sentido em todo o mundo. No Brasil não é comum ocorrerem óbitos por causa do calor excessivo, mas ainda assim é algo que afeta o corpo, assim como as plantas e os seres vivos em geral.

Constantemente o INMET emite alertas e resumos climáticos do Brasil, em 2020 o instituto mostrou que mais de 50 cidades brasileiras registraram as maiores temperaturas do ano em setembro, muitas ultrapassando temperaturas acima de 40°C¹⁴. Normalmente o Inmet também pode associar a onda de calor com umidade e temperaturas elevadas. Altas temperaturas também ocorreram nas cidades do Nordeste inclusive em algumas que fazem parte do Vale do São Francisco.

A qualidade ou previsibilidade dos produtos agrícolas são afetadas diretamente pelas variações bruscas de temperaturas, no cultivo da manga, por exemplo, as plantas podem vegetar ao invés de florir se os eventos extremos ocorrem durante a fase de vegetação, efeito esse que foi sentido em 2020 pela safra em Monte Alto/Taquaritinga (SP) para o tipo de manga Palmer (ABRAFRUTAS, 2020). Para piorar a situação, temperaturas elevadas em determinadas

fases ou solos podem acarretar maiores chances de incidência de doenças nos frutos.

Voltando à definição de ondas de calor, várias agências meteorológicas possuem suas fórmulas diferentes umas das outras e discordâncias quanto ao tempo de duração de temperaturas elevadas para ser identificado o evento. Pela Organização Mundial de Meteorologia, por exemplo, suas fórmulas se baseiam em temperaturas máximas diárias com pelo menos 5°C acima da normal climatológica da temperatura máxima da região e do mês de referência, com duração de no mínimo 5 dias. Já em os artigos apresentados por MET OFFICE (2022) e METSUL (2022), o evento é definido por temperaturas máximas diárias, que tem duração de no mínimo 3 dias consecutivos e ultrapassam os limiares estabelecidos de acordo com as últimas normais climatológicas antes da data analisada para a região. Para Lima e Aleixo (2024) também usaram a referência de duração de no mínimo três dias e a variável de temperatura máxima, mas usando o limiar de acima do percentil 90 da temperatura máxima diária do período climatológico de referência. Além dessas citadas, existem várias outras com duração e cálculos diferentes.

Neste artigo será usada a técnica do percentil 90, semelhante ao trabalho de Lima e Aleixo (*op. cit.*) e de outros que também utilizam essa técnica. Será considerada, portanto, uma onda de calor, temperaturas máximas diárias maiores que o percentil 90 para a época e região de Petrolina.

Normais climatológicas

Para cada vez mais entender a variabilidade climática e fazer comparações no decorrer dos anos, foram definidas normais

¹⁰ <https://www.undrr.org/publication/human-cost-disasters-overview-last-20-years-2000-2019>

¹¹

<https://g1.globo.com/mundo/noticia/2022/07/19/calor-europa-incendio-temperatura-recorde.ghtml>

¹² <https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/el-informe-anual-de-la-omm-pone-de-relieve-el-avance-continuo-del-cambio>

¹³ <https://www.undrr.org/publication/human-cost-disasters-overview-last-20-years-2000-2019>

¹⁴ <https://portal.inmet.gov.br/noticias/onda-de-calor-mais-de-50-cidades-registraram-nesta-segunda-feira-12-as-maiores-temperaturas-do-ano-até-o-momento>

climatológicas, em resumo, dados climáticos médios dentro de um período de tempo. Sendo a atualização e acompanhamento das normais extremamente importantes para o agronegócio, entre elas, o risco climático de seguros agrícolas, o próprio mercado financeiro, o setor de geração de energia, entre outros (Instituto Nacional de Metrologia [INMET], 2022).

Um guia de instruções para o estabelecimento e cálculos para normais climatológicas podem ser encontrados no relatório da Organização Meteorológica Mundial, (World Meteorological Organization [WMO], 2017). Nesse guia, é recomendado usar períodos de referência de 30 anos nas definições para as normais. E pelo site do INMET é possível encontrar os períodos de 1961 a 1990, 1981 a 2010 e 1991 a 2020 para as normais climatológicas brasileiras (INMET, *op. cit.*). Para temperaturas, os cálculos estabelecidos nos guias citados são:

$$X_{ij} = \frac{\sum_k X_{ijk}}{N},$$

em que X_{ijk} é o valor observado da variável X (temperatura, por exemplo), no dia k , do mês j , do ano i e N é o número de dias no mês i , do ano j , para os quais se dispõe das observações.

A OMM recomenda que, nestes casos, se adote a regra 3:5, descartando-se os meses com ausência de dados em três ou mais dias consecutivos, ou cinco ou mais dias alternados. Entendendo essas referências quanto às normais, é possível verificar anomalias e a variabilidade dos dados no decorrer dos anos.

Processo de renovação generalizado

Os processos de renovação generalizados (GRP, do inglês *generalized renewal processes*) estão bem descritos em Firmino, Oliveira & Cristino (2021) e são utilizados na modelagem de tempos entre dois eventos consecutivos de uma série. A ideia principal é introduzir o conceito de *idade virtual* do sistema estudado, que implica em mudanças nas equações de sobrevivência ou confiabilidade, conforme o caso. Lembrando, se $-F_X(t)$ é a função de distribuição da variável

aleatória (temporal) X , ou seja, $F_X(t) = P(X \leq t)$, então $S_X(t) = 1 - F_X(t)$ é a função de sobrevivência (no caso de análise de sistemas orgânicos) ou confiabilidade (no caso de sistemas eletromecânicos ou abstratos).

