



7, 8 e 9
Março 2018
ÉVORA
Évora Hotel

GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS:
**NOVOS
DESAFIOS**

QUALIDADE DA ÁGUA NO RESERVATÓRIO DE ALQUEVA ATRAVÉS DE MEDIÇÕES *IN SITU* E DE DETEÇÃO REMOTA DE SATÉLITE

Gonçalo, RODRIGUES¹; Miguel, POTES²; Maria J., COSTA²; Rui, SALGADO²; Alexandra², PENHA²; Maria, NOVAIS²

¹ Universidade de Évora, Rua Romão Ramalho, 59. 7000-671
Évora, Portugal, grodrigues@uevora.pt

² Instituto de Ciências da Terra (ICT), Universidade de Évora, Rua Romão Ramalho, 59, 7000-671
Évora, Portugal

Resumo

Um dos objetivos propostos para o projeto ALOP (*ALentejo* Observation and Prediction systems) passa pela implementação de um método de deteção remota por satélite combinado com medidas *in situ*, para a monitorização de parâmetros relacionados com a qualidade da água. Os algoritmos empíricos propostos com o espectrómetro MERIS (ENVISAT) foram testados para o instrumento multi-espectral MSI (SENTINEL-2) para estimar a concentração de clorofila *a*, densidade de cianobactérias e a turbidez da água na albufeira de Alqueva. O instrumento MSI apresenta uma elevada resolução espacial, assim como um bom tempo de revisitação para a albufeira de Alqueva. A obtenção de estimativas da qualidade da água diretamente da imagem de satélite permite a identificação rápida de *blooms* de algas, bem como das variações temporais e/ou espaciais dos parâmetros de qualidade da água. As estimativas de concentrações de clorofila *a*, densidade de cianobactérias e turbidez da água obtidas com recurso ao instrumento MSI, serão testadas no contexto de um evento de *bloom* de micro-algas ocorridas no Verão e início do Outono de 2017, e ainda relacionadas com as variações das condições meteorológicas para o mesmo período.

Palavras-chave: Sentinel-2, Albufeira de Alqueva, Turbidez, Clorofila *a*, Cianobactérias, Qualidade da água

Tema: Qualidade da água e dos ecossistemas



7, 8 e 9
Março 2018
ÉVORA
Évora Hotel

GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS:
**NOVOS
DESAFIOS**

1. INTRODUÇÃO

A albufeira de Alqueva situada na região do Alentejo é uma barragem construída no leito do rio Guadiana, sendo um dos maiores lagos artificiais do Sul da Europa quanto à área superficial (250 km²). Este reservatório é crucial no armazenamento de água para utilização nos períodos de seca, para fins industriais, domésticos e agricultura. A qualidade da água é fundamental nestes fins, sendo atualmente monitorizada através de amostras recolhidas e analisadas em laboratório. No entanto esta monitorização apresenta limitações espaciais e temporais que impedem uma monitorização completa dos parâmetros de qualidade da água.

Com o rápido desenvolvimento da tecnologia de deteção remota nos últimos anos, o mapeamento dos parâmetros de qualidade da água nos lagos interiores e deteção de variações nos parâmetros de qualidade da água, tem sido cada vez mais realizada com recurso a imagens de satélite (Chandrasekar *et al*, 2010; Barrett e Frazier, 2016).

A monitorização da qualidade da água com recurso à deteção remota envolve normalmente a determinação de uma relação entre refletâncias em certas bandas espectrais (ou combinações de bandas) e os parâmetros de qualidade da água medidos no local ou em laboratório.

Potes *et al*. (2011) desenvolveu um método para estimar concentrações de clorofila *a* e cianobactérias sobre o Alqueva, combinando diferentes refletâncias espectrais de superfície do Alqueva com recurso ao espectrómetro MERIS e análises de laboratório. Para além destes dois parâmetros, o mesmo autor utilizou imagens de satélite MERIS de forma a obter estimativas de turbidez na mesma albufeira, permitindo avaliar variações espaciais e temporais deste parâmetro na albufeira (Potes *et al*, 2012).

Os dados obtidos através das missões Sentinel-2 (MSI), para além de atualmente apresentarem alta revisitação, com cobertura global sistemática na região da albufeira de Alqueva de três a sete dias, apresenta ainda alta resolução espacial. Comparativamente com o espectrómetro MERIS, apresenta uma melhoria na resolução espacial, com o MSI a apresentar 10 m de resolução nas bandas espectrais com maior resolução, sendo que o MERIS apresentava 300 m de resolução máxima. No presente estudo, pretende-se aplicar os algoritmos conseguidos por Potes *et al*. (2011, 2012) ao instrumento MSI de modo a estimar as concentrações de clorofila *a*, densidade de cianobactérias e turbidez da água na albufeira de Alqueva. De forma a estudar a viabilidade da utilização dos três algoritmos nas imagens de satélite do MSI, analisou-se um evento de *bloom* de micro-algas que ocorreu no reservatório de agosto a meados de outubro de 2017.

