

**Reconstituição da erupção de 2014/2015 do vulcão do
Fogo (Cabo Verde) através de imagens de detecção remota**

Vasco de Pina Aresta Branco Miranda

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Geológica e de Minas

Orientadores:

Professor Doutor Pedro Miguel Berardo Duarte Pina

Doutora Sandra Isabel das Neves Heleno da Silva

Júri

Presidente: Professora Doutora Maria Teresa da Cruz Carvalho

Orientador: Professor Doutor Pedro Miguel Berardo Duarte Pina

Vogal: Professora Doutora Carla Andreia da Silva Mora

Mai de 2018

Declaração

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

Agradecimentos

Para a realização deste trabalho, foi notável o apoio de família, amigos e professores, que merecem reconhecimento.

Em primeiro lugar, agradeço aos meus pais pelo apoio e formação que me deram ao longo dos anos, inculcando-me os valores e proporcionando-me as ferramentas para chegar onde me encontro hoje.

À minha namorada, que me acompanhou e apoiou durante todo o meu percurso universitário, com amizade e respeito.

Aos meus amigos, pela companhia, amizade e sábios conselhos sem os quais não teria sido possível a minha realização académica ou pessoal.

Aos meus professores que, desde sempre, me guiaram, ensinaram e dotaram de espírito crítico, essencial para o trabalho científico. Em particular, ao Doutor Pedro Pina e Doutora Sandra Heleno pela orientação da qual resulta o presente trabalho.

Aos meus colegas, que embora sejam já referidos no agradecimento aos meus amigos, merecem relevo adicional por comigo terem “sobrevivido” ao árduo caminho académico com empenho e boa disposição.

Ao Laboratório de Tecnologias de Informação de Minas, sítio onde nos últimos anos passei mais tempo do que em casa e me proporcionou momentos de estudo e descontração.

A todos os autores, cineastas e artistas cujas obras me inspiraram, com particular relevo para os que se dedicam ao género da ficção científica que, desde novo, me fascina e me levou à escolha de uma área científica.

Esta dissertação insere-se nas actividades de investigação desenvolvidas no projecto ‘FIRE-Vulcão do Fogo: Investigação multidisciplinar da erupção de 2014’ (PTDC/GEO-GEO/1123/2014) financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia.

Resumo

Uma erupção vulcânica é um evento ligado à libertação de calor, gases e material do interior da Terra e que é facilmente detectável em certas regiões do espectro electromagnético, nomeadamente nas regiões térmicas infravermelho. Assim, estes eventos podem ser estudados através da aquisição de imagens de detecção remota térmica e do uso dos princípios que a regem.

Um evento vulcânico pode ter impactos globais mas representa um risco acrescido para as populações e bens na sua vizinhança, oferecendo também uma maior compreensão dos eventos dinâmicos da Terra. O estudo da vulcanologia pretende, por isso, conhecer o fenómeno e prever o seu comportamento, na óptica da mitigação do risco.

Em Novembro de 2014, originou-se um episódio eruptivo na ilha do Fogo em Cabo Verde que duraria 78 dias e que causou danos materiais às populações locais.

Neste trabalho pretende-se fazer um estudo reconstitutivo da erupção 2014/2015 do vulcão da ilha do Fogo, utilizando imagens de detecção remota com elevada resolução temporal. Para tal, desenvolveu-se uma metodologia baseada em imagens MODIS e algoritmos de detecção de *hot spots* através da determinação do limiar fixo mais adequado no índice de anomalia térmica MODVOLC.

Analisaram-se os resultados da aplicação da metodologia quanto à capacidade de descrever o historial de intensidade eruptiva ao longo do período da erupção (análise temporal) e da localização dos *hot spots* detectados em relação a imagens com resolução espacial superior (análise espacial). Por último, verificou-se que o método não produzia falsos alarmes de *hot spots* para datas não eruptivas (análise de contexto). O limiar fixo mais adequado foi escolhido através da análise integrada dos resultados das três análises, resultando no limiar optimal de - 0.82 para descrever o fenómeno à escala regional.

Palavras-chave: Fogo, detecção remota térmica, detecção de *hot spots*, NTI, limiar fixo.

Abstract

A volcanic eruption is an event in which heat, gases and molten rock are released, being a phenomenon easily detected through analysis of certain regions of the electromagnetic spectrum, namely the thermal wavelengths. Therefore, these phenomena can be studied through the acquisition of thermal remotely sensed imagery and its principles.

A volcanic event can cause global effects, being especially hazardous to the nearby population. However, it also provides a better understanding of the Earth's dynamic events, so the study of these phenomena has in sight the prediction of its behavior, in order to mitigate the risk.

On November 23rd 2014, there was a volcanic eruption on the volcano of Fogo Island, Cape Verde. It lasted 78 days and caused damage to goods and infrastructures.

This work aims to reconstitute the 2014-2015 Fogo Island volcanic eruption, through the use of very high temporal resolution remotely sensed imagery. To that end, a methodology was developed based on fixed threshold hot spot detection algorithms that use MODIS imagery, like MODVOLC.

The results of the application of this methodology were evaluated by the capability of describing the eruption throughout the eruptive period (temporal analysis), and the location of the identified hot spots in comparison to the lava's location in high resolution images (spatial analysis). Lastly, it was verified that the method did not produce false hot spot identification in the non-eruptive period (context analysis). The fixed threshold was determined through the integrated study of the three analyses, culminating on the optimal threshold of -0.82 to describe the phenomenon in the regional scale.

Keyword: Fogo, thermal remote sensing, hot spot detection, NTI, fixed threshold.

Índice

Resumo	vii
Abstract	viii
Índice	ix
Índice de Tabelas	xi
Índice de Figuras	xi
1. Introdução	1
1.1. Objectivos e motivação	2
1.2. Organização do documento	3
2.Revisão do Estado da Arte	5
2.1. Detecção remota térmica	5
2.1.1. Espectro electromagnético	5
2.1.2. Princípios da detecção remota térmica aplicada à vulcanologia	6
2.1.3. Características dos sensores utilizados na detecção remota térmica	8
2.1.4. Comparação entre sensores relevantes para o trabalho	9
2.2 Vulcanismo da ilha do Fogo	12
2.2.1. Breve história do vulcanismo da ilha	14
2.2.2. Estudos no âmbito da detecção remota térmica que abordam a erupção de 2014/2015	15
2.3. Metodologias	16
2.3.1. Detecção visual de <i>hot spots</i>	16
2.3.2. Algoritmos de detecção automática de <i>hot spots</i> vulcânicos	16
2.3.3. Desempenho dos algoritmos de detecção de <i>hot spots</i>	17
3. Metodologia	21
3.1. Pré-selecção de dados	23
3.2. Desenvolvimento da metodologia	24

4. Resultados e Discussão.....	29
4.1 Pré-seleção de dados	29
4.2 Resultados da Análise Temporal	31
4.3 Resultados da Análise Espacial	43
4.4 Resultados da Análise de Contexto.....	58
5. Conclusões e trabalhos futuros	63
6. Referências bibliográficas.....	65
Anexo A.....	67
Anexo A. 1 – Dados adquiridos referentes ao período da erupção:	68
Anexo A.2 – Dados adquiridos referentes ao período não eruptivo:.....	70
Anexo B.....	71
Anexo B. 1 – Dados referentes à efusividade e a contagem de pixels identificados como termicamente anómalos para cada um dos limiares de estudo:.....	72

Índice de Tabelas

Tabela 1- Regiões do espectro electromagnético segundo o comprimento de onda (adaptado de Harris, 2013)	6
Tabela 2 - Resoluções espaciais e temporais dos satélites	11
Tabela 3 - número de dados identificados para o período eruptivo (23/11/2014 a 08/02/2015) para cada fonte.....	29
Tabela 4 – Resultados de identificação de <i>hot spots</i> resultantes da aplicação de cada limiar de estudo nas 54 datas com imagens de qualidade aceitável.	39
Tabela 5 – Pares de imagens utilizados na análise espacial do método	45

Índice de Figuras

Figura 1 - Erupção do Pico do Fogo (composição colorida das bandas 7-6-5 do satélite Landsat8_OLI captada a 24-11-2014)	1
Figura 2 - Destruição da Portela (fotografia captada por Theo Lautrey, http://ovga.centrosciencia.azores.gov.pt/noticia/vulc%C3%A3o-do-fogo-cabo-verde-lavas-amea%C3%A7am-o-per%C3%ADmetro-florestal-de-monte-velha)	2
Figura 3 - Curvas de Planck para um corpo negro a temperaturas entre -50 e 1200°C (Harris, 2013)	7
Figura 4 - Posicionamento e largura das bandas dos 4 sensores analisados em função do comprimento de onda e das regiões do espectro elecgtromagnético.....	10
Figura 5 - Arquipélago de Cabo Verde: 1. Santo Antão, 2. São Vicente, 3. Santa Luzia, 4. São Nicolau, 5. Sal, 6. Boa Vista, 7. Maio, 8. Santiago, 9. Fogo, 10. Brava (adaptado de Vieira et al., 2016).....	12
Figura 6 – Regiões de interesse para o estudo (adaptado de Vieira et al., 2016); P – Portela; B – Bangaeira;	13
Figura 7 – 7 a) Esquematização teórica do abatimento do topo do edifício vulcânico da ilha do Fogo e subsequente formação da “Chã das Caldeiras” (adaptado de Ribeiro, 1998); 7 b) esquematização teórica do abatimento lateral e formação da Caldeira (adaptado de Day et al. 1999).....	Erro! Marcador não definido.
Figura 8 - Formação de ilhas através de um hot spot (http://www.buzzle.com/articles/volcanic-eruptions-what-causes-volcanoes-to-erupt.html).....	15
Figura 9 - Organigrama da metodologia desenvolvida.....	22
Figura 10 – a) NTI da imagem MODIS captada no dia 09/12/2014; b) aplicação do limiar -0.80 no histograma do NTI da imagem MODIS captada no dia 09/12/2014 (setas indicam pixels que excedem o limiar); NTI da imagem MODIS captada no dia 09/12/2014 após aplicação do limiar de -0.80.	25
Figura 11 - a) Imagem de referência Landsat8_OLI captada a 23/10/2014 (composição colorida das bandas 7-6-5); b) contorno vectorial de referência do programa Copernicus;	27
Figura 12 - Imagens existentes para cada sensor com imagens com tamanho de pixel de 30 m x 30 m, durante os 78 dias da erupção.	30

Figura 13 - Imagem MODIS captada no dia 26/11/2014: a) Composição colorida das bandas 9, 22 e 32; b) NTI; c) limiar de -0.78 (pontos a vermelho); d) limiar de -0.80; e) limiar de -0.82; f) limiar de -0.84;	32
Figura 14 – Efusividade da lava durante a erupção do Fogo 2014-2015, baseado em dados do SEVIRI, disponibilizados pelo Hotvolc e processados por Mathieu Gouhier	34
Figura 15 - NTI das imagens referentes à ilha do Fogo captadas pelo sensor MODIS nas noites dos dias: a) 15/12/2014, imagem de qualidade inferior. b) 28/11/2014, imagem de qualidade média. c) 03/12/2014, imagem de qualidade superior.	35
Figura 16 – Comparação entre o número de pixels identificados como termicamente anómalos após a aplicação do limiar de -0.78 com os valores máximos diários de efusividade ao longo do período eruptivo.....	36
Figura 17 - Comparação entre o número de pixels identificados como termicamente anómalos após a aplicação do limiar de -0.80 com os valores máximos diários de efusividade ao longo do período eruptivo.....	37
Figura 18 - Comparação entre o número de pixels identificados como termicamente anómalos após a aplicação do limiar de -0.82 com os valores máximos diários de efusividade ao longo do período eruptivo.....	37
Figura 19 - Comparação entre o número de pixels identificados como termicamente anómalos após a aplicação do limiar de -0.84 com os valores máximos diários de efusividade ao longo do período eruptivo.....	38
Figura 20 – Diagrama de dispersão do valor médio de efusividade com o número de pixels termicamente anómalos identificados através da aplicação do limiar de -0.78..	40
Figura 21 - Diagrama de dispersão do valor médio de efusividade com o número de pixels termicamente anómalos identificados através da aplicação do limiar de -0.80..	41
Figura 22 - Diagrama de dispersão do valor médio de efusividade com o número de pixels termicamente anómalos identificados através da aplicação do limiar de -0.82..	41
Figura 23 - Diagrama de dispersão do valor médio de efusividade com o número de pixels termicamente anómalos identificados através da aplicação do limiar de -0.84..	42
Figura 24 – Variação das correlações entre o valor médio de efusividade diária com o número de pixels identificados como termicamente anómalos para a aplicação de cada um dos 4 limiares de estudo.....	43
Figura 25 - NTI da imagem MODIS captada no dia 26/11/2014 com sobreposição do contorno vectorial da ilha: (a) antes do co-registo; b) após co-registo.	44
Figura 26 - Comparação do posicionamento dos pixels identificados como termicamente anómalos para os 4 limiares de estudo com a posição das lavas na imagem de resolução espacial superior:a) NTI da imagem MODIS captada no dia 24/11/2014; b) imagem Landsat8_OLI captada no dia 24/11/2014 (composição colorida das bandas 7-6-5) com indicação do posicionamento das lavas; c) aplicação do limiar de -0.78; d) aplicação do limiar de -0.80; e) aplicação do limiar de -0.82; f) aplicação do limiar de -0.84;	47
Figura 27 - Comparação do posicionamento dos pixels identificados como termicamente anómalos para os 4 limiares de estudo com a posição das lavas na imagem de resolução espacial superior: a) NTI da imagem MODIS captada no dia 16/12/2014; b) imagem EO1-ALI captada no dia 16/12/2014 (composição colorida das bandas 5-4-3) com indicação do posicionamento das lavas; c) aplicação do limiar de -0.78; d) aplicação do limiar de -0.80; e) aplicação do limiar de -0.82; f) aplicação do limiar de -0.84;	48
Figura 28 - Comparação do posicionamento dos pixels identificados como termicamente anómalos para os 4 limiares de estudo com a posição das lavas na imagem de resolução espacial superior: a) NTI da imagem MODIS captada no dia	

18/01/2015; b) imagem EO1-Hyperion captada no dia 16/01/2015 (composição colorida das bandas 200-80-30) com indicação do posicionamento das lavas; c) aplicação do limiar de -0.78; d) aplicação do limiar de -0.80; e) aplicação do limiar de -0.82; f) aplicação do limiar de -0.84;	49
Figura 29 - Contornos vectoriais das escoadas de lava com indicação (setas) de zonas onde houve mudança em relação ao contorno vectorial anterior em:	51
Figura 30 - Contornos vectoriais dos limites das escoadas de lava com indicação (setas) de zonas onde houve mudança em relação ao contorno vectorial anterior, em:	52
Figura 31 - Comparação do posicionamento dos pixels identificados como termicamente anómalos para os 4 limiares de estudo com a posição do contorno vectorial das lavas para a mesma data de 26/11/2014: (a) NTI; (b) limiar -0.78; (c) limiar -0.80; (d) limiar -0.82; (e) limiar -0.84.	54
Figura 32 - Comparação do posicionamento dos pixels identificados como termicamente anómalos para os 4 limiares de estudo com a posição do contorno vectorial das lavas para a mesma data de 25/12/2014: (a) NTI; (b) limiar -0.78; (c) limiar -0.80; (d) limiar -0.82; (e) limiar -0.84.	55
Figura 33 - Comparação do posicionamento dos pixels identificados como termicamente anómalos para os 4 limiares de estudo com a posição do contorno vectorial das lavas para a mesma data de 28/12/2014 : (a) NTI; (b) limiar -0.78; (c) limiar -0.80; (d) limiar -0.82; (e) limiar -0.84.	56
Figura 34 - NTI da imagem MODIS captada no dia: (a) 06/02/2014; b) 10/02/2014; c) 05/09/2016; d) 09/10/2016;	59
Figura 35 - NTI da imagem MODIS captada no dia: (a) 22/11/2014; b) 09/02/2015;	60
Figura 36 - NTI da imagem MODIS captada no dia 09/02/2015 com a aplicação do limiar de -0.87	60
Figura 37 - a) NTI da imagem MODIS captada no dia 19/02/2014; b) NTI da imagem MODIS captada no dia 26/02/2015; b) NTI da imagem MODIS captada no dia 05/03/2015;	61

1. Introdução

No dia 23 de Novembro de 2014 teve início um episódio eruptivo no vulcão da ilha do Fogo, em Cabo Verde, que duraria 78 dias, terminando a 8 de Fevereiro de 2015 (González et al., 2015; Vieira et al., 2016; Bagnardi et al., 2016). A erupção teve diversas fases, desde uma fase efusiva, estromboliana e explosiva. A erupção teve origem numa fissura no Pico do Fogo, perto do local onde se originou a anterior erupção em 1995. No decorrer da erupção houve a libertação de gases, cinzas, piroclastos, fontes de lava, escoadas de lava (bem visíveis logo no dia seguinte ao início do evento como se mostra na figura 1) e explosões ocasionais (Vieira et al., 2016). Este evento levou ao encerramento de várias infraestruturas importantes, nomeadamente o aeroporto da ilha, devido às extensas plumas de cinzas atmosféricas. As escoadas de lava, que cobriram uma área total de cerca de 4.5 km² da Chã da Caldeira, destruíram vários terrenos agrícolas, estradas e infraestruturas do parque natural do Fogo. Duas aldeias, Portela e Bangaeira, foram destruídas pelas escoadas (figura 2) resultando na evacuação de cerca de mil pessoas que viviam nas zonas afectadas (Cappello et al., 2016). Apesar dos danos materiais, não houve perda de vidas humanas.

