



VARIABILIDADE TEMPORAL E ESPACIAL DAS PRECIPITAÇÕES E SUSCETIBILIDADE À SECA NO DISTRITO DE BRAGANÇA - PORTUGAL

JOÃO VICTOR ROCHA DOS SANTOS

*Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de Bragança para obtenção
do Grau de Mestre em Tecnologia Ambiental*

Orientado por:

Tomás de Figueiredo

Bragança

2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a minha mãe, Ana Lucia Rocha dos Santos, a meu finado pai, Claudio Aparecido dos Santos, meu irmão Pedro Henrique Rocha dos Santos e minha finada avó Nair Francisquetti Rocha pelo apoio e amor incondicional que me foi dado durante a caminhada, e pelas palavras encorajadoras para enfrentar e incentivar meus próximos passos. Eu amo vocês.

Obrigado aos meus amigos do meu bairro Eloy Chaves, da minha cidade natal Jundiá, por estarem sempre ao meu lado. Pelas conversas, incentivos, broncas e momentos juntos aproveitados durante todo esse processo. A minha grande amiga Beatriz Samogim, que sei que posso contar com ela em qualquer situação da minha vida, e me deu apoio desde os momentos mais tristes aos mais felizes.

Não posso deixar de agradecer meus amigos da universidade e a minha namorada Bruna Teixeira, que sem eles a caminhada teria sido muito mais difícil. Aos meus amigos e irmãos feitos em Bragança, com quem eu dividi teto e compartilhei experiências durante os anos e fizeram de todo esse processo mais feliz.

A todos os professores que me ensinaram muito durante todo o período de formação, em especial ao meu orientador Tomás Figueiredo por toda ajuda, motivação e dedicação a este trabalho.

RESUMO

Grande parte do nordeste de Portugal é composta por zonas áridas, caracterizadas por uma suscetibilidade de moderada a severa à desertificação e à seca. Foi realizada uma análise de tendências, tanto individual quanto combinada, da precipitação e do índice de seca SPI em vinte estações meteorológicas no Distrito de Bragança, em Portugal, abrangendo um período de quarenta anos (1957-1997). A análise revelou que, ao longo do período de estudo, à medida que a escala temporal do SPI aumentou (de 1 para 12 meses), houve um aumento na frequência de meses secos, bem como na ocorrência de meses com secas severas e extremas. Os resultados indicam uma redução gradual ao longo da escala temporal, dos meses classificados como "Próximo ao normal" na classificação de SPI, passando de 69% no SPI 1 para 65,5% no SPI 12. Em contrapartida, a percentagem de meses de secas aumentou gradualmente, com valores passando de 14,3% dos meses de seca no SPI 1 a 17% no SPI 12. A percentagem de meses de "seca severa" e "seca extrema" seguiram o mesmo padrão de aumento dos meses secos, aumentando conforme a escala de análise de SPI 1 a SPI 12. No geral, as tendências identificadas para precipitação e seca sugerem uma intensificação gradual na vulnerabilidade à desertificação na região, embora sem um padrão de variação uniforme na região ao longo das 4 décadas estudadas.

Palavras chave: Variabilidade climática, tendências temporais, seca e desertificação, extremos de precipitação, SPI.

ABSTRACT

Much of northeastern Portugal is arid, characterized by moderate to severe susceptibility to desertification and drought. An individual and combined trend analysis of precipitation and the SPI drought index was performed at twenty meteorological stations in the Bragança District of Portugal, covering a forty-year period (1957–1997). The analysis revealed that, over the study period, as the SPI time scale increased (from 1 to 12 months), there was an increase in the frequency of dry months, as well as in the occurrence of months with severe and extreme droughts. The results indicate a gradual reduction over the time scale of months classified as “Near normal” in the SPI classification, going from 69% in SPI 1 to 65.5% in SPI 12. In contrast, the percentage of drought months increased gradually, with values going from 14.3% of drought months in SPI 1 to 17% in SPI 12. The percentage of months of “severe drought” and “extreme drought” followed the same pattern of increase as dry months, increasing as the scale of analysis from SPI 1 to SPI 12. Overall, the trends identified for precipitation and drought suggest a gradual intensification in vulnerability to desertification in the region, although without a uniform pattern of variation in the region over the 4 decades studied.

Keywords: Climate variability, time trends, drought and desertification, precipitation extremes, SPI.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	3
2.1	<i>Hidrologia</i>	3
2.2	<i>Ciclo Hidrológico.....</i>	3
2.3	<i>Precipitação.....</i>	5
2.3.1	Precipitações frontais ou ciclônicas	6
2.3.2	Precipitações Convectivas.....	6
2.3.3	Precipitações Orográficas.....	7
2.3.4	Distribuição temporal e espacial da pluviosidade	7
2.3.5	Alterações climáticas e suas consequências na precipitação	8
2.4	<i>Secas.....</i>	9
2.4.1	Seca meteorológica	10
2.4.2	Seca agrícola	11
2.4.3	Seca Hidrológica	11
2.4.4	Seca Socioeconomica	12
2.5	<i>Indicadores de seca baseados na precipitação</i>	12
2.5.1	Normal de precipitação (NP)	12
2.5.2	Decis.....	13
2.5.3	SPI (Standart Precipitation Index).....	13
2.6	<i>Gestão dos Recursos Hídricos</i>	14
3	METODOLOGIA	17
3.1	<i>Área de estudo</i>	17
3.2	<i>Análise estatística das series temporais</i>	20
3.2.1	Extração de dados meteorológicos.....	20
3.3	<i>Cálculo do SPI.....</i>	21

3.4	<i>Tratamento estatístico dos dados</i>	25
3.5	<i>Representação espacial dos resultados</i>	26
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
4.1	<i>Precipitações médias anuais de cada estação meteorológica</i>	28
4.2	<i>Precipitações médias mensais de cada estação meteorológica</i>	32
4.3	<i>Valores de SPI 1, 6 e 12</i>	36
4.4	<i>Tendências na variação temporal da precipitação.....</i>	50
4.5	<i>Tendências na variação temporal do SPI.....</i>	52
5	CONCLUSÃO	60
6	REFERÊNCIAS	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo hidrológico	4
Figura 2: Exemplificação das chuvas Frontais, Convectivas e Orográficas.....	5
Figura 3: Esquema da sequência temporal dos diversos tipos de seca.	10
Figura 4: Classes de índice de aridez no Nordeste de Portugal.	18
Figura 5: Mapa de Precipitação Total Anual (1959 – 1991) e Mapa de Altimetria de Portugal.	19
Figura 6: Mapa de Altimetria do Distrito de Bragança e a delimitação da Bacia Hidrográfica do Rio Sabor. Fonte: Autoria Própria.....	20
Figura 7: Localização da área de estudo, com relação à Portugal.	Erro! Indicador não definido.
Figura 8: Localização das estações meteorológicas.....	21
Figura 9: Precipitação média anual do período comum de cada estação meteorológica.	28
Figura 10: Análise de correlação da precipitação média anual com as variáveis geográficas das estações meteorológicas. Fonte: Autoria Própria.	29
Figura 11: Mapa de precipitação média anual no Distrito de Bragança.....	31
Figura 12: Variação da precipitação média mensal ao longo do ano hidrológico, nas estações de Montezinho, Pinela, Campo de Víboras e Moncorvo, respectivamente.	36
Figura 13: Frequência de classes agregadas de SPI 1 das séries de precipitação das estações meteorológicas (número de meses nas colunas, num total de 480 meses).	38
Figura 14: Frequência de classes agregadas de SPI 6 das séries de precipitação das estações meteorológicas (número de meses nas colunas, num total de 480 meses).	39
Figura 15: Frequência de classes agregadas de SPI 12 das séries de precipitação das estações meteorológicas (número de meses nas colunas, num total de 480 meses).	40
Figura 16: Variação dos coeficientes de correlação, do acumulado de meses de secas, secas severas e extremas e secas extremas.....	44
Figura 17: Mapa de Seca Moderada, para o SPI 1.....	45

Figura 18: Mapa de Seca Severa, para o SPI 1.	45
Figura 19: Mapa de Seca Extrema, para o SPI 1.	46
Figura 20: Mapa de Seca Moderada, para o SPI 6.....	47
Figura 21: Mapa de Seca Severa, para o SPI 6.	47
Figura 22: Mapa de Seca extrema, para o SPI 6.....	48
Figura 23: Mapa de Seca moderada, para o SPI 12.....	49
Figura 24: Mapa de Seca Severa, para o SPI 12.	49
Figura 25: Mapa de Seca Extrema, para o SPI 12.....	50
Figura 26: Gráfico de Boxsplot dos valores de b dos SPI 1, SPI 6 e SPI 12..	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 2: Classificação da intensidade das secas segundo McKee et al. (1993).....	24
Tabela 3: Classificação da intensidade de secas do SPI em Portugal (INAG)	25
Tabela 4: Valores da estatística de regressão múltipla entre os parâmetros de Altitude, Latitude e Longitude, e a Precipitação média anual para o conjunto das estações meteorológicas selecionadas.	30
Tabela 5: Parâmetros de média e desvio padrão das precipitações médias mensais de cada estação meteorológica, para cada mês do ano hidrológico.	33
Tabela 6: Percentagem de ocorrência de meses classificados como próximos do normal ou mais secos, de acordo com o SPI (1957-1997): média do conjunto das 20 estações selecionadas.....	41
Tabela 7: Valores de coeficiente de correlação de SPI 1, SPI 6 e SPI 12 com a Precipitação média anual, para cada classe de SPI.....	42
Tabela 8: Parâmetros estatísticos da regressão linear dos dados de precipitação mensal ao longo de 40 anos de dados (1957-1997).....	50
Tabela 9: Parâmetros estatísticos da regressão linear dos dados de SPI mensal ao longo de 40 anos de dados (1957-1997).	52
Tabela 10: Média dos meses secos de cada SPI, em cada década de análise dentro dos 40 anos de dados (1957-1997), e os valores de significância dos efeitos dos factores Década e SPI no número de meses secos.	55

1 INTRODUÇÃO

As alterações climáticas globais têm sido amplamente registradas, e previsões do clima futuro indicam mudanças significativas nas temperaturas médias do ar, bem como nos valores e na distribuição da precipitação (IPCC, 2014). Embora ainda existam incertezas nas projeções para as chuvas, há um consenso de que a variabilidade nas precipitações deve aumentar. Dessa forma, eventos de precipitação extremos devem ocorrer com mais frequência no futuro e com uma intensidade maior em comparação aos atuais. Como resultado, espera-se que secas e inundações se tornem mais recorrentes e intensas, trazendo possíveis consequências negativas das mudanças climáticas. O aumento da variabilidade das condições climáticas nos últimos anos indica que eventos extremos podem se tornar mais frequentes e severos, especialmente com períodos de seca prolongados.

O sul da Europa tem sentido os efeitos do aumento das temperaturas globais (IPCC, 2014), com maior frequência e intensidade das secas, sobretudo nas regiões mediterrâneas (Vicente-Serrano et al., 2014; Gudmunsson e Seneviratne, 2015; Hoerling et al., 2012). Entender o fenômeno da seca, monitorá-lo, identificá-lo e prever sua ocorrência são passos essenciais para mitigar seus efeitos, especialmente em ambientes áridos e nas regiões secas do Mediterrâneo.

A seca é um fenômeno complexo e ainda sem uma definição única aceita universalmente. De modo geral, é vista como um fenômeno natural de escassez de água por conta da diminuição da quantidade de recursos hídricos disponíveis, causado pela variabilidade natural da precipitação e agravado por uma infraestrutura insuficiente de abastecimento (Wilhite, 1992). Cada episódio de seca deve ser caracterizado não apenas pelas condições climáticas da região, mas também pelos seus impactos. Dessa maneira, a seca pode ser classificada em quatro categorias principais, conforme sua duração e impactos: meteorológica, hidrológica, agrícola e socioeconômica (Wilhite e Glantz, 1985; Wilhite, 1992).

Para avaliar secas meteorológicas globalmente, o Centro Nacional de Mitigação de Seca dos EUA (NDMC), Organização Meteorológica Mundial (WMO), NOAA e da Convenção das Nações Unidas de Combate à Desertificação (WMM, 2012, p. 1), recomendou o Standard Precipitation Index (SPI) como padrão para os Serviços Meteorológicos e Hidrológicos Nacionais.

O SPI, desenvolvido por McKee et al. (1993), utiliza apenas a precipitação como entrada e identifica déficits em múltiplas escalas temporais (de 1 a 48 meses), permitindo sua ampla aplicação. Como índice padronizado, o SPI é bastante versátil, possibilitando comparações entre diferentes climas em escala global (Svoboda e Fuchs, 2017). Estudos indicam que o SPI é particularmente eficaz para representar condições de seca de curta e média duração além de ser amplamente utilizado para prever secas, monitorar sua ocorrência e prever a transição entre classes de seca (Mishra e Desai, 2005; Vicente-Serrano e López-Moreno, 2005; Tirivarombo et al., 2018; Steinemann, 2003).

Dessa forma, o presente estudo visa identificar as tendências temporais de precipitação e secas ao longo de 40 anos no distrito de Bragança, em Portugal. Além disso, realiza uma análise da extensão dos períodos de seca na região, utilizando SPI gerado a partir de séries mensais de precipitação de longo prazo em estações meteorológicas representativas, além da representação espacial dos resultados encontrados, utilizando técnicas de cartografia.

Para isso, o estudo se baseou em um referencial teórico que traz informações à respeito do ciclo hidrológico, precipitação, secas e os indicadores de seca presentes na literatura, e a definição do SPI como indicador de seca a ser utilizado ao longo das análises. Os materiais e métodos definiram a área de estudo, baseado nas suas características de precipitação, índice de aridez e a relação com a Bacia do Rio Sabor. Ainda, os materiais e métodos trataram da extração e análise estatística dos dados de precipitação de cada estação meteorológica, a fim de aplicar o cálculo do SPI 1, SPI 6 e SPI 12 e a representação geográfica dos resultados utilizando técnicas de Krigagem com o ArcGIS.

Na sequência, são apresentados os resultados obtidos das análises de precipitações médias anuais, mensais, os valores de SPI's encontrados e o mapeamento geográfico dos resultados, permitindo compreender a dinâmica da suscetibilidade à secas na região.

Por fim, na conclusão é apresentado um resumo e uma reflexão dos resultados, indicando as regiões mais suscetíveis a seca no Distrito de Bragança.

2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

2.1 Hidrologia

A hidrologia é o campo de estudo dedicado à análise das águas superficiais, abrangendo aspectos como seu fluxo, presença, dispersão, interação com o ambiente e características físico-químicas (Lencastre & Franco, 2006; WMO, 1982).

Em um estudo realizado por Collischonn e Tassi (2008), o autor destaca a importância de examinar as mudanças ao longo do tempo em variáveis essenciais do ciclo hidrológico. Isso é fundamental para o desenvolvimento de projetos de engenharia apropriados, visando reduzir os impactos extremos dessas variáveis, como inundações e períodos prolongados de estiagem.

No contexto da hidrologia e suas contribuições para a engenharia, a investigação nessa área se manifesta nos diversos usos da água, como na geração de energia, no abastecimento, no controle de enchentes, na irrigação de plantas, bem como na utilização e recarga de aquíferos. O objetivo é direcionar o manejo, a preservação e a aplicação da água para atender às necessidades humanas (Lencastre & Franco, 2006; Hipólito & Vaz, 2017). Assim, o ciclo hidrológico desempenha um papel crucial no ambiente e na vida em geral, pois todos os aspectos dessa ciência são essenciais para modelar o terreno, influenciar o clima e sustentar a fauna e a flora. Dessa forma, pode-se afirmar que estudar o ciclo da água é indispensável para a preservação da vida e do meio ambiente.

2.2 Ciclo Hidrológico

O ciclo hidrológico (Figura 1) pode ser explicado como a totalidade dos caminhos pelos quais a água se desloca e transforma na natureza, constituindo um sistema fechado de processos. Quando observado em uma escala global, esse ciclo envolve uma complexidade significativa (Hipólito & Vaz, 2017; Lousada & Camacho, 2018).

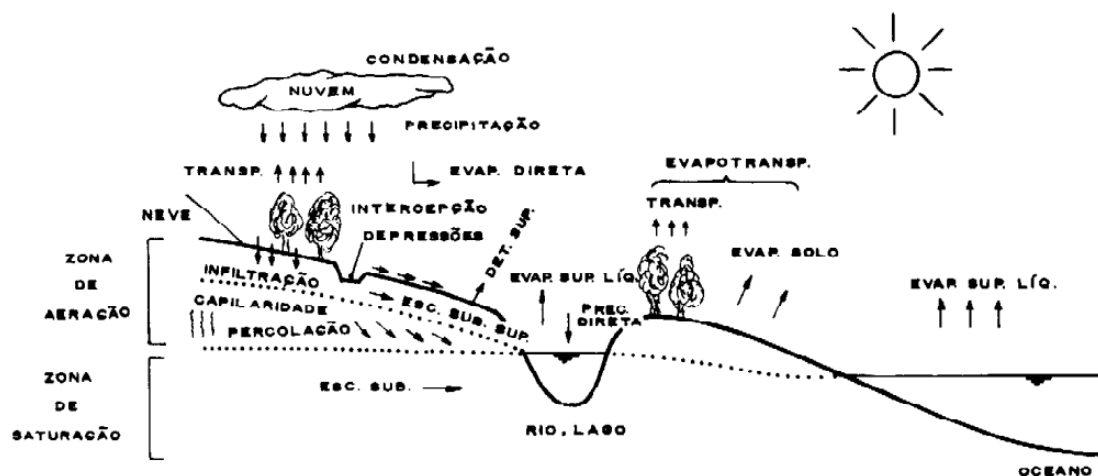


Figura 1. Ciclo hidrológico

Fonte: Silveira, 1997.

O ciclo hidrológico, um sistema fechado globalmente, é impulsionado por processos como infiltração, precipitação e evaporação, delineando a constante circulação da água (Linsley, Kohler e Paulhus, 1985; Black, 1996).

Para entender o ciclo hidrológico, pode-se descrevê-lo como começando com a evaporação da água dos oceanos. Este ciclo, fechado globalmente, carece de um ponto de início ou fim definido, sendo a radiação solar o princípio explicativo (Hipólito e Vaz, 2017). A energia solar aquece a superfície, causando a evaporação da água, cuja intensidade varia com a latitude, estação do ano, hora do dia e nebulosidade (Chow et al., 1994; Lencastre e Franco, 2006).

O vapor resultante é transportado pelo movimento das massas de ar e, sob condições específicas, condensa-se, formando nuvens que podem resultar em precipitação. A chuva ou neve que ocorre sobre a terra é distribuída de diversas maneiras. A maior parte é temporariamente retida no solo próximo ao local de queda e, eventualmente, retorna à atmosfera por meio da evaporação e transpiração das plantas. Outra porção da água remanescente flui sobre a superfície do solo (infiltração) ou penetra através do solo em direção aos rios (escoamento subsuperficial), enquanto parte dela se infiltra profundamente no solo, contribuindo para a recarga do lençol d'água subterrâneo (Villela e Mattos, 1975).

2.3 Precipitação

Dentre as diversas variáveis instrumentais utilizadas para identificar e descrever as manifestações de seca, a precipitação é a mais comum. Isso se deve, sem dúvida, à facilidade de perceber o fenômeno associado a ela e às consequências decorrentes da sua variabilidade temporal e espacial (Portela et al., 2012). Além disso, a precipitação é extensivamente monitorada, e é relativamente comum encontrar registros temporais de precipitação com uma extensão suficientemente longa. Essas circunstâncias conferem consistência às caracterizações baseadas nessas informações.

Comumente, a redução da temperatura de uma porção de ar resulta na ocorrência de precipitação, nuvens e tempestades. Esse processo ocorre quando a porção de ar é elevada em uma área de baixa pressão, atingindo assim a temperatura de condensação da água por meio da densidade da massa de ar e do resfriamento adiabático. Diversos fatores desencadeiam o levantamento, resfriamento e influenciam a precipitação das massas de ar, sendo categorizados como: frontais ou ciclônicos, convectivos e orográficos (conforme apresentado na Figura 4), conforme explicado por Black (1996), Bertoni e Tucci (2001), Collischonn e Tassi (2008).

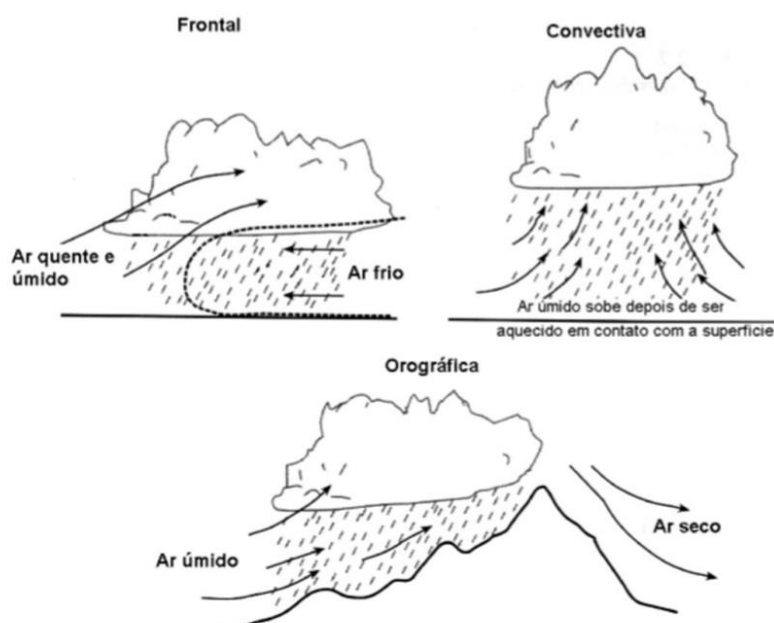


Figura 2: Exemplificação das chuvas Frontais, Convectivas e Orográficas.

Fonte: Black, 1996.

2.3.1 *Precipitações frontais ou ciclônicas*

Decorre da interação entre massas de ar aquecido e resfriado, em que a massa aquecida é impelida vigorosamente para cima, resfriando-se e, devido à sua umidade, experimenta a condensação do vapor de água, resultando em chuvas. Quanto maior a presença de água na atmosfera, menor será a densidade do ar, tornando-o menos estável do que o ar seco.

Quando essa massa de ar encontra uma área de baixa pressão, ela tende a se elevar, provocando uma diminuição de temperatura de forma adiabática. Isso leva ao aumento tanto da umidade relativa quanto da instabilidade, favorecendo a ocorrência de precipitação. Por outro lado, em áreas de alta pressão, as condições são mais estáveis e geralmente associadas a baixa umidade.

A colisão entre massas de ar quente e frio também contribui para a ocorrência de precipitação. Nas frentes frias e secas, ao encontrar massas de ar quente e úmido, a massa quente é elevada devido à sua menor densidade, ocorrendo adiabaticamente a diminuição da temperatura e desencadeando a precipitação. Este conjunto de eventos gera nuvens do tipo Cumulonimbus, caracterizadas por provocarem chuvas intensas de curta duração em áreas limitadas.