2. DADOS UTILIZADOS E METODOLOGIA

2.1. Instrumento MSI do Sentinel-2

O Instrumento MSI (MultiSpectral Instrument) a bordo do Sentinel-2 apresenta 13 bandas espectrais (visível e infravermelho próximo) com elevada resolução espacial, apresentando



7, 8 e 9
Março 2018
ÉVORA
Évora Hotel

GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS:
**NOVOS
DESAFIOS**

4 bandas com resolução de 10 m, seis bandas de 20 m e três bandas de 10 m (Figura 1).

Este apresenta ainda boa resolução temporal com 3 - 7 dias de revisitação na área onde a albufeira de Alqueva se insere.

Sentinel-2 Bandas	Central Wavelength (nm)	Resolução (m)
Band 1 - Coastal aerosol	443	60
Band 2 - Blue	490	10
Band 3 - Green	560	10
Band 4 - Red	665	10
Band 5 - Vegetation Red Edge	705	20
Band 6 - Vegetation Red Edge	740	20
Band 7 - Vegetation Red Edge	783	20
Band 8 - NIR	842	10
Band 8A - Narrow NIR	865	20
Band 9 - Water vapour	945	60
Band 10 - SWIR - Cirrus	1375	60
Band 11 - SWIR	1610	20
Band 12 - SWIR	2190	20

Figura 1. Bandas espectrais do instrumento MSI, comprimento de onda centrais e resolução espacial para cada banda.

As imagens do Sentinel-2 são num primeiro nível, correspondentes às radiâncias do topo da atmosfera, sendo que com o intuito de analisar os parâmetros à superfície, tal apenas é possível com o recurso às refletâncias da superfície. Com esse objetivo, utilizou-se o algoritmo de correcção atmosférica Sen2Cor desenvolvido pela ESA (European Space Agency) para converter as imagens do topo da atmosfera em refletâncias à superfície, com correcção de cirrus no canal de 1375 nm, vapor de água baseado nas bandas B8A e B9 (865 nm, 945 nm) e aerossóis (Uwe *et al*, 2013). O instrumento MSI do Sentinel 2 devido à sua elevada resolução espacial e temporal, permite a deteção visual de blooms de algas, nomeadamente com a utilização da imagem RGB através das bandas do azul (490 nm), do verde (560 nm) e do vermelho (665 nm).

O índice Maximum Chlorophyll Index (MCI) é um indicador da quantidade de clorofila presente na água e tem sido explorado como uma ferramenta muito útil na quantificação e monitorização de *blooms* de algas nos lagos interiores. Com o instrumento MSI este índice é calculado com base nas bandas dos 665, 705 e 740 nm (banda 4, 5 e 6, respetivamente).

2.2. Parâmetros de qualidade da água analisados

Os parâmetros de qualidade da água analisados na albufeira de Alqueva neste trabalho são a concentração de clorofila *a*, densidade de cianobactérias e turbidez da água.



7, 8 e 9
Março 2018
ÉVORA
Évora Hotel

GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS:
**NOVOS
DESAFIOS**

A Clorofila *a* é o único pigmento fotossintético presente em todas as plantas sendo, portanto, um bom indicador da atividade fotossintética e da biomassa fitoplanctónica.

É a principal variável indicadora do estado trófico nos ambientes aquáticos, sendo a indicada para a verificação do nível de produção primária. As cianobactérias são organismos fotossintéticos unicelulares que se podem agrupar em colónias de dimensões suficientemente grandes para serem perceptíveis à vista desarmada.

Algumas espécies de cianobactérias, em casos de grandes densidades, produzem e libertam toxinas na água que podem contaminar a água, constituindo um sério risco à saúde pública. Um dos grandes problemas dos *blooms* de cianobactérias é que muitas destas toxinas não podem ser eliminadas por métodos tradicionais usados em estações de tratamento de água.

A turbidez é causada pela presença de materiais sólidos em suspensão como: silte, argila, sílica ou coloides, matérias orgânicas e inorgânicas, organismos microscópicos e algas. A turbidez é um dos parâmetros de qualidade para avaliação das características físicas da água bruta e da água tratada. O valor máximo permitido para água tratada é de 1 NTU (unidade nefelométrica de turbidez) na saída das estações de tratamento de água e 5 NTU em qualquer ponto da rede de distribuição.

2.3. Metodologia

Analisaram-se as variações temporais e espaciais de um evento de *bloom* de micro-algas ocorrido na albufeira de Alqueva no período Agosto - Outubro de 2017, utilizando para isso as refletâncias de superfície obtidas pelo instrumento MSI. Para obter os valores da refletância à superfície (nível L2A), o módulo de correção atmosférica Sen2Cor foi aplicado ao produto do nível L1C associado (radiâncias no topo da atmosfera).

