

# Mapeamento de áreas inundadas usando um índice de água baseado em dados do satélite Sentinel-2: as cheias de 2019 no Baixo Mondego (Portugal)

*Mapping of flooded areas using a Sentinel-2 satellite-based water index: The 2019 floods in Lower Mondego (Portugal)*

Romeu Gerardo<sup>1\*</sup> , Isabel Pedroso de Lima<sup>2</sup> , João Pedroso de Lima<sup>3</sup> 

## RESUMO

Embora a frequência e a severidade de cheias estejam a aumentar em todo o mundo, dados sobre áreas inundadas são geralmente escassos ou inexistentes, ou estão desatualizados e não digitalizados. O desenvolvimento e a aplicação de novos produtos de detecção remota, bem como o aumento da capacidade computacional, estão a permitir obter oportunamente mapas de inundação úteis e atualizados. Entre os dias 15 e 22 de dezembro de 2019, a precipitação total em 24 horas ultrapassou 100 mm em várias regiões do Norte e do Centro de Portugal, provocando inundações. Neste estudo, usam-se imagens multiespectrais do satélite Sentinel-2 e calcula-se o Índice de Água por Diferença Normalizada Modificado (MNDWI – *Modified Normalized Difference Water Index*) para mapear a área inundada, em situação de cheia, que resultou do colapso/rotura dos diques do Rio Mondego, na região do Baixo Mondego (centro de Portugal). O mapa da área inundada em 29 de dezembro foi comparado com o mapa das áreas na situação pré-cheia. A ampla extensão espacial, coberta tipicamente por imagens de satélite, bem como a alta frequência e a resolução espacial das imagens do Sentinel-2 constituem as principais vantagens que promovem a utilização de índices de água baseados em dados de satélite para identificar áreas afetadas por inundações.

**Palavras-chave:** Rio Mondego; cheia fluvial; MNDWI; detecção remota; monitorização ambiental.

## ABSTRACT

While the frequency and severity of floods are increasing across the world, flood inundation data are often scarce or non-existent, or outdated and not digitized. The development and application of new remote sensing products and the increase in computational capacity are offering new opportunities to obtain useful and updated flood maps in a timely manner. Between the 15<sup>th</sup> and 22<sup>nd</sup> of December 2019, the total rainfall in 24 hours exceeded 100 mm in several regions of northern and central Portugal, causing floods. In this study, multispectral images from the Sentinel-2 satellite and the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) are used to map the flooded area in the Lower Mondego region that resulted from the collapse/rupture of the dikes of the Mondego River. The map of the area flooded on December 29<sup>th</sup> was compared to the map of the areas covered with water, in the pre-flood situation. The wide spatial extent that is typically covered by satellite imagery and the high frequency and spatial resolution of Sentinel-2 imagery constitute the main advantages that promote the use of water indices based on satellite data to identify areas affected by floods.

**Keywords:** Mondego River; fluvial flood; MNDWI; remote sensing; environmental monitoring.

<sup>1</sup>Engenheiro Ambiental pelo Instituto Politécnico de Coimbra. Mestre em Engenharia do Ambiente pela Universidade de Coimbra (UC). Doutorando em Engenharia do Ambiente pela UC. Técnico Superior no Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico para a Construção, Energia, Ambiente e Sustentabilidade (Itecons) Membro do Civil Engineering Research and Innovation for Sustainability (CERIS) da UC.

<sup>2</sup>Engenheira Civil pela UC. Mestre em Ciência do Solo e Gestão da Água e Doutorada em Ciências Ambientais pela Universidade de Wageningen. Professora do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da UC. Membro do Centro de Ciências do Mar e do Ambiente (MARE) da UC.

<sup>3</sup>Engenheiro Civil pela UC. Mestre em Ciência do Solo e Gestão da Água e Doutorado em Ciências Ambientais pela Universidade de Wageningen. Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da UC e Coordenador da Área Científica de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente. Coordenador da Linha de Investigação 1 (Hidráulica, Hidrologia e Ambientes Sedimentares) do MARE da UC.

