

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Recuperação biofísica nas cicatrizes de incêndio

Ana Mafalda Quaresma Canelas da Silva

Mestrado em Ciências Geofísicas
Especialização em Meteorologia e Oceanografia

Dissertação orientada por:
Doutor João Paulo Martins
Professor Doutor Carlos da Camara

2020

Agradecimentos

No desenvolvimento do presente trabalho contei com o apoio de diversas pessoas, de forma direta ou indireta, e deixo aqui os meus especiais agradecimentos:

Ao Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) pela cedência de instalações e dados necessários à realização deste trabalho.

À paciente e contínua orientação do Doutor João Martins e do Professor Doutor Carlos da Camara. O incentivo, disponibilidade e apoio demonstrados tornaram esta jornada numa aprendizagem inédita a todos os níveis. Obrigada.

À Professora Doutora Célia Gouveia por toda a ajuda fornecida e à Doutora Rita Durão pela companhia no dia-a-dia no IPMA.

Aos amigos e família, pois são estas pessoas especiais a principal fonte de motivação.

Finalmente, à felina Fifi que me ensina constantemente a encarar a vida de forma mais tranquila e graciosa.

Resumo

Portugal é afetado pela ocorrência frequente de incêndios rurais, com impactos a nível social, económico e ecológico. As paisagens mudam drasticamente e as cicatrizes de fogo podem durar entre meses a anos. As alterações sazonais na estrutura da vegetação e respetiva fisiologia afetam as propriedades biofísicas das superfícies que, por sua vez, alteram diretamente o balanço de energia à superfície e, por conseguinte, a temperatura da superfície da terra. A avaliação detalhada e uma monitorização continuada da vegetação após um incêndio tornam-se então cruciais e estes processos, apesar de complexos, têm sido possíveis graças ao contínuo desenvolvimento da deteção remota das últimas décadas.

A *Satellite Application Facility on Land Surface Analysis* (LSA-SAF) produz desde 2004 registos de dados de longo prazo. Estes incluem quantidades associadas ao balanço radiativo da superfície, tais como temperatura, a emissividade, fluxos radiativos à superfície; propriedades da vegetação e variáveis relacionadas com o fogo rural e ainda fluxos turbulentos, tais como a evapotranspiração, calor latente e calor sensível. O presente estudo tem por objetivo a caracterização das alterações das propriedades biofísicas das cicatrizes de fogo após grandes eventos de incêndios rurais, utilizando observações LSA-SAF dos produtos *Land Surface Temperature* (LST), *Fraction of Vegetation Cover* (FVC) e *Albedo* (AL). Estudam-se 5 eventos de incêndio (Serra do Caldeirão, Arrifana, Cairaia, Pataias e Pedrógão Grande) ocorridos no período 2004 – 2017, através da comparação das séries temporais de cada produto na cicatriz e nos pixéis que a rodeiam.

Os resultados revelaram a existência sistemática de anomalias positivas de LST (de até 4,6°C no caso do incêndio de Pataias) e anomalias negativas de FVC (de até -0,23, também para Pataias) nos períodos posteriores aos eventos de incêndio, e a respetiva recuperação de valores nos anos subsequentes. No caso do AL, os incêndios introduzem anomalias negativas nas semanas imediatamente posteriores ao evento, que na maioria dos casos se tornam positivas na primavera seguinte (o que está associado ao surgimento de vegetação com características diferentes da que estava presente anteriormente). Mostrou-se que o tempo de recuperação para valores típicos anteriores ao incêndio é diferente para cada produto, tendo o AL um retorno mais rápido, em comparação com a LST e FVC. A análise conjunta destas grandezas permite uma melhor compreensão dos mecanismos biofísicos envolvidos na recuperação da vegetação na cicatriz.

Analisou-se ainda a recuperação das cicatrizes em função do tipo de cobertura do solo, com os pixéis de floresta a apresentarem maiores valores de anomalia térmica e maior diferença entre condições na cicatriz e em seu redor, para os casos da LST e FVC. No caso do AL, a dependência dos resultados com o tipo de cobertura do solo é menos expressiva, notando-se, no entanto, um aumento da dispersão de valores nos períodos pós-incêndio para todas as classes de cobertura de solo analisadas.

Palavras-Chave

Incêndios Rurais, Deteção Remota, Temperatura de Superfície, Vegetação, Balanço de Energia à Superfície

Abstract

Portugal is affected by the occurrence of very severe wildfires with serious impacts at the social, economic and ecological levels. The landscapes change dramatically, and fire scars may last from months to years. The seasonal change in the vegetation structure and its physiology also impact the surfaces' biophysical properties which, in turn, directly impact the surface energy budget and consequently surface temperature. Therefore, a detailed evaluation and a continuous monitoring of the post-fire vegetation are crucial and these processes, besides their complexity, have been feasible thanks to the continuous improvement of remote sensing instruments over the last decades.

The Satellite Application Facility on Land Surface Analysis (LSA-SAF) has been producing long term data records since 2004, including quantities that control the surface radiative balance (such as surface temperature and emissivity, and radiative fluxes), vegetation properties and fire related variables, as well as turbulent fluxes such as evapotranspiration/latent heat and sensible heat. The present study aims to characterize the changes in biophysical properties of fire scars after major wildfire events, using LSA-SAF's Land Surface Temperature (LST), Fraction of Vegetation Cover (FVC) and Albedo (AL) products. Five fire events occurred in the period 2004 - 2017 are studied (Serra do Caldeirão, Arrifana, Catraia, Pataias and Pedrógão Grande), comparing the time series of each product measured within the fire scar and in its surroundings.

The results revealed the systematic existence of positive thermal anomalies (of up to 4,6°C in the case of the Pataias fire) and negative anomalies of FVC (of up to -0,23, also in the Pataias fire) in period immediately after the fire events, and their recovery in the following years. In the case of AL, fire introduces negative anomalies in the first weeks after the event, that in most cases become positive in the next Spring (which is related to the growth of vegetation with different characteristics compared to the one before the fire event). It was also shown that the recovery period to values characterizing the pre-fire period is different for each variable; AL having a faster recovery when compared to LST and FVC. The combined analysis of these variables allows a better insight on the biophysical mechanisms controlling the vegetation recovery within the fire scar.

Finally, the dependence of the results on land cover type was assessed. Forest pixels show larger thermal anomalies, and larger differences between pixels within and out of the fire scar, for both LST and FVC. In the case of AL, the dependence is less evident. However, there is a significant increase in the spread of AL estimates for the post-fire period, for all the land cover classes under analysis.

Keywords

Wildfires, Remote Sensing, Land Surface Temperature, Vegetation, Surface Energy Balance

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract.....	iii
Lista de Figuras	3
Lista de abreviaturas e siglas	9
1 Introdução	11
2 Dados.....	16
2.1 Temperatura da superfície do solo (LST).....	16
2.2 FVC.....	16
2.3 Albedo	17
2.4 Dados de cobertura do solo e altitude	18
3 Metodologia	20
4 Resultados	24
4.1 Incêndio da Serra do Caldeirão (2004).....	24
4.1.1 Seleção dos pixéis	24
4.1.2 Anomalias de LST.....	25
4.1.3 Anomalias de FVC	26
4.1.4 Anomalias de AL	27
4.2 Arrifana (2005).....	28
4.2.1 Seleção dos pixéis	28
4.2.2 Anomalias de LST.....	30
4.2.3 Anomalias de FVC	30
4.2.4 Anomalias de AL	31
4.3 Catraia (2012).....	32
4.3.1 Seleção dos pixéis	32
4.3.2 Anomalias de LST.....	33
4.3.3 Anomalias de FVC	36
4.3.4 Anomalias de AL	39
4.4 Pedrógão Grande (2017)	41
4.4.1 Seleção dos pixéis	41
4.4.2 Anomalias de LST.....	42
4.4.3 Anomalias de FVC	43

4.4.4	Anomalias de AL	44
4.5	Pataias (2017).....	45
4.5.1	Seleção dos pixéis	45
4.5.2	Anomalias de LST.....	47
4.5.3	Anomalias de FVC	47
4.5.4	Anomalias de AL	48
4.6	Síntese dos resultados por produto (LST, FVC e AL)	49
4.6.1	Síntese de resultados para a LST.....	49
4.6.2	Síntese de resultados para a FVC	50
4.6.3	Síntese de resultados para o AL	51
5	Discussão.....	53
6	Conclusão.....	58
7	Referências.....	59
8	Anexos.....	69
8.1)	Classificação da cobertura do solo segundo o Sistema IGBP	69
8.2)	Séries temporais completas dos produtos para o incêndio de Arrifana.....	71
8.3)	Séries temporais completas dos produtos para o incêndio de Catraia.....	72
8.4)	Séries temporais completas dos produtos para o incêndio de Pedrógão Grande..	74
8.5)	Séries temporais completas dos produtos para o incêndio de Pataias	75
8.6)	Classificação da cobertura do solo segundo o projeto CCI-LC.....	77

Lista de Figuras

Figura 1.1: Frames provenientes da ferramenta Earth Timelapse, para o Sul de Portugal no ano de 2011 (a) e 2013 (b). A vermelho encontra-se circundada a área ardida no incêndio ocorrido em Catraia, Tavira, em 2012. Adaptado de https://earthengine.google.com/timelapse/	13
Figura 2.1: Mapa de cobertura do solo com classificação proveniente do programa IGBP.	18
Figura 2.2: Mapa topográfico de Portugal Continental, com elevação em metros.	19
Figura 3.1 - Áreas ardidas em 2004, assinaladas a azul claro (a) e em 2005 a vermelho (b). Os incêndios estudados encontram-se circundados pelas elipses verdes. Adaptado de: ICNF (http://www2.icnf.pt/portal/florestas/dfci/inc/mapas)..	20
Figura 3.2 - Áreas ardidas em 2012 (a) e 2017 (b), assinaladas a laranja. Os incêndios estudados encontram-se circundados pelas elipses verdes. Adaptado de: ICNF (http://www2.icnf.pt/portal/florestas/dfci/inc/mapas).	21
Figura 3.3: Mapas da LST máxima em °C (esquerda), da mediana da FVC (centro) e da mediana do AL (direita) para a primeira década de junho de 2019 (01/06/2019 - 10/06/2019). 22	
Figura 3.4 – Pixéis ardidos pertencentes à cicatriz de incêndio de Pedrógão Grande ocorrido a 15/06/2017 (a vermelho); pixéis de outras áreas ardidas no mesmo ano (a cinzento) e pixéis do buffer resultante (a verde).	23
Figura 4.1 - Cicatriz do evento de incêndio de 2004 na Serra do Caldeirão e respetivos pormenores, com pixéis preenchidos com a fração de pixel ardido (em cima) e cobertura de solo do IGBP (em baixo).	24
Figura 4.2 - Buffer espacial para a cicatriz do evento de incêndio de 2004 na Serra do Caldeirão e respetivo pormenor, com pixéis preenchidos com a classificação da cobertura de solo do IGBP.....	25
Figura 4.3 - a) Série temporal dos máximos das décadas da LST para o incêndio da Serra do Caldeirão (janeiro 2004 a dezembro de 2009) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). b) Série temporal da anomalia da LST (pixéis da cicatriz - buffer) para o mesmo período. As zonas vermelha e verde correspondem à delimitação dos períodos em que os pixéis são afetados pelo incêndio (21/07/2004 a 20/07/2006), a vermelho, e em que os pixéis já não sentem os efeitos do incêndio (21/07/2007 a 20/07/2009), a verde. As barras verticais a vermelho assinalam a data do incêndio (26/07/2004).	26
Figura 4.4 - a) Série temporal das medianas das décadas de FVC para o incêndio da Serra do Caldeirão (janeiro 2004 a dezembro de 2009) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). b) Série temporal da anomalia de FVC (pixéis da cicatriz - buffer) para o mesmo período. As zonas vermelha e verde correspondem à delimitação dos períodos com incêndio (21/07/2004 a 20/07/2006) e sem incêndio (21/07/2007 a 20/07/2009), respetivamente. As barras a vermelho assinalam a data do incêndio (26/07/2004).	27
Figura 4.5 - a) Série temporal das medianas das décadas de AL para o incêndio da Serra do Caldeirão (janeiro 2004 a dezembro de 2009) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). b) Série temporal da anomalia de AL (pixéis da cicatriz - buffer) para o mesmo período. As zonas vermelha e verde correspondem à delimitação dos períodos com incêndio (21/07/2004 a 20/07/2006) e sem incêndio (21/07/2007 a 20/07/2009), respetivamente. As barras a vermelho assinalam a data do incêndio (26/07/2004).	28
Figura 4.6 - Cicatriz do evento de incêndio de 2005 em Arrifana, e respetivo pormenores, com pixéis preenchidos com a fração de pixel ardido (em cima) e cobertura de solo do IGBP (em baixo).....	29

Figura 4.7 - Buffer espacial para a cicatriz do evento de incêndio de 2005 em Arrifana e respetivo pormenor, com pixéis preenchidos com a classificação da cobertura de solo do IGBP.	29
Figura 4.8 - a) Série temporal dos máximos das décadas da LST para o incêndio de Arrifana (janeiro de 2005 a dezembro de 2013) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). b) Série temporal da anomalia da LST (pixéis da cicatriz - buffer) para o mesmo período. As zonas vermelha e verde correspondem à delimitação dos períodos com incêndio (19/08/2005 a 20/08/2007 e sem incêndio (19/08/2011 a 20/08/2013), respetivamente. As barras a vermelho assinalam a data do incêndio (19/08/2005).	30
Figura 4.9 - a) Série temporal das medianas das décadas de FVC para o incêndio de Arrifana (janeiro 2005 a dezembro de 2013) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). b) Série temporal da anomalia de FVC (pixéis da cicatriz - buffer) para o mesmo período. As zonas vermelha e verde correspondem à delimitação dos períodos com incêndio (19/08/2005 a 20/08/2007) e sem incêndio (19/08/20011 a 20/08/2013), respetivamente. As barras a vermelho assinalam a data do incêndio (19/08/2005).	31
Figura 4.10 - a) Série temporal das medianas das décadas de AL para o incêndio de Arrifana (janeiro 2005 a dezembro de 2013) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). b) Série temporal da anomalia de AL (pixéis da cicatriz - buffer), para o mesmo período. As zonas vermelha e verde correspondem à delimitação dos períodos com incêndio (19/08/2005 a 20/08/2007) e sem incêndio (19/08/20011 a 20/08/2013), respetivamente. As barras a vermelho assinalam a data do incêndio (19/08/2005).	32
Figura 4.11 - Cicatriz do evento de incêndio de 2012 em Catraia, e respetivos pormenores, com pixéis preenchidos com a fração de pixel ardido (em cima) e cobertura de solo do IGBP (em baixo).....	33
Figura 4.12 - Buffer espacial para a cicatriz do evento de incêndio de 2012 em Catraia e respetivo pormenor, com pixéis preenchidos com a classificação da cobertura de solo do IGBP.	33
Figura 4.13 - a) Série temporal dos máximos das décadas da LST (°C) para o incêndio de Catraia (janeiro 2009 a dezembro de 2014) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde), com classe de cobertura de solo CS 6 (a) e classe CS 12 (b). As barras a vermelho assinalam a data do incêndio: 18/07/2012.....	34
Figura 4.14 - a) Série temporal da anomalia de LST (pixéis da cicatriz - buffer) para o incêndio de Catraia (janeiro 2012 a dezembro de 2014) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde), com a classe de cobertura de solo CS 6 e a classe CS 12 (b). As barras a vermelho assinalam a data do incêndio: 18/07/2012.....	34
Figura 4.15 - a) Série temporal completa da anomalia de LST (pixéis da cicatriz - buffer) para o incêndio de Catraia (janeiro 2004 a junho de 2019) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde), com classe de cobertura de solo CS 6 e classe CS 12 (b). As barras a vermelho assinalam as datas dos incêndios: 26/07/2004 e 18/07/2012.	35
Figura 4.16: - a) Série temporal completa dos máximos das décadas da LST para o incêndio da Serra do Caldeirão (janeiro 2004 a junho de 2019) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). b) Série temporal da anomalia da LST (pixéis da cicatriz - buffer), para o mesmo período. As barras a vermelho assinalam as datas dos incêndios: 26/07/2004 e 18/07/2012.	35
Figura 4.17 - a) Série temporal das medianas das décadas de FVC para o incêndio de Catraia (janeiro 2009 a dezembro de 2014) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde), com classe de cobertura de solo CS 6 (a) e classe CS 12 (b). As barras a vermelho assinalam a data do incêndio: 18/07/2012.	36

Figura 4.18 - a) Série temporal da anomalia de FVC (pixéis da cicatriz - buffer) para o incêndio de Catraia (janeiro 2012 a dezembro de 2014) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde), com classe de cobertura de solo CS 6 e classe CS 12 (b). As barras a vermelho assinalam a data do incêndio: 18/07/2012..... 37

Figura 4.19 - a) Série temporal completa da anomalia de FVC (pixéis da cicatriz - buffer) para o incêndio de Catraia (janeiro 2012 a dezembro de 2014), para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde), com classe de cobertura de solo CS 6 e classe CS 12 (b). As barras a vermelho assinalam as datas dos incêndios: 26/07/2004 e 18/07/2012. 38

Figura 4.20 - a) Série temporal completa das medianas das décadas de FVC para o incêndio da Serra do Caldeirão (janeiro 2004 a junho de 2019) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). b) Série temporal da anomalia da FVC (pixéis da cicatriz - buffer), para o mesmo período. As barras a vermelho assinalam as datas dos incêndios: 26/07/2004 e 18/07/2012. 38

Figura 4.21 - a) Série temporal das medianas das décadas de AL para o incêndio de Catraia (janeiro 2009 a dezembro de 2014) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde), com classe de cobertura de solo CS 6 (a) e classe CS 12 (b). As barras a vermelho assinalam a data do incêndio: 18/07/2012. 39

Figura 4.22 - a) Série temporal da anomalia de AL (pixéis da cicatriz - buffer) para o incêndio de Catraia (janeiro 2012 a dezembro de 2014) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde), com classe de cobertura de solo CS 6 e classe CS 12 (b). As barras a vermelho assinalam a data do incêndio: 18/07/2012..... 40

Figura 4.23 - a) Série temporal completa da anomalia de AL (pixéis da cicatriz - buffer) para o incêndio de Catraia (janeiro 2012 a dezembro de 2014), para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde), com classe de cobertura de solo CS 6 e classe CS 12 (b). As barras a vermelho assinalam as datas dos incêndios: 26/07/2004 e 18/07/2012. 40

Figura 4.24 - a) Série temporal completa das medianas das décadas de AL para o incêndio da Serra do Caldeirão (janeiro 2004 a junho de 2019) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). b) Série temporal da anomalia de AL (pixéis da cicatriz - buffer), para o mesmo período. As barras a vermelho assinalam as datas dos incêndios: 26/07/2004 e 18/07/2012. 41

Figura 4.25 - Cicatriz do evento de incêndio de 2017 em Pedrógão Grande, e respetivos pormenores, com pixéis preenchidos com a fração de pixel ardido (em cima) e cobertura de solo do IGBP (em baixo). 41

Figura 4.26 - Buffer espacial para a cicatriz do evento de incêndio de 2017 em Pedrógão Grande, com pixéis preenchidos com a classificação da cobertura de solo do IGBP. 42

Figura 4.27 - a) Série temporal dos máximos das décadas da LST para o incêndio de Pedrógão Grande (janeiro 2014 a junho de 2019) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). b) Série temporal da anomalia da LST (pixéis da cicatriz - buffer) para o mesmo período. As zonas vermelha e verde correspondem à delimitação dos períodos com incêndio (15/06/2017 a 30/06/2019) e sem incêndio (15/06/2014 a 30/06/2016), respetivamente. As barras a vermelho assinalam a data do incêndio (15/06/2017). 43

Figura 4.28 - a) Série temporal das medianas das décadas de FVC para o incêndio de Pedrógão Grande (janeiro 2014 a junho de 2019) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). b) Série temporal da anomalia de FVC (pixéis da cicatriz - buffer) para o mesmo período. As zonas vermelha e verde correspondem à delimitação dos períodos com incêndio (15/06/2017 a 30/06/2019) e sem incêndio (15/06/2014 a 30/06/2016), respetivamente. As barras a vermelho assinalam a data do incêndio (15/06/2017). 44

Figura 4.29 - a) Série temporal das medianas das décadas de AL, para o incêndio de Pedrógão Grande (janeiro 2014 a junho de 2019) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). b) Série temporal da anomalia de AL (pixéis da cicatriz - buffer) para o mesmo

período. As zonas vermelha e verde correspondem à delimitação dos períodos com incêndio (15/06/2017 a 30/06/2019) e sem incêndio (15/06/2014 a 30/06/2016), respetivamente. As barras a vermelho assinalam a data do incêndio (15/06/2017). 45

Figura 4.30 -Cicatriz do evento de incêndio de 2017 em Pataias,com pixéis preenchidos com a fração de pixel ardido (em cima) e cobertura de solo do IGBP (em baixo) 46

Figura 4.31 - Buffer espacial para a cicatriz do evento de incêndio de 2017 em Pataias, com pixéis preenchidos com a classificação da cobertura de solo do IGBP..... 46

Figura 4.32 - a) Série temporal dos máximos das décadas da LST para o incêndio Pataias (janeiro 2014 a junho de 2019) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). b) Série temporal da anomalia da LST (pixéis da cicatriz - buffer) para o mesmo período. As zonas vermelha e verde correspondem à delimitação dos períodos com incêndio (15/10/2017 a 30/06/2019) e sem incêndio (15/10/2014 a 30/06/2016), respetivamente. As barras a vermelho assinalam a data do incêndio (15/10/2017). 47

Figura 4.33 - a) Série temporal das medianas das décadas de FVC para o incêndio de Pataias (janeiro 2014 a junho de 2019) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). b) Série temporal da anomalia de FVC (pixéis da cicatriz - buffer) para o mesmo período. As zonas vermelha e verde correspondem à delimitação dos períodos com incêndio (15/10/2017 a 30/06/2019) e sem incêndio (15/10/2014 a 30/06/2016), respetivamente. As barras a vermelho assinalam a data do incêndio (15/10/2017). 48

Figura 4.34 - a) Série temporal das medianas das décadas de AL, para o incêndio de Pataias (janeiro 2014 a junho de 2019) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). b) Série temporal da anomalia de AL (pixéis da cicatriz - buffer) para o mesmo período. As zonas vermelha e verde correspondem à delimitação dos períodos com incêndio (15/10/2017 a 30/06/2019), e sem incêndio (15/10/2014 a 30/06/2016), respetivamente. As barras a vermelho assinalam a data do incêndio (15/10/2017). 49

Figura 4.35 - Boxplot da distribuição dos valores de anomalia de LST, para os períodos sem incêndio (a tons de verde) e com incêndio (a vermelho), para os eventos de incêndio identificados – Serra do Caldeirão, Arrifana, Catraia, Pedrógão Grande e Pataias. Na base da figura encontra-se a identificação da classe de cobertura de solo (CS) para cada par..... 50

Figura 4.36 - Boxplot da distribuição dos valores de anomalia de FVC, para os períodos sem incêndio (a tons de verde) e com incêndio (a vermelho), para os eventos de incêndio identificados – Serra do Caldeirão, Arrifana, Catraia, Pedrógão Grande e Pataias. Na base da figura encontra-se a identificação da classe de cobertura de solo (CS) para cada par. 51

Figura 4.37 - Boxplot da distribuição dos valores de anomalia de AL, para os períodos sem incêndio (a tons de verde) e com incêndio (a vermelho), para os eventos de incêndio identificados – Serra do Caldeirão, Arrifana, Catraia, Pedrógão Grande e Pataias. Na base da figura encontra-se a identificação da classe de cobertura de solo (CS) para cada par..... 52

Figura 5.1 - Mapa de cobertura do solo de 2015 para a região centro de Portugal. Proveniente do projecto CCI-LC (Climate Change Initiative Land Cover). A legenda das classes de cobertura do solo encontra-se no anexo 8.6. Adaptado de: <http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/index.php>. 55

Figura 5.2: Mapa de cobertura do solo de 2015 para a região sul de Portugal. Proveniente do projecto CCI-LC (Climate Change Initiative Land Cover). A legenda das classes de cobertura do solo encontra-se no anexo 8.6. Adaptado de: <http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/index.php> 55

Figura 8.1 - a) Série temporal completa dos máximos das décadas da LST (°C) para o incêndio de Arrifana (janeiro 2004 a junho de 2019) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do

buffer (a verde). b) Série temporal da anomalia da LST (pixéis da cicatriz - buffer), para o mesmo período. As barras a vermelho assinalam a data do incêndio: 19/08/2005. 71

Figura 8.2 - a) Série temporal completa das medianas das décadas de FVC para o incêndio de Arrifana (janeiro 2004 a junho de 2019) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). b) Série temporal da anomalia da FVC (pixéis da cicatriz - buffer), para o mesmo período. As barras a vermelho assinalam a data do incêndio: 19/08/2005..... 71

Figura 8.3 - a) Série temporal completa das medianas das décadas de AL para o incêndio da Serra do Caldeirão (janeiro 2004 a junho de 2019) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). b) Série temporal da anomalia de AL (pixéis da cicatriz - buffer), para o mesmo período. As barras a vermelho assinalam a data do incêndio: 19/08/2005. 72

Figura 8.4 - a) Série temporal completa dos máximos das décadas da LST (°C) para o incêndio de Catraia (janeiro 2004 a junho de 2019) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde), com classe de cobertura de solo CS 6 (a) e classe CS 12 (b). As barras a vermelho as assinalam as datas do incêndio: 26/07/2004 e 18/07/2012. 72

Figura 8.5 - a) Série temporal completa das medianas das décadas de FVC para o incêndio de Catraia (janeiro 2004 a junho de 2019) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde), com classe de cobertura de solo CS 6 (a) e classe CS 12 (b). As barras a vermelho assinalam as datas dos incêndios: 26/07/2004 e 18/07/2012..... 73

Figura 8.6 - a) Série temporal completa das medianas das décadas de AL para o incêndio de Catraia (janeiro 2004 a junho de 2019) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde), com classe de cobertura de solo CS 6 (a) e classe CS 12 (b). As barras a vermelho assinalam as datas dos incêndios: 26/07/2004 e 18/07/2012..... 73

Figura 8.7 - a) Série temporal completa dos máximos das de décadas da LST (°C) para o incêndio de Pedrógão Grande (janeiro 2004 a junho de 2019) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). b) Série temporal da anomalia da LST (pixéis da cicatriz - buffer), para o mesmo período. As barras a vermelho assinalam a data do incêndio: 15/06/2017. 74

Figura 8.8 - a) Série temporal completa das medianas das décadas de FVC para o incêndio de Pedrógão Grande (janeiro 2004 a junho de 2019) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). b) Série temporal da anomalia da FVC (pixéis da cicatriz - buffer), para o mesmo período. As barras a vermelho assinalam a data do incêndio: 15/06/2017. 74

Figura 8.9 - a) Série temporal completa das medianas das décadas de AL para o incêndio de Pedrógão Grande (janeiro 2004 a junho de 2019) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). b) Série temporal da anomalia do AL (pixéis da cicatriz - buffer), para o mesmo período. As barras a vermelho assinalam a data do incêndio: 15/06/2017. 75

Figura 8.10 - a) Série temporal completa dos máximos das décadas da LST (°C) para o incêndio de Pataias (janeiro 2004 a junho de 2019) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). b) Série temporal da anomalia da LST (pixéis da cicatriz - buffer), para o mesmo período. As barras a vermelho assinalam a data do incêndio: 15/10/2017. 75

Figura 8.11 - a) Série temporal completa das medianas das décadas de FVC para o incêndio de Pataias (janeiro 2004 a junho de 2019) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). b) Série temporal da anomalia da FVC (pixéis da cicatriz - buffer), para o mesmo período. As barras a vermelho assinalam a data do incêndio: 15/10/2017..... 76

Figura 8.12 - a) Série temporal completa das medianas das décadas de AL para o incêndio de Pataias (janeiro 2004 a junho de 2019) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). b) Série temporal da anomalia do AL (pixéis da cicatriz - buffer), para o mesmo período. As barras a vermelho assinalam a data do incêndio: 15/10/2017..... 76

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Descrição dos tipos de cobertura de solo utilizados na base de dados do IGBP.	18
Tabela 3.1: Identificação dos casos de estudo considerados neste trabalho.	20
Tabela 8.1 - Sistema de classificação da cobertura do solo segundo o programa IGBP. Adaptado de Loveland et al., 2000.	69
Tabela 8.2 - Sistema de classificação da cobertura do solo segundo o projeto CCI-LC. Adaptado de ESA, 2017.	77

Lista de abreviaturas e siglas

AL	Albedo
ANEPC	Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil
AVHRR	<i>Advanced Very-High-Resolution Radiometer</i>
BRDF	<i>Bidirectional Reflectance Distribution Function</i>
CCI-LC	<i>Climate Change Initiative Land Cover</i>
CS	Cobertura de Solo
DSLFL	<i>Downward Surface Longwave Flux</i>
DSSFL	<i>Downward Surface Shortwave Flux</i>
EM	<i>Emissivity</i>
EPS	<i>EUMETSAT Polar System</i>
EROS	<i>Earth Resources Observation System</i>
ESA	<i>European Space Agency</i>
ET	<i>Evapotranspiration</i>
ET _o	<i>Reference Evapotranspiration</i>
EUMETSAT	<i>European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites</i>
FAO	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i>
fAPAR	<i>Fraction of Absorbed Photosynthetic Active Radiation</i>
FD&M	<i>Fire Detection and Monitoring</i>
FRM	<i>Fire Risk Map</i>
FRP	<i>Fire Radiative Power</i>
FVC	<i>Fraction Vegetation Cover</i>
HRV	<i>High Resolution Visible</i>
ICNF	Instituto da Conservação da Natureza e Florestas

IGBP	<i>International Geosphere Biosphere Programme</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
IIQ	Intervalo Interquartil
IV	Radiação Infravermelha
JRC	<i>Joint Research Centre of the European Commission</i>
LAI	<i>Leaf Area Index</i>
LSA-SAF	<i>Satellite Application Facility on Land Surface Analysis</i>
LST	<i>Land Surface Temperature</i>
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
MSG	<i>Meteosat Second Generation</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
RGB	<i>Red Green Blue</i>
SAF	<i>Satellite Application Facility</i>
SEVIRI	<i>Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager</i>
SMA	<i>Spectral Mixture Analysis</i>
TOA	<i>Top Of Atmosphere</i>
TOC	<i>Top Of Canopy</i>
UNL	<i>University Nebraska-Lincoln</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
VIS	<i>Visible Spectrum</i>

1 Introdução

De acordo com a Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil (ANEPC), os incêndios rurais encontram-se entre as catástrofes naturais mais graves que ocorrem em Portugal, tendo em conta a elevada frequência com que se verificam, a extensão que alcançam e a destruição que promovem. De cariz sazonal, estes eventos ocorrem principalmente durante o verão. Os maiores danos das últimas décadas registaram-se em 2003, 2005 e 2017 – cerca de 450.000, 326.000 e 442.000 hectares de área ardida, respetivamente (DGF, 2003; DGRF, 2005; ICNF, 2017), destacando-se o ano de 2017 pelo elevado número de vítimas mortais, que alcançou 165.

Portugal é sistematicamente afetado por incêndios rurais cujas principais causas apontadas se prendem com a elevada percentagem de área florestal não gerida resultante do abandono dos terrenos agrícolas e florestais e respetivo absentismo dos proprietários (Mateus e Fernandes, 2014), com o aumento em quantidade e extensão das cargas combustíveis (de Rigo *et al.*, 2017) e com o elevado número de ignições indesejadas em condições de incêndio moderadas a graves, incluindo negligência humana e o incendiário (Leone *et al.*, 2009). Somam-se a estes fatores as alterações climáticas que favorecem a ocorrência de períodos crescentes de tempo quente e seco, que prolongam e aumentam a gravidade dos períodos críticos de incêndio (Beighley e Hyde, 2018).

No contexto de alterações climáticas, amplamente documentado nos relatórios do IPCC (*The Intergovernmental Panel on Climate Change*), particularmente o recente relatório especial *Climate Change and Land* (IPCC, 2019), espera-se que o risco de incêndio aumente em muitas regiões do mundo, sendo o sul da Europa uma das áreas mais sensíveis a essas mudanças (Brotons *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2010; Moriondo *et al.*, 2006). Os incêndios são eventos que dependem de fatores meteorológicos (Good *et al.*, 2008) e, no Mediterrâneo, os invernos chuvosos e amenos, que amplificam a disponibilidade de combustível, seguidos de verões quentes e secos, que aumentam o risco de incêndio, tornam a região especialmente propensa à ocorrência de episódios extremos, nomeadamente em países como Portugal, Espanha, França, Itália, Grécia e Croácia (Amraoui *et al.*, 2013).

Para que tenham lugar, os incêndios rurais requerem uma fonte de ignição, combustível e condições meteorológicas que propiciem a propagação do fogo. De acordo com a FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2015), 35,3% do território português é coberto por florestas maioritariamente fragmentadas. As espécies mais comuns são o pinheiro (*Pinus spp.*), que representa cerca de 31% da área florestal, o sobreiro (*Quercus suber L.*), com cerca de 23% e, com uma ocupação de 21%, as plantações de *Eucalyptus spp.* De acordo com o documento *online* do ICNF (<http://www2.icnf.pt/portal/florestas/dfci/Resource/doc/estat/area-ardida-1996-a-2014>), as estatísticas de áreas ardidas anuais por tipo de ocupação de solo, para o período 1996-2014, apontam para uma maior área ardida de mato e pastagens, seguindo-se, por ordem decrescente, as áreas de pinheiro-bravo, eucaliptos e sobreiros.

De acordo com Fernandes *et al.* (2006), o risco de incêndio não se traduz diretamente pela composição da floresta, mas sim pela sua estrutura e ordenamento. No entanto, como grande parte das espécies acima mencionadas é destruída pelos incêndios (Catry *et al.*, 2013; Milenkovic *et al.*, 2017), é importante estudar os mecanismos ecológicos de regeneração pós-fogo (Catry *et al.*, 2010; Ferreira-Leite *et al.*, 2013).

Relativamente à capacidade regenerativa natural da vegetação, é possível considerar dois grupos distintos, um constituído pelas espécies com aptidão para se regenerar vegetativamente (através de rebentos) e outro que engloba espécies que apenas se podem regenerar por semente (Catry *et al.*, 2010). O primeiro grupo inclui todas as espécies cuja regeneração é imediata após o

fogo, sendo esta garantida através do lançamento de novos rebentos com origem no tecido que resistiu às altas temperaturas (localizados no caule ou em órgãos subterrâneos tais como rizomas, bolbos, tubérculos). No segundo grupo incluem-se todas as espécies que não resistem à ocorrência do fogo e que, como tal, dependem integralmente da regeneração por sementes para poderem assegurar a sua continuidade (Catry *et al.*, 2007). Fernandes e Rigolot (2007) mostraram que em Portugal é possível a regeneração das florestas dominadas por *Pinus pinaster* devido às características da espécie, quando ocorrem fogos de baixa intensidade. No entanto, quando se trata de pequenos intervalos de tempo entre ocorrências de fogo, as plantas podem não atingir a maturidade reprodutiva. Segundo Tessler *et al.* (2016), a regeneração da vegetação é acelerada quando o intervalo de tempo entre incêndios é maior, ficando a mesma comprometida perante uma maior frequência de incêndios na mesma área.

Os efeitos do fogo sobre os ecossistemas são complexos na medida em que dependem das características, gravidade e dano do fogo, assim como da resposta da vegetação a tais regimes e ainda a fatores ambientais (Brown e Smith, 2000). Os impactos mais importantes traduzem-se na perda de espécies de fauna e flora endémicas (Jhariya e Raj, 2014) e no empobrecimento do solo através da perda de nutrientes por volatilização no momento do fogo e no pós-fogo, aquando da exposição do solo nu a erosão hídrica e eólica (Pausas e Vallejo, 1999). Thornes (1990) sugeriu que é necessário um mínimo de 30% de cobertura vegetal para proteger o solo contra a erosão hídrica e que, quanto maior o tempo de recuperação após um incêndio, maior o risco de erosão. A maior parte da perda de sedimentos parece ocorrer no primeiro ano após o incêndio (DeBano *et al.*, 1998; Cerdà and Doerr, 2005; Reneau *et al.*, 2007). No processo de recuperação da vegetação entram também outros fatores, como a ocorrência de secas, que podem inibir o crescimento e causar atrasos na recuperação durante vários meses (Gouveia *et al.*, 2012).

Moore *et al.* (1996), Pielke *et al.* (1998) e Richardson *et al.* (2013) sugerem que as alterações sazonais na estrutura da vegetação (como a altura do dossel ou o índice de área foliar) e respetiva fisiologia (por exemplo, transpiração e fotossíntese) afetam as propriedades biofísicas das superfícies (albedo, condutância do dossel) que, por sua vez, alteram diretamente o balanço de energia à superfície e, por conseguinte, a temperatura da superfície da terra (Schwartz, 1992).

Nesta conformidade, a avaliação detalhada e uma monitorização continuada da vegetação após um incêndio tornam-se cruciais no que respeita à gestão do território e defesa do património. Estes processos, apesar de complexos, são atualmente viáveis graças ao desenvolvimento contínuo que se tem vindo a observar na deteção remota ao longo dos anos (Leblon *et al.*, 2016).