Nas frentes quentes, ao avançarem sobre massas de ar frio, a massa fria permanece no local devido à sua maior densidade, enquanto a massa quente se eleva sobre ela. A ascensão da massa de ar quente sofre resfriamento adiabático, resultando na formação de nuvens que podem dar origem a eventos de precipitação. No entanto, nesse cenário, são geradas nuvens do tipo stratus, que cobrem áreas mais extensas e produzem chuvas de intensidade menor.

2.3.2 *Precipitações Convectivas*

As precipitações convectivas geralmente se formam durante o verão e são comuns na região intertropical. Estas ocorrem, em geral, a cada 20 minutos e são observadas próximas a corpos de água e áreas urbanas, especialmente no final da

manhã e início da tarde. O fenômeno se deve ao ar quente, que, por ter menor densidade, ascende por convecção, sofrendo uma redução de temperatura de forma adiabática. Isso resulta na condensação e precipitação. Essas precipitações são caracterizadas por sua intensidade elevada, curta duração, ocorrência em áreas dispersas e são acompanhadas por ventos de diversas velocidades e direções.

2.3.3 *Precipitações Orográficas*

As chuvas orográficas ocorrem quando um grande obstáculo de relevo, cordilheiras, montanhas ou serras de elevada altitude, atuam como mecanismo de elevação de massas de ar quentes e húmidas, normalmente oriundas dos oceanos que serão resfriadas adiabaticamente havendo condensação do vapor, formação de nuvens e chuvas. Esse tipo de precipitação possui pequena intensidade, longa duração e cobrem pequenas áreas. Quando as massas de ar conseguem ultrapassar essa barreira o lado oposto é projetado à sombra pluviométrica, locais onde possuem áreas secas ou semiáridas causadas pelo ar seco já que a humidade foi perdida na superfície oposta do terreno.

2.3.4 *Distribuição temporal e espacial da pluviosidade*

A distribuição da chuva apresenta uma irregularidade espacial, manifestando-se de maneira desigual na área afetada pela precipitação. Em determinados pontos, a intensidade atinge o máximo, contrastando com uma redução nas proximidades. Além disso, à medida que a área do evento aumenta, sua intensidade diminui em sua periferia, complicando a obtenção de dados precisos em toda a região de estudo. As medições das precipitações são tipicamente pontuais, cobrindo uma área menor do que aquela em que a precipitação ocorreu, impossibilitando uma afirmação precisa sobre a quantidade total precipitada.

No entanto, é viável identificar locais propensos a eventos de precipitação, influenciados pela presença de cadeias de montanhas. A pluviosidade tende a aumentar com a altitude, especialmente até 2000 a 3000 metros, sendo também

influenciada pela inclinação e orientação das vertentes. Superfícies mais inclinadas e voltadas para o vento (barlavento) recebem mais água, enquanto superfícies mais planas e voltadas contra o vento (sotavento) recebem menos. Além disso, a proximidade do mar afeta a pluviosidade, sendo maior próxima aos oceanos em comparação com regiões distantes da costa (Black, 1996; Lencastre e Franco, 2006).

2.3.5 *Alterações climáticas e suas consequências na precipitação*

Conforme o IPCC (2014), com a evolução dos anos, vêm sendo registradas mudanças no clima global, e as previsões climáticas futuras continuam a indicar alterações significativas na temperatura média do ar e nos padrões de quantidade e distribuição de precipitação. Ainda persistem incertezas quanto às projeções dos valores futuros de precipitação atmosférica, mas essas projeções consistentemente sugerem um aumento futuro na variabilidade da precipitação. Dessa forma, é esperado que eventos extremos de precipitação ocorram com maior frequência no futuro, e esses eventos extremos futuros devem apresentar uma magnitude superior em comparação com os eventos atuais.

Como resultado, antecipa-se que secas e inundações se tornem mais frequentes e mais intensas do que as observadas atualmente, prevendo-se potenciais impactos adversos decorrentes das mudanças climáticas.

A variabilidade das condições atmosféricas tem mostrado um aumento nos últimos anos, e caso essa tendência persista nos próximos tempos, é esperado um aumento tanto na frequência quanto na intensidade de eventos climáticos extremos, especialmente um prolongamento dos períodos de seca. Além de observações globais que confirmam essa tendência, o cenário de extremos de precipitação mais abrangente também é aplicável a Portugal continental (SIAM2, 2006; Costa et al., 2012; APA, 2015; EEA, 2021; Fraga et al., 2017; Fraga et al., 2021).

Como uma manifestação atual das previsões indicativas do aumento da temperatura global (IPCC, 2014), o sul da Europa tem testemunhado um aumento tanto na frequência quanto na intensidade das secas, especialmente nas regiões mediterrânicas (Vicente-Serrano et al., 2014; Gudmunsson e Seneviratne, 2015).

Esse fenômeno tem sido mais acentuado, conforme relatado por Hoerling et al. (2012), Spinoni et al. (2017), Spinoni et al. (2019), Giorgi e Lionello (2008). Compreender os processos relacionados à seca, juntamente com sua monitorização, identificação e previsão, desempenha um papel crucial na mitigação dos impactos das secas em escala global, especialmente em ambientes áridos e nas terras secas do Mediterrâneo.

2.4 Secas

A seca é um fenômeno natural complexo, apresentando uma natureza recorrente e não aleatória, originado por condições meteorológicas e climatológicas, podendo culminar em um desastre natural ou catástrofe (Cunha, 2008). Este evento, que pode assumir proporções extremas, difere de outros desastres naturais devido ao seu desencadeamento gradual e muitas vezes imperceptível. Geralmente, sua evolução é lenta, estendendo-se por períodos prolongados e afetando áreas vastas. Além disso, a recuperação dessas regiões tende a ser um processo mais demorado (Cunha, 2008).

Ainda segundo Cunha (2008), a seca é interpretada como uma condição física transitória caracterizada pela escassez de água, associada a períodos prolongados de precipitação significativamente reduzida. Essa situação tem impactos negativos consideráveis nos ecossistemas e nas atividades socioeconômicas. Determinar com precisão o início e o fim da seca, bem como quantificar sua duração, é uma tarefa desafiadora, pois esse fenômeno pode persistir por alguns meses a vários anos.

As secas podem ter efeitos duradouros e abrangentes, diretamente e indiretamente, em diversos setores, sistemas, fronteiras e regiões econômicas (UNDRR 2021; Hagenlocher et al., 2023). Devido à multiplicidade de sistemas potencialmente impactados, como agricultura, indústria, abastecimento público de água e ecossistemas, e suas interações específicas com os recursos hídricos, os efeitos relacionados à seca são extremamente complexos.

Conforme o Atlas Europeu de Risco de Seca (2023), no âmbito agrícola, a

seca pode causar danos significativos à produtividade das culturas, sendo que esses impactos podem diferir consideravelmente entre diferentes culturas, cada uma com necessidades hídricas distintas. Além disso, a presença ou ausência de sistemas de irrigação desempenha um papel crucial, podendo, por si só, constituir um fator de escassez de água quando não gerenciado de forma sustentável. Em outros sistemas, os impactos da seca podem se manifestar de maneiras ainda mais intrincadas.

A definição de seca depende do ponto de vista do utilizador. Em geral distingue-se entre seca meteorológica, seca agrícola, seca hidrológica e seca socioeconómica, conforme a Figura 3.

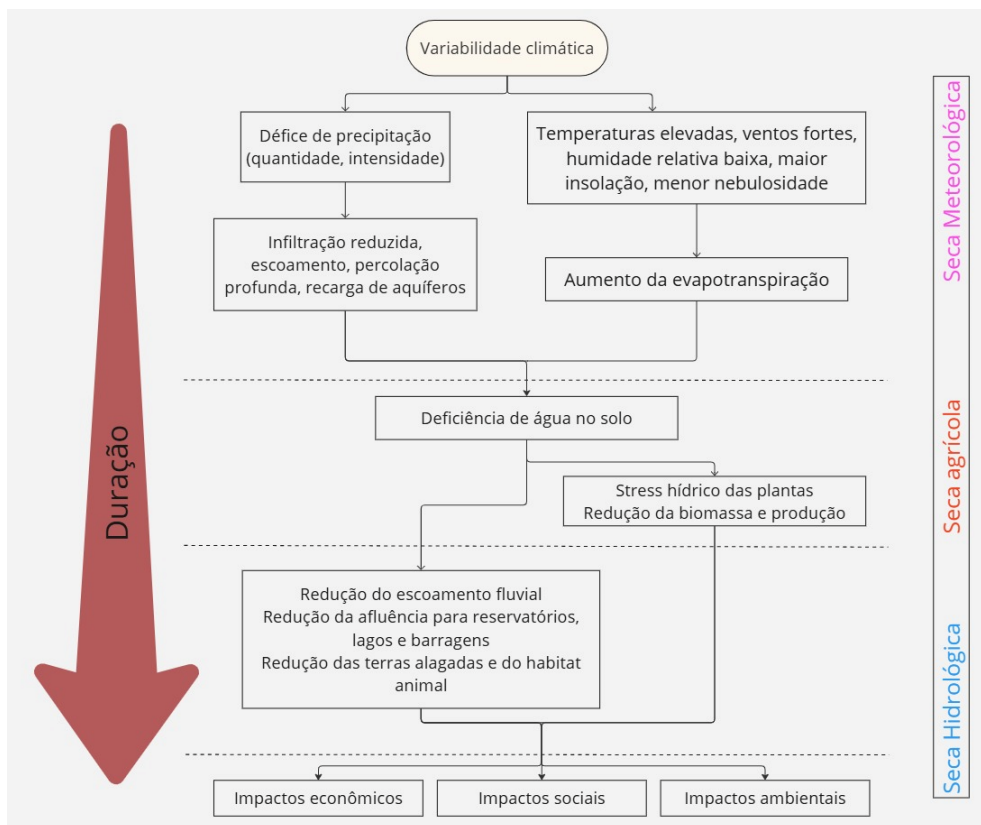


Figura 3: Esquema da sequência temporal dos diversos tipos de seca.

Fonte: Whilhite e Glantz, 1987.

2.4.1 *Seca meteorológica*

Segundo o Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), a seca meteorológica é descrita como uma medida do desvio dos padrões de precipitação

em relação aos valores normais. Essa condição é caracterizada pela falta de água resultante do desequilíbrio entre a quantidade de precipitação e a evaporação. A intensidade da seca meteorológica é influenciada por diversos elementos, tais como a velocidade do vento, temperatura, umidade do ar e insolação. Vale ressaltar que a definição de seca meteorológica é regionalmente dependente, pois as condições atmosféricas que conduzem a deficiências de precipitação podem variar significativamente de uma região para outra

2.4.2 *Seca agrícola*

A seca agrícola é caracterizada pela falta de água resultante do desequilíbrio entre a quantidade disponível no solo, as necessidades hídricas das culturas e a transpiração das plantas. Esse tipo de seca está intrinsecamente ligado às características específicas das culturas, da vegetação natural e, de modo geral, dos sistemas agrícolas. A falta de água afeta diretamente a capacidade das plantas em atender às suas demandas hídricas, comprometendo o desenvolvimento e a produtividade das culturas. Dessa forma, a seca agrícola representa um desafio significativo para a agricultura, influenciando negativamente o desempenho das safras e exigindo estratégias adaptativas por parte dos agricultores

2.4.3 *Seca Hidrológica*

A seca hidrológica está associada à diminuição dos níveis médios de água em rios, reservatórios e à depleção de água no solo. Diferentemente da seca meteorológica e agrícola, este tipo de seca geralmente ocorre em momentos distintos, uma vez que demanda um período mais extenso para que as deficiências na precipitação se manifestem nos vários componentes do sistema hidrológico. A redução dos níveis de água em reservatórios e a diminuição da umidade no solo caracterizam a seca hidrológica, refletindo o impacto prolongado da escassez de precipitação nos recursos hídricos locais.

2.4.4 *Seca Socioeconômica*

A seca socioeconômica está vinculada ao impacto conjunto das repercussões naturais e sociais resultantes da falta de água, originada pelo desequilíbrio entre a oferta e a demanda de recursos hídricos. Este fenômeno afeta diretamente as comunidades, tendo em vista que a quantidade e distribuição anual da precipitação, juntamente com elevadas temperaturas do ar, são fatores determinantes para a intensidade e as consequências de uma seca. Para avaliar a possibilidade e a gravidade da ocorrência de uma seca, é essencial compreender as condições climáticas. Nesse contexto, para uma determinada região, os dados meteorológicos cruciais incluem precipitação, temperatura do ar, umidade do ar e conteúdo de água no solo. Essas informações são fundamentais para avaliar e mitigar os impactos socioeconômicos adversos decorrentes da escassez hídrica.

2.5 Indicadores de seca baseados na precipitação

Numa primeira fase é importante avaliar as situações de seca passadas e classificá-las quanto à sua severidade. Assim, é necessário analisar a precipitação anual e compreender o grau de intensidade de seca, que dependerá da maior ou menor ausência de precipitação verificada (duração e intensidade do fenômeno).

2.5.1 *Normal de precipitação (NP)*

Esse é um dos índices que proporciona uma maneira simples de definir e quantificar as condições típicas de precipitação em qualquer região. O cálculo deste índice é relativamente descomplicado, envolvendo a relação entre a quantidade real de precipitação e a média histórica de precipitação (conhecida como precipitação normal, obtida calculando a média das precipitações ao longo do período de análise, assumindo registros de no mínimo 30 anos) em uma determinada área, expressa em porcentagem.

Esse indicador pode ser determinado para diferentes escalas temporais, geralmente variando de um mês a um conjunto de meses, representando uma estação específica ou até mesmo um ano hidrológico. A precipitação normal para uma região específica é considerada como referência, sendo equivalente a 100%.

2.5.2 *Decis*

A sugestão para utilizar os Decis foi inicialmente proposta por Gibbs e Maher (1967). Os totais mensais de precipitação, ao longo de um extenso período, são organizados em ordem decrescente, começando pelo valor mais elevado e indo até o menor, para criar uma distribuição de frequências acumuladas.

Essa distribuição é então dividida em dez partes iguais, conhecidas como Decis. O quinto Decil corresponde à mediana, representando o valor de precipitação no qual 50% das ocorrências a ultrapassam e 50% ficam abaixo. Por exemplo, o primeiro Decil indica o valor de precipitação que é superado em 90% das vezes, implicando uma probabilidade de ocorrência de 10%. Quando a precipitação se enquadra nos 20% mais baixos (Decis 1 e 2), é classificada como significativamente abaixo da média.

2.5.3 *SPI (Standart Precipitation Index)*

Desenvolvido por McKee, Doesken e Kleist em 1993, o Índice de Precipitação Padronizado (SPI) foi criado para avaliar a carência de chuvas. Ele possibilita entender as várias consequências dessa falta de água em diferentes aspectos, como solo, reservatórios, umidade do solo, escoamento superficial e presença de água sob a forma de gelo e neve.

O Índice de Precipitação Padronizado (SPI), em qualquer período de análise, fundamenta-se na probabilidade de chuvas. Sua ampla aplicação na gestão de situações de seca é devido à sua notável versatilidade como indicador (Svobda et al., 2012)

O Índice de Precipitação Padronizado (SPI) foi desenvolvido com o propósito de medir a escassez de chuvas em diferentes escalas de tempo, refletindo assim o impacto da seca na disponibilidade de vários recursos hídricos. As condições de

umidade do solo respondem rapidamente às anomalias de precipitação em prazos mais curtos, enquanto os lençóis freáticos, o fluxo dos rios e o armazenamento de reservatórios refletem as anomalias de precipitação em prazos mais longos. Com base nesses princípios, McKee *et al.* (1993) inicialmente calcularam o SPI para períodos de 3, 6, 12, 24 e 48 meses.

É recomendável ter um conjunto de dados mensais com um histórico de pelo menos 20-30 anos para uma análise ideal, sendo ainda mais favorável alcançar 50-60 anos ou mais, conforme sugerido por Guttman (1999).

A determinação do SPI para qualquer localidade fundamenta-se no registro de precipitação de longo prazo para o período desejado. Esse histórico é ajustado a uma distribuição de probabilidade, que é então transformada em uma distribuição normal, resultando em um SPI médio igual a zero para a localidade e o período desejado (Edwards e McKee, 1997). Valores positivos do SPI indicam precipitação superior à mediana, enquanto valores negativos indicam precipitação inferior à mediana. Como o SPI é normalizado, climas mais úmidos e mais secos podem ser representados da mesma maneira; portanto, períodos chuvosos também podem ser monitorados usando o SPI.

Conforme a Organização Mundial de Meteorologia (WMO, 2016), ainda que o SPI seja um índice simples que utiliza uma única variável para análise estatística (precipitação), usar apenas dados de precipitação é a maior força do SPI, pois torna muito fácil de usar e calcular. O SPI é aplicável em todos os regimes climáticos, e os valores do SPI para climas muito diferentes podem ser comparados. A capacidade do SPI de ser computado para curtos períodos de registro que contêm dados ausentes também é valiosa para as regiões que podem ser pobres em dados ou sem conjuntos de dados coesos e de longo prazo.

2.6 Gestão dos Recursos Hídricos

No nordeste de Portugal, a gestão de recursos hídricos tem como foco enfrentar as condições de seca, por meio da implementação de sistemas de reservatórios, estratégias de gestão integrada e diretrizes legais robustas. Esses esforços buscam mitigar os impactos das secas prolongadas, que se tornam cada vez

mais frequentes e severas devido às mudanças climáticas. A região conta com o suporte de legislações como a Diretiva-Quadro da Água, o Plano Nacional da Água e os Planos de Bacia Hidrográfica, que fornecem as bases para o planejamento e a gestão sustentável dos recursos hídricos (Ó, 2012).

A Diretiva-Quadro da Água, juntamente com os instrumentos nacionais, como o Plano Nacional da Água, estabelece os princípios para a gestão integrada e sustentável da água. Esses planos orientam a implementação de medidas para reduzir os riscos associados às secas e promover o uso racional da água. No entanto, a integração e coordenação entre esses instrumentos ainda precisam ser aprimoradas para maximizar a eficiência no enfrentamento dos impactos das secas (Ó, 2012).

Entre as soluções estruturais adotadas na região, destaca-se o sistema de dois reservatórios na bacia hidrográfica do Alto Sabor. Essa abordagem oferece uma alternativa mais eficiente em comparação a um único reservatório, proporcionando maior segurança no abastecimento hídrico, especialmente nas condições climáticas atuais (Santos, et al, 2017). Além disso, em 2015, foi construído um novo reservatório na mesma bacia para atender à crescente demanda por água durante os períodos secos e momentos de maior densidade populacional, como nas férias. Apesar desses avanços, as mudanças climáticas, com o aumento das temperaturas e a redução das precipitações, podem comprometer a eficácia dessas infraestruturas no futuro (Santos et al, 2017).

Essas alterações climáticas têm causado impactos significativos, especialmente na bacia do Côa, onde projeções indicam uma redução no escoamento dos rios, particularmente no final da primavera e no verão (Rodrigues et al, 2023). Isso agrava as condições de seca e representa um desafio adicional para a irrigação agrícola, um setor essencial para a economia local. Para enfrentar esses desafios, estratégias de gestão integrada têm sido aplicadas, com foco na otimização do uso da água, aumento da eficiência e implementação de medidas que equilibram a oferta e a demanda (Rodrigues et al, 2023).

Além das medidas internas, a cooperação transfronteiriça desempenha um papel importante. Portugal trabalha em parceria com a Espanha para desenvolver indicadores comuns e estratégias de gestão para bacias hidrográficas compartilhadas,

como forma de promover uma gestão integrada e sustentável dos recursos hídricos. Esses esforços são essenciais para enfrentar os desafios relacionados às secas e melhorar a resiliência regional.

3 METODOLOGIA

3.1 Área de estudo

A escolha da área de estudo, o distrito de Bragança, foi baseada em sua conhecida suscetibilidade à seca e em sua diversidade topográfica, que varia de altitudes inferiores a 500 metros até mais de 1.100 metros. Essa variação exerce um papel crucial na distribuição da precipitação, criando condições ideais para investigar os padrões de seca e suas interações com o relevo (Vicente-Serrano et al., 2014; Black, 1996). Essa diversidade altitudinal contribui para a formação de microclimas, o que enriquece a análise e permite uma compreensão detalhada das dinâmicas regionais (Hoerling et al., 2012).

O índice de aridez (IA) é definido pela relação entre a precipitação anual e a evapotranspiração potencial, sendo categorizado em quatro classes no território do nordeste: Semiárido ($0,2 < IA < 0,5$), subúmido-seco ($0,5 < IA < 0,65$), subúmido-úmido ($0,65 < IA < 1$) e úmido ($IA > 1$) (PANCD, 2011). Essas categorias climáticas são utilizadas para avaliar a suscetibilidade à desertificação, onde a região semiárida apresenta alta suscetibilidade e a subúmido-seca uma suscetibilidade moderada. Segundo a Classificação Climática de Köppen, o nordeste de Portugal está incluído nos climas Csa e Csb, ambos de tipo mediterrâneo, caracterizados por verões secos e quentes (Csa) ao sul, e verões secos e amenos (Csb) nas regiões do norte e extremo nordeste (Köppen, 1936; IPMA, 2021).

Um estudo realizado por Royer et al (2021), representou de forma geográfica, o índice de aridez para o nordeste de Portugal.

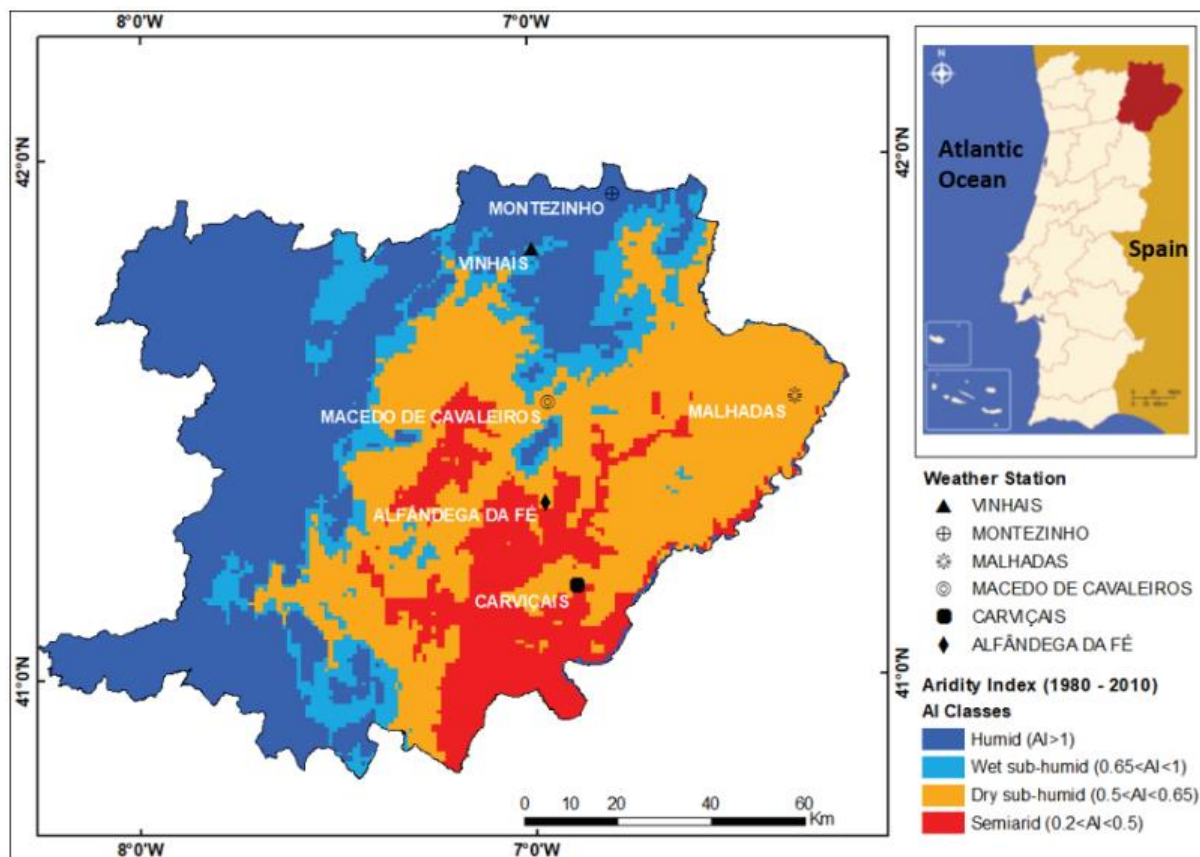


Figura 4: Classes de índice de aridez no Nordeste de Portugal.