Considere a linha do tempo de vida de um sistema qualquer na Figura 2.

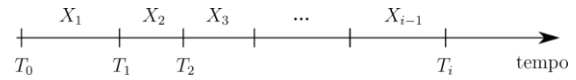


Figura 2 - Linha do tempo de vida/funcionamento de um sistema. Os pontos T_i são instantes nos quais ocorrem eventos que se deseja estudar. As variáveis X_i são os tempos entre dois eventos consecutivos. Fonte: elaborado pelos autores.

A idade virtual introduzida por Kijima (Firmino *et al.*, 2021) pode ser definida por duas classes:

- A idade virtual do tipo I: $v_i = v_{i-1} + qx_i$, $v_0 = 0$.
- A idade virtual do tipo II: $v_i = q(v_{i-1} + x_i)$, $v_0 = 0$.

A constante q que aparece nas equações de definição dos tipos de idade virtual é chamado *coeficiente de rejuvenescimento (envelhecimento)* (conforme seu valor) e representa a qualidade da intervenção do sistema ou a absorção dessa intervenção (Firmino *et al.*, 2021). Por exemplo, se $q = 0$, o sistema volta à condição de tão bom quanto novo, se $q = 1$, o reparo não restaura a idade do sistema e o caso $0 < q < 1$ é o caso mais comum de estudo do PRG.

Mais especificamente, se as variáveis $(X_1, X_2, \dots, X_n)$ são consideradas por um PRG, então a função de distribuição de tais variáveis é dada a partir de:

$$F_{T_i}(x + v_{i-1} | v_{i-1}, \theta) = \frac{F_{T_1}(x + v_{i-1} | \theta) - F_{T_1}(v_{i-1} | \theta)}{1 - F_{T_1}(v_{i-1} | \theta)},$$

em que θ é um vetor de parâmetros. O modelo GuGRP definido por Cristino *et al.* (2020)

utiliza a função de distribuição Gumbel para F_T (Ross e Peköz, 2023):

$$F_{T_i}(x + v_{i-1} | v_{i-1}, \alpha, \beta) = 1 - \exp \left\{ \exp \left[\frac{v_{i-1} - \alpha}{\beta} \right] - \exp \left[\frac{x + v_{i-1} - \alpha}{\beta} \right] \right\},$$

com $\alpha \in \mathbb{R}$, parâmetro de localização e $\beta > 0$, parâmetro de escala.

Conforme demonstrado por Cristino *et al.* (op cit.), tem-se que:

Proposição 1: Seja $(W_1, W_2, \dots, W_n)$, $n \geq 1$ um vetor aleatório tal que:

$$W_i = \exp \left[\frac{X_i + V_{i-1} - \alpha}{\beta} \right] - \exp \left[\frac{V_{i-1} - \alpha}{\beta} \right],$$

em que $X_i + V_{i-1}$, $i = 0, 1, \dots, n$ condicionadas à $(i - 1)$ -ésima idade virtual, V_{i-1} , segue o modelo GuGRP com parâmetros α e β . Então:

1. W_i segue a distribuição exponencial com parâmetro 1, para cada i ;
2. $W_1, \dots, W_n$ são identicamente distribuídos e mutuamente independentes.

A Proposição 1 acima implica em um algoritmo que permite verificar se uma sequência de tempos entre eventos segue (ou não) o modelo GuGRP (veja apresentação do algoritmo de aderência proposto na Proposição 1 em Cristino *et al.* (2020)). Assim a estratégia de verificação de aplicabilidade do modelo a uma sequência de tempos é tomar o estimador para o vetor de parâmetros e usar a Proposição 1 a partir de um teste de hipóteses para as variáveis transformadas.

Seleção da base de dados

A base de dados escolhida é das temperaturas da região de Petrolina disponíveis no site do instituto Nacional de Meteorologia - INMET. Essa base de dados no site, abrange os anos de abril de 2003 até os dias atuais, a medição é realizada diariamente todos os dias do ano pelo laboratório (INMET, 2023). Já os dados referentes

a preço de Venda da Manga no mercado interno foram retirados da fonte Hortifruti/Cepea.

Pré-processamento de Dados

Conforme foram sendo analisadas as bases de dados disponíveis no site do INMET foi necessário fazer a limpeza e padronização dos dados, retirando cabeçalhos desnecessários, renomeando colunas, contando valores vazios da tabela de meses que não foram preenchidos na base como, por exemplo, o ano de 2003 que não contém os meses de janeiro e fevereiro até o dia 21 de fevereiro. Assim como 2003, o ano de 2023 não contém o preenchimento dos dados de temperatura de todo o ano de 2023 já que o ano ainda não terminou quando este trabalho estava sendo feito.

Além disso, a base de dados de temperaturas continha os dados de temperaturas máximas medidas de hora em hora, para não atrapalhar no momento da leitura diária das temperaturas foi realizada a filtragem da maior temperatura máxima do dia e colocada em outro *dataframe* para continuar as análises. Nos dados dos valores de venda da Manga foram separados os dados pelas variações Palmer e Tommy para uma melhor análise de preços.