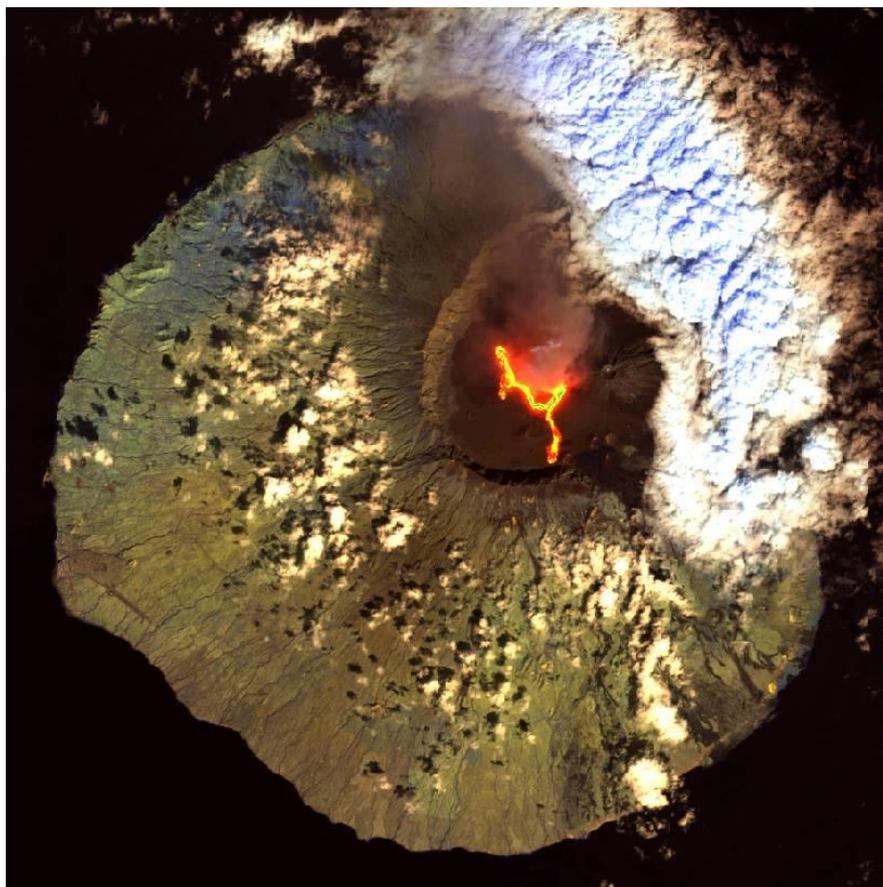


Figura 1 - Erupção do Pico do Fogo (composição colorida das bandas 7-6-5 do satélite Landsat8_OLI captada a 24-11-2014)



Figura 2 - Destruição da Portela (fotografia captada por Theo Lautrey, <http://ovga.centrosciencia.azores.gov.pt/noticia/vulc%C3%A3o-do-fogo-cabo-verde-lavas-amea%C3%A7am-o-per%C3%ADmetro-florestal-de-monte-velha>)

1.1. Objectivos e motivação

Um evento vulcânico representa um risco para pessoas e bens na sua proximidade, embora forneça também conhecimento sobre os processos dinâmicos da Terra (Murphy et al., 2013). Assim, tendo em conta o acontecimento descrito previamente, propõe-se a realização de um estudo reconstitutivo do período da erupção através de dados que possibilitem um acompanhamento diário ou quase-diário. Deste modo, espera-se aumentar o conhecimento existente sobre a erupção e desenvolver uma metodologia que possa ser usada em conjunto com as outras existentes de modo a fornecer informação adicional relevante. Por último, pretende-se que, futuramente, a metodologia desenvolvida possa ser usada numa monitorização integrada com outras metodologias que auxilie os estudos científicos e a acção dos mecanismos da protecção civil durante o evento eruptivo.

O trabalho proposto inicia-se pela recolha do maior número possível de imagens de detecção remota provenientes de diversos satélites que cubram o período da erupção numa base quase diária de modo a reconstituir a erupção. Pretende-se aplicar nas imagens seleccionadas uma metodologia que detecte *hot spots* ao longo do tempo, fazendo um acompanhamento da intensidade da erupção e localização das lavas. A metodologia deverá identificar inequivocamente *hot spots* na altura da erupção, pelo que será estudado o comportamento do método para datas fora do período eruptivo de forma a garantir que não existem falsas detecções.

1.2. Organização do documento

A dissertação possui um total de cinco capítulos. O presente capítulo (1. Introdução) faz um enquadramento do documento, do tema e dos objectivos. O segundo capítulo (2. Revisão do Estado de Arte) trata da revisão de conhecimentos necessários para o desenvolvimento e compreensão do trabalho, quer seja sobre a ciência de detecção remota, quer seja pelo enquadramento específico da região de estudo. No terceiro capítulo (3. Metodologia) é descrito o desenvolvimento da metodologia e os objectivos de cada etapa. No quarto capítulo (4. Resultados e discussão) apresentam-se os resultados da aplicação da metodologia e tecem-se considerações sobre os mesmos. Por último, o quinto capítulo (5. Conclusões e trabalhos futuros) consiste numa exposição das conclusões do trabalho desenvolvido e sugestão da direcção do trabalho futuro sobre o tema.

2.Revisão do Estado da Arte

2.1. Detecção remota térmica

Como referido, a ferramenta proposta para a reconstituição da erupção vulcânica da ilha do Fogo de 2014-2015 é a detecção remota térmica. Por isso, torna-se necessário descrever as zonas do espectro electromagnético que são relevantes neste contexto, uma vez que estas possuem nomenclatura e limites variados na literatura, apresentar os princípios básicos que fazem da detecção remota térmica uma ferramenta útil no estudo de vulcanismo terrestre e por último abordar as diferenças dos sensores que captam os dados necessários e comparar as suas diversas características.

2.1.1. Espectro electromagnético

A radiação electromagnética é criada pela interacção de partículas com carga com todos os objectos com temperatura acima do zero absoluto. A radiação electromagnética propaga-se através de ondas com duas componentes ortogonais entre si (uma representando o campo eléctrico, a outra o campo magnético) possuindo propriedades que são úteis na detecção remota, uma vez que estas podem ser usadas para obter informação sobre o objecto com o qual interagiram. Tais propriedades são: o comprimento de onda, a amplitude, a frequência e a energia (Dean e Jonathan, 2015).

A energia electromagnética é directamente proporcional à frequência e inversamente proporcional ao comprimento de onda. A totalidade das energias electromagnéticas possíveis constitui o espectro electromagnético, que é composto por diversas regiões que são amplamente consensuais quanto à nomenclatura e às suas fronteiras. No entanto, a região associada ao infravermelho é alvo de variadas nomenclaturas e definição de fronteiras (Dean e Jonathan, 2015). Assim sendo, existe a necessidade de explicitar quais as regiões do espectro electromagnético que se consideram neste trabalho e as suas fronteiras (Tabela 1). Neste trabalho seguiu-se a nomenclatura apresentada no livro de referência *Thermal Remote Sensing of Active Volcanos* (Harris, 2013).

Tabela 1- Regiões do espectro electromagnético segundo o comprimento de onda (adaptado de Harris, 2013)

Visível	VIS	0.4 a 0.7 μm
Infravermelho próximo	NIR	0.7 a 1.1 μm
Infravermelho de onda curta	SWIR	1.1 a 3.0 μm
Infravermelho médio	MIR	3.0 a 5.0 μm
Infravermelho térmico	TIR	5.0 a 20 μm

2.1.2. Princípios da detecção remota térmica aplicada à vulcanologia

A detecção remota térmica aplicada à vulcanologia assenta em dois princípios basilares: a Lei de Planck e a Lei de Wien (Steffke e Harris, 2011).

A lei de Planck, apresentada em 1901, descreve a radiância emitida (M) em função do comprimento de onda (λ) e a temperatura (T) para um corpo negro (Harris, 2013):

$$M(\lambda, T) = 2\pi hc^2 \lambda^{-5} \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (\text{Wm}^{-2}\text{m}^{-1})$$

(1)

Onde h é a constante de Planck ($6.6256 \times 10^{-34} \text{ J s}$), c é a velocidade da luz ($2.9979 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$) e k é a constante de Boltzmann ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$). Relacionando-se a radiância emitida com o comprimento de onda para várias temperaturas, é possível verificar que a emissividade de um corpo mais quente é sempre superior à emissividade de um corpo mais frio para o mesmo comprimento de onda, mas a diferença entre as emissividades é diferente dependendo do comprimento de onda (figura 3).

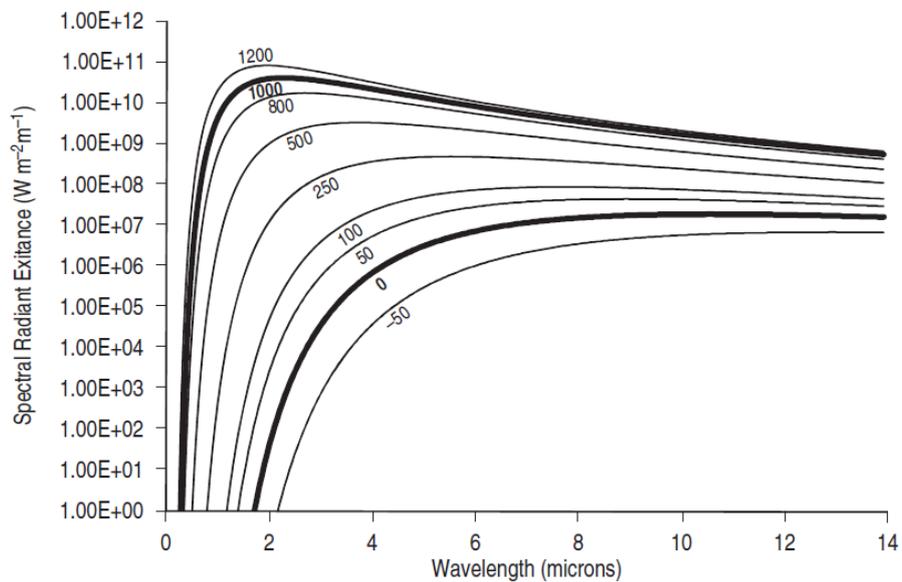


Figura 3 - Curvas de Planck para um corpo negro a temperaturas entre -50 e 1200°C (Harris, 2013)

Como se pode observar, estes resultados levam à formação de três ideias fundamentais (Harris, 2013):

- Para um determinado comprimento de onda, a radiância emitida por um corpo quente é superior à radiância emitida por um corpo frio.
- A diferença das radiâncias é maior para a região SWIR do que nas regiões do espectro com comprimento de onda superior.
- O máximo da radiância emitida é atingido para um comprimento de onda tanto menor, quanto maior for a temperatura.

Este último tópico leva à criação da lei de Wien, que traduz a relação entre o comprimento de onda onde se verifica a emissividade máxima (λ_{max}) e a temperatura (T) para um corpo negro:

$$\lambda_{max} = \frac{A}{T} (\mu m)$$

(2)

onde A é a constante de Wien ($2898 \mu m K$). Aplicando esta equação às temperaturas habituais da superfície terrestre e às temperaturas ligadas a eventos de vulcanismo, tem-se que (Harris, 2013):

- O pico para temperaturas médias da superfície terrestre encontra-se na região TIR;
- Para corpos à temperatura magmática (entre $1000^{\circ}C$ e $1200^{\circ}C$) o pico encontra-se localizado na região SWIR;

Através destes dois princípios, torna-se possível calcular a temperatura de um objecto através da sua emissividade para uma determinada banda usando a equação 1, e também explorar as diferenças do comportamento das emissividades para uma determinada temperatura e comprimento de onda. São estes princípios que são explorados pelas diversas metodologias propostas na literatura para o estudo dos eventos associados aos vulcões através de imagens de detecção remota. Como se verá adiante (capítulo 4), as informações obtidas pelos sensores nestas regiões do espectro electromagnético (SWIR e TIR), são a base dos algoritmos de detecção de *hot spots*.

2.1.3. Características dos sensores utilizados na detecção remota térmica

O estudo do vulcanismo terrestre que envolve o uso das práticas da detecção remota térmica recorre predominantemente a sensores instalados em satélites. Estes satélites possuem diversas características que os diferenciam e complementam (Pina, 2016).

Os satélites usados em detecção remota efectuam órbitas circulares ou elípticas à volta da Terra. Consoante o tipo de órbita estes podem ser classificados como sendo geoestacionários ou polares. Os satélites geoestacionários encontram-se localizados a grandes altitudes e são estacionários em relação ao planeta, tendo um período de rotação igual ao período de rotação da terra. Este tipo de satélites encontra-se geralmente associado a actividades de telecomunicações e meteorologia. Os satélites polares, por outro lado, encontram-se colocados a menores altitudes que os satélites geoestacionários (entre 100 a 1500 km) e efectuam órbitas que passam pelos polos. Estes satélites são geralmente heliosíncronos, uma vez que possuem sempre a mesma trajectória em relação ao Sol, sendo a Terra que roda.

Os sensores utilizados nos satélites de detecção remota podem medir a energia que ocorre naturalmente (energia solar), ou podem emitir energia para o objecto alvo, a fim de o analisar. Assim, os sensores podem ser classificados como passivos, caso não emitam energia, ou activos, caso emitam energia.

Os sensores podem ainda ser comparados entre si em função das suas resoluções. Existem 4 tipos de resolução a considerar na avaliação de um sensor: espectral, radiométrica, espacial e temporal.

A resolução espectral refere-se aos comprimentos de onda detectáveis pelo sensor, o tamanho das bandas e as regiões do espectro cobertas pelo sensor. Por outro lado a resolução radiométrica refere-se aos níveis de quantificação colectados pelo sensor (geralmente expresso em base binária). A resolução espacial refere-se à capacidade de distinguir pequenos objectos na imagem, o que está relacionado com o tamanho do pixel. Por fim, a resolução temporal refere-se ao tempo que leva um sensor a adquirir 2 imagens consecutivas para um mesmo lugar.

Tendo em conta estas características de um sensor, a escolha depende do estudo que se quer efectuar, uma vez que resoluções mais elevadas de um dos 4 tipos leva geralmente a uma menor resolução de um, ou mais, dos outros 3 tipos de resolução (como por exemplo: maior resolução espacial leva geralmente a uma menor resolução temporal). Há ainda que ter em conta questões como a acessibilidade das imagens, aquando da escolha do sensor. É por isso que neste trabalho se comparam as características de sensores cujas imagens são de acesso livre.

2.1.4. Comparação entre sensores relevantes para o trabalho

Os sensores comparados neste capítulo fornecem todos imagens de acesso livre e com interesse para o estudo de um evento de vulcanismo recorrendo à detecção remota, como se verá adiante em pormenor. Todos os satélites que contêm estes sensores possuem órbitas polares e todos os sensores considerados adquirem informação da superfície terrestre de forma passiva. As resoluções destes sensores são diferentes entre si podendo fornecer para o trabalho informações complementares, que não seriam possíveis apenas recorrendo a um único sensor. Os 4 sensores considerados são: EO1- Hyperion, EO1-ALI, Aqua MODIS e Landsat8_OLI.

Todos os sensores considerados possuem a capacidade de detectar a radiância na zona do espectro correspondente ao infravermelho (como se mostra na Figura 4), sendo por isso sensores de interesse na detecção remota térmica. No entanto nem todos conseguem detectar a radiância associada ao TIR (casos do EO1-ALI e do EO1-Hyperion).

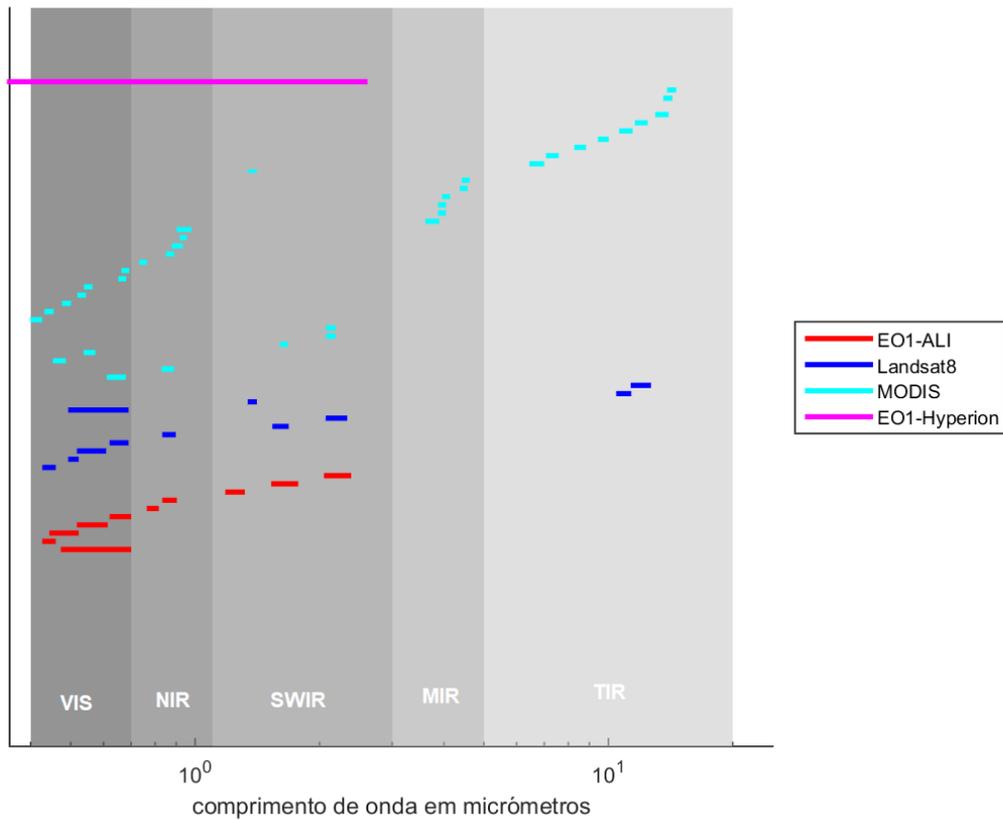


Figura 4 - Posicionamento e largura das bandas dos 4 sensores analisados em função do comprimento de onda e das regiões do espectro eletromagnético.