Fonte: Royer et al (2021).

Paralelo a isso, o Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, representa em um mapa, a precipitação total anual, com dados de 1959 até 1991. Ainda, a USGS – United States Geological Survey, disponibiliza informações sobre altimetria de Portugal conforme a Figura 5.

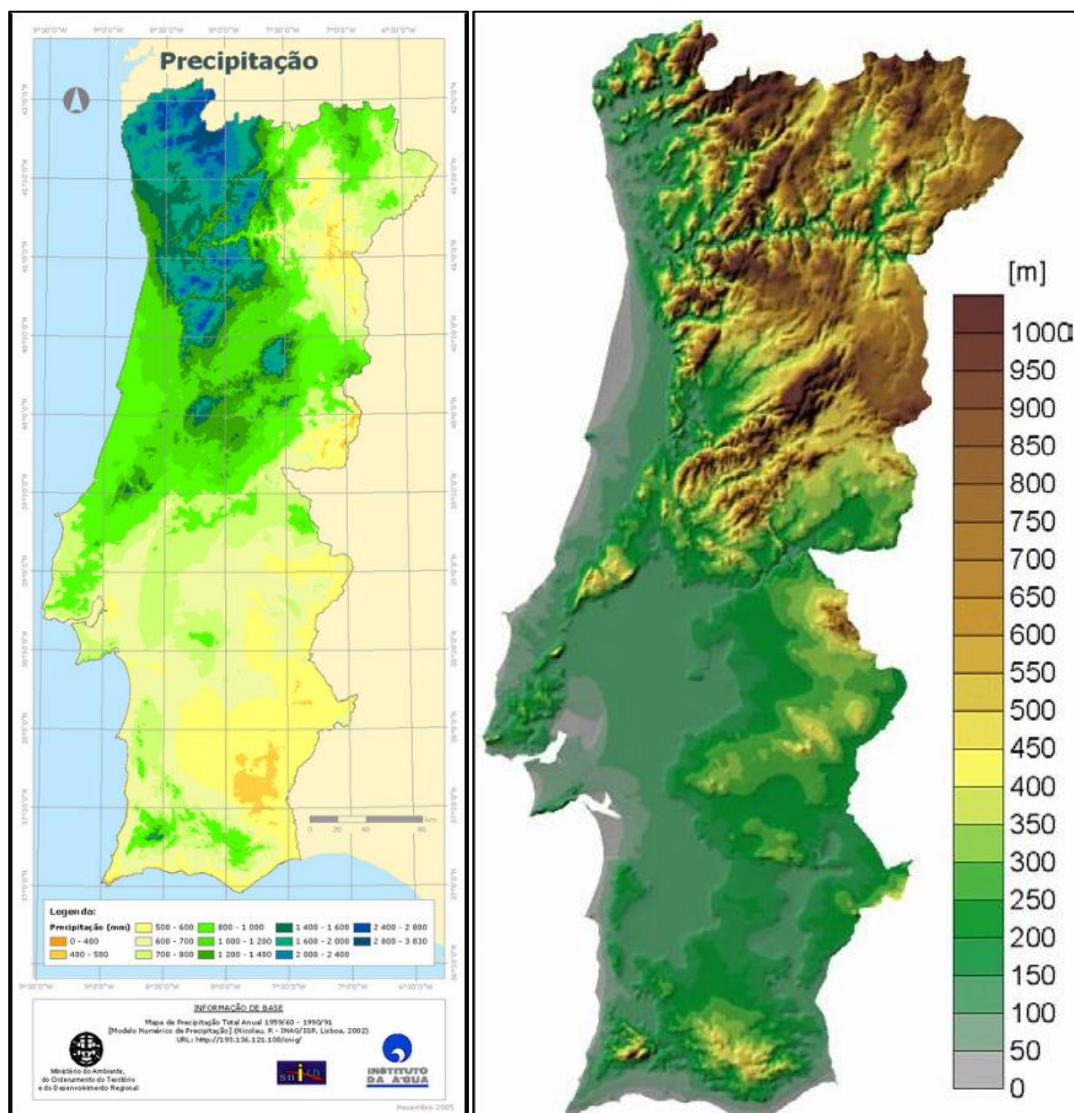


Figura 5: Mapa de Precipitação Total Anual (1959 – 1991) e Mapa de Altimetria de Portugal.

Fonte: Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional e United States Geological Survey.

Ainda, o distrito de Bragança está localizado na bacia hidrográfica do Rio Sabor, que se destaca como o primeiro e principal afluente do Rio Douro em Portugal e possui uma importância significativa para a hidrografia da região. O Rio Douro, por sua vez, é uma das bacias hidrográficas mais extensas e influentes da Península Ibérica, desempenhando um papel fundamental na sustentação dos ecossistemas locais e nas atividades humanas, como a agricultura e o abastecimento de água (Cunha, 2008; Gudmundsson & Seneviratne, 2015).

A Figura representa a altimetria do Distrito de Bragança, junto à delimitação da Bacia Hidrográfica do Rio Sabor.

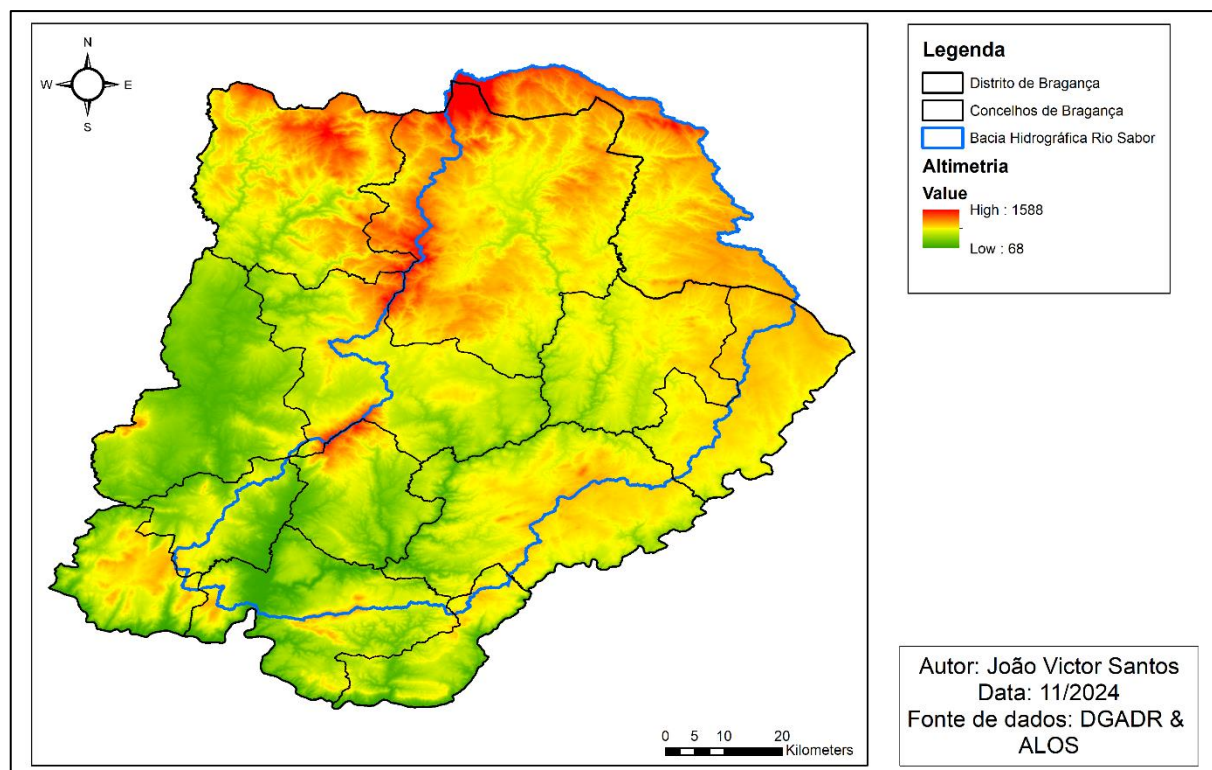


Figura 6: Mapa de Altimetria do Distrito de Bragança e a delimitação da Bacia Hidrográfica do Rio Sabor. Fonte: Autoria Própria.

Estas características da área de estudo acrescenta uma camada de complexidade ao entendimento das relações entre altitude e precipitação, e a potencial suscetibilidade à desertificação, justificando a escolha da região.

3.2 Análise estatística das series temporais

3.2.1 Extração de dados meteorológicos

A extração de dados meteorológicos foi realizada em vinte (20) estações meteorológicas selecionadas dentro do distrito de Bragança – Portugal, juntamente à delimitação da Bacia Hidrográfica do Rio Sabor. Essas estações meteorológicas fazem parte da rede de monitoramento meteorológico do SNIRH – Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos.

O sistema apresenta dados mensais de precipitação de cada estação meteorológica. Para a análise, foi selecionado o mais longo período comum de dados disponibilizados para o conjunto das estações, o qual vai de 1957 à 1997, gerando um período de análise de 40 anos. Ainda, o SNIRH fornece informações de altitude, latitude e longitude de cada estação analisada. A escolha dos anos de análises foram baseados na disponibilidade de dados das estações meteorológicas, identificando um período comum onde todas as estações selecionadas tivessem a mesma quantidade de dados.

A Figura 7 mostra a localização das estações meteorológicas selecionadas, dentro da área de estudo.

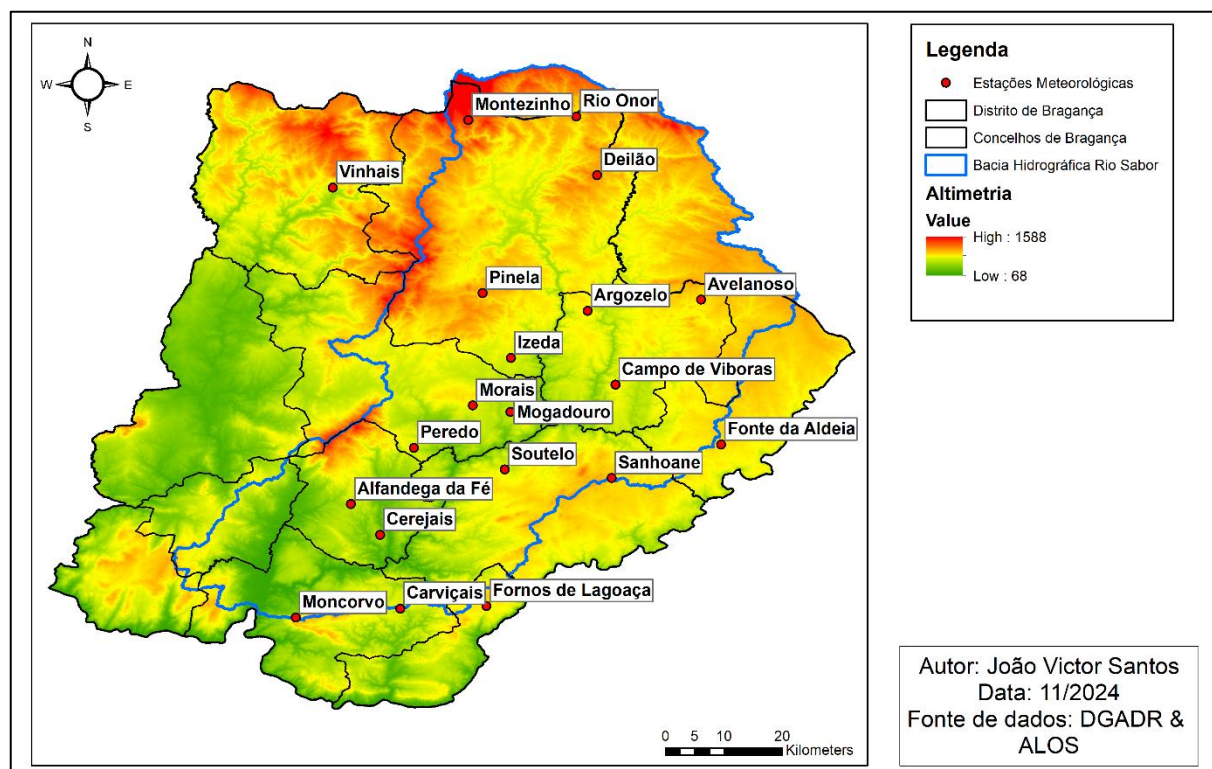


Figura 7: Localização das estações meteorológicas.

Fonte: Autoria Própria.

3.3 Cálculo do SPI

O SPI, em uma abordagem simplificada, é determinado através da normalização da precipitação mensal. Esse processo consiste na diferença entre a

quantidade de chuva registrada durante um determinado período e a média histórica de precipitação para o mesmo intervalo de tempo. Em seguida, essa diferença é dividida pelo desvio padrão, conforme definido por McKee (1993). A média e o desvio padrão são obtidos a partir de dados históricos de precipitação.

$$SPI = \frac{(X_i - \bar{X}_i)}{\sigma}$$

Onde:

SPI – Índice de Precipitação Standard

X_i - Precipitação real para o período em análise

\bar{X}_i - Média de precipitação para a série de anos considerados

σ - Desvio padrão da série de precipitação considerada

Contudo, do ponto de vista estatístico, as precipitações não seguem uma distribuição normal em torno da média, especialmente para períodos de acumulação inferiores a 12 meses. Em vez disso, apresentam uma distribuição irregular, com considerável desvio em relação à média. Para viabilizar o cálculo do SPI, é necessário aplicar uma transformação na distribuição de probabilidade relacionada à ocorrência de registros de precipitação.

Do ponto de vista matemático, o SPI representa a probabilidade cumulativa de ocorrência de precipitação e se fundamenta no conceito de precipitação normalizada. Nesse contexto, valores positivos de SPI indicam que, para uma determinada região e período analisado, a precipitação observada supera a média. Em contrapartida, valores de SPI inferiores a zero indicam que a precipitação registrada está abaixo da média para o mesmo período.

É necessário coletar os registros de precipitação mensal ao longo de um período de análise contínuo, idealmente com duração igual ou superior a 30 anos. Em seguida, são selecionadas as escalas temporais de análise, como 1, 3, 6, 12, 24 ou 48 meses, por exemplo. O cálculo é realizado de forma que o valor do SPI em cada

mês seja derivado dos meses anteriores (Wanders et al, 2010)

A série de dados de precipitação passa por um ajuste à distribuição probabilística Gama para estabelecer a relação entre a probabilidade de ocorrência e os valores de precipitação. A distribuição Gama é definida por meio da seguinte equação

$$G(x) = \frac{1}{\beta^\alpha - \Gamma(x)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} dx, x > 0$$

Onde:

$G(x)$ - Probabilidade acumulada

β - Parâmetro de escala ($\beta > 0$)

α - Parâmetro de forma ($\alpha > 0$)

x - Variável aleatória ($x > 0$)

$\Gamma(x)$ - Função Gama

Segundo Wanders et al (2010), s valores dos parâmetros α e β são calculados para cada estação, em relação a cada escala de tempo e para cada mês do ano. A máxima probabilidade aproximada dos parâmetros α e β é determinada por meio da seguinte expressão.

$$\alpha = \frac{1}{4U} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4U}{3}} \right) \text{ e } \beta = \frac{\bar{x}}{\alpha}$$

Sendo:

$$U = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(X)}{N}$$

Onde:

N - número de observações;

Calculada a probabilidade acumulada, $G(x)$, sendo x a variável em análise, determina-se o valor de Z (variável normalizada) para a mesma probabilidade, obtendo-se assim, o índice normalizado.

McKee et al. (1993) utilizaram a tabela de valores do Índice de Precipitação Padronizado (SPI), apresentada na Tabela 1, para estabelecer as categorias de severidade da seca associadas ao SPI. Além disso, eles estabeleceram critérios para a ocorrência de um evento de seca em qualquer uma das escalas de tempo. Um evento de seca é considerado sempre que o SPI permanece continuamente negativo e atinge uma intensidade de -1,0 ou menos. A finalização do evento ocorre quando o SPI torna-se positivo.

Cada evento de seca, portanto, é caracterizado por uma duração determinada pelo seu início e fim, além de uma intensidade para cada mês durante o qual o evento persiste. A soma positiva dos valores do SPI para todos os meses dentro de um evento de seca pode ser referida como a "magnitude" da seca.

Tabela 1: Classificação da intensidade das secas segundo McKee et al. (1993)

SPI	INDICADOR DE SECA	PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA
2,0 ou mais	Extremamente úmido	2,3%
1,5 a 1,99	Muito úmido	4,4%
1,0 a 1,49	Moderadamente úmido	9,2%
-0,99 a 0,99	Próximo do normal	48,0%
-1,0 a -1,49	Seca moderada	9,2%
-1,5 a -1,99	Seca severa	4,4%
-2,0 ou menos	Seca extrema	2,3%

Um índice SPI igual a zero indica que não houve desvios nos valores de precipitação em relação à média durante o período analisado. Valores positivos do índice SPI indicam que a precipitação está acima da média, caracterizando um período com boa disponibilidade hídrica. Por outro lado, valores negativos do SPI

indicam que a precipitação está abaixo da média (Portela et al, 2012).

A classificação proposta por McKee et al. (1993) é amplamente adotada na maioria dos países. Contudo, em alguns lugares, os planos de gestão de secas incorporam classificações do Índice de Precipitação Padronizado (SPI) mais ajustadas às condições específicas de suas regiões, divergindo, assim, da classificação mencionada anteriormente.

Em Portugal, o Instituto Nacional da Água (INAG), atualmente integrado na Agência Portuguesa do Ambiente (APA), opta por uma classificação mais simplificada em comparação com a sugerida por McKee et al. (1993), conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2: Classificação da intensidade de secas do SPI em Portugal (INAG)

SPI	INTENSIDADE DE SECA
0 ou mais	Inexistencia de seca
0,0 a -1,0	Seca Suave
1,0 a -1,50	Seca Moderada
-1,50 ou menos	Seca Severa/Extrema

Para o presente estudo, os cálculos do SPI, serão baseados na Tabela 1, proposta por McKee et al (1993). A referida metodologia de cálculo foi aplicada usando um programa de cálculo automático, disponível on-line no site do Nacional Drought Mitigation Center (NDMC, 2006).

3.4 Tratamento estatístico dos dados

O tratamento dos dados foi realizado utilizando o software Microsoft Excel. Inicialmente, os dados brutos de precipitação foram organizados em planilhas, possibilitando a sistematização e a preparação dos valores para os cálculos subsequentes. Com base nos dados de precipitação mensal e anual, foi calculado o Standard Precipitation Index (SPI) para as escalas temporais de 1, 6 e 12 meses, a fim de avaliar a variabilidade temporal e espacial das secas na região de estudo.

Os resultados obtidos dos cálculos do SPI foram agrupados em tabelas para facilitar a interpretação dos valores e a identificação de padrões de ocorrência. A partir dessas tabelas, foi possível a elaboração de gráficos que permitiram visualizar a distribuição temporal e a magnitude dos eventos de seca. O uso do Excel foi fundamental para organizar, resumir e representar os resultados graficamente, tornando possível a compreensão da dinâmica das precipitações e a ocorrência de períodos secos.

Além da organização e apresentação gráfica dos dados, também foram realizadas correlações estatísticas entre as variáveis selecionadas. As correlações foram conduzidas por meio da ferramenta "Análise de Dados" disponível no Excel, que possibilita a aplicação de métodos estatísticos, como o coeficiente de correlação de Pearson. Esse procedimento foi essencial para investigar a relação entre a precipitação e outros parâmetros relevantes, contribuindo para uma análise mais robusta dos dados e suas implicações na suscetibilidade à seca no Distrito de Bragança.

3.5 Representação espacial dos resultados

O estudo realizou a representação espacial dos resultados de SPI encontrados, para os dados analisados, além da representação de dados de precipitação e representação da área afetada em cada análise.

Para a análise espacial dos resultados obtidos, foi utilizada a técnica de krigagem, uma forma de interpolação geoestatística que considera tanto a distância entre os pontos amostrais quanto a sua variabilidade. Esta técnica é adequada para dados ambientais, como precipitação, por capturar padrões espaciais de forma precisa e oferecer uma estimativa da incerteza associada às previsões.

O processo de krigagem foi realizado no software ArcGIS Pro, utilizando os valores mensais de precipitação e os índices de SPI (1, 6 e 12 meses) calculados para cada estação meteorológica.

Para a krigagem ordinária, utilizou-se um semivariograma esférico, que se ajustou melhor aos dados de precipitação e SPI. O raio de influência foi definido com

base na distância média entre as estações meteorológicas e a variabilidade observada nos dados.

Em sequência, foram gerados mapas mensais de precipitação e SPI para cada intervalo de tempo (1, 6 e 12 meses), assim como o mapa do coeficiente de variação das precipitações. A krigagem permitiu visualizar a distribuição espacial dos fenômenos, extrapolando os dados das estações meteorológicas para toda a área do distrito de Bragança.

A validação do modelo de krigagem foi complementada por uma comparação dos resultados obtidos com o mapa de precipitação anual produzido pelo Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional de Portugal, representado na Figura 5.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Precipitações médias anuais de cada estação meteorológica

Os dados de precipitação coletados das estações meteorológicas permitiram uma análise detalhada das variações anuais e mensais no distrito de Bragança. A Figura 8 apresenta os valores médios anuais de precipitação para cada estação durante o período de estudo.

Observa-se uma significativa variação espacial na distribuição da precipitação, com as maiores médias registradas nas estações localizadas nas áreas de maior altitude, como a Serra de Montesinho, onde os valores anuais médios ultrapassaram os 1.200 mm. Por outro lado, nas regiões mais ao sul do distrito, como na área de Moncorvo, as precipitações médias anuais foram substancialmente mais baixas, em torno de 600 mm, refletindo a transição para um clima mais seco, característico dessa porção do território. A Figura 8 representa os valores de precipitação média anual, organizadas em ordem decrescente.