\*Endereço para correspondência: Rua Pedro Hispano, 3030-289 - Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico para a Construção, Energia, Ambiente e Sustentabilidade (Itecons). Coimbra, Portugal. e-mail: romeu.jorge@itecons.uc.pt

## 1. INTRODUÇÃO

As cheias estão entre os desastres naturais mais catastróficos e com maior impacto ambiental: afetam os ecossistemas, causam danos importantes e/ou permanentes a infraestruturas e sistemas de comunicação, produções agrícolas, propriedades e, mais relevante, as cheias podem provocar perda de vidas humanas. Cenários de alterações climáticas sugerem que esse tipo de fenômeno possa agravar-se como consequência do esperado aumento da frequência de eventos meteorológicos extremos e adversos (KHARIN *et al.*, 2007).

Diante de cenários de agravamento de cheias na Europa, a Comissão Europeia adotou, em 2007, a Diretiva da Avaliação e Gestão dos Riscos de Inundações (DAGRI). A detecção remota é amplamente reconhecida como uma fonte ímpar de dados para a implementação das diretrizes da União Europeia, pois fornece uma visão sobre grandes áreas, observações frequentes e arquivos históricos (BRESCIANI *et al.*, 2011). Têm-se, portanto, intensificado os estudos de aplicação de produtos de detecção remota para a identificação de massas de água e áreas inundadas. O mapeamento de áreas inundadas é uma ferramenta útil à melhor compreensão do regime de cheias, contribuindo para a redução dos seus efeitos negativos por meio da adoção atempada de medidas preventivas (DINH *et al.*, 2019).

A maioria dos métodos disponíveis para o mapeamento de massas de água com dados óticos, obtidos remotamente, baseia-se em índices espectrais (BOSCHETTI *et al.*, 2014; PEKEL *et al.*, 2016), neste caso conhecidos como “índices de água”. Podem calcular-se diversos índices de água usando diferentes combinações de bandas espectrais, obtendo-se, assim, indicadores da presença de água na superfície terrestre que são baseados na refletância observada nas bandas do visível (Vis, 350 – 700 nm), infravermelho próximo (NIR, 700–1250 nm) e infravermelho de onda curta (SWIR, 1.250 – 2.500 nm).

Com base em outros índices de água desenvolvidos até o momento, Xu (2006) propôs o Índice de Água por Diferença Normalizada Modificado (MNDWI — *Modified Normalized Difference Water Index*), que tem potencial para conduzir a um melhor mapeamento de massas de água do que outros índices de água existentes, como, por exemplo, o Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI — *Normalized*

*Difference Water Index*) (MCFEETERS, 1996), como evidenciado em vários estudos (XU, 2006; DU *et al.*, 2016).

Este estudo apresenta resultados focados no mapeamento da área inundada em 2019, na região do Baixo Mondego (Portugal), resultante do colapso de infraestruturas de defesa contra cheias construídas no Rio Mondego; esse mapeamento apoia-se no MNDWI, calculado com dados do satélite Sentinel-2, do Programa Copernicus. O objetivo principal deste trabalho foi avaliar o potencial das imagens do Sentinel-2 para identificar áreas afetadas por inundações.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

A região do Baixo Mondego, inserida na Região do Centro de Portugal Continental, corresponde ao segmento a jusante da Bacia Hidrográfica do Rio Mondego e apresenta grande potencial do ponto de vista agrícola. O Rio Mondego drena uma área de 6.670 km<sup>2</sup>, desenvolve-se ao longo de 227 km e deságua no Oceano Atlântico; caracteriza-se por um regime natural de escoamento extremamente variável, na atualidade regulado por várias obras hidráulicas. Anteriormente a essas intervenções hidráulicas, realizadas fundamentalmente na década de 70 e 80 do século XX, que incluem barragens de regularização fluvial e obras de defesa contra cheias (e.g., diques) na região do Baixo Mondego, essa localidade foi fustigada por sérias e frequentes inundações de origem fluvial. O atual cenário de implementação de obra leva a eventos de cheia que conduzem a inundações menos frequentes e severas, mas não elimina o risco da sua ocorrência; nomeadamente, as últimas décadas testemunharam alterações relevantes em termos de uso do solo e de clima. Um evento devastador de inundação dos campos ocorreu no inverno de 2000/2001, após galgamento e subsequente rotura do dique da margem esquerda do Rio Mondego (LOURENÇO *et al.*, 2017).