Potes et al. (2011) através de refletâncias de superfície e de relações entre bandas, encontrou empiricamente relações para determinar concentrações de clorofila *a* e densidade de cianobactérias na albufeira de Alqueva, utilizando dados de laboratório no período 2003-2006, e validados com dados de 2007. O mesmo autor, aplicando a mesma metodologia, encontrou empiricamente uma relação entre dados analisados *in situ* de turbidez com a razão entre refletâncias nas bandas do verde e do azul escuro. Os algoritmos encontrados para o espectrómetro MERIS foram aplicados ao instrumento MSI e as bandas utilizadas correspondem aos comprimentos de onda mais próximos dos utilizados pelo MERIS. Calculou-se assim, as estimativas dos parâmetros de qualidade da água pixel a pixel com as refletâncias de superfície do MSI.

Foi analisada a variação nestes três parâmetros ao longo de 7 dias neste período de Agosto-Outubro, analisando mapas de cobertura total no Alqueva e ainda verificando a evolução temporal em 5 pontos pré-definidos na albufeira.

Selecionaram-se 5 pontos na albufeira de Alqueva, de forma a verificar a variação dos índices de qualidade da água no período agosto-outubro de 2017.

Os pontos foram escolhidos, de forma a cobrir a albufeira toda e que representassem, da melhor forma a qualidade da água nesses locais. Assim, foram seleccionados pontos longe das margens, sendo o ponto da Amieira no ramo do Degebe a Oeste da albufeira, Montante a Sul, Estrela e Campinho no centro e Monsaraz, o ponto mais a norte da albufeira (Figura 2).

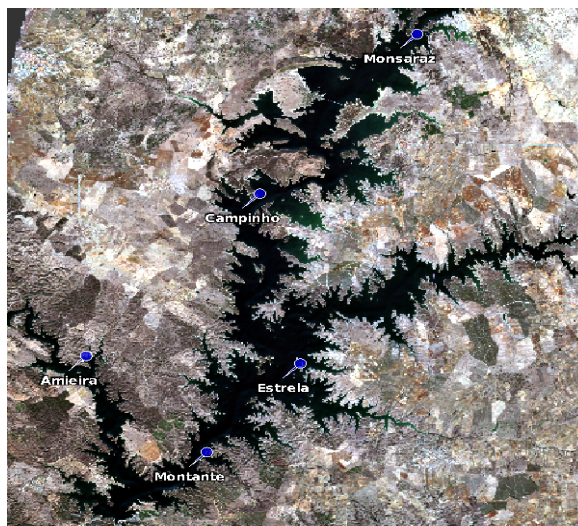


Figura 2. Localização dos pontos seleccionados para análise.

Procedeu-se ainda ao cálculo dos parâmetros de qualidade da água analisados para todos os pixéis localizados sobre o reservatório de Alqueva de forma a ter cobertura total e não apenas pontual. Para isso, utilizaram-se as equações encontradas com recurso ao satélite MERIS, calculando-se assim, as estimativas dos parâmetros de qualidade da água pixel a pixel para as refletâncias à superfície do Sentinel-2. Na elaboração/análise de mapas e processamento estatístico recorreu-se à ferramenta SNAP disponibilizada pela ESA e à linguagem de programação Python.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No Verão e início de Outono de 2017, desenvolveu-se um *bloom* de micro-algas no reservatório de Alqueva, com as condições meteorológicas a favorecer esse desenvolvimento, ou seja, temperaturas elevadas e ventos fracos praticamente no Verão todo e até meados de outubro.

Em agosto e até meados de setembro, o *bloom* de micro-algas afetou principalmente a região mais a norte da albufeira e as margens direitas. Uma das possíveis razões para se apresentarem maiores concentrações de micro-algas nas margens à direita do reservatório, poderá estar relacionada com o vento predominante de Norte/Noroeste. Na figura 3 apresenta-se a direção do vento para o mês de setembro numa estação meteorológica (Estação da Barbosa) aproximadamente a 1 km para oeste do ponto Montante (figura 2), em terra. Nesta figura verifica-se que na maior parte do mês a direção do vento foi nomeadamente dos quadrantes de norte/noroeste, entre os 280 e os 350 graus de direção.

