

Estudo Comparativo de Índices de Avaliação da Seca em Aquíferos Costeiros

Comparative Study of Drought Assessment Indices in Coastal Aquifers

Maria da Conceição Neves;
Universidade do Algarve, IDL
mneves@ualg.pt

Resumo

Os aquíferos em áreas costeiras áridas e semiáridas, como a região do Algarve, são fortemente impactados por secas, agravadas pela sobre-exploração, que pode levar à degradação da qualidade da água e à intrusão salina. A monitorização eficaz é essencial, utilizando vários indicadores para prever e gerir os efeitos da redução da precipitação e do aumento da extração. Este estudo compara indicadores de desempenho relativos à seca, como o Índice Padronizado do Nível de Água Subterrânea (SGI) e os tempos ótimos de acumulação do Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI). Ao combinar dados de reanálise atmosférica com observações dos níveis de água subterrânea, o estudo avalia a memória do sistema de água subterrânea e determina os períodos de acumulação do SPEI mais adequados. O inverso da memória obtido pela autocorrelação do SGI ajuda a estimar a capacidade de recuperação de cada furo em condições de seca, indicando a sua resiliência e sustentabilidade. No Algarve, o índice SPEI-12 representa eficazmente a variabilidade regional dos níveis de água subterrânea, mas as memórias dos aquíferos e os tempos ótimos do SPEI variam amplamente (SPEI-5 a SPEI-48). Furos com memórias mais curtas (< 6 meses) demonstram melhor sustentabilidade, enquanto aqueles com memórias mais longas (> 16 meses) apresentam menor resiliência.

Palavras-chave: Aquíferos, Seca, Monitorização, Índice, Sustentabilidade

Abstract

Aquifers in arid and semi-arid coastal areas, such as the Algarve region, are heavily impacted by droughts, worsened by over-extraction which leads to degraded water quality and seawater intrusion. Effective monitoring is essential, utilizing various indicators to predict and manage the effects of reduced precipitation and increased pumping. This study compares performance indicators relative to drought, the Standardized Groundwater Level Index (SGI) and optimal accumulation times from the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI). By combining atmospheric reanalysis datasets with groundwater observations, the study assesses groundwater system memory and determines the most suitable SPEI accumulation periods. The inverse of memory from SGI autocorrelation helps estimate each well's drought recovery capacity, indicating resilience and sustainability. In the Algarve, the SPEI-12 index effectively represents regional groundwater variability, but groundwater memories and optimal SPEI times vary widely (SPEI-5 to SPEI-48). Wells with shorter memories (< 6 months) show better sustainability, while those with longer memories (> 16 months) have lower resilience.

VI CONGRESSO INTERNACIONAL
EDUCAÇÃO, AMBIENTE
E DESENVOLVIMENTO

13 A 16 NOVEMBRO 2024


ESCOLA SUPERIOR DE EDUCAÇÃO E CIÊNCIAS SOCIAIS
INSTITUTO POLITÉCNICO DE LEIRIA
LEIRIA — PORTUGAL

SITE: <http://6cead.ipliria.pt/>

PRESENCIAL
& ONLINE



ORGANIZAÇÃO

 OIKOS
Associação de Defesa
do Ambiente e do Património
da Região de Leiria

 POLITÉCNICO
DE LEIRIA

ESCOLA SUPERIOR
DE EDUCAÇÃO
E CIÊNCIAS SOCIAIS

Introdução

Os níveis globais de água subterrânea em regiões áridas e semiáridas estão em declínio devido às mudanças climáticas e à extração excessiva. Os aquíferos costeiros nas regiões mediterrâneas semiáridas são particularmente vulneráveis, embora essenciais para a manutenção dos ecossistemas e para a segurança alimentar durante períodos de seca. Nas regiões costeiras, a sobre-exploração pode causar intrusão salina, comprometendo os aquíferos e o abastecimento de água a longo prazo. As alterações climáticas têm vindo a agravar a escassez hídrica, aumentando a severidade das secas e reduzindo a disponibilidade de água devido à diminuição da precipitação e ao aumento da evaporação que advém do aumento da temperatura.