Diversas verificações de inconsistências foram executadas sobre os dados observados por meio da linguagem de programação Python e das bibliotecas de *Python Pandas* e *Pandas Profiling* durante a etapa de pré-processamento de dados.

Processamento dos dados

Foram realizadas análises exploratórias dos dados com objetivo de entender um pouco melhor as características dos dados, insights e possíveis problemas que possam afetar a validade dos resultados. A base de dados dos preços de venda da manga do Vale do São Francisco foi utilizada para leitura visual rápida de quais meses tiveram valores com maiores médias para que se localize o alvo das previsões. Para começar a contagem dos eventos extremos, mais precisamente a onda de calor, foi necessária definir qual seria o conceito para aplicar na metodologia.

O conceito escolhido foi a definição de onda de calor como um evento em que as temperaturas máximas diárias estariam acima do 90 percentil do mês de referência para a região de Petrolina (PE). Além disso, sendo necessário que as temperaturas extremamente elevadas ocorressem por pelo menos três dias consecutivos. Também à título de informação, alguns gráficos foram feitos mostrando os dados que ficaram acima das normais climatológicas de referência.

Será feita a separação dos dados na proporção 80% treinamento e 20% teste. Isso ajuda a verificar se o modelo é capaz de generalizar para novos dados. A separação será feita pela cronologia dos dados.

Os seguintes passos foram utilizados para o ajuste e definição do modelo aos dados levantados:

- Foi realizada a contagem de ondas de calor ocorridas, guardando duas informações de cada evento para serem passadas para a função de máxima verossimilhança: o tempo em anos entre o estado de falha do dado atual e anterior (onda de calor) e a duração do evento em dias. Também foram guardados outros dados como a intensidade, essa última definida como a diferença de temperatura máxima do evento e da temperatura máxima média para a época de referência, ano do evento e mês, mas não foram passadas para a função objetiva. Os dados depois da contagem dos eventos foram separados em treinamento e teste.
- Posteriormente, com a função de Máxima Verossimilhança do Processo de Renovação Generalizada baseada em

Gumbel, utiliza-se o algoritmo Enxame de partículas e, complementarmente, a função `FindMaximum` do *Wolfram Mathematica*® para estimar os parâmetros da distribuição pelos dados de treinamento.

- Para se calcular a idade virtual de cada evento, é feita uma transformação dos dados utilizando a Proposição 1.
- Para ser testada a aderência da distribuição, o teste de Kolmogorov Smirnov é utilizado.
- É feita a extrapolação das previsões para testar as previsões para os dados de teste e cálculo das probabilidades do evento ocorrer em determinado tempo.

Resultados e discussões

Como citado anteriormente, foi analisada a série histórica de 2004 a 2023 de temperaturas na Região do Vale do São Francisco, no entorno das cidades de Petrolina (PE) e Juazeiro (BA). A primeira observação pode ser feita a partir do Gráfico da Figura a seguir que indica as temperaturas máximas (médias) ao longo do ano.

Na plotagem do *box plot* de temperaturas máximas de todos os meses entre os anos de 2008 e 2022 na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é possível notar a presença de alguns outliers, ou seja, alguns valores atípicos de temperaturas máximas tanto "bem" abaixo quanto alguns muito "acima". Lembrando que os outliers plotados no *box plot* da mesma Figura representam as temperaturas máximas individuais que foram atípicas e não exatamente indicam a presença explícita do Evento de onda de calor, já que para ser caracterizado assim precisaria obedecer aos critérios determinados nesse trabalho.

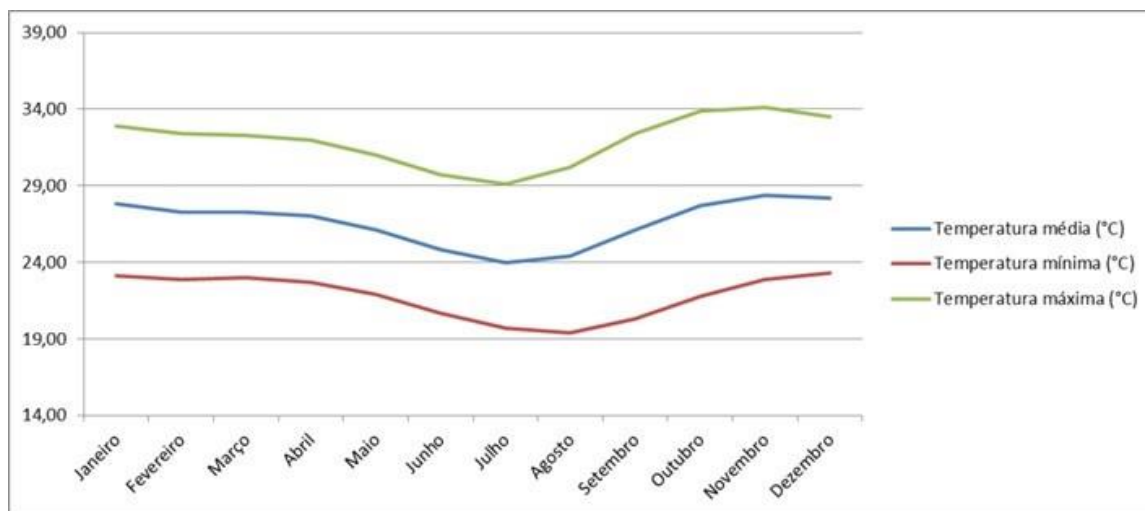


Figura 3 -Temperaturas mínimas, médias e máximas (valores esperados) ao longo do ano na Região de estudo. Fonte: dados do INMET, gráficos elaborados pelos autores.