Como é possível observar na figura 4, o MODIS é o sensor que melhor cobre as zonas do visível e infravermelho. O Landsat8_OLI possui também bandas em todas as regiões do espectro relevantes para a detecção remota térmica, mas possui menor número de bandas. Os sensores do EO1 possuem uma boa cobertura até à zona do TIR, onde, no entanto, não possuem bandas. O sensor EO1-Hyperion possui 242 bandas, sendo o sensor considerado com maior número de bandas.

Os satélites possuem resoluções espaciais e temporais diferentes (tabela 2), o que possibilita a aquisição de imagens com diferentes níveis de pormenor, devido à resolução espacial, e em diferentes intervalos de tempo, devido à resolução temporal.

Tabela 2 - Resoluções espaciais e temporais dos satélites

Satélites	Nº de bandas	Resolução espacial	Resolução temporal
MODIS	29 (8-36)	1 km	Bidiária
	5 (3-7)	0.5 km	
	2 (1-2)	0.2 km	
Landsat8_OLI	8 MS	30 m	16 Dias
	1 PAN	15 m	
	2 TIR	100 m	
EO1- Hyperion	242 HS	30 m	Variável
EO1- ALI	7 MS	30 m	16 Dias
	1 PAN	10 m	

Como é também possível verificar na tabela 2, para certos satélites, as resoluções espaciais variam consoante as bandas, obtendo-se as melhores resoluções espaciais nas bandas pancromáticas (PAN).

O MODIS é o sensor com maior resolução temporal mas menor resolução espacial. O EO1-Hyperion é o sensor com maior número de bandas mas não possui bandas no TIR. O Landsat8_OLI possui o menor número de bandas mas estas encontram-se distribuídas por todas as regiões do infravermelho. Em suma, estes sensores foram escolhidos também pela capacidade de facultar dados de resoluções tão alargadas quanto possível. O facto de haver dados com alguma redundância não causa problema algum pois poderá permitir alguma fusão quando necessário. Este diversificado conjunto de informação será assim bastante mais útil na monitorização de um evento vulcânico, uma vez que a utilização de um único sensor levaria a uma compreensão mais limitada de uma actividade dessa natureza (Murphy et al., 2013).

Na realização do método deste trabalho foram também usados dados referentes ao sensor SEVIRI. No entanto, estes dados não foram usados directamente, tendo sido apenas usados os valores de efusividade calculados e fornecidos por Mathieu Gouhier com base num algoritmo desenvolvido para tal fim (Gouhier et al., 2012).

O SEVIRI é um sensor a bordo do satélite MSG (Meteosat Second Generation) que possui 12 bandas espectrais com resolução espacial de 1 km para a banda visível de alta resolução e 3 km para as bandas correspondentes ao infravermelho e às restantes bandas do vermelho. A resolução temporal deste instrumento é por outro lado bastante elevada e aproximadamente igual a 15 minutos, logo permitindo captar até um máximo de 96 imagens por dia (Schmid, 2000).

2.2 Vulcanismo da ilha do Fogo

A ilha do Fogo é uma de 10 ilhas que constituem o arquipélago de Cabo Verde (Figura 5). Encontra-se localizada a aproximadamente 600 km a Oeste da costa africana e possui forma circular com diâmetro médio de 30 km, (Vieira et al., 2016)., como se observa nas figuras 1 e 5.



Figura 5 - Arquipélago de Cabo Verde: 1. Santo Antão, 2. São Vicente, 3. Santa Luzia, 4. São Nicolau, 5. Sal, 6. Boa Vista, 7. Maio, 8. Santiago, 9. Fogo, 10. Brava (adaptado de Vieira et al., 2016)

A ilha do Fogo tem a forma de cone excêntrico, com declive mais acentuado no flanco Este. A cerca de 1700 m de altitude há uma zona plana com enchimento de lavas, Chã das Caldeiras, circundada por uma escarpa semicircular aberta na encosta Este com cerca de 1000m de altura, designada por Bordeira. Na Chã das Caldeiras ergue-se o cone eruptivo principal, o Pico do fogo, com altitude máxima de 2829 m (Heleno, 2003; Day et al., 1999).

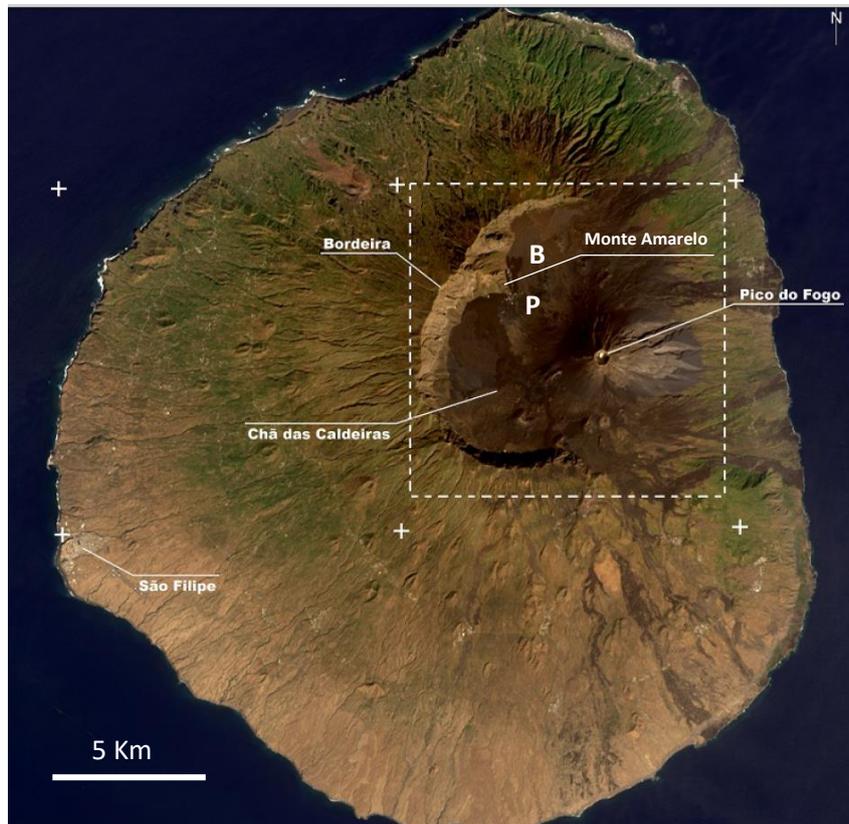


Figura 6 – Regiões de interesse para o estudo (adaptado de Vieira et al., 2016); P – Portela; B – Bangaeira;

Como referido anteriormente, a ilha do Fogo possui forma de cone excêntrico. Isso deve-se ao truncamento, que levou à formação de uma caldeira em forma de hemicírculo, localmente conhecida como Chã das Caldeiras (Heleno, 2003). Existem hipóteses contraditórias quanto à formação da Caldeira. Numa das hipóteses sugerida, a caldeira formou-se devido ao abatimento do cone, como é ilustrado na figura 7 a) (Ribeiro, 1998). No entanto, a hipótese actualmente mais consensual é a do colapso lateral do edifício vulcânico para Este (figura 7 b)) (Day et al., 1999; Heleno, 2013; Ramalho et al. 2015). A ilha do Fogo é a única ilha do arquipélago que tem o registo erupções históricas (Heleno, 2003), sendo o Pico do Fogo o vulcão mais activo do Atlântico Central (González et al., 2016).

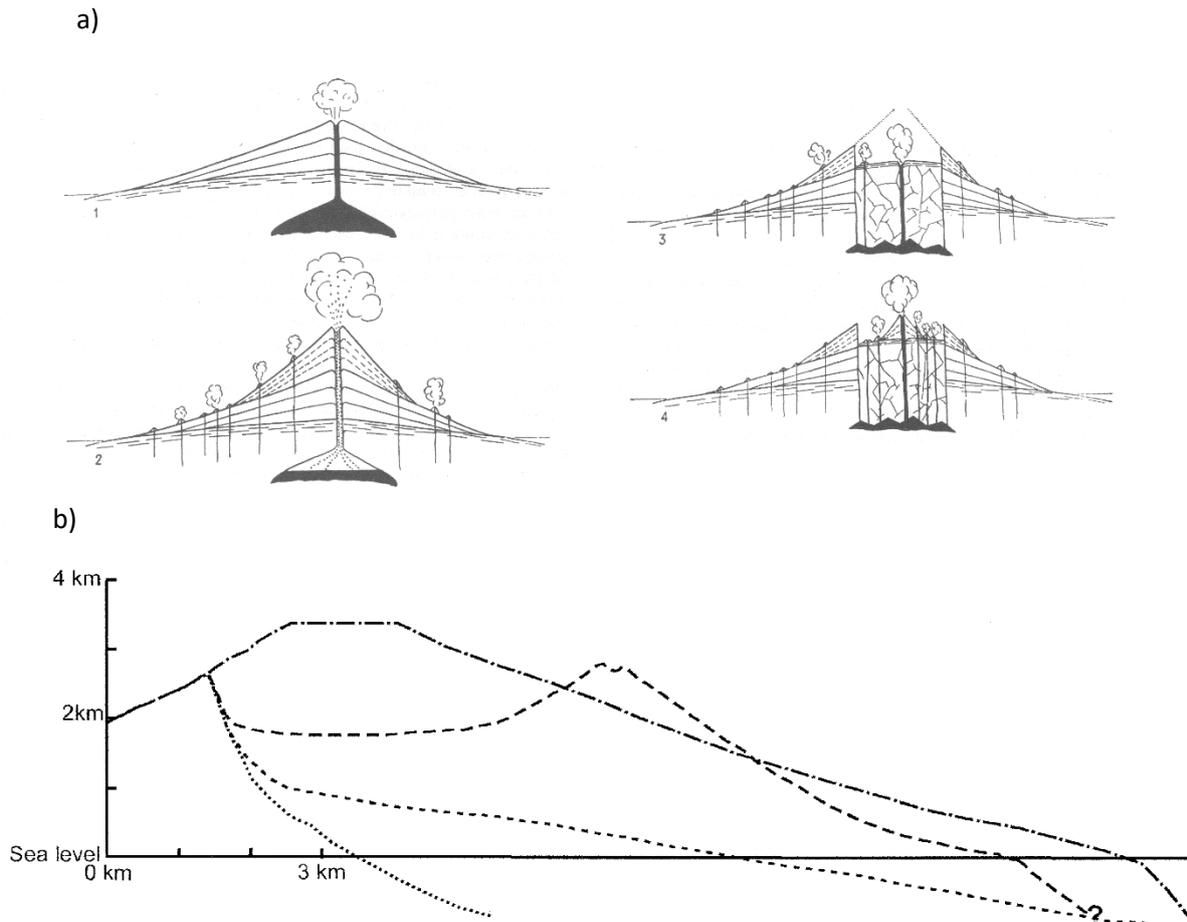


Figura 7 - a) Esquemática teórica do abatimento do topo do edifício vulcânico da ilha do Fogo e subsequente formação da “Chã das Caldeiras” (adaptado de Ribeiro, 1998); b) esquematização teórica do abatimento lateral e formação da Caldeira (adaptado de Day et al. 1999).

2.2.1. Breve história do vulcanismo da ilha

A ilha do Fogo, assim como as outras ilhas que constituem o arquipélago de Cabo Verde, tem origem num evento vulcânico intraplaca ligado à existência de um *hot spot* vulcânico. Neste caso, a formação das ilhas está ligada a um ponto quente no manto inferior com velocidade de deriva menor que a velocidade da placa tectónica (Heleno, 2003). Assim, a formação das ilhas resulta da passagem da placa tectónica por cima do *hot spot* como é exemplificado na Figura 8.

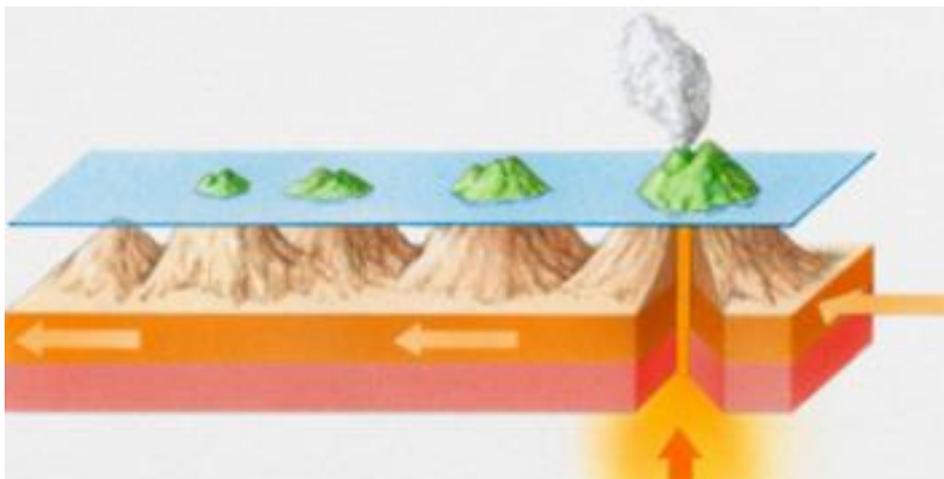


Figura 8 - Formação de ilhas através de um hot spot
(<http://www.buzzle.com/articles/volcanic-eruptions-what-causes-volcanoes-to-erupt.html>)

O arquipélago de Cabo Verde encontra-se na placa tectónica Africana, placa esta que se movimentou muito pouco nos últimos 30 Ma em relação ao *hot spot*. Este facto, aliado à localização próxima do polo de rotação da placa com a posição do arquipélago, leva à posição fixa do *hot spot* e é potencialmente a razão pela qual o arquipélago possui uma forma de aglomerado de ilhas, ao invés de uma cadeia linear (Ramalho, 2011).

Desde o início da sua colonização, em meados do séc. XV, existe o registo histórico de pelo menos 27 erupções, havendo uma erupção a cada 20 anos em média (Vieira et al., 2016; Day et al., 1999; Cappello et al., 2016). Previamente à erupção de 2014/2015, a última erupção ocorreu em 1995.

2.2.2. Estudos no âmbito da detecção remota térmica que abordam a erupção de 2014/2015

Na sequência da erupção de 2014/2015, foram desenvolvidos alguns trabalhos baseados em dados de detecção remota para estudar o evento. Dos artigos publicados apenas dois abordam questões relacionadas com detecção remota térmica, sendo os trabalhos desenvolvidos por Cappello et al., (2016) e Vieira et al., (2016). O número reduzido de trabalhos neste tema dever-se-á à recentidade do fenómeno mas também à dificuldade em analisar adequadamente o evento com imagens de baixa resolução espacial.

No trabalho desenvolvido por Cappello et al., (2016), os autores modelizam as escoadas de lava ao longo dos dias da erupção através do uso dos algoritmos HOTSAT e MAGFLOW e de imagens de

diversos satélites combinados com dados obtidos no terreno. No trabalho desenvolvido por Vieira et al., (2016), os autores avaliam a variação da temperatura da superfície terrestre durante a erupção através de quatro imagens obtidas pelo sensor Landsat8_OLI e comparam os resultados com imagens do sensor MODIS para as mesmas datas. Ou seja, apesar de utilizarem algumas das imagens que serão utilizadas neste trabalho, só o fazem muito parcialmente e com outros objectivos,

2.3. Metodologias

A ocorrência de *hot spots* vulcânicos na superfície terrestre pode ser detectada em imagens de detecção remota através de uma análise meramente visual (baseados em critérios subjectivos) ou através de algoritmos automáticos (suportado por critérios objectivos).

2.3.1. Detecção visual de *hot spots*

A detecção visual de um *hot spot* vulcânico é possível através da repetida observação de uma determinada região geográfica, para diferentes condições de iluminação solar (dia ou noite) e atmosféricas, entre outras. Para tal, o operador necessita de larga experiência, obtida através do estudo de uma grande quantidade de imagens do mesmo vulcão alvo. Assim, o operador desenvolve uma poderosa capacidade empírica para detectar *hot spots* (Harris, 2013).

2.3.2. Algoritmos de detecção automática de *hot spots* vulcânicos

O elevado número de dados resultantes da passagem diária de vários satélites e o número de eventos de vulcanismo na superfície da terra levaria a um enorme dispêndio de tempo e recursos humanos, se fossem tratados manualmente. Assim, diversos algoritmos foram, e continuam a ser, criados para, de forma automática, detectar, localizar e acompanhar a evolução de *hot spots* ligados a eventos vulcânicos. O desempenho destes algoritmos foi largamente testado na literatura por diversas comparações com a detecção manual de determinados eventos vulcânicos.

Até à presente data, os algoritmos de detecção criados podem-se enquadrar em 3 principais tipos, dependendo da forma como se identificam os *hot spots*: limiar fixo, contextuais e temporais. Existem

também alguns algoritmos que abordam o problema de uma perspectiva mista, integrando elementos de mais do que um tipo de algoritmo. Este tipo de algoritmos designam-se por algoritmos híbridos (Copola et al., 2014).

Um algoritmo com limiar fixo é um algoritmo que avalia individualmente cada pixel de uma imagem e verifica se a radiância nas bandas MIR e/ou TIR é termicamente anómala (Steffke and Harris, 2011; Copola et al., 2014). O principal algoritmo deste tipo é o MODVOLC desenvolvido por Wright et al., (2002) no Instituto de Geofísica e Planetologia do Havai (Hawai'i Institute of Geophysics and Paleontology). É um algoritmo não interativo que, a partir de imagens nocturnas (de forma a minimizar o contributo da radiação solar) com baixa resolução espacial (tamanho de pixel igual 1km) provenientes do MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiator), avalia pixel-a-pixel se este é termicamente anómalo e disponibiliza os dados na internet em tempo quase real (em <http://modis.higp.hawaii.edu>). (Wright et al., 2004). A versão final do algoritmo ficou operacional em Fevereiro de 2000.