Um exemplo de uma ferramenta de deteção remota disponível *online* consiste no *Google Earth Timelapse*, inserido no projeto *Google Earth Engine* (Gorelick *et al.*, 2017). Esta ferramenta consiste num vídeo global que permite ver as alterações na Terra nos últimos 34 anos. Composto por cerca de 35 imagens anuais de céu-limpo, uma para cada ano do período 1984-2018, resulta da combinação de mais de 15 milhões de imagens de satélite fornecidas pelo *Landsat Program* e pelos satélites Terra e Aqua da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e pelo *Copernicus Sentinel Program*. Na Figura 1.1 apresentam-se dois *frames* do *Google Earth Timelapse* para o Sul de Portugal Continental, em 2011 e 2013 (isto é, antes e após o incêndio de Tavira que ocorreu em 2012). As imagens são compósitos RGB (*Red Green Blue*) das bandas do visível obtidas pelo Landsat. sendo de notar que as diferenças nas refletâncias entre os dois *frames* permitem identificar a área ardida (circundada a vermelho).



Figura 1.1: Frames provenientes da ferramenta Earth Timelapse, para o Sul de Portugal no ano de 2011 (a) e 2013 (b). A vermelho encontra-se circundada a área ardida no incêndio ocorrido em Catraia, Tavira, em 2012. Adaptado de <https://earthengine.google.com/timelapse/>.

A aplicação de imagens detetadas remotamente para monitorizar e avaliar os impactos do fogo nos ambientes locais e regionais pode ser dividida em dois grandes tópicos, a saber (1) a identificação da área ardida e (2) a avaliação de alterações na superfície queimada (cobertura, combustível, etc.). O estudo mais simples e mais comum dos efeitos pós-incêndio é pelo mapeamento de áreas ardidas (Lentile *et al.*, 2006).

O mapeamento de áreas ardidas, ou de cicatrizes de fogo, tem sido objeto de interesse nas últimas décadas, utilizando diferentes fontes de dados de satélite (Alonso-Canas and Chuvieco, 2015; Barbosa *et al.*, 1999; Grégoire *et al.*, 2003; Hudak and Brockett, 2004; Mallinis and Koutsias, 2012; Mohler and Goodin, 2010; Smith *et al.*, 2007), sendo de mencionar ainda os estudos da recuperação da vegetação (Bright *et al.*, 2019; Caccamo *et al.*, 2015; Meng *et al.*, 2018; Paci *et al.*, 2017; Röder *et al.*, 2008; Yang *et al.*, 2017) para diferentes locais do planeta. No que respeita a Portugal, Bastos *et al.* (2011) e Gouveia *et al.* (2018) retrataram dois casos de estudo sobre estas temáticas. O primeiro refere-se ao estudo da recuperação da vegetação em duas áreas afetadas pelos dois grandes eventos de incêndio de 2003 e 2005, utilizando valores mensais de NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) para o período 1998-2009, provenientes do instrumento SPOT-VEGETATION. Os resultados indicam que os danos causados pelo fogo são um fator determinante da regeneração, uma vez que a vegetação menos danificada recupera mais rapidamente. Por sua vez, Gouveia *et al.* (2018) analisaram os episódios de incêndios de 2003, 2005 e 2012. A identificação de cicatrizes de incêndio foi obtida com base numa análise de *clusters* de anomalias persistentes de NDVI no ano após o evento. Neste caso, os dados de NDVI tiveram origem no produto MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) Terra V6,

a bordo do satélite Terra. O comportamento da vegetação foi caracterizado através de mapas de taxas de recuperação. Este estudo permitiu avaliar as características de recuperação da vegetação pós-incêndio em condições de episódios recorrentes e da respetiva sucessão de espécies no território português.

Além do NDVI, quer a temperatura da superfície do solo (*Land Surface Temperature*, LST; Quintano *et al.*, 2015) quer o albedo da superfície (Veraverbeke *et al.*, 2012) constituem bons indicadores de severidade de áreas ardidas, para períodos pós-incêndio no verão, nos ecossistemas florestais do Mediterrâneo. Nos estudos acima mencionados foram utilizados dados com origem nos satélites Landsat, SPOT-VEGETATION e Terra e Aqua com diferentes resoluções espaciais e temporais. Porém, a utilização de dados provenientes do radiómetro SEVIRI (*Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager*), a bordo dos satélites da série *Meteosat Second Generation* (MSG), permite uma muito maior frequência de amostragem. Esta última característica pode revelar-se útil, em especial em situações de céu frequentemente nublado.

A *Satellite Application Facility on Land Surface Analysis* (LSA-SAF) produz desde 2004 registos de dados de longo prazo (*Climate Data Records*). Estes incluem quantidades associadas ao balanço radiativo da superfície, tais como temperatura, a emissividade e os fluxos radiativos à superfície; propriedades da vegetação e variáveis relacionadas com o fogo rural e ainda fluxos turbulentos, tais como a evapotranspiração, calor latente e calor sensível. A LSA SAF (Trigo *et al.*, 2011) faz parte da rede SAFs (*Satellite Application Facilities*), um conjunto de centros especializados de desenvolvimento e processamento que integram o setor terrestre da *European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites* (EUMETSAT). Os produtos da LSA-SAF baseiam-se fundamentalmente em duas missões espaciais, a saber a série geoestacionária MSG e o EUMETSAT *Polar System* (EPS). A bordo dos MSG encontra-se o radiómetro SEVIRI, cujas principais características incluem o rastreamento da Terra utilizando 12 canais espectrais com imagens de 15 em 15 minutos. A resolução espacial da imagem é de 3 km no nadir e de até 1 km para o canal visível de alta resolução (HRV – *High Resolution Visible*) (Schmid, 2000).

Os produtos disseminados com base nesses sensores podem ser divididos em dois grupos: parâmetros de balanço radiativo de superfície e parâmetros biogeofísicos. O primeiro grupo inclui os fluxos radiativos descendentes de superfície de longo comprimento de onda (DSLRF - *Downward Surface Longwave Flux*) (Josey *et al.*, 2003; Prata, 1996) e de curto comprimento de onda (DSSF - *Downward Surface Shortwave Flux* - Brisson *et al.*, 1998; Carrer *et al.*, 2008), o albedo (AL) (Carrer *et al.*, 2018, 2010; Geiger *et al.*, 2008), a temperatura de superfície do solo (LST - Ermida *et al.*, 2014; Freitas *et al.*, 2010; Göttsche *et al.*, 2016; Trigo *et al.*, 2008a) e a emissividade (EM - Emissivity) (Trigo *et al.*, 2008b). O segundo grupo inclui a evapotranspiração (ET - *Evapotranspiration*) (Ghilain 2016; Petropoulos *et al.*, 2016); os produtos de vegetação: FVC – *Fraction Vegetation Cover* (García-Haro *et al.*, 2005, 2005b; Roujean *et al.*, 1992), LAI - *Leaf Area Index*, (Chen e Black, 1992; Roujean e Lacaze, 2002), fAPAR - *Fraction of Absorbed Photosynthetic Active Radiation* (Carrer *et al.*, 2010; García-Haro *et al.*, 2006; Gobron *et al.*, 2006; Roujean e Breon, 1995) e ainda os produtos relacionados com o fogo: FD&M - *Fire Detection and Monitoring* (Amraoui *et al.*, 2010), FRM – *Fire Risk Map* (Pinto *et al.*, 2018; Van Wagner, 1987) e FRP – *Fire Radiative Power* (Roberts *et al.*, 2015; Wooster *et al.*, 2015).

O presente estudo tem por objetivo a caracterização das alterações das propriedades biofísicas das cicatrizes de fogo após grandes eventos de incêndios rurais, utilizando observações LSA-SAF dos produtos LST, FVC e AL. Estudam-se 5 casos que incluem os ocorridos em 2017 em Pedrógão Grande e Leiria. Os resultados são uma mais valia para uma modelação adequada da recuperação da vegetação pós-incêndio e têm aplicações no domínio da agricultura, no estudo de ecossistemas e na área de prevenção de incêndios.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: a secção 2 descreve os dados de satélite utilizados; na secção 3 está descrita a metodologia utilizada para o estudo, nomeadamente a identificação dos casos de estudo e da escolha dos pixéis que caracterizam a cicatriz e os pixéis não-ardidos em seu redor. Na secção 4 os casos de estudo são analisados individualmente e por produto, sendo apresentada uma síntese de resultados na secção 4.6. As secções 5 e 6 consistem na discussão de resultados e conclusões, respetivamente.

2 Dados

2.1 Temperatura da superfície do solo (LST)

A temperatura de superfície do solo, LST, define-se como a temperatura radiométrica da superfície terrestre e controla a radiação de longo comprimento de onda emitida pela superfície (Li *et al.*, 2013; Trigo *et al.*, 2008a). A LST constitui ainda um parâmetro importante para o estudo do balanço energético da superfície terrestre, na medida em que está envolvida na determinação dos fluxos de calor sensível e latente entre a superfície e a atmosfera (Li *et al.*, 2013). Pode ser também utilizada para estimar a humidade do solo (Holmes *et al.*, 2013; Wang and Qu, 2009), a evapotranspiração (Anderson and Kustas, 2008; Miralles *et al.*, 2011; Xiong and Qiu, 2011) e as propriedades da vegetação (Raynolds *et al.*, 2008; Weng *et al.*, 2004), incluindo o respetivo stress hídrico (Bento *et al.*, 2018; Karnieli and Dall'Olmo, 2003).

A obtenção da LST para grandes áreas é geralmente conseguida através da medição por sensores de satélite da radiação emitida pela superfície. Nas metodologias mais comuns, essa medição é, de uma maneira geral, feita a partir de um ou mais canais dentro da janela do Infra-Vermelho (IV) térmico - 8 a 13 μm (Dash *et al.*, 2002; Li *et al.*, 2013), embora seja também possível determinar a LST recorrendo a sensores de micro-ondas (e.g., Duan *et al.*, 2017; Ermida *et al.*, 2017; Jiménez *et al.*, 2017). Prata (1993) e Wan e Dozier (1996) propuseram um algoritmo com base numa regressão semi-empírica das temperaturas de brilho do topo da atmosfera (*Top Of Atmosphere* - TOA), de dois canais contíguos na banda do IV térmico (*split-window channels*). Os produtos de LST disseminados pela LSA-SAF utilizam este tipo de metodologia (Trigo *et al.*, 2008a). No caso do produto com base em medições do SEVIRI a bordo dos satélites da série MSG, a LST é processada a partir de canais centrados em 10,8 e 12,0 μm , na resolução espacial e temporal do sensor (i.e., 3 km no nadir e com imagens a cada 15 min), permitindo a captura de todo o ciclo diurno em regiões de céu limpo.

O produto LST da LSA-SAF tem sido amplamente validado (Ermida *et al.*, 2014; Freitas *et al.*, 2010; Göttsche *et al.*, 2016, 2013; Martins *et al.*, 2016), através da comparação com medições *in situ* e da comparação com a LST obtida através de sensores a bordo de outros satélites. Embora a precisão pretendida para as observações da LST seja de 2°C, as comparações com estações *in situ* em África indicam erros médios quadráticos de até 1,6°C (Göttsche *et al.*, 2016). A incerteza é fornecida juntamente com o produto e depende de uma série de fatores que incluem a emissividade, o conteúdo de vapor de água na atmosfera, o ângulo de visão do sensor e o ruído do sensor (Freitas *et al.*, 2010; Göttsche *et al.*, 2016).

A principal vantagem dos campos LST provenientes de sensores a bordo de satélites geostacionários, quando comparados com os obtidos a partir de órbitas polares, consiste na capacidade de descrever o ciclo diurno graças a uma maior probabilidade de se obter um número significativo de leituras (de céu limpo) por dia (Trigo *et al.*, 2011).

2.2 FVC

A fração de coberto vegetal (FVC) representa a fração de vegetação verde que cobre cada pixel. Determina o balanço entre as contribuições do solo e da vegetação, para fins de estimativas de emissividade (Peres and DaCamara, 2005; Trigo *et al.*, 2008b). A variável é utilizada para representar a abundância da vegetação e reflete as alterações na vegetação de escalas global e local que traduzem mudanças rápidas nas condições atmosféricas ou nos fatores de *stress* ambiental. Para resolver essas alterações do estado e da quantidade de vegetação, devidas à influência do clima e das atividades humanas, são necessárias observações com uma frequência relativamente alta, atualmente garantidas pelo radiómetro SEVIRI (LSA-SAF, 2019).

A FVC é estimada através da aplicação de uma metodologia estatística denominada Spectral Mixture Analysis (SMA; García-Haro *et al.*, 2005; Roujean *et al.*, 1992; Settle and Drake, 1993), na qual os componentes do solo e da vegetação são representados por uma função de densidade de probabilidade multimodal (Bateson *et al.*, 2000; García-Haro *et al.*, 2005b), que leva em consideração a variabilidade espectral da vegetação em diferentes ecossistemas, para os valores de refletância VIS (*Visible Spectrum* - visível) e *near-IR* (infravermelho próximo). A incerteza associada ao produto situa-se no intervalo entre 0,005 e 0,1 e as respetivas limitações surgem nas latitudes altas, principalmente na Europa durante o inverno, onde os ângulos zenitais são maiores e existem zonas com neve residual (García-Haro *et al.*, 2019).

A FVC tem a vantagem de poder ser definida independentemente das condições de iluminação, tornando a quantidade um atributo intrínseco do dossel. Ademais, o produto é relevante para uma vasta gama de aplicações da biosfera terrestre, como a agricultura e a silvicultura, a gestão ambiental, a hidrologia, a monitorização da dinâmica vegetação-solo e a monitorização das condições de seca e extensão de cicatrizes de incêndio (Trigo *et al.*, 2011).

2.3 Albedo

O albedo da superfície terrestre (AL) é a fração da energia solar de curto comprimento de onda refletida pela superfície (Lattanzio *et al.*, 2013; Trigo *et al.*, 2011), pelo que também determina a fração de energia absorvida pela superfície e reemitida sob a forma de radiação IV, calor sensível ou calor latente. O albedo é uma variável-chave para caracterizar o balanço energético no sistema superfície-atmosfera e para modelos de transferência solo-vegetação-atmosfera (Carrer *et al.*, 2018; Geiger *et al.*, 2008).

Desde fevereiro de 2005, o produto diário Land-SAF AL é gerado operacionalmente na LSA-SAF para a região europeia e, desde julho do mesmo ano, para todo o disco do SEVIRI. O albedo de superfície baseia-se em 3 canais nas bandas do visível e IV próximo (0,6, 0,8 e 1,6 μm) e é calculado em três etapas e a partir de medições de reflectância no nível do topo do dossel (*Top of Canopy* - TOC). A conversão de radiâncias TOA em reflectâncias de TOC é feita por um esquema de correção atmosférica, recorrendo a um modelo simplificado de transferência radiativa SMAC - *Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum*, proposto por Rahman e Dedieu (1994) (etapa 1). As reflectâncias do TOC são utilizadas para derivar a função de distribuição de refletância bidirecional (BRDF - *Bidirectional Reflectance Distribution Function*, Roujean *et al.* (1992)) da superfície (etapa 2), que fornece a refletância do TOC para qualquer configuração angular. O produto final é finalmente obtido através da integração angular da BRDF (etapa 3) (Carrer *et al.*, 2018, 2008).

Apesar de todo o esforço para desenvolver um produto fiável, as séries temporais do AL ainda podem conter variabilidade espúria em escalas de tempo mais curtas, devida a efeitos atmosféricos, como contaminação residual por nuvens e aerossóis. É também possível a existência de artefactos nos pixéis, tanto em locais com queda de neve, como latitudes altas e regiões montanhosas, na altura do solstício de Inverno, como nos afetados por sombras derivadas dos baixos ângulos de elevação solar (Geiger *et al.*, 2008; LSA-SAF, 2018b).

Os dados de cada produto (LST, AL e FVC) estão disponíveis para o período entre janeiro de 2004 e junho de 2019. Entre 2004 e 2015 trata-se de dados reprocessados (i.e., de um *climate data record*, processado com o mesmo algoritmo e conjunto de *inputs*), sendo os restantes (2016-2019) os que foram distribuídos em *near-real time*, visto que nesse período os algoritmos e *inputs* não sofreram alterações significativas (relativamente aos do *climate data record*) que comprometam a homogeneidade das séries temporais.

2.4 Dados de cobertura do solo e altitude

A informação da classificação da cobertura do solo foi fornecida pelo IGBP – *International Geosphere Biosphere Programme* (Belward, 1996). Trata-se de uma base de dados global de cobertura do solo, gerado pelo *Earth Resources Observation System* (EROS) da *United States Geological Survey* (USGS), desenvolvida pela *University Nebraska-Lincoln* (UNL) e pelo *Joint Research Centre of the European Commission* (JRC). Os dados de cobertura da terra do IGBP têm resolução espacial de 1 km, baseiam-se em dados provenientes do radiômetro AVHRR (*Advanced Very-High-Resolution Radiometer*). Entre as diferentes classificações de cobertura do solo disponíveis, adotou-se a classificação que distingue 18 classes de cobertura do solo (Loveland *et al.*, 2000). O mapa apresentado na Figura 2.1 corresponde à reprojeção do referido *dataset* na projeção geoestacionária para o domínio em estudo. A projeção coincide com a utilizada nos *inputs* das cadeias de processamento dos produtos da LSA SAF, baseados no MSG/SEVIRI. A Tabela 2.1 apresenta a descrição de cada tipo de cobertura de solo considerado, sendo uma descrição mais completa de cada classe fornecida no Anexo 8.1.

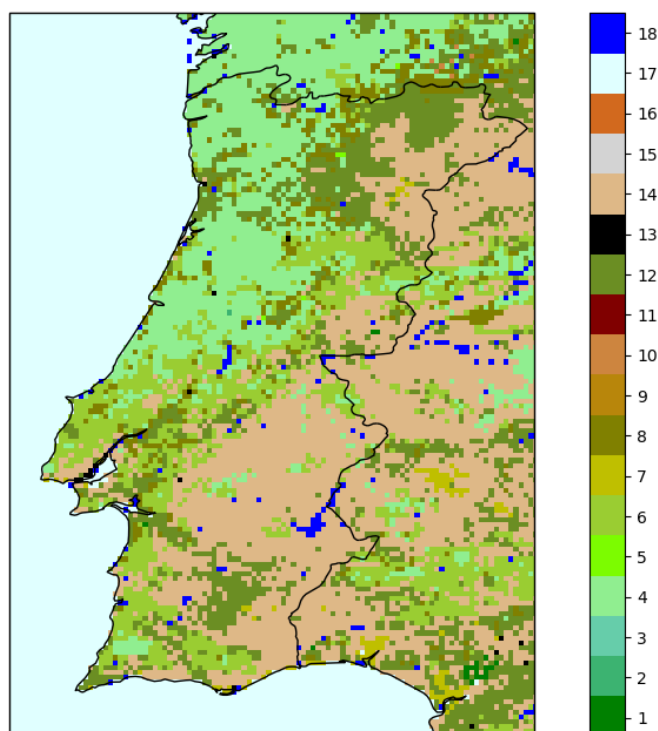


Figura 2.1: Mapa de cobertura do solo com classificação proveniente do programa IGBP.

Tabela 2.1: Descrição dos tipos de cobertura de solo utilizados na base de dados do IGBP.

Classe IGBP	Descrição
1.	Florestas de coníferas persistentes
2.	Florestas temperadas de folha persistente
3.	Florestas de coníferas caducas
4.	Florestas temperadas de folha caduca
5.	Florestas mistas
6.	Mato fechado
7.	Mato aberto
8.	Savanas lenhosas
9.	Savanas

10.	Pastagens
11.	Zonas inundadas
12.	Zonas agrícolas
13.	Zonas urbanas
14.	Mosaico de zonas agrícolas e vegetação natural
15.	Neve e gelo
16.	Zonas áridas / vegetação escassa
17.	Oceano
18.	Massas de água interiores / lagos

Além da cobertura do solo, a magnitude da diferença de altitude interfere com os valores dos produtos da LST, AL e FVC. A Figura 2.2 ilustra a topografia do domínio considerado neste estudo, que foi igualmente calculada na projeção geostacionária, com dados provenientes do produto GTOPO-30 da USGS.

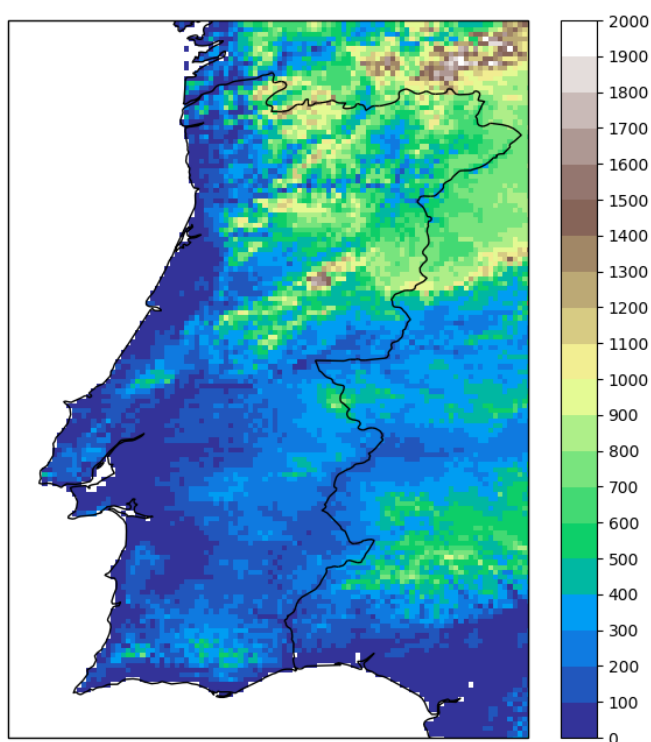


Figura 2.2: Mapa topográfico de Portugal Continental, com elevação em metros.

3 Metodologia

Conforme já referido, pretende-se estudar o comportamento de variáveis biofísicas nas cicatrizes dos incêndios, através de uma análise da variação temporal da LST, AL e FVC em 5 casos de estudo, que consistem em 5 incêndios rurais ocorridos entre 2004 e 2017 (Tabela 3.1).

Tabela 3.1: Identificação dos casos de estudo considerados neste trabalho.

Ano	Localização	Datas	Área ardida (ha)
2004	Serra do Caldeirão	ocorrido entre 26/07 e 30/07	23 219
2005	Arrifana	deflagrado a 19/08	8 143
2012	Catraia	ocorrido entre 18/07 e 21/07	24 800
2017	Pedrógão Grande	ocorrido a 17/06	30 359
2017	Pataias (Alcobaça)	deflagrado a 15/10	18 600

Estes casos foram escolhidos por constituírem incêndios de grandes proporções (i.e., afetando áreas ardidas muito extensas). Visto que o MSG/SEVIRI tem uma resolução espacial relativamente baixa em comparação com outros sensores (nomeadamente os instalados em satélites de órbita polar), apenas são esperadas assinaturas significativas nas variáveis em estudo para incêndios com áreas ardidas extensas. A localização de cada cicatriz do incêndio rural foi feita recorrendo ao ICNF que disponibiliza no *site* oficial as áreas ardidas e as respetivas cartografias, que se encontram representadas nas Figuras 3.1 e 3.2 para os anos de 2004/2005 e 2012/2017, respetivamente.

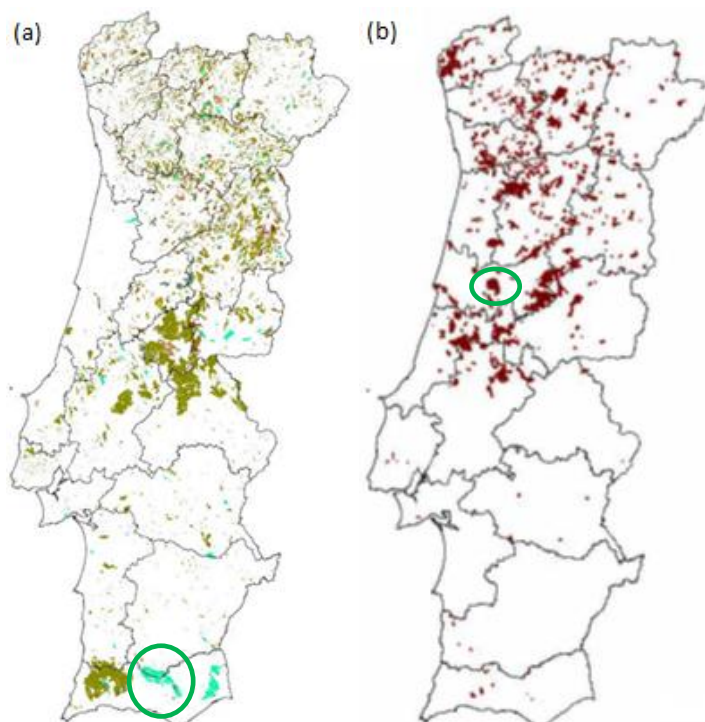


Figura 3.1 - Áreas ardidas em 2004, assinaladas a azul claro (a) e em 2005 a vermelho (b). Os incêndios estudados encontram-se circundados pelas elipses verdes. Adaptado de: ICNF (<http://www2.icnf.pt/portal/florestas/dfci/inc/mapas>).

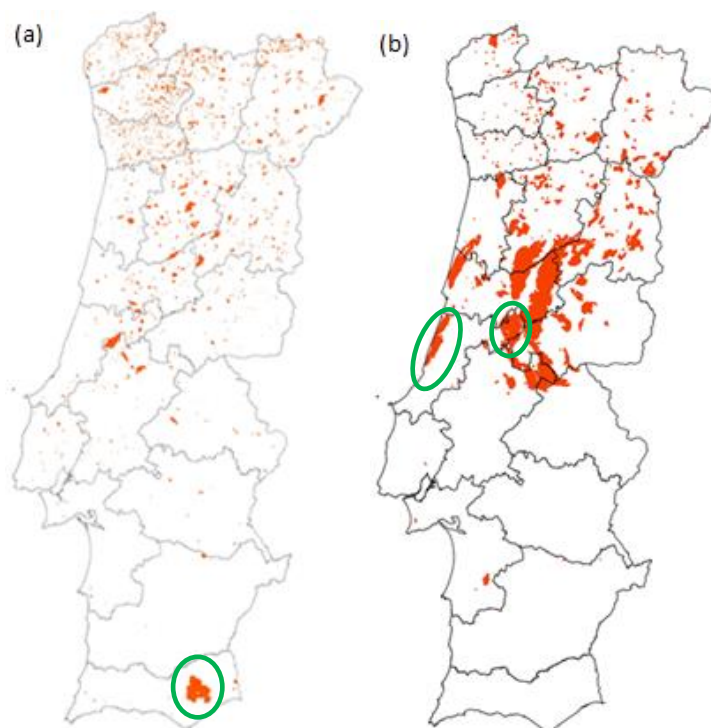


Figura 3.2 - Áreas ardidas em 2012 (a) e 2017 (b), assinaladas a laranja. Os incêndios estudados encontram-se circundados pelas elipses verdes. Adaptado de: ICNF (<http://www2.icnf.pt/portal/florestas/dfci/inc/mapas>).

Relativamente aos produtos, foi efetuado um pré-processamento dos dados da série completa de modo a apresentar todos os *datasets* com um valor por década. As décadas são definidas como períodos de 10 dias, ou, no caso da última década do mês, pelos dados desde o dia 21 até ao último dia do mês em consideração. Para a LST (com resolução temporal de 15 minutos) determinaram-se os valores máximos diurnos, determinando para cada pixel o valor máximo das 11 observações compreendidas entre as 12h e as 14h30. De forma a obter um número máximo de observações sem contaminação por nuvens, apenas se contabilizaram os dias que apresentaram pelo menos 3 observações válidas. Posto isto, determinou-se o máximo para a década. No caso do AL e do FVC utilizaram-se os produtos diários, calculando-se as medianas para cada década. Este operador foi escolhido visto ser mais robusto na presença de valores atípicos (*outliers*), quando comparada, por exemplo, com a média. A Figura 3.3 apresenta exemplos de dados relativos à primeira década de junho de 2019 (01/06/2019 - 10/06/2019) para os três produtos em análise.

Observando o mapa relativo à LST denota-se menores valores (entre 30 e 40°C) nas regiões do litoral oeste, norte e de maiores altitudes (sobressaindo a Serra da Estrela e a Serra de Monchique) e com valores superiores (entre 50 e 55°C) na região do Baixo Alentejo. No caso da FVC, a fração de vegetação verde é superior nas regiões do norte de Portugal (variando entre 0,5 e 0,8) e menor a sul (entre 0,1 e 0,3). Finalmente, o albedo apresenta valores inferiores na zona da Serra da Estrela (0,10 – 0,20) e superiores no Baixo Alentejo (0,15 – 0,25).

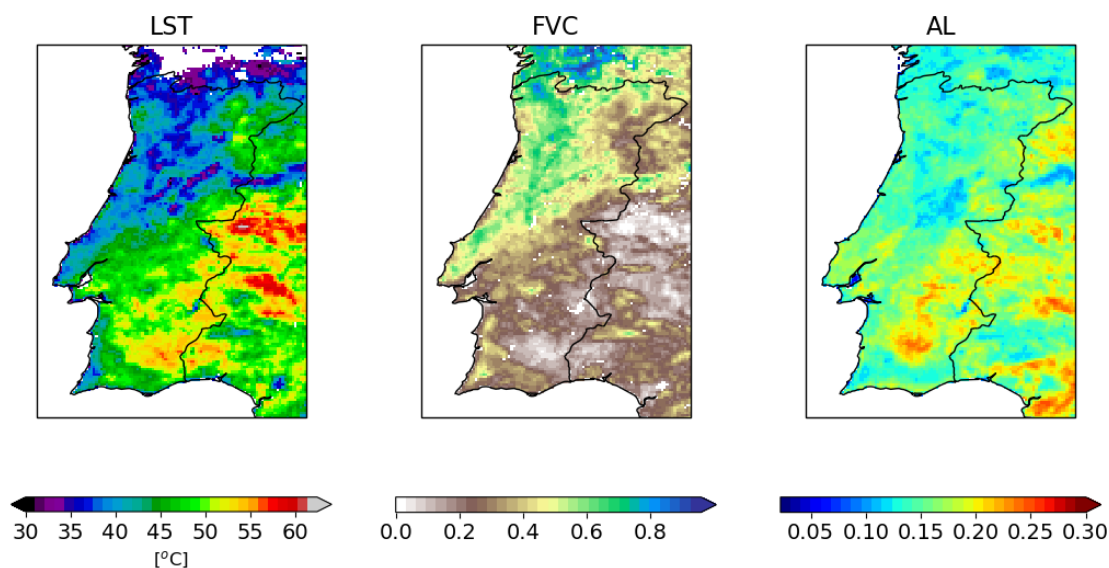


Figura 3.3: Mapas da LST máxima em °C (esquerda), da mediana da FVC (centro) e da mediana do AL (direita) para a primeira década de junho de 2019 (01/06/2019 - 10/06/2019).

As Figuras 3.1 e 3.2 mostram que os 5 casos de estudo se distribuem entre as zonas centro e sul de Portugal Continental. Por conseguinte, a altitude e o tipo de vegetação nas áreas ardidas variam entre as localizações e, em menor escala, de pixel para pixel. Essas variações podem condicionar os valores típicos obtidos para cada pixel. Por exemplo, para altitudes mais elevadas, é natural que os valores de LST sejam mais baixos porque a temperatura do ar decresce, em geral, com a altitude, afetando o balanço de energia à superfície.

Com o intuito de determinar a percentagem de pixel ardido para cada cicatriz de incêndio, utilizou-se o *software* QGIS que, através de um processo de rasterização, permitiu conjugar as resoluções distintas dos dados de cartografia do ICNF com a projeção do disco MSG dos produtos. Foi também identificado conjunto de pixéis que rodeavam as cicatrizes (área não ardida em torno da área ardida), originando um *buffer* espacial – i.e., uma área de controlo que permitisse comparar pixéis ardidos e não ardidos com condições ambientais semelhantes. Este método foi utilizado em estudos anteriores como, por exemplo, Lhermltte *et al.* (2010) e Veraverbeke *et al.* (2010). Considerou-se como área ardida todos os pixéis numa cicatriz com área ardida superior a 75%. Os valores das observações decadais da LST, AL e FVC foram analisados em cada pixel da cicatriz ardido e do *buffer*, estando estes sujeitos às seguintes duas condições de correspondência:

- igual classificação de cobertura do solo;
- diferença de altitude inferior a 300 m (Khandelwal *et al.* (2018) e Phan *et al.* (2018) mostraram que em estudos que envolvem distribuição espacial de LST em grandes áreas, deve ser considerado o efeito da mudança de altitude).

No caso da cartografia de 2017, a cicatriz de incêndio de Pedrógão Grande encontrava-se rodeada por outras áreas que arderam na mesma época de incêndios, formando outras cicatrizes. Por conseguinte, no momento da escolha dos pixéis do *buffer*, excluíram-se os pixéis que pertenciam às referidas áreas ardidas, evitando a sobreposição (Figura 3.4).

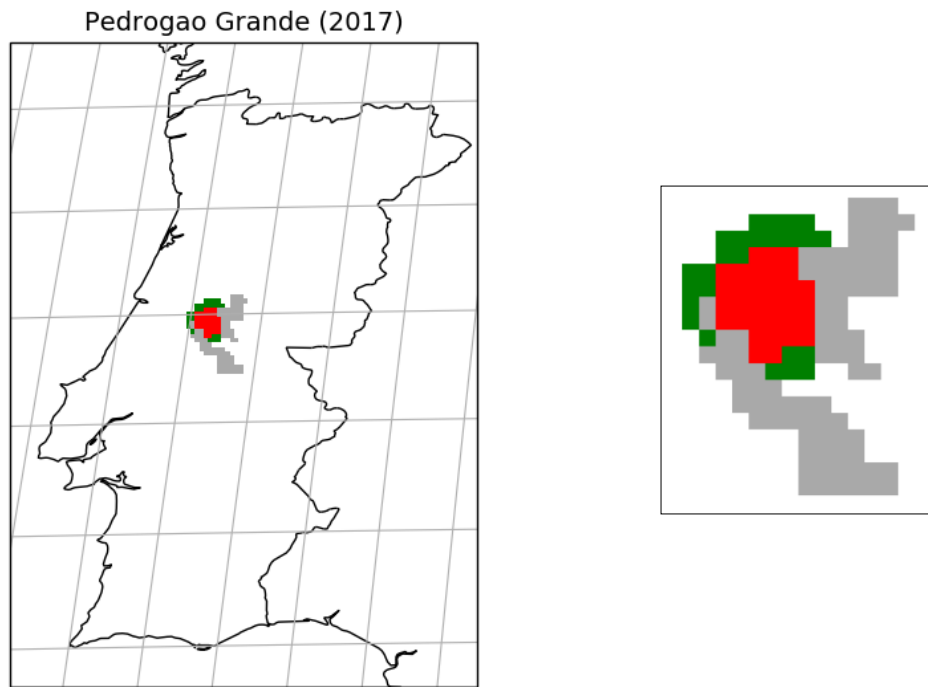


Figura 3.4 – Pixéis arditos pertencentes à cicatriz de incêndio de Pedrógão Grande ocorrido a 15/06/2017 (a vermelho); pixéis de outras áreas arditas no mesmo ano (a cinzento) e pixéis do buffer resultante (a verde).

Projetaram-se as séries temporais dos valores das observações de cada produto na cicatriz e no *buffer*, assim como a anomalia (isto é, a diferença média entre os valores da cicatriz e *buffer*), para cada produto e para cada evento de incêndio. A partir dos valores das anomalias da LST, FVC e AL determinou-se posteriormente os respetivos *boxplot*, para dois períodos distintos: um “sem incêndio” e outro “com incêndio”.

4 Resultados

4.1 Incêndio da Serra do Caldeirão (2004)

4.1.1 Seleção dos pixéis

Segundo os dados de cartografia do ICNF, no incêndio ocorrido na Serra do Caldeirão entre os dias 26 e 30 de julho de 2004 arderam 23219 ha. Na Figura 4.1 mostra-se a cicatriz do referido incêndio, colorida de acordo com a área ardida de cada pixel da imagem do SEVIRI. Os valores de área ardida variam entre 8% e 100% nos pixéis identificados.

Cicatriz - Serra do Caldeirao (2004)

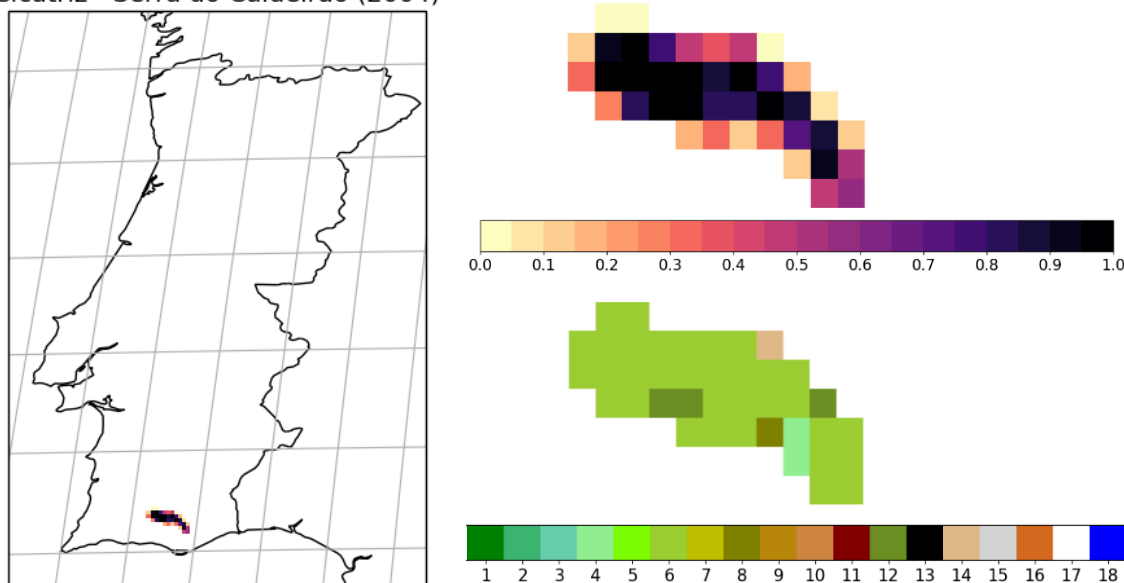


Figura 4.1 - Cicatriz do evento de incêndio de 2004 na Serra do Caldeirão e respetivos pormenores, com pixéis preenchidos com a fração de pixel ardido (em cima) e cobertura de solo do IGBP (em baixo).