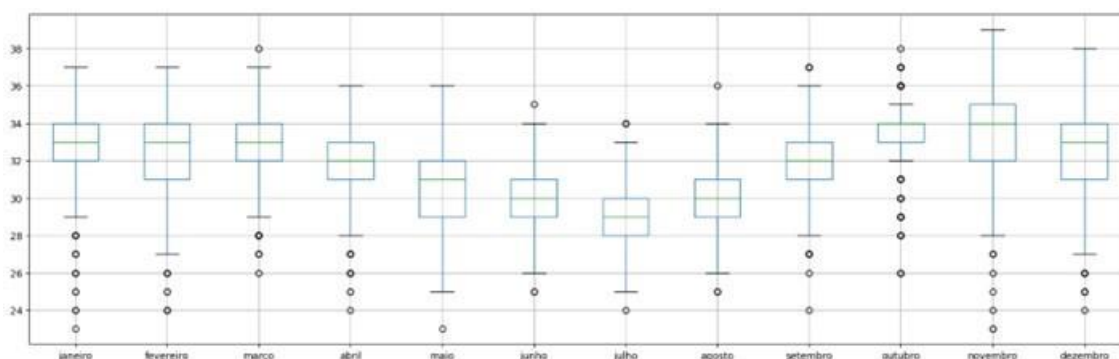


Figura 4 - Box plot de temperaturas máximas de todos os meses e da série histórica entre 2008-2022. Fonte: análise pelos autores

Pelo Histograma da **Erro! Fonte de referência não encontrada.** de temperaturas médias máximas de todos os meses da série histórica coletada é possível observar a distribuição dos dados. A maior frequência de temperaturas médias máximas está centrada no centro do gráfico,

ou seja, perto da média (medida central), o que caracteriza o histograma como simétrico. Esse resultado pode dar indício que a distribuição dos dados é normal, mas para confirmar se segue a distribuição Normal ou outra é necessária validação pelo teste de Kolmogorov-Smirnov.

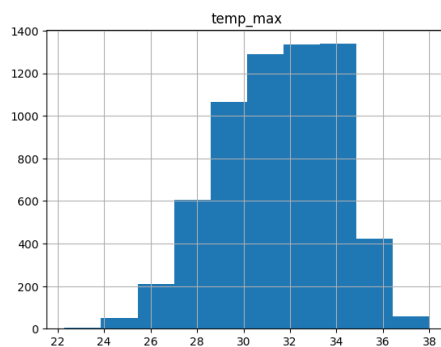


Figura 5 - Histograma das temperaturas máximas médias. Fonte: elaborado pelos autores.

Em resumo, os dados estão principalmente entre as temperaturas médias máximas de 30°C e 36°C , contendo poucas frequências com valores menores que 28°C ou maiores que 36°C .

No Gráfico da Figura 6, do total dos 2323 dados acima, 28,97% das anomalias dos dados de temperaturas máximas acima da normal climatológica de referência ficaram com a estação do verão, em seguida o outono com 27,51%, primavera com 22,73% e o inverno com 20,79%.

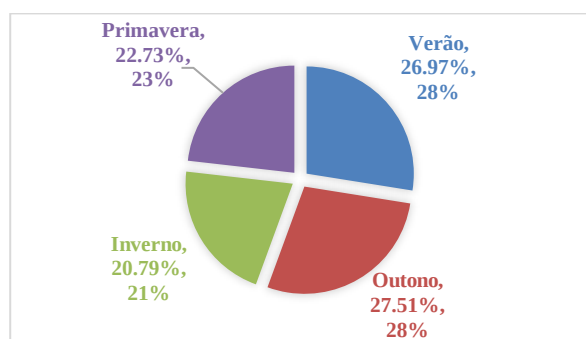


Figura 6 - Gráfico das temperaturas máximas que ultrapassaram as normais climatológicas separadas por estação. Fonte: elaborado pelos autores.

Utilizando da técnica de percentil 90, as temperaturas máximas acima e consecutivas podem ser observadas do ponto de vista de intensidade e duração segundo o que pode ser observado nos Gráficos abaixo.

Na Figura 7, estão plotadas as intensidades de ondas de calor na região de estudo, ou seja, a variação em graus das temperaturas máximas acima do percentil 90, os maiores valores de variação na ordem foram os anos 2019, 2016, 2013 e 2004, em Petrolina.

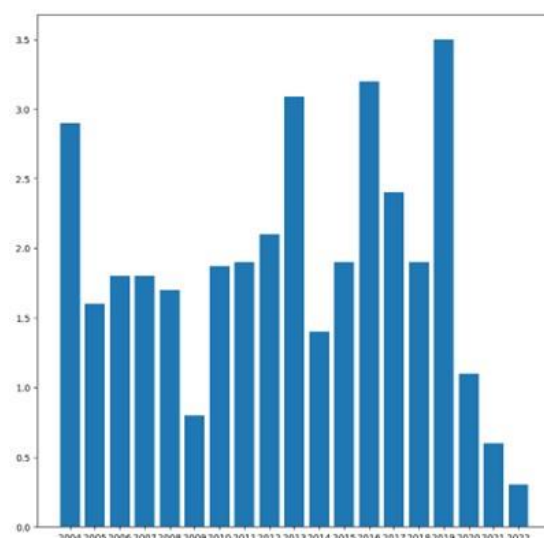


Figura 7. Intensidade em graus da Onda de calor no decorrer dos anos. Elaboração pelos autores.