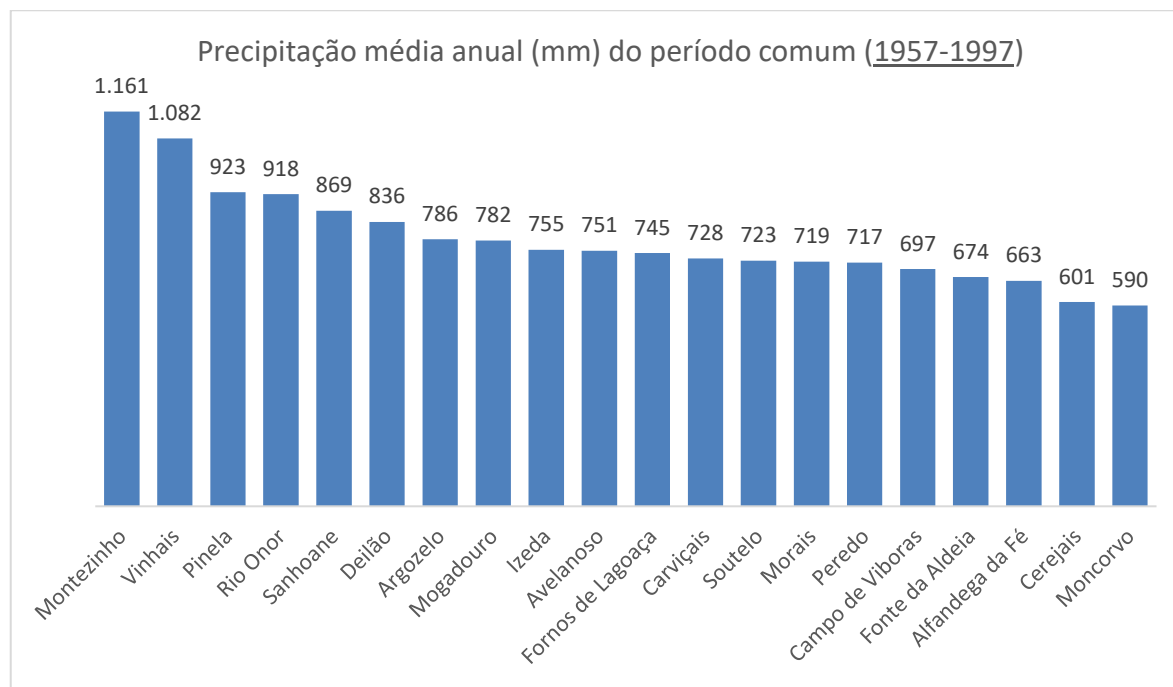


Figura 8: Precipitação média anual do período comum de cada estação meteorológica.

Fonte: Autoria Própria

Ainda, foi realizada uma análise de correlação entre a precipitação média anual e as variáveis geográficas de altitude, latitude e longitude, conforme a Figura 9.

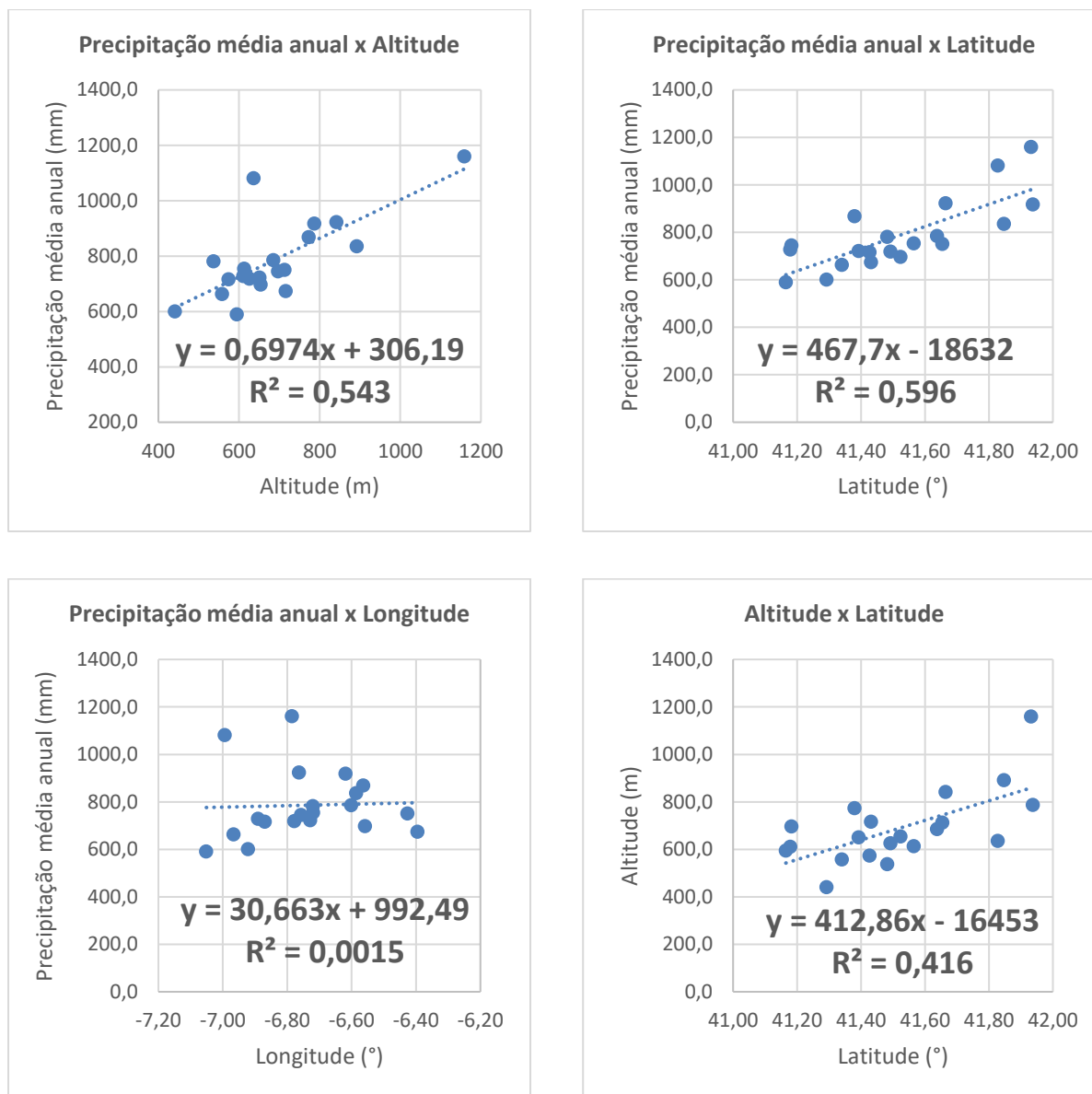


Figura 9: Análise de correlação da precipitação média anual com as variáveis geográficas das estações meteorológicas. Fonte: Autoria Própria.

Os resultados sugerem que a altitude exerce um papel importante no regime de precipitação, uma vez que o coeficiente de regressão para essa variável indica um aumento na precipitação média anual à medida que a altitude se eleva. Especificamente, o coeficiente obtido de 0,457 mm por metro indica que, ao subir um metro em relação ao nível do mar, espera-se um aumento de aproximadamente 0,457

mm na precipitação anual. Este dado é corroborado pelo valor-P baixo, de 0,007 (Tabela 3), que evidencia a significância estatística dessa relação. Assim, pode-se identificar que regiões de maior altitude tendem a registrar maiores volumes de precipitação.

A latitude também apresentou uma relação positiva com a precipitação média anual, com um coeficiente de 339,26 mm por grau. Este valor implica que, para cada grau adicional em direção ao norte, há uma tendência de aumento na precipitação anual média. O valor-P de 0,002 (Tabela 3) confirma a significância estatística desse coeficiente, sugerindo que a latitude é uma variável importante no modelo. Este resultado permite a suposição de que a localização geográfica no sentido norte-sul influencia diretamente os índices de precipitação.

Por outro lado, a longitude apresentou uma relação inversa com a precipitação, com um coeficiente de -247,50 mm por grau a oeste. Isso sugere que, ao mover-se para o oeste, a precipitação média anual tende a diminuir. O valor-P de 0,027 (Tabela 3) indica que essa relação é estatisticamente significativa, mas também sugere que o impacto da longitude é menos expressivo em comparação com as outras variáveis.

Tabela 3: Valores da estatística de regressão múltipla entre os parâmetros de Altitude, Latitude e Longitude, e a Precipitação média anual para o conjunto das estações meteorológicas selecionadas.

Parâmetro	Coefficientes	valor-P	Estatística de regressão	
Interseção	-15280,82	0,0016	R múltiplo	0,88
Altitude (m)	0,46	0,0074	R-Quadrado	0,78
Latitude (°N)	339,26	0,0025	R-quadrado ajustado	0,73
Longitude (°W)	-247,50	0,0271	Erro padrão	74,94

As estatísticas de regressão reforçam a qualidade do modelo. O R múltiplo de 0,88 indica uma correlação forte entre as variáveis explicativas (altitude, latitude e longitude) e a variável dependente (precipitação média anual). O valor do R² de 0,78 indica que 78% da variabilidade na precipitação anual pode ser explicada pelo modelo, indicando um ajuste substancial. Adicionalmente, o R² ajustado de 0,73 considera a quantidade de variáveis incluídas, confirmando que uma porção significativa da variabilidade da precipitação é efetivamente explicada pelo modelo. Ainda, o erro padrão, de 74,94, fornece uma estimativa da precisão do modelo, indicando que as

previsões de precipitação têm uma margem de erro razoável.

Por fim, utilização das metodologias de krigagem realizadas no software ArcGIS, das precipitações médias anuais, permitiu a criação de um mapa detalhado que representa a distribuição espacial das chuvas no distrito de Bragança. Observa-se uma clara variação de padrões pluviométricos ao longo do território, com as áreas de maior altitude, como Montezinho e Vinhais, apresentando os maiores volumes de precipitação, superiores a 1000 mm anuais. Estas áreas, localizadas no noroeste do distrito, destacam-se pelas tonalidades mais verdes na Figura 10, indicativas de alta pluviosidade, o que está de acordo com as elevações mais pronunciadas nessas regiões.

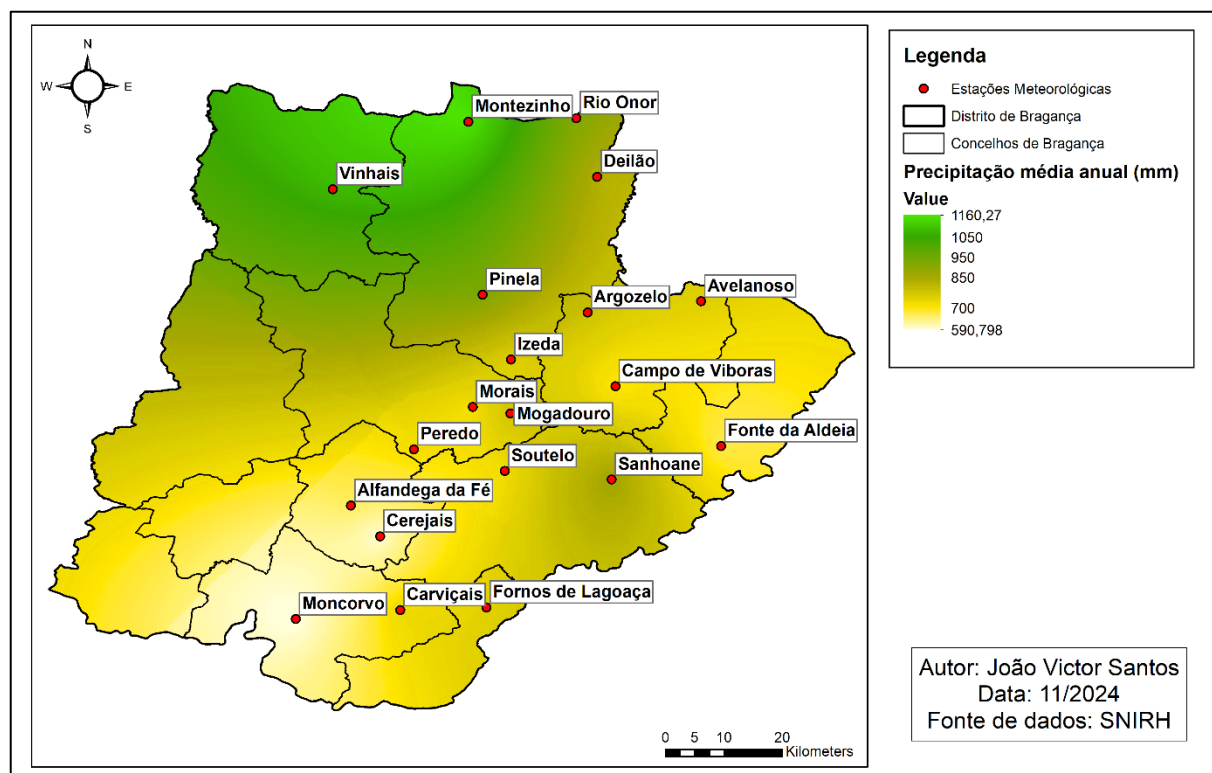


Figura 10: Mapa de precipitação média anual no Distrito de Bragança.

Fonte: Autoria Própria.

À medida que nos deslocamos para o sudeste, a precipitação diminui consideravelmente, especialmente nas áreas próximas a Mogadouro, Alfândega da Fé e Cerejais, que recebem menos de 600 mm anuais. Essas zonas estão representadas por cores mais claras no mapa, evidenciando uma menor

disponibilidade hídrica. A transição gradual na intensidade das cores demonstra a correlação inversa entre altitude e precipitação, resultado que era esperado dado o efeito orográfico, comum em regiões montanhosas

A krigagem foi fundamental para interpolar os valores entre as estações meteorológicas e fornecer uma visão mais contínua da variação espacial das chuvas, permitindo identificar claramente as regiões mais vulneráveis a períodos de seca prolongada, que coincidem com as áreas de menor precipitação no mapa.

Os resultados confirmam a importância da análise espacial das precipitações, evidenciando as diferenças significativas entre as áreas montanhosas, com maior disponibilidade hídrica, e as áreas de planície ao sul, mais suscetíveis à aridez.

Ainda, a análise temporal revelou uma tendência de maior concentração das precipitações nos meses de inverno (dezembro a fevereiro), que concentraram mais de 40% do total anual de precipitação, enquanto os meses de verão (junho a agosto) registraram valores muito baixos, caracterizando um período de seca sazonal. Esta variação sazonal, comum em regiões de clima mediterrâneo, é particularmente relevante para a compreensão da dinâmica hídrica da região e para o planejamento de recursos hídricos, já que a irregularidade das chuvas pode agravar a vulnerabilidade à seca, principalmente em áreas de menor precipitação.

4.2 Precipitações médias mensais de cada estação meteorológica

A análise das precipitações mensais no distrito de Bragança também se baseou nos dados históricos abrangendo um período de 40 anos, de 1957 a 1997, conforme citado anteriormente. A extração dos dados mensais permitiu calcular as médias e os desvios padrão das chuvas em cada estação meteorológica, para cada mês do ano, conforme apresentado na Tabela 4. Com esses valores, foi possível identificar padrões sazonais e entender melhor as flutuações mensais de precipitação, além de comparar o comportamento das chuvas em locais com diferentes altitudes e posições geográficas.

Os dados extraídos foram organizados ao longo de um ano hidrológico, permitindo observar o ciclo completo das chuvas em cada estação meteorológica.

Tabela 4: Parâmetros de média e desvio padrão das precipitações médias mensais de cada estação meteorológica, para cada mês do ano hidrológico. Fonte: Autoria Própria.

Estações Meteorológicas	Parâmetros	out	nov	dez	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set
Montezinho	Média	115,2	137,6	146,0	152,0	125,1	112,4	92,4	95,4	50,8	27,2	22,9	58,3
	Desvio Padrão	93,8	104,0	128,9	117,0	116,0	104,0	78,6	61,4	31,4	25,8	18,8	49,3
Vinhais	Média	115,2	129,0	143,1	137,3	136,5	93,1	86,3	86,3	49,4	23,2	20,5	57,8
	Desvio Padrão	83,1	89,8	111,1	87,8	112,9	73,3	67,1	48,1	40,0	26,5	23,2	51,2
Pinela	Média	99,7	115,3	132,7	131,4	116,3	75,6	70,8	72,6	46,7	18,3	15,9	43,0
	Desvio Padrão	82,7	86,5	126,3	101,2	104,4	73,0	47,3	49,6	43,8	27,0	19,2	40,0
Rio Onor	Média	98,0	112,9	130,5	124,7	111,2	74,6	66,0	70,3	41,7	19,1	14,9	48,7
	Desvio Padrão	79,4	85,4	115,4	95,9	96,5	71,1	50,5	44,6	38,2	21,9	15,9	44,4
Sanhoane	Média	89,0	105,5	119,5	110,7	100,1	70,5	72,1	73,4	46,9	17,3	12,4	47,4
	Desvio Padrão	79,0	95,1	111,0	83,9	88,5	61,6	56,1	50,6	42,6	22,2	16,7	56,9
Deilão	Média	87,6	99,5	107,7	103,0	99,7	68,0	67,8	72,2	42,8	20,4	17,3	44,1
	Desvio Padrão	66,0	72,7	87,7	81,6	84,5	57,1	52,0	44,1	34,9	24,3	18,9	33,1
Argozelo	Média	90,7	92,7	108,9	107,3	90,6	60,1	57,5	66,5	38,1	16,0	13,9	37,9
	Desvio Padrão	71,1	72,2	97,9	82,0	72,4	54,8	43,7	41,2	30,4	19,5	16,2	39,7
Mogadouro	Média	83,0	98,5	99,6	92,7	92,7	60,4	62,9	67,0	43,0	15,4	16,1	45,1
	Desvio Padrão	64,8	75,3	81,6	72,4	82,1	52,3	44,6	37,9	33,8	18,7	19,4	43,1
Izeda	Média	81,4	96,0	99,1	92,4	88,2	60,9	60,0	62,7	41,0	15,6	14,8	38,3
	Desvio Padrão	66,2	72,7	89,2	74,4	75,4	58,0	42,8	36,3	32,0	21,4	17,5	39,4
Avelanoso	Média	75,6	92,0	94,2	95,4	86,9	62,0	60,8	63,7	40,9	17,2	17,1	42,5
	Desvio Padrão	59,9	79,2	79,9	75,4	75,4	58,8	45,5	36,6	30,9	17,5	18,2	37,5
Fornos de Lagoaça	Média	78,9	93,2	91,6	94,0	89,4	62,0	62,4	66,3	39,2	11,4	12,2	43,8
	Desvio Padrão	62,1	70,3	72,8	69,4	74,4	53,0	44,7	41,9	28,5	14,9	15,6	42,8
Carviçais	Média	82,5	90,3	93,5	87,8	81,7	56,3	56,5	60,4	40,0	18,0	15,3	40,6
	Desvio Padrão	60,9	68,7	76,2	63,2	69,3	49,9	40,0	38,5	30,6	25,1	19,7	39,6
Soutelo	Média	78,4	90,0	93,9	82,7	81,3	56,2	57,5	64,9	40,5	17,0	14,0	40,2
	Desvio Padrão	60,6	69,4	77,5	63,7	73,5	47,7	41,7	40,9	28,5	22,1	17,2	40,9
Morais	Média	80,0	95,5	96,5	85,9	87,8	54,2	57,8	59,9	42,2	13,3	15,1	36,0
	Desvio Padrão	67,3	73,2	85,4	64,7	76,9	49,2	41,2	36,3	41,2	15,0	17,9	34,7
Peredo	Média	82,2	102,3	96,7	86,2	97,1	60,6	58,2	63,3	36,1	9,9	9,9	36,0
	Desvio Padrão	76,9	92,1	90,3	75,2	109,1	71,5	59,8	43,1	36,9	15,5	19,6	37,0
Campo de Vóboras	Média	71,6	83,6	86,0	80,3	77,4	53,3	54,8	63,5	39,6	18,0	14,3	38,3
	Desvio Padrão	52,7	73,2	73,4	64,8	70,1	46,8	36,7	49,0	32,3	21,4	17,9	39,0
Fonte da Aldeia	Média	69,2	84,2	81,8	78,8	79,0	50,7	60,3	61,4	42,1	14,0	11,4	35,3
	Desvio Padrão	55,2	73,4	68,7	63,4	75,5	42,8	39,3	35,5	31,6	15,8	13,4	37,0
Alfandega da fé	Média	79,0	81,1	82,7	73,5	73,5	51,9	53,7	58,2	38,0	11,7	16,2	37,4
	Desvio Padrão	65,6	64,5	74,6	58,8	66,8	43,7	39,3	34,6	30,2	15,6	20,0	35,4

Estações Meteorológicas	Parâmetros	out	nov	dez	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set
Cerejais	Média	65,6	72,4	77,8	67,1	66,3	45,3	46,7	53,4	35,1	15,3	13,9	33,3
	Desvio Padrão	46,5	57,4	63,2	50,3	55,1	37,5	34,2	30,6	25,6	19,8	17,3	30,6
Moncorvo	Média	62,6	73,1	68,1	62,3	62,1	42,3	46,7	48,9	37,8	12,2	10,6	34,1
	Desvio Padrão	51,7	59,1	54,8	49,2	53,0	38,1	36,1	26,6	29,5	16,5	11,8	33,3

A análise das precipitações médias mensais nas estações meteorológicas de Bragança mostra como a chuva varia de acordo com a estação e a localização. Estações como Montezinho, Pinela, Campo de Víboras e Moncorvo foram escolhidas para representar esses padrões, pois estão situadas em diferentes altitudes e posições geográficas, e em diferentes índices de aridez o que reflete bem a diversidade climática e as particularidades de cada local.

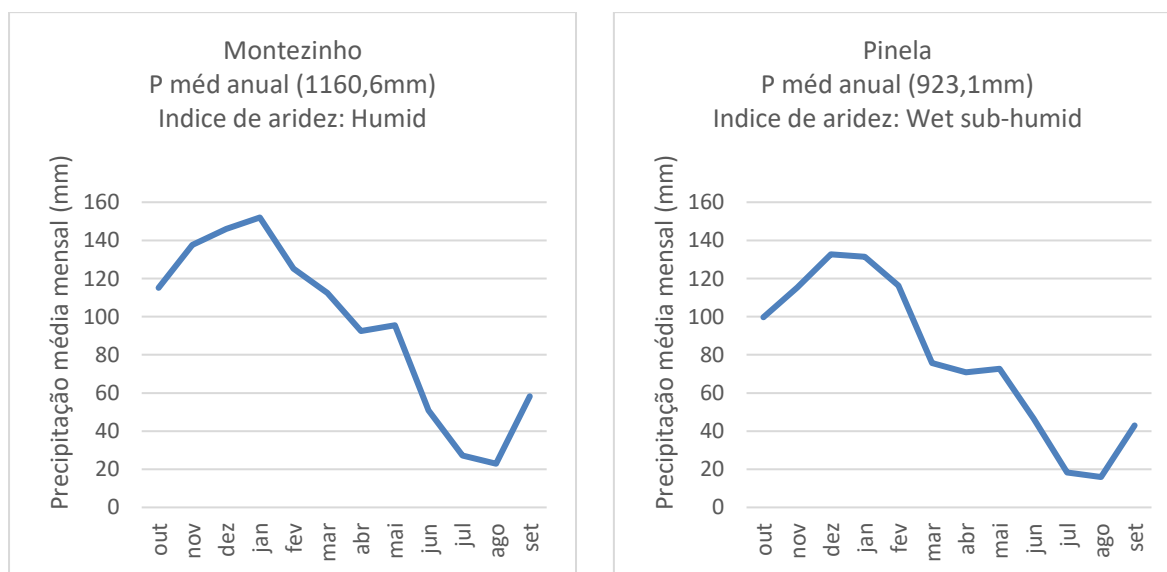
Em Montezinho, observa-se que os meses de inverno concentram os maiores volumes de chuva, com destaque para dezembro e janeiro, cujas médias ultrapassam 145 mm e 150 mm, respectivamente. Durante o verão, o volume de precipitação reduz-se significativamente, com os valores mais baixos em agosto, onde a média fica em torno de 22,90 mm. A variação interanual também é notável, especialmente nos meses de inverno, como indicado pelo desvio padrão em dezembro, que atinge 128,86 mm. Isso sugere que Montezinho experimenta anos de precipitação intensificada intercalados com anos de menor volume de chuva, característica comum em regiões de alta altitude, sujeitas a maior variabilidade climática.