Um algoritmo contextual é um algoritmo que avalia a radiância de cada pixel, comparando-a com a radiância dos pixels na sua vizinhança, para o classificar como anómalo ou não (Steffke e Harris, 2011) (Copola et al., 2014). O principal algoritmo deste tipo é o VAST desenvolvido por Higgins and Harris (1997). O VAST (Volcanic Anomaly Software) é um algoritmo que usa imagens com baixa resolução espacial (tamanho de pixel igual a 1.09 km) provenientes do sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer). O algoritmo foi também adaptado para funcionar com imagens de outros satélites como o GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) e o MODIS (Steffke e Harris, 2011).

Um algoritmo temporal é um algoritmo que avalia a radiância de cada pixel através da comparação com a média das radiâncias do mesmo pixel para um determinado intervalo de tempo e classifica o pixel como anómalo ou não de acordo com o limiar (Steffke e Harris, 2011; Copola et al., 2014). O principal algoritmo deste tipo é o RAT ou RST desenvolvido por Di Bello et al., (2004). O RST (Robust Satellite Technique) é um algoritmo que usa imagens com baixa resolução espacial (tamanho de pixel igual a 1.09 km) provenientes do sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer).

2.3.3. Desempenho dos algoritmos de detecção de *hot spots*

O desempenho destes algoritmos depende do número de pixels que são correctamente classificados como anómalos, o número de pixels que são termicamente anómalos, mas não são identificados, e o

número de pixels que são falsamente identificados como anómalos. Outro tipo de critérios poderão também ser utilizados, por exemplo, os de natureza logística como os tempos de computação, a quantidade de dados que tem que estar disponível para que o algoritmo seja capaz de funcionar e a qualidade desses dados.

Geralmente o número de pixels anómalos identificados é tanto maior quanto o número de pixels falsamente identificados como anómalos (Steffke e Harris, 2011). Os algoritmos basilares de cada um dos três tipos funcionam normalmente bem, tendo em conta o propósito para o qual foram desenhados (Coppola et al., 2014).

No caso do MODVOLC, este foi desenhado para, de uma forma quase em tempo real, poder detectar *hot spots* à escala global e com a mínima ocorrência de falsos positivos. Assim sendo, foca-se em *hot spots* de maior dimensão, podendo não identificar *hot spots* de menor dimensão. O limiar baixo (-0.80) no NTI (Normalized Thermal Index) que concede esta precisão ao algoritmo pode, noutros casos, ser uma abordagem excessivamente conservadora (Koeppen e Wright, 2010).

O VAST foi criado para detectar intensos valores anómalos causados por escoadas de lava. No estudo comparativo entre os três tipos de algoritmos aplicados aos mesmos eventos vulcânicos, realizado por Steffke e Harris (2011), este algoritmo é o que detecta o maior número de *hot spots*, mas também é o que sofre da maior ocorrência de falsos positivos.

Por último, o RST consegue detectar *hot spots* comparando o valor obtido com a radiância expectável em cada pixel. Embora esta abordagem produza bons resultados para certos tipos de vulcanismo, tende a não identificar *hot spots* se estes forem de natureza persistente e continuada no tempo. Outra desvantagem é a grande quantidade de dados de que o algoritmo necessita para poder funcionar, uma vez que precisa de ter os registos da radiância para cada pixel ao longo do tempo (Koeppen e Wright, 2010; Steffke e Harris, 2011).

Como é normal, nenhum dos algoritmos atinge desempenhos máximos de 100%, nem pode ser completamente substituído em detrimento de outro. O MODVOLC funciona melhor à escala global, dando informações fiáveis de *hot spots* emergentes, enquanto o VAST e o RST funcionam melhor a uma escala regional, havendo maior contextualização da informação mas também mais dados para analisar.

Por fim, sucessivos trabalhos vão propondo melhorias ou integrações de ideias presentes em vários tipos de algoritmos, resultando em algoritmos híbridos, que tentam melhorar o desempenho de um ponto de vista geral, ou para um evento de vulcanismo singular. Estas melhorias são propostas por diversos autores como Koeppen e Wright, (2010) e Coppola et al., (2014).

3. Metodologia

Tendo em vista os objectivos apresentados no capítulo 1, a metodologia que foi concebida será descrita em detalhe neste capítulo. Esta divide-se em duas instâncias, sendo a primeira a pré-selecção dos dados e a segunda o trabalho desenvolvido sobre os mesmos de modo a resolver o problema proposto.

Na elaboração desta metodologia pretendeu-se reconstituir o período eruptivo do do evento de 2014/2015 do vulcão do Fogo de forma a obter informações para o maior número de datas possível, fazendo o seu acompanhamento quase dia a dia. Para tal, as principais imagens usadas no método desenvolvido são imagens de sensores com alta resolução temporal e com baixa resolução espacial. Ainda assim, estudou-se a forma de obter a melhor qualidade possível na informação espacial resultante da aplicação do método. Por último, verificou-se se o método desenvolvido era adequado para descrever períodos não eruptivos do vulcão, não produzindo falsos positivos na identificação de *hot spots* vulcânicos.

Assim, elaboraram-se três análises complementares no desenvolvimento da metodologia. Chamou-se a cada um destes passos análise temporal, análise espacial e análise do contexto (não confundir com os algoritmos contextuais e espaciais de detecção de *hot spots*). A metodologia pode então ser esquematizada da maneira apresentada na figura 9.

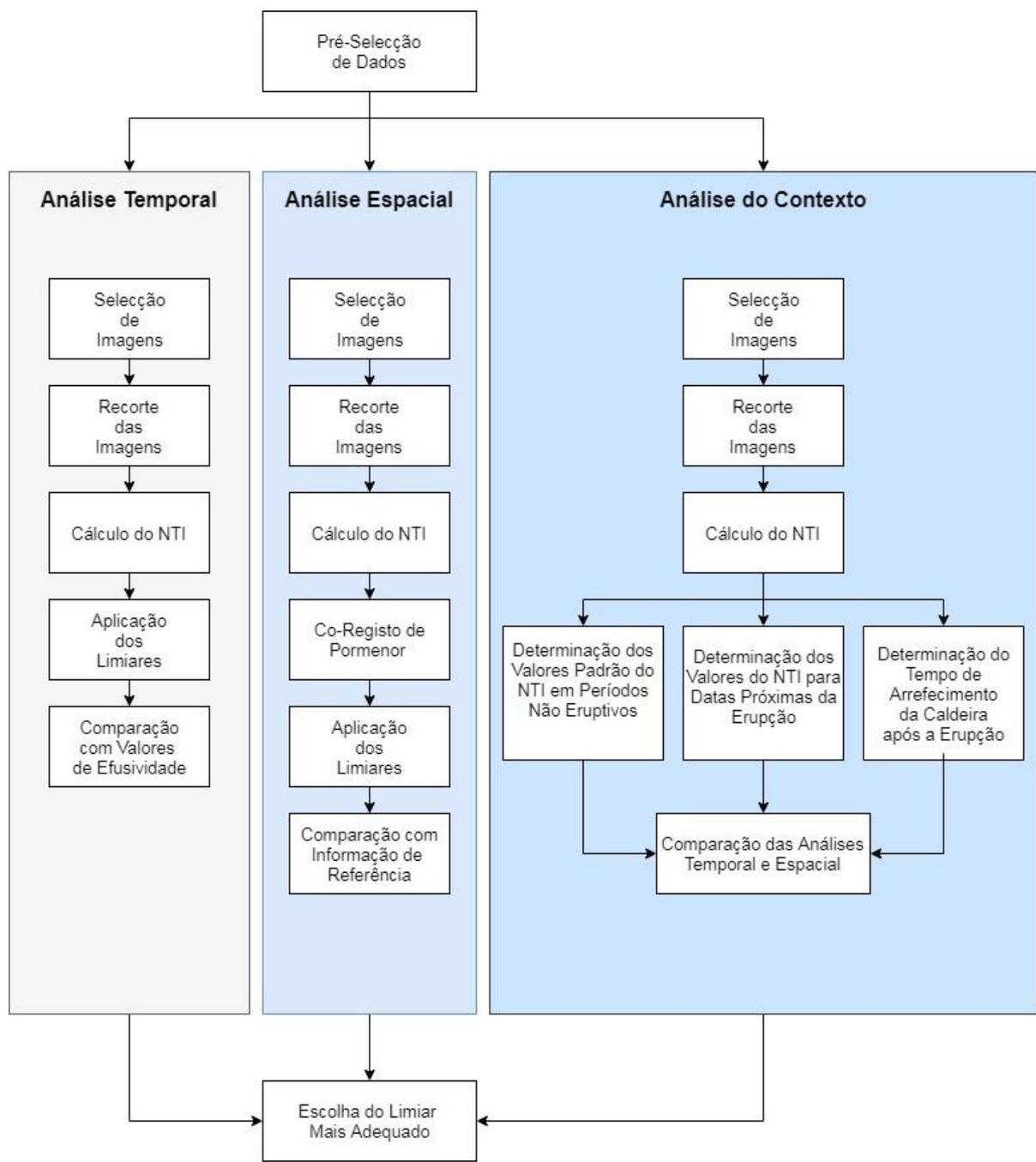


Figura 9 - Organograma da metodologia desenvolvida

3.1. Pré-selecção de dados

No decorrer do período da erupção, múltiplos sensores registaram informações, capturaram imagens e realizaram medições de parâmetros afectos ao fenómeno. A natureza das informações obtidas difere entre si nos parâmetros medidos, resolução espacial ou espectral (no caso das imagens de satélite), acessibilidade ou ainda na periodicidade da sua obtenção.

Uma erupção vulcânica caracteriza-se por um fenómeno no qual há libertação de calor, quer seja pelas escoadas de lava quer pelas plumas atmosféricas. Sendo o foco do estudo uma erupção, pretendeu-se adquirir imagens de satélite que compreendessem a ilha do Fogo, e mais especificamente a sua caldeira (Chã da Caldeira), durante o período da mesma e ainda, que estas imagens possuíssem informação espectral nos intervalos do espectro referentes ao visível e infravermelho. Existem múltiplos satélites que cumprem os critérios procurados.

Pesquisaram-se todas as imagens nocturnas nível 1B calibradas provenientes do MODIS Aqua. Estas imagens encontram-se disponíveis publicamente, e são fornecidas pelo *site* da NASA dedicado (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>). As imagens estão georreferenciadas, embora com pouca precisão, e os ficheiros são do formato HDF (*Hierarchical Data Format*). Estas imagens foram convertidas para ficheiros de formato DAT através da ferramenta 'MODIS Conversion Toolkit' para facilitar a sua manipulação no *software* ENVI.

Foram também pesquisadas imagens de maior resolução espacial, também disponíveis publicamente através do *site* GLOVIS da United States Geological Survey (<https://glovis.usgs.gov/>). Estas imagens são provenientes dos sensores: Landsat8_OLI, EO1- ALI e EO1- Hyperion. As imagens estão georreferenciadas com precisão, e os ficheiros são do tipo TIFF. Estas imagens foram também convertidas para ficheiros de tipo DAT para facilitar a sua manipulação no *software* ENVI.

Obteve-se também a totalidade de relatórios publicados pela componente de emergência programa Copernicus referentes à erupção. Estes relatórios possuem mapas em formato PDF e os contornos vectoriais do tipo *shape* (SHP) referentes à posição das escoadas da erupção em várias datas.

Por último, obteve-se informação referente aos valores de efusividade das lavas calculados através de dados do sensor SEVIRI. Estes cálculos foram efectuados pelo investigador Mathieu Gouhier a partir de dados provenientes do Hotvolc (<http://hotvolc.opgc.fr/www/>) usando uma metodologia própria (Gouhier et al, 2012).

3.2. Desenvolvimento da metodologia

De modo a reconstituir o período eruptivo do vulcão da ilha do Fogo em 2014/2015, recorreu-se à compilação de dados disponíveis publicamente de diversas fontes. Os relatórios sobre a erupção com vista a apoio à decisão pelos agentes de segurança e protecção civil, como os provenientes do sistema Copernicus, baseiam-se em imagens de múltiplos sensores, com alta resolução espacial e baixa resolução temporal. Assim, os relatórios apresentam uma periodicidade bastante variável, por vezes espaçados 14 dias entre si. A informação obtida através destes relatórios, embora útil, não possibilita uma gestão diária ou quase-diária do evento.

Por outro lado, satélites com menor resolução espacial mas com resolução temporal superior cobrem quase na totalidade o evento eruptivo. No caso das imagens MODIS, existe informação espectral que possibilita uma análise térmica, relevante para um evento desta natureza. Como foi descrito no capítulo 2, metodologias de identificação de *hot spots* vulcânicos foram desenvolvidas por diversos autores para imagens com baixa resolução espacial.

A metodologia desenvolvida baseia-se no algoritmo do MODVOLC desenvolvido por Wright et al., (2002). O algoritmo começa por avaliar a qualidade da informação. Se considera que a qualidade é boa, avalia o estado de saturação da banda 22 do MODIS (3.929-3.989 μm). Em seguida, calcula o índice térmico NTI utilizando as bandas 32 (11.770-12.270 μm) e 22 (em caso de saturação da banda 22, é usada a banda 21 que se encontra no mesmo intervalo do espectro), resultando numa imagem em escala de cinzentos com valores compreendidos entre -1 (preto) e 1 (branco).

$$NTI = \frac{22 - 32}{22 + 32} \quad (3)$$

Ou:

$$NTI = \frac{21 - 32}{21 + 32} \quad (4)$$

O resultado do índice aplicado a cada pixel é então comparado com um limiar estabelecido previamente (-0.80), como é ilustrado na figura 10.

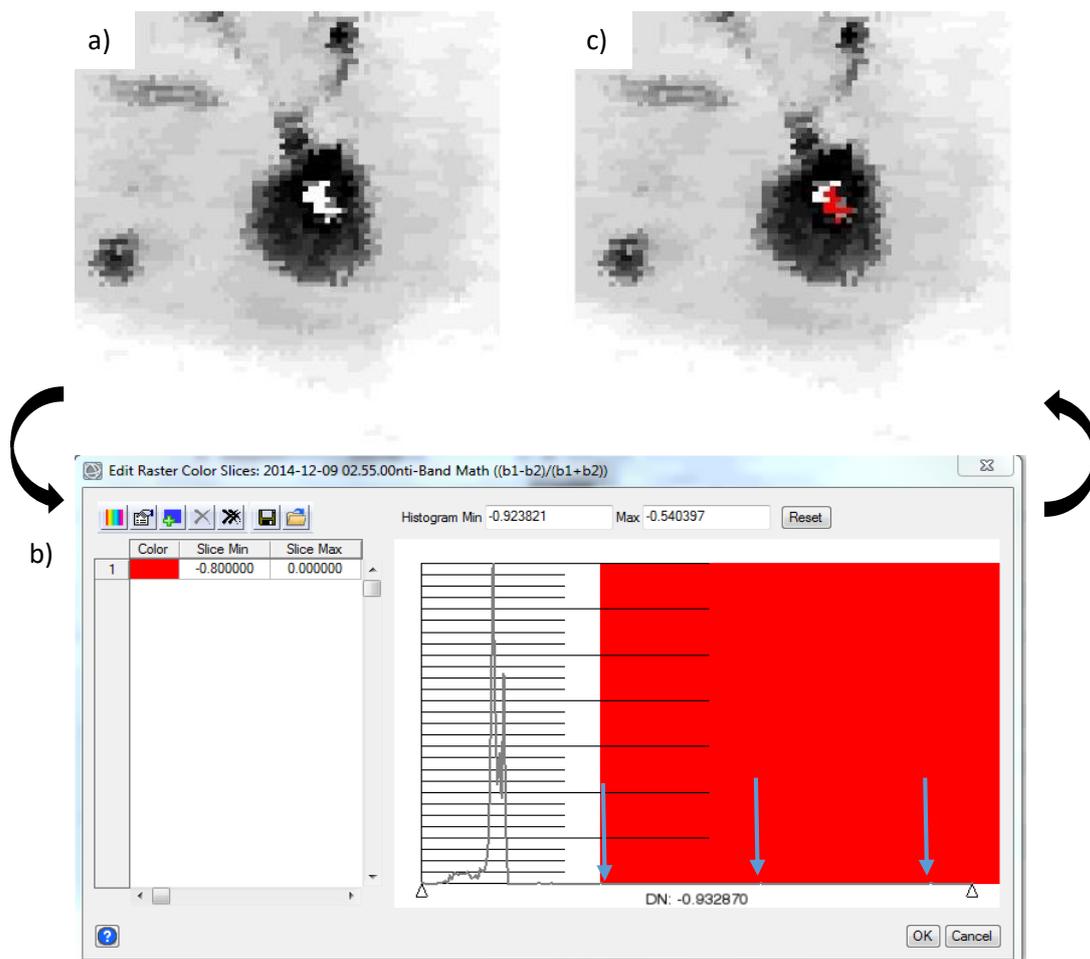


Figura 10 – a) NTI da imagem MODIS captada no dia 09/12/2014; b) aplicação do limiar -0.80 no histograma do NTI da imagem MODIS captada no dia 09/12/2014 (setas indicam pixels que excedem o limiar); NTI da imagem MODIS captada no dia 09/12/2014 após aplicação do limiar de -0.80.

Na metodologia desenvolvida, utilizaram-se os princípios do MODVOLC, mas o método não se encontra automatizado. Ao invés, o operador calcula o NTI para cada imagem da erupção e aplica o limiar, não só para detectar *hot spots*, como para acompanhar a sua evolução ao longo da erupção numa base quási-diária. Testaram-se diferentes valores para o limiar fixo, a fim de se obter uma melhor adequação do método à realidade regional, uma vez que o limiar -0.80, proposto por Wright et al., (2002) serve para detectar *hot spots* à escala global e com a mínima ocorrência de falsos positivos, o que leva a uma abordagem que pode ser excessivamente conservadora (Koeppen e Wright, 2010). Os limiares testados foram: -0.78, -0.80, -0.82 e -0.84.

A escolha do limiar foi feita a partir da integração da informação resultante das três principais fases de construção do método. Procurou-se estabelecer um limiar que descrevesse com a melhor precisão possível a erupção ao longo do tempo, que produzisse melhor a informação espacial referente à

posição das escoadas lavas e que não produzisse falsos positivos para datas não eruptivas. Assim a metodologia desenvolvida encontra-se dividida em três fases.