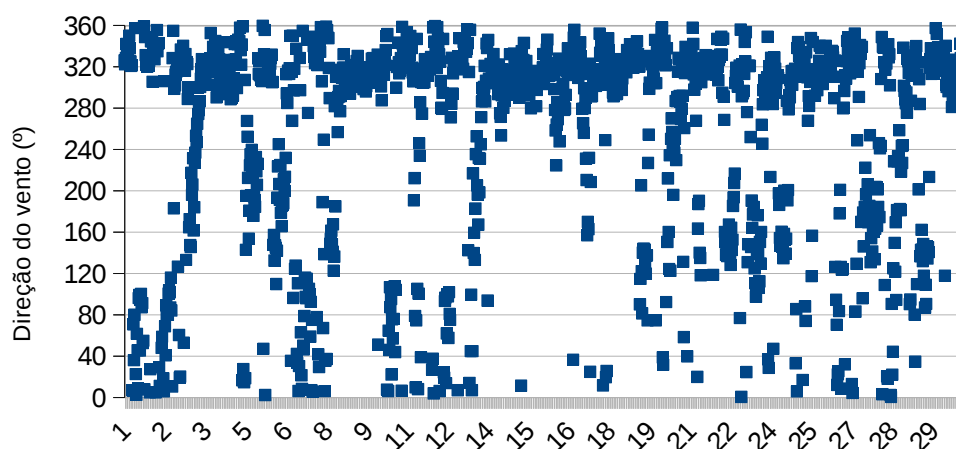


Figura 3. Direção do vento no mês de setembro, na estação meteorológica da Barbosa.

Com recurso ao Sentinel-2 é possível identificar visualmente o *bloom* de micro-algas com recurso à imagem RGB (Figura 4 à direita) e quantificar o bloom através do índice *Maximum Chlorophyll Index* (Figura 4 à esquerda). Verifica-se nesta figura de dia 12 de setembro a boa capacidade do índice MCI em identificar os *blooms* de micro-algas, com valores elevados deste índice a coincidir com locais de presença do *bloom* na imagem RGB (Píxeis a verde).

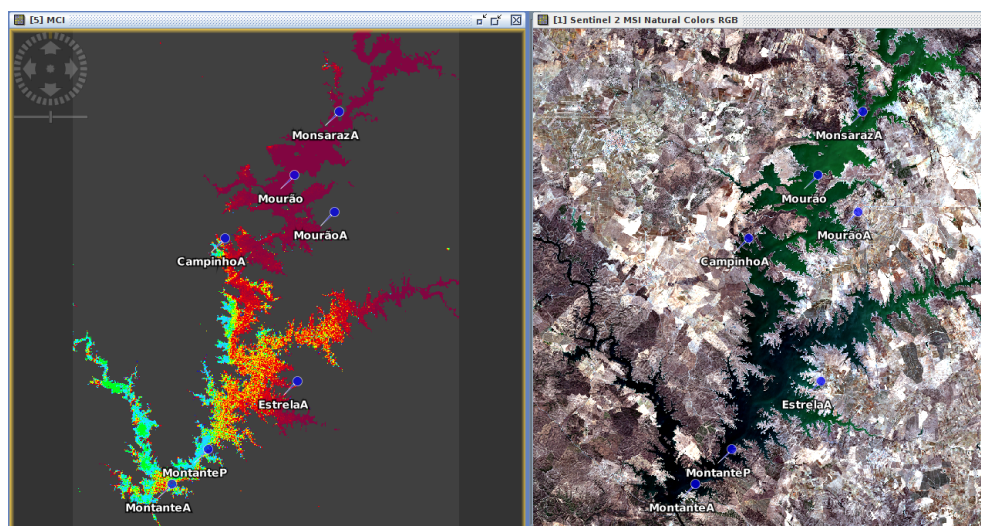


Figura 4. Imagem RGB (direita) e índice Maximum Chlorophyll Index (esquerda), dia 12 de setembro de 2017.

O *bloom* de micro-algas continuou a desenvolver-se e a propagar-se em praticamente toda a albufeira no fim de setembro e início de outubro, com a continuação do tempo quente e vento predominante de Norte/Noroeste. As temperaturas muito elevadas da primeira quinzena de outubro foram interrompidas com a passagem da tempestade tropical Ofélia ao

largo de Portugal Continental, seguida de uma superfície frontal fria, com vários dias de vento Sudoeste/Oeste, precipitação e queda acentuada nas temperaturas do ar. Na figura 5, a evolução da temperatura no mês de outubro na estação da Barbosa.

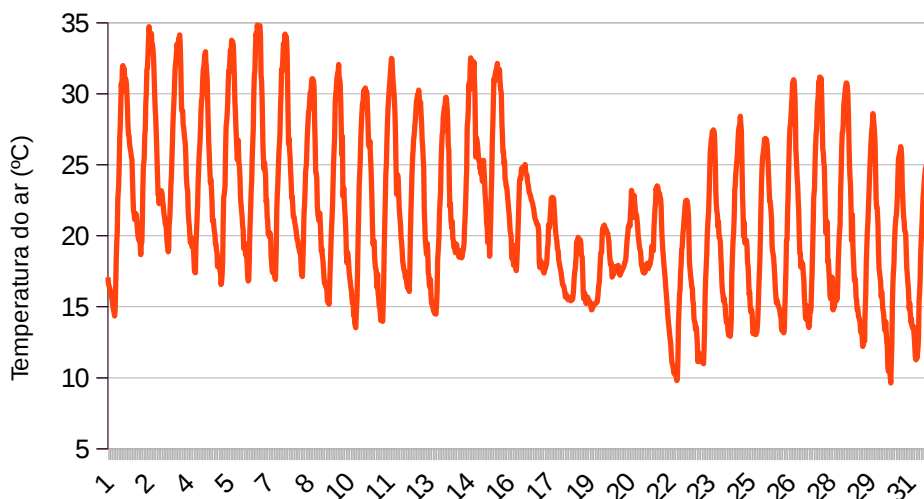


Figura 5. Evolução da temperatura do ar em outubro na estação da Barbosa.