Pela técnica do percentil, utilizando os dados do Inmet, é possível observar uma alta duração do evento de Onda de Calor no ano de 2013, seguido de 2015 e 2016 em detrimentos dos outros anos (ver Figura 8).

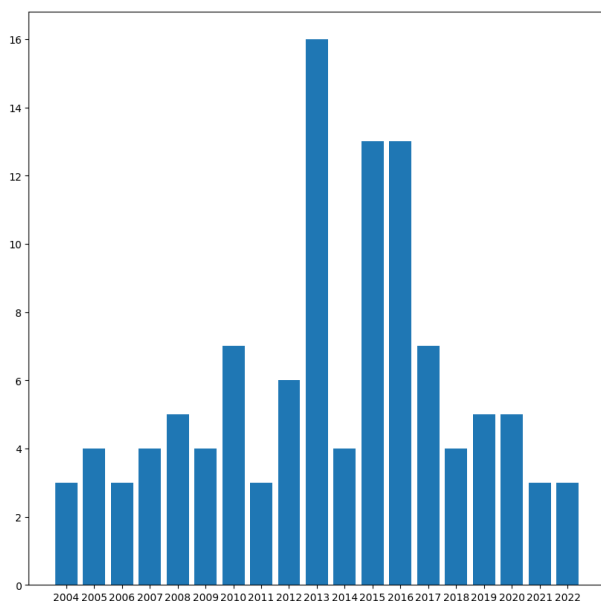


Figura 8 - Duração de ondas de calor no decorrer dos anos. Elaborado pelos autores.

Com a função de log-verossimilhança estabelecida, os dados necessários como tempo de uma onda de calor para outra e a duração do evento, foram aplicados e lidos na função, formando uma função objetivo para algoritmos de otimização

Usando-se o nível de significância de 0,05, o teste de Kolmogorov-Smirnov representado na Tabela 2 apontou que não tinha evidências para rejeitar a hipótese nula que os dados transformados não seguiam uma distribuição exponencial com parâmetro 1, em outras palavras, significando que os dados se mostraram aderentes ao modelo GuGRP com a medida de *P*-valor de 0.280101, corroborando com a aceitação da hipótese de que os tempos entre sucessivas ondas de calor seguem o modelo GuGPR, com os parâmetros estimados. Nessa mesma Tabela, estão apresentados resultados de outros testes.

estimar os parâmetros. Na utilização do algoritmo enxame de partículas utilizando a biblioteca *PySwarms*, utilizou-se a função de log-verossimilhança como função objetivo, mas não obteve as melhores estimações dos quatro parâmetros, que tornassem as distribuições transformadas mais aderentes a uma distribuição exponencial de parâmetro 1. Entretanto, utilizando os valores obtidos pelo referido algoritmo como valores iniciais da função do *FindMaximum* do Wolfram Mathematica®, estimou os parâmetros e obteve boa aderência para o modelo e a distribuição esperada. Essa função utiliza diversos algoritmos de otimização para estimar os parâmetros da função do método de máxima verossimilhança ou log-verossimilhança.

Os valores estimados para cada um dos 4 parâmetros utilizados na função de densidade de probabilidade do modelo GuGRP na perspectiva de log de máxima verossimilhança estão apresentados em valores aproximados na Tabela 1.

Tabela 1 Estimativas dos parâmetros do modelo. Tem-se que q é o parâmetro de rejuvenescimento (envelhecimento), α e β são os parâmetros de localização e escala da distribuição, respectivamente, e δ o parâmetro associado à duração do evento.

q	α	β	δ
$\approx 1,53483$	$\approx 345,71036$	$\approx 64,84899$	$\approx 17,29964$

Tabela 2 - Tabela dos testes de aderência dos dados transformados à distribuição Exponencial com parâmetro 1. Veja Proposição 1.

Teste	Estatística	<i>P</i> -valor
Anderson Darling	1.38515	0.20604
Cramér-von Mises	0.236713	0.206334
Kolmogorov-Smirnov	0.113701	0.280101
Kuiper	0.178486	0.0717222
Pearson χ^2	12.3151	0.340433
Watson U^2	0.217264	0.0268756

Reforçando os resultados dos testes de aderência apresentados acima, pode-se verificar no Gráfico *QQ-plot* da Figura 9, a boa aderência dos valores transformados à distribuição Exponencial,

mais uma evidência para aplicação da tese do Proposição 1, ou seja, que os dados podem ser representados pelo modelo GuGRP.