Na primeira fase, comparou-se a capacidade dos limiares estudados detectarem *hot spots* para o conjunto das datas da erupção com as informações referentes ao historial de actividade do vulcão durante o referente período, utilizando para quantificar este último, os valores de efusividade eruptiva calculados a partir das imagens do satélite SEVIRI.

Numa segunda fase, seleccionou-se um conjunto de datas e comparou-se a localização dos pixels identificados pelos limiares como *hot spots* com a localização das escoadas de lava nas imagens de alta resolução para as mesmas datas, ou datas muito próximas.

Por último, procurou-se averiguar como se comportam os valores do NTI na ilha para situações não eruptivas. Para tal, efectuam-se os cálculos do NTI para dois conjuntos de imagens: um conjunto com datas prévias à erupção e um conjunto de imagens posteriores ao término da erupção.

Todas as imagens consideradas sofreram tratamento comum prévio. Assim, todas as imagens foram recortadas para evidenciar a região de interesse e facilitar a sua manipulação posterior. Esta operação foi executada no *software* ENVI. Todas as imagens sofreram à partida uma pré-selecção baseada na sua qualidade e ausência de ruído excessivo. Assim, da totalidade de imagens MODIS obtidas, seleccionaram-se as imagens com qualidade aceitável para tratamento, isto é, imagens nas quais fosse possível ver os contornos da ilha do fogo ou então em que fosse possível ver-se a ilha de forma parcial mas a caldeira na sua totalidade. Descartaram-se assim as imagens com demasiada cobertura de nuvens ou outros fenómenos atmosféricos como as brumas secas.

O cálculo do NTI e subsequente atribuição de diferentes valores do limiar foram executados no *software* ENVI. As imagens utilizadas para o estudo espacial do método foram criteriosamente registadas (ou alinhadas) de forma a poderem ser adequadamente comparadas. Esta operação foi executada no *software* ArcMap tendo sido utilizadas a imagem Landsat8_OLI de dia 23/10/2014 (figura 11a)) e o contorno vectorial da ilha (figura 11b)) proveniente dos mapas do programa Copernicus como referência.

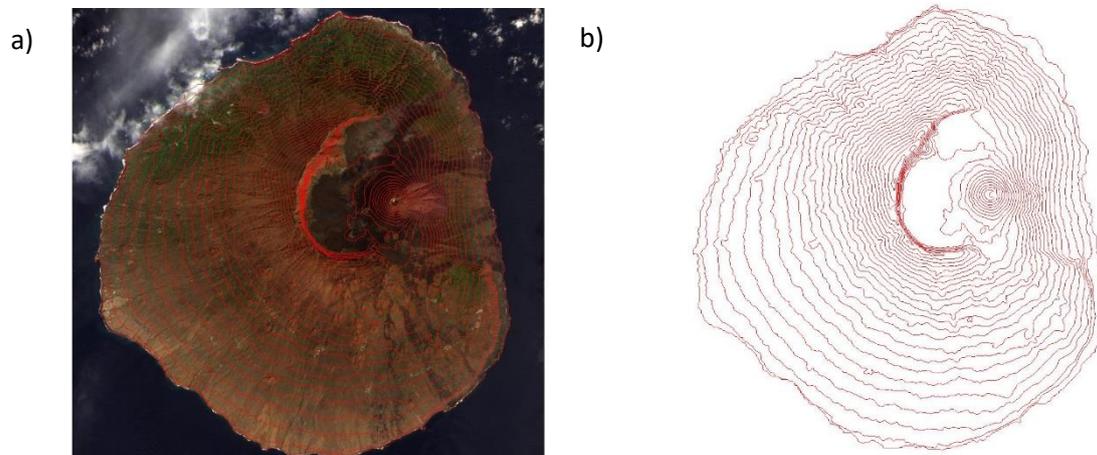


Figura 11 - a) Imagem de referência Landsat8_OLI captada a 23/10/2014 (composição colorida das bandas 7-6-5); b) contorno vectorial de referência do programa Copernicus;

4. Resultados e Discussão

Da implementação da metodologia descrita no capítulo anterior, obtiveram-se resultados que serão apresentados e devidamente discutidos neste capítulo. Procurou-se reconstituir a erupção através da análise de imagens MODIS e da adaptação da metodologia de identificação de *hot spots* MODVOLC. Seleccionaram-se dados para a aplicação do método e aplicou-se a metodologia focando três medidas de desempenho, sendo estas relativas ao desempenho de identificação de hot spots ao longo de todas as datas da erupção, à qualidade da informação espacial obtida pelo método e à sua adequação a períodos não eruptivos.

Assim os resultados serão apresentados e discutidos separadamente por cada uma dessas principais etapas. Por fim discutir-se-á a totalidade dos resultados de forma integrada. O presente capítulo será então dividido nos seguintes subcapítulos: pré-selecção de dados, resultados da análise temporal, resultados da análise espacial e resultados da análise contextual.

4.1 Pré-selecção de dados

Os dados recolhidos das diversas fontes serviram de base para o estudo da erupção vulcânica e dos méritos da metodologia desenvolvida. Estes dados foram adquiridos consoante a sua relevância para o estudo e a sua disponibilidade. Sendo a totalidade dos dados públicos e de acesso gratuito, as únicas limitações na sua selecção foram a existência de dados para cada data da erupção e a sua qualidade. A resolução temporal de cada um dos satélites e datas de elaboração dos relatórios do programa Copernicus ditam a quantidade de dados recolhidos e a sua distribuição ao longo do evento. Assim, a totalidade de dados identificados e referentes ao período da erupção encontra-se na tabela 3 (em detalhe no anexo A.1):

Tabela 3 - número de dados identificados para o período eruptivo (23/11/2014 a 08/02/2015) para cada fonte

Fonte	Número
Landsat8 OLI	5
EO-1 ALI	7
EO-1 Hyperion	3
MODIS Aqua	76
Relatórios Copernicus	17

Nem todas as imagens obtidas pelos sensores para o período da erupção possuem qualidade satisfatória para serem usadas no trabalho. No caso das imagens provenientes dos sensores com 30m x 30m de tamanho de pixel, classificou-se cada uma delas em 3 categorias de qualidade, como ilustrado na figura 12.

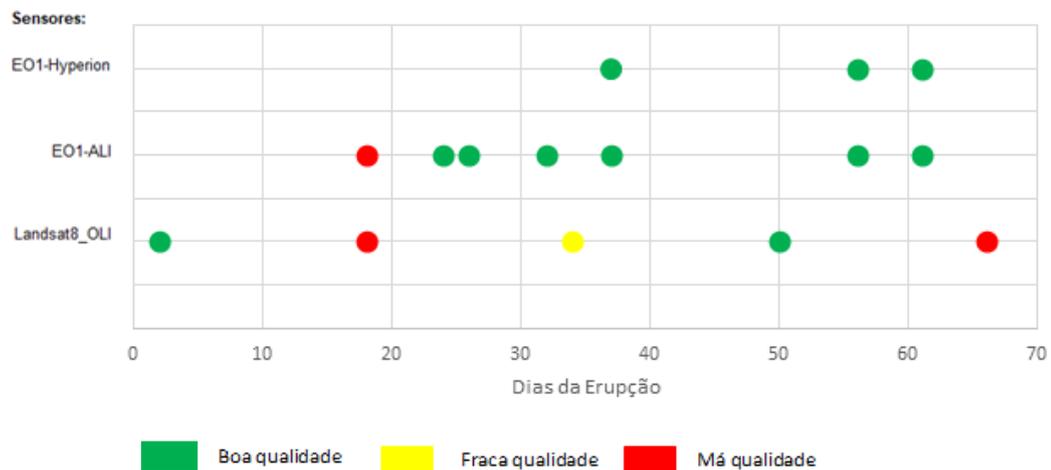


Figura 12 - Imagens existentes para cada sensor com imagens com tamanho de pixel de 30 m x 30 m, durante os 78 dias da erupção.

Como é possível verificar na figura 12, existem poucas imagens com resolução espacial de 30 m (15 no total), e destas só 12 imagens é que são consideradas imagens com qualidade boa ou média.

No caso das imagens MODIS, não foi possível classificar as imagens nas mesmas classes de qualidade. Isto deve-se à dificuldade de avaliar a qualidade de uma imagem noturna em que os pixels possuem 1km x 1km. Existem, no entanto, imagens que não são passíveis de ser tidas em conta para a aplicação do método, uma vez que é evidente o excesso de nuvens ou outras condicionantes atmosféricas. As imagens MODIS foram assim avaliadas uma a uma quanto à sua utilidade para cada uma das análises consoante critérios que são descritos em cada um dos subcapítulos seguintes.

4.2 Resultados da Análise Temporal

A reconstituição de um período eruptivo requer que haja imagens da erupção com elevada frequência temporal de modo a que o estudo represente com grande fiabilidade todas as fases do fenómeno. Como foi referido no subcapítulo 3.1 (Pré-selecção de dados) foram identificadas e seleccionadas imagens que cobrem quase na totalidade o período da erupção.

Estudou-se a erupção utilizando como base a metodologia do MODVLC de Wright et al., (2002). Para tal, usaram-se imagens MODIS e calculou-se o índice NTI para cada imagem considerada de qualidade. Como referido na metodologia, quis-se implementar um limiar que fosse mais ajustado à realidade regional do vulcão do Fogo a fim de melhorar a reconstituição da erupção. Assim aplicaram-se os 4 limiares: -0.78, -0.80, -0.82 e -0.84. Todos os pixels com valor de NTI superior ao limiar foram evidenciados a vermelho. Para cada um dos limiares usados contou-se a quantidade de pixels detectados como *hot spots* (este processo encontra-se esquematizado na imagem 13).

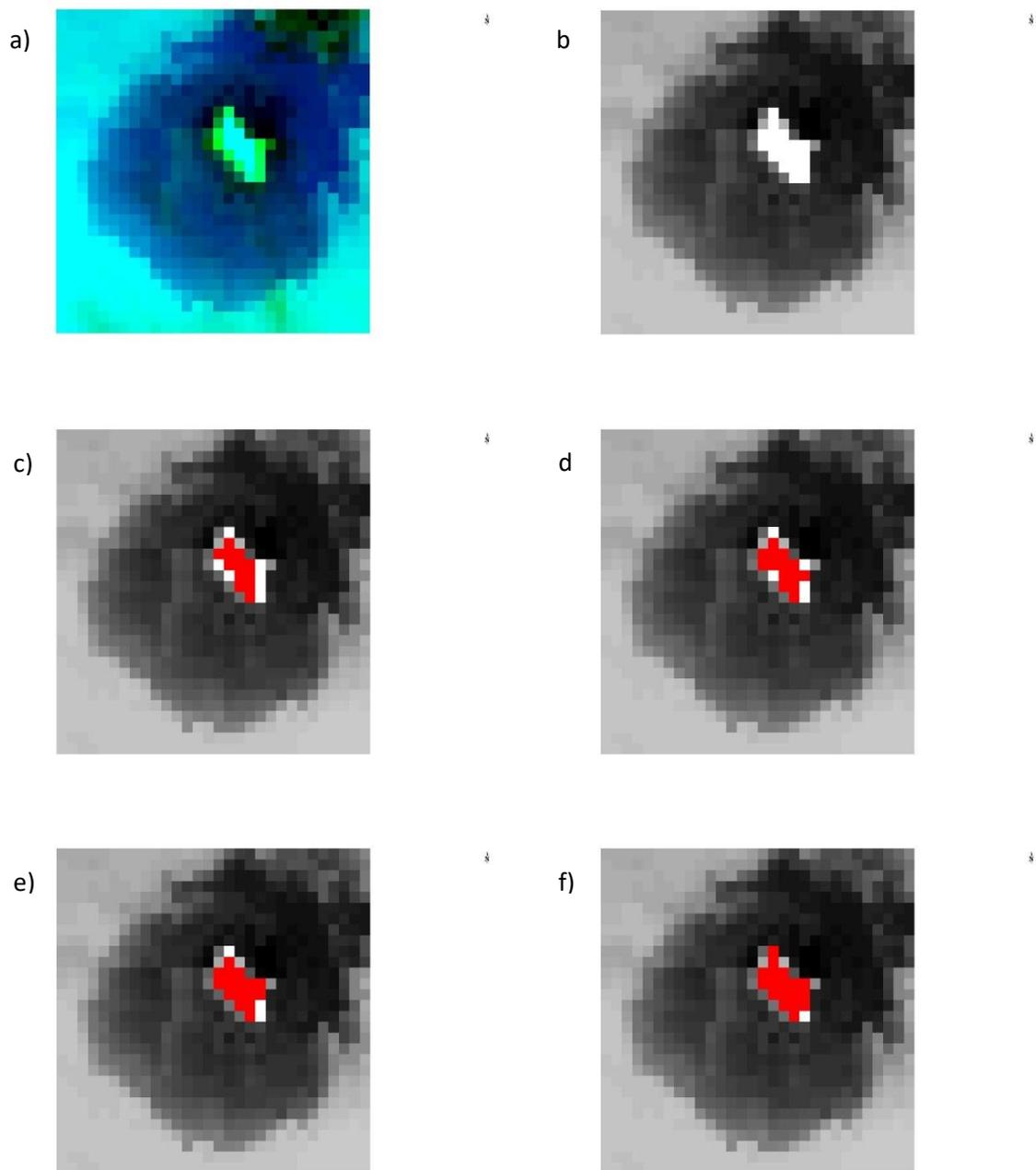


Figura 13 - Imagem MODIS captada no dia 26/11/2014: a) Composição colorida das bandas 9, 22 e 32; b) NTI; c) limiar de -0.78 (pontos a vermelho); d) limiar de -0.80; e) limiar de -0.82; f) limiar de -0.84;

Nesta análise procurou-se perceber qual dos 4 limiares produzia melhores resultados na tarefa de descrever a erupção. Assim propôs-se comparar a informação obtida através da aplicação dos limiares de estudo nos NTI das datas da erupção com os valores da efusividade calculada de outra forma através de dados do SEVIRI.

Os dados do SEVIRI foram fundamentais uma vez que estes forneceram informação sobre a erupção várias vezes ao dia, podendo ser comparada com a informação diária do MODIS. No entanto, as imagens provenientes deste sensor não foram trabalhadas no decorrer deste trabalho. Esse trabalho foi executado por Mathieu Gouhier através de dados provenientes do Hotvolc (<http://hotvolc.opgc.fr/www/>). Estes cálculos foram feitos à semelhança do que é descrito no artigo de Gouhier et al. (2011). Deste tratamento resultaram os valores de efusividade para cada 15 min de erupção. Estes dados encontram-se ilustrados na figura 14, onde se conseguem ver os valores de efusividade ao longo do tempo e o volume médio de lava.

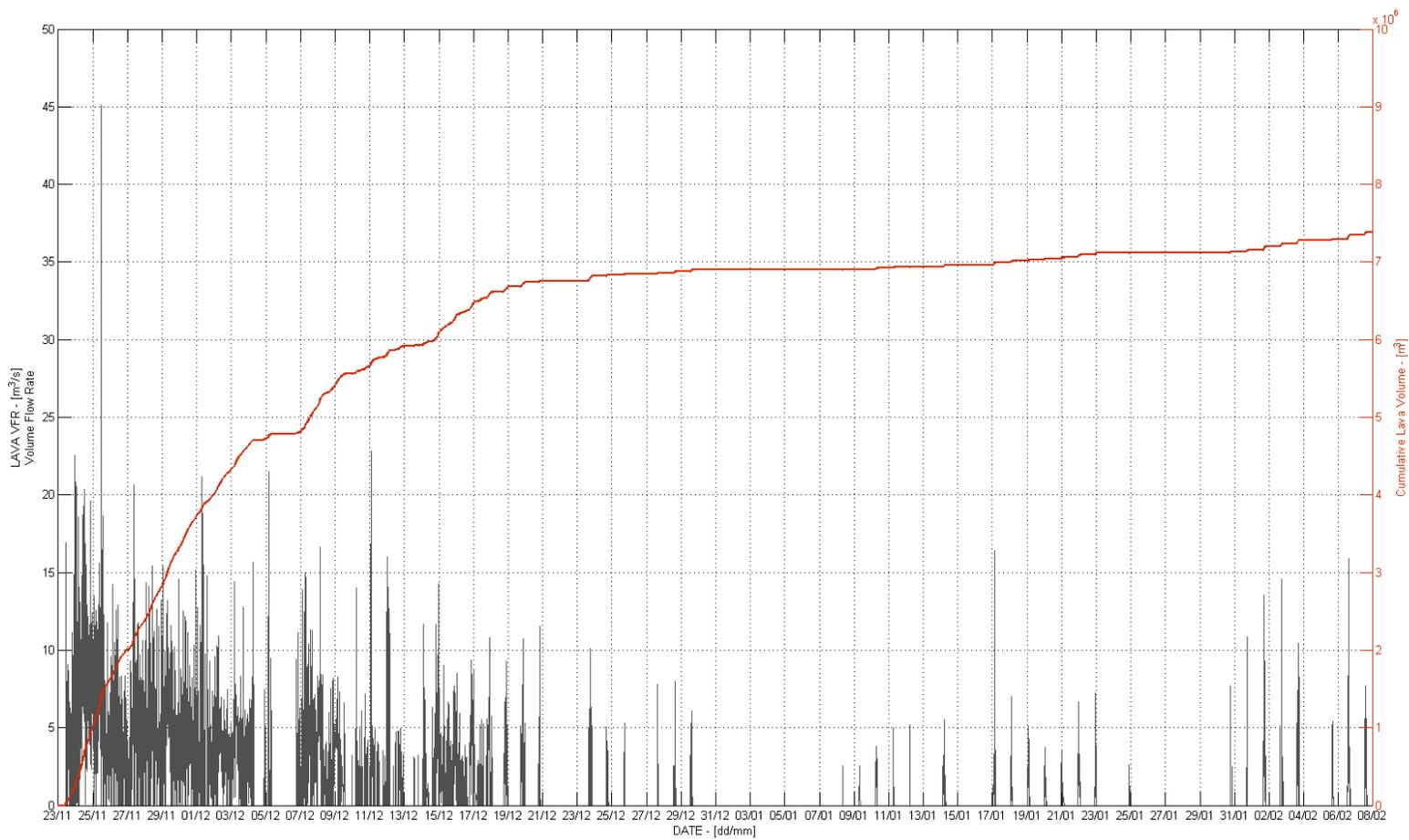


Figura 14 – Efusividade da lava durante a erupção do Fogo 2014-2015, baseado em dados do SEVIRI, disponibilizados pelo Hotvolc e processados por Mathieu Gouhier

A informação disponibilizada por Mathieu Gouhier sobre a efusividade das lavas ao longo das datas da erupção foi utilizada como indicador de grau de actividade vulcânica. Através da figura 14 é possível verificar que grande parte da actividade vulcânica encontra-se concentrada entre o final do mês de Novembro, altura do começo da erupção, e o final de Dezembro. Posteriormente verificam-se 2 períodos nos quais há picos de actividade vulcânica: o primeiro à volta do dia 17 de janeiro, o segundo nos últimos dias da erupção até ao término do evento no dia 8 de Fevereiro de 2015.