Esta diminuição brusca de temperatura do ar entre 15 e 19 de outubro (Aproximadamente 10°C), levou a uma melhoria significativa da qualidade da água na albufeira de alqueva, bem identificada nos mapas de estimativa da qualidade da água para os dias 12 e 22 de outubro. Na figura 6 e 7 apresentam-se resultados obtidos com o instrumento MSI do qual foi possível estimar a concentração de clorofila a, densidade de cianobactérias e turbidez da água à superfície, para o dia 12 de outubro e nas figuras 8 e 9, para o dia 22 de outubro.

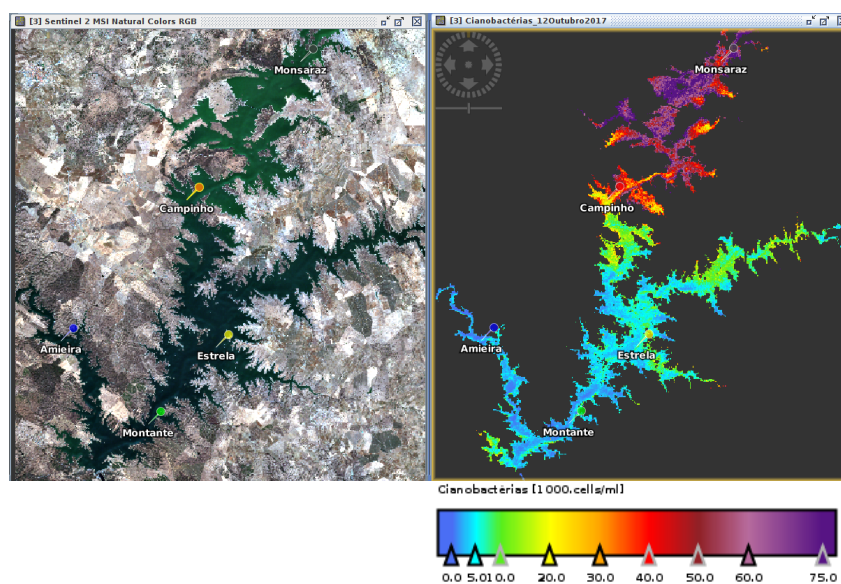


Figura 6. Imagem RGB e mapa de cianobactérias para dia 12 de outubro

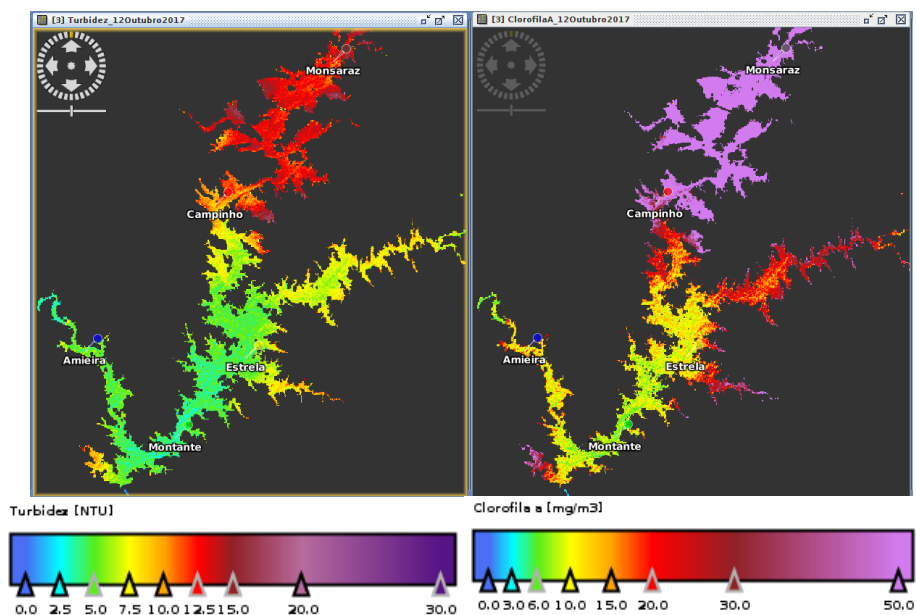


Figura 7. Mapa de turbidez (Esquerda) e clorofila a (Direita), dia 12 de outubro de 2017.