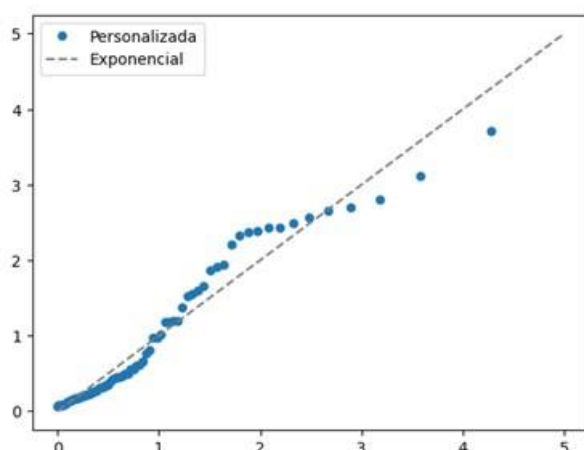


Figura 9 - Gráfico comparando os dados transformados com uma distribuição exponencial com parâmetro 1. Elaborado pelos autores.

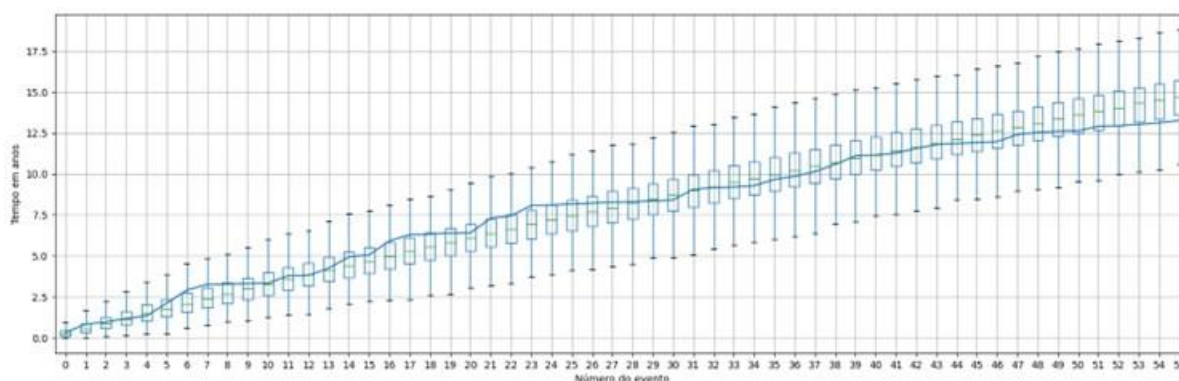


Figura 10 - Série de gráficos do tipo box plot das simulações das previsões via distribuição estimada. A linha contínua representa o que de fato ocorreu. Elaborado pelos autores.

Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, a série de box plot do treinamento. O eixo horizontal representa a ordem dos eventos e o eixo vertical os anos. O box representa a distribuição das estimativas para o evento utilizando a distribuição acumulada do modelo, enquanto a linha contínua, a distribuição com o que de fato ocorreu de onda de calor. Para fazer os limites do box plot se assemelhando a figura, foram realizadas 999 interações em cada número de evento de onda de calor. É possível observar com isso, que as estimativas se adequaram bem ao que de fato ocorreu.

Conclusões e considerações finais

A presente trabalho teve o objetivo de encontrar tendências ou estimativas de temperaturas extremamente elevadas, denominadas ondas de calor, na região de plantio, manejo ou cultivo da Manga na região do Vale do São Francisco e, portanto, tornando um processo de apoio à decisão na produção da manga. Para tal e utilizando análises básicas, propôs-se e comprovou-se a hipótese de que os tempos entre eventos naturais de ondas de calor podem ser modeladas pelo Processo de Renovação

Generalizado baseado na distribuição de Gumbel, GuGRP, tendo seus parâmetros estimados pelo método de máxima verossimilhança por algoritmos de otimização e testes de aderências para garantir uma melhor estimativa desses eventos e apoio à decisão ao agricultor.

Os dados de temperatura máxima que se mostraram mais aderentes a distribuição GuGRP, com os seus parâmetros sendo maximizados e estimados pelo método de Máxima Verossimilhança, foi utilizando a função `FindMaximum` do Wolfram Mathematica®, que utiliza diversos algoritmos de otimização para encontrar as estimativas para os parâmetros utilizando-se do método de otimização enxame de partículas utilizando a biblioteca *PySwarms* para “chutes” iniciais. A aderência dos dados pode ser comprovada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov e outros. Deve-se notar que o parâmetro q de rejuvenescimento/envelhecimento maior que 1 indica que a probabilidade de ocorrência de ondas de calor aumenta com o passar do tempo.

Pela extrapolação dos dados da distribuição do modelo utilizando temperaturas máximas, é possível estimar possíveis eventos de ondas de calor. Além disso, à título de apoio a decisão para o agricultor, os meses de março, abril e maio para a Manga Palmer e os meses fevereiro, março e maio para a Manga Tommy são os que

possuem maiores médias de preço na venda da Manga ou discrepâncias de valores para o mercado interno (brasileiro). Sabendo da probabilidade desses eventos é possível ter uma maior atenção no manejo e na produção da Manga ou até mesmo adiantando o plantio e consequentemente venda do produto para evitar possibilidades de maiores prejuízos.

Obviamente, a metodologia apresentada pode ser utilizada para avaliações de ondas de calor em qualquer região, servindo de fator de tomada de decisão para outros casos.

