



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO
CAMPUS BAIXADA SANTISTA
INSTITUTO DO MAR

Renato do Nascimento Bio

**Efeitos do El Niño-Oscilação Sul (ENSO) no clima do Centro-Sul do Brasil,
aplicado na produtividade da cana-de-açúcar**

SANTOS-SP

2022

Renato do Nascimento Bio

**Efeitos do El Niño-Oscilação Sul (ENSO) no clima do Centro-Sul do Brasil,
aplicado na produtividade da cana-de-açúcar**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Comissão do Trabalho de Conclusão de Curso de graduação em Bacharelado em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de São Paulo, como requisito à aprovação na unidade curricular de Trabalho de Conclusão de Curso II.

Orientador: Wandrey de Bortoli Watanabe

SANTOS-SP

2022

Ficha catalográfica elaborada por sistema automatizado
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

B615ee do Nascimento Bio, Renato.
Efeitos do El Niño-Oscilação Sul (ENSO) no clima
do Centro-Sul do Brasil, aplicado na produtividade
da cana-de-açúcar. / Renato do Nascimento Bio;
Orientador Wandrey de Bortoli Watanabe; Coorientador
. -- Santos, 2022.
45 p. ; 30cm

TCC (Graduação - Engenharia Ambiental) --
Instituto do Mar, Universidade Federal de São Paulo,
2022.

1. El Niño-ENSO. 2. Temperatura de Superfície do
Mar (TSM). 3. Centro-Sul, Brasil. 4. Cana-de-açúcar.
5. Análises de Séries Temporais e Correlações
Cruzadas. I. de Bortoli Watanabe, Wandrey, Orient.
II. Título.

CDD 628

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus, por me permitir ultrapassar todos os obstáculos encontrado ao longo da minha graduação. Ao professor Wandrey, por ter sido meu orientador e ter desempenhado tal função com dedicação e amizade. Obrigado pela confiança! A professora Gyrlene, por ter aceitado avaliar o meu projeto de conclusão de curso. E também a todos os docentes do Instituto do Mar. Aos meus colegas de graduação, com quem convivi intensamente durante os últimos anos, pelo companheirismo e pela troca de experiências que me permitiram crescer não só como pessoa, mas também como formando. A todos os meus colegas de empresa BP Bunge, *dream team*, pelo fornecimento de dados e materiais que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço ao Kleber, meu supervisor que se tornou um grande amigo, pois foi um dos meus principais incentivadores. De todos os meus familiares, especialmente minha mãe e minha vó, por todo apoio e ajuda, que muito contribuíram para a realização deste trabalho. Pai, mesmo que você não esteja mais aqui, presente fisicamente, todas as minhas vitórias são dedicadas a você. Você foi a pessoa que mais acreditou em mim, e que atravessava cidades para me levar aos vestibulares. Hoje o seu filho entrega o Trabalho de Conclusão de Curso II como Cientista do Mar e Engenheiro Ambiental pela Universidade Federal de São Paulo. E olha, também já sou Analista de Inteligência de Mercado. Imensa gratidão a tudo e todos, muito obrigado do fundo do meu coração.

RESUMO

Maior produtor de açúcar no mundo e responsável por 49% da exportação mundial, a cana-de-açúcar no Brasil foi observada desde o período colonial, onde a evolução da sua cultura foi capaz de mudar todo o cenário econômico do país. A principal região produtora de cana no país fica localizada na região do Centro-Sul, com cerca de 93% da produção total. Alguns fatores são capazes de interferir a produtividade da cana, como o clima no ambiente de produção, refletindo assim no rendimento de campo TCH (toneladas de cana por hectare). O fenômeno El Niño-Oscilação do Sul (ENSO) é responsável por alterações no padrão de circulação geral da atmosfera, e isto influencia diretamente o comportamento do clima global, gerando impactos significativos na América do Sul e no Brasil. O grau desses impactos no clima da região Centro-Sul pode ser visto no presente trabalho através dos índices MEI, e das anomalias de TSM (temperatura de superfície do mar) nas regiões de Niño (1+2, 3, 3.4 e 4) que indicaram a intensidade destes grandes eventos e suas relações significativas com os parâmetros climáticos da região no período de janeiro de 2002 a março de 2022. E posto isso, também para o rendimento de campo (TCH) da cana a partir da safra 2007/08 até a safra 2021/22. Para tal foram utilizados métodos de Análise de Séries Temporais e de Correlações Cruzadas. O MEI e a região de Niño 3 foram os índices que apresentaram os maiores coeficientes de correlação com a temperatura mínima, precipitação e o índice NDVI na região Centro-Sul e nos estados do Paraná, Mato Grosso do Sul e Goiás sucessivamente. O TCH indicou ser uma combinação de todos esses parâmetros climáticos e a correlação cruzada entre o MEI (0,369) e as anomalias de TSM nas regiões Niño foram estatisticamente maiores, a região de Niño 3.4 com um máximo de 0,394. As relações encontradas encorajam estudos futuros para aprimorar o entendimento de outros padrões atmosféricos e os seus impactos sobre as variáveis climáticas da região, que podem afetar toda a cadeia produtiva da cana.

Palavras-chave: ENSO; TSM; Centro-Sul; clima; cana-de-açúcar, produtividade; análise de séries temporais; correlação cruzada.

ABSTRACT

The largest sugar production in the world and responsible for 49% of worldwide exports, the sugarcane in Brazil has been observed since the colonial period when the evolution of this culture was able to change the country's economic scenario. The main sugarcane production in the country is located in the South Central region, with about 93% of the total production. Some factors are capable of interfering with cane productivity, such as the climate in the field, which this reflected in the TCH (tons of cane per hectare) as yield. The El Niño Southern Oscillation (ENSO) phenomenon are responsible for changes in the general circulation pattern of the atmosphere, and this directly influences the behavior of the global climate, generating significant impacts in South America and Brazil. The degree of these impacts on the climate of the South Central region can be seen in this project through the MEI indices, and the SST anomalies (sea surface temperature) in the Niño (Niño 1+2, Niño 3, Niño 3.4, and Niño 4) that indicated the intensity of these major events and their significant relationship with the climatic parameters of the region in the period from January 2002 to March 2022. In consideration of the foregoing, also for the field yield (TCH) of sugarcane from the 2007/08 harvest until the 2021/22 crop. Methods of Analysis of Time Series and Cross-Correlation Function (CCF) were used for this purpose. MEI and Niño 3 are the indices with the highest correlation coefficients with the minimum temperature, precipitation, and NDVI index in the South Center and the states of Paraná, Mato Grosso do Sul, and Goiás successively. TCH was indicated to be a combination of all these climatic parameters and the CCF between MEI (0.369), and SST anomalies in the Niño regions were statistically higher, with Niño 3.4 region a maximum of 0.394. The relationships found encourage future studies to improve the understanding of other atmospheric patterns and their impacts on climatic variables in the region, which can affect the entire sugarcane yield chain.

Keywords: ENSO; SST; South Central Brazil; climate; sugarcane; yield; time series analysis; cross-correlation function

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Anomalias da temperatura de superfície do mar em eventos de El Niño (figura superior, com baixa pressão nível do mar na região em tracejado) e La Niña (figura inferior, com alta pressão nível do mar na região em linha cheia). Os tons avermelhados indicando regiões com temperaturas acima da média e os tons mais azulados regiões com temperaturas abaixo da média. FONTE: NOAA, Climate Prediction Center.	13
Figura 2 - Regiões de Niño vistas separadamente ao longo do Oceano Pacífico. Fonte: (SILVA, 2015)	14
Figura 3 - Localização das usinas canavieiras no Brasil, com nítida concentração no Centro-Sul do país, principalmente no estado de São Paulo. FONTE: UDOP - União dos Produtores de Bioenergia.....	16
Figura 4 - Série temporal do MEI no período de janeiro de 2002 a março de 2022, em azul os eventos de El Niño e em vermelho os eventos La Niña ao decorrer dos anos.	19
Figura 5 - Anomalias da temperatura de superfície do mar (TSM) na região de Niño 1+2, no período de janeiro de 2002 a março de 2022, em azul os eventos de El Niño e em vermelho os eventos La Niña ao decorrer dos anos.	20
Figura 6 - Anomalias da temperatura de superfície do mar (TSM) na região de Niño 3, no período de janeiro de 2002 a março de 2022, em azul os eventos de El Niño e em vermelho os eventos La Niña ao decorrer dos anos.	21
Figura 7 - Anomalias da temperatura de superfície do mar (TSM) na região de Niño 3.4, no período de janeiro de 2002 a março de 2022, em azul os eventos de El Niño e em vermelho os eventos La Niña ao decorrer dos anos.	21
Figura 8 - Série temporal da variável climática temperatura máxima (Tmax, em °C) expresso mensalmente durante o período de março de 2002 a março de 2022 na região Centro-Sul do país.	22
Figura 9 - Série temporal da variável climática temperatura mínima (Tmin, em °C) expresso mensalmente durante o período de março de 2002 a março de 2022 na região Centro-Sul do país.	22
Figura 10 - Série temporal da variável climática precipitação (Prec, em milímetros mm) expresso mensalmente durante o período de março de 2002 a março de 2022 na região Centro-Sul do país.	23
Figura 11 - Série temporal do índice NDVI (medido através do nível de reflectância) expresso mensalmente durante de março de março de 2002 a março de 2022 na região Centro-Sul do país.	24
Figura 12 - MEI (x) expresso na Temperatura Mínima (y) da região Centro-Sul, em um tempo antes de t (representado na parte esquerda do gráfico). As linhas tracejadas azuis representam o intervalo de confiança de 95%. Os valores de correlação que ultrapassam estes intervalos são considerados significativos. Como os intervalos são mensais, cada lag corresponde a um mês.	25
Figura 13 - Correlação vista através de uma regressão linear para a temperatura mínima em função do ENSO, através do índice MEI, com o ajuste de lag de um mês em vermelho, e sem o ajuste de lag em preto, junto da distribuição dos pontos ao fundo.	25
Figura 14 - MEI (x) expresso na Precipitação (y) do estado do Paraná, em um tempo antes de t (representado na parte esquerda do gráfico). As linhas tracejadas azuis representam o intervalo de confiança de 95%. Os valores de correlação que ultrapassam estes intervalos são considerados significativos. Como os intervalos são mensais, cada lag corresponde a um mês.	26
Figura 15 - MEI (x) expresso no Índice NDVI (y) do estado de Goiás, em um tempo antes de t (representado na parte esquerda do gráfico). As linhas tracejadas azuis representam o intervalo	

de confiança de 95%. Os valores de correlação que ultrapassam estes intervalos são considerados significativos. Como os intervalos são mensais, cada lag corresponde a um mês.

.....	27
Figura 16 - Série temporal do rendimento de campo TCH (toneladas de cana por hectare) expresso mensalmente durante o período de abril de 2008 a março de 2022 na região Centro-Sul do país, totalizando 14 safras (ano-safra).....	29
Figura 17 - MEI (x) expresso no TCH (y) na região do Centro-Sul, em um tempo antes de t (representado na parte esquerda do gráfico). As linhas tracejadas azuis representam o intervalo de confiança de 95%. Os valores de correlação que ultrapassam intervalos são considerados significativos. Como os intervalos são mensais, cada lag corresponde a um mês.	30
Figura 18 - Correlação vista através de uma regressão linear para o TCH em função do ENSO, através do índice MEI, com o ajuste de lag de três meses em vermelho, e sem o ajuste de lag em preto, junto da distribuição dos pontos ao fundo.	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Correlações cruzadas entre o ENSO junto das anomalias de TSM nas regiões de Niño com as variáveis climáticas Tmax, Tmin, Prec, Preccum e NDVI no Centro-Sul, e em seus estados separadamente.	28
Tabela 2 - Correlações cruzadas entre a produtividade de cana (TCH) e ENSO + Anomalias TSM nas regiões de Niño.	31

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
2. OBJETIVOS.....	11
2.1 Objetivo geral.....	11
2.2 Objetivos específicos.....	11
3. REFERÊNCIAL TEÓRICO.....	12
4. MATERIAL E MÉTODOS	14
4.1 Obtenção dos dados.....	14
4.2 Análise dos dados.....	17
5. RESULTADOS	20
6. DISCUSSÃO.....	34
7. CONCLUSÃO.....	37

1. INTRODUÇÃO

Importante fonte natural e acessível de energia para as pessoas, seja na forma de alimento, combustível ou até mesmo energia elétrica, a cana-de-açúcar é observada desde o período colonial no Brasil e a evolução da sua cultura foi capaz de mudar todo o cenário econômico do país (BAER, 1965). O Brasil é historicamente o maior produtor de açúcar no mundo e responsável por 49% da exportação mundial, e essa demanda tem disparado a produção e exportação da matéria-prima devido ao crescimento da população mundial e, também ao aumento de insumos em países em desenvolvimento (MARIN e NASSIF, 2013). Nas zonas subtropicais da região Centro-Sul é onde se encontram as principais usinas canavieiras do país, responsáveis por 93% da produção total, seguido das usinas nas zonas tropicais Norte-Nordeste com 7% da produção (RODRIGUES e ORTIZ, 2006). Outros países, caso de Índia, Tailândia e Austrália também são conhecidos como grandes produtores. Em países altamente dependentes de recursos naturais, como o Brasil, eventos climáticos extremos podem impactar toda uma economia e sociedade (THORNTON et al., 2009). Esses impactos sobre a agricultura são de total relevância para o país, visto que quase 30% do produto interno bruto brasileiro (PIB) está relacionado ao agronegócio (BARROS, 2009).

O ciclo da cana-de-açúcar dura em média um ano a 18 meses, ou seja, por dispor de um período mais longo de colheita comparado a outras culturas, como a de soja e milho, o seu desenvolvimento fica mais sujeito ainda às variações climáticas (CUNHA, 1999). Sabe-se que para um bom desempenho da cultura há necessidade de um período quente e úmido, com intensa radiação solar durante o seu crescimento, pois isso interfere diretamente no índice denominado NDVI, sendo ele basicamente uma medida do estado da saúde das plantas baseado em como ela reflete a luz em determinadas frequências (algumas ondas sendo absorvidas e outras refletidas), e de um período mais seco durante as suas fases de maturação e de colheita (ZULLO JÚNIOR et al., 2010).

A precipitação é um parâmetro climático bastante importante de ser analisado em regiões tropicais. Uma grande quantidade de umidade que vem da Região Amazônica pode ser canalizada pelos Andes formando corredores de umidade, também conhecido por Jatos de Baixos Níveis da América do Sul (JBNAS), que traz o ar úmido até o Centro e Sul do país, chegando até a Bacia do Prata, e conseqüentemente chuvas para as regiões (SILVA et al., 2009; SILVA e AMBRIZZI, 2006).