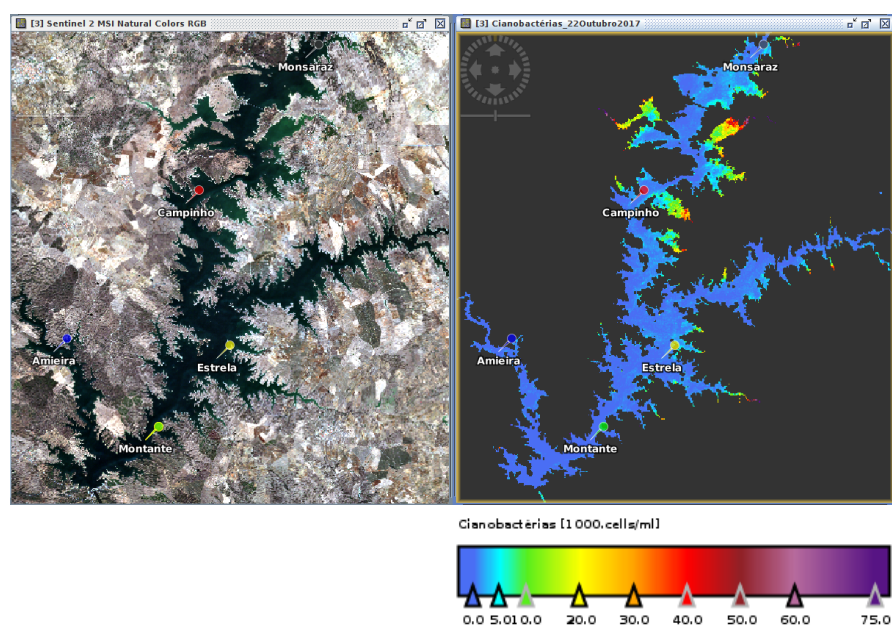


Figura 8. Imagem RGB e mapa de cianobactérias para dia 22 de outubro

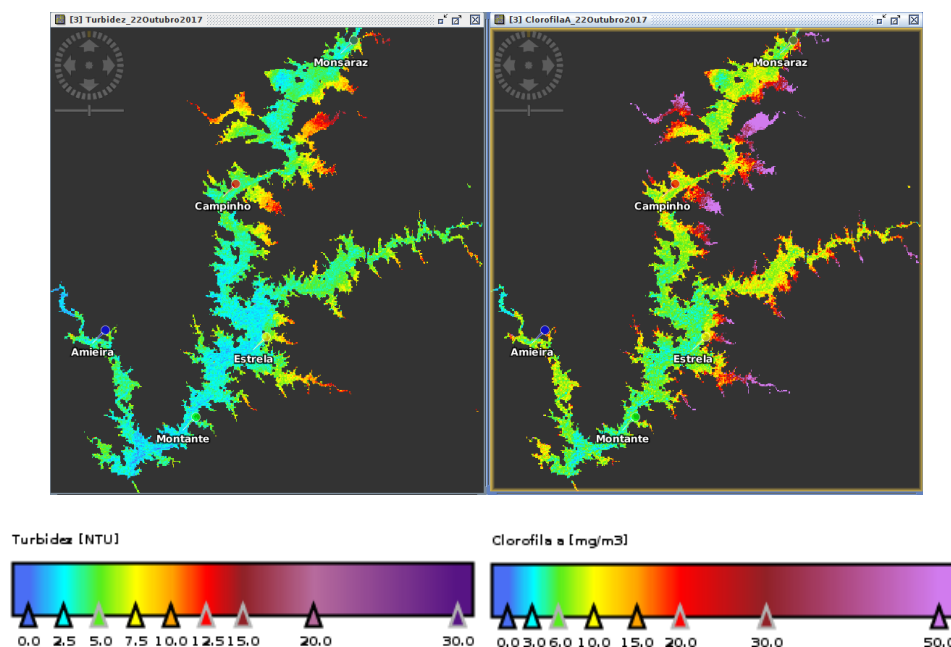


Figura 9. Mapa de turbidez (Esquerda) e clorofila a (Direita), dia 22 de outubro de 2017.

A presença de micro-algas associada ao aumento de organismos fotossintéticos presentes na água tendem a aumentar a turbidez da água. Assim, pode-se considerar como uma boa estimativa de turbidez obtida com o MSI para o dia 12, pela boa relação entre a presença de micro-algas evidenciada na imagem RGB (Figura 6 e 8) e valores mais elevados de turbidez da água (Figura 7 e Figura 9).

Evidencia-se também uma excelente relação entre os locais com presença de micro-algas (imagem RGB das figuras 6 e 8) com os valores mais elevados de clorofila a e cianobactérias, apresentando-se este como um bom indicador para estimar os dois parâmetros de qualidade da água analisados através dos algoritmos empíricos obtidos. Na figura 10 e figura 11 apresenta-se a variação temporal de clorofila a e da turbidez da água à superfície nos cinco pontos selecionados (Figura 1), assinalando uma vez mais o início de outubro como um período em que a qualidade da água foi fraca e melhoria significativa de qualidade da água no período entre 12 e 22 de outubro.