A Serra do Caldeirão situa-se a Sul de Portugal Continental e o relevo é marcadamente acentuado, variando entre as cotas 150 e 598 m (cota mais elevada). Grande parte da Serra era coberta por extensos montados de sobre (*Quercus suber*) que evoluíram para formações mais densas devido ao abandono agro-pastoril. Observa-se a presença de matos e matagais arborescentes e também vastas áreas de esteval, em solos empobrecidos, que resultaram da cultura cerealífera intensiva (e posterior abandono) na década de 60 (ICNF - <http://www2.icnf.pt/portal/pn/biodiversidade/rn2000/resource/doc/sic-cont/caldeirao>).

Ao seleccionar os pixéis envolventes da cicatriz obteve-se o *buffer* espacial ilustrado na Figura 4.2. A zona ardida é constituída por pixéis de mato fechado, de zonas agrícolas, savana lenhosa, floresta temperada de folha caduca e mosaico de zonas agrícolas e vegetação. O *buffer*, por sua vez, é constituído por 22 pixéis de mato fechado, 15 pixéis de zonas agrícolas e 18 pixéis de mosaico de zonas agrícolas e vegetação natural.

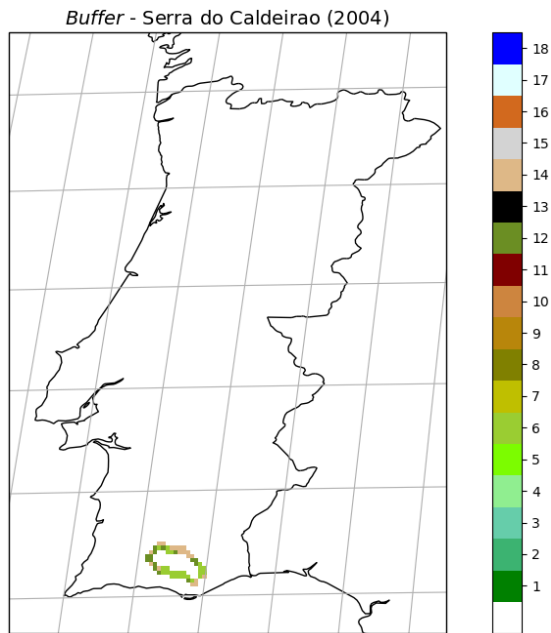


Figura 4.2 - Buffer espacial para a cicatriz do evento de incêndio de 2004 na Serra do Caldeirão e respetivo pormenor, com pixéis preenchidos com a classificação da cobertura de solo do IGBP.

Comparando os pixéis da cicatriz (com percentagem superior a 75% de pixel ardido) com os do *buffer*, verificou-se que existia uma predominância de pixéis classificados como mato fechado (classe de Cobertura de Solo, CS 6, cf. Tabela 2.1). Selecionando apenas os pixéis com altitudes entre 300 e 600 m, obtiveram-se 15 e 11 pixéis para caracterizar a cicatriz e o *buffer*, respetivamente.

4.1.2 Anomalias de LST

A média dos valores de LST dos pixéis da cicatriz e do *buffer* foram calculadas para cada década para o período compreendido entre janeiro de 2004 e junho de 2019. Na Figura 4.3 estão representadas as séries temporais das LSTs decadais (ver secção 3) da cicatriz e do *buffer*, bem como a sua diferença (que representa a anomalia introduzida pelo incêndio), entre janeiro de 2004 e dezembro de 2009.

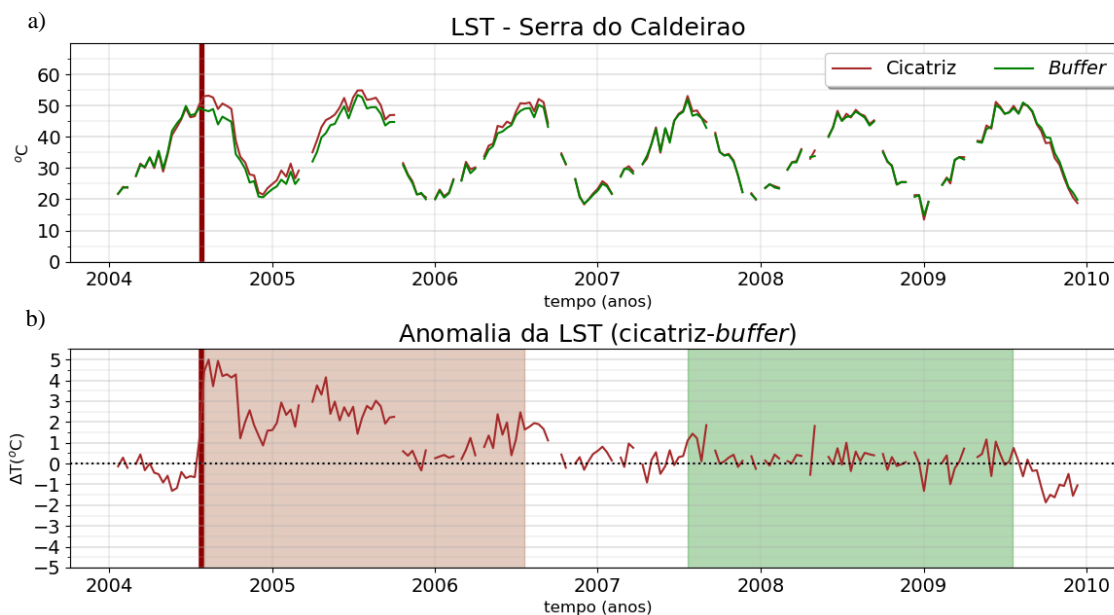


Figura 4.3 - a) Série temporal dos máximos das décadas da LST para o incêndio da Serra do Caldeirão (janeiro 2004 a dezembro de 2009) para os pixels da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). b) Série temporal da anomalia da LST (pixels da cicatriz - buffer) para o mesmo período. As zonas vermelha e verde correspondem à delimitação dos períodos em que os pixels são afetados pelo incêndio (21/07/2004 a 20/07/2006), a vermelho, e em que os pixels já não sentem os efeitos do incêndio (21/07/2007 a 20/07/2009), a verde. As barras verticais a vermelho assinalam a data do incêndio (26/07/2004).

Tanto para o caso da cicatriz como para o *buffer*, observa-se um claro ciclo sazonal nas LSTs – variam entre 45°C e 55°C nos meses de verão e entre 13°C e 25°C no inverno. A anomalia da LST (cicatriz – *buffer*), Figura 4.3b, mostra que, antes da ocorrência do incêndio (barra a vermelho, que corresponde à data 26/07/2004), a anomalia térmica toma valores em geral no intervalo entre -1,3°C e 0,5°C, ou seja, os valores da LST na cicatriz e *buffer* são muito próximos. Na década posterior á ocorrência do incêndio, observa-se um aumento significativo da anomalia (5,7°C), permanecendo com valores na ordem de 1-3°C até aproximadamente a maio de 2007. No entanto, a anomalia térmica diminui 3,1°C da segunda para a terceira década de outubro de 2004, que se pode explicar pela ocorrência das chuvas de outono e pela decrescente disponibilidade de radiação solar.

Note-se que as “falhas” de valores existentes ao longo das séries temporais se deve à presença de nuvens, sendo mais frequentes nos meses de outono e inverno.

4.1.3 Anomalias de FVC

As séries temporais de FVC, obtidas de forma semelhante às da Figura 4.3, encontram-se representadas na Figura 4.4. Tal como no produto LST, as observações de FVC exibem uma forte sazonalidade (Figura 4.4a). Neste caso, os maiores valores são atingidos nos meses de primavera (entre 0,4 e 0,5 em março/abril) e os menores no verão (entre 0,25 e 0,30 nos meses de julho a setembro, após a estação seca).

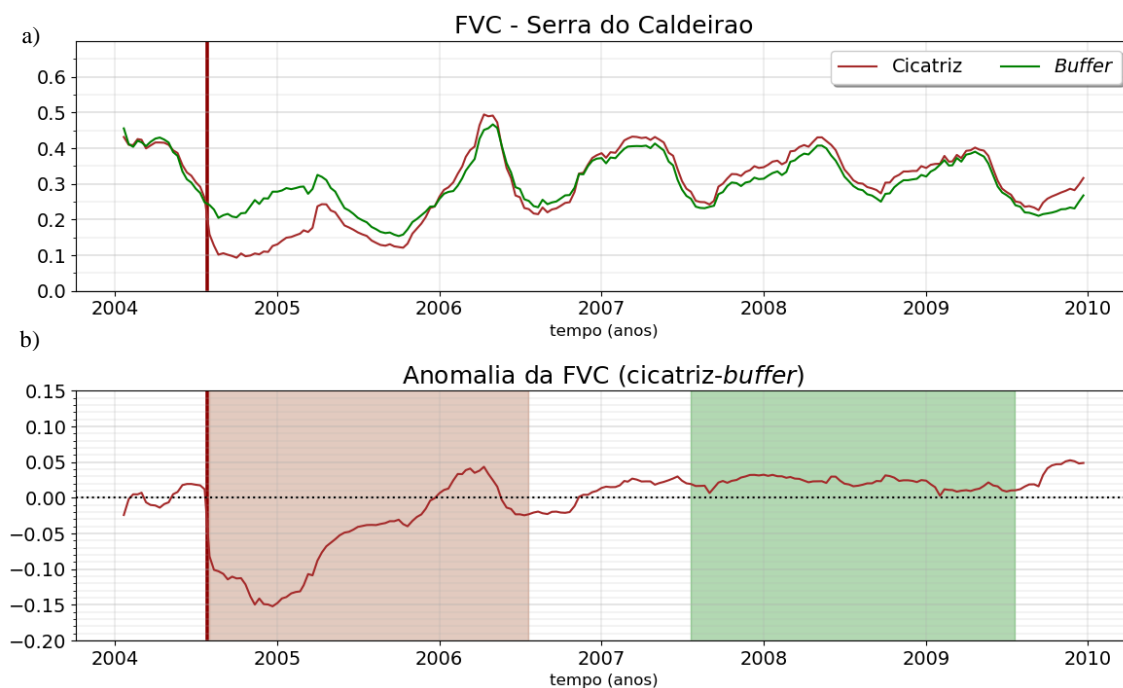


Figura 4.4 - a) Série temporal das medianas das décadas de FVC para o incêndio da Serra do Caldeirão (janeiro 2004 a dezembro de 2009) para os pixels da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). b) Série temporal da anomalia de FVC (pixels da cicatriz - buffer) para o mesmo período. As zonas vermelha e verde correspondem à delimitação dos períodos com incêndio (21/07/2004 a 20/07/2006) e sem incêndio (21/07/2007 a 20/07/2009), respetivamente. As barras a vermelho assinalam a data do incêndio (26/07/2004).

No que respeita à anomalia de FVC (a diferença entre as observações do produto nos pixels da cicatriz e *buffer* – Figura 4.4b), observam-se valores entre -0,02 e 0,02 até à segunda década de julho de 2004 inclusive, decaindo abruptamente na terceira década do mesmo mês (data do incêndio) para diferenças na ordem dos -0,15 em novembro. Ocorre de seguida uma diminuição progressiva da anomalia, até esta se tornar positiva e atingir o valor 0,04 na segunda década de abril de 2006. Este valor é superior ao valor típico registado antes do incêndio, o que pode indicar que na regeneração da cicatriz podem ter florescido plantas de espécies diferentes das originalmente presentes na região, ou que possa ter surgido uma maior quantidade de vegetação rasteira. Trabaud (1994) estudou a dinâmica da vegetação pós-incêndio na bacia do Mediterrâneo e observou que, particularmente no sudoeste de Espanha, no primeiro ano posterior ao incêndio deu-se a germinação de espécies lenhosas e herbáceas e as espécies resistentes ao fogo iniciaram o seu crescimento; durante o segundo ano as gramíneas atingiram o seu máximo desenvolvimento.

4.1.4 Anomalias de AL

O terceiro produto analisado para cada evento de incêndio é o albedo, AL. Na Figura 4.5 estão ilustradas as séries temporais para esse produto, utilizando a mesma metodologia aplicada para os produtos anteriores. A série temporal representada compreende o mesmo período da Figura 4.3 e da Figura 4.4. Tal como os outros dois produtos acima descritos, também se observa um ciclo sazonal do AL, tomando os maiores valores no verão (entre 0,14 e 0,16) e menores no inverno (entre 0,10 e 0,12), explicados pela maior fração de radiação solar absorvida por fotossíntese (García-Haro *et al.*, 2018).

Apesar da anomalia do albedo tomar valores quase sempre negativos até à data do incêndio (variando entre 0,004 e -0,008), nas décadas imediatamente posteriores é claramente visível a diminuição da anomalia (em cerca de 0,02). No entanto esta diferença é rapidamente recuperada até à primeira década do mês de abril e os valores de albedo da cicatriz tornam-se superiores aos

do *buffer* até cerca de 2010 (veja-se a anomalia positiva de valores até 0,01 ao longo de todo o período entre 2005 e 2010).

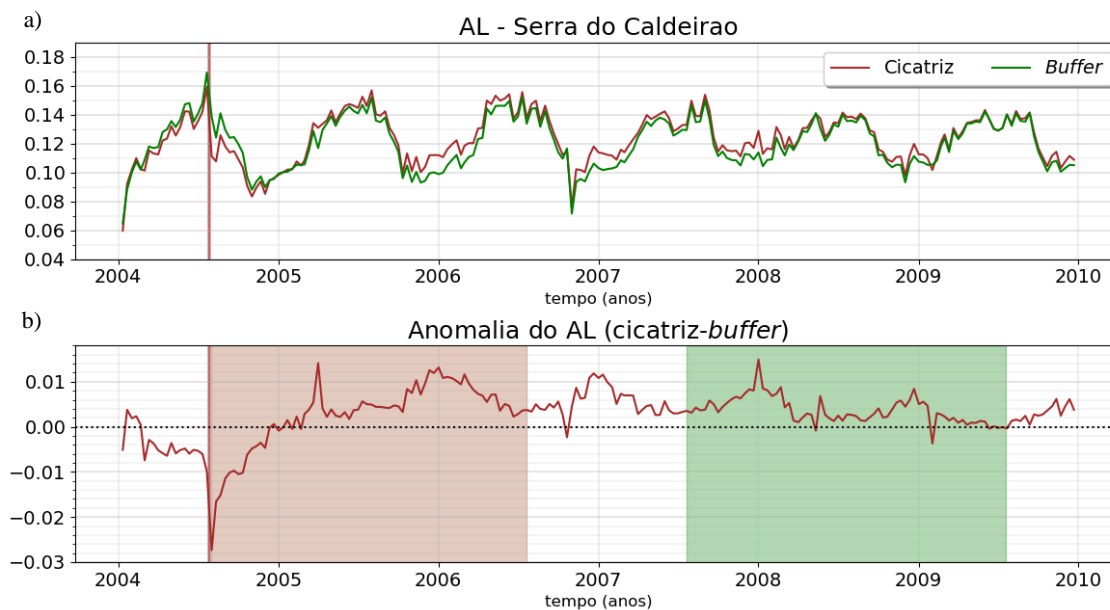


Figura 4.5 - a) Série temporal das medianas das décadas de AL para o incêndio da Serra do Caldeirão (janeiro 2004 a dezembro de 2009) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do *buffer* (a verde). **b)** Série temporal da anomalia de AL (pixéis da cicatriz - *buffer*) para o mesmo período. As zonas vermelha e verde correspondem à delimitação dos períodos com incêndio (21/07/2004 a 20/07/2006) e sem incêndio (21/07/2007 a 20/07/2009), respetivamente. As barras a vermelho assinalam a data do incêndio (26/07/2004).

4.2 Arrifana (2005)

4.2.1 Seleção dos pixéis

Arrifana é uma freguesia pertencente ao concelho de Vila Nova de Poiares. A 19/08/2005 deflagrou um incêndio que consumiu, segundo dados do ICNF, 8143 ha. A localização da cicatriz de incêndio e respetivas frações de pixel ardido apresentam-se na Figura 4.6, tendo-se identificado dois pixéis totalmente ardidos. Ao repetir a construção do *buffer* e a análise do número de pixéis com correspondência em tipo de cobertura do solo e altitude (Figura 4.7), verificou-se que 10 dos 11 pixéis do *buffer* pertencem à classe 4 (florestas temperadas caducas – CS 4). Os pixéis escolhidos apresentam altitudes no intervalo entre 200 e 500 m.

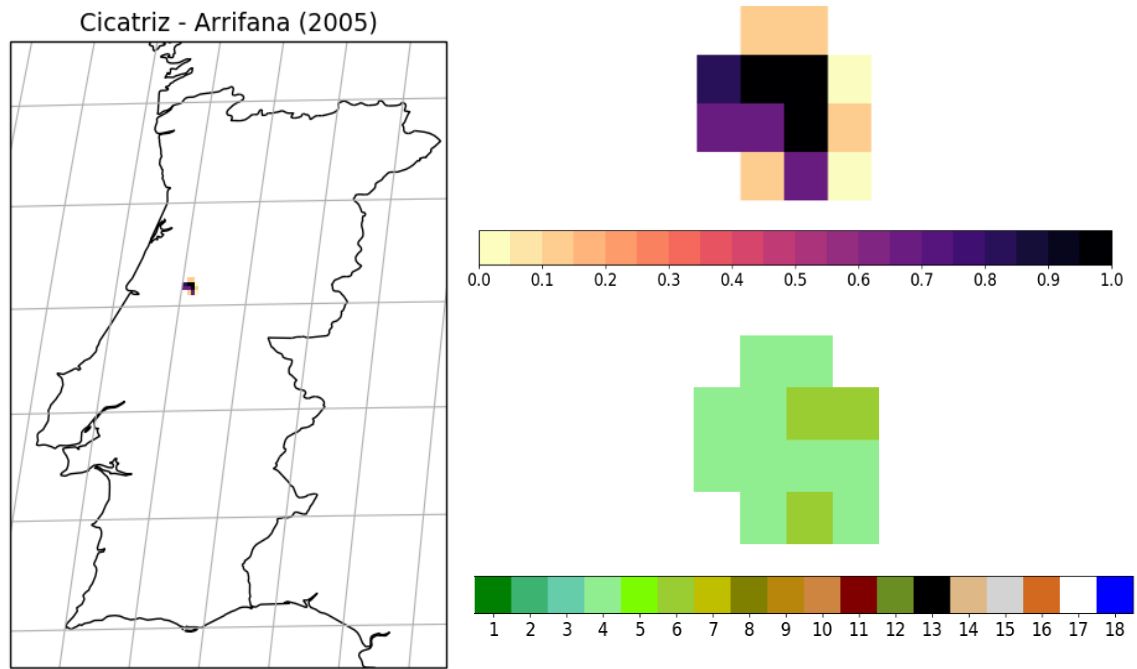


Figura 4.6 - Cicatriz do evento de incêndio de 2005 em Arrifana, e respetivo pormenores, com pixéis preenchidos com a fração de pixel ardido (em cima) e cobertura de solo do IGBP (em baixo).

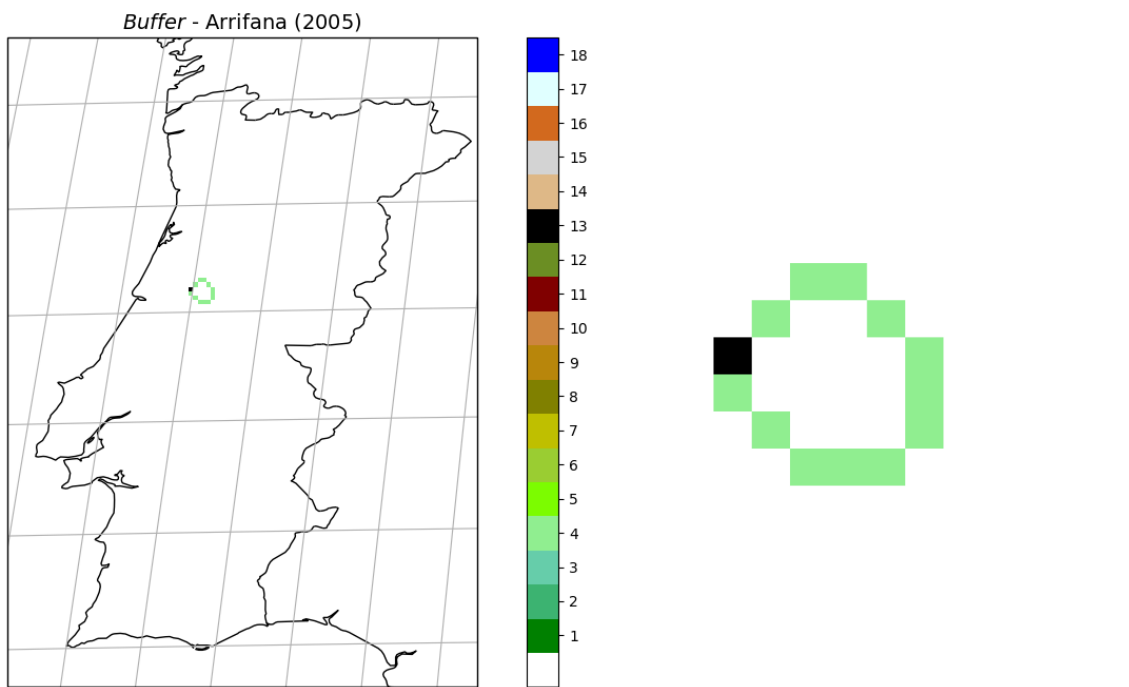


Figura 4.7 - Buffer espacial para a cicatriz do evento de incêndio de 2005 em Arrifana e respetivo pormenor, com pixéis preenchidos com a classificação da cobertura de solo do IGBP.

4.2.2 Anomalias de LST

Para o caso de estudo de Arrifana, as séries temporais relativas às observações de LST e da respetiva anomalia para o período janeiro 2005 – dezembro 2013 apresentam-se na Figura 4.8. No Anexo 8.2 pode-se visualizar a série temporal completa (2004-2019).

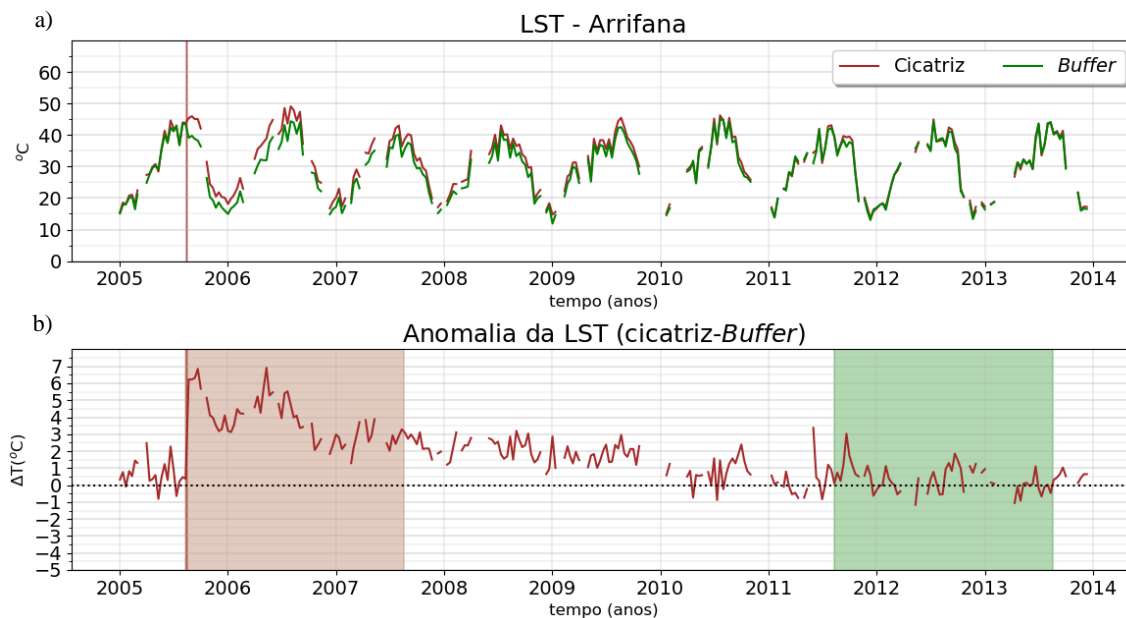


Figura 4.8 - a) Série temporal dos máximos das décadas da LST para o incêndio de Arrifana (janeiro de 2005 a dezembro de 2013) para os pixels da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). b) Série temporal da anomalia da LST (pixels da cicatriz - buffer) para o mesmo período. As zonas vermelha e verde correspondem à delimitação dos períodos com incêndio (19/08/2005 a 20/08/2007 e sem incêndio (19/08/2011 a 20/08/2013), respetivamente. As barras a vermelho assinalam a data do incêndio (19/08/2005).

Mais uma vez se observa a sazonalidade dos valores de LST (Figura 4.8a), assim como o aumento da anomalia térmica nas décadas posteriores ao incêndio. Até à terceira década de setembro de 2005, a anomalia térmica aumenta em 6,4°C, diminuindo para valores de 3,1°C em dezembro do mesmo ano. No entanto, mantêm-se anomalias a rondar valores entre 1 e 3°C, que diminuem gradualmente até ao início de 2010.

4.2.3 Anomalias de FVC

Até à data do incêndio de Arrifana (19/08/2005), os pixels da cicatriz e *buffer* apresentam valores de FVC próximos entre si, com diferenças inferiores a 0,05 (Figura 4.9a). Após o incêndio, a anomalia atinge valores de cerca de -0,29 (na segunda década de janeiro de 2006), visível na Figura 4.9b. Esta anomalia aproxima-se gradualmente de zero, estabilizando por volta do ano 2010, data a partir da qual os valores pertencentes aos pixels da cicatriz tornam-se sistematicamente superiores aos do buffer. Apesar desta recuperação, a anomalia não retorna a valores tão próximos de zero como os que precedem a evento de incêndio, o que poderá indicar a substituição de um tipo de vegetação por outra.

Comparando com os dados de FVC do caso de estudo da Serra do Caldeirão, a periodicidade dos valores é também visível, apesar da variabilidade sazonal ser menor na zona de Arrifana, tal se devendo ao facto de esta última região se tratar de uma zona florestada.

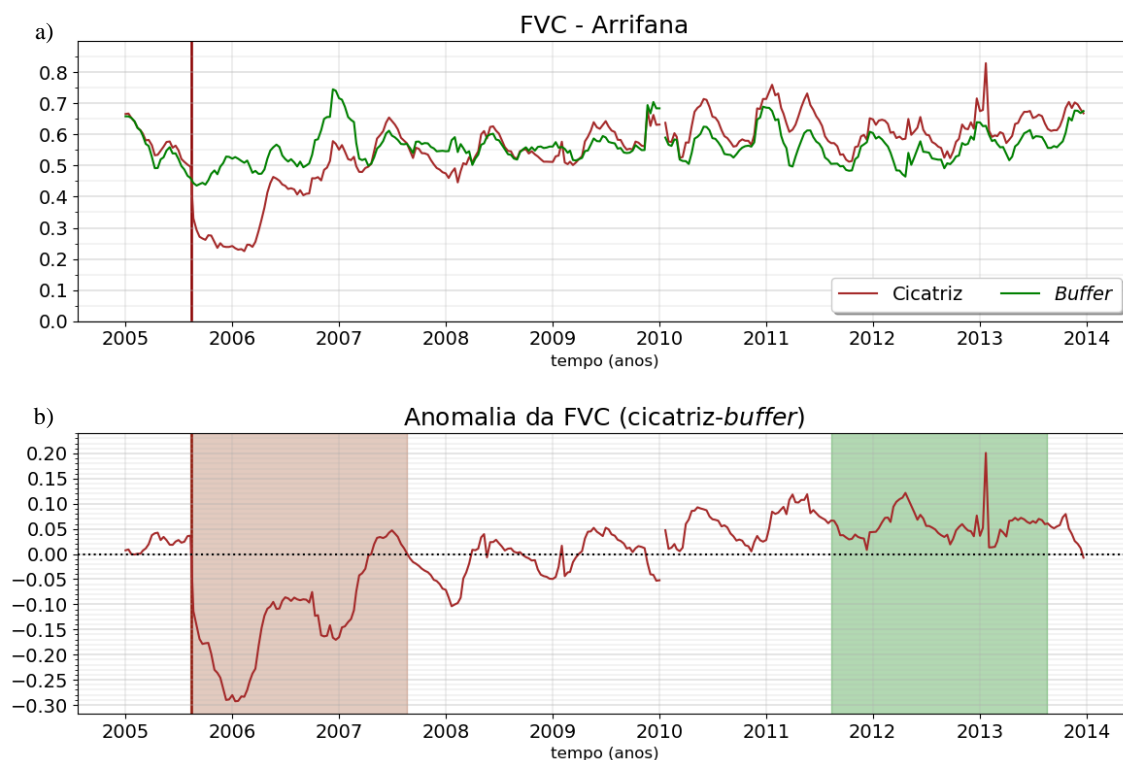


Figura 4.9 - a) Série temporal das medianas das décadas de FVC para o incêndio de Arrifana (janeiro 2005 a dezembro de 2013) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). **b)** Série temporal da anomalia de FVC (pixéis da cicatriz - buffer) para o mesmo período. As zonas vermelha e verde correspondem à delimitação dos períodos com incêndio (19/08/2005 a 20/08/2007) e sem incêndio (19/08/2011 a 20/08/2013), respetivamente. As barras a vermelho assinalam a data do incêndio (19/08/2005).

4.2.4 Anomalias de AL

As séries temporais relativas ao AL para o caso de Arrifana são apresentadas na Figura 4.10. Em geral os valores de albedo apresentam uma forte sazonalidade, com máximos entre 0,12 e 0,14 no verão e mínimos entre 0,10 e 0,11 no final do outono/inverno. A série temporal da anomalia mostra que os valores de albedo na cicatriz e no *buffer* são semelhantes antes do incêndio (com diferenças na ordem dos 0,03). No pós-incêndio (demarcado pela barra a vermelho), o albedo da região da cicatriz torna-se mais baixo que o do *buffer*, com um aumento da anomalia nas décadas seguintes ao evento de incêndio (atingindo o valor máximo de -0,019 na terceira década de agosto de 2005), precedida pelo decréscimo gradual de 0,025 até à terceira década de abril de 2004. A redução da anomalia de albedo é relativamente rápida neste caso, embora as séries temporais de albedo apresentem algum ruído. Verifica-se também que a anomalia de albedo apresenta valores positivos no início da primavera, diminuindo ao longo da estação seca nos anos de 2006 a 2008. A partir de 2009 esse comportamento deixa de se observar.

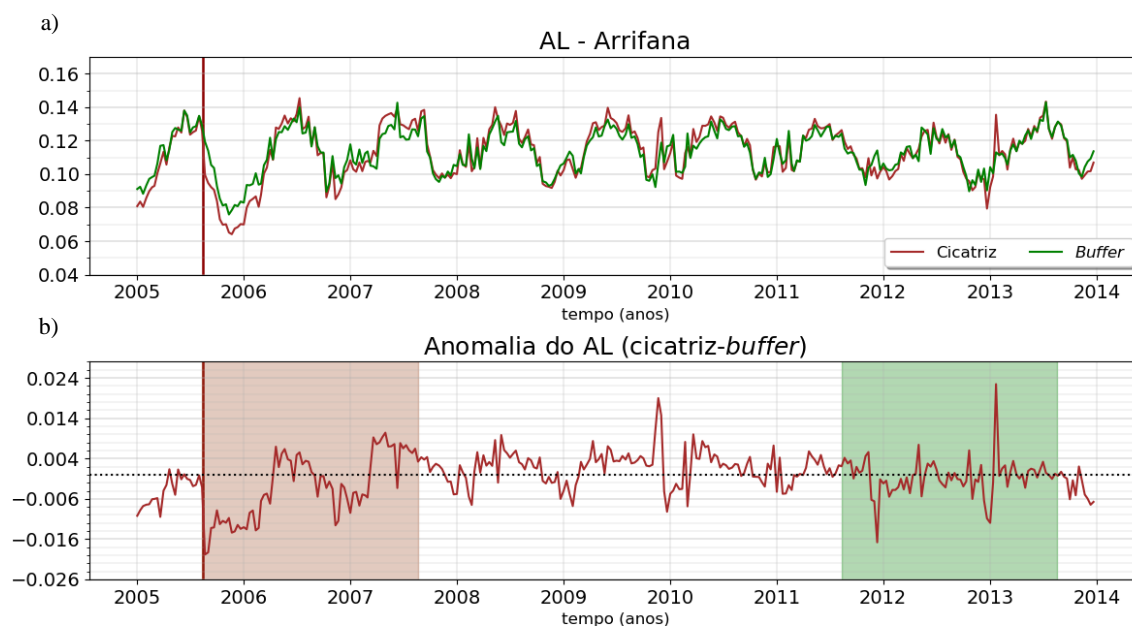


Figura 4.10 - a) Série temporal das medianas das décadas de AL para o incêndio de Arrifana (janeiro 2005 a dezembro de 2013) para os pixels da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). b) Série temporal da anomalia de AL (pixels da cicatriz - buffer), para o mesmo período. As zonas vermelha e verde correspondem à delimitação dos períodos com incêndio (19/08/2005 a 20/08/2007) e sem incêndio (19/08/2011 a 20/08/2013), respetivamente. As barras a vermelho assinalam a data do incêndio (19/08/2005).

4.3 Catraia (2012)

4.3.1 Seleção dos pixels

O incêndio de Catraia, Tavira, iniciou-se no dia 18 de julho de 2012, tendo sido dado por controlado no dia 21 de julho. Percorreu várias freguesias dos concelhos de Tavira e São Brás de Alportel, tendo ardido cerca de 24800 ha. Mais de metade da área afetada pelo incêndio estende-se por zonas ocupadas com matos, afetando cerca de 17% da Zona Especial de Conservação e Zona de Proteção Especial do Caldeirão (ICNF, 2012b). A cicatriz do evento encontra-se delineada na Figura 4.11, sendo possível identificar pixels com áreas ardidas a variar entre 7 e 100%.

Neste evento de incêndio foi possível efetuar a análise para dois tipos de cobertura de solo: mato fechado (CS 6) e zonas agrícolas (CS 12), tal como ilustrado na Figura 4.12. Apesar de predominar a CS 14 no *buffer*, isto é, mosaico de zonas agrícolas e vegetação natural, na cicatriz de incêndio não se verificou a ocorrência de qualquer pixel. A altitude dos pixels da cicatriz e do *buffer* varia entre 300 e 600 m.

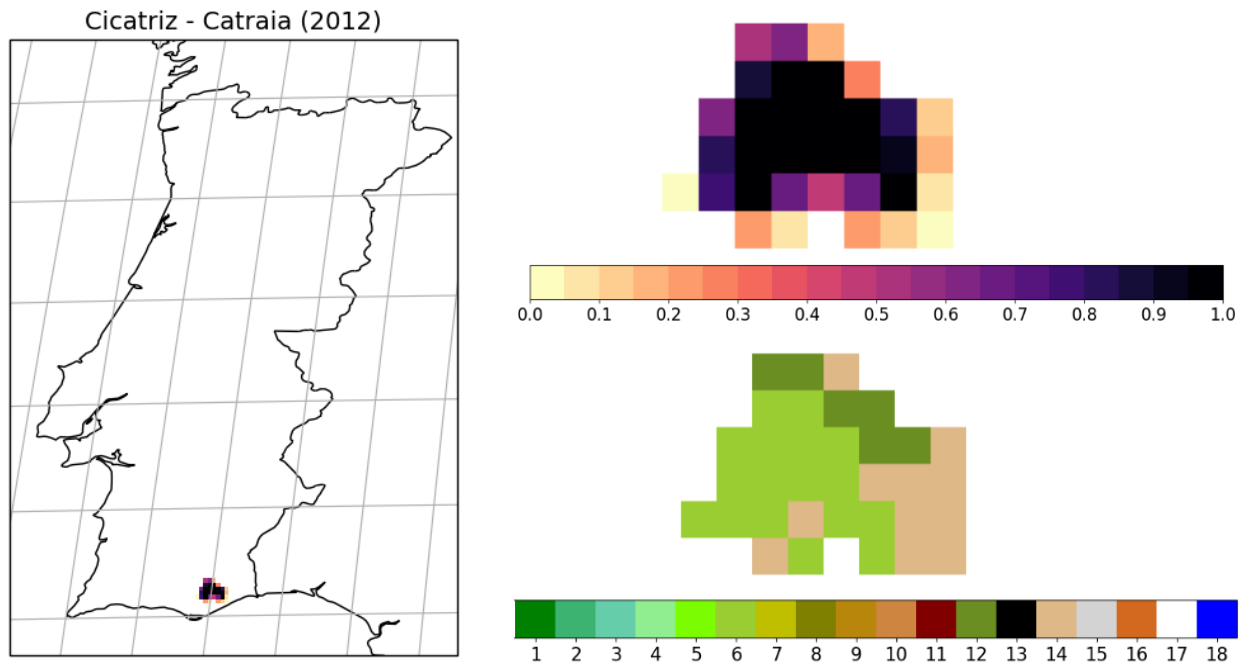


Figura 4.11 - Cicatriz do evento de incêndio de 2012 em Catraia, e respetivos pormenores, com pixéis preenchidos com a fração de pixel ardido (em cima) e cobertura de solo do IGBP (em baixo).