Para o desenvolvimento do método, esta informação foi comparada com as anomalias térmicas obtidas com as imagens MODIS para as mesmas datas. Parte-se do princípio que maior efusividade das lavas leva a uma maior dispersão destas pelo terreno ou maior pressurização no interior das escoadas anteriormente posicionadas. Assim, nas datas em que houve maior efusividade das lavas espera-se que a lava se disperse mais no terreno e por isso haja um maior número de pixels identificados como *hot spots* aquando da aplicação do método.

Seleccionaram-se as imagens do MODIS do período da erupção que possuem qualidade aceitável para serem comparadas. Tentou-se que esta selecção fosse o mais objectiva possível. Admitiram-se imagens nas quais fossem perceptíveis os contornos gerais da ilha (exemplo: figura 15c)) ou, no mínimo, a zona correspondente à caldeira que, por se encontrar mais quente que as restantes, sobressai nalgumas imagens (exemplo: figura 15b)). Um exemplo desta escolha encontra-se na figura 15.

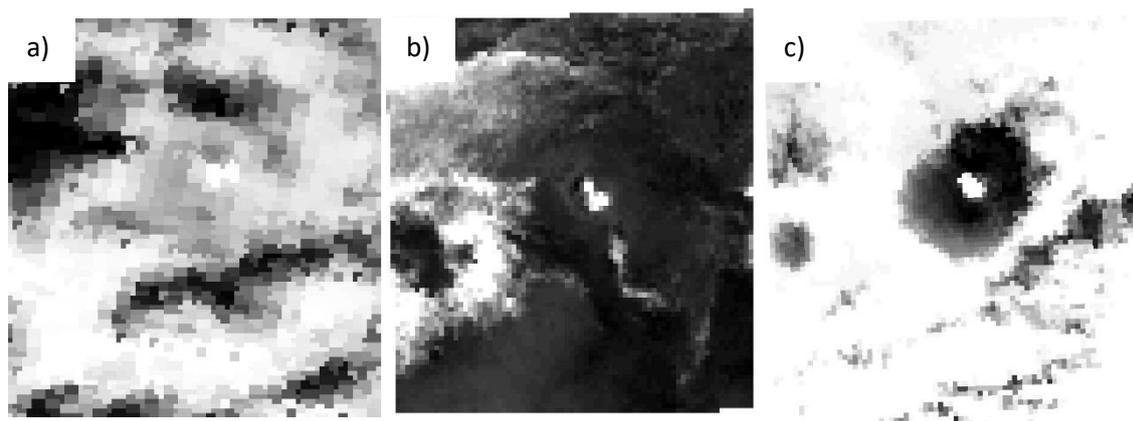


Figura 15 - NTI das imagens referentes à ilha do Fogo captadas pelo sensor MODIS nas noites dos dias: a) 15/12/2014, imagem de qualidade inferior. b) 28/11/2014, imagem de qualidade média. c) 03/12/2014, imagem de qualidade superior.

Considerou-se que a simples exclusão de imagens com demasiada interferência atmosférica (exemplo: figura 15a)) conduziria a resultados com maior fidedignidade do que meramente lhe atribuir o valor igual a zero na identificação de *hot spots*. Se assim fosse, os dias em que há imagens com boa qualidade mas não há detecção de *hot spots* teriam o mesmo peso que os dias com imagens sem qualidade aceitável.

Do total das 78 datas referentes à erupção, a selecção prévia permitiu identificar 54 datas com imagens de qualidade aceitável que serão comparadas com os dados da efusividade SEVIRI . Calculou-se assim o NTI para cada uma destas imagens MODIS a que se aplicaram os 4 limiares indicados anteriormente. Para cada data e cada limiar, contou-se o número de pixels acima do limiar que se comparou, numa primeira fase, com o histograma de efusividades. Procurou-se através desta comparação perceber se a contagem de pixels expressava de forma semelhante o historial efusivo da erupção, tal como observado na figura 13. Para efectuar a comparação com cada um dos 4 limiares elaboraram-se 4 gráficos (Figuras 16 a 19, dados originais no anexo B.1).

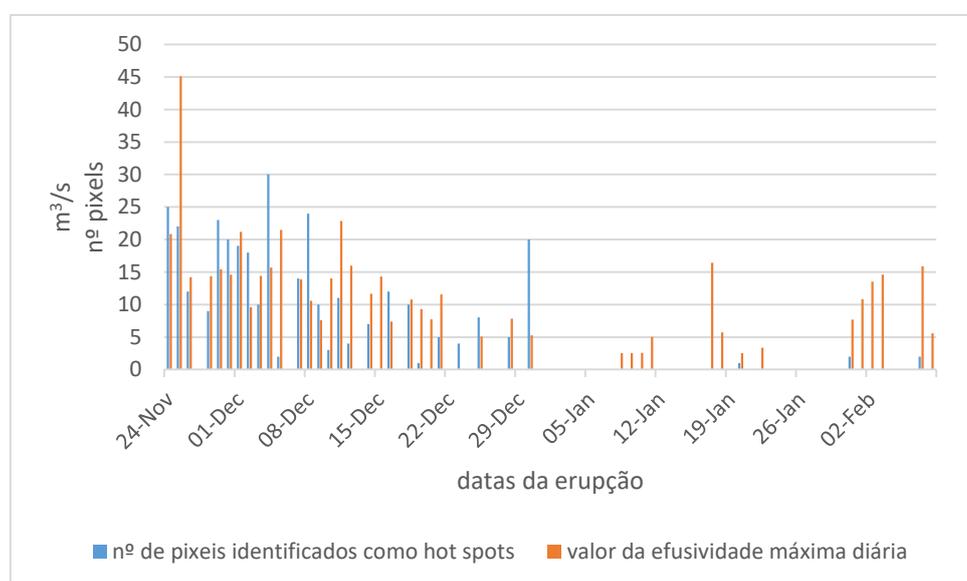


Figura 16 – Comparação entre o número de pixels identificados como termicamente anómalos após a aplicação do limiar de -0.78 com os valores máximos diários de efusividade ao longo do período eruptivo.

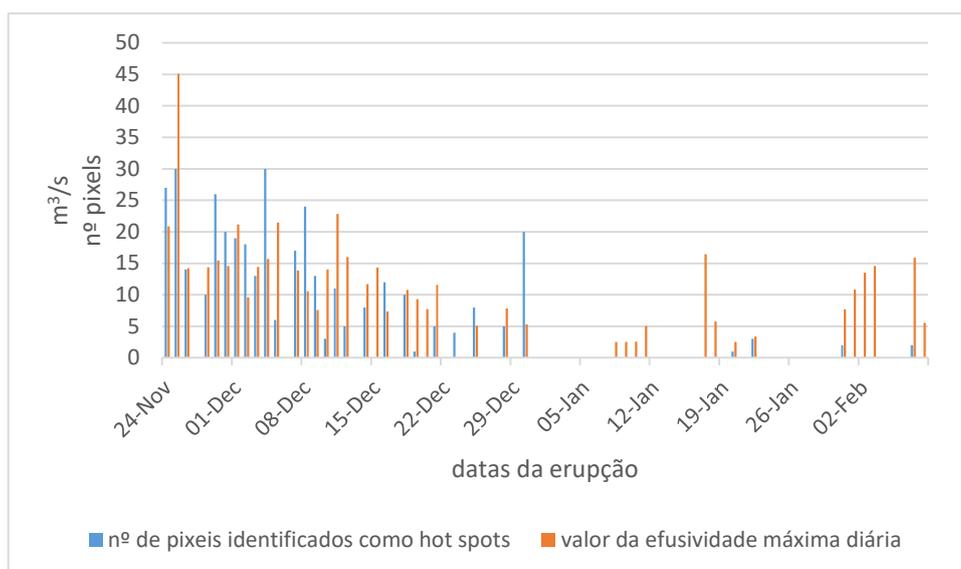


Figura 17 - Comparação entre o número de pixels identificados como termicamente anómalos após a aplicação do limiar de -0.80 com os valores máximos diários de efusividade ao longo do período eruptivo.

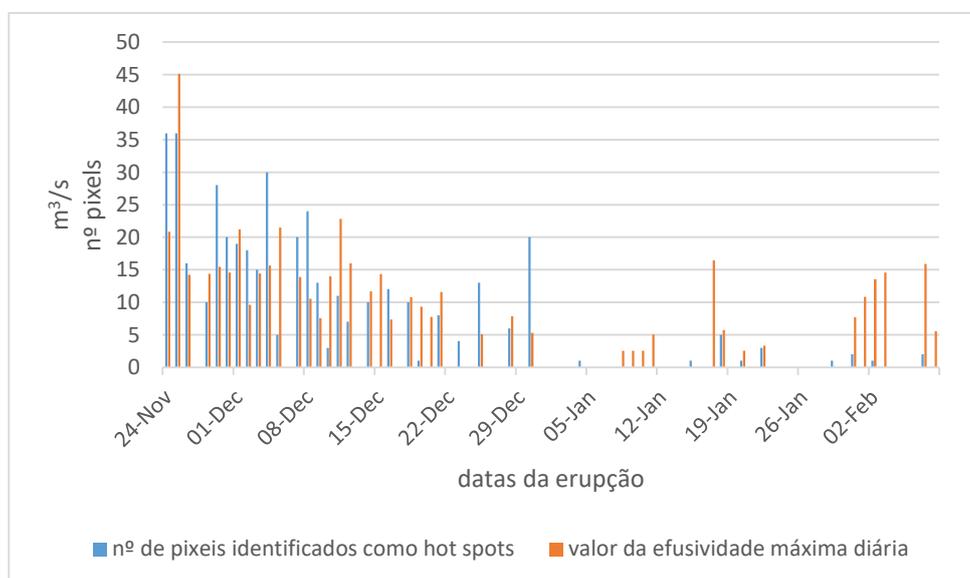


Figura 18 - Comparação entre o número de pixels identificados como termicamente anómalos após a aplicação do limiar de -0.82 com os valores máximos diários de efusividade ao longo do período eruptivo.

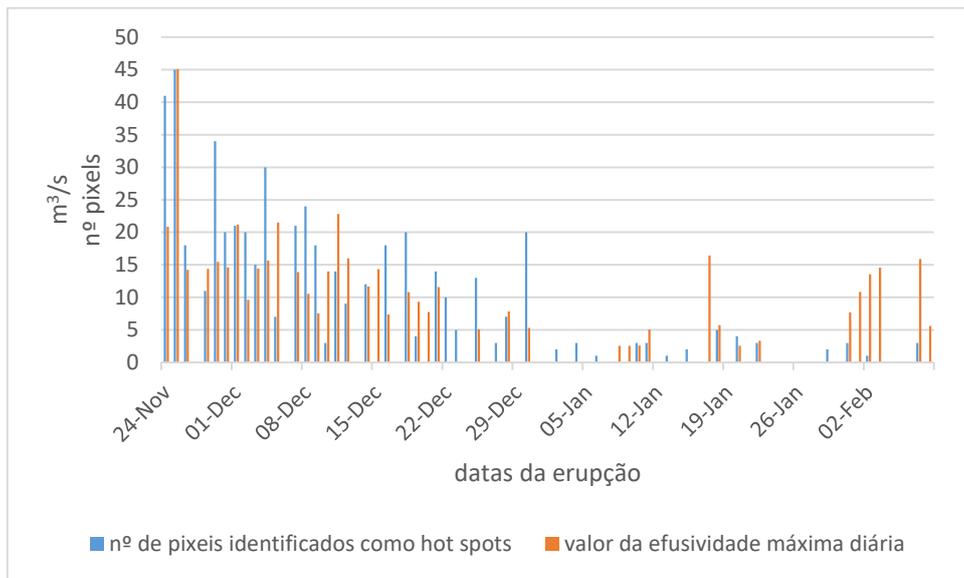


Figura 19 - Comparação entre o número de pixels identificados como termicamente anómalos após a aplicação do limiar de -0.84 com os valores máximos diários de efusividade ao longo do período eruptivo.

No geral, todos os histogramas referentes aos 4 limiares de estudo apresentam a mesma tendência do histograma da efusividade das lavas, indicado a laranja para comparação. O período de maior actividade vulcânica é coincidente em todos os histogramas com o período descrito no histograma da efusividade das lavas. No entanto, para descrever as fases menos activas da erupção, os limiares usados produzem resultados com precisões diferentes, ainda que claramente piores. Pensa-se que isto se possa dever ao aumento da espessura da crosta da lava (rocha mais superficial que começou a solidificar devido ao seu arrefecimento), sendo mais difícil de detectar a variação da actividade vulcânica.

Na aplicação do limiar de -0.78 (figura 16), a descrição do período entre o início de Janeiro e o final da erupção apresenta apenas três datas nas quais são identificados *hot spots*. Nestas datas o número de pixels é muito baixo e não retrata convenientemente os dois picos de actividade vulcânica em Janeiro e Fevereiro. A fraca detecção de *hot spots* com a utilização deste limiar é de certa forma esperada, uma vez que este limiar é mais exigente que o limiar utilizado no método do MODVOLC. A exigência deste limiar leva a que seja o que detecta um menor número de *hot spots* num menor número de datas e que também o produz o menor número de identificação incorrecta de pixels (falsos positivos).

O limiar de -0.80 (figura 17) é o limiar usado na metodologia do MODVOLC. Este valor foi proposto por Wright et al., (2002) como o limiar que melhor conjuga a tarefa de identificar *hot spots* com a produção aceitável de falsas detecções para a análise global. Em relação ao limiar -0.78, a aplicação deste limiar identifica pixels anómalos em apenas mais uma data e não produz nenhum falso positivo adicional em relação ao limiar -0.78.

Os limiares de -0.82 e -0.84 (figuras 18 e 19) são ambos limiares menos exigentes que o limiar do MODVOLC. Como é possível verificar nos histogramas, as diferenças entre a aplicação destes limiares são mais expressivas nos meses em que a actividade vulcânica é menor. Estes descrevem melhor os dois picos de actividade no mês de Janeiro e no final da erupção. Como esperado, este facto leva a um maior número de datas nas quais há identificações erradas.

Para cada limiar, foi contado o número de datas nas quais foram detectados *hot spots* e não existem valores de efusividade registados (falsos positivos). Foi ainda contada a frequência das datas para as quais não há detecção de pixels termicamente anómalos mas existem valores de efusividade registados (falsos negativos). Os resultados desta contagem encontram-se expressos na tabela 4.

Tabela 4 – Resultados de identificação de *hot spots* resultantes da aplicação de cada limiar de estudo nas 54 datas com imagens de qualidade aceitável.

		<i>Limiares</i>			
		-0.78	-0.80	-0.82	-0.84
<i>Identificações</i>	Verdadeiros Positivos	28	29	31	33
	Falsos Positivos	1	1	4	9
	Verdadeiros Negativos	12	12	9	4
	Falsos Negativos	13	12	10	8

Como é possível verificar nestes resultados, o número de falsos positivos aumenta com a diminuição do limiar, sendo o limiar de -0.84 o que tem maior número de falsos positivos, tal como o número de falsos negativos aumenta com o aumento do limiar, sendo o limiar de -0.78 o que possui maior número de falsos negativos.

Os dados relativamente aos erros não são conclusivos em relação ao limiar que produz melhores resultados, uma vez que a aplicação de limiares diferentes não influencia só o número de erros, mas também a expressão do vulcanismo nos dias em que há identificações correctas. Assim, criou-se uma medida de comparação do desempenho dos limiares que tivesse todos os resultados em conta, e não apenas contabilizasse os erros de identificação.

Sendo que existem dados de efusividade para cada intervalo de 15 minutos e apenas uma imagem para cada data (nos dias em que há imagem com qualidade) calculou-se o valor médio da efusividade diária, uma vez que este valor expressa melhor a quantidade máxima de escorrência de lava para um determinado dia do que o valor da efusividade máxima do dia. Este valor foi depois comparado com o número de pixels que são identificados como *hot spots* para cada limiar de estudo, através da realização de um diagrama de dispersão. Com isto, pretendeu-se perceber a correlação que existe entre o número de pixels detectados como *hot spots* e a medida de actividade vulcânica diária presente na efusividade média diária.

Para cada diagrama de dispersão calculou-se o declive da recta de regressão dos dados. Este declive dá uma medida numérica de correlação dos dados. Os diagramas de dispersão obtidos para cada um dos 4 limiares de estudo apresentam-se nas figuras 20 a 23 (dados originais no anexo B.1).