Finalmente, deve-se destacar que o uso de um processo de renovação generalizado para a predição de ondas de calor é inusitado, mas apresentou-se com um ótimo ajuste aos dados. Destaque, também, deve ser dada à estimativa do parâmetro q de rejuvenescimento/envelhecimento indica um aumento das probabilidades de ocorrência destes eventos, respaldado pela maioria dos modelos que tratam de mudanças climáticas (p.ex. Geirinhas *et al.*, 2021; Marx & Bornmann, 2021). Isso que deve alertar produtores, financiadores e compradores dessa cultura, e autoridades para que se possa estabelecer um amplo diálogo a respeito das mudanças climáticas e seus efeitos sobre as atividades humanas, assim como o impacto de ações antrópicas sobre a Natureza e a vida em nosso planeta.

Referências

- ABRAFRUTAS - Associação Brasileira dos Produtores Exportadores de Frutas e Derivados. (2019, outubro). Excesso de mangas faz preços caírem até 40% no mercado. Disponível em <https://abrafrutas.ultramidia.com.br/2019/10/excesso-de-mangas-faz-precos-cairem-ate-40-no-mercado/>. Acesso: 10 Set. 2023.
- ABRAFRUTAS. (2022, janeiro) Manga foi a fruta mais exportada pelo Brasil em 2021. Disponível em <https://abrafrutas.org/2022/01/manga-foi-a-fruta-mais-exportada-pelo-brasil-em-2021/>. Acesso: 10 Set. 2022.
- ABRAFRUTAS. (2023, janeiro). Conheça os tipos de manga mais comuns no Brasil. Disponível em <https://abrafrutas.org/2023/01/conheca-os-tipos-de-manga-mais-comuns-no-brasil/>. Acesso: 03/Mar/2023.
- Barriopedro, D., García-Herrera, R., Ordóñez, C., Miralles, D. G., & Salcedo-Sanz, S. (2023). Heat waves: Physical understanding and scientific challenges. *Reviews of Geophysics*, 61(2), e2022RG000780. <https://doi.org/10.1029/2022RG000780>.
- Bellemare, M. F., Lee, Y. N., & Novak, L. (2021). Contract farming as partial insurance. *World Development*, 140, 105274. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2020.105274>.
- Castillo, F., Vargas, A. S., Gilles, J. K., & Wehner, M. (2021). The impact of heat waves on agricultural labor productivity and output. *Extreme events and climate change: A multidisciplinary approach*, 11-20. <https://doi.org/10.1002/9781119413738.ch2>.
- Chehade, A., Savargaonkar, M., & Krivtsov, V. (2022). Conditional Gaussian mixture model for warranty claims forecasting. *Reliability Engineering & System Safety*, 218, 108180. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108180>.

- Costa, A., da Costa, A. N. & Caetano, L. C. S. (2008). Recomendações técnicas para a produção de manga. Vitória, ES: Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural. Disponível em <https://biblioteca.incaper.es.gov.br/digital/bitstream/item/105/1/minicurso-cd-6-recomendacoes-tecnicas-para-manga.pdf>. Acesso: 12 Dez. 2023.
- Cristino, C. T., Zebrowski, P. & Wildemeersch, M. (2020) Assessing the time intervals between economic recessions. *Plos One*, 15(5), e0232615. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232615>.
- de Lima, T. A., de Lima, J. R. F., de Oliveira, D. G., & Silva, J. D. S. (2023). Análise do processo de comercialização de manga produzida no polo Petrolina/PE e Juazeiro/BA. In: Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural do Nordeste (SOBER-NE), 15., 2023, Serra Talhada. Agricultura e desenvolvimento rural no Nordeste: inovação, desenvolvimento sustentável e impactos sociais: anais. Serra Talhada: UFRPE, 2023.
- de Oliveira, J. R., Moreira, N. M., de Carvalho, A. C., & dos Santos, A. B. C. (2022). Efeito da densidade de inóculo, temperatura, período de molhamento sobre o desenvolvimento de lesões e controle alternativo de antracnose e podridão peduncular de manga Tommy Atkins: Effect of inoculum density, temperature, wetness period on lesion development and alternative control of anthracnose and stem rot of Tommy Atkins mango. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 5(4), 4410-4428. <https://doi.org/10.34188/bjaerv5n4-084>.
- Dos Reis, C. J., Souza, A., Graf, R., Kossowski, T. M., Abreu, M. C., de Oliveira-Júnior, J. F., & Fernandes, W. A. (2022). Modeling of the air temperature using the Extreme Value Theory for selected biomes in Mato Grosso do Sul (Brazil). *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 36(10), 3499-3516. <https://doi.org/10.1007/s00477-022-02206-1>.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (2015, novembro) Cultivo da Mangueira. 3ª Ed. EMBRAPA Semi-Árido. Disponível em <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1031747/1/Cultivo-da-Mangueira.pdf>. Acesso: 05 Jun. 2024.
- Fernandes, T., de Souza Hacon, S., & Novais, J. W. Z. (2021). Mudanças climáticas, poluição do ar e repercussões na saúde humana: Revisão Sistemática. *Revista Brasileira de Climatologia*, 28, 138-164. Disponível em <https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/rbclima/article/view/14343>. Acesso 05 Jun. 2024.
- Firmino, P. R., de Oliveira, C. C., & Cristino, C. T. (2021). Generalized renewal processes. In *Safety and Reliability Modeling and its Applications* (pp. 305-353). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2019-0-05344-7>.
- Geirinhas, J. L., Russo, A., Libonati, R., Sousa, P. M., Miralles, D. G., & Trigo, R. M. (2021). Recent increasing frequency of compound summer drought and heatwaves in Southeast Brazil. *Environmental Research Letters*, 16(3), 034036. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abe0eb>.
- Globo Rural. (2021, 25 de abril). Vale do São Francisco é responsável por 87% do volume de manga exportado no país. Disponível em <https://g1.globo.com/economia/agronegocios/globo-rural/noticia/2021/04/25/vale-do-sao-francisco-e-responsavel-por-87percent-do-volume-de-manga-exportado-no-pais.ghtml>. Acesso: 10 Set. 2022.
- INMET Instituto Nacional de Meteorologia. (2022). Onda de calor: mais de 50 cidades brasileiras registram as maiores temperaturas do ano até o momento. Disponível em <https://portal.inmet.gov.br/noticias/onda-de-calor-mais-de-50-cidades-registraram-nesta-segunda-feira-12-as-maiores-temperaturas-do-ano-até-o-momento>. Acesso: 01 Abr. 2023.
- _____. (2023). Dados históricos anuais. Disponível em <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acesso: 31 Mar.2023.
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). Mudanças Climáticas 2022: Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade. Disponível em <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>. Acesso: 10 Abr. 2022.
- Lima, B., & Aleixo, N. (2024). Extremos térmicos e vulnerabilidade social na morbidade cardiorrespiratória em Manaus-AM. *Estrabão*, 5, 155-169. <https://doi.org/10.53455/re.v5i1.227>
- Lima Filho, J. M. P. & Teixeira, A. H. de C. (2021). In EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (2021). Manga. Brasília, DF: Embrapa. Disponível em <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/manga/pre-producao/caracteristicas/clima/temperatura>. Acesso: 03 Abr. 2023.
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., ... & Zhou,