Uma contribuição para essas anomalias pode ser explicada pelo transporte de calor e umidade no oceano Atlântico Tropical (AT) através dos ventos alísios, que são causados pelo forte aquecimento e evaporação no interior da atmosfera em torno do equador.

Alguns estudos associam essa variabilidade interanual de precipitação com o fenômeno El Niño e Oscilação Sul – ENSO (KAYANO e MOURA, 1986; MARENGO, 1992; MARENGO et al., 2004). Fenômenos climáticos naturais resultantes das interações entre o oceano e a atmosfera, enquanto o El Niño consiste no aquecimento anormal do Oceano Pacífico Equatorial, que combinado com enfraquecimento dos ventos alísios na região provoca mudanças na circulação atmosférica, e a La Niña que é o oposto, provocando o resfriamento do Oceano Pacífico Equatorial, durante a sua atuação ocorre o fortalecimento da Alta Subtropical do Pacífico Sul transportando águas oceânicas superficiais mais fria para o Pacífico Equatorial Central-Oeste (OLIVEIRA, 2001).

Devido à alta extensão do Pacífico Equatorial esta é dividida em quatro regiões de Niño (Niño 1+2, Niño 3, Niño 3.4 e Niño 4), onde suas variações de temperatura de superfície do mar (TSM) tem diferentes influências nas condições climáticas (LOPES et al., 2007).

Portanto, anomalias positivas ou negativas da temperatura de superfície do mar no Oceano Pacífico associadas a episódios de El Niño ou La Niña produzem circulações atípicas de grande escala na atmosfera, gerando assim impactos significativos no clima da região do Oceano Atlântico e da América do Sul, inclusive no Brasil e suas regiões (ACEITUNO, 1988; GRIMM et al., 2000; GRIMM, 2003). Saber quando ocorrem estes eventos climáticos sobre as regiões de produção de cana é fundamental e cada vez mais os produtores procuram por serviços tecnológicos e especialistas, como desenvolvedores, meteorologistas, logísticos, para informações mais precisas e confiáveis.

Essas anomalias são capazes de mudar todo um contexto histórico do clima no Centro-Sul do país, como no aumento de temperatura, com períodos mais longos de déficit ou de superávit hídrico, devido as alterações na circulação atmosférica. Por exemplo, o resfriamento dos ventos/massas de ar que pode causar as geadas, um dos principais problemas enfrentados pelo produtor (FIORENTIN, 2016). Outras consequências nos canaviais causadas por anomalias climáticas são os problemas na irrigação do solo, alteração da incidência solar e consequentemente nos níveis de açúcar, afetando assim toda uma cadeia produtiva (CUNHA, 1999).

Posto todo bem econômico global que a cana tem, para se obter grandes produções e assim bons lucros, saber sobre esses efeitos climáticos e como podem inferir no preço da cana é de suma importância, visto que além da produção total adquirida, quanto mais concentrada de açúcar a cana for e mais saudável ela estiver, melhor também será o retorno financeiro. A hipótese do presente trabalho é de que os ciclos de El Niño e La Niña têm uma influência direta no clima da região Centro-Sul do Brasil e consequentemente na produtividade da cana-de-

açúcar. E que essas consequências podem acarretar todo o papel que a cana tem no setor alimentício como também no mercado que são de grandes interesses econômico.

A confirmação da hipótese pode auxiliar na redução dos riscos associados à produtividade da cana-de-açúcar na principal região do país, e quando for o caso, também aproveitar o uso de condições climáticas favoráveis no cultivo, pois haverá um aumento da previsibilidade dos impactos que os eventos atmosféricos citados causam nos parâmetros atmosféricos relevantes para o cultivo da cana-de-açúcar.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desse trabalho é avaliar o impacto das variações meteorológicas em grande escala na produtividade da cana-de-açúcar, sendo ela de forma direta ou indireta.

Em vista disso, deseja-se buscar correlações dos fenômenos de El Niño e La Niña com a variação de parâmetros atmosféricos na região Centro-Sul do Brasil, como na temperatura, taxa de precipitação e do índice NDVI.

2.2 Objetivos específicos

Assim, o presente projeto apresenta os seguintes objetivos específicos:

1. Obtenção da série histórica dos eventos de El Niño e La Niña através do índice MEI e das anomalias de temperatura de superfície do mar (TSM) nas regiões de Niño (Niño 1+2, Niño 3, Niño 3.4 e Niño 4), separadamente. No período de janeiro/2002 a março/2022, totalizando séries de 20 anos e 3 meses.
2. Obtenção dos dados de temperatura, precipitação e NDVI da região do Centro-Sul e, também de seus estados separadamente (Paraná, São Paulo, Mato Grosso do Sul, Goiás e Minas Gerais). No período de janeiro/2002 a março/2022, totalizando séries de 20 anos e 3 meses.
3. Calcular a correlação cruzada destes grandes eventos com os dados meteorológicos acima (objetivo 2).
4. Em caso de correlação estatisticamente significativa com as variáveis climáticas, saber como isso influencia na produtividade da cana-de-açúcar, através da variável TCH (tonelada de cana por hectare), também chamada de *yield* (rendimento de campo). No período de abril/2008 a março/2022 (ano-safra), totalizando uma série de 14 safras. O ano-safra na região do Centro-Sul é de abril a março.

3. REFERÊNCIAL TEÓRICO

As usinas sucroenergéticas da região Centro-Sul do país na safra de 2007/08 processaram 493,4 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, produzindo 30,8 milhões de toneladas de açúcar e 22,5 bilhões de litros de etanol (UNICA, 2008). O estado de São Paulo foi o principal produtor da matéria-prima, concentrando 67,6% da área total disponível para colheita na região. Um dos principais fatores que influencia esta expansão da cana na região é o aumento da venda de veículos nos últimos anos, com isso aumentou a demanda do biocombustível etanol (SILVA et al., 2009).

Projeções de mudança climática sobre usinas canavieiras indicam alterações como na umidade do solo, por períodos mais longos de alta temperatura, também inundações e secas em muitas localidades (ALEXANDROV e HOOGENBOOM, 2000). O aumento de temperatura e principalmente na concentração de CO₂ são vistos como benéficos para a cultura de cana-de-açúcar pois apresentam elevação em sua produtividade, aumentando a eficiência do uso da água pela planta, o aumento da produção de biomassa e consequentemente um aumento na superfície de transpiração (MARIN e NASSIF, 2013). Então, é provável que mudanças climáticas resultem em alterações no sistema de manejo da cultura, uma vez que plantas daninhas, pragas e doenças também serão beneficiadas, alterando os estágios e taxas de desenvolvimento do patógeno, e modificando a resistência do hospedeiro (FUHRER, 2003).

O comportamento da temperatura de superfície do mar (TSM) no Oceano Pacífico tropical (localizado na parte central do oceano junto à costa oeste da América do Sul) está associado aos campos de pressão representados pelo Índice de Oscilação do Sul (IOS), no qual é capaz de alterar o padrão de circulação da atmosfera (ACEITUNO, 1988; GRIMM et al., 2000). O fenômeno ENSO, também representado pelo índice MEI, é reconhecido por eventos de longo termo (6 a 18 meses) sendo responsável pelas chamadas anomalias climáticas persistentes que são capazes de alterar o clima global, inclusive outros oceanos (CUNHA, 1999). O evento possui duas fases - uma quente (El Niño) e outra fria (La Niña).

Devido à alta extensão do oceano Pacífico, este é dividido em quatro regiões correspondente aos eventos de Niño: Niño 1+2 (0-10S, 90W-80W) - menor e mais oriental das regiões, correspondente a parte costeira da América do Sul, onde o El Niño foi reconhecido pela primeira vez através da população local e tende apresentar maior oscilação entre os índices; Niño 3 (5N-5S, 150W-90W) - a região já foi ponto-chave para identificar e prever eventos de El Niño, porém mais tarde pesquisadores identificaram que essas interações entre oceano e

atmosfera acopladas ao ENSO ficam mais a oeste e consequentemente, a região de Niño 3.4 (5N-5S, 170W-120W) se torna a favorita para definir estes grandes eventos, considerada como representante das anomalias de TSM equatoriais; e por último, a região Niño 4 (5N-5S) (160E-150W) - o índice captura com mais eficiência as anomalias de TSM no pacífico equatorial central e oeste. Haja vista toda a influência destas anomalias de temperatura de superfície do mar nas condições climáticas da América do Sul e do Brasil, como nos estudos de (LOPES et al., 2007), (COELHO & AMBRIZZI, 2000) e (SOUZA, 2021)

A precipitação é um fator bastante importante em todo ciclo fenológico da cana-de-açúcar, dado que em sua fase de maturação a planta exige por temperaturas abaixo de 20°C e períodos de déficit hídrico para que haja repouso fisiológico e acúmulo de sacarose em seus colmos (ANDRADE, 2006).

Índices de vegetação têm sido constantemente utilizados para monitorar a cobertura vegetal da Terra em escala global ou local, indicando assim o possível estado de saúde da planta e, também a extensão da janela de plantio (MIURA et al., 2001). Esses índices podem apresentar anomalias devido a reflectância sob determinadas condições climáticas. Baixos ou altos índices de NDVI podem ser explicados através da taxa fotossintética e da concentração de clorofila (ZHANG, 2019). O índice NDVI está relacionado com as características fisiológicas da planta e estas são expressivamente afetadas em condições de déficit ou superávit hídrico. A distribuição e espaçamento foliar, conteúdo relativo de água, teor de pigmentos e o grau de estresses ambientais são fatores que modificam a refletância da planta (BARET e GUYOT, 1991).

Uma série temporal pode estar relacionada a outra em diferentes lapsos de tempo, identificando assim fatores exógenos ou preditores que possam explicar a variação da série ao longo do tempo, e para isso a medição é feita através da análise de correlação-cruzada (CCF). A significância da função CCF é dada basicamente como o coeficiente de correlação de Pearson, porém agora considerando uma defasagem h .

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Obtenção dos dados

Os dados do Índice Multivariado do El Niño Oscilação Sul (MEI) que correspondem as fases do ENSO em regiões de latitudes baixas, foram obtidos através do Physical Sciences Laboratory da NOAA (<https://psl.noaa.gov/enso/mei/>), onde todas as variáveis são interpoladas em uma grade comum de latitude-longitude de 2.5°. O índice MEI (*Multivariate ENSO Index*) combina 5 variáveis oceânicas e atmosféricas, sendo elas: pressão ao nível do mar, as componentes zonal e meridional do vento em superfície, a temperatura da superfície do mar, a temperatura do ar em superfície e um indicador de nebulosidade sobre a bacia tropical do Pacífico (de coordenadas 30°S-30°N e 100°E-70°W). O MEI é calculado separadamente para cada um dos doze meses do ano, e expresso em médias bimestrais, i.e., (dezembro-janeiro, janeiro-fevereiro, fevereiro-março até novembro-dezembro) a fim de reduzir a maior frequência dessas variabilidades intrassazonais.

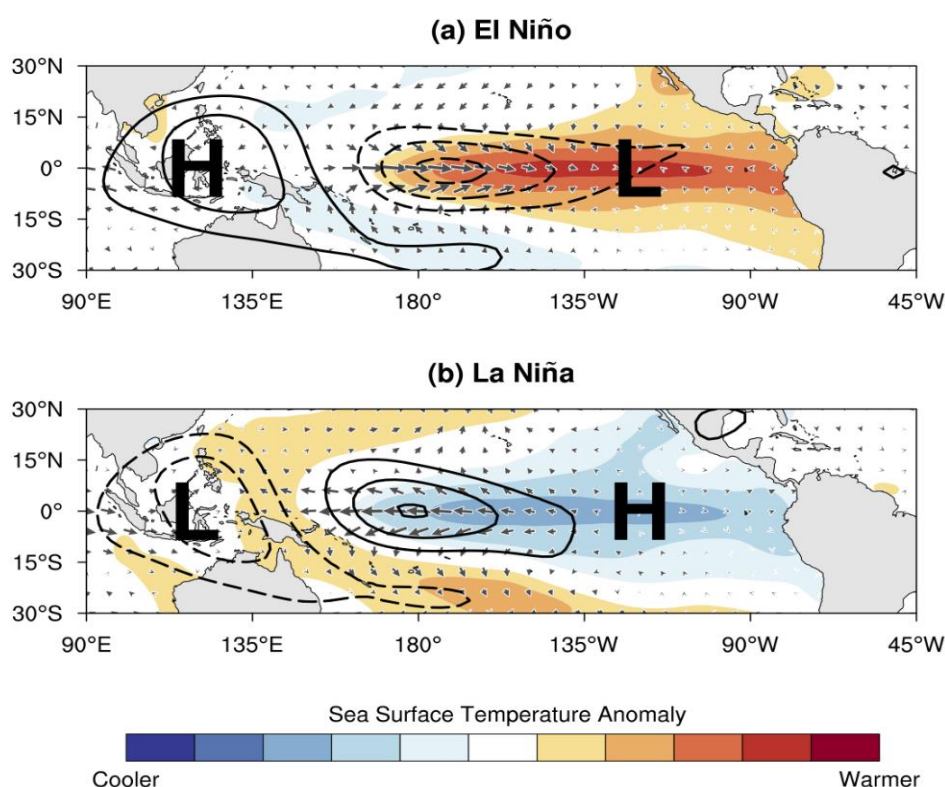


Figura 1 - Anomalias da temperatura de superfície do mar em eventos de El Niño (figura superior, com baixa pressão nível do mar na região em tracejado) e La Niña (figura inferior, com alta pressão nível do

mar na região em linha cheia). Os tons avermelhados indicando regiões com temperaturas acima da média e os tons mais azulados regiões com temperaturas abaixo da média. FONTE: NOAA, Climate Prediction Center.

Anomalias de TSM (temperatura de superfície do mar) das regiões de Niño (Figura 2), Niño 1+2 (0° - 10° S, 90° W- 80° W), Niño 3 (5° N- 5° S, 150° W- 90° W), Niño 3.4 (5° N- 5° S, 170° W- 120° W) e, Niño 4 (5° N- 5° S) (160° E- 150° W) também foram obtidos no site da NOAA (<https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/>), onde são dados mensalmente e também foram testados para a confirmação de nossas hipóteses.