Novamente, em dezembro do 2019, a região do Baixo Mondego foi severamente atingida por inundações com origem no Rio Mondego (FREIRE e DO CARMO, 2021). No período de 15 a 19 de dezembro, formaram-se três fortes depressões atmosféricas, designadas por “Tempestades Daniel, Fabien e Elsa”, que deram origem a precipitação persistente, por vezes intensa; em particular, no dia 19 registaram-se, em 24 horas, valores acumulados superiores a

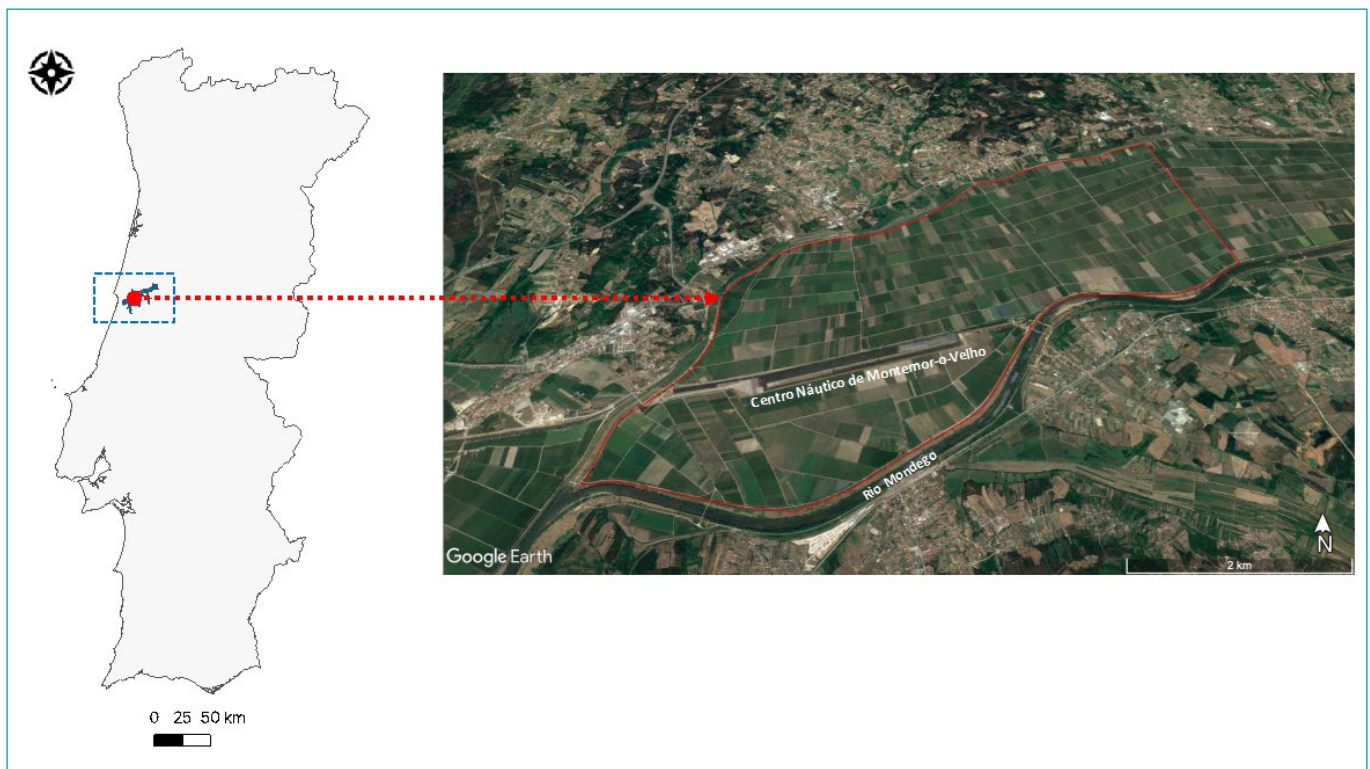
100 mm em alguns locais do Norte e do Centro de Portugal Continental (IPMA, 2019). No dia 21 de dezembro, durante a ocorrência de uma situação de cheia no Rio Mondego, em que o caudal ultrapassou o limite de segurança de 2.000 m<sup>3</sup> s, ocorreu a ruptura de dois diques de proteção do vale central do Rio Mondego e, conseqüentemente, a inundação dos

campos do Baixo Mondego, causando elevados prejuízos econômicos, ambientais e agrícolas (**Figura 1**).