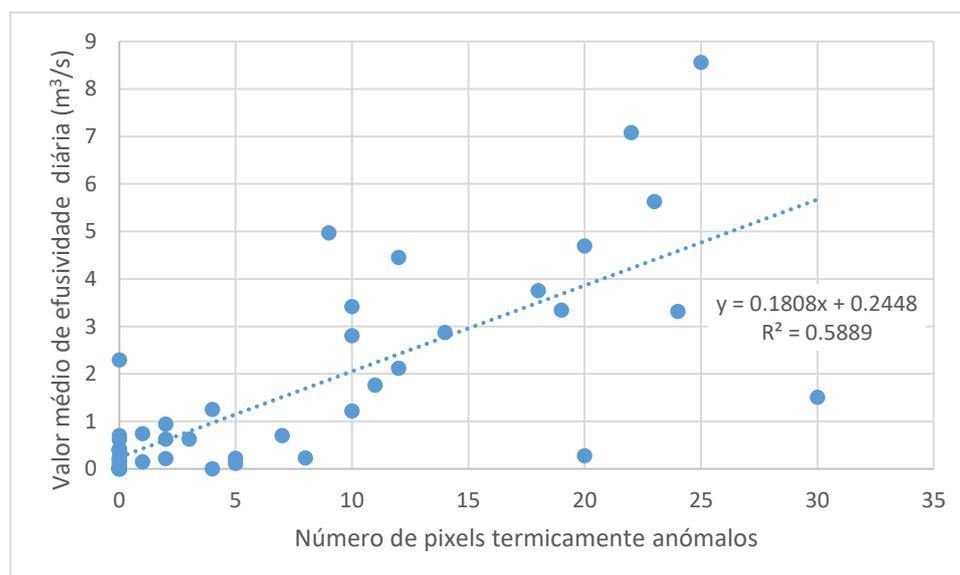


Figura 20 – Diagrama de dispersão do valor médio de efusividade com o número de pixels termicamente anómalos identificados através da aplicação do limiar de -0.78.

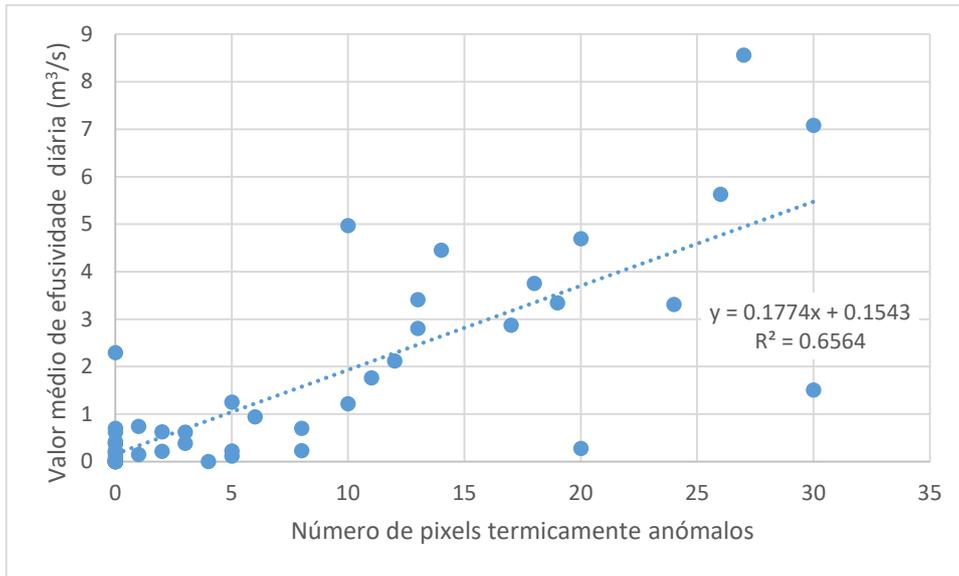


Figura 21 - Diagrama de dispersão do valor médio de efusividade com o número de pixels termicamente anómalos identificados através da aplicação do limiar de -0.80.

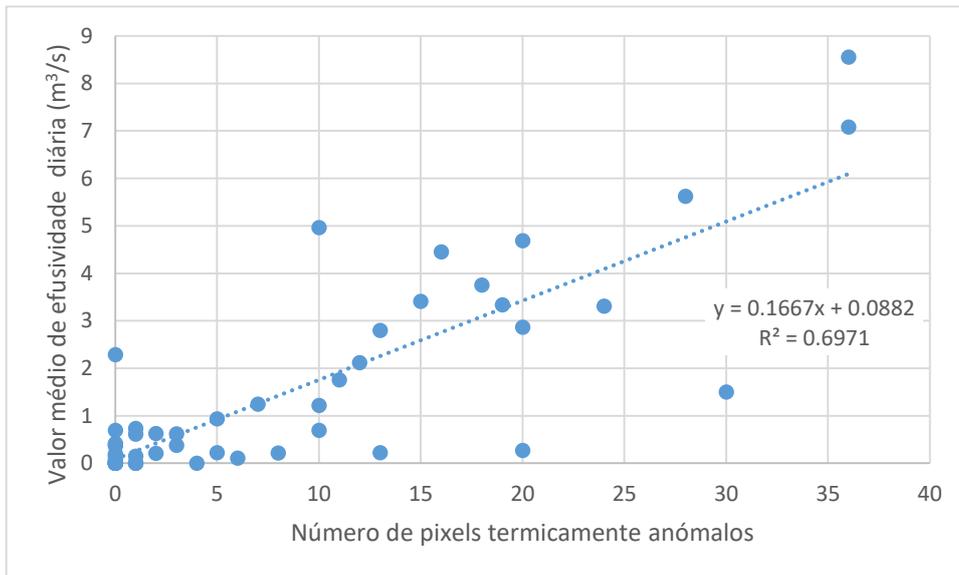


Figura 22 - Diagrama de dispersão do valor médio de efusividade com o número de pixels termicamente anómalos identificados através da aplicação do limiar de -0.82.

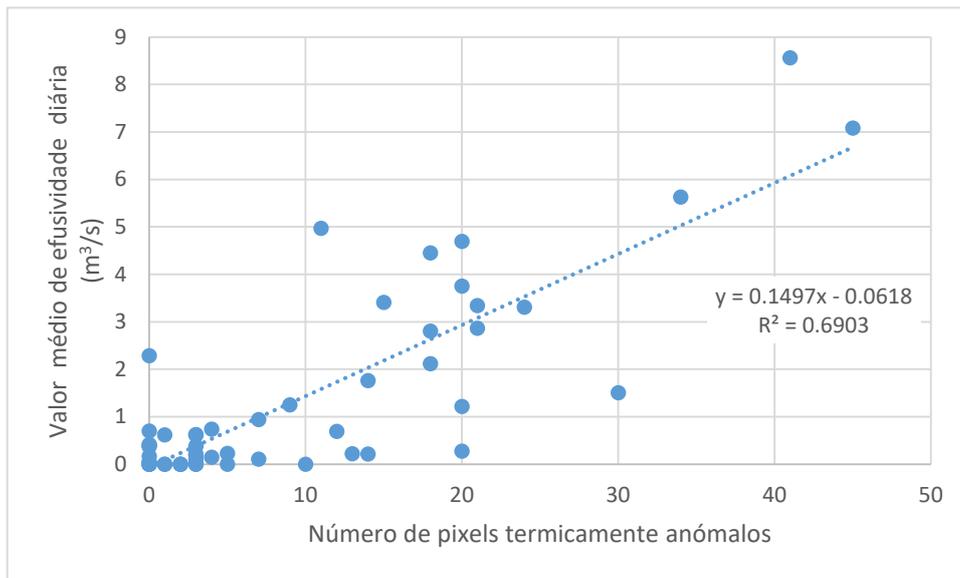


Figura 23 - Diagrama de dispersão do valor médio de efusividade com o número de pixels termicamente anómalos identificados através da aplicação do limiar de -0.84.

Todos os diagramas de dispersão obtidos apresentam uma recta de regressão linear com declive positivo, havendo por isso uma correlação positiva. Isso evidencia uma tendência para haver maior número de pixels identificados como *hot spots* nas datas em que houve maior efusividade das lavas.

Para a aplicação de todos os limiares de estudo, considera-se que a correlação é bastante positiva, uma vez que todos os valores se encontram acima dos 50%. O valor de correlação menor é, como esperado, o valor correspondente ao limiar de -0.78, tomando o valor 0.5889.

Para os limiares seguintes, -0.80 e -0.82, o valor da correlação é crescente, tomando os valores de 0.6564 e 0.6971, respectivamente.

A aplicação do limiar de -0.84 resulta numa correlação superior ao valor obtido com o limiar correspondente ao do MODVOLC, mas apresenta um valor de correlação mais baixo que o obtido pela aplicação do limiar de -0.82. O valor obtido é de 0.6971.

Tendo em conta os valores obtidos para as correlações obtidas a partir da aplicação dos limiares de estudo, chega-se à conclusão que o limiar com correlação optima é igual a -0.82, como evidenciado na figura 24.

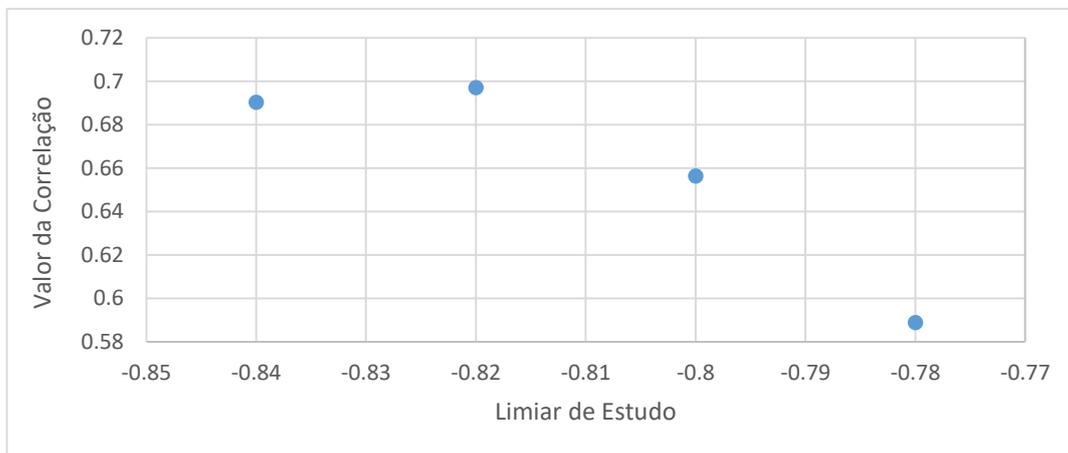


Figura 24 – Variação das correlações entre o valor médio de efusividade diária com o número de pixels identificados como termicamente anómalos para a aplicação de cada um dos 4 limiares de estudo

Para efeitos do estudo comparativo da análise das imagens MODIS com os dados obtidos através do SEVIRI ao longo das datas da erupção, o limiar -0.82 é o que produz resultados com maior correlação e é por isso o limiar escolhido como o mais adequado.

4.3 Resultados da Análise Espacial

Na anterior análise temporal verificou-se que, através da manipulação de imagens MODIS, é possível obter informações que permitem reconstituir a erupção à *posteriori* e até fazer um acompanhamento quase-diário do fenómeno durante a erupção. As informações obtidas previamente são referentes à intensidade da erupção medida através da quantidade de pixels identificados como termicamente anómalos ao longo das sucessivas datas da erupção. Os resultados obtidos são de natureza quantitativa.

Nesta fase do trabalho, procurou-se compreender se, usando imagens MODIS e o método de detecção de *hot spots* adaptado do MODVOLC, era possível obter informação espacial relevante para o estudo reconstitutivo da erupção. Nomeadamente, pretendeu-se saber a posição das lavas ao

longo da erupção, a direcção das escoadas de lava e ainda verificar qual dos limiares de estudo usados anteriormente produz informação espacial mais fidedigna.

De modo a se estudar a influência dos limiares escolhidos na obtenção de informação espacial sobre a posição dos *hot spots* e direcção das escoadas, tem que se assegurar um bom registo ou alinhamento das imagens. Mas com pixels de 1 km de lado, as imagens MODIS são difíceis de co-registar. Como referido no subcapítulo 3.1 (Pré-selecção de dados) escolheram-se para esta tarefa as imagens MODIS de datas coincidentes ou próximas de datas nas quais tenham sido captadas imagens de maior resolução espacial. Realizaram-se primeiro os cálculos referentes ao NTI para cada uma das imagens MODIS, que ajudaram a efectuar o alinhamento com as imagens de maior resolução espacial, tal como exemplificado na parte Sul da ilha nas imagens antes e depois do co-registo (Figura 25).

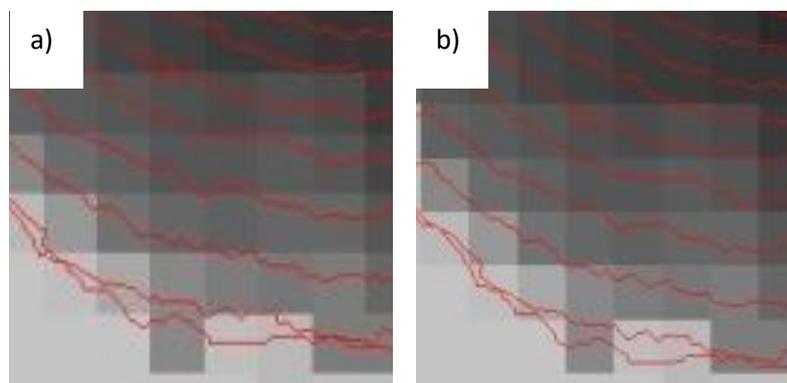


Figura 25 - NTI da imagem MODIS captada no dia 26/11/2014 com sobreposição do contorno vectorial da ilha: (a) antes do co-registo; b) após co-registo.

Utilizaram-se também as imagens de sensores com melhor resolução espacial que as imagens MODIS e os contornos vectoriais que descrevem a evolução das lavas ao longo dos dias da erupção. As imagens são provenientes dos sensores Landsat8_OLI, EO1-ALI e EO1-Hyperion e os contornos vectoriais são os provenientes dos relatórios Copernicus. Estes dados foram recolhidos para o período da erupção tendo em vista servirem de suporte comparativo para as imagens MODIS.

Foram seleccionadas as imagens MODIS em datas para as quais havia também imagens dos outros sensores ou contornos vectoriais (ou, não existindo na mesma data, uma data muito próxima), e cuja qualidade possibilitava uma análise espacial, isto é, conseguir-se distinguir os limites da ilha e da caldeira. Assim, foram encontrados 6 pares de imagens com estas características, tal como se detalha na tabela 5.

Tabela 5 – Pares de imagens utilizados na análise espacial do método

Imagem MODIS (imagens nocturnas)	Imagem de Satélite de elevada resolução espacial (imagens diurnas)
24/11/2014	Landsat8_OLI: 24/11/2014
16/12/2014	EO1-ALI: 16/12/2014
18/01/2015	EO1-Hyperion: 17/01/2015

Imagem MODIS (imagens nocturnas)	Contorno Vectorial do Copernicus
26/11/2014	26/11/2014
25/12/2014	25/12/2014
28/12/2014	28/12/2014

As imagens indicadas na tabela 5 foram também sujeitas a recorte para se trabalhar exclusivamente sobre a área da ilha. Para cada imagem MODIS efectuaram-se os cálculos do NTI.

A totalidade das imagens encontrava-se georreferenciada de origem, existindo apenas pequenos desvios para as imagens de maior resolução espacial. O conjunto destas imagens foi assim sujeita a ligeiros acertos na sua posição, através do co-registo com a imagem de referência do Landsat8_OLI para a data de 23/10/2014.

No caso das imagens MODIS verificou-se que os desvios de posicionamento da ilha eram maiores em valor absoluto, com valores de um a dois pixels, resultando em erros de alguns poucos quilómetros (entre 1 a 2 km). Como é referido por Wright et al., (2002), este erro depende da posição relativa da área de estudo em relação ao centro da imagem, e aumenta com a distância às suas bordas. As imagens MODIS foram assim sujeitas a operações de co-registo. O processo de co-registo para estas imagens não foi tão simples como para as imagens com maior resolução espacial, sendo necessário recorrer ao contorno vectorial da ilha como referência. A utilização do contorno vectorial da ilha também facilitou este procedimento por ser possível ver em transparência as operações que eram aplicadas nas imagens MODIS. As dificuldades adicionais prenderam-se com a magnitude dos erros, a fraca resolução espacial das imagens e o facto de serem usadas imagens

nocturnas para o método. Estas dificuldades resultam num co-registo das imagens MODIS em que, apesar do bom ajuste global, se deve admitir alguma incerteza (sub-pixel).

Depois de co-registadas, as imagens MODIS podem assim ser confrontadas com as imagens de outros sensores a fim de se comparar a localização dos pixels termicamente anómalos detectados com a localização das lavas. No entanto, existem poucas imagens com estas características durante o período da erupção.

Aplicaram-se os limiares de teste aos NTI das imagens MODIS e para cada uma das datas seleccionadas, sobrepuseram-se os pixels identificados em cima da imagem com melhor resolução espacial. Nas imagens 26, 27 e 28 encontram-se algumas composições ilustrativas dos resultados obtidos.