Em Pinela, o comportamento das chuvas segue um padrão semelhante ao de Montezinho, com as maiores concentrações ocorrendo no inverno. Nos meses de dezembro e janeiro, as médias são próximas a 132 mm e 131 mm, respectivamente, o que confirma a sazonalidade típica da região. No entanto, Pinela apresenta valores de precipitação ligeiramente inferiores aos de Montezinho, o que pode ser atribuído a pequenas diferenças de altitude e posição geográfica. Durante o verão, a precipitação média também é baixa, com os menores valores em julho e agosto, que registram médias de 18 mm e 15 mm, respectivamente. A variabilidade entre os anos é mais evidente no inverno, com o maior desvio padrão em dezembro (126,31 mm), refletindo, novamente, a possibilidade de extremos pluviométricos.

Já em Campo de Víboras, o regime pluviométrico apresenta um caráter menos intenso em comparação com Montezinho e Pinela. As precipitações de inverno se concentram em dezembro e janeiro, com médias de 86 mm e 80 mm, respectivamente, enquanto os meses de verão são marcadamente secos, com o valor mais baixo em agosto (14,27 mm). O desvio padrão nos meses de inverno é relativamente elevado, indicando variabilidade interanual, mas ainda menor do que nas estações de maior altitude, como Montezinho. Esse comportamento pode ser uma resposta às influências de relevo menos acentuadas, o que reduz a intensidade e a variabilidade das chuvas.

Moncorvo, localizada em uma região mais baixa e ao sul do distrito, tem os menores índices de precipitação entre as estações analisadas. Ao longo do ano, as chuvas são mais escassas, com novembro registrando a maior média, em torno de 73 mm, e julho e agosto com menos de 15 mm. A variabilidade interanual é menor, como indicado pelo desvio padrão mais moderado em dezembro (54,76 mm), refletindo um regime de precipitação mais estável e menos sujeito a extremos.

A Figura 11 representa a variação da precipitação média mensal ao longo do ano hidrológico nas estações supra analisadas.



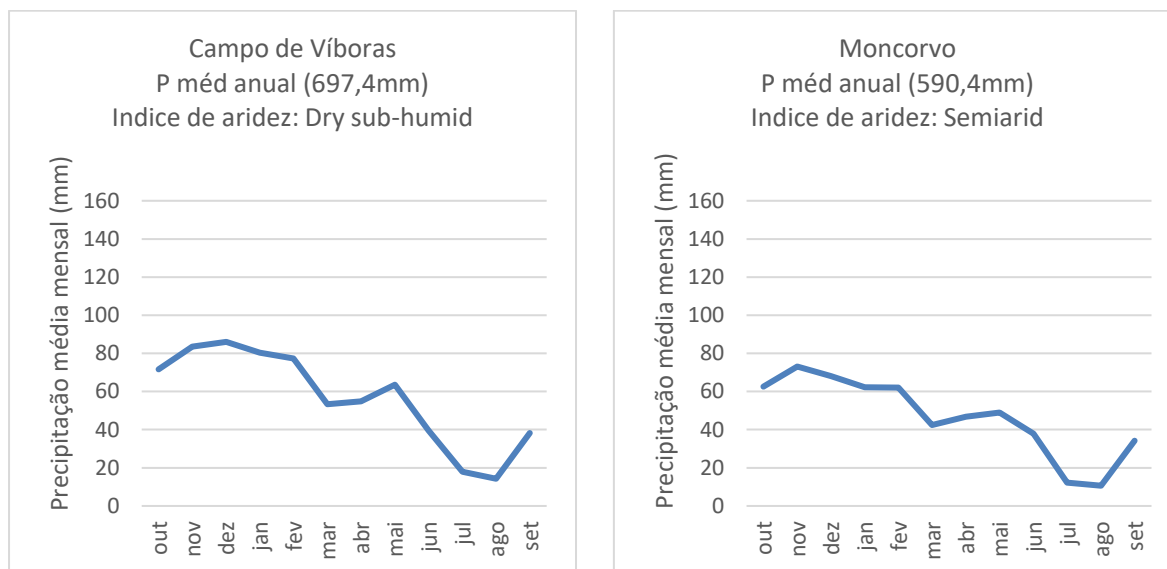


Figura 11: Variação da precipitação média mensal ao longo do ano hidrológico, nas estações de Montezinho, Pinela, Campo de Víboras e Moncorvo, respectivamente. Fonte: Autoria própria.

Os dados de precipitação média mensal foram utilizados para o cálculo do Índice de Precipitação Padronizado (SPI) em diferentes escalas temporais (1, 6 e 12 meses), permitindo avaliar de forma mais detalhada as condições de seca e umidade na região. Os valores de SPI calculados a partir dessas médias serão apresentados a seguir, abordando as variações de curto, médio e longo prazo e sua relevância para a gestão dos recursos hídricos em Bragança.

4.3 Valores de SPI 1, 6 e 12

A análise do Índice de Precipitação Padronizado (SPI) para os períodos de 1, 6 e 12 meses permitiu avaliar a variabilidade das condições de seca em diferentes escalas temporais no distrito de Bragança. O SPI-1, que reflete as condições de seca em curto prazo, indicou uma alta variabilidade mensal, com alguns episódios de seca moderada e severa registrados principalmente nos meses de verão, quando a precipitação é naturalmente mais baixa. Esta condição é típica de áreas com clima mediterrâneo, onde secas sazonais são frequentes, e o SPI-1 capturou com precisão esses eventos mais pontuais de escassez hídrica.

O gráfico de SPI 1 representado pela Figura 12 revela que a maioria das estações meteorológicas experimenta condições "próximas do normal" em mais de 80% do tempo, com algumas variações observadas entre as estações. Algumas estações, como Montenzinho e Morais, mostram episódios mais frequentes de seca moderada e severa, representados pelas seções em laranja claro e escuro. Montenzinho, por exemplo, apresenta 60 meses de seca moderada e 20 de seca severa, sugerindo maior suscetibilidade às flutuações de curto prazo.

Em contraste, o SPI-6, que avalia a seca em um período intermediário, mostrou tendências de seca mais prolongadas, particularmente associadas a períodos de baixa precipitação acumulada entre outono e inverno. Algumas estações no sul e sudoeste do distrito, como Mogadouro, registraram valores de SPI-6 abaixo de -1,5, indicando uma condição de seca severa em várias ocasiões ao longo dos anos analisados. Estes resultados sugerem que essas áreas são particularmente vulneráveis a episódios prolongados de falta de chuva, o que pode impactar a agricultura e a disponibilidade de água.

No gráfico de SPI 6, que reflete condições de seca em um período de seis meses (Figura 13), a distribuição de "próximo do normal" continua a ser predominante. Contudo, há um aumento na ocorrência de seca moderada e severa em relação ao SPI 1. Ainda, é possível perceber que a maioria das regiões registrou resultados superiores de seca extrema. Moncorvo, por exemplo, passou de 3 episódios de seca extrema, no SPI 1, enquanto no SPI 6, registrou 15 meses. Moncorvo, obteve resultados inferiores de seca extrema.

As condições de umidade também são mais evidentes no SPI 6. Estações como Peredo e Montenzinho mostram um maior número de meses de "muito úmido" e "extremamente úmido" (até 20 meses em Montenzinho). O aumento de condições de seca prolongada em estações como Avelanoso e Izeda também chama a atenção, o que reforça a vulnerabilidade dessas áreas a períodos de seca de médio prazo.

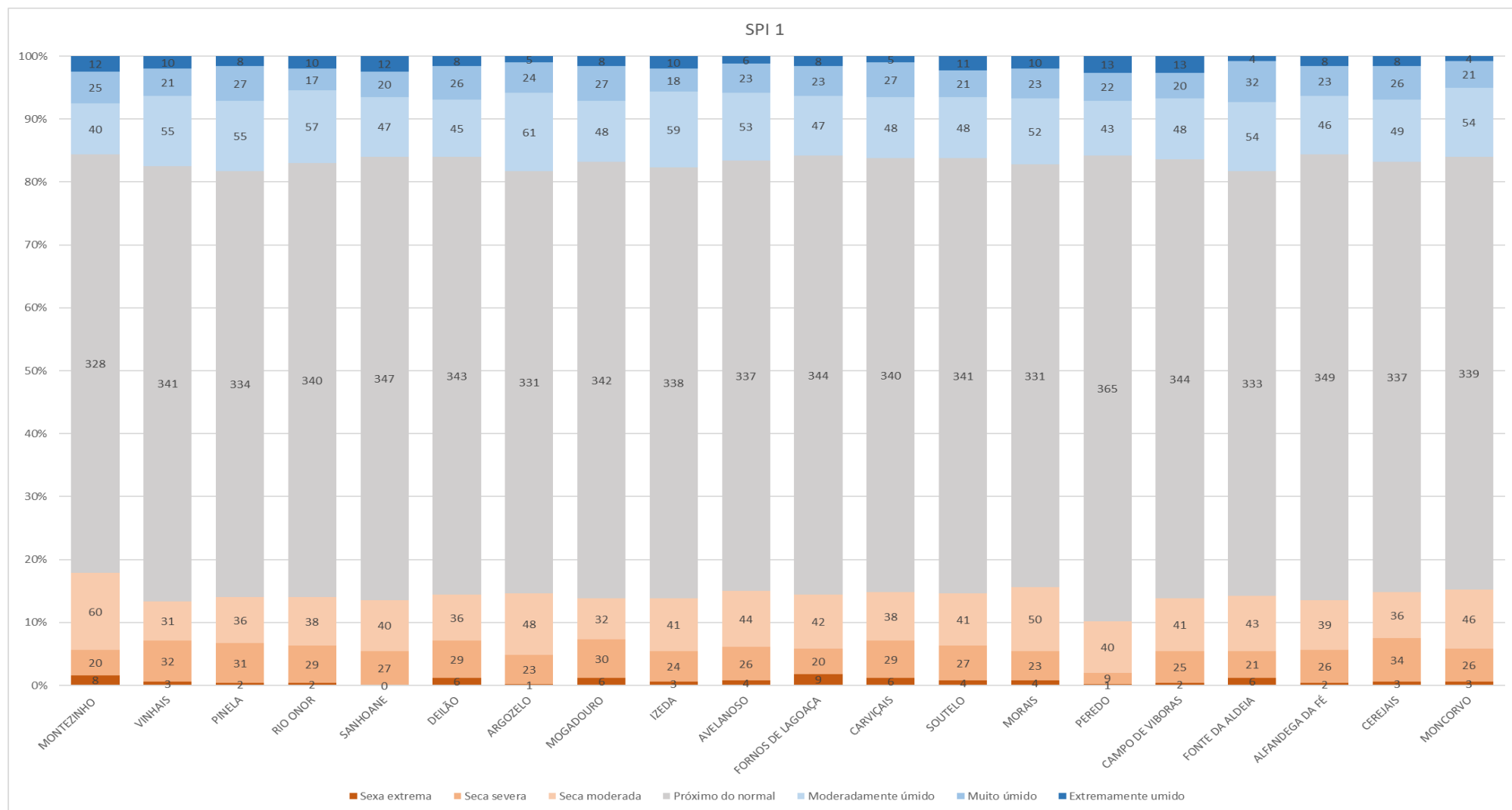


Figura 12: Frequência de classes agregadas de SPI 1 das séries de precipitação das estações meteorológicas (número de meses nas colunas, num total de 480 meses). Fonte: Autoria própria.

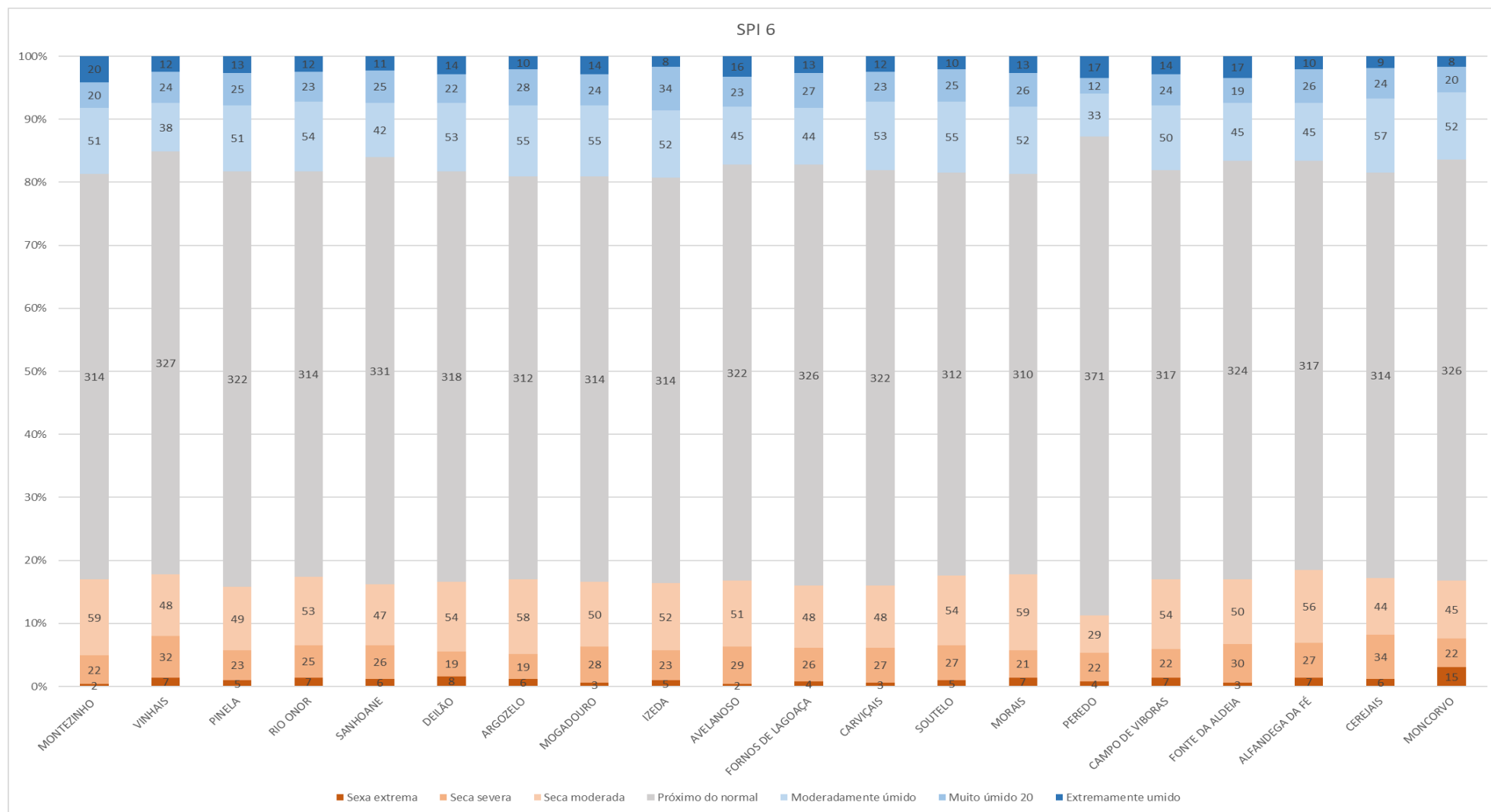


Figura 13: Frequência de classes agregadas de SPI 6 das séries de precipitação das estações meteorológicas (número de meses nas colunas, num total de 480 meses). Fonte: Autoria própria.

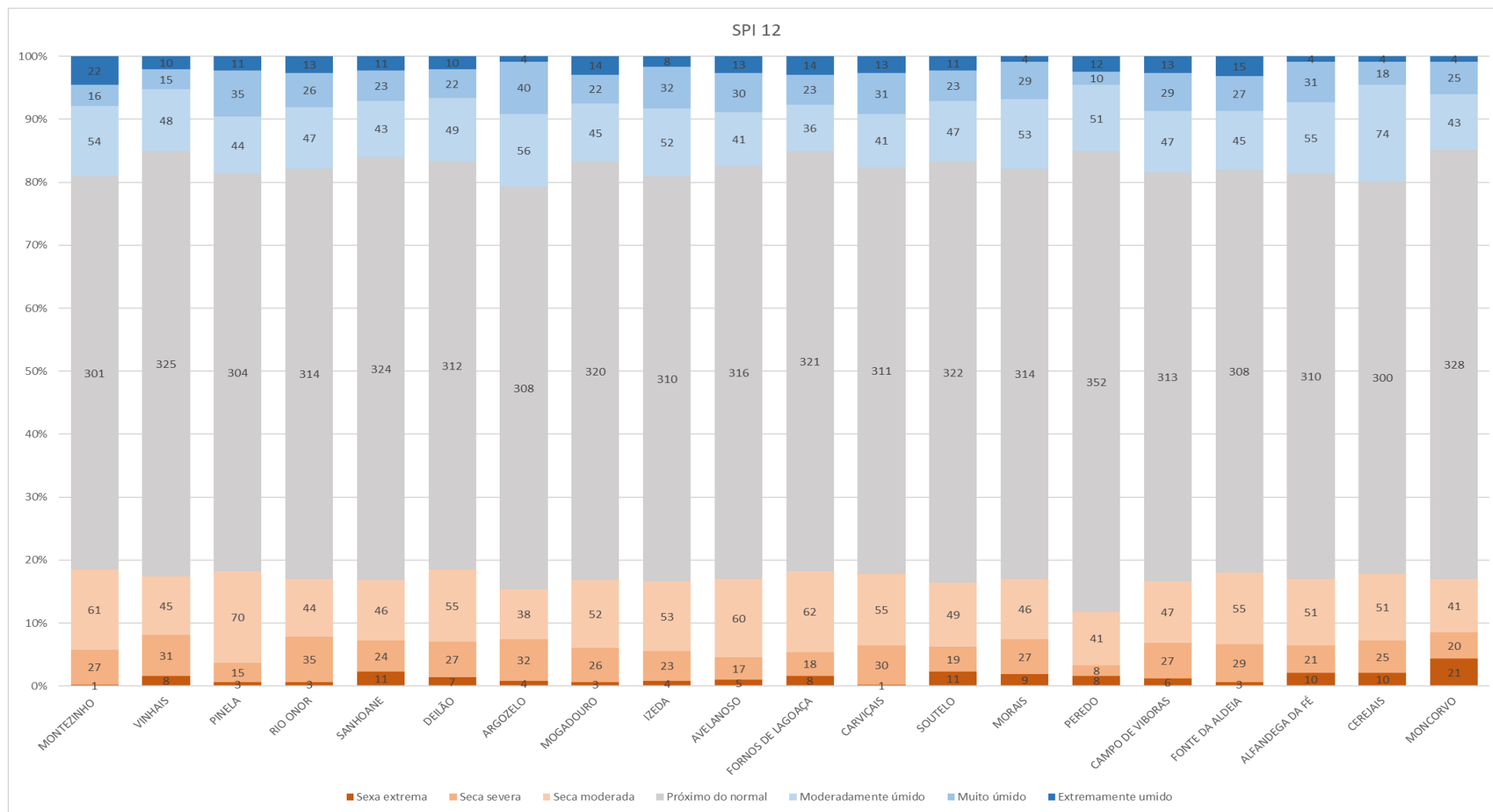


Figura 14: Frequência de classes agregadas de SPI 12 das séries de precipitação das estações meteorológicas (número de meses nas colunas, num total de 480 meses). Fonte: Autoria própria.

O gráfico de SPI 12 (Figura 14), que representa um período anual, revela uma predominância ainda maior de condições "próximas do normal" em quase todas as estações. No entanto, nota-se diferença nos meses de seca extrema em algumas regiões. Enquanto Montezinho apresentou 8 meses de seca extrema no SPI-1, nos gráficos de SPI-6 e SPI-12 a estação apresentou 2 e 1 meses, respectivamente. Estações como Sanhoane, Soutelo e Moncorvo registram um aumento significativo de meses de seca severa, o que indica uma alta suscetibilidade a secas de longo prazo

Ao comparar os dados de precipitação média anual com os valores de SPI das estações, observa-se uma relação clara entre altitude e padrões de seca. As estações com maiores altitudes, como Montezinho (1159 m), apresentam precipitações mais elevadas (1160,6 mm) e, conseqüentemente, tendem a mostrar índices de SPI que indicam condições mais úmidas. Isso é consistente com os valores de SPI que mostram uma predominância de condições próximas ao normal e até moderadamente úmidas.

Por outro lado, estações em altitudes mais baixas, como Cerejais (601 m) e Moncorvo (590,4 m), apresentam menores precipitações anuais (441 mm e 595 mm, respectivamente) e uma maior incidência de SPI indicando condições de seca. Nesses locais, os gráficos de SPI sugerem maior suscetibilidade à seca, com uma presença significativa de seca moderada, severa e extrema.

De forma a resumir as informações supracitadas, foi realizada uma média percentual dos meses de ocorrência das classes "próximo do normal" ou mais secos, para o conjunto das 20 estações meteorológicas selecionadas, conforme a Tabela 5.

Tabela 5: Percentagem de ocorrência de meses classificados como próximos do normal ou mais secos, de acordo com o SPI (1957-1997): média do conjunto das 20 estações selecionadas. Fonte: Autoria própria.

Classes SPI	SPI 1	SPI 6	SPI 12
	Percentagem de ocorrência		
Próximo do normal	69,0%	65,9%	65,5%
Secas	14,3%	16,6%	17,0%
Seca severa e extrema	5,9%	6,3%	6,4%
Seca extrema	0,8%	1,1%	1,4%

A classe “Próximo do normal” representa a maior parte dos meses em todas as escalas SPI, indicando condições climáticas relativamente estáveis e com precipitação regular. A percentagem de ocorrência é ligeiramente maior para SPI 1 (69,0%), reduzindo-se gradualmente para SPI 6 (65,9%) e SPI 12 (65,5%). Esse decréscimo indica que, à medida que as escalas temporais se ampliam, os meses classificados como “Próximo do normal” tornam-se menos frequentes.