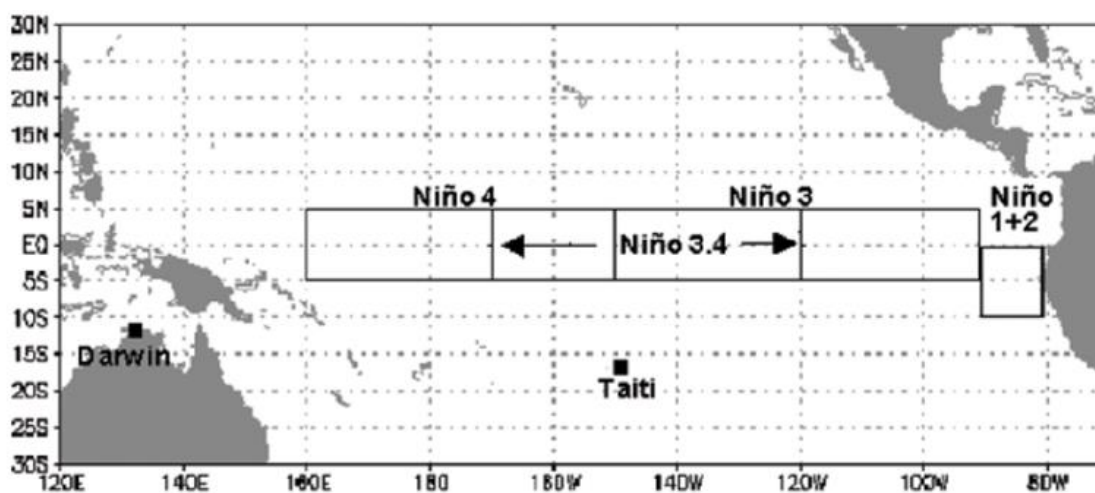


Figura 2 - Regiões de Niño vistas separadamente ao longo do Oceano Pacífico. Fonte: (SILVA, 2015)

Dados de temperatura (máxima e mínima), precipitação (diária e acumulada) e NDVI foram obtidos de forma privada através do pacote de tecnologia IBM Pairs Geoscope (<https://www.ibm.com/products/environmental-intelligence-suite/geospatial-analytics>), onde são dados diariamente. O pacote é um serviço de automação e inteligência artificial de sensoriamento remoto que coleta e utiliza dados de várias fontes, incluindo imagens hiperespectrais capturadas por satélites ou sistemas aéreos, drones, telefones celulares, mídias sociais, registros populacionais e boletins meteorológicos gerando insights de dados geoespaciais-temporais em minutos (CHATURVEDI, 2019). O pacote foi adquirido de forma privada, a fim de reduzir o tempo de retorno das análises, garantindo o melhor acesso aos dados geoespaciais.

Inicialmente, foram determinados diversos pontos ao longo da região Centro-Sul do país, principalmente nas áreas produtoras de cana, onde as suas coordenadas foram

transformadas em graus minutos e segundos e colocadas à automação. Esses pontos monitorados por satélites e afins, posteriormente foram transformados em dados e repassados ao programador. Foram disponibilizados dados diários a partir do ano 2002 até o presente momento.

As variações sazonais desses elementos climáticos e as suas relações eventos de El Niño e La Niña foram avaliados através de análises de séries temporais e correlações cruzadas. Estes grandes eventos apresentam correlações diretas/positivas em evento de El Niño e inversas/negativas em evento La Niña no clima do Brasil. Posteriormente, para a nossa aplicação, foram feitas novas análises de correlação cruzada junto aos dados de toneladas de cana por hectare (TCH), também chamado de rendimento de campo (*yield*) da cana-de-açúcar. O termo se refere a produtividade do canavial, e o seu cálculo é feito basicamente através da divisão de toneladas de cana moída pela área de cultivo. Alguns fatores prejudicam o plantio da cana, diminuindo assim o TCH, como o clima e o ambiente de produção, complementos nutricionais da planta. E estes fatores interferem no manejo adequado do solo, para o uso de fertilizantes, controle de pragas e plantas daninhas. Além destes controles diários, a adoção de serviços tecnológicos têm sido a principal solução encontrada pelos produtores para aumentar a produtividade da cana e garantir a qualidade no plantio.

Informações sobre a produtividade (TCH) da cana-de-açúcar no Centro-Sul do país foram obtidas através do Observatório de Cana (<https://observatoriodacana.com.br/>), um espaço dedicado à divulgação de dados, informações e estudos sobre o setor sucroenergético no Brasil. Grandes empresas do setor contribuem, como a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA), Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (Cepea - ESALQ/USP), Conselho de Produtores de Cana-de-açúcar, açúcar e etanol (CONSECANA-SP), entre outros. No site, são divulgados relatórios quinzenais com os números finais de TCH, produção total, moagem de cana, área de cultivo por hectare, além de outros detalhamentos. Para o presente estudo, os dados de TCH foram obtidos a partir da safra 2008-09, que se inicia em abril de 2008 e encerra em março de 2009, até a safra 2021-22. A Figura 3 apresenta a distribuição das usinas canavieiras ao longo do Brasil:

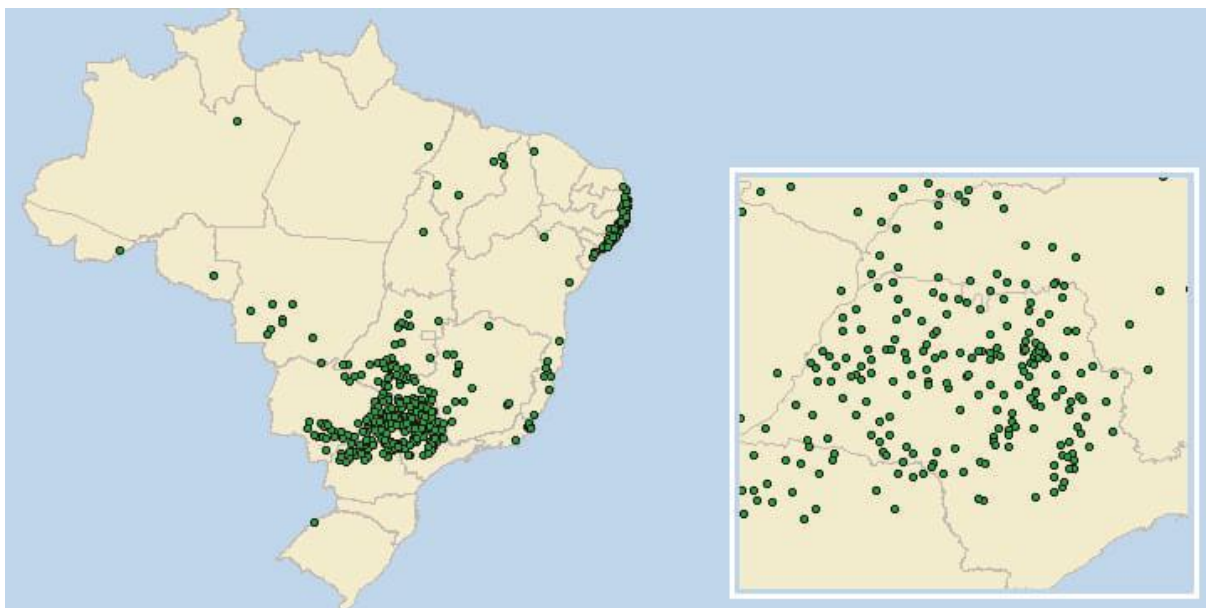


Figura 3 - Localização das usinas canaveiras no Brasil, com nítida concentração no Centro-Sul do país, principalmente no estado de São Paulo. FONTE: UDOP - União dos Produtores de Bioenergia.

4.2 Análise dos dados

Para a interpretação do MEI e das anomalias nas regiões de Niño, os valores positivos representam os meses que tiveram influência do fenômeno El Niño, período de aumento anômalo da temperatura da superfície do Oceano Pacífico Equatorial centro-leste, enquanto que, os negativos representam o fenômeno La Niña, com configuração oposta ao El Niño (WOLTER e TIMLIN, 2011). O período dos dados interpretados foi de janeiro de 2002 a março de 2022, totalizando séries de 20 anos e 3 meses.

A inclusão de mais variáveis no MEI em relação as anomalias de TSM nas regiões de Niño torna o índice menos suscetível a erros de instrumentação. Ao integrar a análise de componentes principais (PCA) utilizando a primeira componente principal (CP) não rotacionada de todos os cinco campos observados e combinados do índice, permite que o MEI varie com o ciclo sazonal (SOUZA, 2021).

Foi feito inicialmente uma média ponderada de todas as variáveis climáticas disponibilizadas pela IBM, visto que os dados são diários e apresentam oscilações. Os dados climáticos são referentes aos pontos de localização das principais usinas produtoras nos estados de São Paulo, Paraná, Mato Grosso do Sul, Goiás e Minas Gerais, que compõem o Centro-Sul do país (Figura 2). O período foi o mesmo que o MEI e das anomalias de regiões de Niño (janeiro de 2002 a março de 2022), totalizando séries de 20 anos e 3 meses.

Para as correlações cruzadas entre o TCH e o MEI também foi feita uma média bimestral da produtividade, ao contrário das correlações cruzadas com as anomalias de temperatura de superfície nas regiões de Niño que foi correlacionado mensalmente.

A análise de correlação cruzada mede a associação entre a variação da série temporal do MEI e das anomalias de TSM nas regiões de Niño com as séries temporais das variáveis climáticas temperatura máxima (*tmax*), temperatura mínima (*tmin*), NDVI, precipitação (*prec*), precipitação acumulada (*preccum*) e por fim, com a produtividade da cana-de-açúcar (TCH), considerando diferentes lapsos de tempo (ZUUR et al., 2007).

A função de correlação cruzada (*cross-correlation function* - CCF) é definida entre $y(t)$ e $x(t+h)$, onde h é um número inteiro. A função é utilizada para identificar sinais de curta duração inseridos em sinais mais longos. Ou seja, na relação entre duas séries temporais, uma delas pode estar relacionada com a outra em diferentes tempos. Portanto a função identifica as defasagens da variável com atrasos (*lags*) ou avanços (*leads*) que podem ser preditores úteis a série principal. Pela ordem dos dados que usamos, primeiro a identificação destes grandes eventos climáticos (El Niño e La Niña), depois a consequências nos parâmetros climáticos (temperatura, precipitação, NDVI) e na produtividade da cana TCH, consideramos então que o ENSO lidera (*leads*) a função.

Para h negativo dizemos então que “ x *leads* y ”, “ x lidera y ”. A correlação mostra a série $x(t)$, em um tempo antes de t , com a série $y(t)$ no tempo t . Normalmente a literatura só considera o h negativo, pois direciona o outro usando valores da variável x para predizer o futuro da variável y . Aqui a série y é adiantada em relação à x , cortando o último valor de x para que as séries terminem no mesmo instante.

A CCF é definida basicamente como o coeficiente de correlação de Pearson, calculado pela razão entre a covariância de duas variáveis e o produto de seus desvios padrão, mas agora considerando uma defasagem (h):

$$\rho_{XY}(h) = \frac{cov(Xt, Yt + bh)}{\sqrt{var(Xt).var(Yt + h)}}$$

O coeficiente de correlação de Pearson (geralmente chamado de R , r ou ρ) é um teste que mede a relação estatística entre duas variáveis contínuas. A covariância mede a relação linear entre duas variáveis. Já o desvio padrão pode ser definido como a raiz quadrada da variância, medida estatística que indica o quão longe os valores se encontram do valor esperado, ou seja, basicamente um coeficiente de variação de dados que expressa o seu grau de dispersão.

Para as correlações serem estatisticamente significativas os valores tiveram que ultrapassar os intervalos de confiança de 95% em função do tamanho amostral da variável e do lag máximo indicado, que foram 12 meses. Um intervalo de confiança (IC) é um estimador que aponta o intervalo no qual o parâmetro se encontra em um determinado nível de probabilidade. O IC na função de correlação cruzada (CCF) é calculado com base nas amostras de covariância. Portanto, quando se considera uma probabilidade de 95% podemos afirmar que, em 95% dos experimentos realizados, o intervalo calculado incluiu o valor verdadeiro do parâmetro.

Todas as análises foram realizadas através dos programas computacionais R (R Development Core Team, 2010).

5. RESULTADOS

Inicialmente foram obtidas as séries históricas dos Eventos de El Niño e La Niña através do índice MEI e das anomalias de temperatura de superfície do mar (TSM) nas regiões de Niño (Niño 1+2, Niño 3, Niño 3.4 e Niño 4), no período de janeiro de 2002 a março de 2022, totalizando séries de 20 anos e 3 meses.

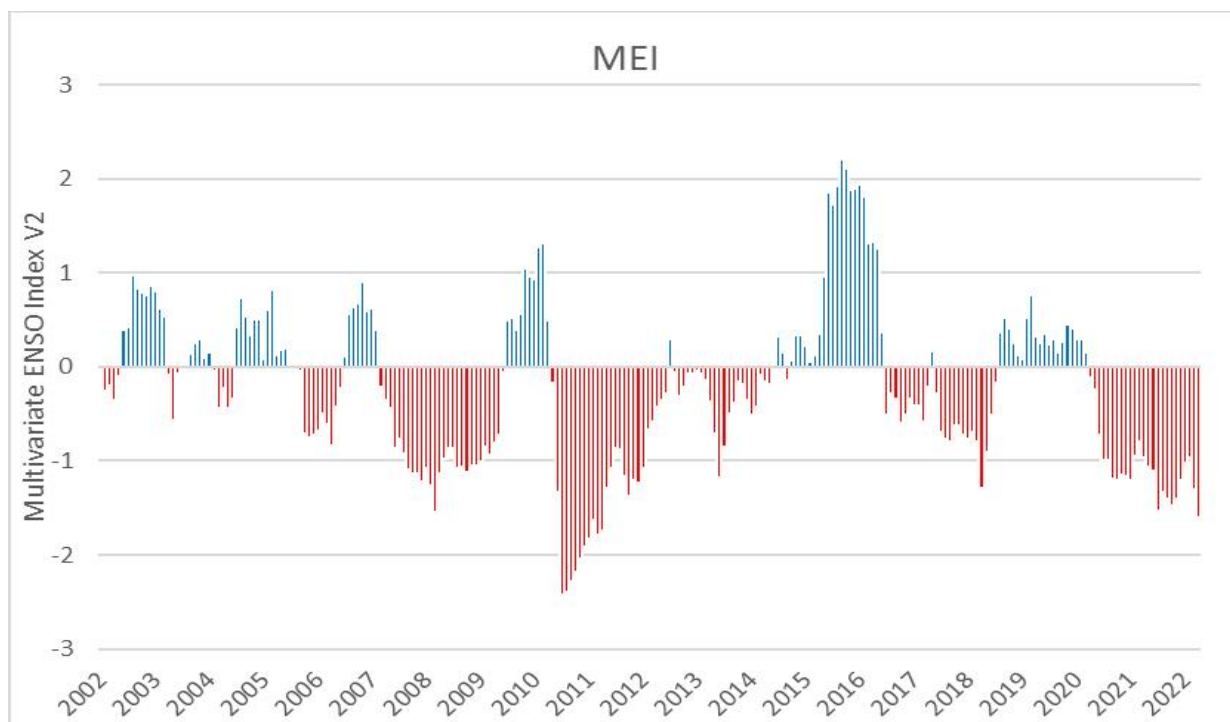


Figura 4 - Série temporal do MEI no período de janeiro de 2002 a março de 2022, em azul os eventos de El Niño e em vermelho os eventos La Niña ao decorrer dos anos.