Efetuaram-se análises de laboratório de clorofila a para cinco amostras de água recolhidas no Alqueva em pontos diferentes, dia 26 de outubro, comparando-se estas com as estimativas de clorofila a para dia 22 e 29 de outubro através do instrumento MSI. Verificando que as medições de clorofila a (exceptuando no ponto Alqueva-Montante) de dia 27, se situam compreendidas entre os valores de dia 22 e 29 para o instrumento MSI, e admitindo que a qualidade da água melhorou de dia 22 para dia 29 de outubro, será um bom indício da boa estimativa de concentrações de clorofila a através do instrumento MSI do Sentinel-2.

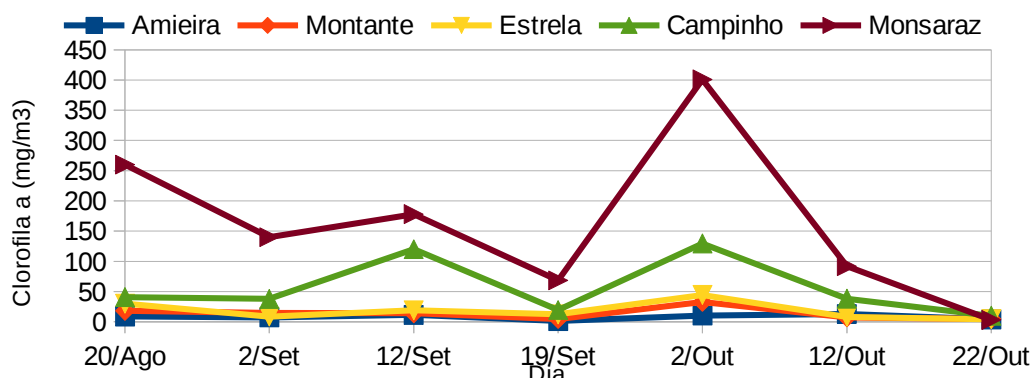


Figura 10. Variação da clorofila a estimada com o MSI no evento de *bloom* de micro-algas

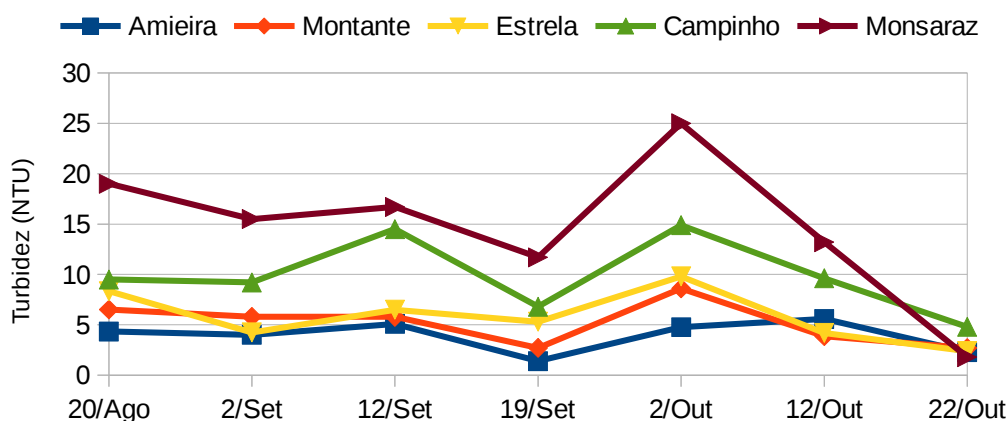


Figura 11. Variação da turbidez da água à superfície estimada com o MSI no evento de *bloom* de micro-algas

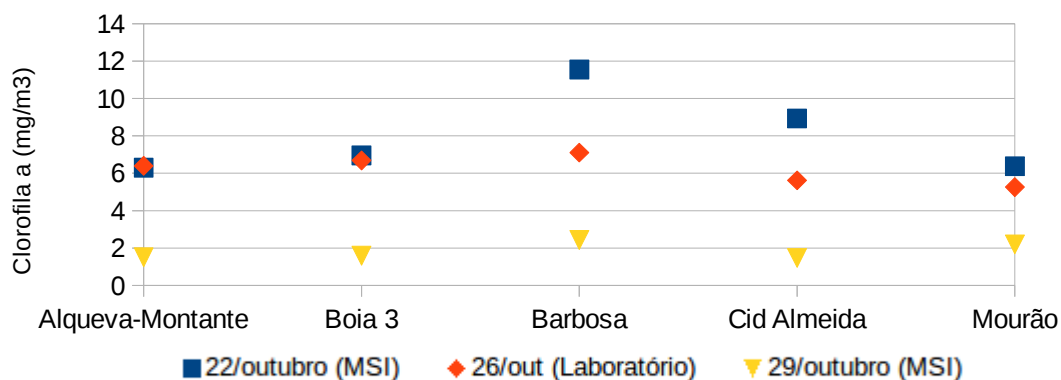


Figura 12. Clorofila a com o MSI (Dia 22 e 29 de outubro) e análises de laboratório (Dia 26 de outubro)



7, 8 e 9
Março 2018
ÉVORA
Évora Hotel

GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS:
**NOVOS
DESAFIOS**

4. CONCLUSÃO

Desenvolveu-se uma metodologia baseada em imagens do Sentinel-2, utilizando refletâncias à superfície do instrumento MSI a bordo deste satélite e aplicando algoritmos anteriormente estimados e com elevados coeficientes de correlação para a albufeira de Alqueva.