Apesar da necessidade urgente de monitorizar e gerir os recursos hídricos, a natureza heterogênea dos aquíferos torna difícil avaliar e prever o estado quantitativo das águas subterrâneas. O Índice Padronizado do Nível de Água Subterrânea (SGI) tem sido amplamente utilizado por ser compatível com outros índices, como o Índice de Precipitação Padronizado (SPI). Contudo, os métodos convencionais e os atuais modelos hidrológicos são frequentemente incapazes de captar as especificidades locais das secas, limitando sua eficácia. A combinação de índices de seca atmosférica e subterrânea permite uma abordagem mais abrangente. Este estudo foca-se no Algarve (Figura 1), uma região mediterrânica semiárida com aquíferos costeiros fortemente impactados pela seca.

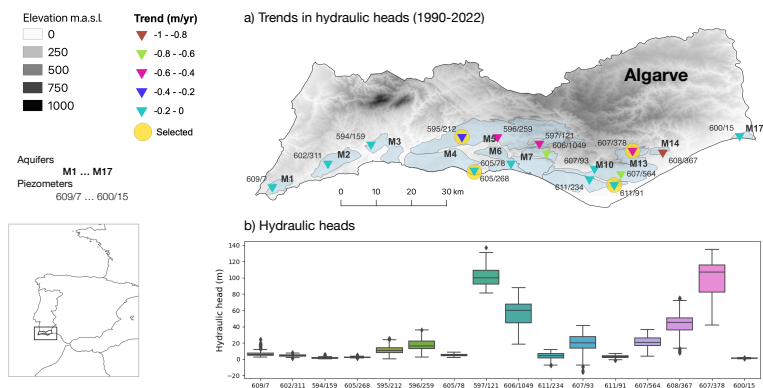


Figura 1: Localização da área de estudo mostrando os aquíferos estudados (M1 a M17). (a) Os triângulos invertidos representam a localização dos 16 piezômetros selecionados para análise e a tendência (*Trend*) dos níveis de águas subterrâneas em cada local. (b) Gráfico de caixa e bigodes dos dados de nível piezométrico (m.a.s.l.) entre 1990 e 2022. As extremidades das caixas correspondem aos percentis 25 e 75, e os bigodes estendem-se aos valores mínimos e máximos dos níveis hidráulicos observados.



Ao comparar diferentes índices de seca, como o SGI, o Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI), a investigação procura fornecer melhores ferramentas para a gestão das águas subterrâneas. O objetivo é melhorar a capacidade de antecipar secas e implementar estratégias de mitigação, contribuindo para uma gestão mais sustentável dos recursos hídricos.

Dados e Métodos

Os aquíferos considerados na região do Algarve, designados de M1 a M17, são essencialmente sistemas cársticos semi-confinados ou mistos cárstico-porosos. Os registos dos níveis de águas subterrâneas, ou registos piezométricos, estão disponíveis através do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH, 2024). Este estudo baseia-se numa seleção de 16 piezómetros distribuídos por 12 aquíferos (Figura 1a), com registos mensais desde janeiro de 1990 até dezembro de 2022. A seleção foi feita com base na duração, continuidade e consistência das séries temporais, amostrando o maior número possível de aquíferos. Apenas metade dos registos abrange todo o período de análise, mas todos têm pelo menos 10 anos de observações e lacunas inferiores a 6 meses.

A etapa inicial da metodologia envolveu o uso de interpolação para estimar valores em falta e a análise das tendências nos níveis de águas subterrâneas. Para identificar as tendências nos níveis de água, utilizou-se o teste de Mann-Kendall (MK). Este trabalho usa índices padronizados que medem desvios em relação a condições normais de forma sistematizada. O exemplo mais conhecido deste tipo de índices em meteorologia é o Índice de Precipitação Padronizada (SPI). Embora o SPI tenha sido analisado em Neves (2024), a análise aqui apresentada foca-se no Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI), mais adequado a regiões semiáridas onde a temperatura tem um impacto significativo (Vicente-Serrano et al., 2010). O SPEI considera as anomalias acumuladas no balanço hídrico climático (diferença entre precipitação e evapotranspiração potencial, ou P-E) em diferentes escalas temporais, como 1, 3, 6 ou 12 meses.