- B. (2021). Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 2(1), 2391. Disponível em https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_FrontMatter.pdf. Acesso 04 Jun. 2024.
- Marx, W., Haunschild, R., & Bornmann, L. (2021). Heat waves: a hot topic in climate change research. *Theoretical and Applied Climatology*, 146(1), 781-800. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03758-y>.
- Meeker, W. Q., Escobar, L. A., & Pascual, F. G. (2022). Statistical methods for reliability data. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1080/00401706.2021.1945328>.
- MET OFFICE. (2022). What is a heatwave? Disponível em <https://www.metoffice.gov.uk/weather/learn-about/weather/types-of-weather/temperature/heatwave>. Acesso: 13 Abr. 2023.
- METSUL Meteorologia. (2022). Ondas de Calor mais frequentes, intensas e duradouras no Brasil. Disponível em <https://metsul.com/ondas-de-calor-mais-frequentes-intensas-e-duradouras-no-brasil/>. Acesso: 02 Mar. 2023.
- Mouco, M. A. do C. & Albuquerque, J. A. S. de. Manejo e Floração. In EMPRAPA, Manga. Embrapa, 2021. Disponível em <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/manga/producao/tratos-culturais/manejo-da-floracao>. Acesso: em 03 Abr. 2023.
- OMM. Organização Meteorológica Mundial. (2022). O Relatório Anual da OMM destaca o avanço contínuo das mudanças climáticas. Disponível em <https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/el-informe-anual-de-la-omm-pone-de-relieve-el-avance-continuo-del-cambio>. Acesso: 28 Out. 2023.
- ONU. Organização das Nações Unidas. (2023). Relatório da ONU revela aumento alarmante nos efeitos da mudança climática. Disponível em <https://news.un.org/pt/story/2023/04/1813222>. Acesso: 21 Abr. 2023.
- Pandey, A., Bahadur, V., Yadav, A., & Lall, D. (2022). Impact of temperature and water on physiological and biochemical changes in fruit crops. *Pharma Innovation J*, 11(9), 423-428. Disponível em <https://www.thepharmajournal.com/archives/2022/vol11issue9/PartD/11-8-373-355.pdf>. Acesso em 05 Abr. 2024.
- Ross, S. M., & Peköz, E. A. (2023). A second course in probability. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009179928>.
- Sankaran M, Dinesh M.R., Abirami K., Murugan C. (2021). Botany of Mango. In: Kole, C. (ed.) The Mango Genome. Compendium of Plant Genomes. New York, NY: Springer Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-47829-2_2.
- Shami, T. M., El-Saleh, A. A., Alswaiti, M., Al-Tashi, Q., Summakieh, M. A., & Mirjalili, S. (2022). Particle swarm optimization: A comprehensive survey. *Ieee Access*, 10, 10031-10061. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3142859>.
- Soares, M. R., Santos, J. R. & Neves, C. S. (2022, agosto). Incêndios em Portugal. A situação ao minuto. RTP Notícias. Caderno País. Disponível em https://www.rtp.pt/noticias/pais/incendios-em-portugal-a-situacao-ao-minuto_e1428267. Acesso: 12 Dez. 2023.
- Soares Filho, A. A. (2022). Produção e qualidade pós-colheita de mangas cultivadas com diferentes doses de cálcio no submédio do Vale do São Francisco (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Vale do São Francisco, Petrolina, PE, Brasil.
- WHO. World Meteorological Organization. (2017). WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals. Disponível em https://library.wmo.int/doc/_num.php?explnum_id=4166. Acesso: 12 Abr. 2023.