Em contraste, a categoria “Secas” apresenta a segunda maior percentagem de ocorrência e mostra um aumento conforme aumenta o período de análise, com 14,3% dos meses classificados como secos em SPI 1, 16,6% em SPI 6 e 17,0% em SPI 12. Meses classificados como “Seca severa e extrema” têm uma ocorrência menor em comparação com o acumulado das secas, mas seguem uma tendência similar de aumento nas escalas temporais: 5,9% para SPI 1, 6,3% para SPI 6 e 6,4% para SPI 12. O mesmo ocorre na categoria de “Seca extrema”, onde a percentagem de ocorrência é de 0,8% para SPI 1, aumentando para 1,1% em SPI 6 e 1,4% em SPI 12. Este crescimento ao longo das escalas temporais mais longas indica que os eventos de seca tendem a se tornar mais visíveis e preocupantes em períodos de observação mais amplos.

A correlação entre precipitação média anual e a quantidade de meses de cada classe SPI, reflete as influências orográficas na distribuição espacial da precipitação e na suscetibilidade à seca. A Tabela 6 indica os valores de coeficiente de correlação de cada SPI com a precipitação média anual, para as classes de “próximo ao normal”, ao acumulado de meses de “Seca moderada, seca severa e seca extrema” representado por “Secas”, ao acumulado de “Seca severa e seca extrema” e aos meses de seca extrema.

Tabela 6: Valores de coeficiente de correlação de SPI 1, SPI 6 e SPI 12 com a Precipitação média anual, para cada classe de SPI. Fonte: Autoria própria.

Classes SPI	SPI 1	SPI 6	SPI 12
	Coeficiente de Correlação (R)		
Próximo do normal	-0,24	-0,06	-0,14
Secas	0,24	0,07	0,24
Seca severa e extrema	0,15	-0,27	-0,04
Seca extrema	0,14	-0,27	-0,45

Em análise, os valores de coeficiente de correlação negativo indicados na classe “Próximo ao normal”, indica que à medida que aumenta-se a precipitação, a quantidade de meses desta classe tende a diminuir nos SPI 1, 6 e 12, sendo mais expressiva a relação no SPI 1.

Em contrapartida, quanto ao acumulado de meses de seca, todos os coeficientes de correlação foram positivos. Ou seja, com o aumento da precipitação média anual, aumenta a quantidade de meses secos nos SPI 1, 6 e 12, sendo mais expressivo nos SPI 1 e 12.

Os coeficientes de correlação do acumulado de meses de seca severa e seca extrema, sugerem que no SPI 1, que apresentou coeficiente positivo, com o aumento da precipitação, ocorre o aumento de meses de secas severas e extremas. Contudo, no SPI 6, o aumento da precipitação resulta em uma diminuição da quantidade meses de seca severa e extrema. Ainda, apesar de no SPI 12 apresentar um coeficiente negativo, sugerindo o mesmo padrão apresentado no SPI 6, o valor do seu coeficiente de correlação é próximo a 0 (-0,04), indicando que a influencia do aumento da precipitação é menor.

Quando analisados os coeficientes de correlação dos meses de seca extrema em comparação com a precipitação média anual, nota-se que no SPI 1 e SPI 6, a tendencia segue a mesma do acumulado de meses de seca severa e seca extrema. A diferença está no SPI 12, onde indica forte relação entre o aumento da precipitação, e a diminuição de meses de seca extrema no conjunto das estações meteorológicas analisadas no distrito de Bragança.

O gráfico na Figura 15, representa o exposto acima, notando as retas de diminuição do coeficiente de variação das classes SPI analisadas.

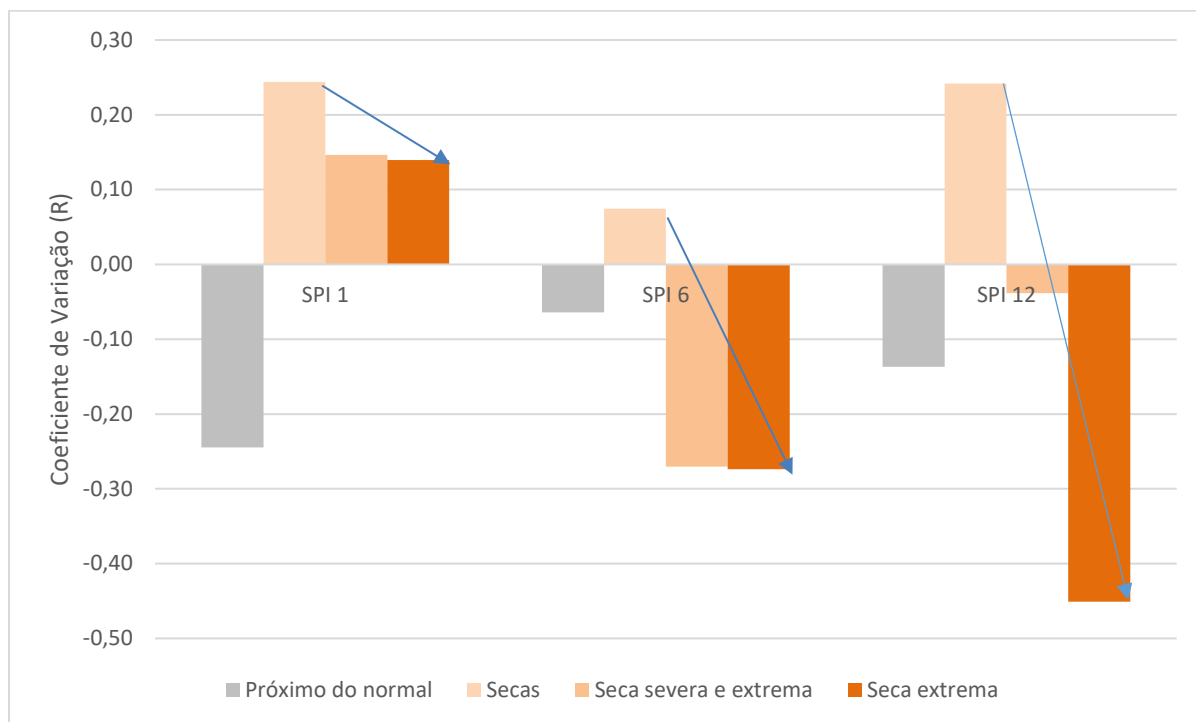


Figura 15: Variação dos coeficientes de correlação, do acumulado de meses de secas, secas severas e extremas e secas extremas. Fonte: Autoria própria.

Em termos espaciais, quanto maior a altitude, maior a precipitação e, portanto, menor a severidade dos índices de seca ao longo dos diferentes períodos analisados (SPI 1, 6 e 12 meses).

Os mapas de porcentagem de ocorrências de meses de seca moderada, severa e extrema, desenvolvidos por meio da krigagem para os índices SPI 1, SPI 6 e SPI 12, revelam padrões espaciais distintos na susceptibilidade à seca no distrito de Bragança. Para o SPI 1, que reflete a variação da seca em curtos períodos (1 mês), observa-se que as secas moderadas estiveram presentes em maior porcentagem no norte do Distrito, com estações como Montezinho chegando a 10% (Figura 16). As secas severas apresentam maior incidência nas áreas à Leste do Distrito, como Argozelo e Avelanoso, com valores percentuais próximos a 5% (Figura 17). As maiores porcentagens de seca extrema foram observadas nas estações de Montezinho de Fornos de Lagoaça (Figura 18). Essas regiões são indicadas por cores mais intensas nos mapas, refletindo a maior vulnerabilidade a secas curtas nessas estações.

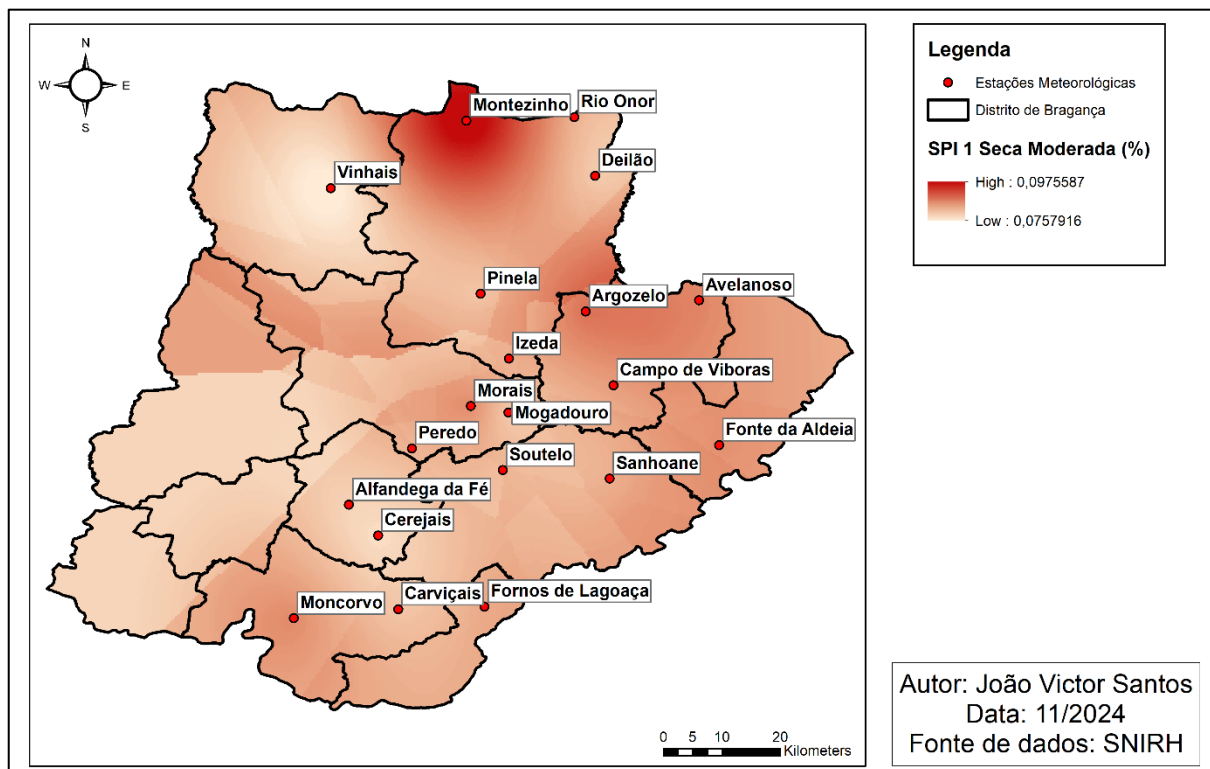


Figura 16: Mapa de Seca Moderada, para o SPI 1. Fonte: Autoria Própria

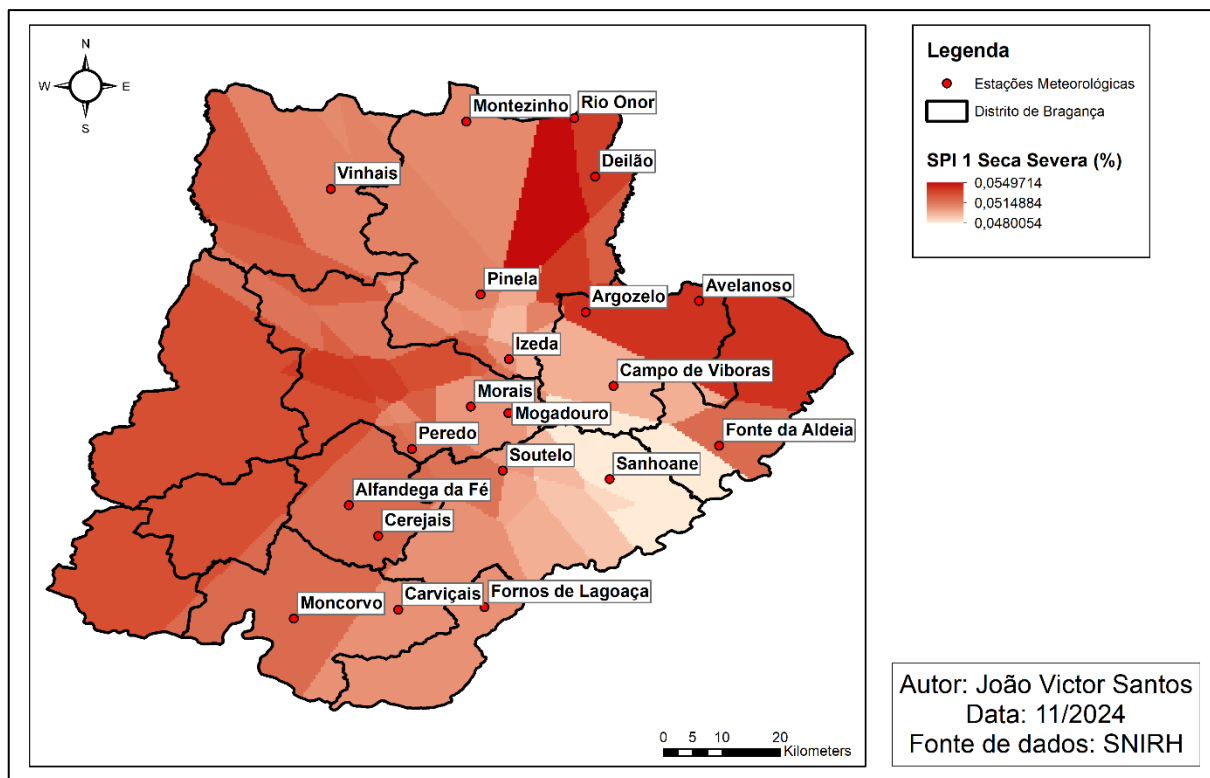


Figura 17: Mapa de Seca Severa, para o SPI 1. Fonte: Autoria Própria

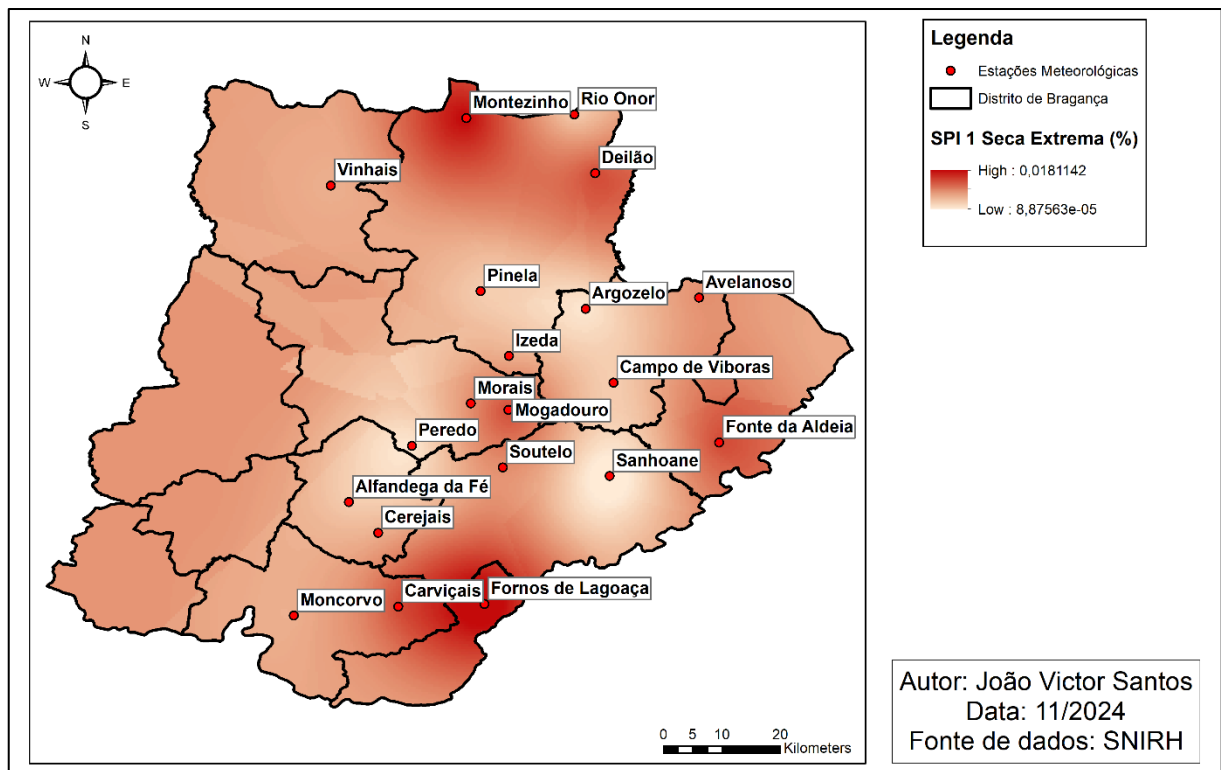


Figura 18: Mapa de Secca Extrema, para o SPI 1. Fonte: Autoria Própria

No SPI 6, que representa períodos de seis meses consecutivos, as secas moderadas tornam-se mais expressivas, com percentuais variando de 9% a 12% na totalidade do território. Áreas a Leste do território apresentam maior ocorrência de meses com secca moderada (Figura 19). As secas severas aumentaram sua percentagem em grande parte do território, destacando-se como regiões críticas nesse intervalo temporal (Figura 20). Isso indica que, além das secas curtas, essas áreas também estão sujeitas a eventos de secca mais prolongados. Já para secas extremas, as maiores incidências estiveram concentradas no sudoeste, em regiões com menor índice pluviométrico (Figura 21).

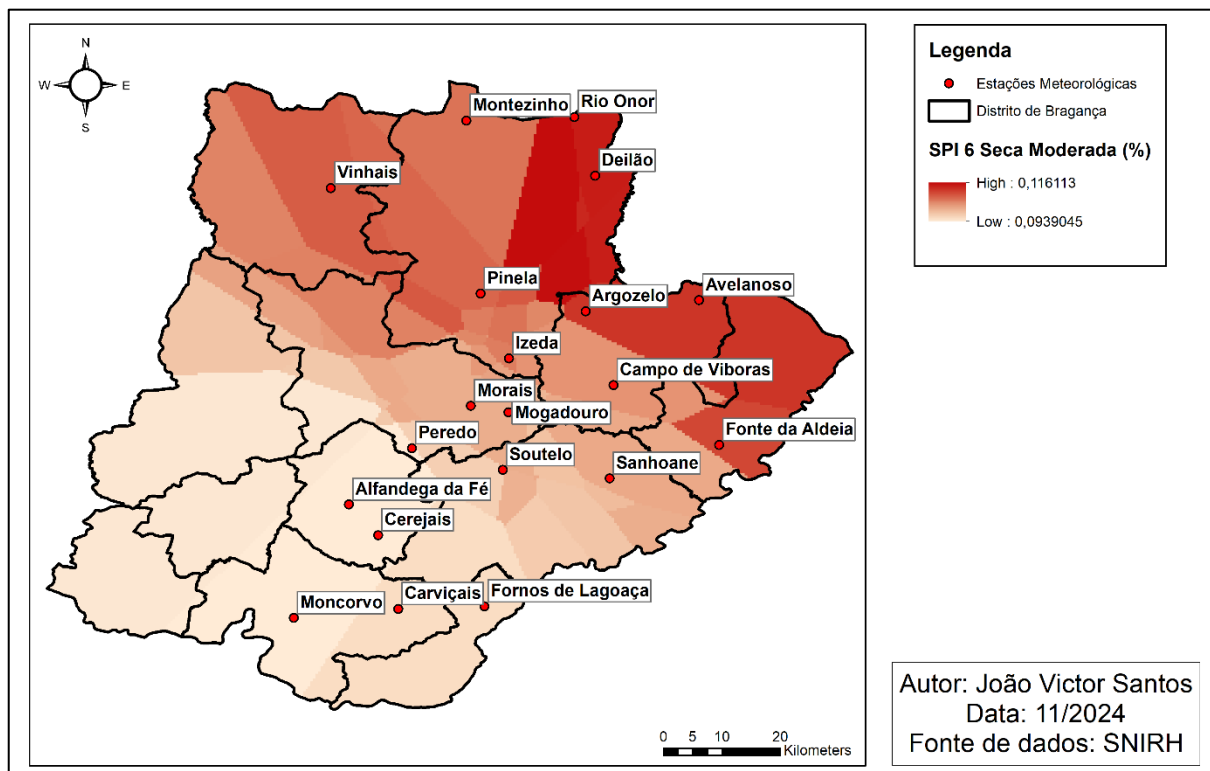


Figura 19: Mapa de Seca Moderada, para o SPI 6. Fonte: Autoria própria.