Neste estudo, selecionou-se e delimitou-se uma subárea (centrada nas coordenadas 40°11'2.79"N; 8°38'6.50"W; **Figura 2**) da zona afetada pela inundação no vale central do Rio Mondego; além disso, fez-se a recolha de imagens



**Figura 1** - Vista da (a) ruptura dos diques de proteção contra cheias do vale central do Rio Mondego e (b) inundação dos campos agrícolas no Baixo Mondego, em dezembro de 2019.



**Figura 2** - Localização da área selecionada no vale central do Rio Mondego, centrada nas coordenadas 40°11'2.79"N; 8°38'6.50"W.



obtidas por detecção remota a partir do satélite Sentinel-2 em cenário de pré-cheia (4 de dezembro de 2019) e de pós-cheia (29 de dezembro de 2019) (**Figura 3**). A área selecionada tem  $\approx 2.000$  ha. As imagens do satélite Sentinel-2 analisadas não apresentavam a presença de nuvens na área de estudo.

Os dados de detecção remota utilizados no mapeamento das áreas inundadas foram adquiridos por intermédio do satélite Sentinel-2, do Programa Copernicus, da Agência Espacial Europeia. A missão Sentinel-2 tem como objetivo principal a monitorização da superfície terrestre, tem uma órbita quase-polar e dispõe de um sensor multiespectral com 13 bandas. De entre essas bandas, a **Tabela 1** identifica só aquelas pertinentes à produção dos mapas apresentados neste trabalho (RGB e MNDWI), visando o estudo de áreas inundadas.

O MNDWI (XU, 2006) distingue-se de outros índices dedicados à identificação de massas de água pelo facto de usar a banda SWIR, em vez de a banda NIR, como é no caso do NDWI, por exemplo. O MNDWI é calculado por meio da Equação (1):

$$\text{MNDWI} = (\text{Green} - \text{SWIR}) / (\text{Green} + \text{SWIR}) \quad (1)$$

O MNDWI toma valores no intervalo  $[-1,+1]$ , com valores positivos a indicar a presença de massas de água (XU, 2006; DU *et al.*, 2016), em especial valores positivos elevados. Neste estudo, o MNDWI foi calculado a partir dos dados de refletância do satélite Sentinel-2 registados nas bandas do verde (Green, B03) e infravermelho de onda curta (SWIR1, B11) (DU *et al.*, 2016). Em virtude da necessidade de efetuar os cálculos com a informação relativa às duas bandas espectrais expressa na mesma resolução espacial, procedeu-se à reamostragem da banda do verde de 10 para 20 m.

**Tabela 1** - Características de bandas espectrais do satélite Sentinel-2.

Banda	Nome da banda	Comprimento de onda central na banda (nm)	Largura da banda (nm)	Resolução espacial (m)
B02	Azul ( <i>blue</i> )	490	65	10
B03	Verde ( <i>green</i> )	560	35	10
B04	Vermelho ( <i>Red</i> )	665	30	10
B11	SWIR1	1610	90	20

Fonte: ESA (2015).



**Figura 3** - Área de estudo na situação de (a) pré-cheia (imagem de 4 de dezembro de 2019); e (b) pós-cheia, com a inundação dos campos limítrofes do Rio Mondego devido a colapso de infraestrutura de defesa contra cheias (imagem de 29 de dezembro de 2019); é visível o local em que o dique rompeu e o respetivo cone de dejeção. As imagens das bandas de composição do visível são do satélite Sentinel-2.

O uso da banda do infravermelho de onda curta contemplado no cálculo do MNDWI é potencialmente vantajoso para o objetivo de identificação de superfícies com água, visto que as massas de água geralmente absorvem mais energia nessa banda do que na banda do infravermelho próximo, o que conduz a valores de MNDWI mais elevados, relativamente ao NDWI (SINGH *et al.*, 2015; DU *et al.*, 2016). Por outro lado, solo, vegetação e áreas construídas apresentam maior refletância na banda do infravermelho de onda curta do que na banda do verde (SUN *et al.*, 2012), resultando em valores negativos baixos para essas classes.