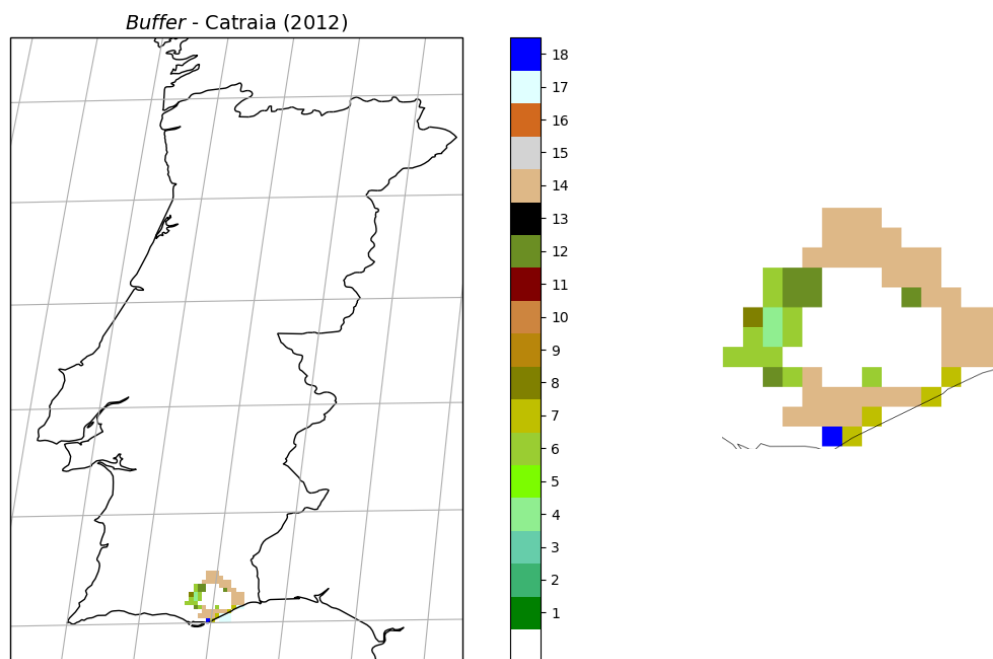


Figura 4.12 - Buffer espacial para a cicatriz do evento de incêndio de 2012 em Catraia e respetivo pormenor, com pixéis preenchidos com a classificação da cobertura de solo do IGBP.

4.3.2 Anomalias de LST

Para o evento de incêndio de Catraia, visto ter sido possível analisar dois tipos de cobertura de solo (CS 6 e CS 12), obtiveram-se séries temporais dos máximos de LST para cada década e respetivas anomalias para cada classe. Para as duas diferentes classes de cobertura do solo, as observações dos máximos das década da temperatura da superfície do solo (Figura 4.13) revelam,

tal como nos eventos de incêndio da Serra do Caldeirão e Arrifana, valores superiores durante o verão (45°C - 52°C) e inferiores no inverno (16°C - 30°C). Na Figura 4.14 pode observar-se que, tanto no caso da CS 6 como no caso da CS 12, já existiam anomalias de LST sistemáticas antes do incêndio (a variar entre 0 - 2°C no caso da CS 6 e entre 0 - 1°C no caso da CS 12). Após o evento do incêndio (18/07/2012) a anomalia no caso da CS 6 é maior (sofre um aumento de $6,5^{\circ}\text{C}$ no ano posterior ao incêndio), enquanto no caso de CS12 a anomalia é de apenas $+3,4^{\circ}\text{C}$.

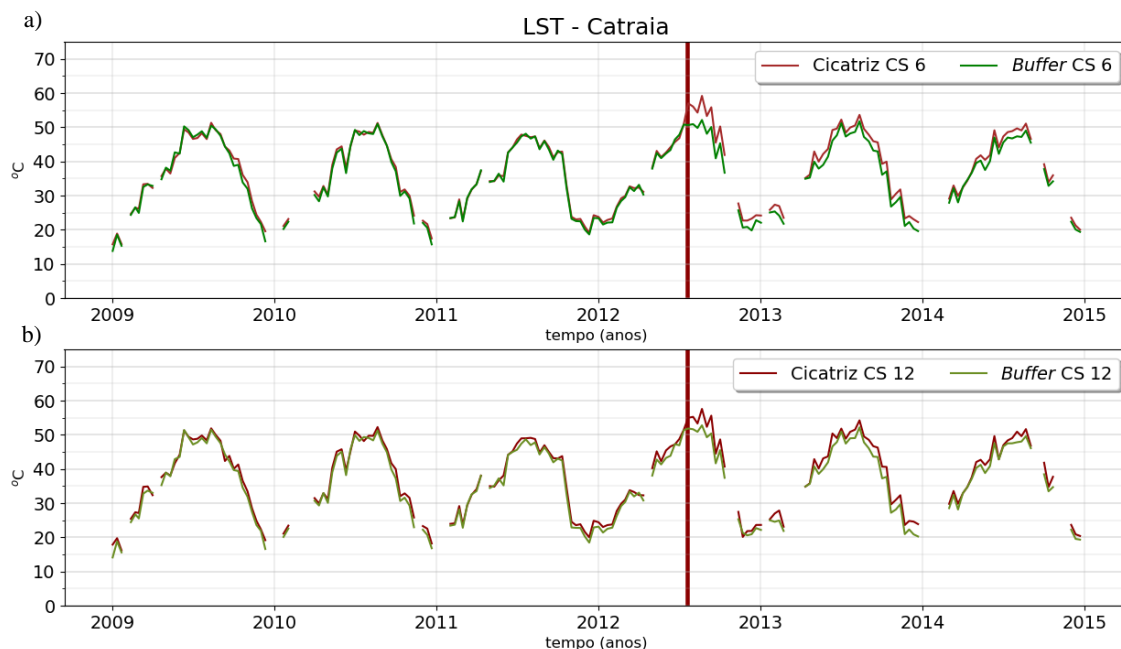


Figura 4.13 - a) Série temporal dos máximos das décadas da LST ($^{\circ}\text{C}$) para o incêndio de Catraia (janeiro 2009 a dezembro de 2014) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde), com classe de cobertura de solo CS 6 (a) e classe CS 12 (b). As barras a vermelho assinalam a data do incêndio: 18/07/2012.

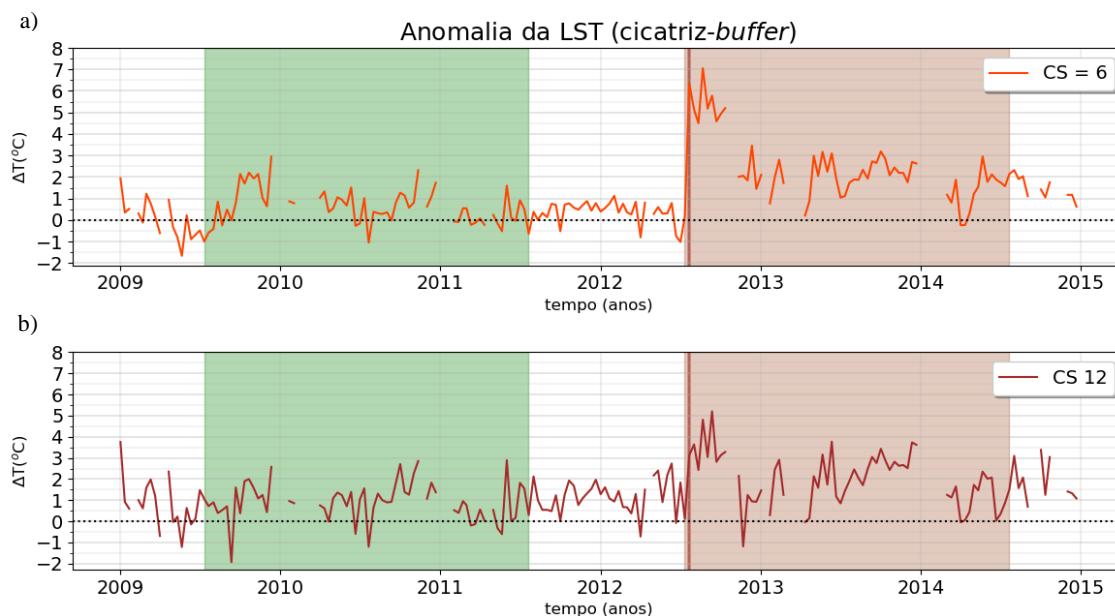


Figura 4.14 - a) Série temporal da anomalia de LST (pixéis da cicatriz - buffer) para o incêndio de Catraia (janeiro 2009 a dezembro de 2014) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde), com a classe de cobertura de solo CS 6 e a classe CS 12 (b). As barras a vermelho assinalam a data do incêndio: 18/07/2012.

Importa referir que alguns dos pixéis envolvidos no presente caso já faziam parte do caso de estudo da Serra do Caldeirão. Na Figura 4.15 apresenta-se a série temporal completa de LST para

as coberturas de solo CS 6 e CS 12, podendo observar-se a ocorrência do incêndio de 2004 em ambos os casos, associada a uma anomalia negativa, visto que foram os pixéis do *buffer* que arderam em 2004, ao invés dos pertencentes à cicatriz. Observa-se o oposto no caso da série temporal completa dos máximos das décadas de LST (Figura 4.16a) e respetiva anomalia (Figura 4.16b) para o caso da Serra do Caldeirão, com pixéis pertencentes à CS 6. Delimitados pelas barras a vermelho, o incêndio de 2004 traduz-se por uma anomalia positiva e o de 2012 por uma anomalia negativa.

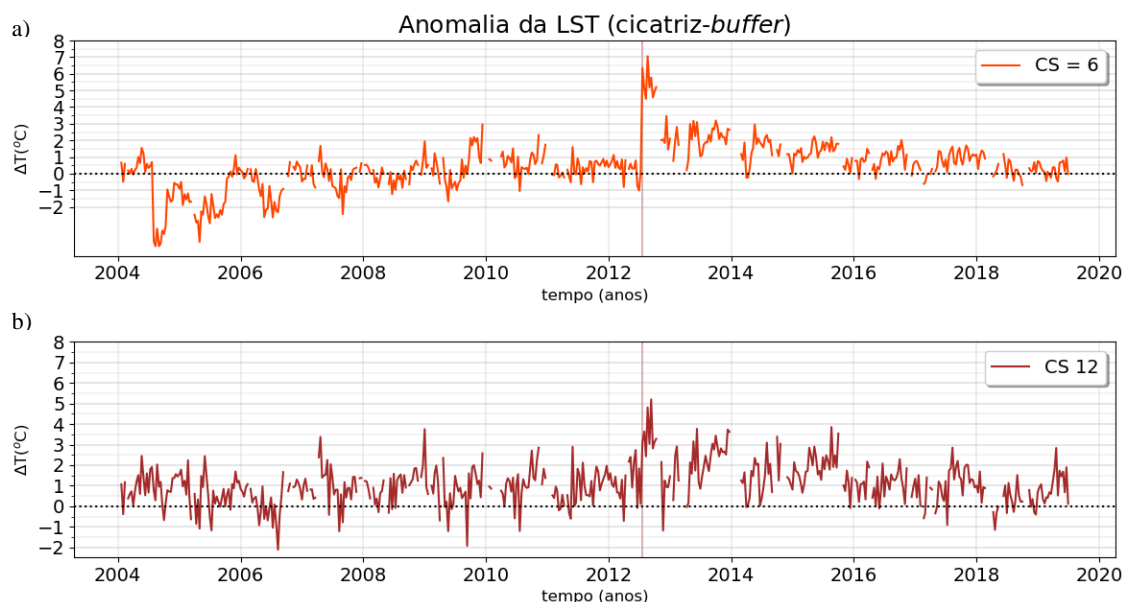


Figura 4.15 - a) Série temporal completa da anomalia de LST (pixéis da cicatriz - buffer) para o incêndio de Catraia (janeiro 2004 a junho de 2019) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde), com classe de cobertura de solo CS 6 e classe CS 12 (b). As barras a vermelho assinalam as datas dos incêndios: 26/07/2004 e 18/07/2012.

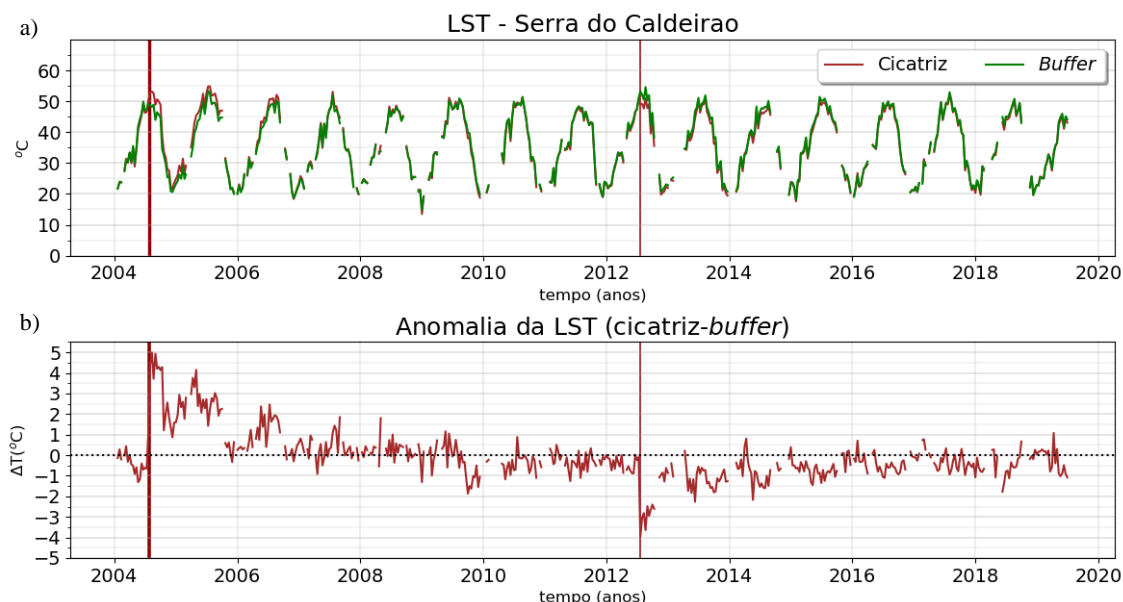


Figura 4.16: - a) Série temporal completa dos máximos das décadas da LST para o incêndio da Serra do Caldeirão (janeiro 2004 a junho de 2019) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). b) Série temporal da anomalia da LST (pixéis da cicatriz - buffer), para o mesmo período. As barras a vermelho assinalam as datas dos incêndios: 26/07/2004 e 18/07/2012.

4.3.3 Anomalias de FVC

A Figura 4.17 ilustra as séries temporais de FVC para as classes CS6 e CS 12, para os pixéis pertencentes à cicatriz e para os pertencentes ao *buffer*. Entre os dois tipos de vegetação, a variações sazonais de FVC são semelhantes, com máximos de cerca de 0,4 na primavera e mínimos a rondar 0,2 no final da estação seca. Entre o início de 2009 e o mês de julho de 2012, a diferença entre os pixéis da cicatriz e *buffer* pertencentes à classe 6 é menor em relação à classe 12. Porém, após o incêndio, em ambos os casos se dá um decréscimo nos pixéis da cicatriz (com os valores a variar de 0,3 para 0,03 no caso da CS 6; e de 0,21 para 0,04, para os pixéis com CS 12). Nas décadas que se sucedem ao início do ano de 2013, a FVC para os pixéis da cicatriz torna-se superior à do *buffer*. De notar que os valores de FVC na região do *buffer* têm mínimos absolutos de cerca de 0,15 no período pós-incêndio, devido ao facto de 2012 ter sido um ano marcado por seca meteorológica, com início no final de 2011 (IPMA, 2012).

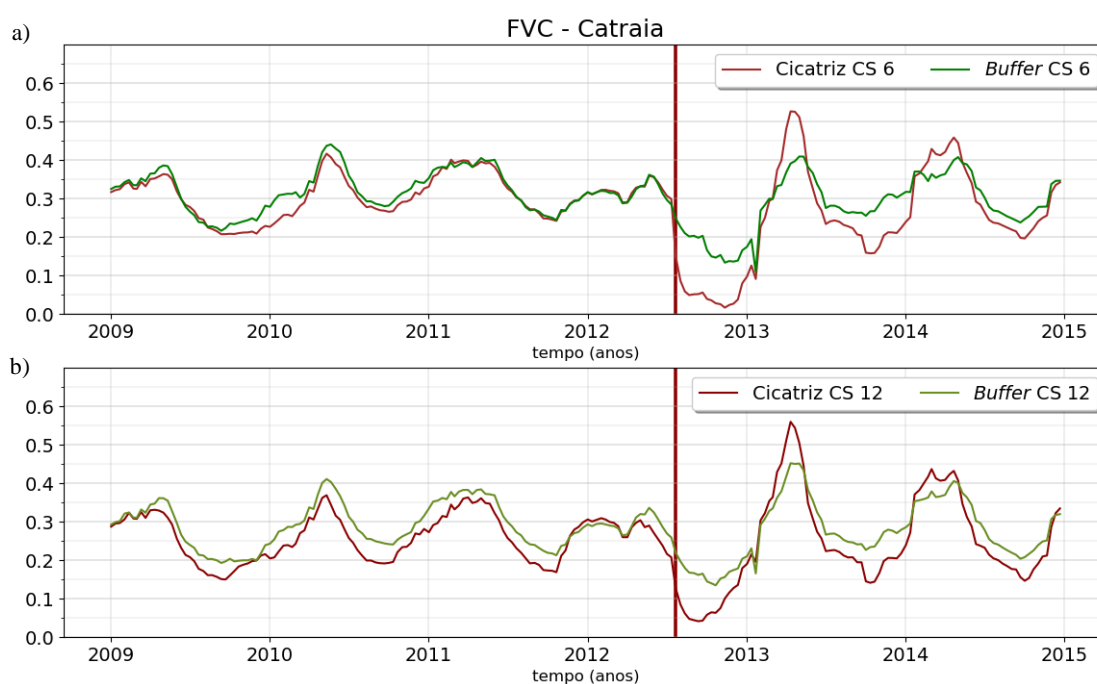


Figura 4.17 - a) Série temporal das medianas das décadas de FVC para o incêndio de Catraia (janeiro 2009 a dezembro de 2014) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do *buffer* (a verde), com classe de cobertura de solo CS 6 (a) e classe CS 12 (b). As barras a vermelho assinalam a data do incêndio: 18/07/2012.

No que respeita à anomalia dos valores de FVC (Figura 4.18), observa-se novamente a diferença entre os períodos não afetados (a verde) e afetados pelo incêndio (a vermelho), passando de 0,016 para -0,15 no caso da classe CS 6 e de -0,05 para -0,12 para a classe 12.

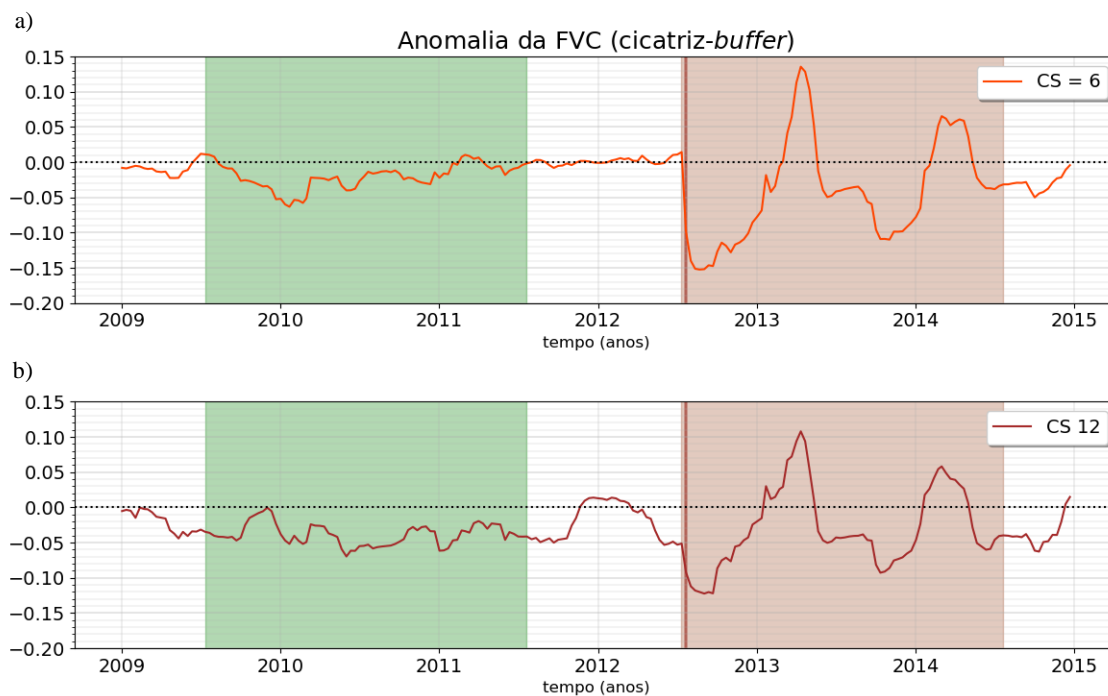


Figura 4.18 - a) Série temporal da anomalia de FVC (pixéis da cicatriz - buffer) para o incêndio de Catraia (janeiro 2012 a dezembro de 2014) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde), com classe de cobertura de solo CS 6 e classe CS 12 (b). As barras a vermelho assinalam a data do incêndio: 18/07/2012.

A série temporal completa das anomalias de FVC (Figura 4.19b) ilustra claramente a assinatura que os incêndios ocorridos no verão de 2004 e 2012 tiveram no parâmetro. Em termos de FVC, a vegetação na classe CS 6 estava plenamente recuperada do evento de 2004 aquando da ocorrência de 2012, sendo igualmente evidente a substituição do tipo de vegetação das áreas ardidas por vegetação com fenologia caracterizada por um forte ciclo sazonal, particularmente visível até 2018.

Mais uma vez, a ocorrência dos incêndios de 2004 e 2012 é visível na série temporal completa de FVC da Serra do Caldeirão (Figura 4.20), observando-se uma queda abrupta do valor da anomalia entre a segunda e terceira décadas de julho de 2004 (Figura 4.20b) e uma anomalia positiva em julho de 2012 (recordar que os pixéis que arderam neste caso pertencem ao *buffer*).

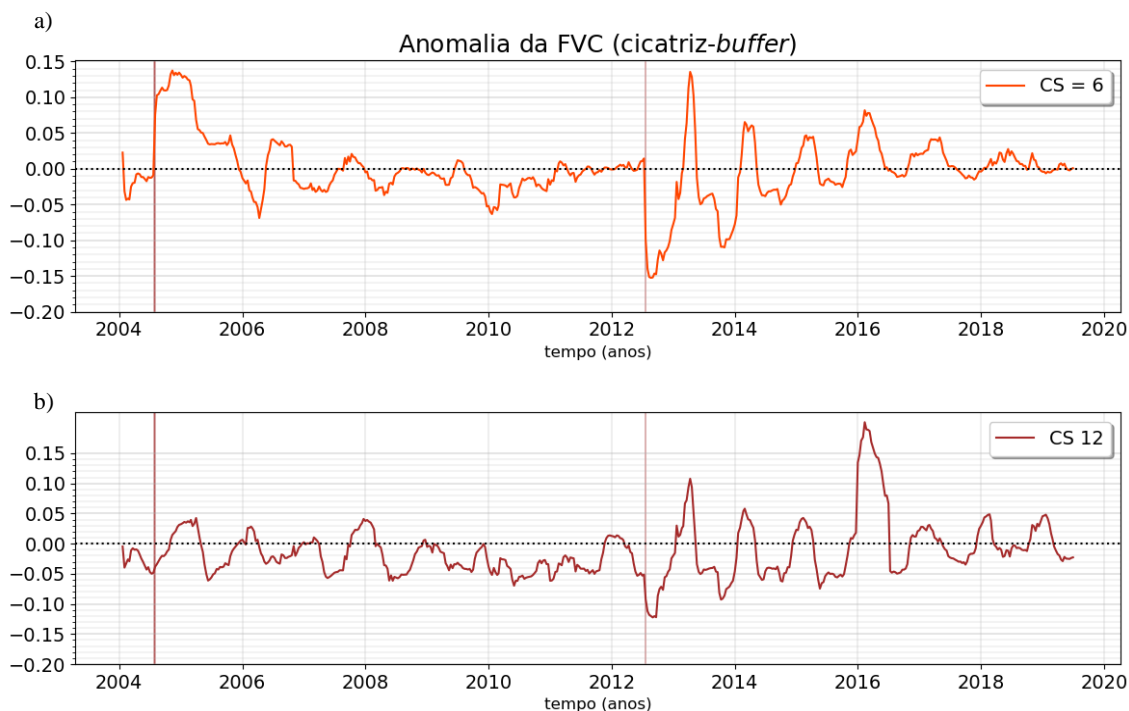


Figura 4.19 - a) Série temporal completa da anomalia de FVC (pixéis da cicatriz - buffer) para o incêndio de Catraia (janeiro 2012 a dezembro de 2014), para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde), com classe de cobertura de solo CS 6 e classe CS 12 (b). As barras a vermelho assinalam as datas dos incêndios: 26/07/2004 e 18/07/2012.

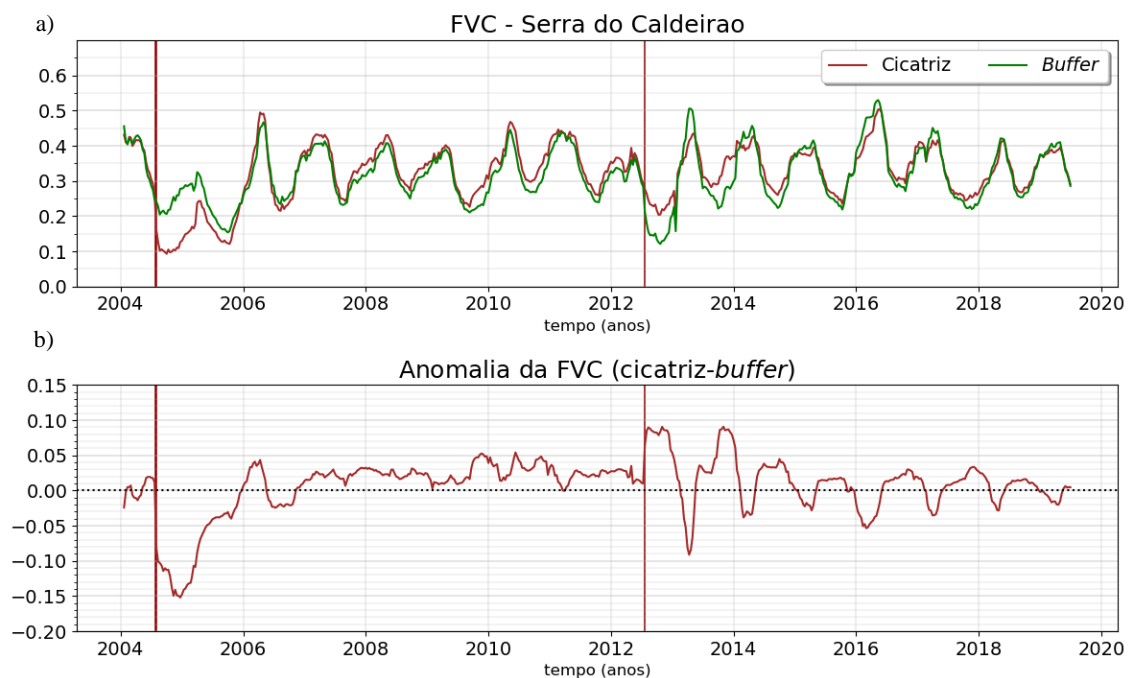


Figura 4.20 - a) Série temporal completa das medianas das décadas de FVC para o incêndio da Serra do Caldeirão (janeiro 2004 a junho de 2019) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). b) Série temporal da anomalia da FVC (pixéis da cicatriz - buffer), para o mesmo período. As barras a vermelho assinalam as datas dos incêndios: 26/07/2004 e 18/07/2012.

4.3.4 Anomalias de AL

A distribuição de valores de albedo no período janeiro 2009 – julho 2012 (i.e. pré-incêndio), para os dois tipos de cobertura de solo (Figura 4.21) mostra que existe uma diferença sistemática entre pixéis da cicatriz e *buffer*, tendo estes últimos maiores valores. Após o incêndio essa diferença aumenta. No entanto, em ambas as classes CS 6 e CS 12 e até ao início da estação húmida do ano de 2014, dá-se o caso inverso, isto é, o albedo dos pixéis da cicatriz torna-se superior em relação ao *buffer*.

O incêndio de Catraia é seguido do aumento da anomalia negativa de albedo na década seguinte ao evento (Figura 4.22), sendo este aumento visível em ambas as classes de cobertura de solo, embora a aumento no caso de CS 6 seja o dobro em relação aos pixéis com CS 12. Diminuindo gradualmente, a anomalia torna-se positiva e atinge o valor máximo na terceira década de julho de 2013 para os pixéis classificados como CS 6 (0,018) e na terceira década de setembro do mesmo ano, para a classe CS 12 (0,019).

A Figura 4.23 constitui mais uma evidência da ocorrência de dois incêndios nos pixéis do *buffer* classificados como mato fechado. Note-se a diferença entre as décadas anterior e posterior à barra vermelha no ano de 2004, onde a anomalia passa de -0,004 para 0,016 no caso de pixéis com CS 6 e de -0,010 para -0,002 para a cobertura de solo 12.

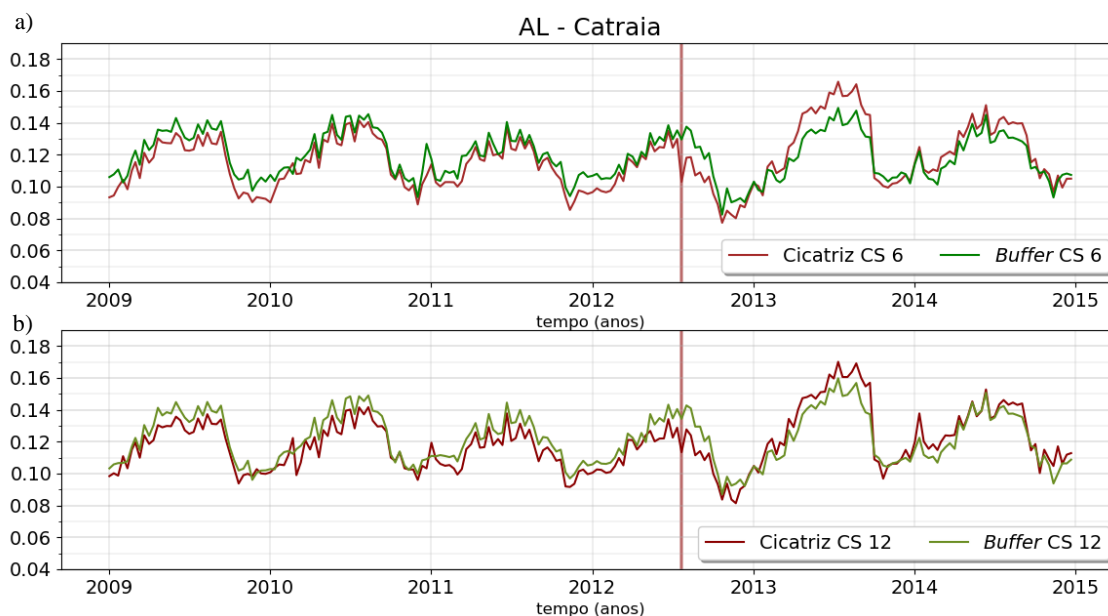


Figura 4.21 - a) Série temporal das medianas das décadas de AL para o incêndio de Catraia (janeiro 2009 a dezembro de 2014) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do *buffer* (a verde), com classe de cobertura de solo CS 6 (a) e classe CS 12 (b). As barras a vermelho assinalam a data do incêndio: 18/07/2012.

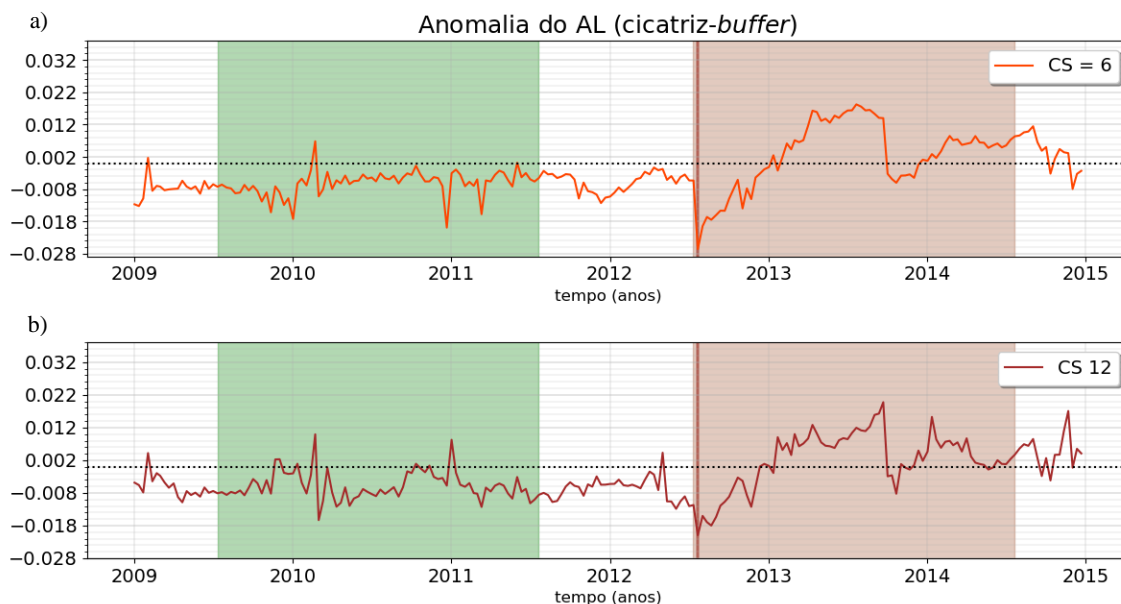


Figura 4.22 - a) Série temporal da anomalia de AL (pixéis da cicatriz - buffer) para o incêndio de Catraia (janeiro 2012 a dezembro de 2014) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde), com classe de cobertura de solo CS 6 e classe CS 12 (b). As barras a vermelho assinalam a data do incêndio: 18/07/2012.

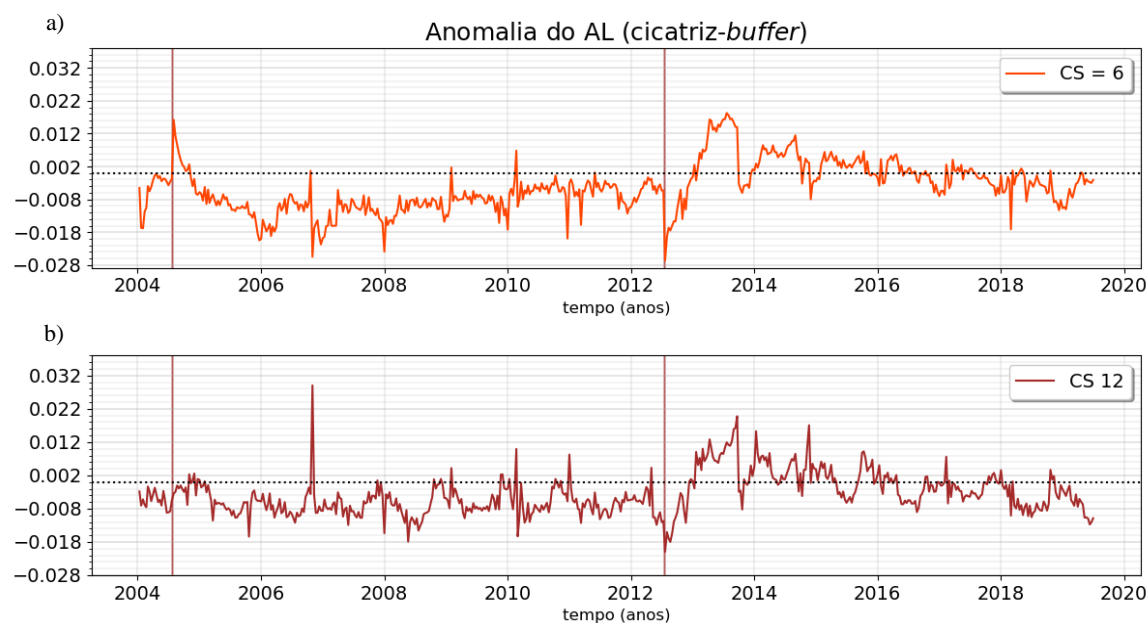


Figura 4.23 - a) Série temporal completa da anomalia de AL (pixéis da cicatriz - buffer) para o incêndio de Catraia (janeiro 2012 a dezembro de 2014), para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde), com classe de cobertura de solo CS 6 e classe CS 12 (b). As barras a vermelho assinalam as datas dos incêndios: 26/07/2004 e 18/07/2012.