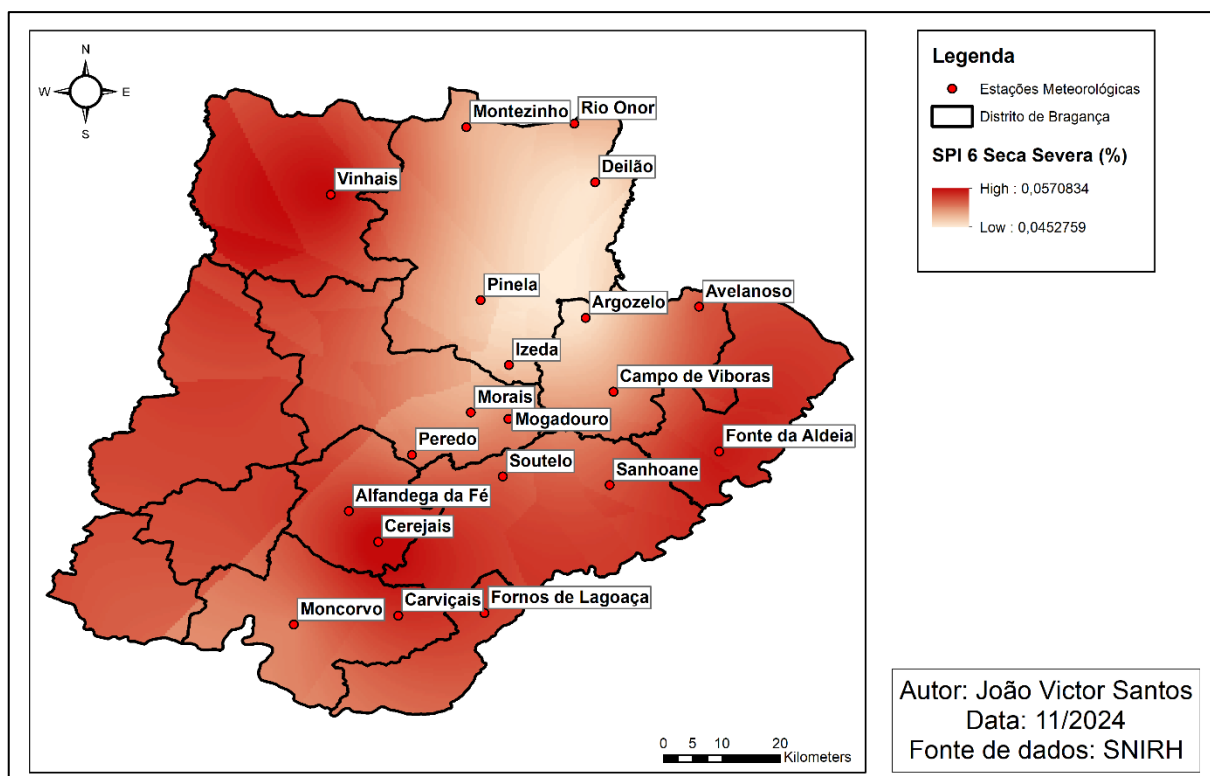


Figura 20: Mapa de Seca Severa, para o SPI 6. Fonte: Autoria Própria

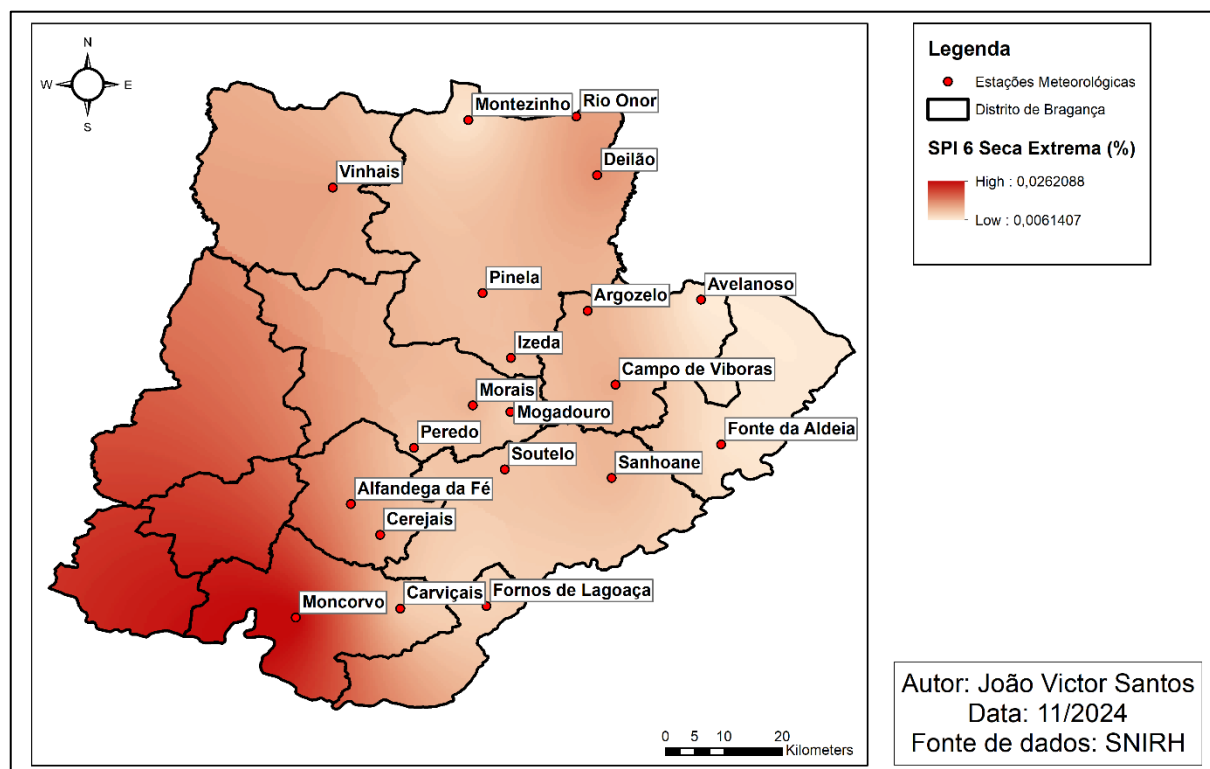


Figura 21: Mapa de Secca extrema, para o SPI 6. Fonte: Autoria própria.

O SPI 12, assim como no SPI 6, as porcentagens de secca moderada estiveram mais altas em todo o território, com porcentagens variando de 8,5% a 12,5%, sendo mais expressivas no sudoeste do território (Figura 22). As secas severas variam de 4,3% a 5,6%, contudo, diferente do SPI 6, as maiores porcentagens se concentraram a norte e leste do território (Figura 23). As secas extremas aparecem em maiores porcentagens, concentradas a sudoeste do território, com os maiores valores em estações como Moncorvo (Figura 24). Este resultado sugere que, ao longo de um ciclo anual, as áreas de menor altitude e menor precipitação apresentam maior susceptibilidade a longos períodos de secca, com um padrão de secca severa menos acentuado que nos índices de SPI mais curtos.

Ressalta-se que em alguns mapas, a krigagem por interpolação resultou em divisões lineares insatisfatórias, dificultando a identificação da localização das estações em relação às porcentagens de meses de ocorrência das secas.

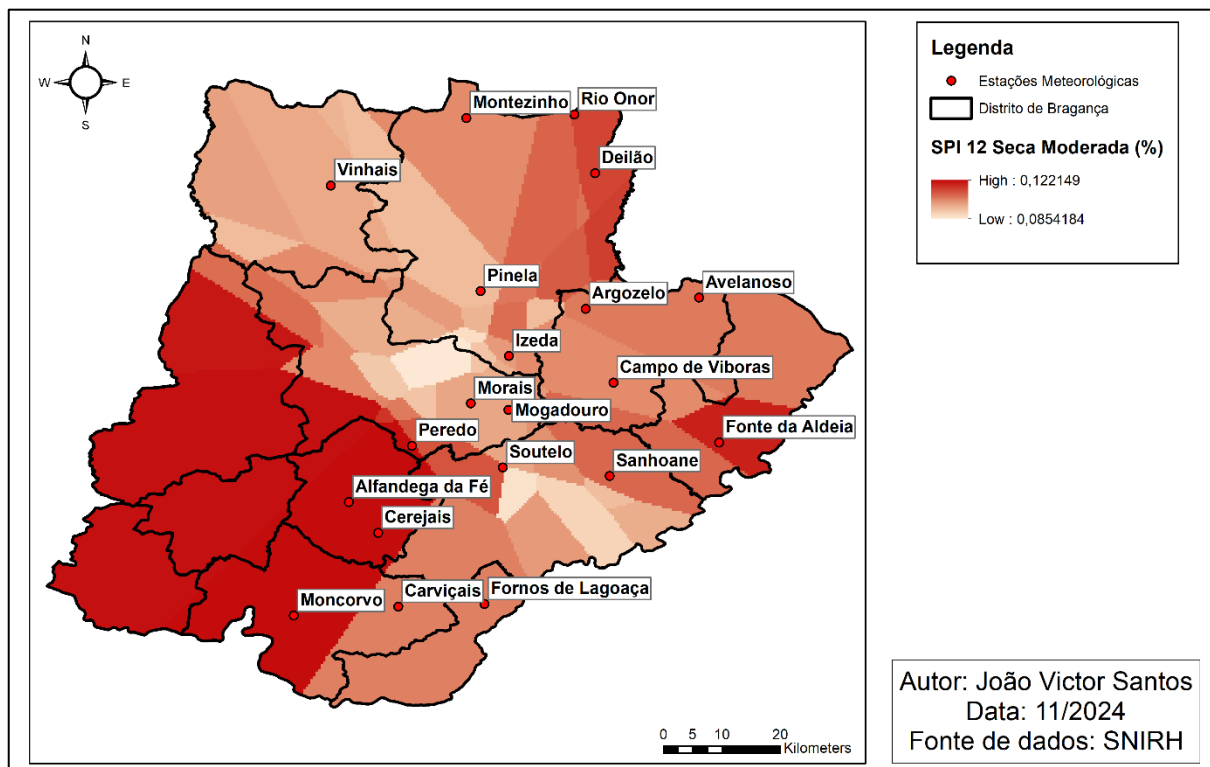


Figura 22: Mapa de Secca moderada, para o SPI 12. Fonte: Autoria própria.

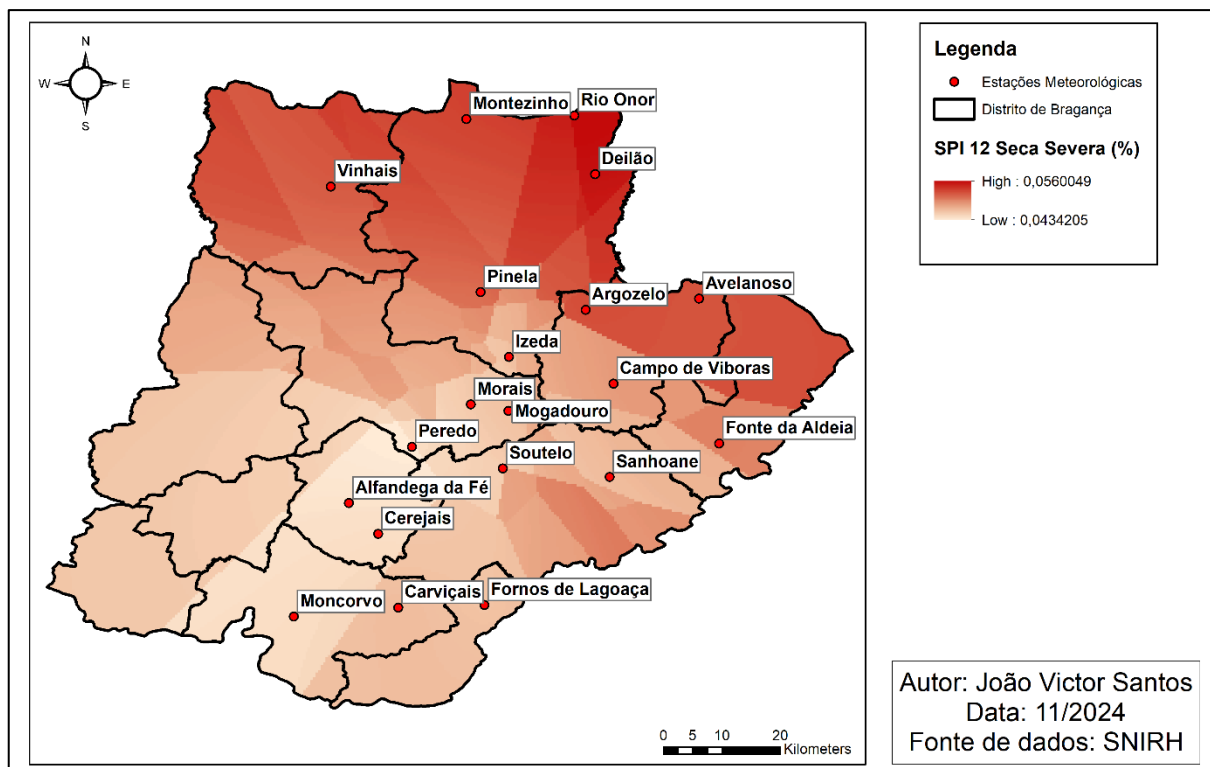


Figura 23: Mapa de Secca Severa, para o SPI 12. Fonte: Autoria própria.

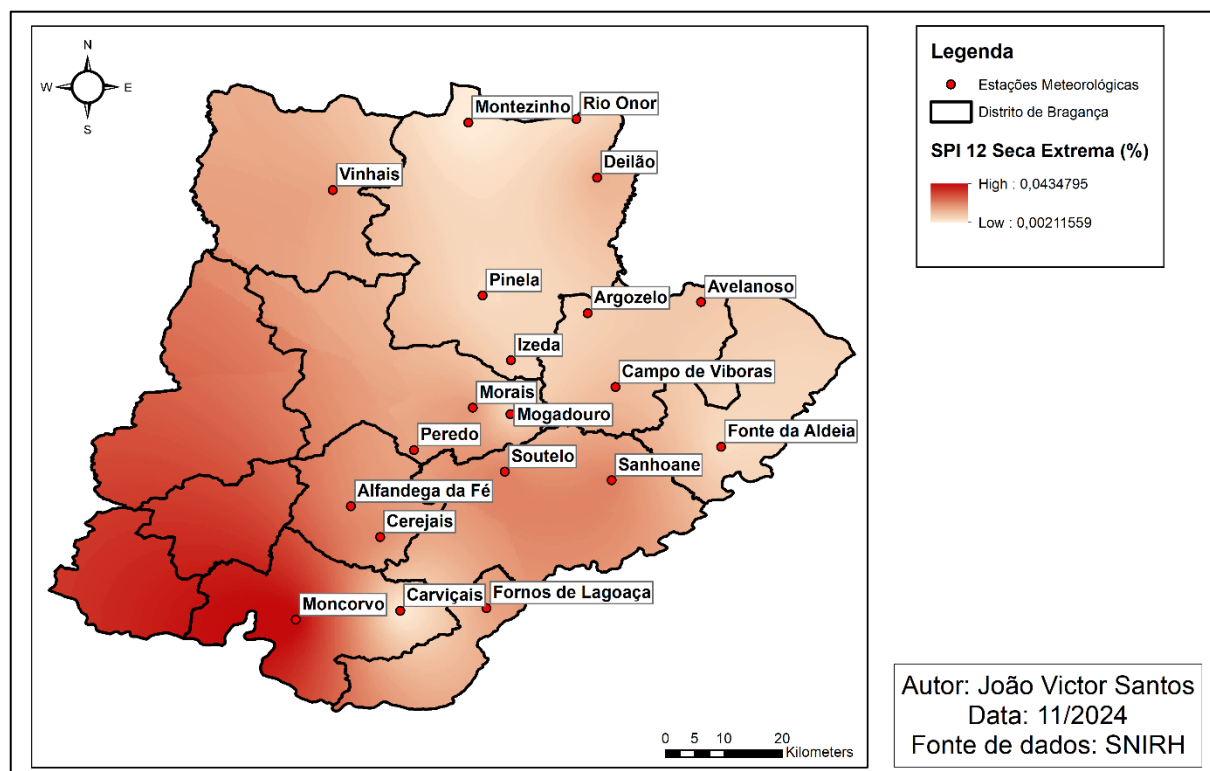


Figura 24: Mapa de Seca Extrema, para o SPI 12. Fonte: Autoria própria.

4.4 Tendências na variação temporal da precipitação

Os dados de precipitação mensal obtidos ao longo dos 40 anos de análise (1957 – 1997), permitiu realizar uma análise na tendência da variação temporal da precipitação em cada estação meteorológica. Para isso, foi realizada uma análise estatística de regressão linear, com base nos 480 valores de precipitação mensal e de cada mês da série de dados. A Tabela 7 expressa os resultados da análise estatística.

Tabela 7: Parâmetros estatísticos da regressão linear dos dados de precipitação mensal ao longo de 40 anos de dados (1957-1997). Fonte: Autoria Própria.

Estações Meteorológicas	b	a	R ²
Montezinho	-0,00324	186,56	0,02175
Vinhais	0,00049	75,98	0,00064
Pinela	-0,00210	137,63	0,01186
Rio Onor	-0,00085	100,11	0,00214
Sanhoane	-0,00220	134,50	0,01556
Deilão	-0,00025	76,42	0,00028
Argozelo	-0,00018	70,15	0,00013
Mogadouro	-0,00157	109,29	0,01175

Estações Meteorológicas	b	a	R ²
Izeda	-0,00117	95,79	0,00649
Avelanoso	-0,00166	109,28	0,01361
Fornos de Lagoaça	-0,00181	113,37	0,01712
Carviçais	-0,00103	89,56	0,00605
Soutelo	-0,00052	74,47	0,00151
Morais	0,00023	54,01	0,00026
Peredo	-0,00053	76,67	0,00099
Campo de Viboras	0,00017	51,93	0,00017
Fonte da Aldeia	-0,00145	96,69	0,01283
Alfandega da Fé	0,00026	47,49	0,00042
Cerejais	-0,00043	61,62	0,00165
Moncorvo	-0,00147	88,51	0,02005

Os resultados obtidos dos coeficientes de regressão linear para a precipitação mensal de 20 estações meteorológicas ao longo de 40 anos (1957-1997) permite identificar tendências regionais e características climáticas importantes. O coeficiente b, que indica a tendência da precipitação ao longo do tempo, desempenha um papel fundamental na compreensão da dinâmica de longo prazo das chuvas na região.

De forma geral, 80% das estações apresentou valores negativos de b, indicando uma tendência predominante de redução na precipitação ao longo do período analisado. Entre as estações com os valores mais negativos, destacam-se Montezinho ($b=-0,00324$) e Pinela ($b=-0,00210$), sugerindo declínios mais acentuados na precipitação mensal.

Por outro lado, algumas estações, como Vinhais ($b=0,00049$), Morais ($b=0,00023$) e Campo de Viboras ($b=0,00017$), exibem coeficientes b positivos, indicando um leve aumento na precipitação ao longo das décadas analisadas. Apesar desses valores positivos, o impacto é pequeno, e o coeficiente de determinação (R²) associado a essas regressões é baixo, sugerindo que as tendências identificadas são relativamente fracas e podem estar associadas a variações naturais ou a eventos climáticos específicos.

A variação nos valores de b entre as estações também reflete as diferenças topográficas e climáticas locais. Por exemplo, Montezinho, que possui o maior valor

absoluto negativo de b , está situada em uma área de maior altitude e maior precipitação média anual, o que pode indicar que áreas úmidas são mais suscetíveis a reduções consistentes ao longo do tempo. Por outro lado, estações em áreas mais secas, como Alfândega da Fé ($b=0,00026$), apresentam coeficientes próximos de zero, indicando estabilidade relativa nas chuvas mensais ao longo das quatro décadas.

Os coeficientes R^2 baixos, observados em praticamente todas as estações (variando de 0,00013 a 0,02175), sugerem que a precipitação mensal ao longo dos 40 anos analisados apresenta alta variabilidade e que as tendências lineares explicam uma pequena fração dessa variação. Isso indica que outros fatores, como variabilidade interanual, sazonalidade ou mudanças climáticas não lineares, podem desempenhar papéis significativos na dinâmica da precipitação.

Por fim, os resultados mostram que a maior parte das estações apresenta valores de b consistentes com uma redução gradual das chuvas. Adicionalmente, o pequeno número de estações com valores positivos de b mostra que as tendências de aumento são limitadas e localizadas.

4.5 Tendências na variação temporal do SPI

Em paralelo, os dados de precipitação mensal, somado aos cálculos de SPI 1, 6 e 12 suprecitados, permitiram avaliar as tendências da variação do SPI, ao longo dos 40 anos de dados.

Tabela 8: Parâmetros estatísticos da regressão linear dos dados de SPI mensal ao longo de 40 anos de dados (1957-1997). Fonte: Autoria Própria

Estações	SPI1		SPI6		SPI12	
	b	R^2	b	R^2	b	R^2
Montezinho	-0,0005	0,006	-0,002	0,083	-0,0028	0,150
Vinhais	0,0004	0,003	0,0006	0,007	0,0004	0,002
Pinela	-0,0008	0,014	-0,002	0,082	-0,0028	0,153
Rio Onor	-0,0004	0,003	-0,001	0,021	-0,0016	0,047
Sanhoane	-0,001	0,021	-0,0022	0,093	-0,003	0,172
Deilão	-0,00006	0,000	-0,0004	0,004	-0,001	0,018

Estações	SPI1		SPI6		SPI12	
	b	R ²	b	R ²	b	R ²
Argozelo	0,00002	0,000	-0,0002	0,001	-0,0006	0,007
Mogadouro	-0,0008	0,012	-0,0019	0,073	-0,0029	0,165
Izeda	-0,0007	0,010	-0,0016	0,053	-0,0024	0,111
Avelanoso	-0,0006	0,009	-0,002	0,081	-0,003	0,179
Fornos de Lagoaça	-0,0009	0,017	-0,0024	0,113	-0,0033	0,216
Carviçais	-0,0007	0,010	-0,0015	0,043	-0,0022	0,090
Soutelo	-0,0003	0,002	-0,0007	0,010	-0,0014	0,037
Morais	0,0001	0,000	0,0003	0,002	0,000009	0,000
Peredo	0,0003	0,002	-0,00007	0,000	-0,0003	0,002
Campo de Viboras	0,00001	0,000	-0,0001	0,000	-0,0005	0,005
Fonte da Aldeia	-0,0007	0,010	-0,0019	0,072	-0,0029	0,164
Alfandega da Fé	0,0002	0,001	0,00005	0,000	0,0001	0,000
Cerejais	-0,0004	0,004	-0,001	0,019	-0,0017	0,057
Moncorvo	-0,0012	0,032	-0,0026	0,137	-0,0036	0,256

A análise dos coeficientes de regressão linear (b e R²) calculados para 20 estações meteorológicas na região estudada, considerando as escalas temporais SPI1, SPI6 e SPI12, revelou padrões importantes relacionados à precipitação média mensal. De maneira geral, o coeficiente b, que expressa a variação dos valores de SPI ao longo do tempo, assim como na tendência da precipitação mensal, apresentou valores predominantemente negativos nas três escalas analisadas. Isso significa que, com o passar do tempo, os valores de SPI tendem a diminuir na maioria das estações meteorológicas, e consequentemente, caracterizar como mais secas as regiões, com base na classificação proposta por McKee (1993). Essa tendência é particularmente mais evidente em períodos mais longos, como o SPI6 e o SPI12.

Na escala mensal (SPI1), os valores médios de b (-0,0004) foram os menos negativos, refletindo uma relação mais fraca entre o aumento das secas no curto prazo com o passar dos anos. Por outro lado, na escala semestral (SPI6), o valor médio de b tornou-se mais negativo (-0,0011), com maior consistência na resposta das estações às variações de SPI. Esse padrão se intensifica ainda mais na escala anual (SPI12), onde o coeficiente médio de b atinge -0,0018, e a mediana reforça essa tendência negativa (-0,0020). Essa evolução ao longo das escalas temporais evidencia que as secas são mais influenciadas pela precipitação acumulada em períodos mais longos.

Em contrapartida, nota-se os valores positivos b em algumas estações como Vinhais, Morais, Alfandega da Fé, que se repetem em todas as escalas de análise (SPI 1, 6 e 12). Paralelo a isso, observa-se que nessas estações, o padrão se repete em comparação com os coeficientes de correlação apresentados para as tendências de variação da precipitação apresentado na Tabela 7, onde os coeficientes também foram positivos. Ainda, estações como Campo de Viboras, Argozelo e Peredo que apresentam coeficiente positivo em SPI 1, quando aumentada a análise temporal acumulada, a tendência é de redução dos valores de SPI ao longo dos anos.

Os valores destacados na análise estatística (como quartis e extremos) reforçam a interpretação dos dados. Em SPI1, os coeficientes b estão concentrados em torno de zero, com o intervalo interquartil indicando maior variabilidade e menor consistência em relação à precipitação média anual. No entanto, em SPI6 e SPI12, os percentis inferiores e superiores mostram que os coeficientes b se tornam progressivamente mais negativos, refletindo uma relação mais robusta e uniforme entre o SPI e a escala temporal de análise. Em SPI12, por exemplo, apenas 15% das estações apresentam coeficientes b acima de $-0,0006$, enquanto os valores mais negativos chegam a $-0,0036$, sugerindo maior impacto da precipitação acumulada no comportamento do SPI.