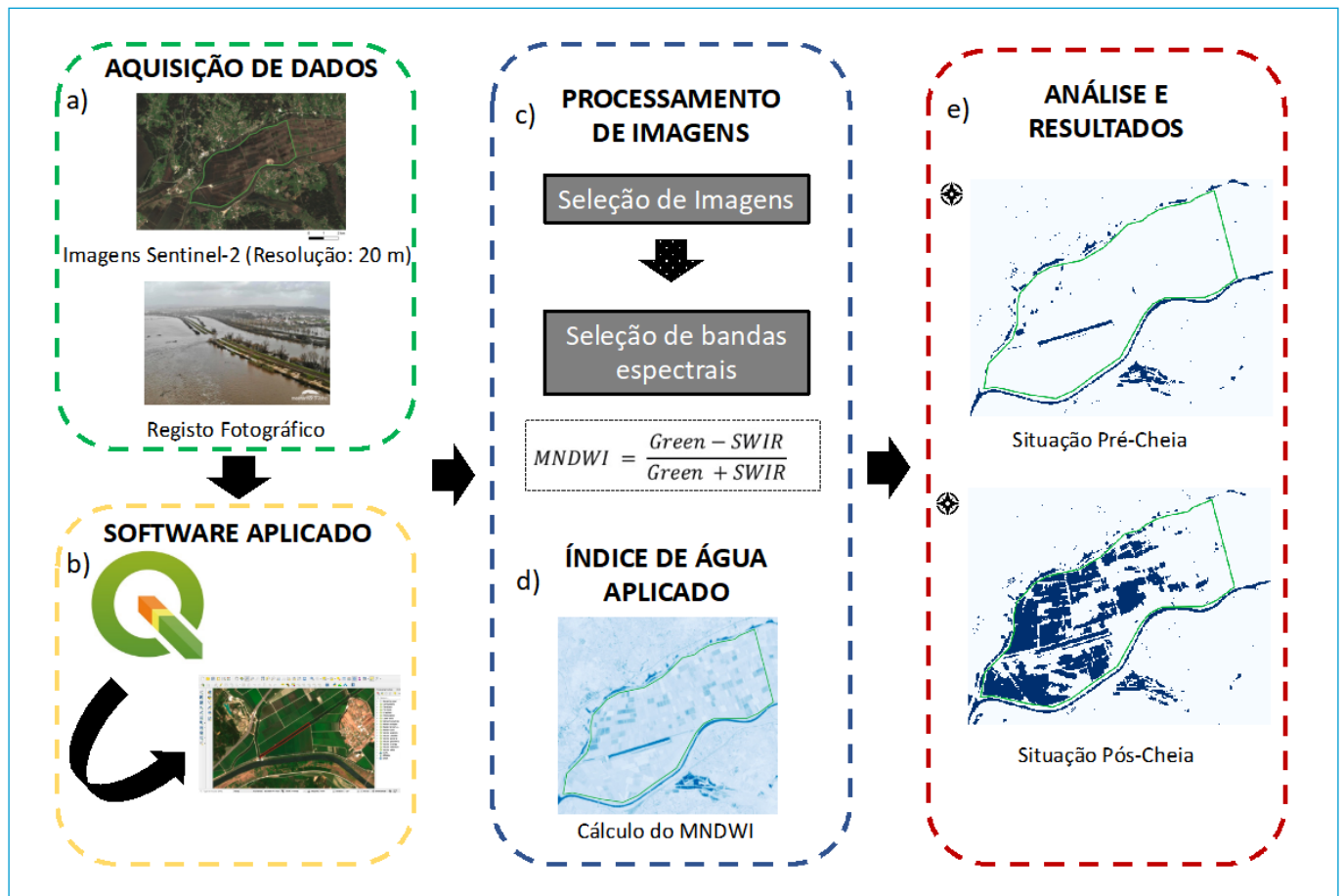
Neste trabalho, para efeito de mapeamento da área de estudo, consideraram-se duas classes (i.e., “água” e “não água”) e geraram-se os correspondentes mapas binários, para melhor identificar apenas a presença de água. Na classificação das imagens referentes ao MNDWI, tomou-se  $MNDWI = 0$  como valor crítico de decisão, para distinguir

a superfície da água de superfícies com outros atributos, sendo esse valor comumente aceito e aplicado em estudos similares (XU, 2006; DU *et al.*, 2016; GHANSAH *et al.*, 2021). Para elaboração das imagens produzidas, o tratamento dos dados relativos às bandas do satélite Sentinel-2 foi feito com recurso ao software de *open source* QGIS, versão 3.6.