O efeito dos dois incêndios ocorridos, que em 2012 afetaram pixéis pertencentes ao *buffer*, tem também assinatura na série temporal completa (Figura 4.24) do produto AL para o evento da Serra do Caldeirão. Ao olhar para o painel b) da mesma figura, observa-se um pequeno aumento abrupto da anomalia do albedo, em cerca de 0,006 na segunda década de julho de 2012. Mais notório é o aumento dos valores de albedo no *buffer*, que neste caso se traduz pela diminuição de 0,014 da anomalia, entre setembro de 2012 e agosto de 2013.

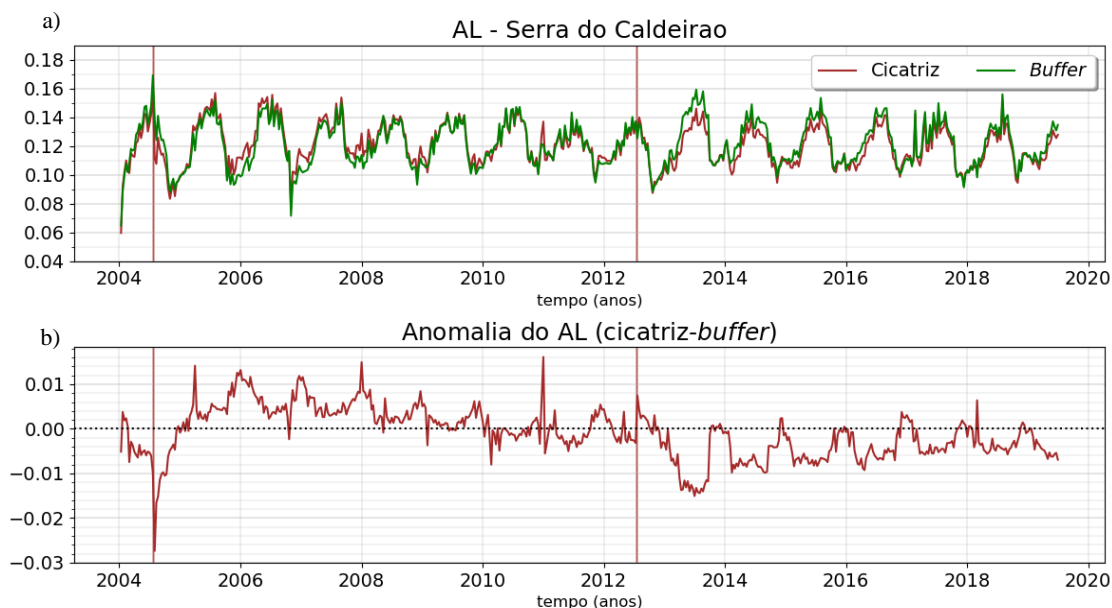


Figura 4.24 - a) Série temporal completa das medianas das décadas de AL para o incêndio da Serra do Caldeirão (janeiro 2004 a junho de 2019) para os pixels da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). b) Série temporal da anomalia de AL (pixels da cicatriz - buffer), para o mesmo período. As barras a vermelho assinalam as datas dos incêndios: 26/07/2004 e 18/07/2012.

4.4 Pedrógão Grande (2017)

4.4.1 Seleção dos pixels

O incêndio de Pedrógão Grande teve início no dia 17 de junho de 2017 e foi dado como extinto no dia 26 do mesmo mês. Afetou mais de seis concelhos (Castanheira de Pera, Figueiró dos Vinhos, Ansião, Alvaiázere, Penela e Sertão) e a área total ardida no incêndio foi de 30359 ha, sendo maioritariamente floresta de eucalipto e áreas de mato e pastagem (Comissão Técnica Independente, 2017). Nos pixels identificados como pertencentes à cicatriz (Figura 4.25), a fração de área ardida varia entre 0,09 e 1, existindo 22 pixels com valores superiores a 75%.

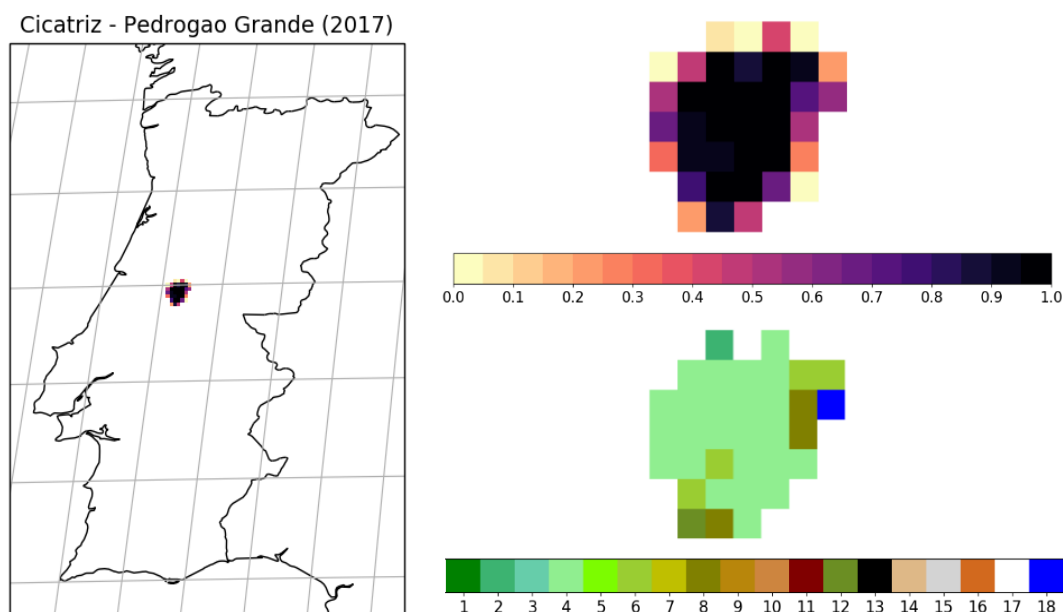


Figura 4.25 - Cicatriz do evento de incêndio de 2017 em Pedrógão Grande, e respetivos pormenores, com pixels preenchidos com a fração de pixel ardido (em cima) e cobertura de solo do IGBP (em baixo).

Na Figura 4.26 pode observar-se que, na sua maioria, os pixéis do *buffer* apresentam uma classe de cobertura de solo de florestas temperadas de folha caduca (CS 4). A correspondência entre os pixéis da cicatriz e do *buffer* com CS 4 e com a altitude a variar entre 200 e 500 m permite obter 12 pixéis para o caso da cicatriz e 11 para o *buffer*. Os pixéis que circundavam o lado direito foram excluídos da análise, tendo em conta que arderam em incêndios no mesmo ano, pertencendo, portanto, a outras cicatrizes.

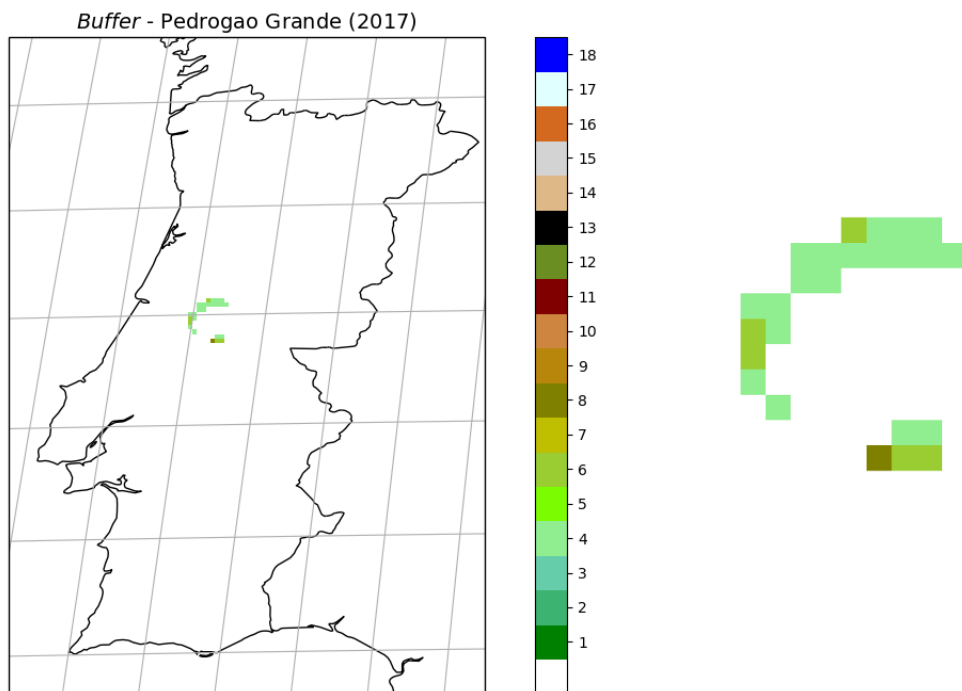


Figura 4.26 - Buffer espacial para a cicatriz do evento de incêndio de 2017 em Pedrogão Grande, com pixéis preenchidos com a classificação da cobertura de solo do IGBP.

4.4.2 Anomalias de LST

Para os pixéis identificados como parte do incêndio de Pedrogão Grande, as séries temporais de LST indicam que, apesar de uma frequente contaminação por nuvens, os pixéis da cicatriz e do *buffer* apresentam valores muito semelhantes no período pré-incêndio com diferenças pontuais entre 0 e 1,5°C (Figura 4.27). A anomalia térmica é evidente no momento posterior ao incêndio passando para valores na ordem de 10,5°C. Esta anomalia, apesar de diminuir para 3°C em janeiro de 2018, perdura com valores positivos até ao final da série temporal (junho de 2019).

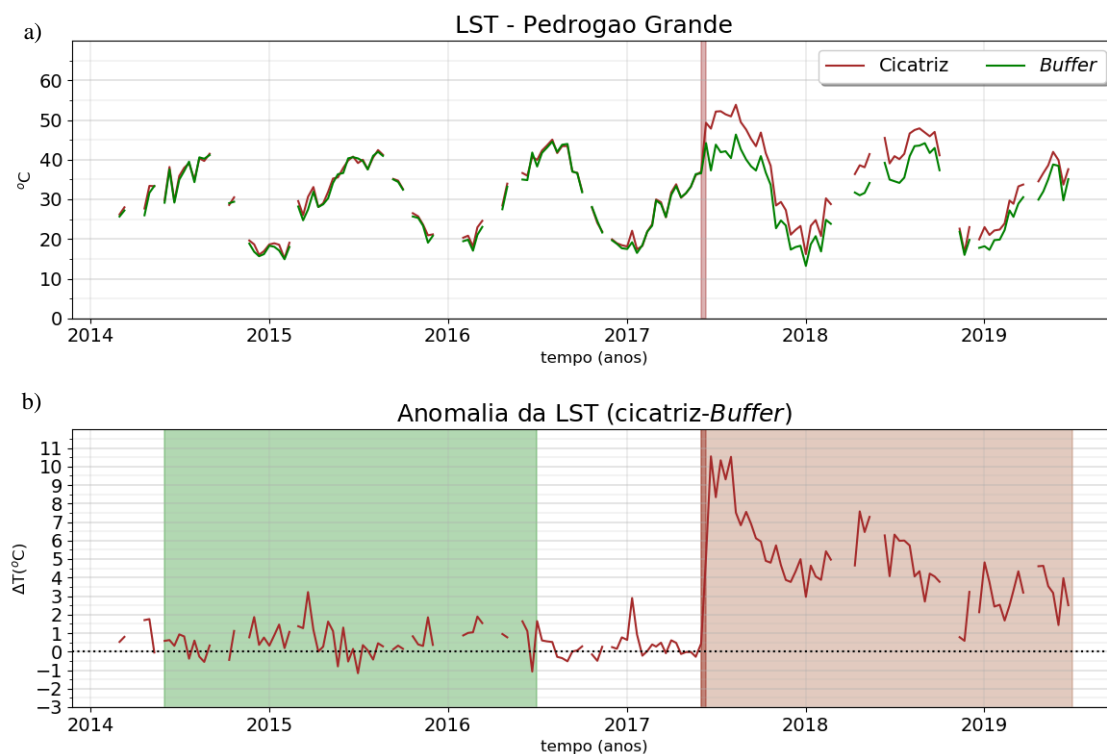


Figura 4.27 - a) Série temporal dos máximos das décadas da LST para o incêndio de Pedrógão Grande (janeiro 2014 a junho de 2019) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). b) Série temporal da anomalia da LST (pixéis da cicatriz - buffer) para o mesmo período. As zonas vermelha e verde correspondem à delimitação dos períodos com incêndio (15/06/2017 a 30/06/2019) e sem incêndio (15/06/2014 a 30/06/2016), respetivamente. As barras a vermelho assinalam a data do incêndio (15/06/2017).

4.4.3 Anomalias de FVC

A fração de cobertura de vegetação dos pixéis da cicatriz e do *buffer*, até à data do incêndio de Pedrógão Grande, varia entre 0,48 e 0,75, com um ciclo sazonal relativamente irregular, em especial nos pixéis da cicatriz (Figura 4.28). De notar que a anomalia apresenta um ciclo sazonal com valores de 0,05 no final da estação seca até -0,05 na estação húmida. Posteriormente à segunda década de junho de 2017, ambas as curvas sofrem um decréscimo, evidentemente mais acentuado nos pixéis da cicatriz. A anomalia decresce rapidamente de 0,05 para -0,30. Ao longo do período pós-incêndio, a anomalia cresce gradualmente até atingir valores próximos de zero no final da série.

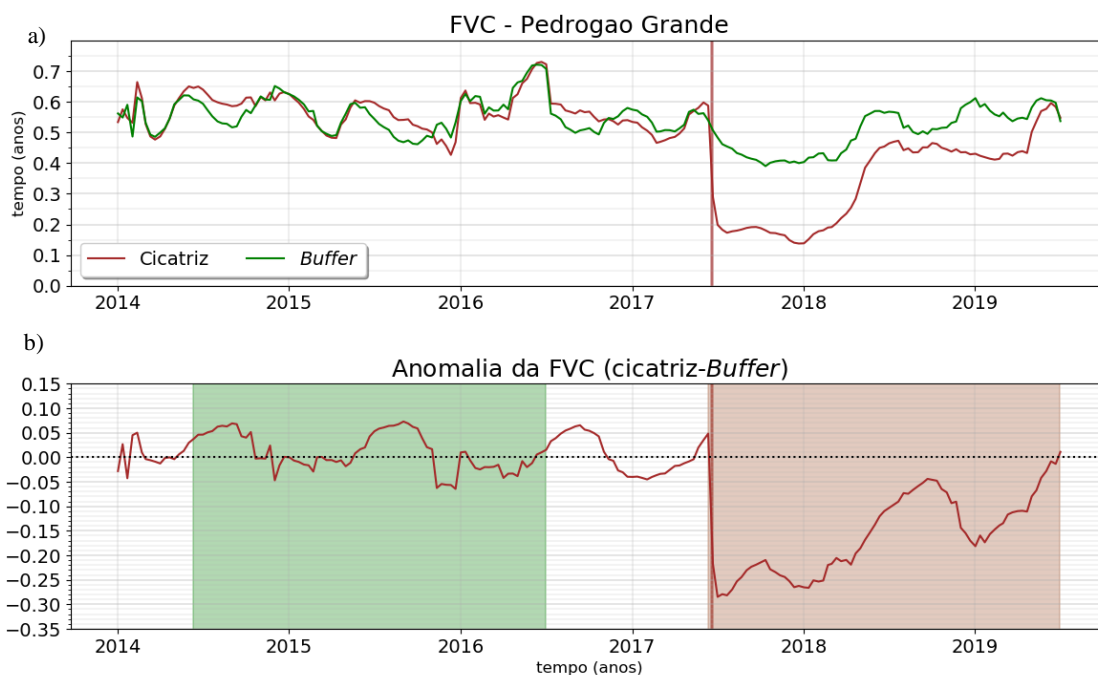


Figura 4.28 - a) Série temporal das medianas das décadas de FVC para o incêndio de Pedrógão Grande (janeiro 2014 a junho de 2019) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). b) Série temporal da anomalia de FVC (pixéis da cicatriz - buffer) para o mesmo período. As zonas vermelha e verde correspondem à delimitação dos períodos com incêndio (15/06/2017 a 30/06/2019) e sem incêndio (15/06/2014 a 30/06/2016), respetivamente. As barras a vermelho assinalam a data do incêndio (15/06/2017).

4.4.4 Anomalias de AL

No evento de incêndio de Pedrógão Grande também se observam diferenças de albedo entre pixéis da cicatriz e do *buffer* ao longo do tempo (Figura 4.29). No entanto, ao contrário dos restantes casos de estudo, essa diferença (com maiores valores no *buffer*) não reverte na estação seca no ano seguinte ao incêndio, diminuindo, no entanto, de magnitude entre julho de 2017 e agosto de 2018. A anomalia é negativa durante a maior parte da série temporal; a diminuição de 0,022 da anomalia na década que se segue ao incêndio e o rápido aumento até à segunda década de novembro de 2017. Observa-se até ao final da série um aumento gradual da anomalia da fração de albedo, sem chegar a tomar valores nulos ou positivos.

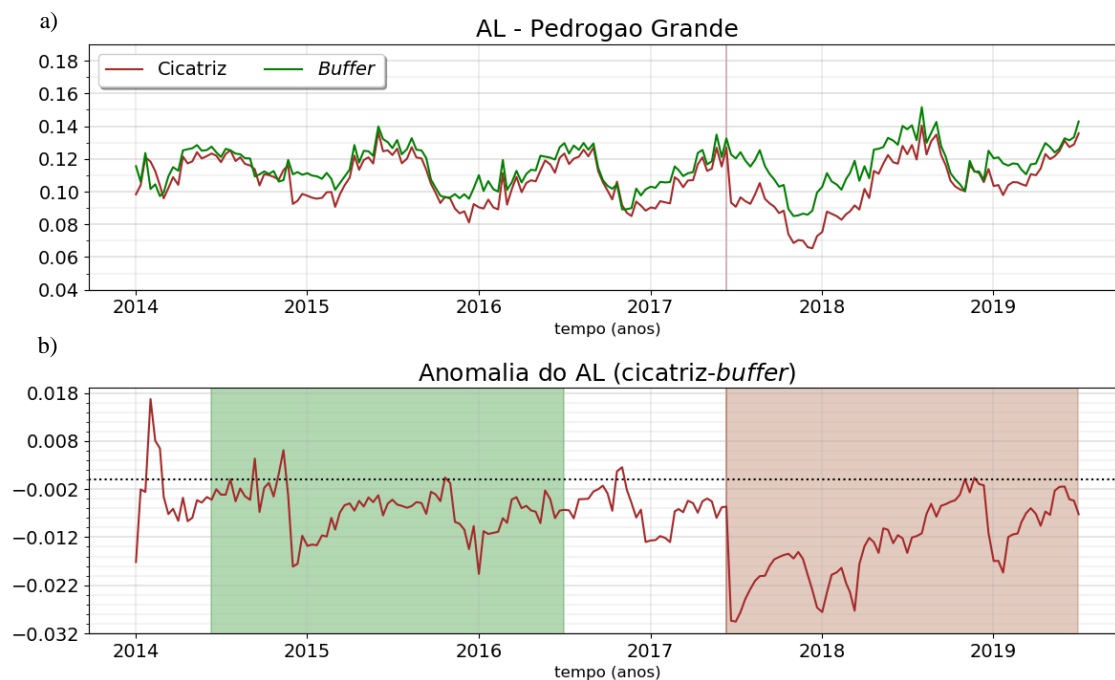


Figura 4.29 - a) Série temporal das medianas das décadas de AL, para o incêndio de Pedrogão Grande (janeiro 2014 a junho de 2019) para os pixels da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). b) Série temporal da anomalia de AL (pixels da cicatriz - buffer) para o mesmo período. As zonas vermelha e verde correspondem à delimitação dos períodos com incêndio (15/06/2017 a 30/06/2019) e sem incêndio (15/06/2014 a 30/06/2016), respetivamente. As barras a vermelho assinalam a data do incêndio (15/06/2017).

4.5 Pataias (2017)

4.5.1 Seleção dos pixels

O quinto e último evento de incêndio estudado ocorreu a 15/10/2017 em Pataias, concelho de Alcobaça, tendo ardido cerca de 18600 ha (Comissão Técnica Independente, 2018). Na Figura 4.30 encontra-se representada a cicatriz analisada, com percentagem de pixel ardido a variar entre 6 e 100%, sendo que 11 pixels têm uma percentagem superior a 75%. A percentagem de área ardida por ocupação de solo foi maior no espaço florestal, mais concretamente na floresta de pinheiro-bravo, com 99,3% (Comissão Técnica Independente, 2018). Tal vai de encontro à classificação dos pixels pertencentes à cicatriz e ao *buffer* (ver Figura 4.31), cuja classe predominante é a 4: floresta temperada de folha caduca.

Limitando as características dos pixels da cicatriz e do *buffer* a: classe de ocupação de solo CS4 e altitude menor do que 300 metros, obtiveram-se 10 pixels para o primeiro caso e 13 para o segundo.

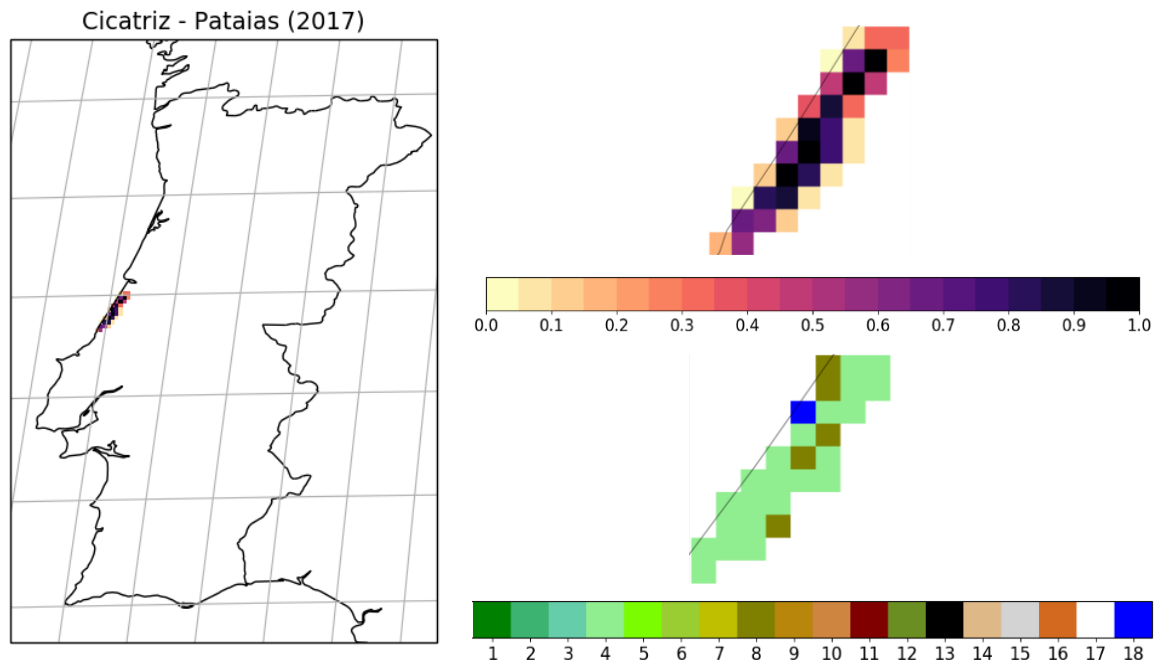


Figura 4.30 - Cicatriz do evento de incêndio de 2017 em Pataias, com pixéis preenchidos com a fração de pixel ardido (em cima) e cobertura de solo do IGBP (em baixo)

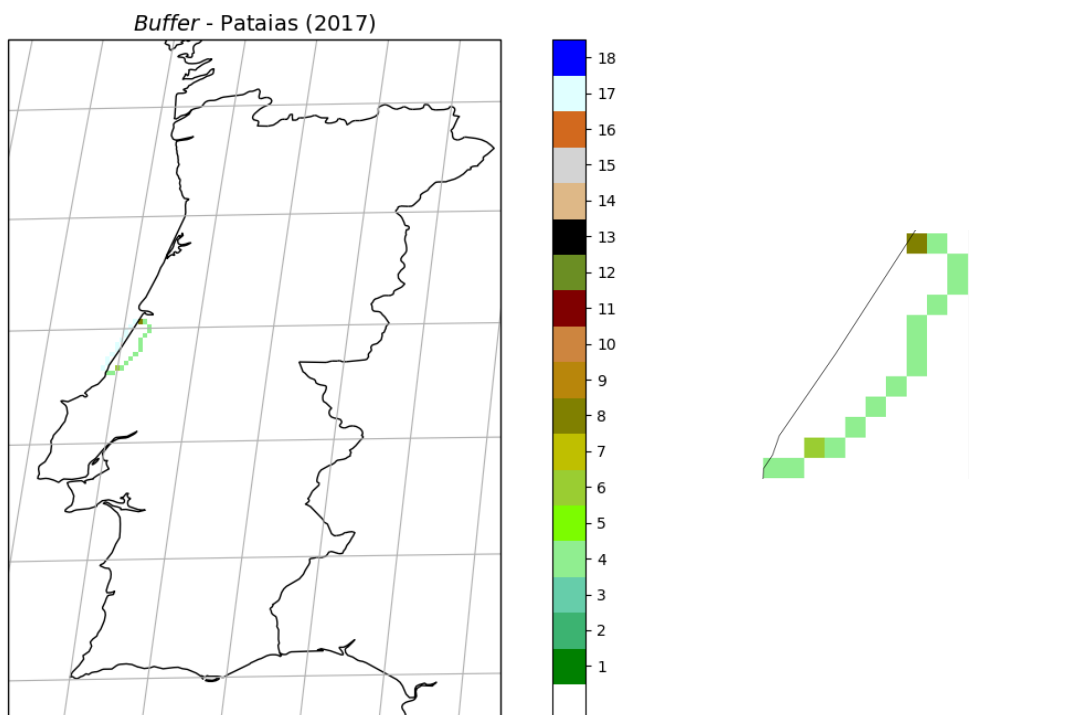


Figura 4.31 - Buffer espacial para a cicatriz do evento de incêndio de 2017 em Pataias, com pixéis preenchidos com a classificação da cobertura de solo do IGBP.

4.5.2 Anomalias de LST

No caso de Pataias, apesar de ocorrer um aumento de cerca de 4°C na anomalia de LST (Figura 4.32) imediatamente a seguir ao incêndio (outubro 2017), o pico de anomalia térmica, de 8,5°C, ocorre em julho de 2018. Tal como no caso de Pedrógão Grande, a anomalia é sistematicamente positiva até ao final da série temporal.

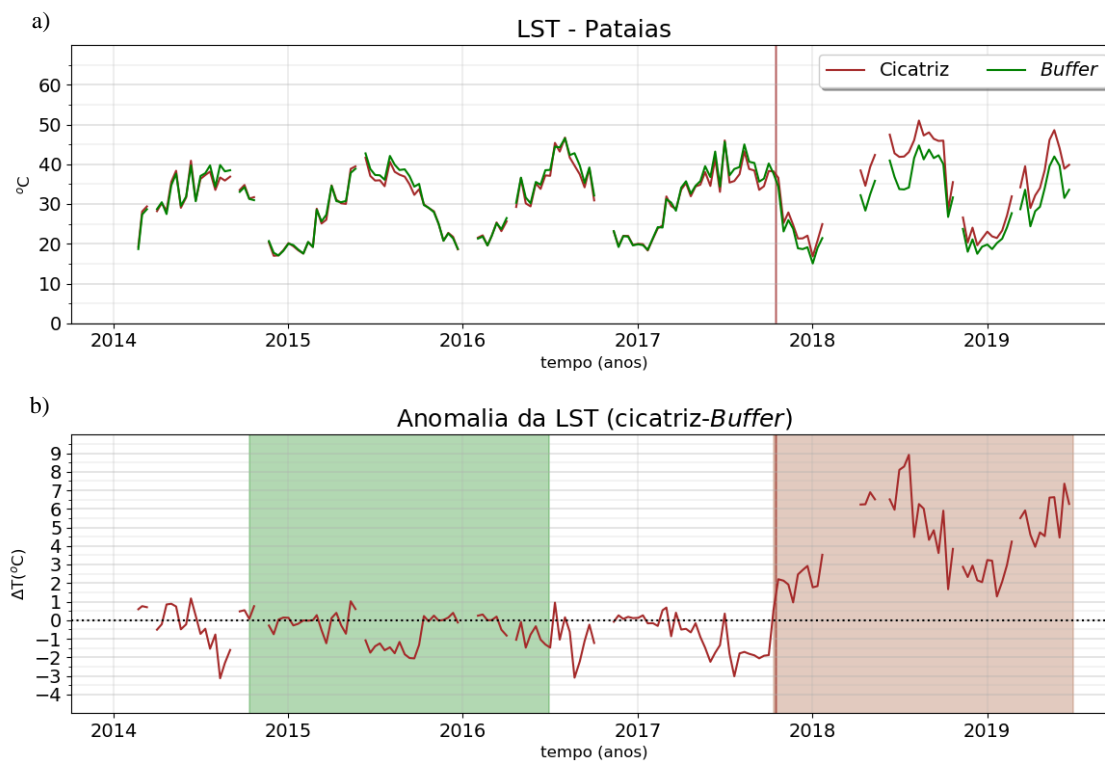


Figura 4.32 - a) Série temporal dos máximos das décadas da LST para o incêndio Pataias (janeiro 2014 a junho de 2019) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). b) Série temporal da anomalia da LST (pixéis da cicatriz - buffer) para o mesmo período. As zonas vermelha e verde correspondem à delimitação dos períodos com incêndio (15/10/2017 a 30/06/2019) e sem incêndio (15/10/2014 a 30/06/2016), respetivamente. As barras a vermelho assinalam a data do incêndio (15/10/2017).

4.5.3 Anomalias de FVC

Entre todos os casos de estudo, Pataias revela a maior diferença de valores de FVC entre a cicatriz e o *buffer* no período anterior ao incêndio, variando entre -0,12 e -0,02 e atingindo 0,02 na segunda década de setembro de 2015 (Figura 4.33). Após o incêndio esta diferença aumenta significativamente, atingindo valores da ordem de -0,3 na segunda década de abril de 2018, permanecendo negativa até ao final da série.

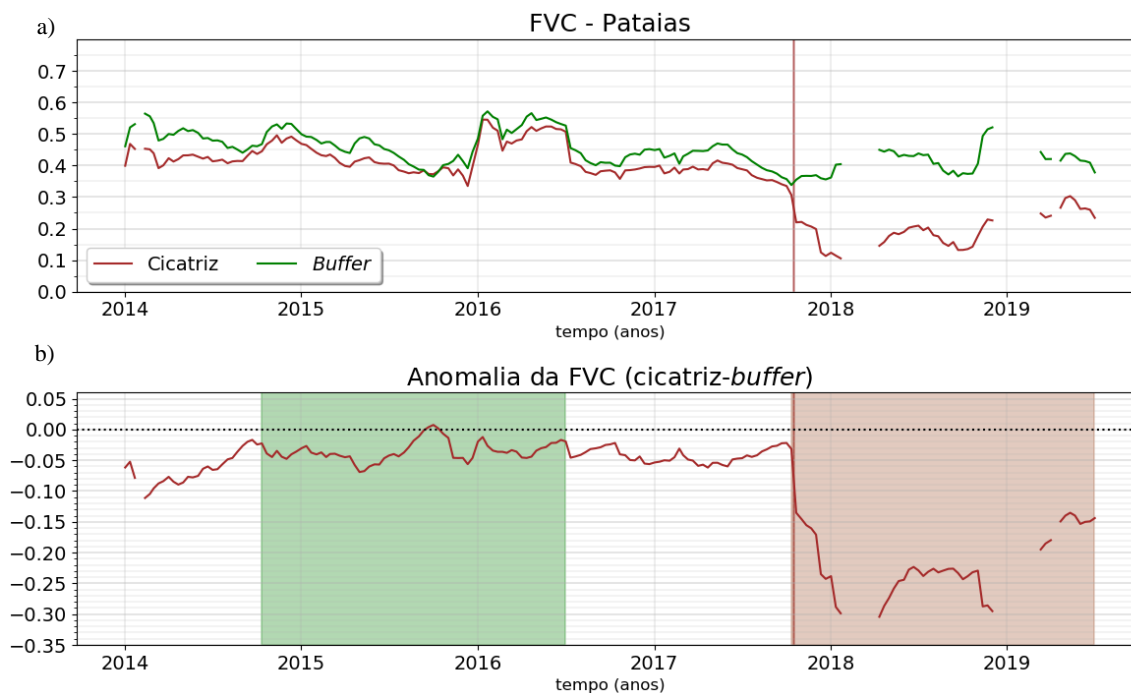


Figura 4.33 - a) Série temporal das medianas das décadas de FVC para o incêndio de Pataias (janeiro 2014 a junho de 2019) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). b) Série temporal da anomalia de FVC (pixéis da cicatriz - buffer) para o mesmo período. As zonas vermelha e verde correspondem à delimitação dos períodos com incêndio (15/10/2017 a 30/06/2019) e sem incêndio (15/10/2014 a 30/06/2016), respetivamente. As barras a vermelho assinalam a data do incêndio (15/10/2017).

4.5.4 Anomalias de AL

Finalmente, a análise do albedo para Pataias confirma o que sucede nos restantes casos de estudo (Figura 4.34). A série temporal mostra que tal, como no FVC, existe uma diferença sistemática de valores de albedo entre pixéis da cicatriz e *buffer* até ao momento do incêndio, oscilando entre -0,01 e 0,02. Após o incêndio, a magnitude dessa diferença aumenta até ao início de 2018. A anomalia diminui então progressivamente de magnitude até à década de 1 de junho de 2018, seguindo-se um novo aumento de magnitude até ao final da estação seca.

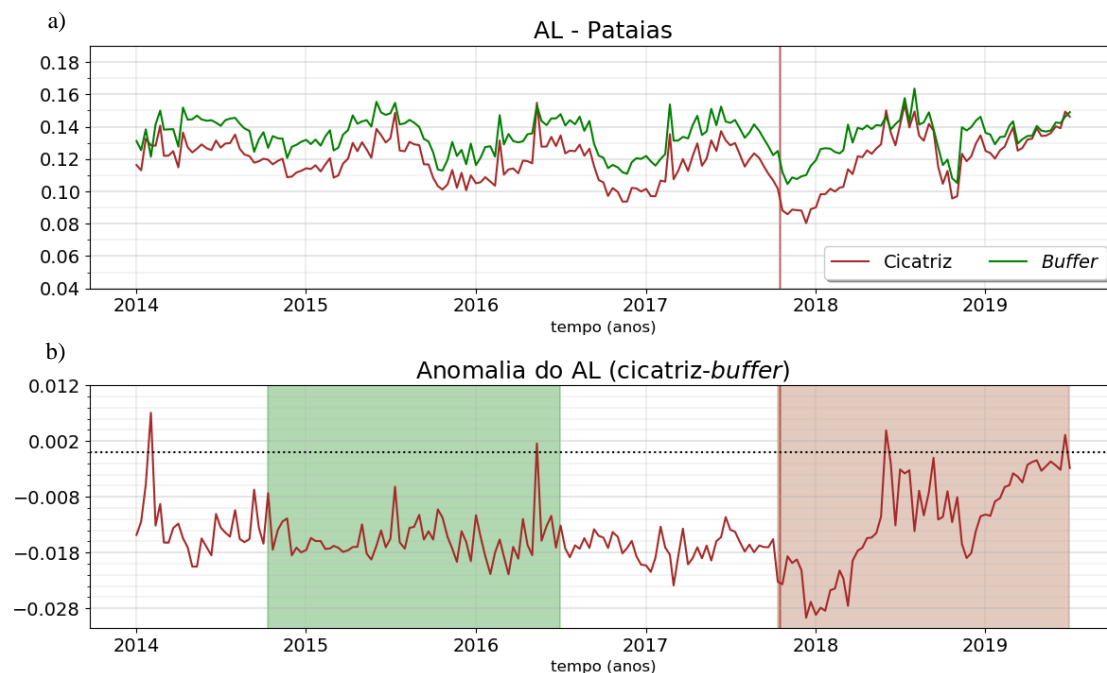


Figura 4.34 - a) Série temporal das medianas das décadas de AL, para o incêndio de Pataias (janeiro 2014 a junho de 2019) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). b) Série temporal da anomalia de AL (pixéis da cicatriz - buffer) para o mesmo período. As zonas vermelha e verde correspondem à delimitação dos períodos com incêndio (15/10/2017 a 30/06/2019), e sem incêndio (15/10/2014 a 30/06/2016), respetivamente. As barras a vermelho assinalam a data do incêndio (15/10/2017).

4.6 Síntese dos resultados por produto (LST, FVC e AL)

O *boxplot* é uma ferramenta de análise estatística onde se representam medidas de tendência central não-paramétrica (mediana), de dispersão (quartis) e de forma de distribuição ou simetria da amostra (valores pontuais mínimo e máximo), bem como valores atípicos (*outliers*) e extremos (Neto *et al.*, 2017).