Pelo fato dos dados do MEI serem expressos em médias bimestrais, os dados climáticos de temperatura, precipitação e NDVI para a região do Centro-Sul e seus estados (Paraná, São Paulo, Mato Grosso do Sul, Goiás e Minas Gerais) também foram agrupados em médias bimestrais para as análises de correlação cruzada entre as séries.

Para a série temporal do ENSO, o mês de agosto de 2010 foi o que apresentou a menor anomalia em evento de La Niña no Oceano Pacífico, com um valor MEI de -2,43. Já a anomalia máxima em evento de El Niño foi vista em setembro de 2015, no valor de 2,21.

Devido à grande extensão do Pacífico Equatorial e a influência das anomalias de temperatura de superfície do mar (TSM) nas condições climáticas, as séries temporais das anomalias de TSM nas regiões de Niño (Niño 1+2, Niño 3, Niño 3.4 e Niño 4) também foram

obtidas separadamente, no período de janeiro de 2002 a março de 2022, totalizando séries de 20 anos e 3 meses. Para as análises de correlação cruzada com os parâmetros climáticos, os dados foram tratados naturalmente, de forma mensal.

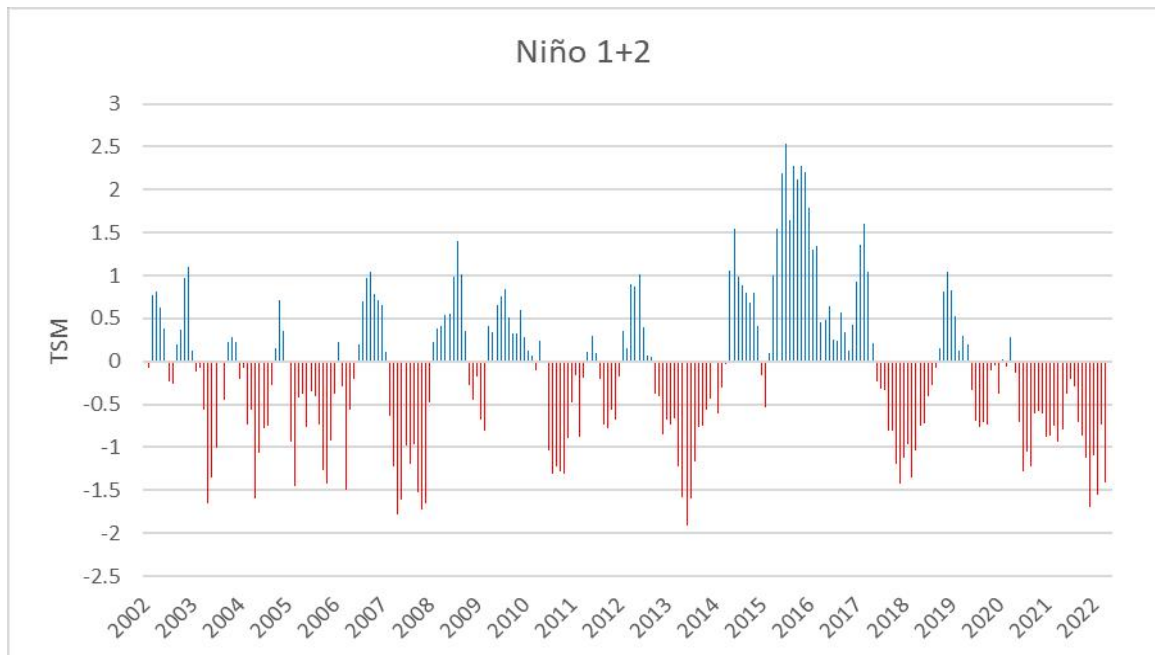


Figura 5 - Anomalias da temperatura de superfície do mar (TSM) na região de Niño 1+2, no período de janeiro de 2002 a março de 2022, em azul os eventos de El Niño e em vermelho os eventos La Niña ao decorrer dos anos.

A região Niño 1+2 que está mais próxima da América do Sul e do Brasil, teve a menor anomalia temperatura de superfície em La Niña em junho de 2013 ($-1,91^{\circ}\text{C}$) e a maior anomalia de temperatura em El Niño em julho de 2017 ($2,54^{\circ}\text{C}$). Contudo, segundo LOPES et al. (2007) foram as regiões de Niño 3 e Niño 3.4 que apresentaram maiores correlações significativas com as variáveis climática no Brasil e suas regiões, como por exemplo, na temperatura e precipitação do estado do Rio Grande do Sul.

Para a região de Niño 3 a menor anomalia de TSM em La Niña foi vista em dezembro de 2007 ($-1,66^{\circ}\text{C}$), e a maior anomalia de temperatura em El Niño em dezembro de 2015 ($2,84^{\circ}\text{C}$). Na presente região já é possível ver menos oscilações de TSM comparada a região 1+2.

A região Niño 3.4 é a região mais centralizada do Pacífico, e consequentemente a que apresenta menos oscilações (mais estável). A região é ponto-chave para entender o que acontece no oceano Pacífico, junto da ocorrência destes grandes eventos. A menor anomalia de TSM

vista na região foi em dezembro de 2010 ($-1,69^{\circ}\text{C}$), e a maior anomalia em evento de El Niño em novembro de 2015 ($2,72^{\circ}\text{C}$).

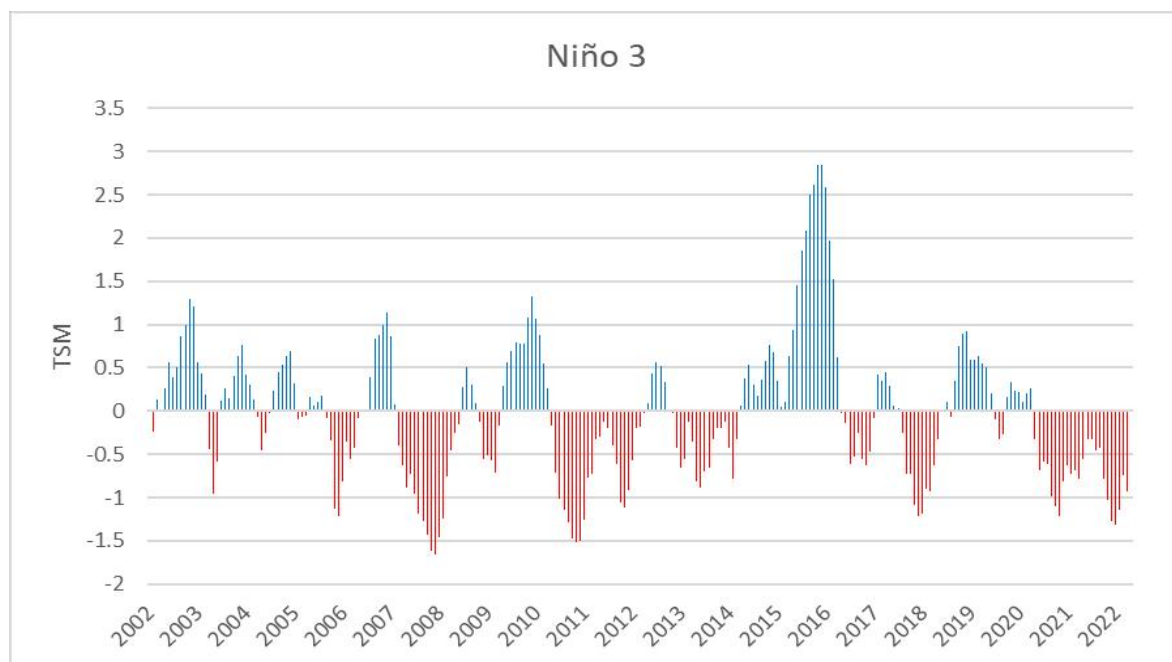


Figura 6 - Anomalias da temperatura de superfície do mar (TSM) na região de Niño 3, no período de janeiro de 2002 a março de 2022, em azul os eventos de El Niño e em vermelho os eventos La Niña ao decorrer dos anos.

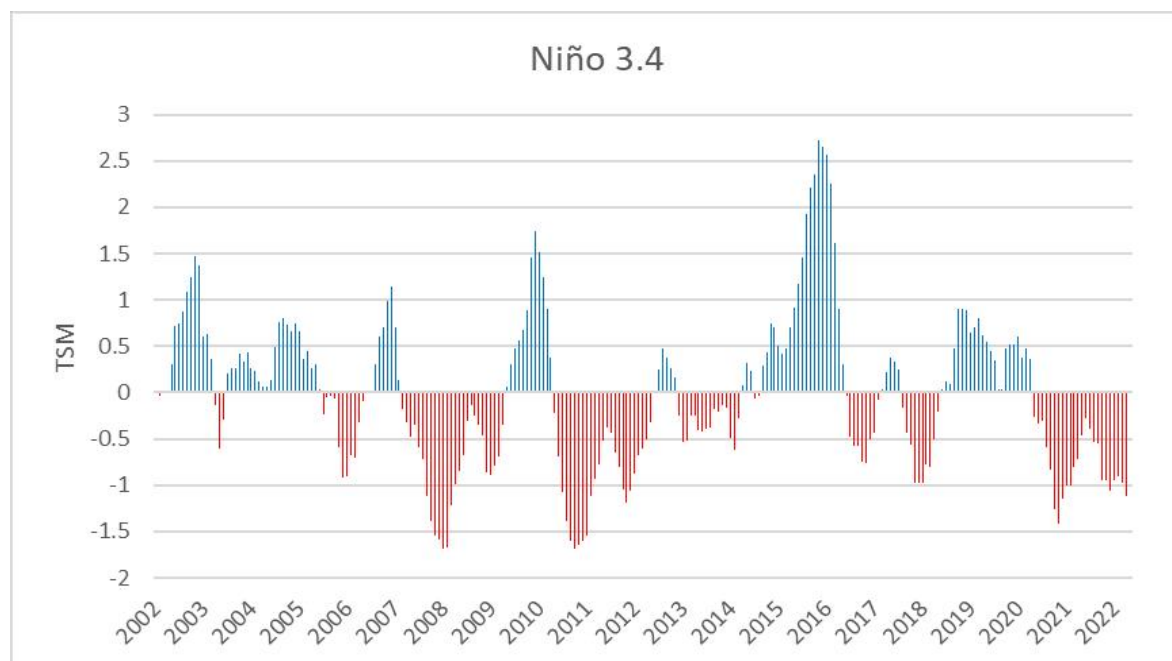


Figura 7 - Anomalias da temperatura de superfície do mar (TSM) na região de Niño 3.4, no período de janeiro de 2002 a março de 2022, em azul os eventos de El Niño e em vermelho os eventos La Niña ao decorrer dos anos.

Também foi obtida a série temporal da região Niño 4, região mais oeste à América do Sul e do Brasil.

Séries temporais das variáveis climáticas do Centro-Sul e, também dos estados de São Paulo, Paraná, Mato Grosso do Sul, Goiás e Minas Gerais foram obtidos separadamente no período de janeiro de 2002 a março de 2022, totalizando séries de 20 anos e 3 meses. Os dados climáticos são referentes as regiões dos pontos destacados na (Figura 2) onde ficam localizadas as usinas canavieiras, e foram agrupados de forma mensal para as correlações com as regiões de Niño e bimestral para as correlações com o MEI.

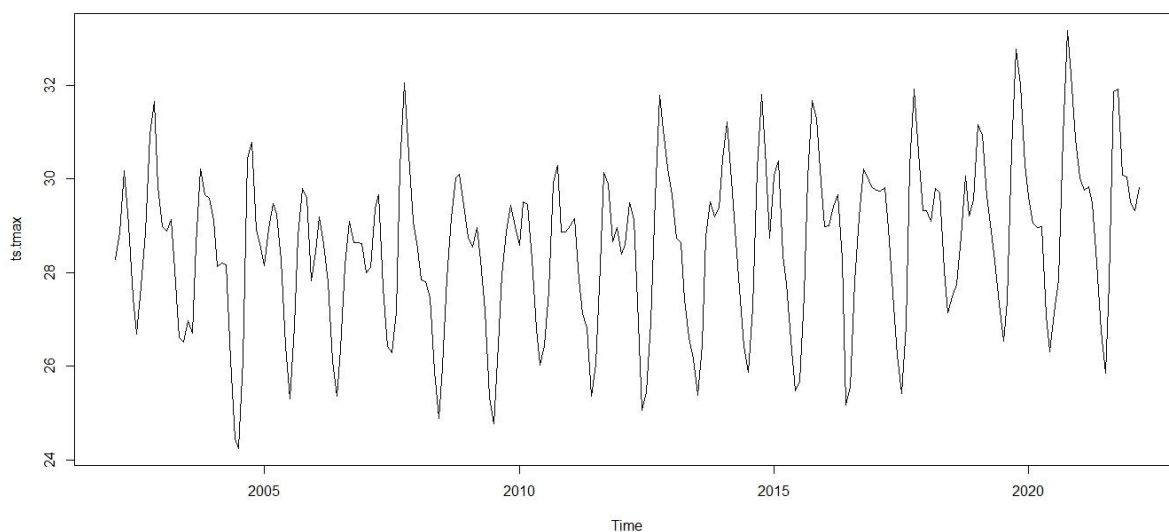


Figura 8 - Série temporal da variável climática temperatura máxima (Tmax, em °C) expresso mensalmente durante o período de março de 2002 a março de 2022 na região Centro-Sul do país.