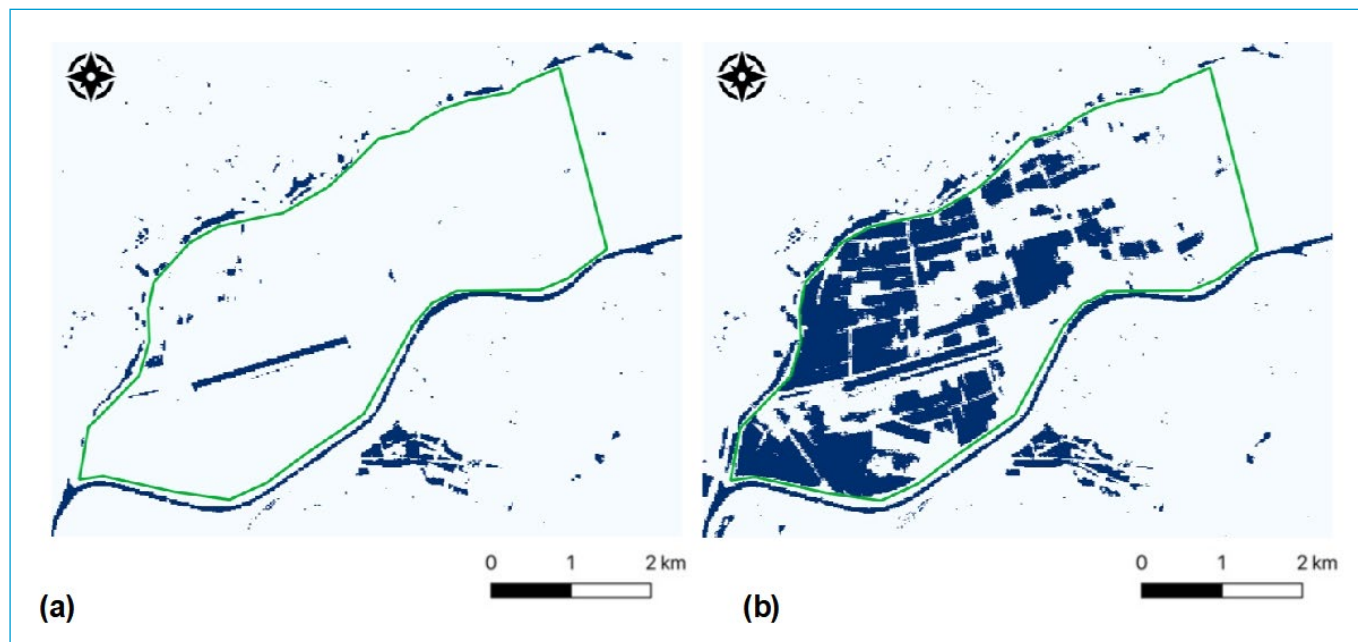
A **Figura 4** fornece, por meio de um fluxograma simplificado, uma visão geral das diferentes etapas da metodologia aplicada neste estudo.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir de imagens do satélite Sentinel-2, calculou-se o MNDWI para as situações de pré-cheia e de pós-cheia na área de estudo selecionada, relatadas na seção 2. Com base nesse índice construíram-se, para as classes “água” e “não água”, os mapas apresentados nas **Figuras 5a e 5b**. Nesses mapas, os píxeis de cor azul



**Figura 4** - Fluxograma simplificado da metodologia utilizada neste estudo. (a) Aquisição de dados; (b) software aplicado; (c) processamento de imagens; (d) índice de água aplicado; (e) análise e resultados.



**Figura 5** - Mapeamento da presença de água na área de estudo baseado no *Modified Normalized Difference Water Index* (Sentinel-2, resolução espacial de 20 m), com a cor azul a indicar superfícies com água (MNDWI > 0): (a) na situação de pré-cheia (4 de dezembro de 2019); (b) na situação de pós-cheia (29 de dezembro de 2019).

identificam a presença de água na superfície observada, o que, na **Figura 5b**, inclui as áreas inundadas decorrentes do colapso dos diques de proteção.