O cálculo das séries temporais do SGI e do SPEI seguiu o método não-paramétrico de Bloomfield & Marchant (2013) descrito em mais detalhes em Neves (2024). A etapa seguinte da metodologia consistiu em calcular o coeficiente de correlação de Pearson entre as séries temporais do SPEI e do SGI. O objetivo foi determinar as acumulações e lags do SPEI necessários para alinhar os sinais meteorológicos com os níveis de águas subterrâneas. Para encontrar o melhor período de acumulação, o SPEI foi calculado em cada local, isto é, para cada piezómetro, fazendo variar os períodos de acumulação entre 1 e 48 meses, com passos de 1 mês. Os melhores períodos de acumulação do SPEI, designados aqui como SPEI ótimos, são aqueles que proporcionam a máxima correlação em cada local.

As funções de autocorrelação representam a dependência linear de um evento nos valores subsequentes da série temporal e são usadas para quantificar o efeito de



memória dos sistemas hidrológicos, um parâmetro que tem implicações para a persistência das secas. Este estudo avalia a memória tanto dos registos de níveis hidráulicos (memória GWL) como das séries temporais do SGI (memória SGI) e explora a relação entre estas memórias e o SPEI. O auto-correlograma é o gráfico da correlação de uma série temporal consigo mesma após ser deslocada por intervalos de tempo (lags) cada vez maiores.

Tendências dos níveis piezométricos

As tendências nos níveis das águas subterrâneas calculadas de acordo com o teste de Mann-Kendall (MK) são exibidas como triângulos invertidos na Figura 1a. Os níveis no Algarve têm diminuído de forma generalizada e consistente. As tendências mais negativas são observadas em locais de maior altitude, como no piezómetro 607/378 no aquífero M13. Isto ocorre porque os défices de precipitação têm um efeito mais significativo nas encostas das colinas, onde a recarga depende principalmente da infiltração direta. Esses piezómetros também exibem as maiores variações de amplitude dos níveis de água (Figura 1b). Para sul, os aquíferos costeiros situados próximo do nível do mar e com pequenas profundidades até o lençol freático apresentam pequenas variações de amplitude nas cargas hidráulicas.

Comparação SPEI-SGI

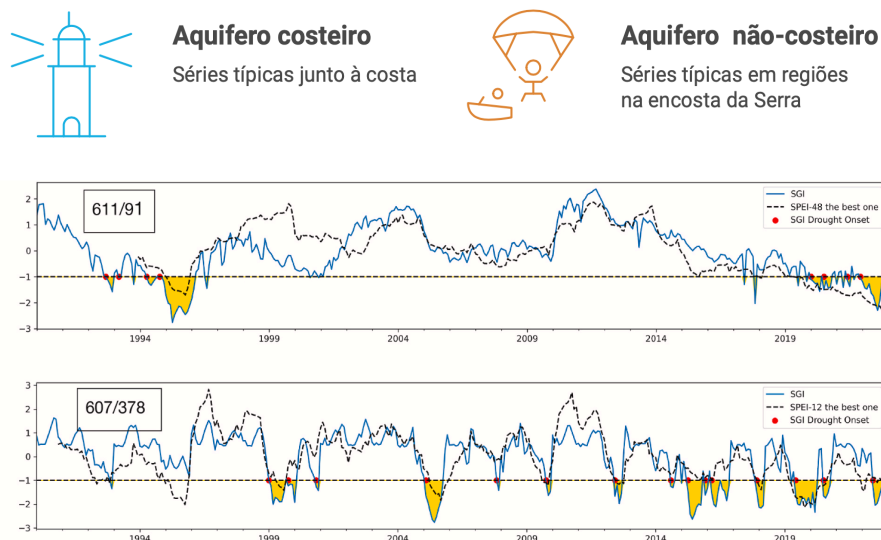


Figura 2: comparação entre os índices de seca meteorológicos e hidrológicos. Evolução temporal das séries temporais do SGI para os piezómetros 611/91 (aquífero costeiro) e 607/378 (aquífero não-costeiro) em comparação com as séries temporais SPEI calculadas no período de acumulação ótimo. Os episódios de seca de águas subterrâneas em que os níveis descem abaixo do limiar crítico SGI (considerado < -1) são apresentados a amarelo. Pontos a vermelho marcam o início da seca das águas subterrâneas.