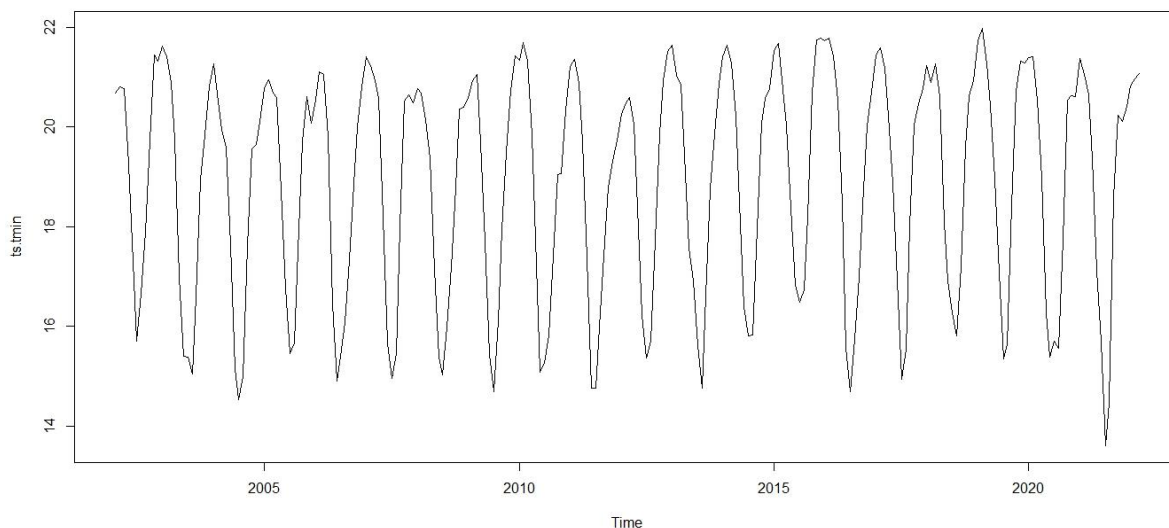


Figura 9 - Série temporal da variável climática temperatura mínima (Tmin, em °C) expresso mensalmente durante o período de março de 2002 a março de 2022 na região Centro-Sul do país.

O mês que apresentou as maiores temperaturas máximas foi o mês de outubro, principalmente no ano de 2020, onde atingiu a sua máxima (média 33,16° C), já as menores temperaturas mínimas foram registradas no mês de julho de 2021 (média 13,61° C).

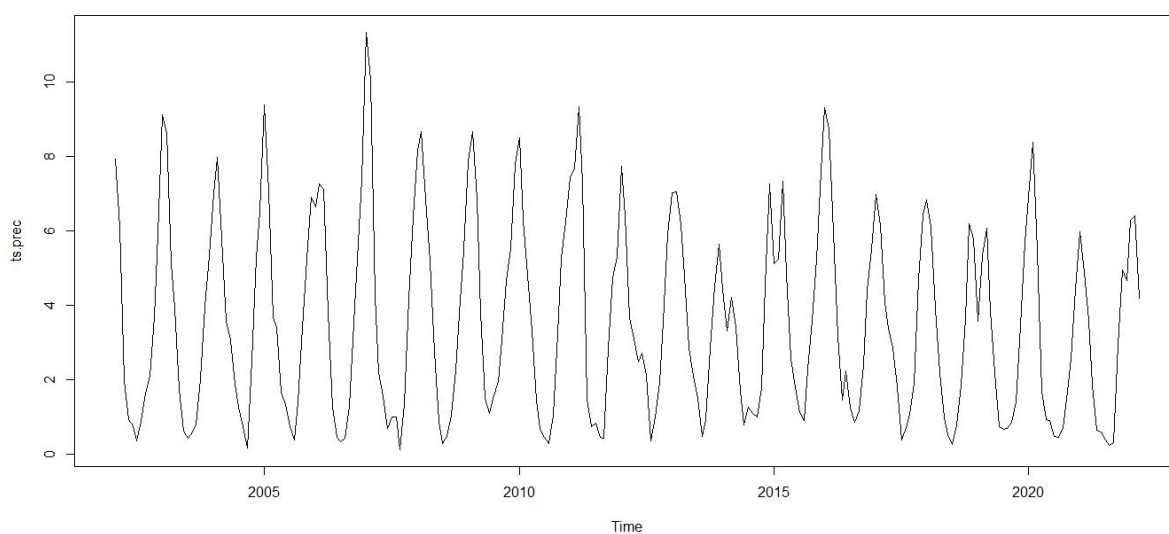


Figura 10 - Série temporal da variável climática precipitação (Prec, em milímetros mm) expresso mensalmente durante o período de março de 2002 a março de 2022 na região Centro-Sul do país.

Para as chuvas, os maiores níveis de precipitação foram vistos no mês de janeiro de 2007, com uma média de 11,32 milímetros, e o mês com menos chuva, em setembro de 2007, média de 0,12 mm. Já para precipitação acumulada, pelo fato de os dados serem acumulados

diariamente, consequentemente o último mês do ano (dezembro) acaba sendo o mês de maior registro, porém, vendo anualmente o ano de 2009 foi o que teve maior registro de precipitação acumulada (média de 1.418 mm) e o ano de 2021 o menor registro (762 mm). Para o índice NDVI, índice de suma importância para a produtividade da cana, apresentou seu maior registro no mês de março de 2022 (0,758). Já os piores índices de NDVI foram vistos nos meses de setembro (0,38) e outubro (0,40) do ano de 2021, período em que curiosamente ocorria o evento de La Niña mais intensa, e com o registro de fortes geadas sobre a região, afetando toda a cadeia produtiva da cana.

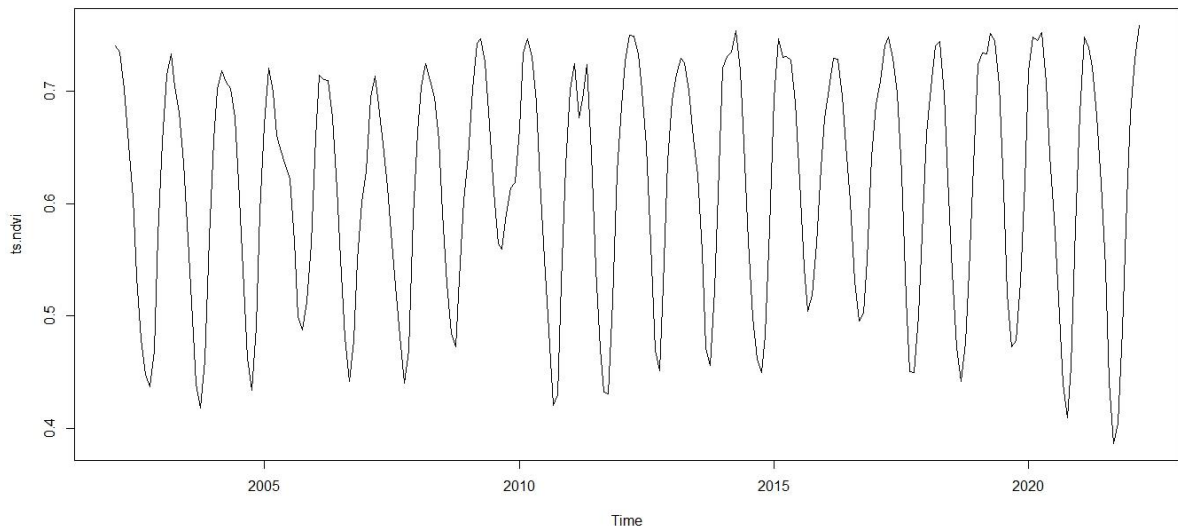


Figura 11 - Série temporal do índice NDVI (medido através do nível de reflectância) expresso mensalmente durante de março de 2002 a março de 2022 na região Centro-Sul do país.

Conforme visto nos gráficos, é possível ver uma sazonalidade interanual entre as variáveis climáticas, porém, pelo tempo limitado de desenvolvimento do projeto foi optado por aceitar o dado puro com toda sua variabilidade, a fim de ver correlações positivas e negativas mesmo que ainda baixas.

Foram testadas várias correlações cruzadas. No Centro-Sul a variável climática que teve correlação direta com o evento de El Niño através do índice MEI foi a **temperatura mínima** (Tmin), no valor de 0,138 com lag de um mês. E esta correlação direta (positiva) da Tmin com El Niño também pode ser vista nos estados do Paraná (0,127), Goiás (0,136), São Paulo (0,137), Mato Grosso do Sul (0,140) e Minas Gerais (0,144), em ordem crescente e todas com lag de um mês. Foram relações estatisticamente fracas (entre 0,1), porém ainda significativas de acordo com a função CCF do R e seu intervalo de confiança de 95%, ou seja, assumimos a

probabilidade de 95% dos fatos realmente ocorrerem. A Figura 12 apresenta a correlação entre o MEI e a temperatura Mínima no Centro-Sul:

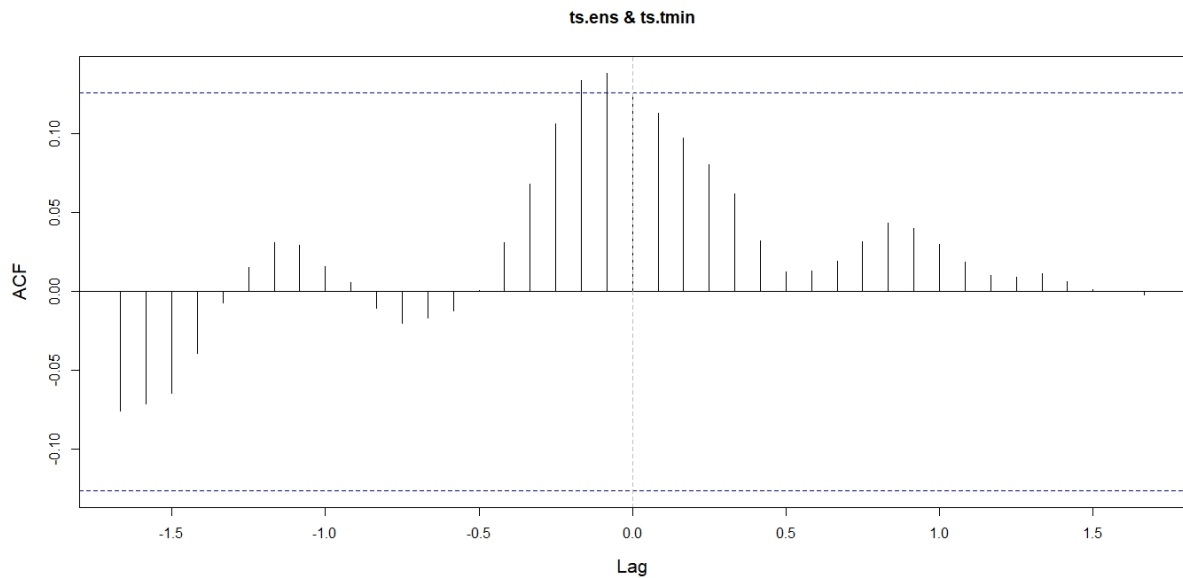


Figura 12 - MEI (x) expresso na Temperatura Mínima (y) da região Centro-Sul, em um tempo antes de t (representado na parte esquerda do gráfico). As linhas tracejadas azuis representam o intervalo de confiança de 95%. Os valores de correlação que ultrapassam estes intervalos são considerados significativos. Como os intervalos são mensais, cada lag corresponde a um mês.

Apesar da tendência anual das variáveis climáticas, ainda se pode ver uma reta (linearidade) mesmo com os pontos dispersos, como mostra o gráfico abaixo para temperatura mínima em função do ENSO:

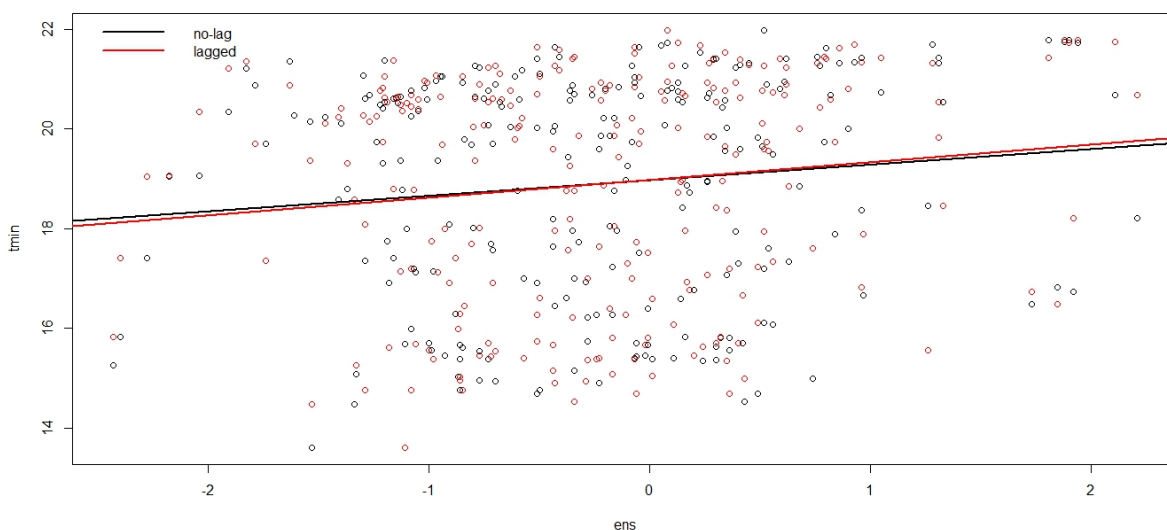


Figura 13 - Correlação vista através de uma regressão linear para a temperatura mínima em função do ENSO, através do índice MEI, com o ajuste de lag de um mês em vermelho, e sem o ajuste de lag em preto, junto da distribuição dos pontos ao fundo.

Ajustando esses valores com lag de 1 mês em uma regressão linear, p.ex., os valores de correlação de Pearson (ρ) também se tornam significativos ($< 0,05$) entre a temperatura mínima e o ENSO na região do Centro-Sul, com valor de $\rho = 0,03549$.

A temperatura mínima também teve correlação direta nas Regiões de Niño 3 e Niño 3.4. Na região de Niño 3 teve correlação em evento de El Niño com a região do Centro-Sul (0,130), estado de São Paulo (0,123), estado de Goiás (0,135) e o estado de Minas Gerais (0,134), todos com lag de três meses. E na região 3.4 também correlação com o estado de Goiás (0,130) e o estado de Minas Gerais (0,129), ambos com lag de três meses.

Além das correlações com as temperaturas mínimas, também puderam ser vistas correlações diretas de evento El Niño através do MEI com a **precipitação** nos estados do Paraná (0,195) e Mato Grosso do Sul (0,147), com lag de um mês. A exemplo (Figura 14) a correlação entre o MEI e a precipitação no estado do Paraná. A correlação direta com a precipitação no estado do Paraná também pode ser vista nas anomalias de TSM das regiões de Niño 1+2 (0,159) com lag de dois meses, Niño 3 (0,172) com lag de um mês, Niño 3.4 (0,146) com lag de um mês. E no estado de Mato Grosso na região de Niño 1+2 (0,126) com lag de dois meses.