Os valores positivos do MNDWI conduzem à estimativa de existência de superfície de água na área de estudo em 31,09 ha, em 4 de dezembro de 2019, e 777,45 ha, em 29 de dezembro de 2019, o que corresponde a uma área adicional inundada de 746,36 ha, ou seja, a um valor percentual de variação de superfície de água de 2.400%. O valor relativo à extensão da inundação na área selecionada provocada pela ruptura dos diques de proteção no Rio Mondego respeita a observação efetuada oito dias após a ocorrência do colapso dessas infraestruturas.

Por meio da obtenção de imagens de satélite Sentinel-2, disponibilizadas pelo Programa Copernicus, e do mapeamento de áreas inundadas com recurso ao MNDWI, é possível monitorizar a dinâmica da evolução quanto à extensão da área inundada e usar essa informação no planejamento de intervenções no terreno, enquanto o próprio evento de inundação está a decorrer. O mapeamento de superfícies terrestres com água (e.g., massas de água, áreas inundadas) recorrendo ao MNDWI mostra resultados promissores, tal como se verificou em estudos anteriores (DU

*et al.*, 2016; SOLOVEY, 2020; SHERSTOBITOV *et al.*, 2021; SIVANPILLAI *et al.*, 2021).

#### 4. CONCLUSÕES

A ampla extensão espacial, coberta tipicamente por imagens de satélite, a elevada frequência e resolução espacial, bem como o acesso sem custos associados às imagens multiespectrais do satélite Sentinel-2, constituem as principais vantagens que promovem a utilização de índices de água baseados em dados de satélite para identificar rapidamente áreas afetadas por inundações. Por meio da obtenção de imagens do Sentinel-2 e do mapeamento de áreas inundadas com recurso ao MNDWI, é possível monitorizar a extensão de áreas inundadas. A avaliação, em um curto espaço de tempo, da extensão de inundações e danos provocados é fundamental para a atuação mais eficaz de todos os intervenientes (e.g., meios de socorro, proteção civil) em situações dessa natureza. O uso de dados do satélite Sentinel-2 torna significativamente mais fácil e rápido identificar e delimitar remotamente grandes áreas alagadas, em comparação com abordagens que exigem trabalho de campo, com grande esforço para ser realizado, prazo de execução alargado e enfrentando frequentemente

limitações de acessibilidade dentro da área inundada, típicas de cenários de cheias.

Neste trabalho, com recurso a imagens do Sentinel-2 e pela aplicação do MNDWI, foi possível obter resultados promissores que permitiram mapear a área inundada, em situação de cheia, que resultou do colapso/rotura dos diques do Rio Mondego, na região do Baixo Mondego. Futuros trabalhos deverão explorar a comparação entre os resultados obtidos com o MNDWI e os provenientes de outros índices de água, já que não existem dados de terreno que permitam validar os resultados por detecção remota.

A metodologia aplicada permite ainda apoiar a validação da modelação de áreas inundadas nessa região. Esse tipo

de modelação é usado, por exemplo, no âmbito do Plano de Gestão dos Riscos de Inundações (PGRI) relativo a essa bacia hidrográfica. Os PGRI definem medidas para a redução das consequências prejudiciais das inundações nas áreas de risco significativo; têm, portanto, como objetivo reduzir o risco nas áreas de possível inundações, com preocupações relativamente à saúde humana, às atividades económicas, ao património cultural e ao ambiente. Estão atualmente em elaboração os PGRI do 2º ciclo de implementação da Diretiva da Avaliação e Gestão dos Riscos de Inundações (nº 2007/60/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de outubro de 2007), que teve início em 2018.