Verificou-se que não existe um período de acumulação ideal único que se ajuste a todas as observações de águas subterrâneas e, na verdade, este valor varia



amplamente entre 4 e 48 meses na área de estudo. Como exemplo ilustrativo a Figura 2 mostra a comparação entre as séries dos índices SGI e SPEI ótimo em dois piezómetros selecionados. O período de acumulação do SPEI que apresenta a melhor correlação com o SGI no local 611/91 é de 48 meses. Este piezómetro está localizado perto do mar e exibe pequenas variações de amplitude no nível da água. Em contrapartida, o período ideal para o SPEI no local 607/378 é de 12 meses. Este piezómetro está localizado num aquífero não-costeiro, no sopé da serra algarvia e a maior altitude (Figura 1a).

Memória dos aquíferos

A memória representa o tempo que o nível de água subterrânea (GWL) leva para responder aos sinais meteorológicos. A memória do sistema é calculada com base na autocorrelação do GWL e na autocorreção do SGI representadas nos gráficos da Figura 3 para todos os piezómetros analisados. As memórias GWL e SGI são consideradas a *lag* correspondente a um coeficiente de autocorrelação de 0,2 e 0,3, respetivamente (Neves, 2024).

As memórias variam amplamente entre os diferentes piezómetros e têm uma distribuição espacial muito heterogénea. A memória GWL varia entre 5 e 26 meses enquanto a memória SGI varia entre 5 e 21 meses. Locais com memórias mais curtas apresentam episódios rápidos ou repentinos de recessão e recuperação (por exemplo, 697/378), enquanto locais com memórias mais longas apresentam variações mais suaves e ciclos de longo prazo (por exemplo, 611/91).

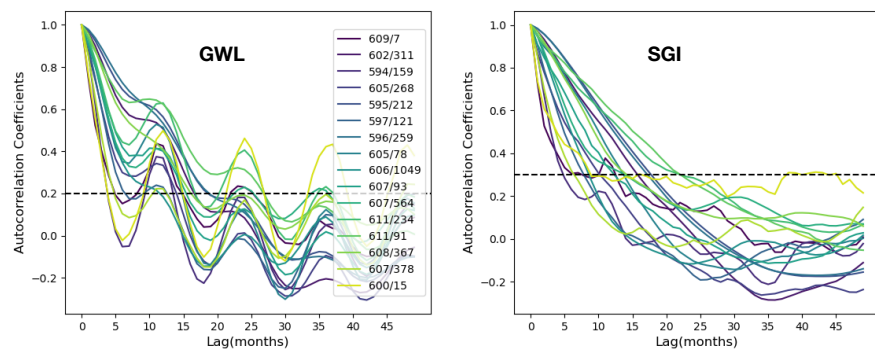


Figura 3: Gráficos da função de autocorrelação do nível da água (GWL) e do SGI para os 16 piezómetros considerados. As linhas tracejadas mostram os valores específicos assumidos para o cálculo da memória (0,2 para GWL e 0,3 para SGI) no Algarve.

Os mapas da Figura 4 mostram a distribuição espacial dos SPEIs ótimos e da resiliência à seca, calculada como o inverso da memória do SGI, ambos utilizando o valor do limiar do SGI igual a -1 para definir condições de seca. Como se pode observar há uma boa correspondência entre a memória do sistema e o tempo de

acumulação ótimo do SPEI, o que indica que a resiliência à seca é bem descrita pela memória dos níveis de água subterrânea em cada local.