Com o intuito de sintetizar os resultados de cada produto e comparar entre eventos em termos de períodos com pixéis ardidos e não ardidos, construíram-se *boxplot* das anomalias de LST, FVC e AL. Estes períodos encontram-se delimitados a cores verde (sem incêndio) e vermelho (pós-incêndio) nas figuras relativas às anomalias dos produtos (ver secções 4.1 a 4.5). Para os casos de estudo da Serra do Caldeirão e Arrifana apenas se representaram os períodos sem incêndio posteriores às datas dos eventos devido à falta de dados anteriores a 2004. No caso de Pataias, devido à ocorrência mais recente do incêndio (outubro de 2017), os períodos sem incêndio e pós-incêndio considerados são mais curtos do que nos restantes casos de estudo (1 ano e 8 meses ao invés de 2 anos).

4.6.1 Síntese de resultados para a LST

No que respeita à LST, os *boxplots* da anomalia térmica [$\Delta T(^{\circ}C)$] dispõem-se na Figura 4.35. Para cada incêndio (identificado na parte superior) encontram-se representados dois *boxplot*: os *boxplot* em tons de verde referem-se aos períodos sem incêndio e os vermelhos a períodos com incêndio. Na parte inferior da figura encontram-se as classes de classificação de cobertura de solo (florestas temperadas de folha caduca – CS 4; mato fechado – CS 6; zonas agrícolas – CS 12).

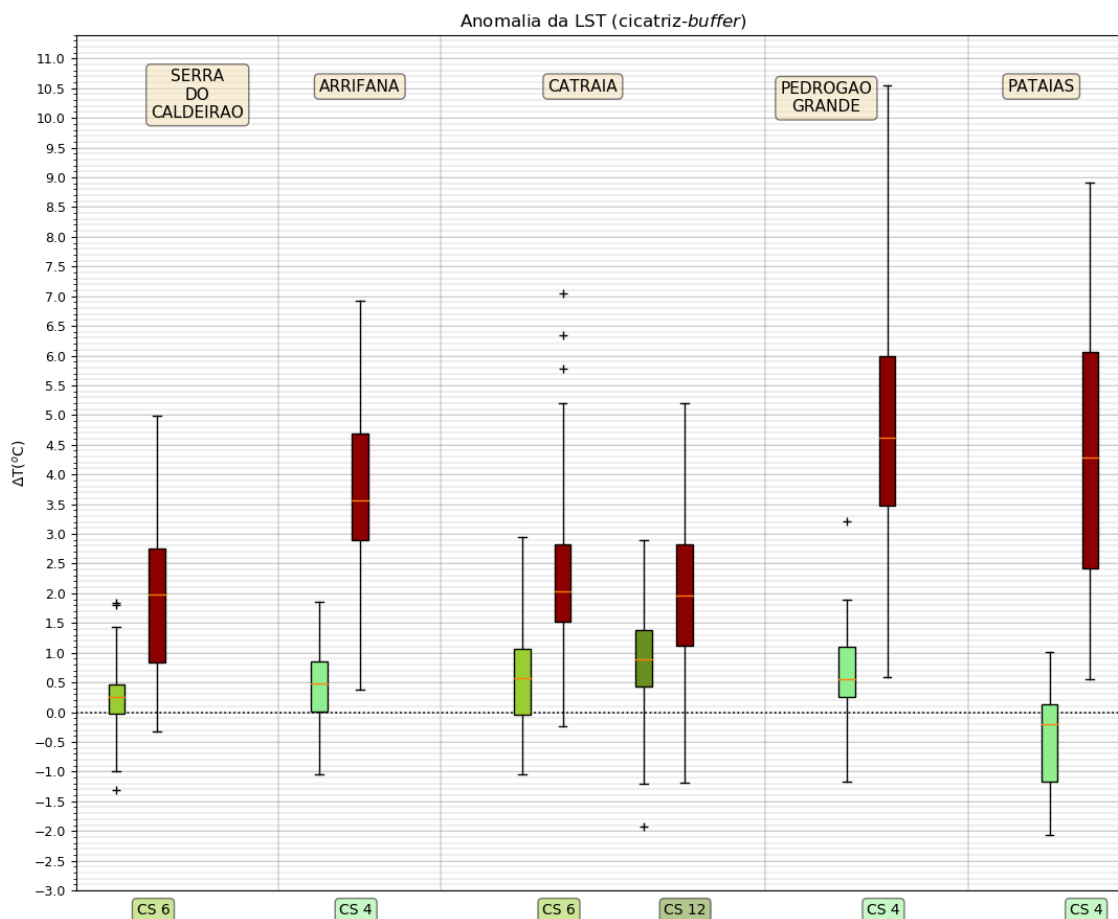


Figura 4.35 - Boxplot da distribuição dos valores de anomalia de LST, para os períodos sem incêndio (a tons de verde) e com incêndio (a vermelho), para os eventos de incêndio identificados – Serra do Caldeirão, Arrifana, Catraia, Pedrogão Grande e Pataias. Na base da figura encontra-se a identificação da classe de cobertura de solo (CS) para cada par.

Pode observar-se na Figura 4.35 que, para o evento da Serra do Caldeirão, no período considerado sem incêndio, a mediana da anomalia térmica é de $0,3^{\circ}\text{C}$, com um intervalo interquartil (IIQ) de $0,5^{\circ}\text{C}$. No entanto, em condições de incêndio, tomam valores de $2,0^{\circ}\text{C}$ e $1,9^{\circ}\text{C}$, respetivamente. No caso do incêndio de Arrifana, as medianas são de $0,5$ e $3,6^{\circ}\text{C}$ para os períodos sem e com incêndio, respetivamente, e IIQ de $0,9^{\circ}\text{C}$ e $1,8^{\circ}\text{C}$. Para o evento de Catraia, e tendo em atenção os dois tipos de classes de cobertura de solo analisados, os pixéis com CS 12 apresentam maior mediana de anomalia térmica ($0,9^{\circ}\text{C}$) em relação à CS 6 ($0,6^{\circ}\text{C}$), no período anterior ao incêndio. Para os períodos após o incêndio, a dispersão dos valores de anomalia para a CS 12 é maior em relação ao caso de CS 6 (IIQ de $1,7$ vs. $1,3^{\circ}\text{C}$). Quanto às medianas, ambas as classes tomam o valor de $2,0^{\circ}\text{C}$. Relativamente a Pedrogão Grande, que apresenta maior variação na distribuição de valores entre todos os eventos, a diferença entre as medianas dos períodos em condições sem e com incêndio é de $4,0^{\circ}\text{C}$ ($0,6^{\circ}\text{C}$ vs $4,6^{\circ}\text{C}$). Por sua vez, o evento de Pataias apresenta uma mediana de $-0,2^{\circ}\text{C}$ no período anterior à ocorrência do incêndio e de $4,3^{\circ}\text{C}$ após o mesmo, sendo por isso o caso com maior diferença de anomalia térmica em condições anteriores e posteriores ao evento.

4.6.2 Síntese de resultados para a FVC

As distribuições das anomalias de FVC para todos os eventos encontram-se representadas na Figura 4.36, estando também separadas para condições de incêndio (a vermelho) e sem incêndio (a verde).

Para condições sem incêndio a mediana da anomalia é de 0,02 no evento da Serra do Caldeirão, 0,05 em Arrifana e 0,00 em Pedrógão Grande. No caso de Catraia para o tipo de vegetação CS 6 a mediana é negativa (-0,02). Na classe CS 12 e no caso de Pataias, ambas as medianas no período pré-incêndio tomam o valor de -0,04.

As medianas da anomalia de FVC mudam substancialmente em condições de incêndio. Por ordem cronológica dos eventos (lendo o *boxplot* da esquerda para a direita), estas são de: -0,04; -0,12; -0,04; -0,04; -0,16 e -0,23 (maior valor absoluto).

A dispersão dos valores em condições de incêndio, traduzida pela IIQ, é maior no caso de Pedrógão Grande (0,134), seguindo-se, por ordem decrescente, Arrifana (0,10), Catraia CS 6 (0,10), Serra do Caldeirão (0,09); Catraia CS 12 (0,08) e Pataias (0,08). Para condições sem incêndio estes indicadores tomavam os valores 0,06; 0,03; 0,02; 0,01; 0,02; e 0,02, respetivamente. No que diz respeito às medianas com e sem incêndio, Pataias constitui o caso de estudo que apresenta maior diferença entre as mesmas (0,19).

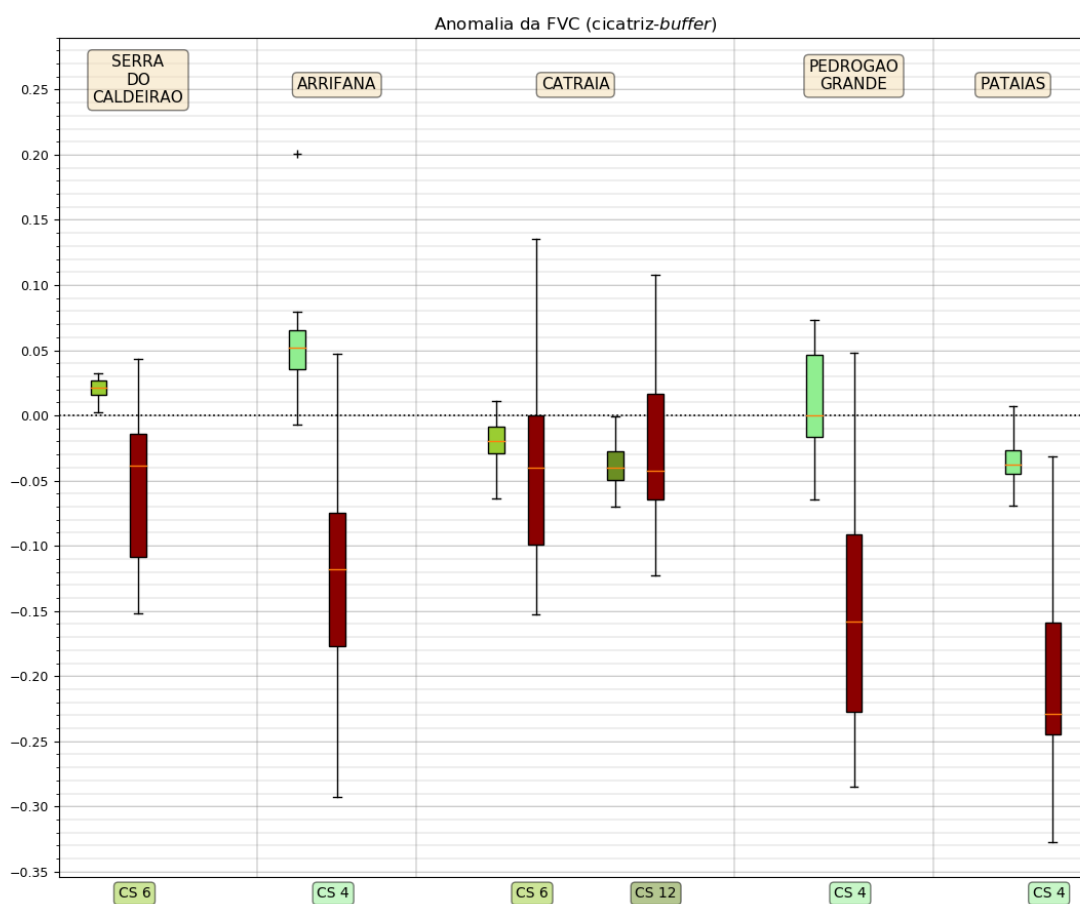


Figura 4.36 - Boxplot da distribuição dos valores de anomalia de FVC, para os períodos sem incêndio (a tons de verde) e com incêndio (a vermelho), para os eventos de incêndio identificados – Serra do Caldeirão, Arrifana, Catraia, Pedrógão Grande e Pataias. Na base da figura encontra-se a identificação da classe de cobertura de solo (CS) para cada par.

4.6.3 Síntese de resultados para o AL

Relativamente ao AL, os *boxplot* representados na Figura 4.37 mostram que a mediana da anomalia em Arrifana, em condições sem incêndio, é a que mais se aproxima de 0 com valor de cerca de -0.001. Seguem-se os eventos da Serra do Caldeirão (0,003), Pedrógão Grande (-0,006), Catraia com CS 6 (-0,006), Catraia com CS 12 (-0,007) e, finalmente, Pataias com a menor

mediana: -0,016. Note-se a presença de um maior número de *outliers* relativamente ao que foi observado na LST e na FVC, em todos os casos exceto em Pedrógão Grande.

No que se refere aos períodos com incêndio, as medianas são positivas para os incêndios da Serra do Caldeirão (0,004) e de Catraia, para ambas as classes de cobertura de solo (0,005 para CS 6 e 0,003 para CS 12). Os restantes – Arrifana, Pedrógão Grande e Pataias – tomam valores negativos: -0,003; -0,012 e -0,012, respetivamente para cada evento.

A dispersão dos dados para períodos de incendio é maior no caso de Pataias, cujo intervalo interquartil (IIQ) é de 0,015. Por ordem decrescente, vêm as IIQ de Arrifana (0,014), Catraia com CS 6 (0,012), Catraia com CS 12 (0,009) e Serra do Caldeirão (0,007).

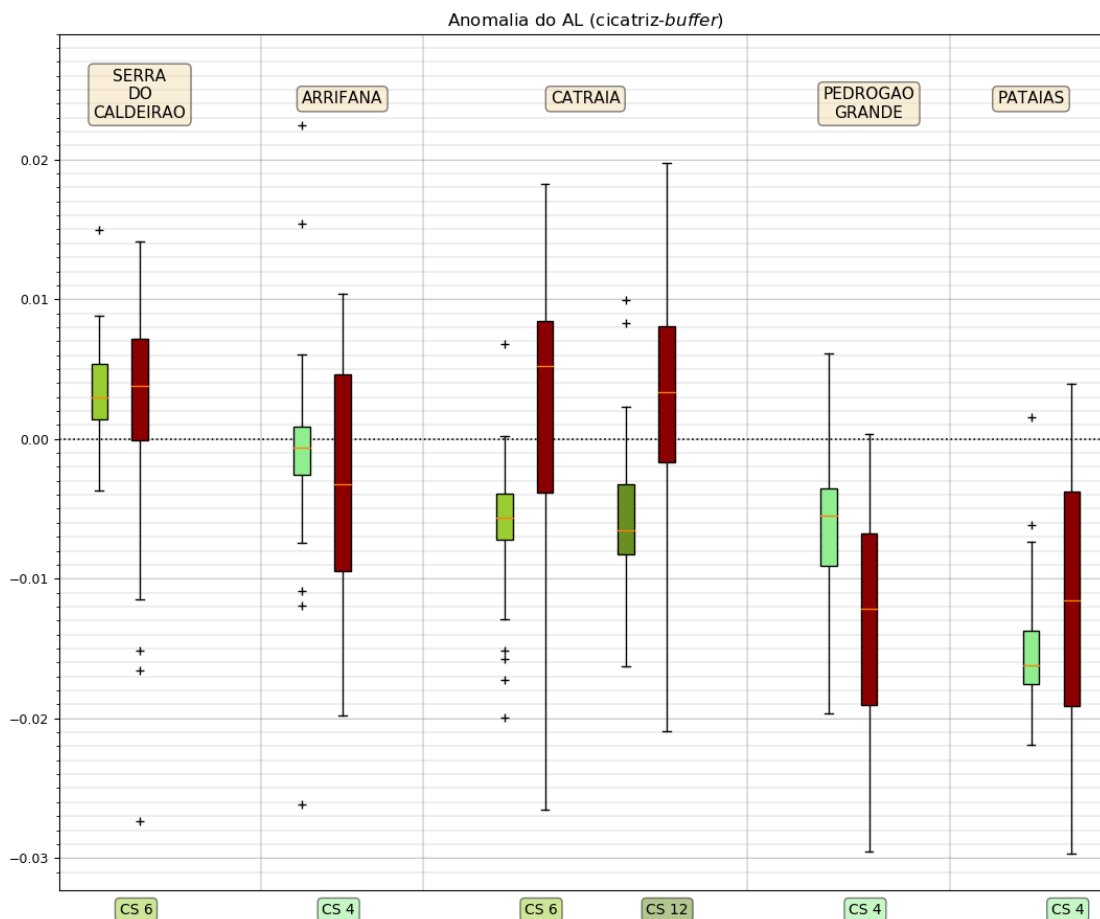


Figura 4.37 - Boxplot da distribuição dos valores de anomalia de AL, para os períodos sem incêndio (a tons de verde) e com incêndio (a vermelho), para os eventos de incêndio identificados – Serra do Caldeirão, Arrifana, Catraia, Pedrógão Grande e Pataias. Na base da figura encontra-se a identificação da classe de cobertura de solo (CS) para cada par.

5 Discussão

De entre os 5 casos de estudo, e no que respeita à área ardida, o incêndio de Pedrógão Grande (2017) apresenta o maior valor (30359 ha), sendo o menor valor o de Arrifana (2005), com 8142 ha. Seguem-se, por ordem decrescente, os eventos de Catraia (2012), Serra do Caldeirão (2004) e Pataias (2017). A cicatriz com maior número de pixéis ardidos em percentagem superior a 75% é a da Serra do Caldeirão, com 15 pixéis e a menor a do evento de Arrifana, com 2 pixéis (sendo por isso os resultados menos robustos para este último caso).

No que diz respeito aos *buffers* espaciais, analisaram-se 6 pixéis no incêndio de Catraia para a classe de cobertura de CS 12 (menor número) e 13 no caso de Pataias (maior número). Quanto às diferenças entre número de pixéis de cicatriz e *buffer* utilizados na análise de cada evento, os valores variaram desde 1 pixel no caso de Pedrógão Grande até 8 pixéis no caso de Arrifana (2 de cicatriz e 10 de *buffer*).

O limiar máximo da diferença de altitude foi de 300 m para todas as cicatrizes e *buffers*. No entanto, o incêndio rural da Serra do Caldeirão (justamente por se tratar de uma Serra) apresentou maior altitude, com valores a variar entre 600 e 300 m. Já os pixéis selecionados para o incêndio de Pataias variaram entre o nível médio do mar e 300 metros.

Nos casos de estudo escolhidos, o tipo de cobertura de solo predominante pertence à classe de floresta temperada de folha caduca, CS 4, que foi analisado nos incêndios de Arrifana, Pedrógão Grande e Pataias. Tal é congruente com o facto das 3 cicatrizes se localizarem no centro do país, e, por conseguinte, serem povoadas com espécies de folhagem caduca típicas da Europa Ocidental (clima temperado) (Brito, 1997).

Nas regiões da Serra do Caldeirão e Catraia dominam espécies de folha persistente e xerófitas (Brito, 1997), tendo-se selecionado pixéis com CS 6 (mato fechado) e CS 12 (zonas agrícolas).

Para todas as séries temporais, o comportamento dos valores máximos de LST é marcado pela sazonalidade da temperatura da superfície do solo, observando-se os maiores valores nas décadas dos meses de verão e menores no inverno, com transições nas estações de outono e primavera (Khorchani *et al.*, 2018). As anomalias da LST antes do incêndio rondam 0,0°C (isto é, os valores do produto dos pixéis da cicatriz e *buffer* são próximos), tornando-se positivas ou com maiores valores após o evento e apresentando picos nas décadas imediatamente posteriores ao incêndio. Tal é congruente com o estudo de Veraverbeke *et al.* (2012) que refere que os valores de LST aumentam logo a seguir a um incêndio, efeito que perdura até às estações de outono/inverno, observando-se então uma diminuição nos valores devido à ocorrência de chuva. Este fenómeno é visível nas séries temporais das anomalias, traduzido pela baixa da anomalia térmica nas décadas dos meses de outubro/novembro seguintes aos incêndios. A única exceção observa-se no evento de Pataias, onde o pico de anomalia térmica ocorre mais tarde, já no verão seguinte; por um lado o incêndio ocorre no início da estação de outono, quando as temperaturas da superfície do solo são inferiores, e, por outro, no verão que sucede ao incêndio ocorre um aumento síncrono dos fluxos de calor sensível e do solo, devido à falta de vegetação (Wendt *et al.*, 2007).

Ao observar as séries temporais completas dos incêndios da Serra do Caldeirão e Catraia (no caso da classe 6 de cobertura do solo – zonas de mato fechado) observa-se um pico de anomalia negativa em 2012 e 2004, respetivamente para cada caso, tendo em conta que os mesmos pixéis, que arderam em momentos diferentes, pertencem ao *buffer*.

Nos casos de estudo, a perturbação nos valores de LST (traduzida pela anomalia positiva) parece persistir aproximadamente entre 2 a 4 anos, sendo que a anomalia estabiliza (aproxima-se

de 0,0°C) mais tardiamente no caso de Arrifana, ocorrendo apenas 6 anos depois do incêndio (ver série temporal completa na Figura 8.2.1 do Anexo 8.2). Esta estabilização é evidenciada por Veraverbeke *et al.* (2012), que já havia observado que a anomalia positiva da LST após o incêndio tende a diminuir com o passar do tempo. Para os incêndios de Pedrógão Grande e Pataias não é possível fazer esse tipo de análise, visto que o período pós-incêndio decorrido é de apenas 2 anos e 1 ano e 8 meses respectivamente, não existindo ainda informação suficiente.

Para a Serra do Caldeirão (2004) e Arrifana (2005), os períodos de análise sem incêndio dos 3 produtos restringiram-se aos anos posteriores aos eventos, dado que as séries de dados têm o seu início em janeiro de 2004. Já no caso dos incêndios de 2017 (Pedrógão Grande e Pataias), a análise ficou restringida ao período pré-incêndio.

Em termos de anomalia em condições pré-incêndio, o maior valor (mediana de 0,9°C) pertence ao evento de Catraia, com classe de cobertura de solo 12 (zonas agrícolas) e o menor (mediana de -0,2°C) a Pataias, sendo este último caso o único que apresenta mais valores com anomalia negativa ao longo do tempo, visto que os pixels pertencentes à cicatriz se encontram junto à costa e, portanto, apresentam menores valores de LST em relação os pixels do buffer (Tarawally *et al.*, 2018).

Por sua vez, em condições de pós-incêndio, a mediana da anomalia térmica é maior comparando com períodos pré-incêndio. Destaca-se o evento de Pataias com maior diferença de valores de mediana de anomalia térmica entre os dois períodos (4,3°C), seguindo-se Pedrógão Grande (4,0°C) e Arrifana (3,1°C). É possível então concluir que os incêndios com classe de cobertura 4 (floresta temperada de folha caduca) apresentam maiores valores de anomalia térmica e também maior diferença entre condições de ardido e não ardido.

No que respeita ao produto FVC observa-se que as áreas correspondentes aos casos de estudo de Arrifana, Pedrógão Grande e Pataias apresentam maiores frações de vegetação verde em relação aos restantes casos (Serra do Caldeirão e Catraia) – cf. séries temporais completas do produto FVC (Anexos 8.2 a 8.5). Ao longo da série, os valores de FVC em Arrifana, Pedrógão Grande e Pataias variam entre 0,4 e 0,8, enquanto que na Serra do Caldeirão e Catraia tomam valores entre 0,1 e 0,55.

Tal como no caso da LST, existe uma periodicidade nos valores de FVC. Nos eventos da Serra do Caldeirão e Catraia (para os dois tipos de cobertura de solo), surgem dois picos, um máximo nos meses de primavera e um mínimo nos meses de outono. No entanto, os restantes casos caracterizados por uma vegetação de floresta temperada de folha caduca – Arrifana, Pedrógão Grande e Pataias - apresentam menores diferenças de fração de vegetação verde e ciclos não tão bem definidos, revelando cerca de dois máximos e mínimos por ano. Este comportamento é congruente com o estudo de Camacho-De Coca *et al.* (2004), que mostram que a cobertura de vegetação lenhosa, como a floresta de pinheiros, apresenta pequena variabilidade interanual e arbustos esparsos e gramíneas sazonais apresentaram maior variabilidade interanual na cobertura do solo.

Relativamente aos pixels da cicatriz e *buffer*, existe uma diferença de valores de FVC em todos os casos de estudo, sendo as diferenças mais notórias no caso de Pataias, onde a anomalia toma valores negativos, mas sendo também visíveis nos eventos de Pedrógão Grande e Arrifana e, em menor grau, na Serra do Caldeirão e Catraia. Esta diferença pode ser explicada pela menor resolução espacial do pixel do SEVIRI e, por conseguinte, o tipo de cobertura de solo é mais homogêneo, quando comparado com resoluções espaciais maiores, como é o caso do projeto *Climate Change Initiative Land Cover* (CCI-LC – ESA, 2017).

Os mapas globais do projeto CCI-LC, pertencente à *European Space Agency* (ESA), fornecem informação acerca da cobertura do solo anual entre 1992 e 2015, com uma resolução

espacial de 300 metros. Ao utilizar a ferramenta *online* do projeto (Figuras 5.1 e 5.2), observa-se que as áreas das cicatrizes de incêndio e buffer têm uma composição de cobertura de solo mais diversificada do que a utilizada neste estudo, classificada apenas com um tipo de cobertura. A heterogeneidade de tipos de cobertura de solo é mais visível na região centro do país, em relação ao sul.



Figura 5.1 - Mapa de cobertura do solo de 2015 para a região centro de Portugal. Proveniente do projecto CCI-LC (Climate Change Initiative Land Cover). A legenda das classes de cobertura do solo encontra-se no anexo 8.6. Adaptado de: <http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/index.php>.

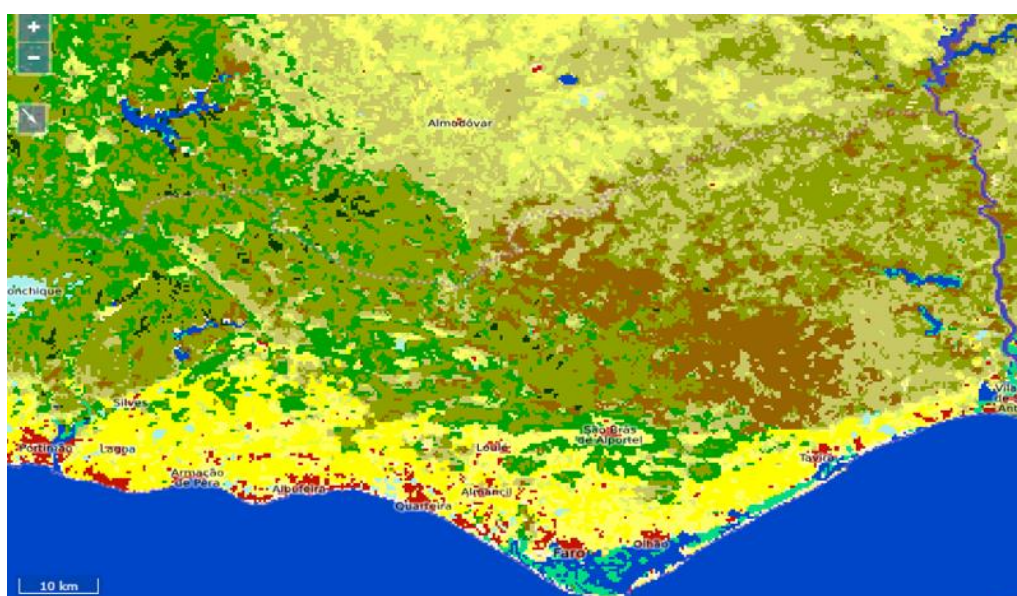


Figura 5.2: Mapa de cobertura do solo de 2015 para a região sul de Portugal. Proveniente do projecto CCI-LC (Climate Change Initiative Land Cover). A legenda das classes de cobertura do solo encontra-se no anexo 8.6. Adaptado de: <http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/index.php>

A ocorrência de incêndio provoca naturalmente um decréscimo acentuado no produto FVC, em todos os casos. Nas décadas posteriores ao evento observa-se uma quebra na fração da vegetação, seguida por um ligeiro aumento no outono seguinte (com valores superiores ao período pré-incêndio). Esta última é mais notável em maior grau nos eventos de Pedrógão Grande e Arrifana (com a anomalia a decair cerca de 0,38) e menor no caso de Catraia, com cobertura de solo 12 (cerca de 0,08). As anomalias de FVC revelam uma recuperação com comportamento semelhante ao de um oscilador harmónico amortecido. Após o incêndio e escoamento das cinzas com as chuvas na estação húmida seguinte, a vegetação é substituída por espécies rasteiras com fenologia diferente da das espécies que ocupavam a área ardida antes do incêndio, tal sendo

notório pela subida rápida do FVC aquando/logo após as primeiras chuvas. Com o passar do tempo, desenvolvem-se arbustos e árvores nos terrenos da cicatriz e o ciclo sazonal torna-se progressivamente mais semelhante ao do período pré-incêndio. De forma geral, os valores de anomalia de FVC recuperam passados 2 anos, aproximadamente. Após o incêndio de Pataias, a anomalia cresce o dobro do valor, passando de -0,30 para -0,15, e permanece negativa até ao final da série. Nos eventos da Serra do Caldeirão e Arrifana observa-se uma estabilização dos valores passados 2 anos e em Pedrógão Grande, mas, apesar da anomalia retornar a valores perto de 0, o tempo posterior ao incêndio não é suficiente para avaliar o comportamento de recuperação. No ano posterior ao evento de incêndio de Catraia, em ambos os tipos de pixéis (CS 6 e 12), existe um aumento substancial da fração da vegetação. Solans Vila e Barbosa (2010) referem que a regeneração de vegetação pertencente à zona de Liguria (Itália) dá-se lentamente no segundo ano após o incêndio e de forma irregular, isto é, algumas áreas recuperam enquanto outras ainda se encontram em regressão, com a cobertura de vegetação a diminuir.

Quanto à informação obtida através dos *boxplot*, conclui-se que as medianas da anomalia de FVC, em condições de incêndio, são negativas em todos os casos, com os menores valores a pertencer à classe 4 de cobertura de solo. Pataias apresenta a menor mediana: -0.230. Porém, ao analisar a dispersão, Pedrógão Grande revela a maior IIQ: 0,134.

Tal como os restantes produtos analisados, o albedo (AL) apresenta uma sazonalidade, com maiores valores nos meses de verão e menores no inverno (Veraverbeke *et al.*, 2012). O AL, tal como o produto FVC, é sensível à heterogeneidade da cobertura de solo do pixel e, por conseguinte, em todos os casos de estudo existe uma diferença sistemática entre valores de albedo da cicatriz e do buffer. A diferença é mais notável no evento de Pataias.

As décadas imediatamente posteriores ao incêndio apresentam em todos os casos um decréscimo dos valores da anomalia de albedo, ainda que em menor grau em Pataias. Isto deve-se ao escurecimento da superfície que é ardida devido à carbonização, causando uma diminuição do albedo (Amiro *et al.*, 2006b; Beringer *et al.*, 2003; Tsuyuzaki *et al.*, 2009; Wendt *et al.*, 2007), cuja diminuição é mais acentuada no evento de Pedrógão Grande, sendo de mencionar que Bremer e Ham (1999) apontam para uma diminuição até metade dos valores anteriores. Porém, este fenómeno não perdura no tempo e rapidamente recupera com a remoção de cinzas e a regeneração da vegetação (Bremer and Ham, 1999; Tsuyuzaki *et al.*, 2009; Veraverbeke *et al.*, 2012). O evento de Pataias apresenta um acréscimo dos valores de albedo mais tardiamente, tendo em conta que o incêndio se deu em outubro. Segundo Amiro *et al.* (1999), o albedo tende a aumentar gradualmente nos anos posteriores ao incêndio e principalmente no verão, estando dependente da regeneração da vegetação.

Relativamente à distribuição dos valores de anomalia de AL, no período pós-incêndio, a dispersão é maior no caso de Pataias (com um IIQ de 0,0153) e menor na Serra do Caldeirão (IIQ de 0,0073). Neste último evento, a diferença entre pixéis é a mais próxima entre todos os casos de estudo, tendo uma mediana em condições pré-incêndio de 0,003 e de 0,004 no pós-incêndio.

A metodologia aplicada neste estudo permitiu analisar 5 eventos de incêndio através dos 3 produtos analisados, que revelou uma anomalia térmica positiva e uma anomalia negativa de valores de FVC e AL. Após a perda de vegetação pelo incêndio, a temperatura da superfície do solo aumenta, em maior grau num solo com menos densidade florestal (Chen e Dirmeyer, 2019), e ao longo do tempo, este aumento tende a esbater-se, devido ao crescimento de vegetação (Veraverbeke *et al.*, 2012). De facto, o fogo gera um ambiente com alterações sazonais na LST, mas o crescimento da vegetação, quantificado pelo produto FVC, atenua progressivamente este efeito (Amiro *et al.*, 2006a; Tsuyuzaki *et al.*, 2009; Veraverbeke *et al.*, 2012). Por outro lado, a queima da vegetação verde leva à substituição por material derivado de cinzas, que

caracteristicamente é mais escuro. Este absorve a luz do sol e reduz a refletividade, traduzindo-se num decréscimo de albedo (Veraverbeke *et al.*, 2012). No entanto os valores de albedo recuperam rapidamente durante os meses de inverno que sucedem o incêndio, devido à ocorrência de chuva típica na região mediterrânica (Pereira *et al.*, 1999). Por esta razão, entre os 3 parâmetros, o AL recupera mais rapidamente.

O tempo de recuperação da vegetação pós-incêndio tem sido alvo de diversos estudos (Bright *et al.*, 2019; Fernández-García *et al.*, 2018; Fernandez-Manso *et al.*, 2016; Solans Vila and Barbosa, 2010; Verroios and Georgiadis, 2002). Nas séries temporais de LST de Arrifana, a recuperação da anomalia parece ocorrer entre 2 e 4 anos passados do incêndio. Bastos *et al.* (2011) referem que as zonas de transição de bosque para vegetação arbustiva apresentam menores tempos de recuperação, enquanto que as coníferas recuperam mais lentamente. Potter (2014), por sua vez, considera que a cobertura de folhas verdes aumenta rapidamente nos primeiros cinco anos após a perturbação de incêndio, dobra em valor cerca de 10 anos após a perturbação e aproxima-se dos valores pré-perturbação entre 25 a 30 anos após o incêndio. Por conseguinte, a recuperação dos valores de FVC referem-se à vegetação que ocupa a área ardida, que não é necessariamente a original.

6 Conclusão

O presente estudo possibilitou a análise das alterações das propriedades biofísicas (temperatura de superfície do solo, fração de vegetação verde e albedo) em cicatrizes de fogo. Uma análise de 5 eventos de incêndio rural, compreendidos no período 2004 – 2017, revelou a existência sistemática de anomalias térmicas positivas e de anomalias negativas de valores de FVC e AL, nos períodos imediatamente posteriores aos eventos de incêndio, e a respetiva recuperação de valores nos anos subsequentes. Por um lado, evidenciou-se a resposta diferente de cada produto, tendo o AL uma recuperação de valores mais rápida em relação à LST e FVC e, por outro, a interdependência entre os três parâmetros que traduz um mecanismo de recuperação da vegetação na cicatriz. Também se analisou a dependência do tipo de vegetação, com os pixéis de floresta temperada de folha caduca a apresentarem maiores valores de anomalia térmica e maior diferença entre condições de ardido e não ardido, para o caso da LST.

A identificação das cicatrizes e a utilização de um *buffer* espacial que rodeia as mesmas permitiu analisar os valores das observações dos produtos, tanto em pixéis pertencentes à cicatriz (ardidos), como na zona circundante (não ardida). Ademais, foi possível tirar proveito da maior frequência de amostragem oferecida pelo radiómetro SEVIRI.

São de referir os seguintes dois indicadores de sucesso da metodologia aplicada: (1) a semelhança em configuração entre a cicatriz de incêndio de 2012 no sul de Portugal presente na Figura 1.1b) detetada pelo *Earth Timelapse* e a cicatriz de pixéis ardidos do caso de estudo 4.3 (Figura 4.11) e (2) o facto de se visualizar a ocorrência de 2 incêndios na mesma região, embora em momentos distintos, nas séries temporais completas dos 3 produtos, em 2004 e 2012.

Apesar do sucesso da utilização dos produtos LSA-SAF, a assinatura de um evento de incêndio apenas foi identificada com clareza para eventos com as seguintes duas características: (1) a grande dimensão da cicatriz (isto é, áreas ardidas extensas) e (2) o facto de se utilizarem apenas pixéis da cicatriz com área ardida superior a 75%. De referir também a presença de *gaps* nas séries temporais da LST, devido à presença de nuvens, e a menor resolução espacial do radiómetro que implica considerar pixéis da cicatriz e *buffer* iguais em termos de cobertura de solo, quando na verdade se verifica localmente maior heterogeneidade. Ainda que estes constrangimentos possam limitar os casos de estudo (podendo mencionar-se, a título de exemplo, o número muito limitado de pixéis analisados no incêndio de Arrifana), o método revelou-se, contudo, adequado no caso de incêndios de grandes dimensões.

Em termos de trabalho futuro existem inúmeras oportunidades, sendo de destacar as duas seguintes linhas de desenvolvimento: a criação de uma metodologia que permita desenvolver uma modelação quantitativa do tempo de recuperação da vegetação, e estender a análise descrita para outros produtos LSA-SAF, tais como ET e ET_0 (*Reference Evapotranspiration* - De Bruin *et al.*, 2016), fAPAR e LAI. De salientar que a utilização da ET e ET_0 para a obtenção de resultados robustos está dependente da existência de séries temporais longas, o que presentemente não acontece dado que as observações só estão disponíveis desde 2016.