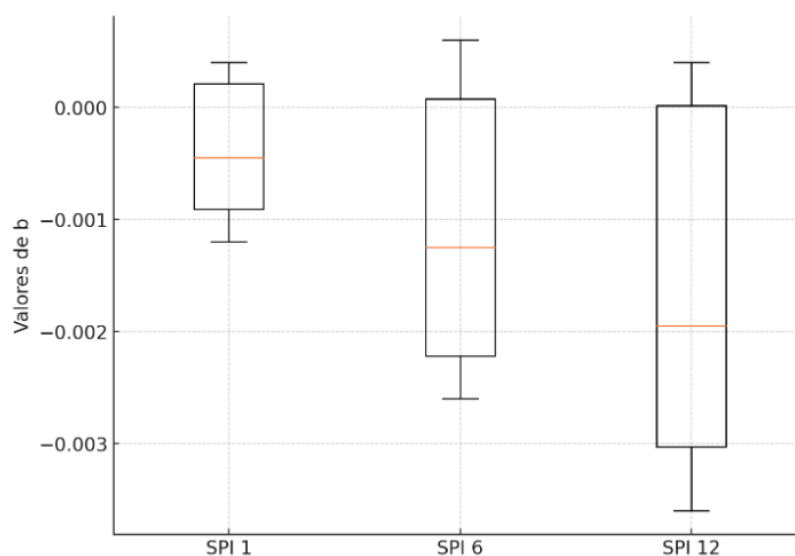


Figura 25: Gráfico de Boxplot dos valores de b dos SPI 1, SPI 6 e SPI 12. Fonte: Autoria Própria.

Além disso, observou-se que a porcentagem de coeficientes b negativos aumenta com a escala temporal, passando de 70% em SPI1 para 85% em SPI6 e

SPI12. Isso evidencia que, embora em curtos períodos algumas estações possam apresentar relações positivas ou neutras entre o SPI ao longo dos anos, em análises acumuladas mais longas (SPI 6 e 12) predomina-se uma relação negativa, caracterizando um aumento nas secas em toda a região do distrito de Bragança.

Do mesmo modo, foi realizada uma análise de tendência da média do número de meses secos ao longo de 4 décadas dentro do conjunto de dados de 40 anos, a fim de identificar a existência de um padrão temporal de secas nas regiões em todo o distrito de Bragança.

A tabela apresentada analisa o comportamento das médias de meses secos ao longo de quatro décadas (D1: 1957-1967, D2: 1967-1977, D3: 1977-1987 e D4: 1987-1997) em diferentes estações meteorológicas. Além disso, é identificado o padrão de tendência dos dados de acordo com o índice SPI (Standardized Precipitation Index) em três escalas temporais: SPI-1, SPI-6 e SPI-12. Os padrões observados incluem variações polinomiais convexas (PCV) e côncavas (PCC), além de tendências lineares (positivas e negativas) e exponenciais positivas.

Tabela 9: Média dos meses secos de cada SPI, em cada década de análise dentro dos 40 anos de dados (1957-1997), e os valores de significância dos efeitos dos factores Década e SPI no número de meses secos.

Estação	Década ¹	Média do n° de meses secos			Valor-p ²	
		SPI 1	SPI 6	SPI 12	Década	SPI
Montezinho	D1	2,3	0,1	0	0,071	0,975
	D2	2,5	3,7	3,4		
	D3	2	2,8	3,6		
	D4	1,6	1,6	1,8		
	Padrão ³	PCV	PCV	PCV		
Vinhais	D1	1,7	2,6	2,4	0,055	0,238
	D2	1,6	2,3	2,9		
	D3	1,4	1,3	1,3		
	D4	1,6	1,8	1,5		
	Padrão	PCC	PCC	PCV		
Pinela	D1	1,7	1	0,9	0,063	0,646
	D2	1,5	1,2	0,9		
	D3	1,8	2,8	3,5		

¹ Décadas – D1 (1957-1967); D2 (1967-1977); D3 (1977-1987); D4 (1987-1997);

² Valor p da correlação ANOVA 2 fatores sem repetição;

³ Padrão de curva – Polinomiais Convexas (PCV); Polinomiais Concavas (PCC); Linear Positiva e Linear Negativa (LP e LN); Exponencial Positiva (EP);

Estação	Década ¹	Média do n° de meses secos			Valor-p ²	
		SPI 1	SPI 6	SPI 12	Década	SPI
	D4	1,8	2,3	3,3		
	Padrão	PCC	PCV	LP		
Rio Onor	D1	1,3	1,5	1	0,116	0,539
	D2	1,8	2,1	2,1		
	D3	1,8	2,1	1,5		
	D4	1,7	2,4	3,5		
	Padrão	PCV	PCV	EP		
Sanhoane	D1 ¹	1,2	1	0,8	0,004 ²	0,496
	D2	1,1	1,3	1,8		
	D3	1,7	1,5	1,8		
	D4	2,4	3,9	3,5		
	Padrão ³	PCC	PCC	PCC		
Deilão	D1	1,6	2,1	1,9	0,341	0,048
	D2	1,6	1,7	2,3		
	D3	1,8	1,8	2		
	D4	1,9	2	2,5		
	Padrão	PCC	PCC	PCC		
Argozelo	D1	2	1,9	1,9	0,054	0,541
	D2	1,7	2,9	2,6		
	D3	1,7	1,7	1,4		
	D4	1,5	1,5	1,3		
	Padrão	PCV	PCV	PCV		
Mogadouro	D1	1,3	0,7	0,7	0,012	0,575
	D2	1,2	1,8	1,7		
	D3	1,9	1,8	2		
	D4	2	3,2	3,4		
	Padrão	LP	LP	LP		
Izeda	D1	1,4	0,9	0,9	0,042	0,670
	D2	1,8	1,4	1,5		
	D3	1,7	2,2	2,3		
	D4	1,7	2,9	3,2		
	Padrão	PCV	LP	LP		
Avelanoso	D1	1,6	0,6	0,5	0,032	0,849
	D2	1,8	2	1,9		
	D3	1,9	2,5	2,4		
	D4	1,9	2,9	3,1		
	Padrão	LP	PCV	PCV		

¹ Décadas – D1 (1957-1967); D2 (1967-1977); D3 (1977-1987); D4 (1987-1997);

² Valor p da correlação ANOVA 2 fatores sem repetição;

³ Padrão de curva – Polinomiais Convexas (PCV); Polinomiais Concavas (PCC); Linear Positiva e Linear Negativa (LP e LN); Exponencial Positiva (EP);

Estação	Década ¹	Média do n° de meses secos			Valor-p ²	
		SPI 1	SPI 6	SPI 12	Década	SPI
Fornos de Lagoaça	D1	1,3	0,7	0,9	0,023	0,417
	D2	1,6	2,7	2,2		
	D3	1,8	1,6	2,3		
	D4	2	2,8	3,2		
	Padrão	LP	PCV	PCV		
Carviçais	D1 ¹	1,4	0,9	0,5	0,070 ²	0,583
	D2	1,6	2,7	3,2		
	D3	1,7	1,7	2,7		
	D4	2	2,3	2,1		
	Padrão ³	PCC	PCV	PCV		
Soutelo	D1	1,4	1,5	1,3	0,028	0,381
	D2	1,9	2,8	2,6		
	D3	1,9	1,7	1,5		
	D4	1,7	2,2	2,4		
	Padrão	PCV	PCV	PCV		
Morais	D1	2	2,7	3	0,025	0,681
	D2	1,5	1,5	1,7		
	D3	1,8	1,4	1,4		
	D4	1,9	2,2	1,9		
	Padrão	PCC	PCC	PCC		
Peredo	D1	0,8	0,3	0,1	0,003	0,844
	D2	2	3,1	3,3		
	D3	1,1	1,1	1,6		
	D4	0,8	0,6	0,5		
	Padrão	PCV	PCV	PCV		
Campo de Víboras	D1	1,4	0,7	0,8	0,036	0,681
	D2	1,8	3,3	3,3		
	D3	1,7	2,3	2,6		
	D4	1,7	1,6	1,2		
	Padrão	PCV	PCV	PCV		
Fonte da Aldeia	D1	1,3	0,8	0,8	0,036	0,540
	D2	2	1,9	1,7		
	D3	1,6	2,1	2,7		
	D4	1,8	3,2	3,2		
	Padrão	PCV	LP	LP		
Alfândega da Fé	D1	1,8	2,2	1,3	0,113	0,296
	D2	1,7	2,8	3,3		
	D3	1,5	1,5	1,3		
	D4	1,3	2,2	1,8		
	Padrão	LN	LN	PCV		

¹ Décadas – D1 (1957-1967); D2 (1967-1977); D3 (1977-1987); D4 (1987-1997);

² Valor p da correlação ANOVA 2 fatores sem repetição;

³ Padrão de curva – Polinomiais Convexas (PCV); Polinomiais Concavas (PCC); Linear Positiva e Linear Negativa (LP e LN); Exponencial Positiva (EP);

Estação	Década ¹	Média do n° de meses secos			Valor-p ²	
		SPI 1	SPI 6	SPI 12	Década	SPI
Cerejais	D1	1,6	0,8	1	0,020	0,682
	D2	1,4	2,4	2,2		
	D3	1,7	1,5	1,5		
	D4	2,3	3,1	3,6		
	Padrão	PCC	LP	EP		
Moncorvo	D1 ¹	1,2	0,3	0,1	0,009²	0,936
	D2	1,6	1,6	1,1		
	D3	1,6	1,2	1,3		
	D4	2,8	4,8	5,6		
	Padrão ³	PCC	EP	EP		

A análise dos dados de médias de meses secos ao longo de quatro décadas (1957-1997) revelou uma tendência de aumento na frequência de secas, especialmente em escalas temporais intermediárias (SPI-6) e longas (SPI-12). Observou-se que, na primeira década (D1: 1957-1967), as secas eram menos frequentes, com valores baixos em SPI-6 e SPI-12, enquanto nas décadas subsequentes, especialmente na última (D4: 1987-1997), houve um aumento expressivo na ocorrência de meses secos.

As tendências polinomiais convexas (PCV) predominam em escalas mais longas. Em contrapartida, padrões côncavos (PCC) foram observados em escalas mais curtas (SPI-1), sugerindo estabilidade inicial seguida de um aumento gradual. Tendências lineares positivas (LP) e exponenciais positivas (EP), embora menos frequentes, destacam-se em estações como Moncorvo e Cerejais, onde as secas estão se tornando progressivamente mais intensas e prolongadas.

Regionalmente, as estações de Moncorvo e Cerejais mostraram os maiores aumentos na frequência de meses secos, especialmente em SPI-12, onde as médias atingiram 5,6 meses em D4. Esse comportamento ressalta a vulnerabilidade dessas áreas a secas prolongadas, com implicações diretas no manejo hídrico e na agricultura local. Em contrapartida, estações como Peredo e Campo de Víboras apresentaram padrões mais estáveis, embora também tenham registrado aumentos na frequência

¹ Décadas – D1 (1957-1967); D2 (1967-1977); D3 (1977-1987); D4 (1987-1997);

² Valor p da correlação ANOVA 2 fatores sem repetição;

³ Padrão de curva – Polinomiais Convexas (PCV); Polinomiais Concavas (PCC); Linear Positiva e Linear Negativa (LP e LN); Exponencial Positiva (EP);

de secas em escalas intermediárias.

Ainda, quanto ao “valor-p”, grande parte das estações meteorológicas apresentaram efeito significativo ($p < 0,05$) da década. O efeito SPI apenas foi significativo em Deilão ($p = 0,048$).

Contudo, embora a análise dos coeficientes de regressão linear apresentados na Tabela 8 revele que, em sua maioria, os valores de "b" são negativos, indicando uma tendência geral de redução dos valores de SPI ao longo do tempo e, conseqüentemente, um aumento da frequência e intensidade de secas, a análise decadal não permite identificar um padrão homogêneo entre as estações meteorológicas. Esse comportamento mostra que a resposta climática às alterações na precipitação acumulada não segue uma linearidade evidente entre todas as regiões estudadas, sendo influenciada por características locais e regionais específicas.

Por exemplo, nas estações de Montezinho e Mogadouro, houve um aumento mais evidente nos meses secos durante a última década (D4: 1987-1997), o que se alinha com os coeficientes negativos observados em SPI-6 e SPI-12. No entanto, estações como Peredo e Moncorvo apresentaram períodos mais críticos em décadas anteriores, como em D1 (1957-1967) e D2 (1967-1977), respectivamente, sugerindo uma variabilidade interdecadal no comportamento das secas que não é inteiramente explicada pela regressão linear.

Adicionalmente, estações como Rio Onor e Sanhoane mostram oscilações em diferentes décadas, com aumentos de meses secos ocorrendo de maneira irregular. Essas variações demonstram que, mesmo com a tendência geral de diminuição dos índices de SPI apontada pelos coeficientes negativos, a distribuição temporal das secas apresenta padrões distintos em diferentes localidades. Por exemplo, enquanto algumas regiões sofreram períodos mais secos em D3 (1977-1987), outras, como Fornos de Lagoaça, exibiram um agravamento das secas apenas na última década analisada.

5 CONCLUSÃO

A gestão de recursos hídricos no nordeste de Portugal enfrenta desafios significativos devido à intensificação das condições de seca, resultado das mudanças climáticas e de sua variabilidade ao longo do tempo. Neste contexto, foi realizada uma análise da precipitação e do Índice de Precipitação Padronizado (SPI) em vinte estações meteorológicas representativas dos domínios climáticos da região, abrangendo uma série temporal de quarenta anos (1957-1997). O estudo incluiu áreas com características climáticas que variam de semiáridas a úmidas, permitindo uma avaliação abrangente da dinâmica de secas e chuvas extremas na região.

O SPI foi calculado em diferentes escalas temporais (de 1 a 12 meses), possibilitando a identificação de mudanças na frequência e severidade das secas ao longo do período analisado. Os resultados indicaram que, à medida que a escala temporal aumenta, há um aumento nas frequências de meses classificados como secos ou úmidos, em detrimento de períodos normais. Observou-se também um crescimento significativo na frequência de meses com secas severas e extremas, especialmente em regiões com menor precipitação média anual, sendo mais pronunciado para as escalas de 6 e 12 meses do SPI. Essas tendências apontam para uma maior variabilidade e uma intensificação das condições extremas de seca, corroborando as projeções climáticas para o nordeste de Portugal.

Globalmente, os resultados destacam uma tendência para a ocorrência de extremos de precipitação no nordeste de Portugal. As condições extremas de seca, são cada vez mais frequentes. Esses achados, com base em dados estatísticos, concordam com as projeções de mudanças climáticas atualmente relatadas.

As tendências gerais de mudanças na precipitação e na seca ao longo dos anos relatadas no estudo confirmam uma progressiva suscetibilidade à desertificação que atualmente afeta o nordeste de Portugal, embora sem um padrão de variação uniforme na região ao longo das 4 décadas estudadas.

Portanto, os resultados deste estudo destacam uma progressiva suscetibilidade à desertificação, particularmente em áreas mais vulneráveis da região, e reforçam a importância de estratégias integradas de gestão de recursos hídricos. A utilização de instrumentos legais como a Diretiva-Quadro da Água, o Plano Nacional

da Água e os Planos de Bacia Hidrográfica desempenha um papel essencial para mitigar os impactos das secas e promover a sustentabilidade hídrica. Contudo, o estudo também indica a necessidade de maior integração e coordenação entre essas ferramentas para garantir a eficácia na gestão dos recursos hídricos.

Adicionalmente, as estratégias estruturais, como os sistemas de reservatórios no Alto Sabor, e as medidas de gestão integrada, que combinam a otimização do uso da água e a preservação de sua disponibilidade, são fundamentais para enfrentar os desafios climáticos.

Por fim, a contribuição do presente estudo vai além da análise estatística, oferecendo uma base sólida para informar ações práticas e políticas públicas. Ao identificar padrões de variabilidade temporal e espacial das precipitações e seus impactos, o trabalho pode orientar a adaptação das estratégias de gestão de recursos hídricos, bem como a implementação de medidas específicas para mitigar os efeitos das mudanças climáticas e da desertificação no nordeste de Portugal.

6 REFERÊNCIAS

APA (2015). **Estratégia Nacional de Adaptação às Alterações Climáticas (ENAAAC 2020)**. Agência Portuguesa do Ambiente., Portugal, 2015.

Bertoni, J, C.; Tucci, C. E. M. (2001). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2ª ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, Precipitação p.177-231.

Black, P. E. (1996). **Watershed hydrology**. 2ª ed. Michigan: Ann Arbor Press.

Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). **Hidrologia aplicada**. In Hidrologia aplicada (p. 575 pp). <http://bases.bireme.br/cgi-bin/wxislind.exe/iah/online/?IsisScript=iah/iah.xis&src=google&base=REPIDISCA&lang=p&nextAction=lnk&exprSearch=158911&indexSearch=ID%5Cnhttp://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=BINA1.xis&method=post&formato=2&cantidad=>

Collischonn, W.; Tassi, R. (2008). **Introduzindo Hidrologia**. 5ª ed.

Costa A., Santos J., Pinto J. (2012). **Climate change scenarios for precipitation extremes in Portugal**. Theoretical and Applied Climatology, 108 (1-2), 217-234.

Cunha, R.L.A. (2008). **Definição de cenários de referência para avaliação dos impactos das secas**. Dissertação de título de grau de Mestre. Universidade do Porto.

EEA - European Environmental Agency (2021). **Climate Adapt Database – Portugal**. Retrieved at may 16th, 2021, from <https://climate-adapt.eea.europa.eu/countries-regions/countries/portugal>

Fraga, H., Costa, R., Cuadrat, J. M., Espírito-Santo, F., Malheiro, A. C., Moutinho-Pereira, J., Santos, J. A. (2017). **Climate change projections for the Mediterranean and the Northeast of Portugal**. *Climate Research*, 73(3), 143-160.

Fraga, H., Moriondo, M., Leolini, L., Santos, J. A. (2021). **Mediterranean olive orchards under climate change: A review of future impacts and adaptation strategies**. *Agronomy*, 11(1), 56.

Gudmundsson, L., Seneviratne, S. I. (2015). **European drought trends and impacts on hydrology, agriculture and ecosystems**. *Environmental Research Letters*, 10(12), 124005.

Guttman, N.B. 1999. **Accepting the Standardized Precipitation Index: A calculation algorithm**. *Journal of the American Water Resource Association*, 35, 311 – 322.

Hagenlocher, M., Naumann, G., Meza, I., Blauhut, V., Cotti, D., Döll, P., et al. (2023). **Tackling growing drought risks - the need for a systemic perspective**. *Earth's Future*, 11.

Hipólito, J. R., & Vaz, A. C. (2017). **Hidrologia e recursos hídricos**. 3a ed. Editora Universitária do Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Hoerling M., Eischeid, J., Perlwitz, J., Quan, X., Zhang, T., Pegion, P. (2012). **On the increased frequency of Mediterranean drought**. *J. Clim.* 25(6), 2146–2161.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2014). **Climate Change (2014): Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.

IPMA - Instituto Português do Mar e da Atmosfera (2014). **Alterações Climáticas em Portugal Continental**.

IPMA - Instituto Português do Mar e da Atmosfera (2021). **Climate Normals**. Retrieved at Feb 8th, 2021, from <https://www.ipma.pt/en/oclima/normais.clima/>

Köppen, W. (1936). **Das geographische System der Klimate [On a geographic system of climate]**. In W. Köppen and G. Geiger (Eds.), *Handbuch der Klimatologie*, Gebr. Borntraeger, [Handbook of Climatology], 1.C, 1–44.

Lencastre, A.; Franco, F. M. (2006). **Lições de Hidrologia**. 3a ed. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Monte da Caparica

Linsley, J.R., R. K; Kohler, M, A; Paulhus, J. L. H. (1895). **Hydrology for Engineers**. 3ª

ed. McGraw-Hill.

Lousada, S. A. N., & Camacho, R. F. (2018). **Hidrologia, recursos hídricos e ambiente: aulas teóricas**. 1a ed. Universidade da Madeira.

Mckee et al. (1993). **The relationship of Drought frequency and duration of time scales, Eight Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society**. 17 – 23 Janeiro, 1993, Anaheim CA, pp. 179-186;

Mishra, A. K., Desai, V. R. (2005). **Drought forecasting using stochastic models**. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 19(5), 326-339.

PANCD - **Programa de Acção Nacional de Combate à Desertificação (2011)**. Ponto Focal Nacional da Comissão das Nações Unidas de Combate à Desertificação, Lisboa

Portela, M.M., Santos J.F.F., Naghettini N., Matos J.P., Silva A.T. (2012). **Superfícies de limiares de precipitação para identificação de secas em portugal continental: uma aplicação complementar do índice de precipitação padronizada, SPI**. Revista Recursos Hídricos, Vol. 33, Nº 2, 5-23.

Royer, A.C., Figueiredo, T., Fonseca, F., Schultz, F.C.A., Hernández, Z. (2021). **Trends of change in precipitation and in drought susceptibility as assessed by the standardized precipitation index (SPI) in northeast portugal**. Territorium 28 (II).

SIAM2 - Scenarios, Impacts and Adaptation Measures (2006). **Alterações climáticas em Portugal: cenários, impactos e medidas de adaptação**. Gradiva, Lisboa, 506 p.

Spinoni, J., Naumann, G., Vogt, J. (2017). **Pan-European seasonal trends and recent changes of drought frequency and severity**. Global Planet. Change 148, 113–130.

Spinoni, J., Barbosa, P., De Jager, A., McCormick, N., Naumann, G., Vogt, J. V., Mazzeschi, M. (2019). **A new global database of meteorological drought events from 1951 to 2016**. Journal of Hydrology: Regional Studies, 22, 100593.

Steinemann, A. (2003). **Drought Indicators and Triggers: A Stochastic Approach**

to Evaluation. Journal of the American Water Resources Association, 39(5), 1217-1233.

Svoboda, M., Hayes, M., & Wood, D. (2012). **Standardized Precipitation Index User Guide.** *World Meteorological Organization.*

Svoboda, M., Fuchs, B. (2017). **Handbook of Drought Indicators and Indices.**

Tirivarombo, S., Osupile, D., Eliasson, P. (2018). **Drought monitoring and analysis: Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) and Standardized Precipitation Index (SPI).** Physics and Chemistry of the Earth.

Tucci, C. E. M. (2001). **Hidrologia: ciência e aplicação.** 2ª ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, Escoamento Superficial, p. 391 – 437

United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). (2021). **Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction.** Special Report on Drought 2021.

Vicente-Serrano, S. M., López-Moreno, J. (2005). **Hydrological response to different time scales of climatological drought: an evaluation of the Standardized Precipitation Index in a mountainous Mediterranean basin.** Hydrology and Earth System Sciences, 9(1607–7938), 523–533.

Vicente-Serrano, S. M., Lopez-Moreno, J. I., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Sanchez-Lorenzo, A., García-Ruiz, J. M., Azorin-Molina, C., Moran-Tejeda, E., Revuelto, J., Trigo, R., Coelho, F., Espejo, F. (2014). **Evidence of increasing drought severity caused by temperature rise in southern Europe.** Environ. Res. Lett. 9(4), 044001.

Villela, S.M., Mattos, A. **A Hidrologia aplicada.** São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 245 p

Wilhite, D. A. (1992). **Drought.** Encyclopedia of Earth System Science, 81–92.

Wilhite, D. A., Glantz, M. H. (1985). **Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions.** Drought Mitigation Center Faculty Publications, 20, 16.

Wilhite, D. A., Svoboda, M. D., Hayes, M. J. (2007). **Understanding the Complex**

Impacts of Drought: A Key to Enhancing Drought Mitigation and Preparedness.
Water Resources Management, 21(5), 763–774.

World Meteorological Organization (WMO), (2016). **Handbook of Drought Indicators and Indices.** Geneva.

World Meteorological Organization (WMO), (2012). **Standardized Precipitation Index User Guide.** WMO – No 1090. Geneva, Switzerland