No evento de *bloom* de micro-algas ocorrido no Verão-Outono de 2017, o facto de se observarem boas estimativas da concentração de clorofila *a*, densidades de cianobactérias, e ainda turbidez da água nos diferentes locais com maior e menor presença de micro-algas na imagem RGB, é um forte indício da boa estimativa através dos algoritmos empíricos obtidos com recurso ao MERIS, e aplicados para as refletâncias do MSI. Evidencia-se não só pelas imagens RGB e índice MCI, como pelos parâmetros de qualidade da água analisados, que a região mais a norte do reservatório, apresenta pior qualidade da água, sendo no troço mais a Oeste, o de melhor qualidade neste período analisado. A melhor qualidade da água neste troço, evidenciada nas imagens apresentadas e nos gráficos da Amieira, deverá estar relacionada pela maior distância ao local onde o bloom de micro-algas se começou a desenvolver, local mais a Norte da albufeira, a norte de Monsaraz. Evidencia-se também a forte influência dos parâmetros meteorológicos nos parâmetros de qualidade da água, com elevadas temperaturas do ar e vento fraco praticamente todo o Verão de 2017, associado ao desenvolvimento de micro-algas na albufeira. Por outro lado, com a diminuição de temperaturas a partir de dia 15 de outubro, com vários dias de vento Sudoeste/Oeste, a contrastar com os meses anteriores de elevadas temperaturas do ar e vento de Noroeste/Norte, levaram assim à melhoria significativa da qualidade da água na albufeira.

Encontram-se em curso, medições de clorofila *a* o que permitirá afinar os algoritmos empíricos utilizando dados MSI para a albufeira de Alqueva. Para além da clorofila *a*, encontram-se também em período de medições outros parâmetros de qualidade da água, de forma a permitir a monitorização e controlo de vários parâmetros de qualidade da água através do Sentinel-2.

Apresenta-se ainda como trabalhos futuros, a obtenção de estimativas de qualidade da água com recurso ao satélite Sentinel-3 através do instrumento OLCI (Ocean and Land Colour Instrument).



7, 8 e 9
Março 2018
ÉVORA
Évora Hotel

GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS:
**NOVOS
DESAFIOS**

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é co-financiado pelo COMPETE 2020 através do projeto FCT (UID / GEO / 04683/2013) com a referência POCI-01-0145-FEDER-007690, pelo projeto ALOP (ALT20-03-0145-FEDER-000) e ainda pelo doutoramento em Ciências da Terra e do Espaço, da Universidade de Évora.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barrett D., Frazier A. (2016). Automated Method for Monitoring Water Quality Using Landsat Imagery. *Water* 2016, 8, 257.

Chandrasekar K.; Sessa Sai, M.V.R.; Roy P.S., Dwevedi R.S. (2010). Land Surface Water Index (LSWI) response to rainfall and NDVI using the MODIS Vegetation Index product. *Int. J. Remote Sens.* 31, 3987–4005.

Drikas, M.G., Newcombe, G. and Nicholson, B. (15 November 2001). Water treatment options for cyanobacteria and their toxins. *Proceedings Water Quality Technology Conference*. pp. 2006-2033.

Drusch M., Del Bello U., Carlier S., Colin O., Fernandez V., Gascon F., Hoersch B., Isola C., Laberinti P., Martimort P. (2012). Sentinel-2, ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sens. Environ.* 120, 25–36.

Brezonik P. L., Olmanson L. G., Bauer M. E., Kloiber S. M. (2007). "Measuring Water Clarity and Quality in Minnesota Lakes and Rivers: A Census-Based Approach Using Remote-Sensing Techniques," *Cura Report.*, pp. 3–13,

Potes M., Costa M. J., Silva J. C. B., Silva A. M., and Morais M. (2011). Remote sensing of water quality parameters over Alqueva reservoir in the south of Portugal, *Int. J. Remote Sens.*, 32, 3373– 3388.

Potes M., Costa M. J. and Salgado R. (2012). Satellite remote sensing of water turbidity in Alqueva reservoir and implications on lake modeling. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16, 1623-1633.

Uwe M., Jerome L., Rudolf R., Ferran G., Marc N. (2013) Sentinel-2 Level 2a Prototype Processor: Architecture, Algorithms and First Results. In *Proceedings of the ESA Living Planet Symposium*, Edinburgh, UK, 9–13 September.