Na próxima década em Portugal, segundo Beighley and Hyde (2018), existe o risco potencial de um ano com incêndios rurais que possam atingir entre 600.000 e 750.000 hectares de área ardida total. É então necessária, por um lado, a adoção de mais e melhores políticas e planos de recuperação pós-incêndio, como os planos de estabilização de emergência (representam a 1ª fase de recuperação de áreas ardidas a nível operacional - Coelho *et al.*, 2010; Fernández e Diaz-Raviña, 2013; Observatório Técnico Independente, 2019). Por outro lado, dever-se-á apostar na prevenção que é uma medida essencial para garantir a proteção do património natural.

7 Referências

- Alonso-Canas, I., Chuvieco, E., 2015. Global burned area mapping from ENVISAT-MERIS and MODIS active fire data. *Remote Sens. Environ.* <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.03.011>
- Amiro, B.D., Barr, A.G., Black, T.A., Iwashita, H., Kljun, N., McCaughey, J.H., Morgenstern, K., Murayama, S., Nesic, Z., Orchansky, A.L., Saigusa, N., 2006a. Carbon, energy and water fluxes at mature and disturbed forest sites, Saskatchewan, Canada. *Agric. For. Meteorol.* <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2004.11.012>
- Amiro, B.D., MacPherson, J.I., Desjardins, R.L., 1999. BOREAS flight measurements of forest-fire effects on carbon dioxide and energy fluxes. *Agric. For. Meteorol.* [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00050-7](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00050-7)
- Amiro, B.D., Orchansky, A.L., Barr, A.G., Black, T.A., Chambers, S.D., Chapin, F.S., Goulden, M.L., Litvak, M., Liu, H.P., McCaughey, J.H., McMillan, A., Randerson, J.T., 2006b. The effect of post-fire stand age on the boreal forest energy balance. *Agric. For. Meteorol.* <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.02.014>
- Amraoui, M., DaCamara, C.C., Pereira, J.M.C., 2010. Detection and monitoring of African vegetation fires using MSG-SEVIRI imagery, *Remote Sens Environ.*, 114, 1038-1052. doi:10.1016/j.rse.2009.12.019
- Amraoui, M., Liberato, M.L.R., Calado, T.J., DaCamara, C.C., Coelho, L.P., Trigo, R.M., Gouveia, C.M., 2013. Fire activity over Mediterranean Europe based on information from Meteosat-8. *For. Ecol. Manage.* <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.08.032>
- Anderson, M., Kustas, W., 2008. Thermal remote sensing of drought and evapotranspiration. *Eos (Washington, DC)*. <https://doi.org/10.1029/2008EO260001>
- Ann Bateson, C., Asner, G.P., Wessman, C.A., 2000. Endmember bundles: a new approach to incorporating endmember variability into spectral mixture analysis. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* <https://doi.org/10.1109/36.841987>
- Barbosa, P.M., Stroppiana, D., Grégoire, J.M., Pereira, J.M.C., 1999. An assessment of vegetation fire in Africa (1981-1991): Burned areas, burned biomass, and atmospheric emissions. *Global Biogeochem. Cycles.* <https://doi.org/10.1029/1999GB900042>
- Bastos, A., Gouveia, C.M., Dacamara, C.C., Trigo, R.M., 2011. Modelling post-fire vegetation recovery in Portugal. *Biogeosciences* 8, 3593–3607. <https://doi.org/10.5194/bg-8-3593-2011>
- Beighley, M., Hyde, A., 2018. Gestão dos Incêndios Florestais em Portugal numa Nova Era: Avaliação dos Riscos de Incêndio, Recursos e Reformas 59.
- Belward, A.S., Office, I.-D., 1996. The IGBP-DIS global 1 km land cover data set “DISCover”: Proposal and implementation plans. Rep. L. Cover Work. Gr. IGBP-DIS.
- Bento, V.A., Gouveia, C.M., DaCamara, C.C., Trigo, I.F., 2018. A climatological assessment of drought impact on vegetation health index. *Agric. For. Meteorol.* <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.05.014>
- Beringer, J., Hutley, L.B., Tapper, N.J., Coutts, A., Kerley, A., O’Grady, A.P., 2003. Fire impacts on surface heat, moisture and carbon fluxes from a tropical savanna in northern Australia, in: *International Journal of Wildland Fire*. <https://doi.org/10.1071/wf03023>
- Bremer, D.J., Ham, J.M., 1999. Effect of spring burning on the surface energy balance in a tallgrass prairie. *Agric. For. Meteorol.* [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00034-9](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00034-9)

- Bright, B.C., Hudak, A.T., Kennedy, R.E., Braaten, J.D., Henareh Khalyani, A., 2019. Examining post-fire vegetation recovery with Landsat time series analysis in three western North American forest types. *Fire Ecol.* <https://doi.org/10.1186/s42408-018-0021-9>
- Brisson A., P. Le Borgne, Marsoin, A., 1998. Development of algorithms for SST retrieval at O&SI SAF Low and Mid Latitude. www.page.eumetsat.org.
- Brito, Raquel Soeiro, *Portugal Perfil Geográfico*, Lisboa, Editorial Estampa, 1997, pp. 64-65.
- Brotons, L., Aquilué, N., de Cáceres, M., Fortin, M.J., Fall, A., 2013. How Fire History, Fire Suppression Practices and Climate Change Affect Wildfire Regimes in Mediterranean Landscapes. *PLoS One.* <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0062392>
- Brown, J.K., Smith, J.K., 2000. Wildland fire in ecosystems: effects of fire on flora. *Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-42.* <https://doi.org/10.1111/j.1467-7717.2009.01106.x>
- Caccamo, G., Bradstock, R., Collins, L., Penman, T., Watson, P., 2015. Using MODIS data to analyse post-fire vegetation recovery in Australian eucalypt forests. *J. Spat. Sci.* <https://doi.org/10.1080/14498596.2015.974227>
- Camacho-De Coca, F., García-Haro, F.J., Gilabert, M.A., Meliá, J., 2004. Vegetation cover seasonal changes assessment from TM imagery in a semi-arid landscape. *Int. J. Remote Sens.* <https://doi.org/10.1080/01431160310001618761>
- Carrer, D., Geiger, B., Roujean, J.L., Hauteceur, O., Meurey, C., Franchistéguy, L., 2008. Land surface albedo and down-welling short-wave radiation retrievals using high frequency observations from msg geostationary satellite, in: *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2008.4780135>
- Carrer, D., Moparthy, S., Lellouch, G., Ceamanos, X., Pinault, F., Freitas, S.C., Trigo, I.F., 2018. Land surface albedo derived on a ten daily basis from Meteosat Second Generation Observations: The NRT and climate data record collections from the EUMETSAT LSA SAF. *Remote Sens.* <https://doi.org/10.3390/rs10081262>
- Carrer, D., Roujean, J.L., Meurey, C., 2010. Comparing operational MSG/SEVIRI Land Surface albedo products from Land SAF with ground measurements and MODIS. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* <https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2034530>
- Catry, F., Bugalho, M., Silva, J., 2007. *Recuperação da Floresta após o Fogo - O caso da Tapada Nacional de Mafra*, CEABN - ISA, Lisboa, 36p.
- Catry, F., Silva, J.S. & Fernandes, P., 2010. *Efeitos do fogo na vegetação*. In F. Moreira, F.X. Catry, J.S. Silva & R. Francisco (Eds.), *Ecologia do fogo e gestão de áreas ardidas* (pp. 49-86). Lisboa, ISA Press.
- Catry, F.X., Moreira, F., Tujeira, R., Silva, J.S., 2013. Post-fire survival and regeneration of *Eucalyptus globulus* in forest plantations in Portugal. *For. Ecol. Manage.* <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.08.036>
- Cerdà, A., Doerr, S.H., 2005. Influence of vegetation recovery on soil hydrology and erodibility following fire: An 11-year investigation. *Int. J. Wildl. Fire.* <https://doi.org/10.1071/WF05044>
- CHEN, J.M., BLACK, T.A., 1992. Defining leaf area index for non-flat leaves. *Plant. Cell Environ.* <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1992.tb00992.x>
- Chen, L., Dirmeyer, P.A., 2019. Differing responses of the diurnal cycle of land surface and air temperatures to deforestation. *J. Clim.* <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0002.1>

- Coelho, C., Prats, S., Pinheiro, A., Carvalho, T., Boulet, A.K., Ferreira, A., 2010. Técnicas para minimização da erosão e da escorrência pós-fogo. Univ. Aveiro, 49 pp. A. Bento Gonçalves & A. Vieira (eds.) Univ. Minho.
- Comissão Técnica Independente (2017). Relatório. Análise e apuramento dos factos relativos aos incêndios que ocorreram em Pedrógão Grande, Castanheira de Pera, Ansião, Alvaiázere, Figueiró dos Vinhos, Arganil, Góis, Penela, Pampilhosa da Serra, Oleiros e Sertã, entre 17 e 24 de junho de 2017. Lisboa, Assembleia da República.
- Comissão Técnica Independente, Guerreiro J., Fonseca C., Salgueiro A., Fernandes P., Lopez Iglésias E., de Neufville R., Mateus F., Castellnou Ribau M., Sande Silva J., Moura J. M., Castro Rego F. e Caldeira D. N. - Coords. (2018). Avaliação dos incêndios ocorridos entre 14 e 16 de outubro de 2017 em Portugal Continental. Relatório Final. Comissão Técnica Independente. Assembleia da República. Lisboa. 274 pp.
- Dash, P., Göttsche, F.M., Olesen, F.S., Fischer, H., 2002. Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: Theory and practice-current trends. Int. J. Remote Sens. <https://doi.org/10.1080/01431160110115041>
- De Bruin, H.A.R., Trigo, I.F., Bosveld, F.C., Meirink, J.F., 2016. Thermodynamically based model for actual evapotranspiration of an extensive grass field close to FAO reference, suitable for remote sensing application. J. Hydrometeorol. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0006.1>
- de Rigo, D., Libertà, G., Houston Durrant, T., Artés Vivancos, T., San-Miguel-Ayanz, J., 2017. Forest fire danger extremes in Europe under climate change: variability and uncertainty, JRC Science Hub. <https://doi.org/10.2760/13180>
- DeBano, L. F., Neary, D. G., and Folliott, P. F.: Fire's Effects on Ecosystems, John Wiley and Sons, New York, 333 pp, 1998.
- DGF, 2003. Incêndios Florestais - 2003, Relatório Provisório (1 Jan – 31 Out). Divisão de Protecção e Conservação Florestal, Direcção Geral das Florestas, Lisboa, 20 pp.
- DGRF (Direcção Geral dos Recursos Florestais) (2005). *Incêndios Florestais – Relatório de 2005. 30 de Janeiro de 2006.*
- Duan, S.B., Li, Z.L., Leng, P., 2017. A framework for the retrieval of all-weather land surface temperature at a high spatial resolution from polar-orbiting thermal infrared and passive microwave data. Remote Sens. Environ. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.04.008>
- Ermida, S.L., Jiménez, C., Prigent, C., Trigo, I.F., DaCamara, C.C., 2017. Inversion of AMSR-E observations for land surface temperature estimation: 2. Global comparison with infrared satellite temperature. J. Geophys. Res. <https://doi.org/10.1002/2016JD026148>
- Ermida, S.L., Trigo, I.F., DaCamara, C.C., Göttsche, F.M., Olesen, F.S., Hulley, G., 2014. Validation of remotely sensed surface temperature over an oak woodland landscape - The problem of viewing and illumination geometries. Remote Sens. Environ. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.03.016>
- ESA: Land Cover CCI Product User Guide Version 2.0, available at: http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/download/ESACCI-LC-Ph2-PUGv2_2.0.pdf (consult. 01 de novembro 2019).
- Fernandes, P., Luz, A., Loureiro, C., Ferreira-Godinho, P., Botelho, H., 2006. Fuel modelling and fire hazard assessment based on data from the Portuguese National Forest Inventory. For. Ecol. Manage. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.08.256>
- Fernandes, P.M., Rigolot, E., 2007. The fire ecology and management of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). For. Ecol. Manage. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.01.010>

- Fernández, C., Diaz-Raviña, M., 2013. Implementation of Techniques to Control Post-Fire Erosion in Galicia (NW Iberian Peninsula): Effects of Soil Quality. Em *Grandes Incêndios Florestais, Erosão, Degradação e Medidas de Recuperação dos solos*, pp. 279-290.
- Fernández, C., Vega, J.A., Arbones, P., Fontúrbel, T., 2019. Eficacia de los Tratamientos del Estabilización del Suelo después de Incendio em Galicia. Anadira Editora, Santiago de Compostela. 108 pp.
- Fernández-García, V., Quintano, C., Taboada, A., Marcos, E., Calvo, L., Fernández-Manso, A., 2018. Remote sensing applied to the study of fire regime attributes and their influence on post-fire greenness recovery in pine ecosystems. *Remote Sens.* <https://doi.org/10.3390/rs10050733>
- Fernandez-Manso, A., Quintano, C., Roberts, D.A., 2016. Burn severity influence on post-fire vegetation cover resilience from Landsat MESMA fraction images time series in Mediterranean forest ecosystems. *Remote Sens. Environ.* <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.06.015>
- Ferreira-Leite, F., Lourenc_o, L., Bento-Gonc_alves, A., 2013. Large forest fires in mainland Portugal, brief characterization. *Mediterranee.* <https://doi.org/10.4000/mediterranee.6863>
- Food and Agriculture Organsiation of the United Nations, 2015. *Global Forest Resources Assessment 2015, Desk Reference.* <https://doi.org/10.1002/2014GB005021>
- Freitas, S.C., Trigo, I.F., Bioucas-Dias, J.M., Götsche, F.M., 2010. Quantifying the uncertainty of land surface temperature retrievals from SEVIRI/Meteosat. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* <https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2027697>
- García-Haro, F.J., Camacho, F., Martínez, B., Campos-Taberner, M., Fuster, B., Sánchez-Zapero, J., Gilabert, M.A., 2019. Climate data records of vegetation variables from geostationary SEVIRI/MSG data: Products, algorithms and applications. *Remote Sens.* <https://doi.org/10.3390/rs11182103>
- García-Haro, F.J., Camacho-de Coca F., Meliá J., Martínez B., 2005b. Operational derivation of vegetation products in the framework of the LSA SAF project. EUMETSAT Meteorological Satellite Conference. Dubrovnik (Croatia). 19-23 Septiembre, in press.
- García-Haro, F.J., Camacho-De Coca, F., Meliá, J., 2006. A directional spectral mixture analysis method: Application to multiangular airborne measurements. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* <https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.861008>
- García-Haro, F.J., Campos-Taberner, M., Muñoz-Marí, J., Laparra, V., Camacho, F., Sánchez-Zapero, J., Camps-Valls, G., 2018. Derivation of global vegetation biophysical parameters from EUMETSAT Polar System. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.03.005>
- García-Haro, F.J., Sommer, S., Kemper, T., 2005. A new tool for variable multiple endmember spectral mixture analysis (VMESMA). *Int. J. Remote Sens.* <https://doi.org/10.1080/01431160512331337817>
- Geiger, B., Carrer, D., Franchistéguy, L., Roujean, J.L., Meurey, C., 2008. Land surface albedo derived on a daily basis from meteosat second generation observations. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* <https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2001798>
- Ghilain, N., 2016. Continental scale monitoring of subdaily and daily evapotranspiration enhanced by the assimilation of surface soil moisture derived from thermal infrared geostationary data, Chapter 16, p. 309-332, in *Satellite Soil Moisture Retrieval Techniques and Applications*, P.K. Srivastava, G. Petropoulos & Y.H. Kerr, eds, Elsevier Publisher.

- Gobron, N., Pinty, B., Ausedat, O., Chen, J.M., Cohen, W.B., Fensholt, R., Gond, V., Huemmrich, K.F., Lavergne, T., Mélin, F., Privette, J.L., Sandholt, I., Taberner, M., Turner, D.P., Verstraete, M.M., Widlowski, J.L., 2006. Evaluation of fraction of absorbed photosynthetically active radiation products for different canopy radiation transfer regimes: Methodology and results using Joint Research Center products derived from SeaWiFS against ground-based estimations. *J. Geophys. Res. Atmos.* <https://doi.org/10.1029/2005JD006511>
- Good, P., Moriondo, M., Giannakopoulos, C., Bindi, M., 2008. The meteorological conditions associated with extreme fire risk in Italy and Greece: Relevance to climate model studies. *Int. J. Wildl. Fire.* <https://doi.org/10.1071/WF07001>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., Moore, R., 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sens. Environ.* <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Göttsche, F.M., Olesen, F.S., Bork-Unkelbach, A., 2013. Validation of land surface temperature derived from MSG/SEVIRI with *in situ* measurements at Gobabeb, Namibia. *Int. J. Remote Sens.* <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.716539>
- Göttsche, F.M., Olesen, F.S., Trigo, I.F., Bork-Unkelbach, A., Martin, M.A., 2016. Long term validation of land surface temperature retrieved from MSG/SEVIRI with continuous in-situ measurements in Africa. *Remote Sens.* <https://doi.org/10.3390/rs8050410>
- Gouveia, C., Páscoa, P., DaCamara, C., 2018. Post-Fire Vegetation Recovery in Iberia Based on Remote- Sensing Information. *For. Fire.* <https://doi.org/10.5772/intechopen.72594>
- Gouveia, C.M., Bastos, A., Trigo, R.M., Dacamara, C.C., 2012. Drought impacts on vegetation in the pre- and post-fire events over Iberian Peninsula. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* <https://doi.org/10.5194/nhess-12-3123-2012>
- Grégoire, J.M., Tansey, K., Silva, J.M.N., 2003. The GBA2000 initiative: Developing a global burnt area database from SPOT-VEGETATION imagery. *Int. J. Remote Sens.* <https://doi.org/10.1080/0143116021000044850>
- Holmes, T.R.H., Crow, W.T., Hain, C., 2013. Spatial patterns in timing of the diurnal temperature cycle. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* <https://doi.org/10.5194/hess-17-3695-2013>
- Hudak, A.T., Brockett, B.H., 2004. Mapping fire scars in a southern African savannah using landsat imagery. *Int. J. Remote Sens.* <https://doi.org/10.1080/01431160310001632666>
- Instituto de Conservação da Natureza e das Florestas (2012a). *Relatório Anual de Áreas Ardidas e Incêndios Florestais em Portugal Continental - 2012.*
- Instituto de Conservação da Natureza e das Florestas (2012b). *Recuperação da área ardida no incêndio de Catraia – Relatório Técnico.*
- Instituto de Conservação da Natureza e das Florestas (2017). *Relatório provisório de incêndios florestais 2017, 01 de Janeiro a 31 de Outubro. Versão 10.*
- IPCC, 2019. IPCC 2019- Special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystem. *Res. Handb. Clim. Chang. Agric. Law.* <https://doi.org/10.4337/9781784710644>
- IPMA, 2012. Boletim Climatológico Anual – 2012. Portugal Continental. *Instituto Português do Mar e da Atmosfera.* Disponível em <<http://www.ipma.pt/pt/publicacoes/boletins.jsp?cmbDep=cli&cmbTema=pcl&cmbAno=2012>> (&idDep=cli&idTema=pcl&curAno=2012) (consult. 06 de janeiro 2020).

- Jhariya, M.K., Raj, A., 2014. Effects of wildfires on flora, fauna and physico-chemical properties of soil-An overview. *J. Appl. Nat. Sci.* <https://doi.org/10.31018/jans.v6i2.550>
- Jiménez, C., Prigent, C., Ermida, S.L., Moncet, J.L., 2017. Inversion of AMSR-E observations for land surface temperature estimation: 1. Methodology and evaluation with station temperature. *J. Geophys. Res.* <https://doi.org/10.1002/2016JD026144>
- Josey, S.A., Pascal, R.W., Taylor, P.K., Yelland, M.J., 2003. A new formula for determining the atmospheric longwave flux at the ocean surface at mid-high latitudes. *J. Geophys. Res. C Ocean.* <https://doi.org/10.1029/2002jc001418>
- Karnieli, A., Dall’Olmo, G., 2003. Remote-sensing monitoring of desertification, phenology, and droughts. *Manag. Environ. Qual. An Int. J.* <https://doi.org/10.1108/14777830310460360>
- Khandelwal, S., Goyal, R., Kaul, N., Mathew, A., 2018. Assessment of land surface temperature variation due to change in elevation of area surrounding Jaipur, India. *Egypt. J. Remote Sens. Sp. Sci.* <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.01.005>
- Khorchani, M., Vicente-Serrano, S.M., Azorin-Molina, C., Garcia, M., Martin-Hernandez, N., Peña-Gallardo, M., El Kenawy, A., Domínguez-Castro, F., 2018. Trends in LST over the peninsular Spain as derived from the AVHRR imagery data. *Glob. Planet. Change.* <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.04.006>
- Lattanzio, A., Schulz, J., Matthews, J., Okuyama, A., Theodore, B., Bates, J.J., Knapp, K.R., Kosaka, Y., Schüller, L., 2013. Land surface albedo from geostationary satellites: A multiagency collaboration within SCOPE-CM. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00230.1>
- Leblon, B., San-Miguel-Ayanz, J., Bourgeau-Chavez, L., Kong, M., 2016. Remote Sensing of Wildfires, in: *Land Surface Remote Sensing: Environment and Risks.* <https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-105-5.50003-7>
- Lentile, L.B., Holden, Z.A., Smith, A.M.S., Falkowski, M.J., Hudak, A.T., Morgan, P., Lewis, S.A., Gessler, P.E., Benson, N.C., 2006. Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects. *Int. J. Wildl. Fire.* <https://doi.org/10.1071/WF05097>
- Leone, V., Lovreglio, R., Martín, M.P., Martínez, J., Vilar, L., 2009. Human factors of fire occurrence in the mediterranean, in: *Earth Observation of Wildland Fires in Mediterranean Ecosystems.* https://doi.org/10.1007/978-3-642-01754-4_11
- Lhermltte, S., Verbesselt, J., Verstraeten, W.W., Coppin, P., 2010. A pixel based regeneration index using time series similarity and spatial context. *Photogramm. Eng. Remote Sensing.* <https://doi.org/10.14358/pers.76.6.673>
- Li, Z.L., Tang, B.H., Wu, H., Ren, H., Yan, G., Wan, Z., Trigo, I.F., Sobrino, J.A., 2013. Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. *Remote Sens. Environ.* <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.12.008>
- Liu, Y., Stanturf, J., Goodrick, S., 2010. Trends in global wildfire potential in a changing climate. *For. Ecol. Manage.* <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.002>
- Loveland, T.R., Reed, B.C., Ohlen, D.O., Brown, J.F., Zhu, Z., Yang, L., Merchant, J.W., 2000. Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1 km AVHRR data. *Int. J. Remote Sens.* <https://doi.org/10.1080/014311600210191>
- LSA-SAF, 2018. Product User Manual for Vegetation Parameters (VEGA). Ref: SAF/LAND/UV/PUM_VEGA/3.2. Disponível em <https://landsaf.ipma.pt> (consult. 01 de junho 2019).

- LSA-SAF, 2018b. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for Ten-day Surface Albedo Climate Data Record (CDR) from MSG/SEVIRI (MTAL-R). Ref: SAF/LAND/MF/VR_MTAL-R/1.2. Disponível em <https://landsaf.ipma.pt> (consult. 01 de junho 2019).
- Mallinis, G., Koutsias, N., 2012. Comparing ten classification methods for burned area mapping in a Mediterranean environment using Landsat TM satellite data. *Int. J. Remote Sens.* <https://doi.org/10.1080/01431161.2011.648284>
- Martins, J.P.A., Trigo, I.F., Bento, V.A., da Camara, C., 2016. A physically constrained calibration database for land surface temperature using infrared retrieval algorithms. *Remote Sens.* <https://doi.org/10.3390/rs8100808>
- Mateus, P., Fernandes, P.M., 2014. Forest Fires in Portugal: Dynamics, Causes and Policies. https://doi.org/10.1007/978-3-319-08455-8_4
- Meng, R., Wu, J., Zhao, F., Cook, B.D., Hanavan, R.P., Serbin, S.P., 2018. Measuring short-term post-fire forest recovery across a burn severity gradient in a mixed pine-oak forest using multi-sensor remote sensing techniques. *Remote Sens. Environ.* <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.03.019>
- Milenkovic, M., Yamashkin, A., Ducic, V., Babic, V., Govedar, Z., 2017. Forest fires in Portugal - the connection with the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO). *J. Geogr. Inst. Jovan Cvijic, SASA.* <https://doi.org/10.2298/ijgi1701027m>
- Miralles, D.G., Holmes, T.R.H., De Jeu, R.A.M., Gash, J.H., Meesters, A.G.C.A., Dolman, A.J., 2011. Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* <https://doi.org/10.5194/hess-15-453-2011>
- Mohler, R.L., Goodin, D.G., 2010. A comparison of red, NIR, and NDVI for monitoring temporal burn signature change in tallgrass prairie. *Remote Sens. Lett.* <https://doi.org/10.1080/01431160903154291>
- Moore, K.E., Fitzjarrald, D.R., Sakai, R.K., Goulden, M.L., Munger, J.W., Wofsy, S.C., 1996. Seasonal variation in radiative and turbulent exchange at a deciduous forest in central Massachusetts. *J. Appl. Meteorol.* [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1996\)035<0122:SVIRAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1996)035<0122:SVIRAT>2.0.CO;2)
- Moriondo, M., Good, P., Durao, R., Bindi, M., Giannakopoulos, C., Corte-Real, J., 2006. Potential impact of climate change on fire risk in the Mediterranean area. *Clim. Res.* <https://doi.org/10.3354/cr031085>
- Neto, J.V., Barbosa, C., Torres, É.M., Estrela, C., 2017. Boxplot: um recurso gráfico para a análise e interpretação de dados quantitativos. *Rev. Odontológica do Bras. Cent.*
- Observatório Técnico Independente, Castro Rego F., Fernandes P., Sande Silva J., Azevedo J., Moura J.M., Oliveira E., Cortes R., Viegas D.X., Caldeira D., e Duarte Santos F. - Coords. (2019) ESTUDO TÉCNICO – Estabilização de Emergência Pós-Fogo. Assembleia da República. Lisboa. 31 pp.
- Paci L, Gelfand AE, Beamonte MA, Rodrigues M, Pérez-Cabello F. Space-time modeling for post-fire vegetation recovery. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment.* 2017;**31**(1):171-183. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00477-015-1182-6>.
- Pausas, J.G., Vallejo, V.R., 1999. The role of fire in European Mediterranean ecosystems, in: *Remote Sensing of Large Wildfires.* https://doi.org/10.1007/978-3-642-60164-4_2
- Pereira, J.M.C., Sá, A.C.L., Sousa, A.M.O., Silva, J.M.N., Santos, T.N., Carreiras, J.M.B., 1999. Spectral characterisation and discrimination of burnt areas, in: *Remote Sensing of Large Wildfires.* https://doi.org/10.1007/978-3-642-60164-4_7

- Peres, L.F., DaCamara, C.C., 2005. Emissivity maps to retrieve land-surface temperature from MSG/SEVIRI. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* <https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.851172>
- Petropoulos, G.P., Ireland, G., Lamine, S., Griffiths, H.M., Ghilain, N., Anagnostopoulos, V., North, M.R., Srivastava, P.K., Georgopoulou, H., 2016. Operational evapotranspiration estimates from SEVIRI in support of sustainable water management. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.02.006>
- Phan, T.N., Kappas, M., Tran, T.P., 2018. Land surface temperature variation due to changes in elevation in Northwest Vietnam. *Climate.* <https://doi.org/10.3390/cli6020028>
- Pielke, R.A., Avissar, R., Raupach, M., Dolman, A.J., Zeng, X., Denning, A.S., 1998. Interactions between the atmosphere and terrestrial ecosystems: influence on weather and climate. *Glob. Chang. Biol.* <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.1998.00176.x>
- Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.]. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 109-230.
- Potter, C., 2014. Ten years of forest cover change in the Sierra Nevada detected using Landsat satellite image analysis. *Int. J. Remote Sens.* <https://doi.org/10.1080/01431161.2014.968687>
- Prata, A.J., 1993. Land surface temperatures derived from the Advanced Very High Resolution Radiometer and the Along-Track Scanning Radiometer 1. Theory. *J. Geophys. Res.* <https://doi.org/10.1029/93jd01206>
- Prata, A.J., 1996. A new long-wave formula for estimating downward clear-sky radiation at the surface. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* <https://doi.org/10.1256/smsqj.53305>
- Quintano, C., Fernández-Manso, A., Calvo, L., Marcos, E., Valbuena, L., 2015. Land surface temperature as potential indicator of burn severity in forest Mediterranean ecosystems. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.10.015>
- Rahman, H., Dedieu, G., 1994. SMAC: A simplified method for the atmospheric correction of satellite measurements in the solar spectrum. *Int. J. Remote Sens.* <https://doi.org/10.1080/01431169408954055>
- Raynolds, M.K., Comiso, J.C., Walker, D.A., Verbyla, D., 2008. Relationship between satellite-derived land surface temperatures, arctic vegetation types, and NDVI. *Remote Sens. Environ.* <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.09.008>
- Reneau, S.L., Katzman, D., Kuyumjian, G.A., Lavine, A., Malmon, D. V., 2007. Sediment delivery after a wildfire. *Geology.* <https://doi.org/10.1130/G23288A.1>
- Richardson, A.D., Keenan, T.F., Migliavacca, M., Ryu, Y., Sonnentag, O., Toomey, M., 2013. Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system. *Agric. For. Meteorol.* <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.09.012>
- Roberts, G., Wooster, M.J., Xu, W., Freeborn, P.H., Morcrette, J.J., Jones, L., Benedetti, A., Jiangping, H., Fisher, D., Kaiser, J.W., 2015. LSA SAF Meteosat FRP products-Part 2: Evaluation and demonstration for use in the Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS). *Atmos. Chem. Phys.* <https://doi.org/10.5194/acp-15-13241-2015>
- Röder, A., Hill, J., Duguay, B., Alloza, J.A., Vallejo, R., 2008. Using long time series of Landsat data to monitor fire events and post-fire dynamics and identify driving factors. A case study in the Ayora region (eastern Spain). *Remote Sens. Environ.* <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.05.001>

- Roujean, J.L., Breon, F.M., 1995. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. *Remote Sens. Environ.* [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)00114-3](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)00114-3)
- Roujean, J.L., Lacaze, R., 2002. Global mapping of vegetation parameters from POLDER multiangular measurements for studies of surface-atmosphere interactions: A pragmatic method and its validation. *J. Geophys. Res. D Atmos.* <https://doi.org/10.1029/2001jd000751>
- Roujean, J.L., Leroy, M., Deschamps, P.Y., 1992. A bidirectional reflectance model of the Earth's surface for the correction of remote sensing data. *J. Geophys. Res.* <https://doi.org/10.1029/92jd01411>.
- Schmid, J., 2000. The SEVIRI instrument. In *Proceedings of the 2000 EUMETSAT meteorological satellite data user's conference, Bologna, Italy (Vol. 29)*.
- Schwartz, M.D., 1992. Phenology and Springtime Surface-Layer Change. *Mon. Weather Rev.* [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1992\)120<2570:passlc>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1992)120<2570:passlc>2.0.co;2)
- Settle, J.J., Drake, N.A., 1993. Linear mixing and the estimation of ground cover proportions. *Int. J. Remote Sens.* <https://doi.org/10.1080/01431169308904402>
- Smith, A.M.S., Drake, N.A., Wooster, M.J., Hudak, A.T., Holden, Z.A., Gibbons, C.J., 2007. Production of Landsat ETM+ reference imagery of burned areas within Southern African savannahs: Comparison of methods and application to MODIS. *Int. J. Remote Sens.* <https://doi.org/10.1080/01431160600954704>
- Solans Vila, J.P., Barbosa, P., 2010. Post-fire vegetation regrowth detection in the Deiva Marina region (Liguria-Italy) using Landsat TM and ETM+ data. *Ecol. Modell.* <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.03.011>
- Tarawally, M., Xu, W., Hou, W., Mushore, T.D., 2018. Comparative analysis of responses of land surface temperature to long-term land use/cover changes between a coastal and Inland City: A case of Freetown and Bo Town in Sierra Leone. *Remote Sens.* <https://doi.org/10.3390/rs10010112>
- Tessler, N., Sapir, Y., Wittenberg, L., Greenbaum, N., 2016. Recovery of Mediterranean Vegetation after Recurrent Forest Fires: Insight from the 2010 Forest Fire on Mount Carmel, Israel. *L. Degrad. Dev.* <https://doi.org/10.1002/ldr.2419>
- Thornes JB. *The Interaction of Erosion and Vegetation Dynamics*. Chichester, UK: John Wiley and Sons Ltd.; 1990.
- Trabaud, L., 1994. Postfire Plant Community Dynamics in the Mediterranean Basin. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-8395-6_1
- Trigo, I.F., Dacamara, C.C., Viterbo, P., Roujean, J.L., Olesen, F., Barroso, C., Camacho-De-Coca, F., Carrer, D., Freitas, S.C., García-Haroj, J., Geiger, B., Gellens-Meulenberghs, F., Ghilain, N., Meliá, J., Pessanha, L., Siljamo, N., Arboleda, A., 2011. The satellite application facility for land surface analysis. *Int. J. Remote Sens.* 32, 2725–2744. <https://doi.org/10.1080/01431161003743199>
- Trigo, I.F., Monteiro, I.T., Olesen, F., Kabsch, E., 2008a. An assessment of remotely sensed land surface temperature. *J. Geophys. Res. Atmos.* <https://doi.org/10.1029/2008JD010035>
- Trigo, I.F., Peres, L.F., DaCamara, C.C., Freitas, S.C., 2008b. Thermal land surface emissivity retrieved from SEVIRI/Meteosat, in: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.905197>

- Tsuyuzaki, S., Kushida, K., Kodama, Y., 2009. Recovery of surface albedo and plant cover after wildfire in a *Picea mariana* forest in interior Alaska. *Clim. Change*. <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9505-y>
- Van Wagner, C.E., 1987. Development and structure of the Canadian forest fire weather index system, *Forestry*. <https://doi.org/19927>
- Veraverbeke, S., Lhermitte, S., Verstraeten, W.W., Goossens, R., 2010. The temporal dimension of differenced Normalized Burn Ratio (dNBR) fire/burn severity studies: The case of the large 2007 Peloponnese wildfires in Greece. *Remote Sens. Environ.* <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.05.029>
- Veraverbeke, S., Verstraeten, W.W., Lhermitte, S., Van De Kerchove, R., Goossens, R., 2012. Assessment of post-fire changes in land surface temperature and surface albedo, and their relation with fireburn severity using multitemporal MODIS imagery. *Int. J. Wildl. Fire*. <https://doi.org/10.1071/WF10075>
- Verroios, G., Georgiadis, T., 2002. Post-fire vegetation succession: The case of Aleppo pine (*Pinus halepensis* Miller) forests of Northern Achaia (Greece). *Fresenius Environ. Bull.*
- Wan, Z., Dozier, J., 1996. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* <https://doi.org/10.1109/36.508406>
- Wang, L., Qu, J.J., 2009. Satellite remote sensing applications for surface soil moisture monitoring: A review. *Front. Earth Sci. China*. <https://doi.org/10.1007/s11707-009-0023-7>
- Wendt, C.K., Beringer, J., Tapper, N.J., Hutley, L.B., 2007. Local boundary-layer development over burnt and unburnt tropical savanna: An observational study. *Boundary-Layer Meteorol.* <https://doi.org/10.1007/s10546-006-9148-3>
- Weng, Q., Lu, D., Schubring, J., 2004. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sens. Environ.* <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.005>
- Wooster, M.J., Roberts, G., Freeborn, P.H., Xu, W., Govaerts, Y., Beeby, R., He, J., Lattanzio, A., Fisher, D., Mullen, R., 2015. LSA SAF Meteosat FRP products-Part 1: Algorithms, product contents, and analysis. *Atmos. Chem. Phys.* <https://doi.org/10.5194/acp-15-13217-2015>
- Xiong, Y.J., Qiu, G.Y., 2011. Estimation of evapotranspiration using remotely sensed land surface temperature and the revised three-temperature model. *Int. J. Remote Sens.* <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.507791>
- Yang, J., Pan, S., Dangal, S., Zhang, B., Wang, S., Tian, H., 2017. Continental-scale quantification of post-fire vegetation greenness recovery in temperate and boreal North America. *Remote Sens. Environ.* <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.07.022>

8 Anexos

8.1) Classificação da cobertura do solo segundo o Sistema IGBP

Tabela 8.1 - Sistema de classificação da cobertura do solo segundo o programa IGBP. Adaptado de Loveland et al., 2000.