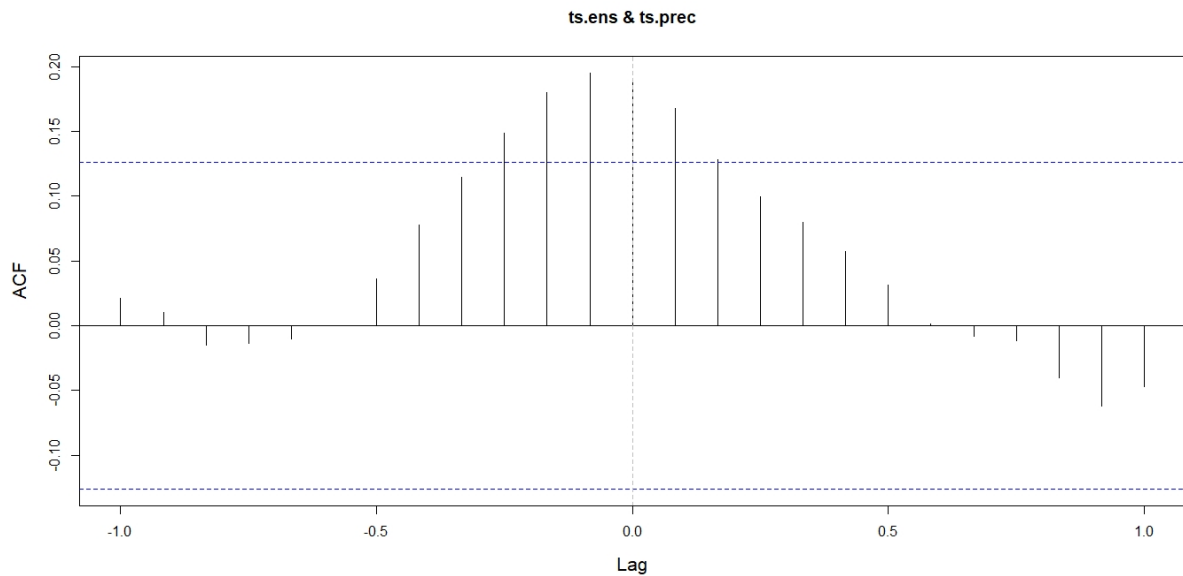


Figura 14 - MEI (x) expresso na Precipitação (y) do estado do Paraná, em um tempo antes de t (representado na parte esquerda do gráfico). As linhas tracejadas azuis representam o intervalo de confiança de 95%. Os valores de correlação que ultrapassam estes intervalos são considerados significativos. Como os intervalos são mensais, cada lag corresponde a um mês.

Por fim, pode ser visto uma correlação inversa (negativa) de La Niña através do MEI com o índice **NDVI** no estado de Goiás (-0,143) com lag de nove meses. Pelo fato de o estado também estar incluído no Centro-Oeste brasileiro, ele acaba tendo as suas particularidades em eventos de La Niña. E uma correlação direta da anomalia de TSM na região de Niño 1+2 com o NDVI do estado de Minas Gerais (0,143) em eventos de El Niño e com lag de três meses. Por ter sido somente o estado de Minas Gerais com essa relação, possivelmente também é o estado que mais sofre com essa relação inversa a evento de La Niña.

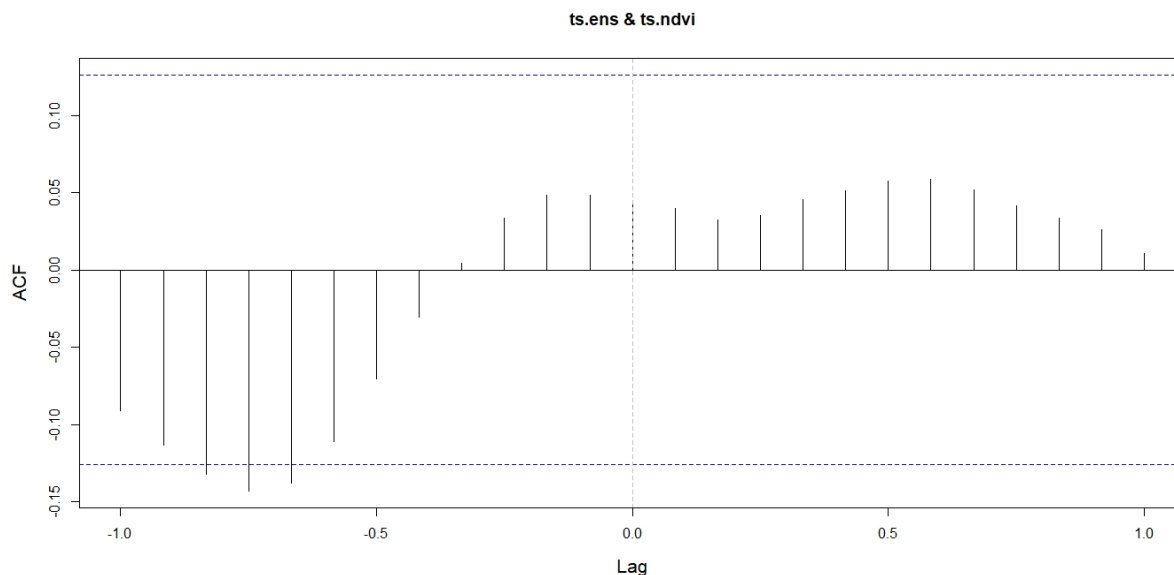


Figura 15 - MEI (x) expresso no Índice NDVI (y) do estado de Goiás, em um tempo antes de t (representado na parte esquerda do gráfico). As linhas tracejadas azuis representam o intervalo de confiança de 95%. Os valores de correlação que ultrapassam estes intervalos são considerados significativos. Como os intervalos são mensais, cada lag corresponde a um mês.

Todas as correlações podem ser vistas na (Tabela 1), totalizando 150 correlações, onde 21 foram estatisticamente significativas (de grau fraco), sendo 18 respostas diretas a evento de El Niño e 1 resposta inversa a evento de La Niña, e 129 não tiveram correlação estatisticamente significativa, representadas em valor vazio.

Tabela 1 - Correlações cruzadas entre o MEI junto das anomalias de TSM nas regiões de Niño com as variáveis climáticas Tmax, Tmin, Prec, Preccum e NDVI no Centro-Sul, e em seus estados separadamente.

	El Niño
	La Niña

		ENSO	LAG	NIÑO 1+2	LAG	NIÑO 3	LAG	NIÑO 3.4	LAG	NIÑO 4	LAG
Centro-sul	Tmax	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Tmin	0.138	1	-	-	0.130	3	-	-	-	-
	Prec	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Preccum	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	NDVI	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Paraná	Tmax	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Tmin	0.127	1	-	-	-	-	-	-	-	-
	Prec	0.195	1	0.159	2	0.172	1	0.146	1	-	-
	Preccum	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	NDVI	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
São Paulo	Tmax	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Tmin	0.137	1	-	-	0.123	3	-	-	-	-
	Prec	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Preccum	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	NDVI	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mato Grosso do Sul	Tmax	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Tmin	0.140	1	-	-	0.135	3	-	-	-	-
	Prec	0.147	1	0.126	2	-	-	-	-	-	-
	Preccum	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	NDVI	-	-	0.143	3	-	-	-	-	-	-
Goiás	Tmax	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Tmin	0.136	1	-	-	0.135	3	0.130	3	-	-
	Prec	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Preccum	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	NDVI	-0.143	9	-	-	-	-	-	-	-	-
Minas Gerais	Tmax	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Tmin	0.144	1	-	-	0.134	3	0.129	3	-	-
	Prec	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Preccum	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	NDVI	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

O índice que mais apresentou correlações estatisticamente significativa com a região do Centro-Sul e seus estados foi o MEI, com o total de 9 correlações (sendo 8 positivas e 1 negativa), seguido da região Niño 3 com 6 correlações positivas. Regiões de Niño 1+2 e Niño 3.4 com 3 correlações positivas. E a região 4 sem nenhuma correlação estatisticamente significativa.

De forma geral, as relações destes eventos com as variáveis climáticas na região do Centro-Sul e seus estados separadamente ainda foram baixas, mas são correlações estatisticamente significativas na função CCF, pois atravessam o intervalos de confiança.

Posteriormente, feito estas correlações cruzadas desses grandes eventos através do MEI e das TSM nas regiões de Niño com as variáveis climáticas no Centro-Sul do país e de seus estados separadamente, e vistas as suas correlações principais com a temperatura mínima do Centro-Sul, e com as precipitações nos estados do Paraná e Mato Grosso do Sul, também foi feita a série temporal para a produtividade da cana-de-açúcar através da variável TCH (*yield*)

para o Centro-Sul do Brasil a partir da safra de 2018-19 (que se inicia em abril de 2018 e vai até março de 2019), até o final da safra 2021-22, totalizando uma série de 14 safras.

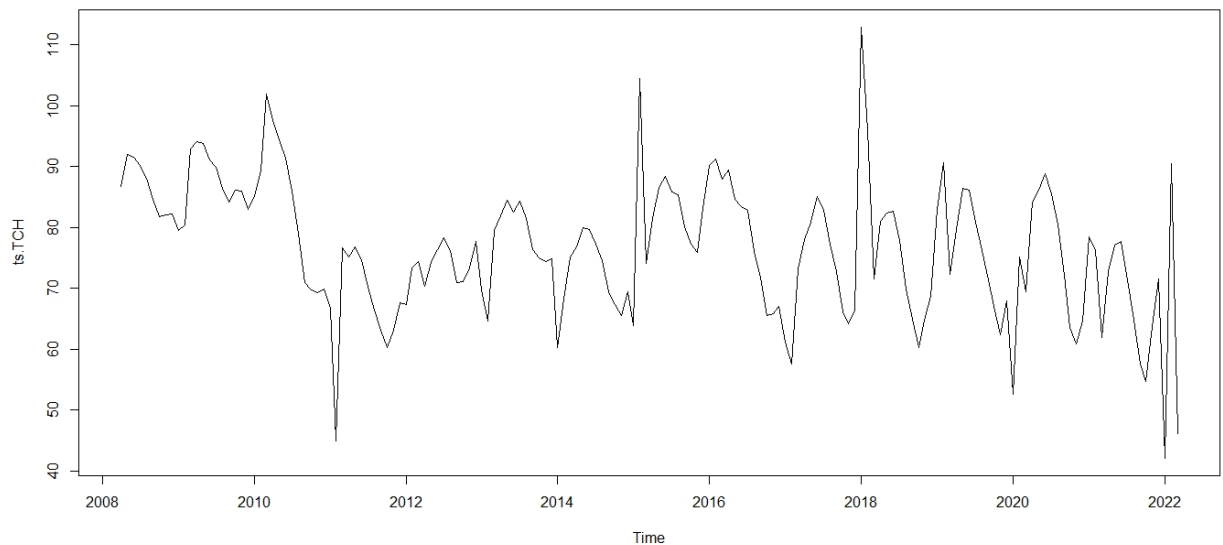


Figura 16 - Série temporal do rendimento de campo TCH (toneladas de cana por hectare) expresso mensalmente durante o período de abril de 2008 a março de 2022 na região Centro-Sul do país, totalizando 14 safras (ano-safra).

A produtividade da cana teve o seu maior registro no mês de janeiro de 2018 (112.903 toneladas por hectare), e melhores rendimentos nos anos de 2009 e 2010, e o pior rendimento de campo registrado no mês de janeiro de 2021/22 (42.1 toneladas por hectare), um ano que foi bem complicado para a cana, como o de 2011, devido a fortes geadas na região. Após a obtenção da série temporal para o TCH, foram feitas novas correlações cruzadas com o índice MEI e as anomalias de TSM nas regiões de Niño.

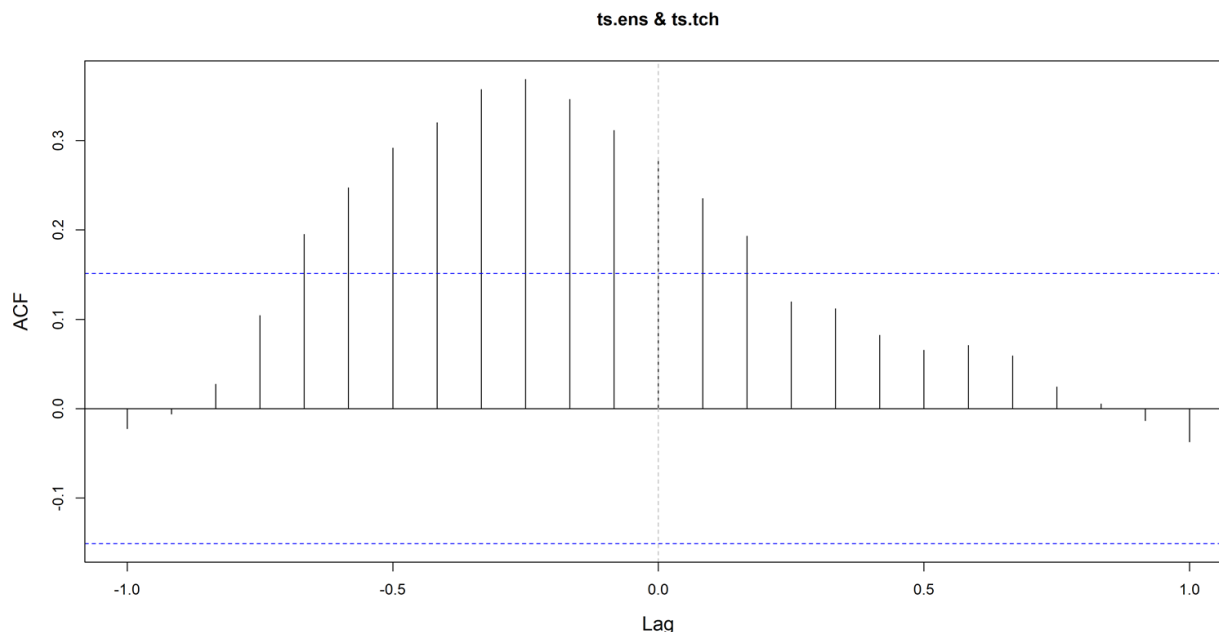


Figura 17 - MEI (x) expresso no TCH (y) na região do Centro-Sul, em um tempo antes de t (representado na parte esquerda do gráfico). As linhas tracejadas azuis representam o intervalo de confiança de 95%. Os valores de correlação que ultrapassam intervalos são considerados significativos. Como os intervalos são mensais, cada lag corresponde a um mês.