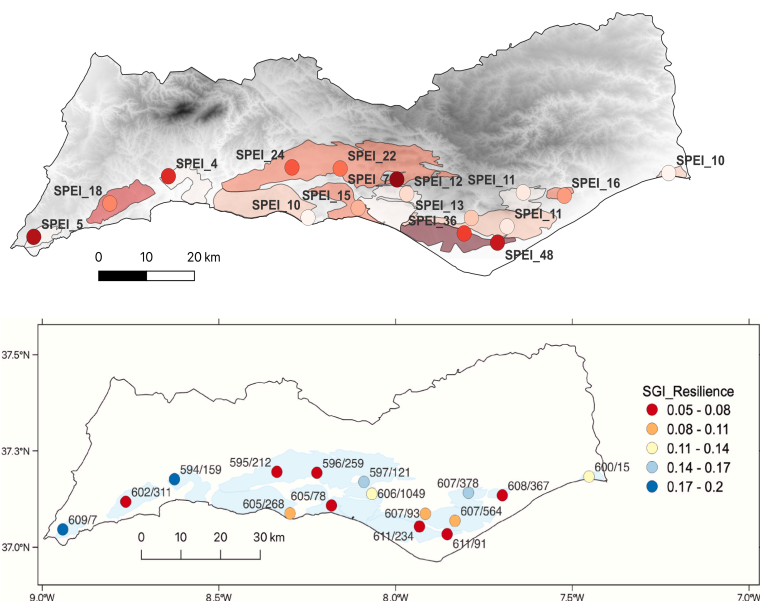


Figura 4: Mapas dos aquíferos mostrando a distribuição espacial dos períodos de acumulação ótimo do SPEI e a resiliência calculada como o inverso da memória SGI em cada piezómetro.

Conclusões

O SGI sendo um índice padronizado apresenta várias vantagens sobre métodos tradicionais baseados em limiares, nomeadamente, uma estimativa mais robusta da memória dos aquíferos, proporcionando uma melhor correspondência com o SPEI ótimo, e uma maior capacidade de detetar a seca precocemente. No entanto, o tempo de acumulação ótimo do SPEI e as memórias devem ser calculado individualmente em cada furo devido às características hidrogeológicas específicas de cada local.

A resiliência à seca é bem descrita pela memória dos níveis de água subterrânea em cada local. A memória é um parâmetro robusto que mostra boa concordância, independentemente do método de cálculo utilizado. O inverso da memória fornece uma estimativa mais fiável da resiliência em locais costeiros com níveis próximos ou abaixo do nível do mar, com risco de intrusão salina.

No Algarve, a seca moderada de águas subterrâneas pode ser definida por um valor-limite de SGI igual a -1. Piezómetros com resposta de curto prazo à precipitação (SPEI ótimo < 6 meses) são classificados como resilientes e sustentáveis. Locais com grandes memórias (SPEI ótimo > 18 meses) são os menos resilientes à seca e os menos sustentáveis. A maioria dos locais tem memórias próximas de 12 meses, indicando que o SPEI-12 é o tempo de acumulação médio que produz a

VI CONGRESSO INTERNACIONAL
EDUCAÇÃO, AMBIENTE
E DESENVOLVIMENTO
13 A 16 NOVEMBRO 2024

ESCOLA SUPERIOR DE EDUCAÇÃO E CIÊNCIAS SOCIAIS
INSTITUTO POLITÉCNICO DE LEIRIA
LEIRIA — PORTUGAL

SITE: <http://6cead.ipliria.pt/>

PRESENCIAL
& ONLINE



ORGANIZAÇÃO

OIKOS
Associação de Defesa
do Ambiente e do Património
da Região de Leiria

POLITÉCNICO
DE LEIRIA
ESCOLA SUPERIOR
DE EDUCAÇÃO
E CIÊNCIAS SOCIAIS

melhor correlação com a variabilidade do nível das águas subterrâneas à escala regional.

Citações

Bloomfield, J. P., & Marchant, B. P. (2013). Analysis of groundwater drought building on the standardised precipitation index approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(12), 4769–4787. <https://doi.org/10.5194/hess-17-4769-2013>

Neves, M. C. (2024). Integrating standardized indices and performance indicators for better drought assessment in semi-arid coastal aquifers. *Groundwater for Sustainable Development*, 27(August), 101341. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101341>

SNIRH. (2024). Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos. <http://www.snirh.pt> (acesso 02-02-2024)

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>

VI CONGRESSO INTERNACIONAL EDUCAÇÃO, AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO

13 A 16 NOVEMBRO 2024

ESCOLA SUPERIOR DE EDUCAÇÃO E CIÊNCIAS SOCIAIS
INSTITUTO POLITÉCNICO DE LEIRIA
LEIRIA — PORTUGAL

SITE: <http://6cead.ipliria.pt/>

PRESENCIAL
& ONLINE



ORGANIZAÇÃO