Class	Class name	Description
1	Evergreen needleleaf forests	Lands dominated by needleleaf woody vegetation with a percent cover >60% and height exceeding 2 m. Almost all trees remain green all year. Canopy is never without green foliage.
2	Evergreen broadleaf forests	Lands dominated by broadleaf woody vegetation with a percent cover >60% and height exceeding 2 m. Almost all trees and shrubs remain green year round. Canopy is never without green foliage.
3	Deciduous needleleaf forests	Lands dominated by woody vegetation with a percent cover >60% and height exceeding 2 m. Consists of seasonal needleleaf tree communities with an annual cycle of leaf-on and leaf-off periods.
4	Deciduous broadleaf forests	Lands dominated by woody vegetation with a percent cover >60% and height exceeding 2 m. Consists of broadleaf tree communities with an annual cycle of leaf-on and leaf-off periods.
5	Mixed forests	Lands dominated by trees with a percent cover >60% and height exceeding 2 m. Consists of tree communities with interspersed mixtures or mosaics of the other four forest types. None of the forest types exceeds 60% of landscape.
6	Closed shrublands	Lands with woody vegetation less than 2 m tall and with shrub canopy cover >60%. The shrub foliage can be either evergreen or deciduous.
7	Open shrublands	Lands with woody vegetation less than 2 m tall and with shrub canopy cover between 10% and 60%. The shrub foliage can be either evergreen or deciduous.
8	Woody savannas	Lands with herbaceous and other understory systems, and with forest canopy cover

		between 30% and 60%. The forest cover height exceeds 2 m.
9	Savannas	Lands with herbaceous and other understory systems, and with forest canopy cover between 10% and 30%. The forest cover height exceeds 2 m.
10	Grasslands	Lands with herbaceous types of cover. Tree and shrub cover is less than 10%.
11	Permanent wetlands	Lands with a permanent mixture of water and herbaceous or woody vegetation. The vegetation can be present either in salt, brackish, or fresh water.
12	Croplands	Lands covered with temporary crops followed by harvest and a bare soil period (e.g., single and multiple cropping systems). Note that perennial woody crops will be classified as the appropriate forest or shrub land cover type.
13	Urban and built-up lands	Land covered by buildings and other man-made structures.
14	Cropland/natural vegetation mosaics	Lands with a mosaic of croplands, forests, shrubland, and grasslands in which no one component comprises more than 60% of the landscape.
15	Snow and ice	Lands under snow/ice cover throughout the year.
16	Barren	Lands with exposed soil, sand, rocks, or snow and never have more than 10% vegetated cover during any time of the year.
17	Water bodies	Oceans, seas, lakes, reservoirs, and rivers. Can be either fresh or salt-water bodies.

8.2) Séries temporais completas dos produtos para o incêndio de Arrifana

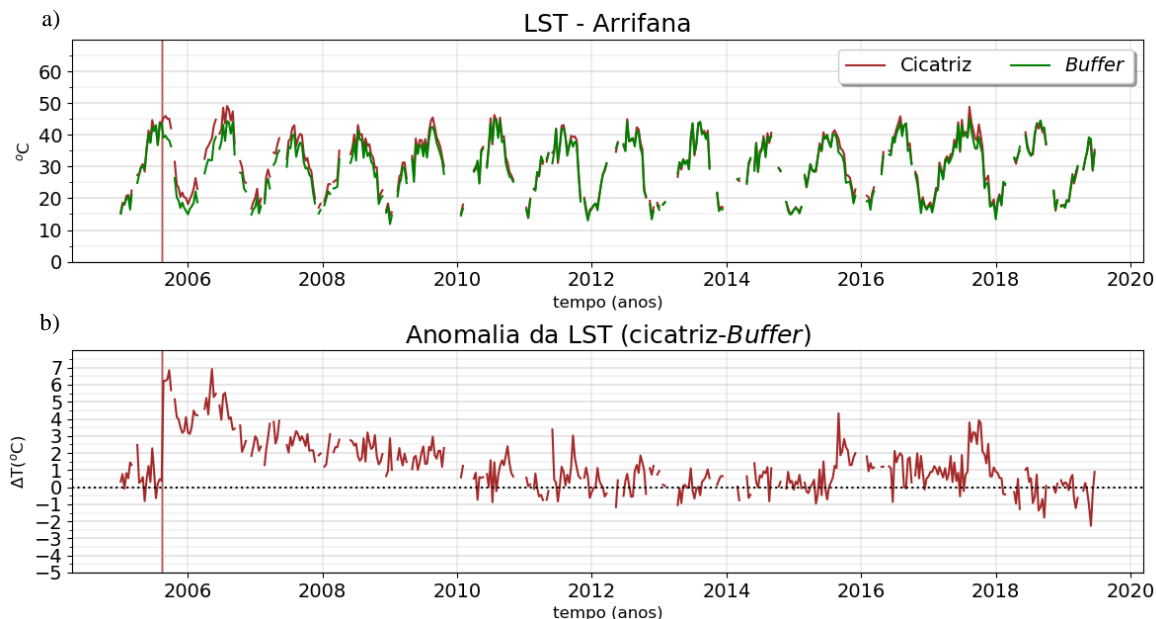


Figura 8.1 - a) Série temporal completa dos máximos das décadas da LST (°C) para o incêndio de Arrifana (janeiro 2004 a junho de 2019) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). b) Série temporal da anomalia da LST (pixéis da cicatriz - buffer), para o mesmo período. As barras a vermelho assinalam a data do incêndio: 19/08/2005.

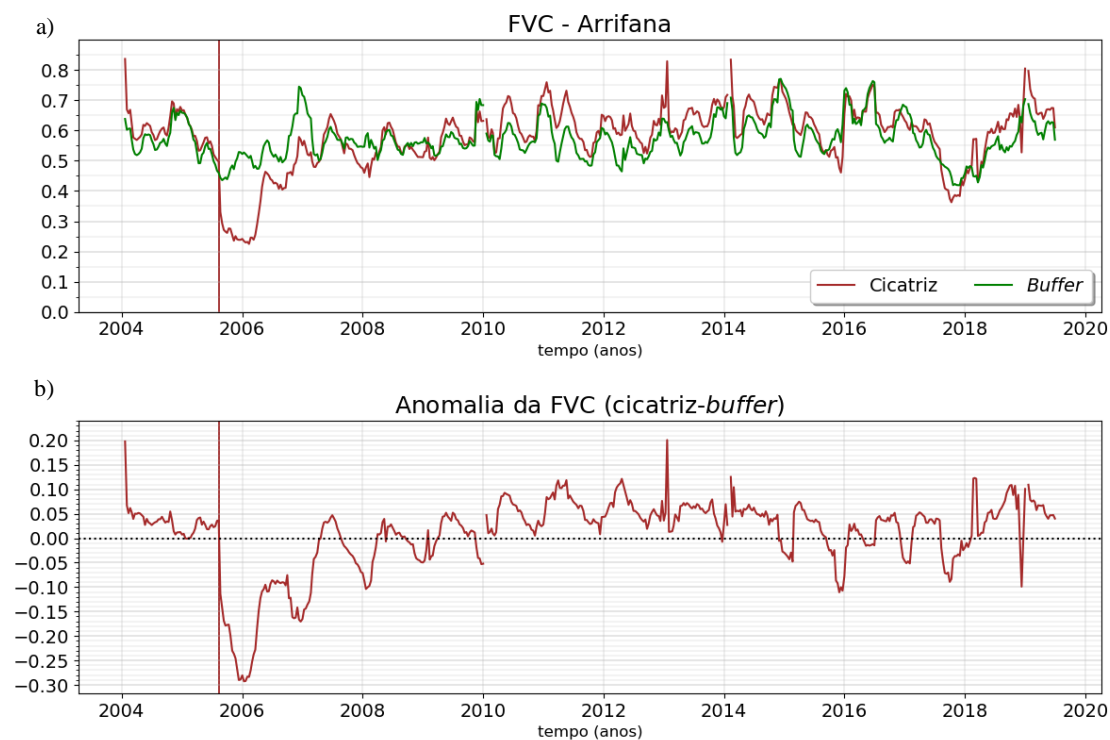


Figura 8.2 - a) Série temporal completa das medianas das décadas de FVC para o incêndio de Arrifana (janeiro 2004 a junho de 2019) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). b) Série temporal da anomalia da FVC (pixéis da cicatriz - buffer), para o mesmo período. As barras a vermelho assinalam a data do incêndio: 19/08/2005.

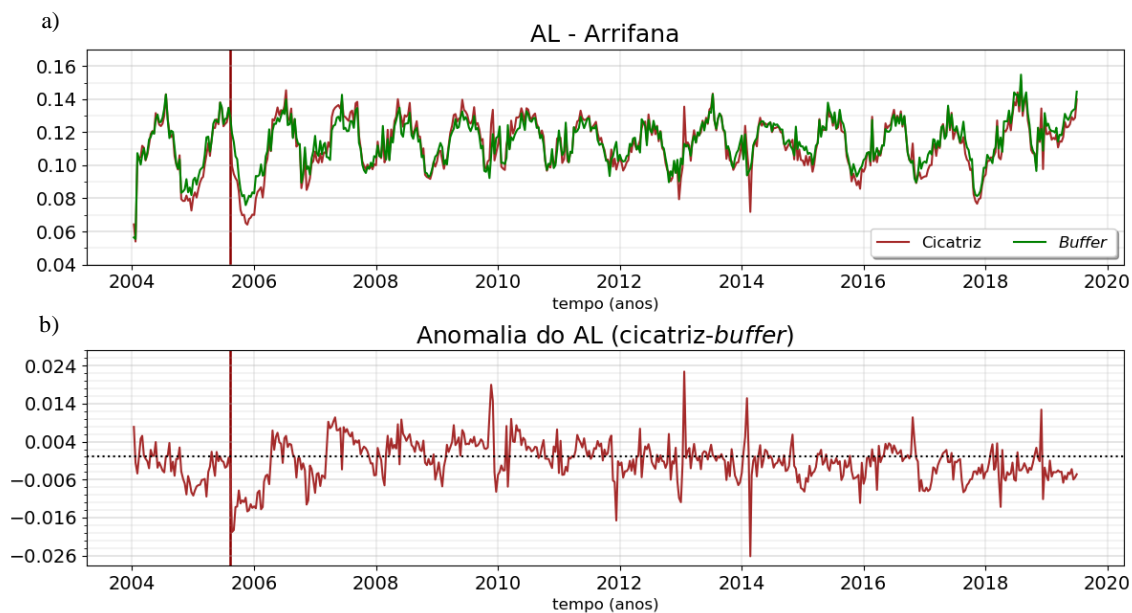


Figura 8.3 - a) Série temporal completa das medianas das décadas de AL para o incêndio da Serra do Caldeirão (janeiro 2004 a junho de 2019) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). b) Série temporal da anomalia de AL (pixéis da cicatriz - buffer), para o mesmo período. As barras a vermelho assinalam a data do incêndio: 19/08/2005.

8.3) Séries temporais completas dos produtos para o incêndio de Catraia

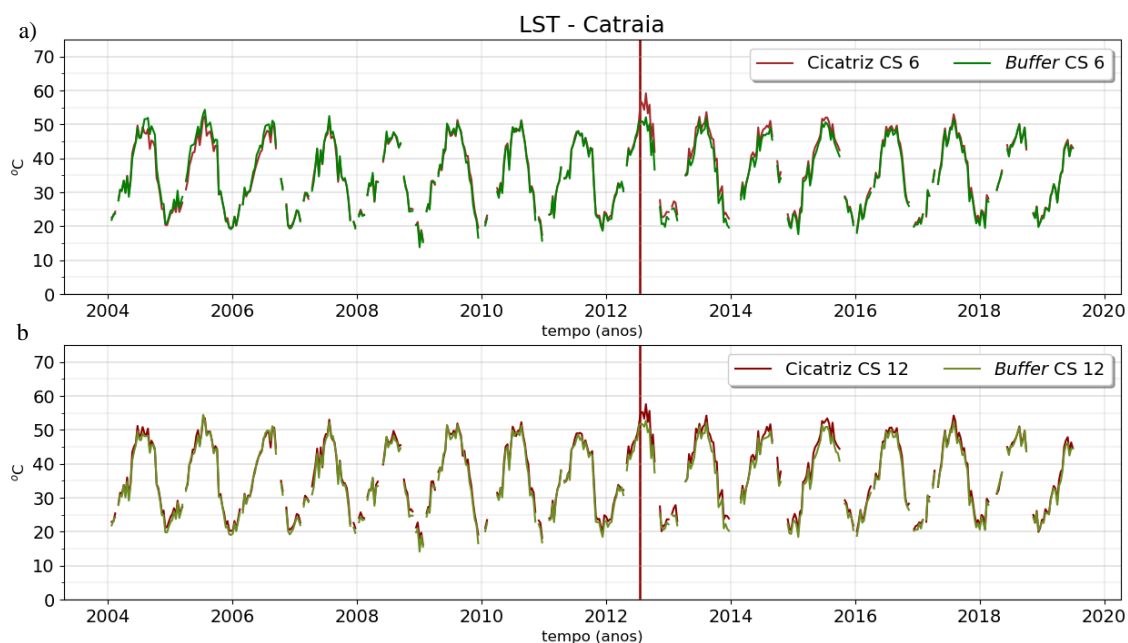


Figura 8.4 - a) Série temporal completa dos máximos das décadas da LST (°C) para o incêndio de Catraia (janeiro 2004 a junho de 2019) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde), com classe de cobertura de solo CS 6 (a) e classe CS 12 (b). As barras a vermelho assinalam as datas do incêndio: 26/07/2004 e 18/07/2012.

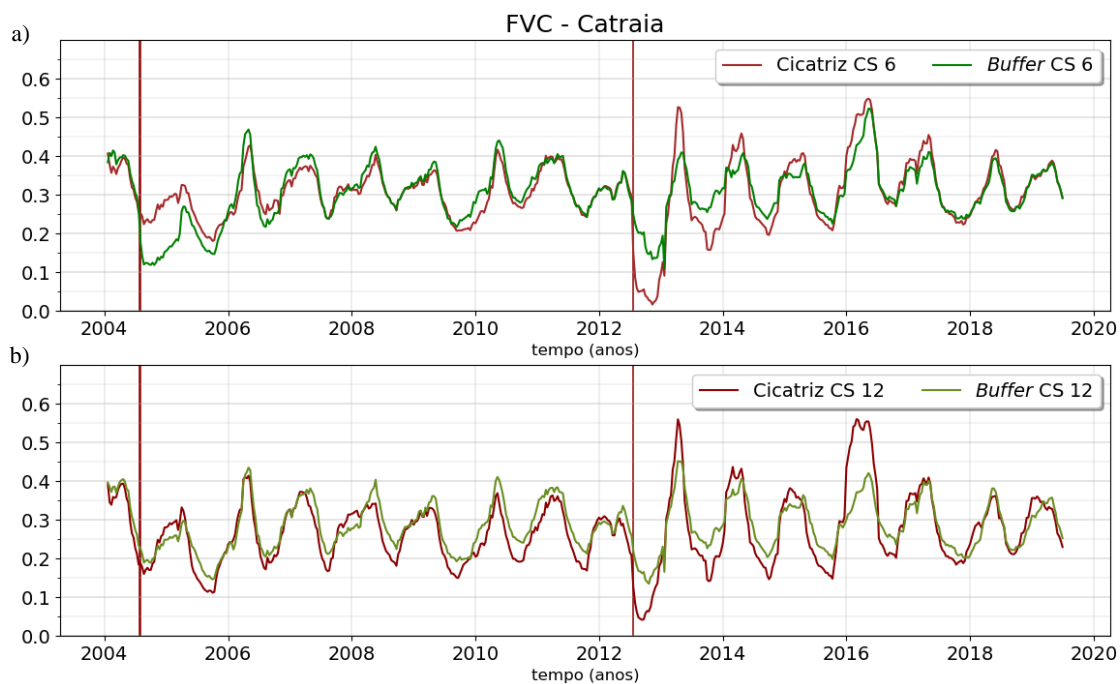


Figura 8.5 - a) Série temporal completa das medianas das décadas de FVC para o incêndio de Catraia (janeiro 2004 a junho de 2019) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde), com classe de cobertura de solo CS 6 (a) e classe CS 12 (b). As barras a vermelho assinalam as datas dos incêndios: 26/07/2004 e 18/07/2012.

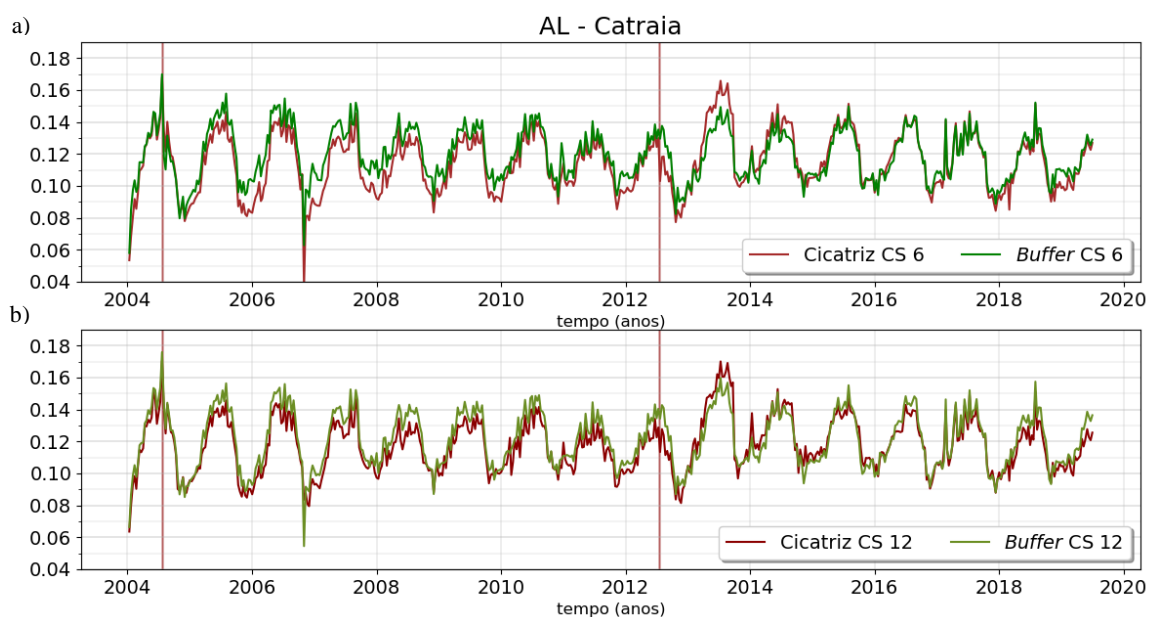


Figura 8.6 - a) Série temporal completa das medianas das décadas de AL para o incêndio de Catraia (janeiro 2004 a junho de 2019) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde), com classe de cobertura de solo CS 6 (a) e classe CS 12 (b). As barras a vermelho assinalam as datas dos incêndios: 26/07/2004 e 18/07/2012.

8.4) Séries temporais completas dos produtos para o incêndio de Pedrógão Grande

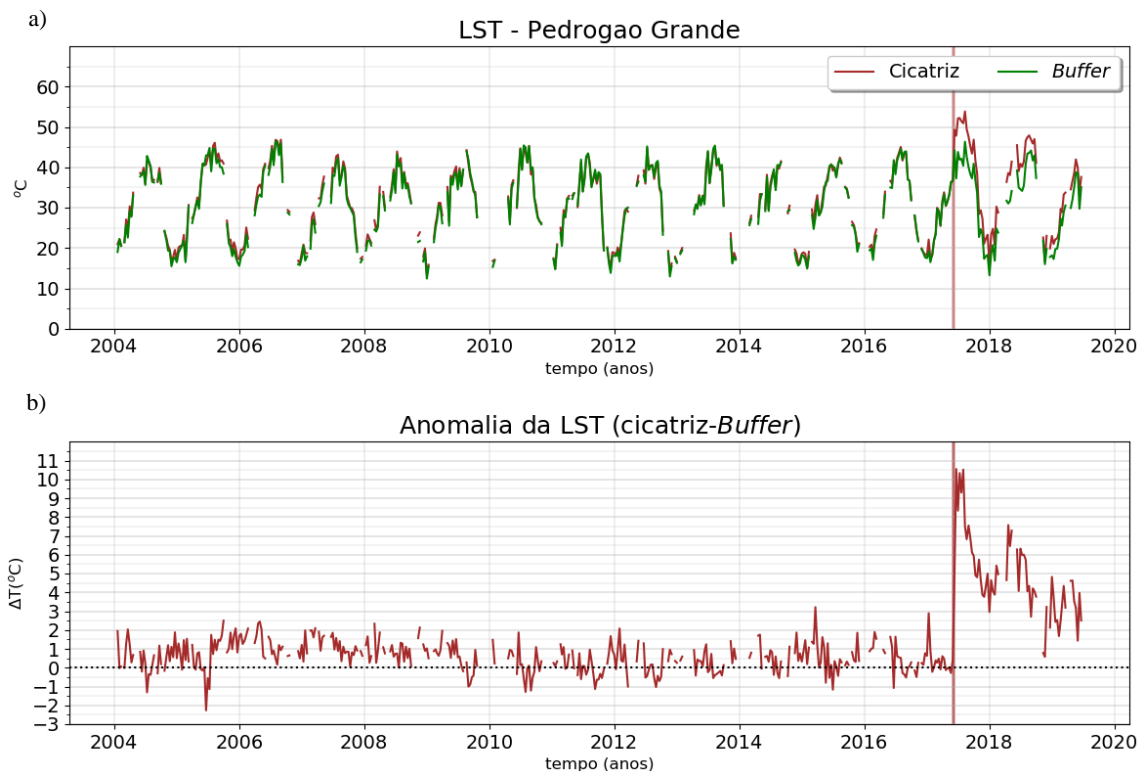


Figura 8.7 - a) Série temporal completa dos máximos das décadas da LST (°C) para o incêndio de Pedrógão Grande (janeiro 2004 a junho de 2019) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). **b)** Série temporal da anomalia da LST (pixéis da cicatriz - buffer), para o mesmo período. As barras a vermelho assinalam a data do incêndio: 15/06/2017.

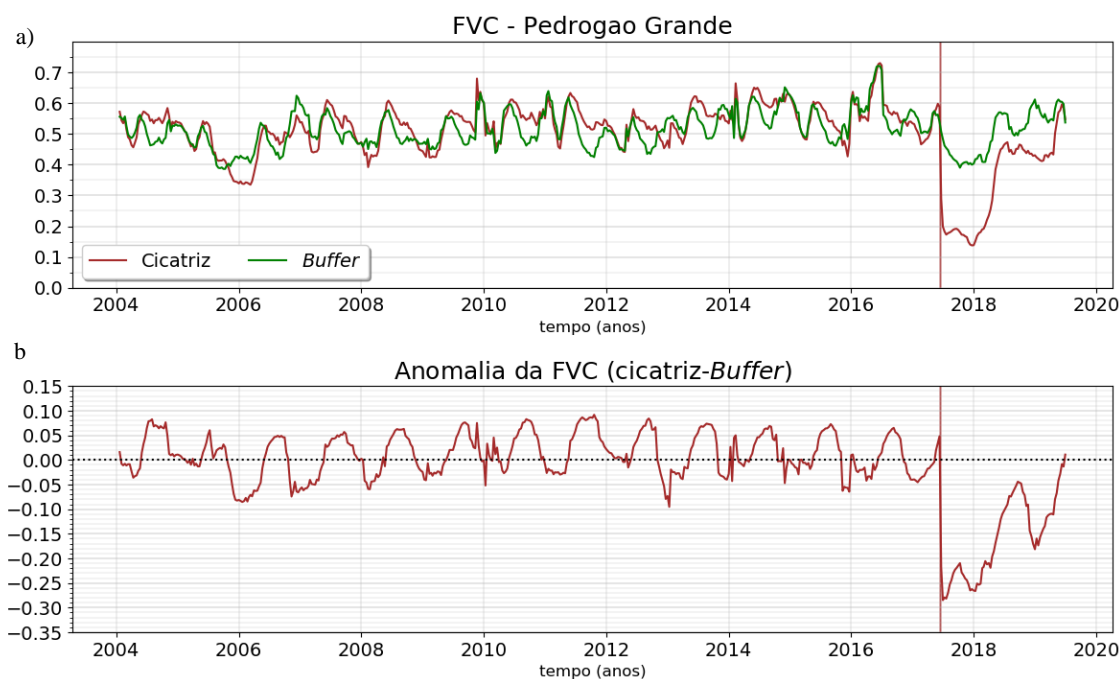


Figura 8.8 - a) Série temporal completa das medianas das décadas de FVC para o incêndio de Pedrógão Grande (janeiro 2004 a junho de 2019) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). **b)** Série temporal da anomalia da FVC (cicatriz-Buffer), para o mesmo período.

anomalia da FVC (pixéis da cicatriz - buffer), para o mesmo período. As barras a vermelho assinalam a data do incêndio: 15/06/2017.

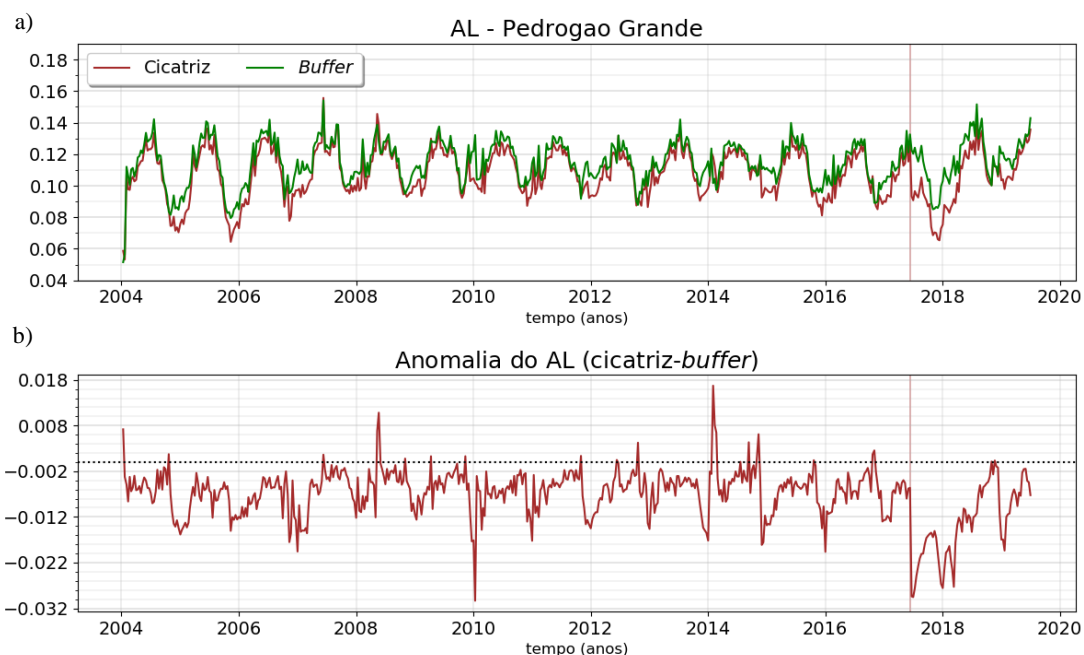


Figura 8.9 - a) Série temporal completa das medianas das décadas de AL para o incêndio de Pedrogão Grande (janeiro 2004 a junho de 2019) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). b) Série temporal da anomalia do AL (pixéis da cicatriz - buffer), para o mesmo período. As barras a vermelho assinalam a data do incêndio: 15/06/2017.

8.5) Séries temporais completas dos produtos para o incêndio de Pataias

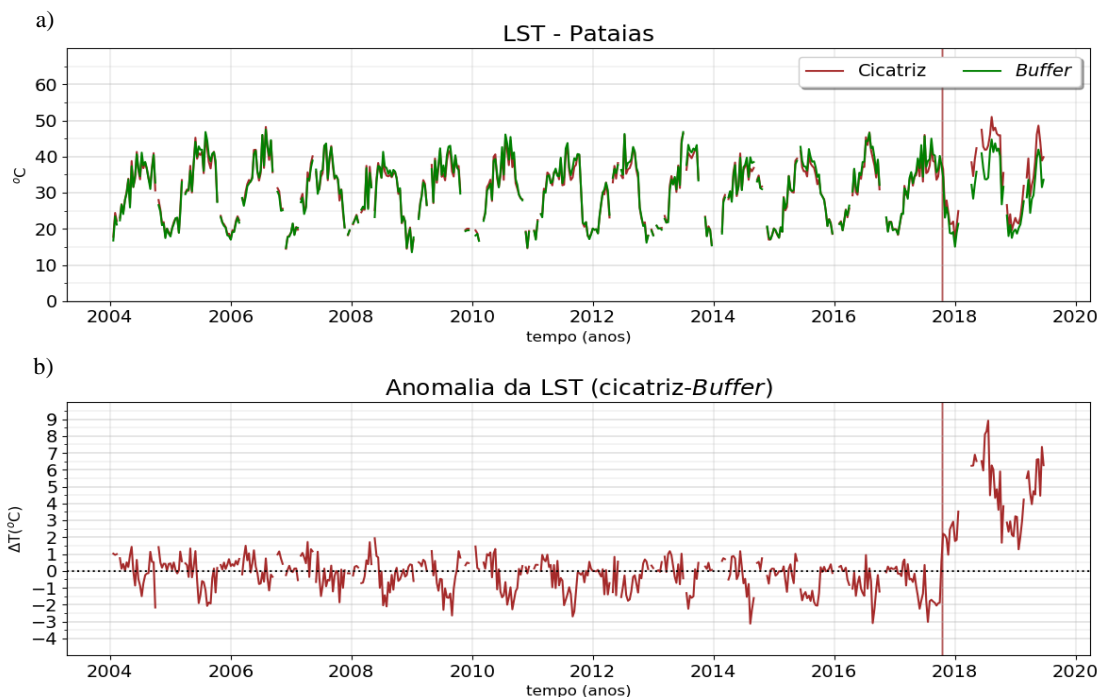


Figura 8.10 - a) Série temporal completa dos máximos das décadas da LST (°C) para o incêndio de Pataias (janeiro 2004 a junho de 2019) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). b) Série temporal da anomalia da

LST (pixéis da cicatriz - buffer), para o mesmo período. As barras a vermelho assinalam a data do incêndio: 15/10/2017.

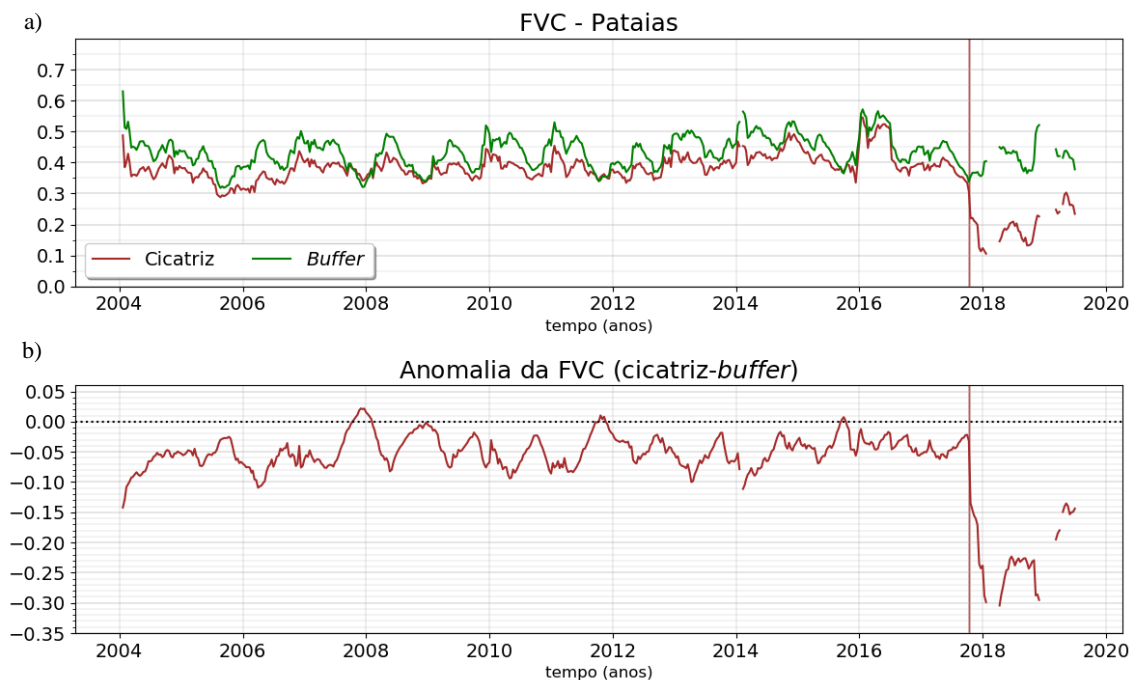


Figura 8.11 - a) Série temporal completa das medianas das décadas de FVC para o incêndio de Pataias (janeiro 2004 a junho de 2019) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). b) Série temporal da anomalia da FVC (pixéis da cicatriz - buffer), para o mesmo período. As barras a vermelho assinalam a data do incêndio: 15/10/2017.

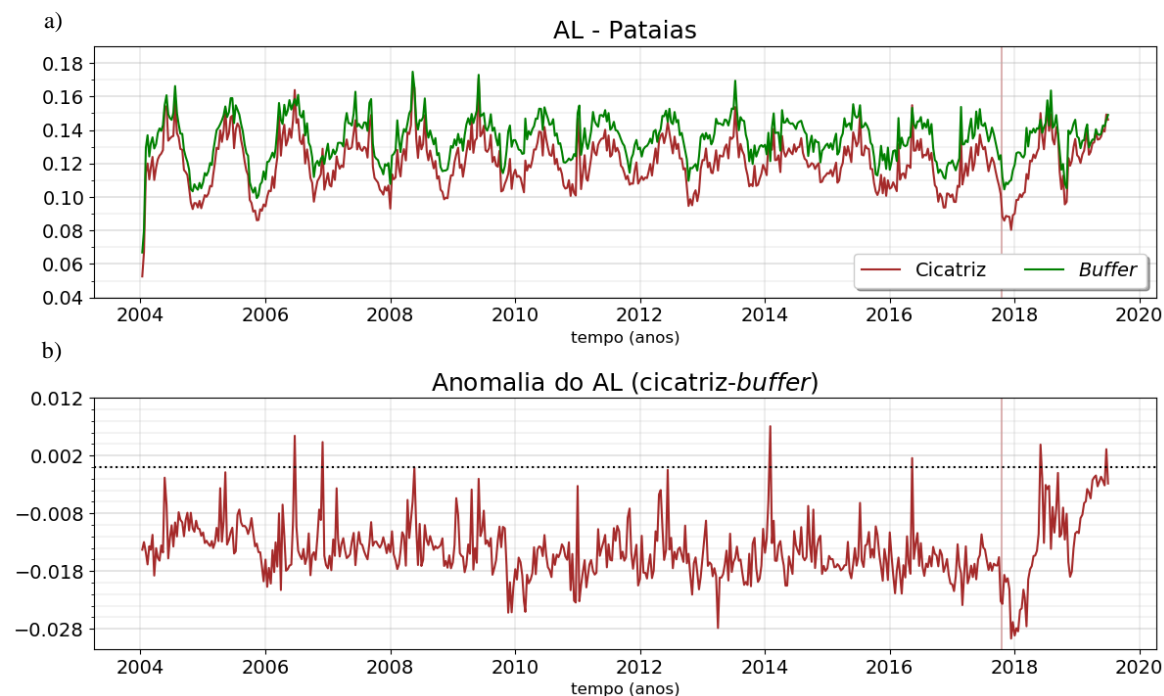


Figura 8.12 - a) Série temporal completa das medianas das décadas de AL para o incêndio de Pataias (janeiro 2004 a junho de 2019) para os pixéis da cicatriz (a vermelho) e do buffer (a verde). b) Série temporal da anomalia do AL (pixéis da cicatriz - buffer), para o mesmo período. As barras a vermelho assinalam a data do incêndio: 15/10/2017.

8.6) Classificação da cobertura do solo segundo o projeto CCI-LC

Tabela 8.2 - Sistema de classificação da cobertura do solo segundo o projeto CCI-LC. Adaptado de ESA, 2017.

Value	Label	Color
0	No Data	
10	Cropland, rainfed	
11	Herbaceous cover	
12	Tree or shrub cover	
20	Cropland, irrigated or post-flooding	
30	Mosaic cropland (>50%) / natural vegetation (tree, shrub, herbaceous cover) (<50%)	
40	Mosaic natural vegetation (tree, shrub, herbaceous cover) (>50%) / cropland (<50%)	
50	Tree cover, broadleaved, evergreen, closed to open (>15%)	
60	Tree cover, broadleaved, deciduous, closed to open (>15%)	
61	Tree cover, broadleaved, deciduous, closed (>40%)	
62	Tree cover, broadleaved, deciduous, open (15-40%)	
70	Tree cover, needleleaved, evergreen, closed to open (>15%)	
71	Tree cover, needleleaved, evergreen, closed (>40%)	
72	Tree cover, needleleaved, evergreen, open (15-40%)	
80	Tree cover, needleleaved, deciduous, closed to open (>15%)	
81	Tree cover, needleleaved, deciduous, closed (>40%)	
82	Tree cover, needleleaved, deciduous, open (15-40%)	
90	Tree cover, mixed leaf type (broadleaved and needleleaved)	
100	Mosaic tree and shrub (>50%) / herbaceous cover (<50%)	
110	Mosaic herbaceous cover (>50%) / tree and shrub (<50%)	
120	Shrubland	
121	Evergreen shrubland	
122	Deciduous shrubland	
130	Grassland	
140	Lichens and mosses	
150	Sparse vegetation (tree, shrub, herbaceous cover) (<15%)	
151	Sparse tree (<15%)	
152	Sparse shrub (<15%)	
153	Sparse herbaceous cover (<15%)	
160	Tree cover, flooded, fresh or brakish water	
170	Tree cover, flooded, saline water	
180	Shrub or herbaceous cover, flooded, fresh/saline/brakish water	
190	Urban areas	
200	Bare areas	
201	Consolidated bare areas	
202	Unconsolidated bare areas	
210	Water bodies	
220	Permanent snow and ice	