## REFERÊNCIAS

- BOSCHETTI, M.; NUTINI, F.; MANFRON, G.; BRIVIO, P. A.; NELSON, A. Comparative analysis of normalised difference spectral indices derived from MODIS for detecting surface water in flooded rice cropping systems. *PLoS One*, v. 9, n.2, p. 1-21, 2014.
- BRESCIANI, M.; STROPPIANA, D.; ODERMATT, D.; MORABITO, G.; GIARDINO, C. Assessing remotely sensed chlorophyll-a for the implementation of the water framework directive in European perialpine lakes. *Science of The Total Environment*, v. 409, n. 17, p. 3083-91, 2011.
- CÂMARA MUNICIPAL DE MONTEMOR-O-VELHO (CMMV). *Página Oficial da Câmara Municipal de Montemor-o-Velho* [2019]. Disponível em: <https://www.cm-montemorvelho.pt/index.php>. Acesso em: 16 mar. 2022.
- DINH, D. A.; ELMAHRAD, B.; LEINENKUGEL, P.; NEWTON, A. Time series of flood mapping in the Mekong Delta using high resolution satellite images. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 266, n. 1, p. 1-10, 2019.
- DU, Y.; ZHANG Y.; LING F.; WANG Q.; LI W.; LI X. Water bodies' mapping from Sentinel-2 imagery with modified normalized difference water index at 10-m spatial resolution produced by sharpening the SWIR Band. *Remote Sensing*, v. 8, n. 4, p. 1-19, 2016.
- EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). *Sentinel-2 User Handbook*. Paris: ESA, 2015, 64 p. (ESA Standard Doc., n. 1).
- FREIRE, D. F. A.; ANTUNES DO CARMO, J. S. As cheias do rio Mondego e as soluções que tardam a implementar. In: NUNES, A.; AMARO, A.; VIEIRA, A.; DE CASTRO, F. V.; FÉLIX, F. (Eds.). *Geografia, Riscos e Proteção Civil*. v. 1. Lisboa: RISCOS, 2021, p. 73-95.
- GHANSAH, B.; NYAMEKYE, C.; OWUSU S.; AGYAPONG E. Mapping flood prone and hazards areas in rural landscape using Landsat images and random forest classification: Case study of Nasia watershed in Ghana. *Cogent Engineering*, v. 8, n. 1, p. 1-16, 2021.
- INSTITUTO PORTUGUÊS DO MAR E DA ATMOSFERA (IPMA). *Boletim Climatológico Mensal - Dezembro 2019*. Lisboa: Ed. Instituto Português do Mar e da Atmosfera, I.P., 2019, 14 p.
- KHARIN, V. V.; ZWIERS, F. W.; ZHANG, X.; HEGERL, G. C. Changes in temperature and precipitation extremes in the IPCC ensemble of global coupled model simulations. *Journal of Climate*, v. 20, n. 8, p. 1419-44, 2007.
- LOURENÇO, L.; VELEZ, F.; CUNHA, P.P.; DE LIMA, I.P.; DE LIMA, J.L.M.P.; TAVARES, A. *Flood risk in the Lower Mondego - Guidebook of the study trip nº 3*. 1 ed. Coimbra: Ed. RISCOS, 2017, 75 p.
- MCFEETERS, S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, v. 17, p. 1425-32, 1996.
- PEKEL, J. F.; COTTAM, A.; GORELICK, N.; BELWARD, A. S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, v. 540, p. 418-22, 2016.



SHERSTOBITOV, D. N.; ERMAKOV, V. V.; BOCHKINA, A. A.; TUPITSYNA, O. V.; BYKOV, D. E.; CHERTES, K. L. Monitoring of the hydrological regime of the Saratov reservoir using the MNDWI index. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 818, n. 1, p. 012048, 2021.

SINGH, K. V.; SETIA, R.; SAHOO, S.; PRASAD, A.; PATERIYA, B. Evaluation of NDWI and MNDWI for assessment of waterlogging by integrating digital elevation model and groundwater level. *Geocarto International*, v. 30, n.6, p. 650-61, 2015.

SIVANPILLAI, R.; JACOBS, K. M.; MATTILIO, C. M.; PISKORSKI, E. V. Rapid flood inundation mapping by differencing water indices from pre-and post-flood Landsat images. *Frontiers of Earth Science*, v. 15, n. 1, p. 1-11, 2021.

SOLOVEY, T. Flooded wetlands mapping from Sentinel-2 imagery with spectral water index: A case study of Kampinos National Park in central Poland. *Geological Quarterly*, v. 64, n. 2, p. 492-505, 2020.

SUN, F.; SUN, W.; CHEN, J.; GONG, P. Comparison and improvement of methods for identifying waterbodies in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, v. 33, n. 21, p. 6854-6875. 2012.

XU, H. Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, v. 27, n. 14, p. 3025-33, 2006.