Ajustando esses valores com lag três meses em uma regressão linear, também notamos que os valores de correlação de Pearson (ρ) também se tornam significativos ($< 0,05$) entre o TCH e o ENSO na região do Centro-Sul, com valor de $\rho = 6,17 \times 10^{-7}$

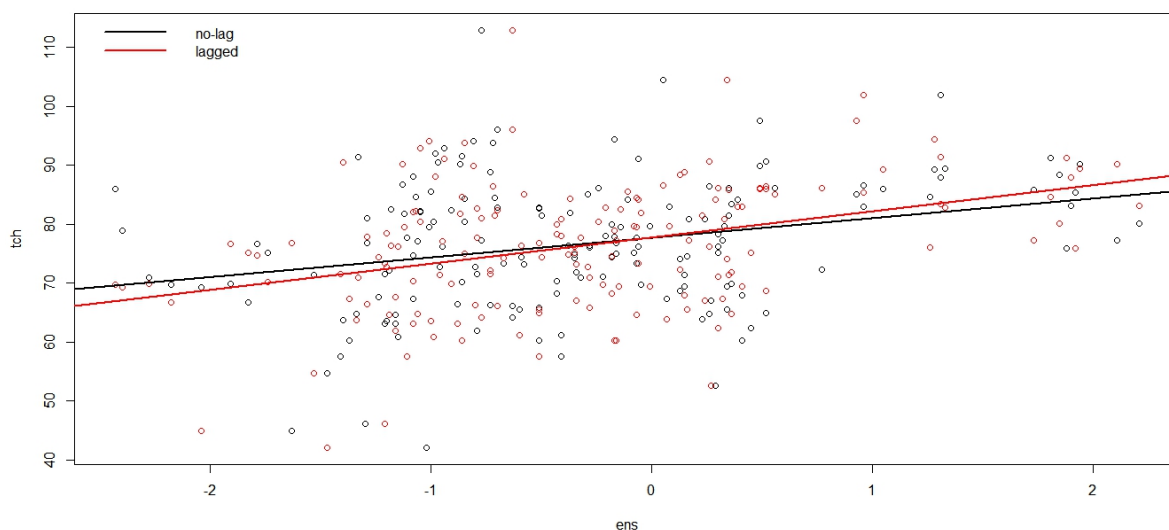


Figura 18 - Correlação vista através de uma regressão linear para o TCH em função do ENSO, através do índice MEI, com o ajuste de lag de três meses em vermelho, e sem o ajuste de lag em preto, junto da distribuição dos pontos ao fundo.

O MEI teve uma correlação positiva em evento de El Niño com o **TCH** do Centro-Sul do país (0,369) com um lag de três meses. O que prediz que a cana rende muito em eventos de El Niño, que normalmente são mais quentes e chuvosos na região do Centro-Sul do país. A correlação com o TCH também pode ser vista nas outras regiões de Niño (Tabela 2) principalmente em Niño 3.4 (0,397), Niño 3 (0,394) e até mesmo Niño 4 (0,319), todas com lag de três meses. Esse lag constante para todas as séries é algo interessante, pois condiz a presença de relações.

	ENSO	LAG	NIÑO 1+2	LAG	NIÑO 3	LAG	NIÑO 3.4	LAG	NIÑO 4	LAG
TCH	0.369	3	0.308	3	0.394	3	0.397	3	0.319	3

Nas correlações separadas, o **NDVI** foi o que teve maior correlação (0,526) com a produtividade da cana (**TCH**) com um lag de 2 meses, confirmando a importância do índice. Seguido da temperatura mínima (0,493) com um lag de 5 meses, temperatura máxima (-0,441) com um lag de 1 mês e respondendo inversamente e, da precipitação (0,417) com um lag de 5 meses.

6. DISCUSSÃO

Os resultados deste presente estudo mostraram que o índice MEI é mais estável do que as anomalias de temperatura da superfície do mar (TSM) nas regiões de Niño do Oceano Pacífico Equatorial, capturando com mais eficiência a sazonalidade destes grandes eventos e apresentando melhores relações com as condições climáticas da região Centro-Sul do Brasil. COELHO & AMBRIZZI (2000) através de técnicas estatísticas analisaram a influência da temperatura de superfície do mar (TSM) do pacífico equatorial sobre a precipitação na América do Sul e tiveram como resultado que a região de Niño 3, localizada mais ao centro do Pacífico, exerce maior influência sobre os padrões de precipitação na América do Sul. LOPES et al. (2007) aponta o MEI e as regiões de Niño 3 e Niño 3.4 como os maiores coeficientes de correlação com a precipitação do estado do Rio Grande do Sul. No geral, o índice Niño 3.4 apresenta médias contínuas de 5 meses e os eventos de El Niño e La Niña são definidos quando excedem a temperatura de $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$ em um período de seis meses ou mais, fazendo com que a região apresente menos oscilações (TRENBERTH e STEPANIAK, 2001), e isto possivelmente explica o motivo da região ser ponto-chave para prever estes eventos climáticos, apesar da sua significância também estar bem próxima a região de Niño 3. Na meteorologia, perturbações em um determinado ponto do planeta que surtem efeitos em regiões mais distantes são chamadas de “teleconexões atmosféricas” (ESCOBAR, 2020). Ou seja, a circulação atmosférica pode estar associada a uma área onde a TSM apresenta valores acima da média e alterar os padrões de precipitação, por exemplo. Portanto, uma bacia oceânica influencia a circulação atmosférica em região mais distante através do mecanismo de teleconexão, também chamado de conexão remota (DA SILVA et al., 2021). Uma contribuição para essa variabilidade interanual da precipitação é explicada através de Jatos de Baixos da América do Sul (JBNAS), produzindo processos de convecção, nuvens e chuvas, uma vez que os ventos são fracos e a movimentação do ar ocorre basicamente na vertical (TUCCI, 1997). No geral, a região amazônica apresenta grande variabilidade da precipitação devido a umidade presente, e está associada à influência de diferentes sistemas de meso-escala (Complexos Convectivos), escala sinótica (Alta da Bolívia), de grande escala (El Niño-Oscilação Sul) (DRUMOND e AMBRIZZI, 2003), Zona de Convergência do Atlântico Sul e Zona de Convergência Intertropical (SOUZA et al., 2000; MARENGO et al., 2001).

Grande parte da literatura, como (GONZALEZ, 2011; SANTOS e BUCHMANN, 2010; SILVA e BARBOSA, 2021) direcionaram seus estudos às regiões Norte/Nordeste e Sul do

Brasil, onde estes eventos de El Niño e La Niña são mais caracterizados e consequentemente mais precisos. Contudo, visto que 93% da produção sucroenergética do Brasil, maior produtor mundial, está concentrada na região Centro-Sul do país e o pouco que se encontra na literatura é a respeito de seus estados separadamente, como em São Paulo (SANCHES et al., 2019), Minas Gerais (ARANTES, 2019), o presente estudo se torna ainda mais relevante para entender sobre os riscos e as condições climáticas favoráveis no cultivo de cana-de-açúcar resultados destes grandes eventos, aumentando assim a previsibilidade das variáveis climáticas na principal região produtora.

Conforme visto nos resultados, principalmente eventos de El Niño atuam como intensificadores nas temperaturas mínimas atmosféricas da região Centro-Sul do Brasil e de todos os seus estados separadamente. Embora os estados do Paraná, Mato Grosso do Sul e Goiás ainda tenham as suas particularidades, principalmente nos níveis de precipitação e no índice NDVI.

A ocorrência dos eventos de La Niña (oposto ao El Niño) costuma provocar irregularidades e diminuição de chuvas na região Sul do país e no estado do Paraná consecutivamente, enquanto é esperado mais chuvas nas regiões Centro-Oeste e Nordeste do país (DE ÁVILA e PEZZI, 1999). Apesar do estado do Mato Grosso do Sul estar incluído no Centro-oeste brasileiro (junto dos estados de Mato Grosso e Goiás), a região de Dourados no sul do estado onde ficam localizadas as usinas canavieiras é considerada uma região de transição climatológica, seguindo padrões diferentes do esperado, como os padrões de La Niña para a região Sul do país (COMUNELLO et al., 2022). Os efeitos tendem a ser mais pronunciados na direção sul e perdem força à medida que avançam para o norte do estado.

Outro efeito de La Niña a ser destacado na região Centro-Sul do país como um todo, são os registros de invernos mais rigorosos, com menores temperaturas junto da ocorrência de geadas, impactando toda a atividade de produção da cana-de-açúcar, como também de outras culturas, como a do milho safrinha e, também a pecuária (COMUNELLO et al., 2022).

O índice NDVI, que corresponde de certa forma o quão saudável a cana-de-açúcar está, também responde a temperaturas mínimas mais elevadas, com ocorrência de precipitação na região, conforme visto nas correlações separadas, o que acaba sendo diferente para região Centro-oeste e principalmente no estado de Goiás, respondendo assim inversamente aos efeitos de La Niña com lag de nove meses, que podem ser mais chuvosos na região. Enquanto o estado de Minas Gerais possivelmente é o que mais sente os efeitos deste evento, respondendo assim diretamente a El Niño na região Niño 1+2 com lag de três meses. O índice é de suma importância para a planta, mas pode acabar sendo enviesado por diversos motivos, visto que a

sua medição é através da sua reflectância, portanto a presença de nuvens ou de um período mais longo de chuva na região podem interferir no valor do índice. AMARAL et al. (2012) cita que a altura dos colmos da cana-de-açúcar, por exemplo, faz o índice ser mais preciso.

Para a produtividade da cana (TCH), que está totalmente correlacionada com o índice NDVI e, também com os eventos de El Niño na região Centro-Sul, tanto para o MEI, como para as anomalias de TSM nas regiões de Niño (1+2, 3, 3.4 e 4) conforme apresentado na (Tabela 2) o clima tem sido fator principal e decisivo para as safras de cana-de-açúcar. A safra 2009/10 foi marcada por vários períodos de excedente hídrico, os quais estão associados a eventos de El Niño na região Centro-Sul, enquanto as safras 2011/12 e 2021/22 já apresentaram períodos de déficits hídricos mais prolongados associados a eventos de La Niña (CARDOZO e SENTELHAS, 2013). Cada um desses cenários trouxe consequências únicas para a produtividade e qualidade da cana-de-açúcar na região e provam o quanto as condições climáticas podem impactar o setor sucroenergético do país.

As correlações cruzadas do presente estudo mostraram níveis de significância ainda maiores entre os eventos de El Niño e La Niña e a produtividade da cana (TCH). O TCH mostrou ser uma combinação do efeito final de todos esses parâmetros climáticos (temperatura, precipitação, NDVI) da região Centro-Sul, o que possivelmente tornou a análise ainda mais significativa, devido ao conjunto de variáveis no índice de rendimento. Posto isto, é principalmente no TCH então que vai surtir estes efeitos, se vai chover ou esfriar, se há excedente ou déficit hídrico, pois é a decomposição de todos esses parâmetros refletido em uma exclusiva variável. Haja visto que as informações preditivas das análises mostraram ser úteis para prever eventos futuros entre as séries temporais.

Verifica-se, no entanto, que além do ENSO há também outros padrões de anomalias que interferem na variabilidade climática da América do Sul, como os Índices de Oscilação de Madden Julian (MJO); Oscilação Antártica, também chamado de Modo Anular Sul (SAM); Pacífico-América do Sul (PSA); Zona de Convergência Intertropical do Atlântico (ZCIT-A) (MANCINI et al., 2020), (TOMAZIELLO, 2014). Por isso estudos mais pormenorizados podem identificar quais e como esses padrões de teleconexões atmosféricas atuam sobre diferentes as regiões do país, dando aporte à previsão de tempo e clima que podem ser utilizadas no planejamento das atividades agrícolas.

7. CONCLUSÃO

A hipótese do presente trabalho foi confirmada, mostrando que eventos de El Niño-ENSO tem influência direta no clima da região Centro-Sul do Brasil, e consequentemente na produtividade da cana-de-açúcar, podendo assim aumentar a previsibilidade que estes eventos atmosféricos podem causar nos parâmetros climáticos estudados. Vista que essas consequências influencia todo o papel que a cana tem no setor alimentício, como também o mercado financeiro.

O índice MEI e a região de Niño 3 tiveram correlações estatisticamente significativas com a temperatura mínima da região Centro-Sul e de todos os seus estados (Paraná, São Paulo, Mato Grosso do Sul, Goiás e Minas Gerais) separadamente. Sendo que para os estados do Paraná e Mato Grosso do Sul também foram vistas correlações significativas com a precipitação. Nesses estados, eventos de La Niña (oposto ao El Niño) costumam provocar maiores irregularidades nos níveis de precipitação, diferente da região Centro-Oeste do país que já pode ser mais chuvosa (DE ÁVILA e PEZZI, 1999) e onde se encontra o estado de Goiás que respondeu inversamente a La Niña com o índice NDVI, que também está correlacionado com temperaturas mais elevadas acompanhado de períodos de chuva. E o estado do Mato Grosso do Sul, que embora esteja incluído no Centro-Oeste do país, a região de Dourados no sul estado onde ficam localizadas as usinas canavieiras é considerada uma zona de transação climática, respondendo a padrões diferentes do esperado, como o de irregularidades de chuvas em La Niña no sul do país (COMUNELLO et al., 2022). Outro efeito de La Niña a ser destacado na região Centro-Sul do país como um todo, são os registros de invernos mais rigorosos acompanhadas da ocorrência de geadas, impactando toda o setor produtividade da cana. Mesmo com todas as sazonalidades apresentadas dos parâmetros climáticos ainda pode-se ver correlações estaticamente significativas com estes grandes eventos.

As correlações cruzadas foram ainda mais significativas entre os eventos de El Niño e a produtividade da cana (TCH), devido ao conjunto de fatores integrados no rendimento de campo. O TCH mostrou ser uma combinação do efeito final de todos os parâmetros climáticos estudados na região. O MEI, a região de Niño 3 e principalmente a região Niño 3.4 (com aproximadamente 40%) foram os índices que apresentaram os maiores coeficientes de correlação com a produtividade da cana-de-açúcar na região Centro-Sul do Brasil.

Conclui-se então a importância de identificar estes grandes eventos e suas correlações com os parâmetros climáticos da principal região produtora de cana do país, indicando a

previsão que uma variável pode ter sobre a outra. A continuidade do presente estudo pode ser feita através de novas reanálises, porém agora removendo a componente sazonal dos dados climáticos e, também identificando a presença de mais fatores como esses padrões de teleconexões atmosféricas citados, que atuam sobre diferentes regiões do país e as suas correlações considerando diferentes intervalos de tempo, dando aporte assim à previsão meteorológica que pode ser utilizada na atividade agrícola.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACEITUNO, P. 1988. **On the Functioning of the Southern Oscillation in the South American Sector**. Part I: Surface Climate. *Monthly Weather Review*, 116:505-524.
- ALEXANDROV, V. A.; HOOGENBOOM, G. **The impact of climate variability and change on crop yield in Bulgaria**. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.104, p.315-327, 2000.
- AMARAL, L. R., PORTZ, G., ROSA, H. J., & MOLIN, J. P. (2012). **Estimativa de produtividade de cana-de-açúcar a partir de dados de sensor de refletância do dossel**. In Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão (Vol. 5).
- ANDRADE, L.A. de B. **Cultura da cana-de-açúcar**. In: CARDOSO, M. das G. (Ed.). *Produção de aguardente de cana-de-açúcar*. 2.ed. rev. e amp. Lavras: UFLA, 2006. Cap.1, p.25-67.
- ARANTES, Luana Stela. **Variabilidade espacial da precipitação pluvial e temperatura do ar em Minas Gerais associada a eventos de El Niño**. 2019. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geografia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.
- ARAÚJO, Edilaine da Silva. **O desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar no Brasil e sua relevância na economia nacional**. 2010.
- BAER, Werner. **A industrialização e o desenvolvimento econômico do Brasil**. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 1965.
- BARET, F.; GUYOT, G. **Potentials and limits of vegetation indices for LAI e APAR assessment**. *Remote Sensing of Environmental*, Basingstone, v. 35, n. 2 -3, p.161 -173, 1991.
- BARROS, G. S. A. C. **Brazil: The challenges in becoming an agricultural superpower**. In: Brainard, L.; Martinez-Diaz, L. (ed.). *Brazil as an economic superpower? Understanding Brazil's changing role in the global economy*. Washington: The Brookings Institution, 2009. Cap.4, p.81-109.
- CANABRAVA, A.P. **História econômica: Estudos e pesquisas**. São Paulo: UNESP. 2005. 320p.
- CARDOZO, Nilceu Piffer; SENTELHAS, Paulo Cesar. **Climatic effects on sugarcane ripening under the influence of cultivars and crop age**. *Scientia Agricola*, v. 70, p. 449-456, 2013.
- CARVALHO, Silvia Angélica Domingues de; FURTADO, Andre Tosi. **«O Melhoramento Genético de Cana-de-Açúcar no Brasil e o Desafio das Mudanças Climáticas Globais»**. *Revista Gestão & Conexões*, vol. 2, n. 1, setembro de 2013, pp. 22–46.
- CASARI, G. H. das C. N., et al. **Uso do NDVI para avaliação de Saccharum spp. em ensaio de tolerância à seca**. 2020. <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1127060>.
- CHATURVEDI, Aditya. **«IBM PAIRS Geoscope – a Breakthrough in Faster Spatial Data Analytics via Multiple Datasets»**. *Geospatial World*, 8 de fevereiro de 2019, <https://www.geospatialworld.net/blogs/ibm-pairs-geoscope-data-analytics/>.
- COELHO, C. A. S. & AMBRIZZI, T. 2000. **Determinação dos padrões de precipitação sobre a América do Sul em associação a TSM da Bacia do Pacífico Equatorial durante períodos extremos**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11, 2000, Rio de Janeiro. SBmet, 2000. CL-00003 1 CDROM.

- COMUNELLO, É.; FIETZ, R. F.; FLUMIGNAM, D. L., 2022. «**Saiba os efeitos do La Niña no MS**». Portal Agrolink, https://www.agrolink.com.br/noticias/entenda-os-efeitos-do-la-nina-no-ms_464214.html.
- CUNHA, G.R. **El Niño-Oscilação do Sul e perspectivas climáticas aplicadas no manejo de culturas no sul do Brasil**. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v.7, n.2, 1999.
- DA SILVA, G. A. M.; CARDOSO, C. S.; AMBRIZZI, T.; de SOUZA, C. P.; MENDES, D.; GOMES, H. B., 2021. **Deteção e atribuição das anomalias anuais dos índices de extremos de chuva e temperaturas máxima e mínima diárias sobre o litoral de São Paulo/Brasil**. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 14, p. 3008-3043
- DE ÁVILA, Ana H.; PEZZI, Luciano Ponzi. **Estimativa de rendimento e comportamento da La Niña 1998/99 para a região Sul do Brasil**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 11, 1999, Florianópolis, SC Anais. Florianópolis, SBA, 1999. CD-ROM.
- DE CASTRO SILVA, Wanda Tathyana; BARBOSA, Humberto Alves. **Avaliação da precipitação na produtividade agrícola da cana-de-açúcar: estudo de caso usina Coruripe para as safras de 2000/2005**. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 13, n. 03, p. 1352-1366, 2021.
- DRUMOND, A. R. M.; AMBRIZZI, T. **Estudo observacional e numérico da variação da circulação atmosférica nas Américas em episódios extremos da Oscilação Sul**. Revista Brasileira de Meteorologia. v. 18, n. 1, p. 1-12, 2003
- ESCOBAR, 2020. «**Mudança climática nas cidades: “Precisamos ficar preparados para o pior”**». Jornal da USP, 12 de fevereiro de 2020.
- FIORENTIN, Ailton Moisés Xavier, et al. «**Estudo de susceptibilidade à geada para a cultura da cana-de-açúcar**». Revista Ciência, Tecnologia & Ambiente, vol. 3, n.1, setembro de 2016, pp. 43–50. www.revistacta.ufscar.br.
- FUHRER, J. **Agroecosystem responses to combinations of elevated CO₂, ozone, and global climate change**. Agriculture, Ecosystems and Environment, v.97, p.1-20, 2003.
- GONZALEZ, Rosimeire Araújo. **Efeitos do gradiente de TSM zonal entre as bacias do Pacífico e Atlântico no norte da América do Sul durante eventos ENOS**. 2011. 124
- GRIMM, A. M.; BARROS, V. R.; DOYLE, M. E. 2000: **Climate variability in Southern South America associated with LA Niña and La Niña events**. Journal of Climate, 13:35-58.
- GRIMM, A. M., 2003: **The LA Niña Impact on Summer Monsoon in Brazil: Regional Processes versus Remote Influences**. Journal of Climate, 16:263-280.
- KAYANO, M.T.; MOURA, A.D. 1986. **O El-Niño de 1982-83 e a precipitação sobre a América do Sul**. Revista Brasileira de Geofísica, 4: 201–214.
- KAYANO, M.T.; RAO, V.B.; ANDREOLI, R.V. 2005. **A review of short-term climate variability mechanisms**. Advances in Space Research, 35:843-851.
- LAY, J. A.& AIELLO, J. L. 2001. **Relaciones entre el MEI (Multivariate ENSO Index) y las precipitaciones en la Argentina continental**. In: Congresso Latino Americano de Meteorologia, 9. Congresso Argentino de Meteorologia, 8. CLIMET 9, COMET 8, Buenos Aires del 7 al 11 de Mayo, 2001 CD-ROM.
- LIMBERGER, L. **Estudo de teleconexões atmosférica e possibilidade de avanços na climatologia geográfica: conceitos, fonte de dados e técnicas**. Revista Brasileira de Climatologia, Paraná, v. 19, julho/dezembro. 2016a.

- LOPES, F.; DINIZ, G.; MARQUES, J. 2007. **Relação entre o Multivariate Enso Index (MEI) e a TSM das Regiões dos Niños com a Precipitação em Regiões Homogêneas do Estado do Rio Grande do Sul**. Anuário do Instituto de Geociências. 30.
- MANCINI, C.; LOPES, V.; CAMPONOGARA, G.; HACKEROTT, J., 2020. **Modo Pacífico América do Sul (PSA)**. <https://pt.linkedin.com/pulse/modo-pac%C3%ADfico-am%C3%A9rica-do-sul-psa-jo%C3%A3o-caetano-mancini-vaz>. Acedido 8 de Julho de 2022.
- MARENGO, J.A. **Interannual variability of surface climate in the Amazon basin**. International Journal of Climatology 12:853–863, 1992.
- MARENGO, J. A. et al. **Onset and end of the rainy season in the Brazilian Amazon Basin**. *Journal Climate*, v. 14, n.3, p.833-852, 2001.
- MARENGO, J. A., SOARES, W. R., SAULO, C., and NICOLINI, M.: **Climatology of the Low-Level Jet east of the Andes as derived from the NCEP reanalyses**, *J. Climate*, 17, 2261–2280, 2004.
- MARIN, Fabio; NASSIF, Daniel S. P. «**Mudanças climáticas e a cana-de-açúcar no Brasil: Fisiologia, conjuntura e cenário futuro**». *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 17, fevereiro de 2013, pp. 232–39. SciELO, <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000200015>.
- MIURA, T.; HUETE, A. R.; YOSHIOKA, H.; HOLBEN, B. N. **An error and sensitivity analysis of atmospheric resistant vegetation indices derived from dark target-based atmospheric correction**. *Remote Sensing of Environment*, v.78, p.284-298, 2001.
- NDVI: **Índice De Vegetação Por Diferença Normalizada**. 27 de setembro de 2021, <https://eos.com/pt/make-an-analysis/ndvi/>.
- OLIVEIRA, G. S. (2001). **O El Niño e Você - o fenômeno climático**. Livro - **O El Niño e Você – o fenômeno climático**. Editora Transtec - São José dos Campos (SP), Disponível em: <http://enos.cptec.inpe.br/saiba/Oque_el-nino.shtml>. Acesso em: jul. 2022.
- R Development Core Team. 2010. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL: <<http://www.R-project.org/>>.
- RODRIGUES, Délcio; ORTIZ, Lúcia. **Em direção à sustentabilidade da produção de etanol de cana de açúcar no Brasil**. 2006.
- SANCHES, R. G.; SANTOS, B. C.; NEVES, G. Z. F.; SILVA, M. S. D.; SOUZA, P. H.; TECH, A. R. B. **Influência da variabilidade climática na produção canavieira na microrregião de São Carlos/ SP no período de 1994 a 2014**. *Revista Brasileira de Climatologia*, v.25, n.15, p.495-514, 2019.
- SANTOS, I. A.; BUCHMANN, Julio. **Uma Revisão Qualitativa Enfatizando Aspectos Climáticos da Amazônia e da Região Nordeste do Brasil**. Anuário do Instituto de Geociências (UFRJ. Impresso), v. 33 - 2, p. 9-23-23, 2010.
- SOUZA, C. A. de; REBOITA, M. S. **Ferramenta para o Monitoramento dos Padrões de Teleconexão na América do Sul**. *Terrae Didactica*, Campinas, SP, v. 17, n. 00, p. e02109, 2021. DOI: 10.20396/td.v17i00.8663474
- SOUZA, E. B. et al. **On the Influences of the El Niño, La Niña and Atlantic dipole pattern on the Amazonian Rainfall during 1960-1998**. *Acta Amazonica*, v. 30, n. 2, p. 305-318. 2000.

- SILVA, G. & AMBRIZZI, T. (2006). **Inter-El Niño variability and its impact on the South American low-level jet east of the Andes during austral summer - Two case studies.** *Advances in Geosciences*. 10.5194/adgeo-6-283-2006.
- SILVA, G.A.M.; AMBRIZZI, T.; MARENGO, J.A. **Observational evidences on the modulation of the South American Low Level Jet east of the Andes according the ENSO variability.** *Annales Geophysicae*, v. 27, n. 2, p. 645-657, 2009.
- SILVA, W. F.; AGUIAR, D. A.; RUDORFF, B. F. T.; SUGAWARA, L. M.; AULICINO, T. L. **I. N Análise da expansão da área cultivada com cana-de-açúcar na região Centro-Sul do Brasil: safras 2005/2006 a 2008/2009.** In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 14, 2009, Natal. Anais... São José dos Campos: INPE, 2009. p. 467-474.
- SILVA, W. T. S.; BARBOSA, H. A., 2021. **Avaliação da precipitação na produtividade agrícola da cana-de-açúcar: estudo de caso usina Coruripe para as safras de 2000/2005.** *Revista Brasileira de Geografia Física*, 13(3), 1352-1366. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.3.p1352-1366>
- SILVA, E. R. L. D. G.; SILVA, M. E. S, 2015. **MEMÓRIA DE EVENTOS ENOS NA PRECIPITAÇÃO DA AMÉRICA DO SUL.** *Revista do Departamento de Geografia*, [S. l.], v. 30, p. 34-55, 2015. DOI: 10.11606/rdg.v30i0.96077. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/96077>. Acesso em: 7 jul. 2022.
- TOMAZIELLO, Ana Carolina Nobile. **Variabilidade da zona de convergência intertropical do Atlântico as estações seca e chuvosa da América do Sul tropical. 2014.** Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. . Acesso em: 08 ago. 2022.
- THORNTON, P. K.; JONES, P. G.; ALAGARSWAMY, G.; ANDRESEN, J. **Spatial variation of crop yield response to climate change in East Africa.** *Global Environment Change*, v.19, p.54-65, 2009.
- TRENBERTH, Kevin E., e STEPANIAK, David P. «**Indices of El Niño Evolution**». *Journal of Climate*, vol. 14, n. 8, Abril de 2001, pp. 1697–701.
- TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação.** Editora da Universidade/ABRH, Porto Alegre - RS, Brasil. 450p, 1997.
- ÚNICA - União Agroindústria Canavieira Estado de São Paulo. **Memória, Cana-de-Açúcar e Sociedade.** ÚNICA, 2008. Em: <www.portalunica.com.br>. Acedido 15 de junho de 2022.
- WOLTER, K.; TIMLIN, M. S. 2011: **El Niño/Southern Oscillation behaviour since 1871 as diagnosed in an extended multivariate ENSO index (MEI.ext).** *Intl. J. Climatology*, 31, 14pp., 1074-1087. DOI: 10.1002/joc.2336.
- ZHANG, L.; ZHANG, H.; Niu, Y.; WENTING, H. **Mapping maize water stress based on UAV multispectral remote sensing.** *Remote Sensing*, v. 11, n.605, p.1 -24, 2019
- ZULLO, Júnior et al. **As mudanças climáticas e a cana-de-açúcar no Estado de São Paulo.** In: CORTEZ, L. A. B. (Coord.). *Bioetanol de cana-de-açúcar: P&D para produtividade e sustentabilidade.* São Paulo: Blucher, 2010. p. 195-202.
- ZUUR, A.F.; IENO, E.N.; SMITH, G.M. 2007 **Analysing Ecological Data.** *Statistics for biology and health.* Heidelberg, Germany: Springer, p. 672