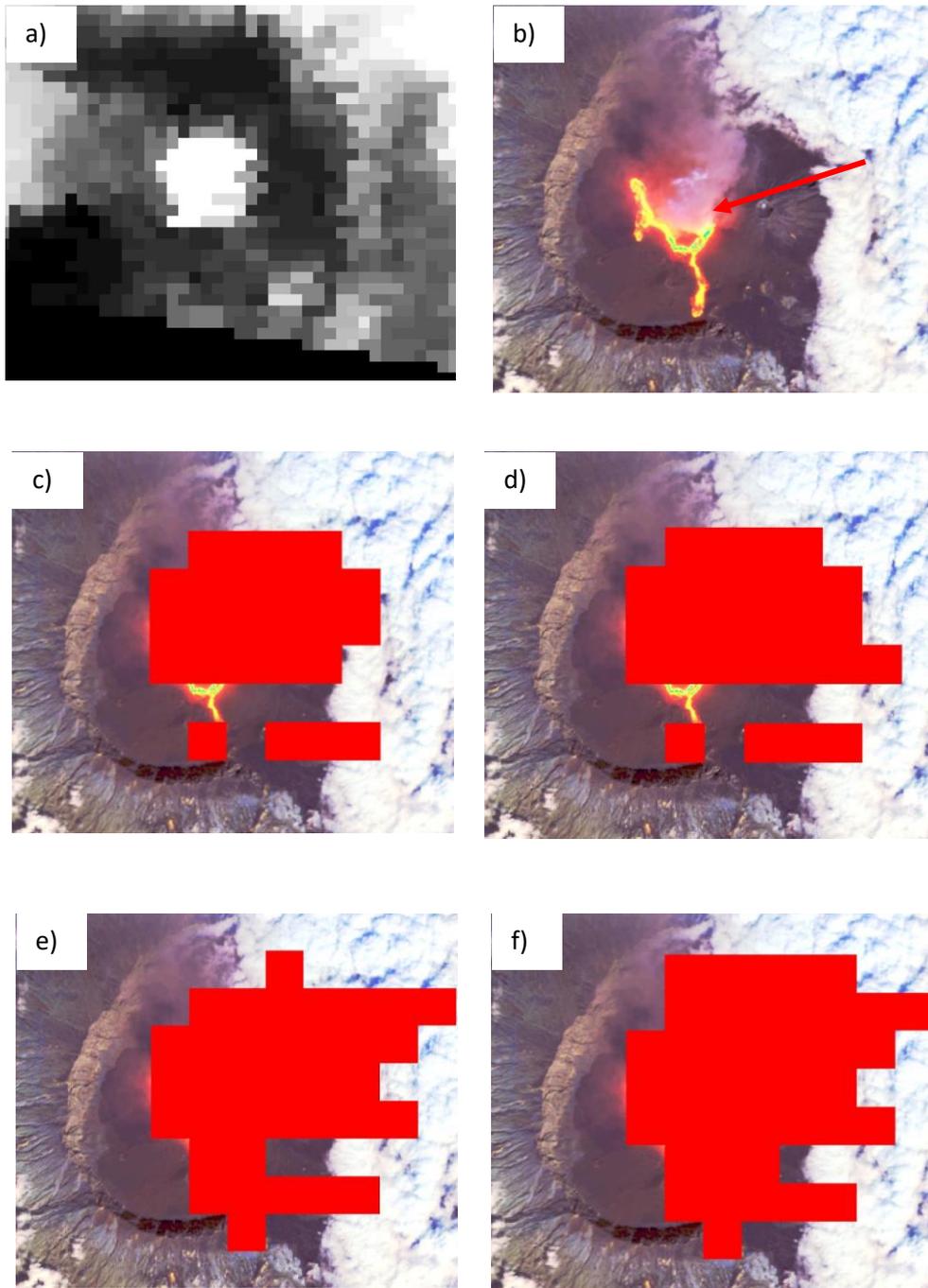


Figura 26 - Comparação do posicionamento dos pixels identificados como termicamente anômalos para os 4 limiares de estudo com a posição das lavas na imagem de resolução espacial superior: a) NTI da imagem MODIS captada no dia 24/11/2014; b) imagem Landsat8_OLI captada no dia 24/11/2014 (composição colorida das bandas 7-6-5) com indicação do posicionamento das lavas; c) aplicação do limiar de -0.78; d) aplicação do limiar de -0.80; e) aplicação do limiar de -0.82; f) aplicação do limiar de -0.84;

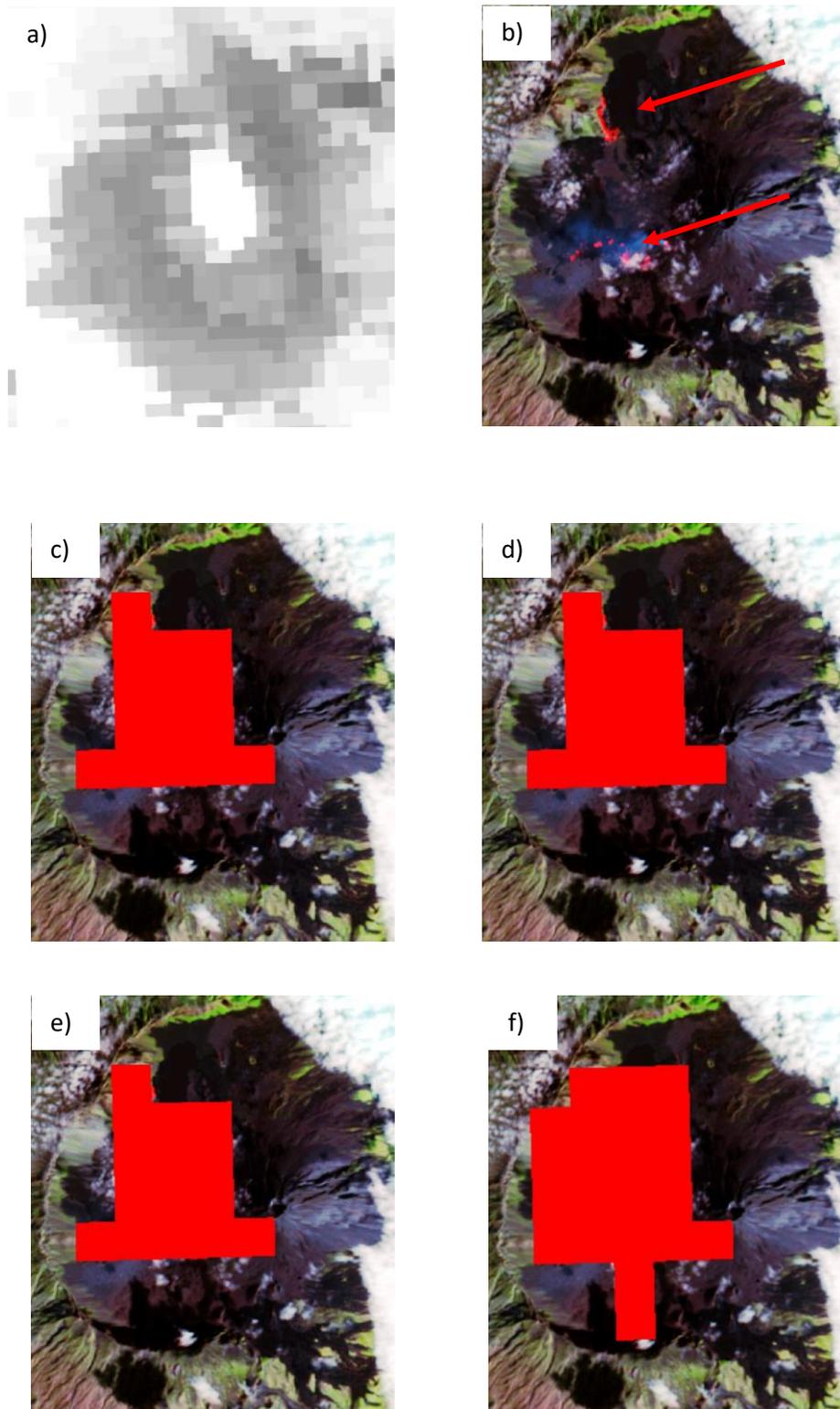


Figura 27 - Comparação do posicionamento dos pixels identificados como termicamente anômalos para os 4 limiares de estudo com a posição das lavas na imagem de resolução espacial superior: a) NTI da imagem MODIS captada no dia 16/12/2014; b) imagem EO1-ALI captada no dia 16/12/2014 (composição colorida das bandas 5-4-3) com indicação do posicionamento das lavas; c) aplicação do limiar de -0.78; d) aplicação do limiar de -0.80; e) aplicação do limiar de -0.82; f) aplicação do limiar de -0.84;

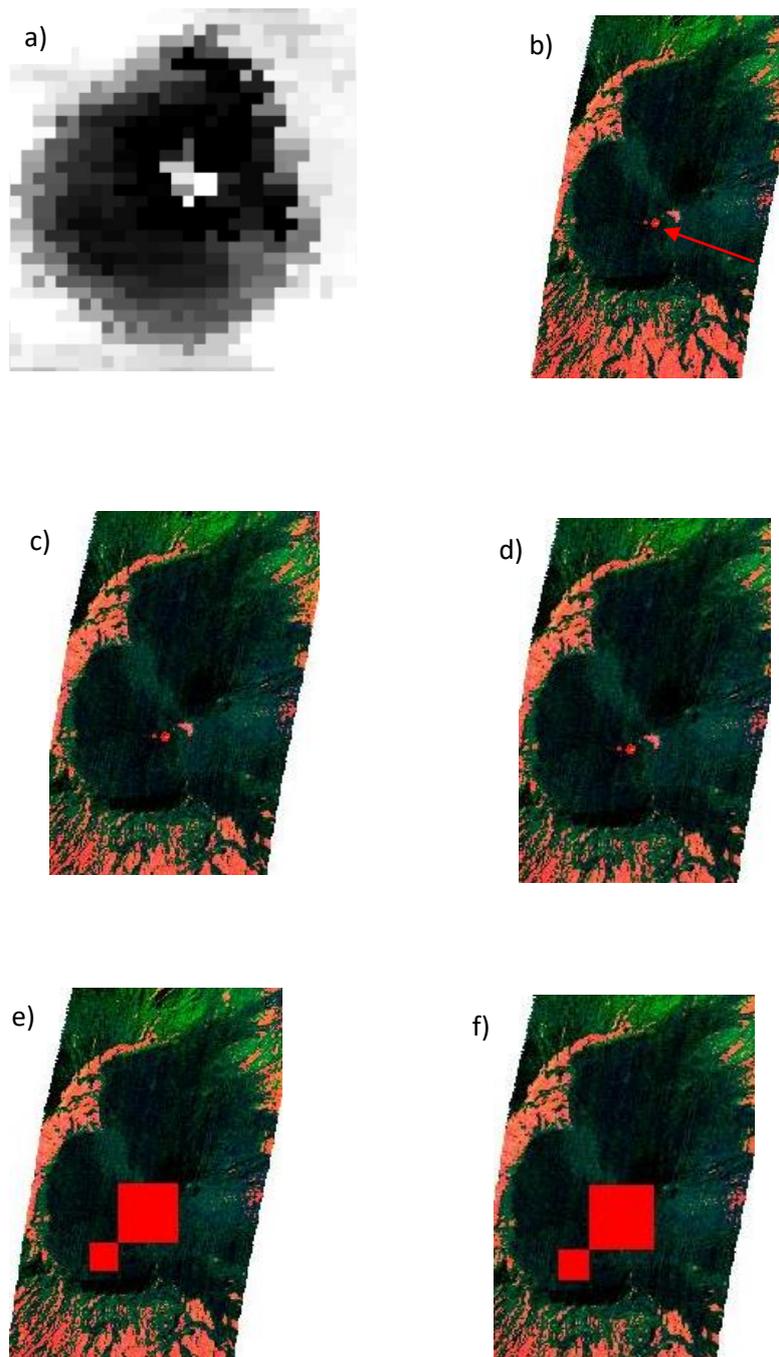


Figura 28 - Comparação do posicionamento dos pixels identificados como termicamente anômalos para os 4 limiares de estudo com a posição das lavas na imagem de resolução espacial superior: a) NTI da imagem MODIS captada no dia 18/01/2015; b) imagem EO1-Hyperion captada no dia 17/01/2015 (composição colorida das bandas 200-80-30) com indicação do posicionamento das lavas; c) aplicação do limiar de -0.78; d) aplicação do limiar de -0.80; e) aplicação do limiar de -0.82; f) aplicação do limiar de -0.84;

A figura 26 corresponde ao segundo dia da erupção (24/11/2014). Como é possível observar, para a aplicação de todos os limiares há a identificação de múltiplos pixels termicamente anómalos no NTI da imagem MODIS que não correspondem a lava na imagem do Landsat8_OLI para a mesma data. É possível observar na imagem do Landsat8_OLI a existência de fumo e plumas vulcânicas que causam potencialmente estas falsas detecções. Por outro lado, apenas os limiares de -0.82 e -0.84 cobrem as escoadas de lava mais a Sul. Esta identificação leva ao aparecimento de mais falsas detecções sendo que para o limiar -0.84, não há uma melhor identificação dos pixels pertencentes à escoada para Sul e apenas são adicionados mais falsos positivos.

Na comparação feita para o dia 16/12/2014 a imagem utilizada é proveniente do sensor EO1-ALI. Na figura 27, vêem-se lavas recentemente expelidas nas zonas Norte e Oeste da escoada. Na aplicação dos limiares -0.78, -0.80 e -0.82, os pixels identificados são os mesmos e a sua dispersão encontra-se maioritariamente nas direcções das escoadas da imagem do EO1-ALI. A sobreposição dos pixels identificados com a imagem do EO1-ALI resulta num bom ajuste, havendo apenas um pequeno desvio para Norte com dimensão menor que um pixel em relação à posição da escoada que vai de Este para Oeste. Este desvio pode dever-se a pequenas imprecisões no co-registo da imagem MODIS. A utilização do limiar -0.84 resulta na identificação adicional de dois pixels para Sul que não correspondem a nenhuma escoada visível na imagem do EO1-ALI.

Na figura 28, que corresponde a 17-18/01/2015, a imagem de melhor resolução espacial usada é proveniente do sensor EO1-Hyperion. Observando a imagem, é possível verificar a existência de lava incandescente junto ao foco da erupção. Na aplicação dos limiares -0.78 e -0.80, nenhum pixel é identificado como termicamente anómalo. Aquando da aplicação dos limiares -0.82 e -0.84, há a identificação de um conjunto de pixels que quando sobrepostos com a imagem do EO1-Hyperion se encontram na zona do foco.

Efectuou-se o mesmo tipo de estudo comparativo mas com os contornos vectoriais das lavas, ao invés das imagens de outros satélites. Os contornos vectoriais possibilitam uma visualização mais detalhada da evolução das escoadas de lava durante o evento eruptivo. Foram obtidos 8 contornos vectoriais que descrevem o fenómeno (Figuras 29 e 30).

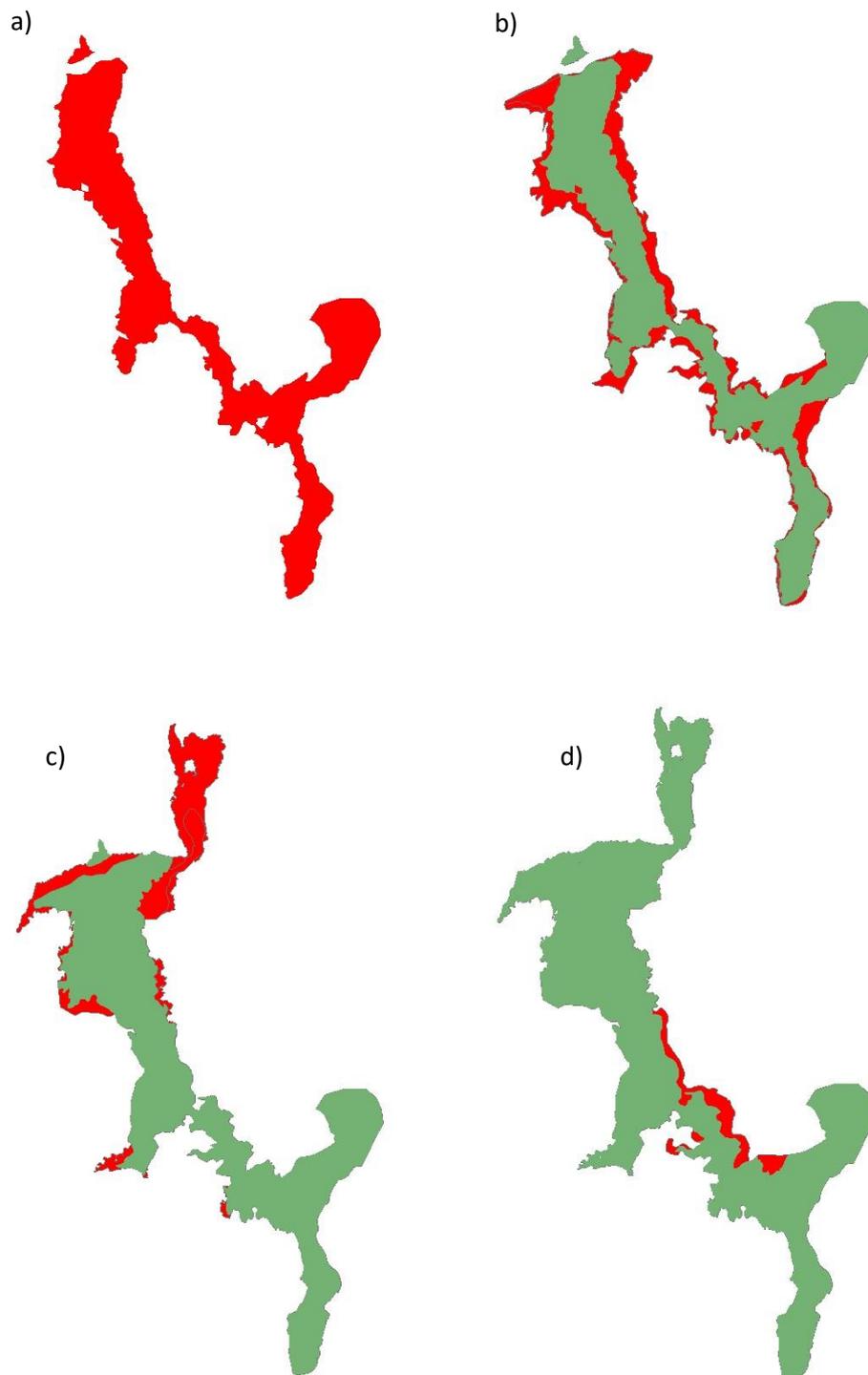


Figura 29 - Contornos vectoriais das escoadas de lava com indicação (vermelho) de zonas onde houve mudança em relação ao contorno vectorial anterior (verde), em:

a) 26/11/2014; b) 29/11/2014; c) 07/12/2014; d) 12/12/2014;

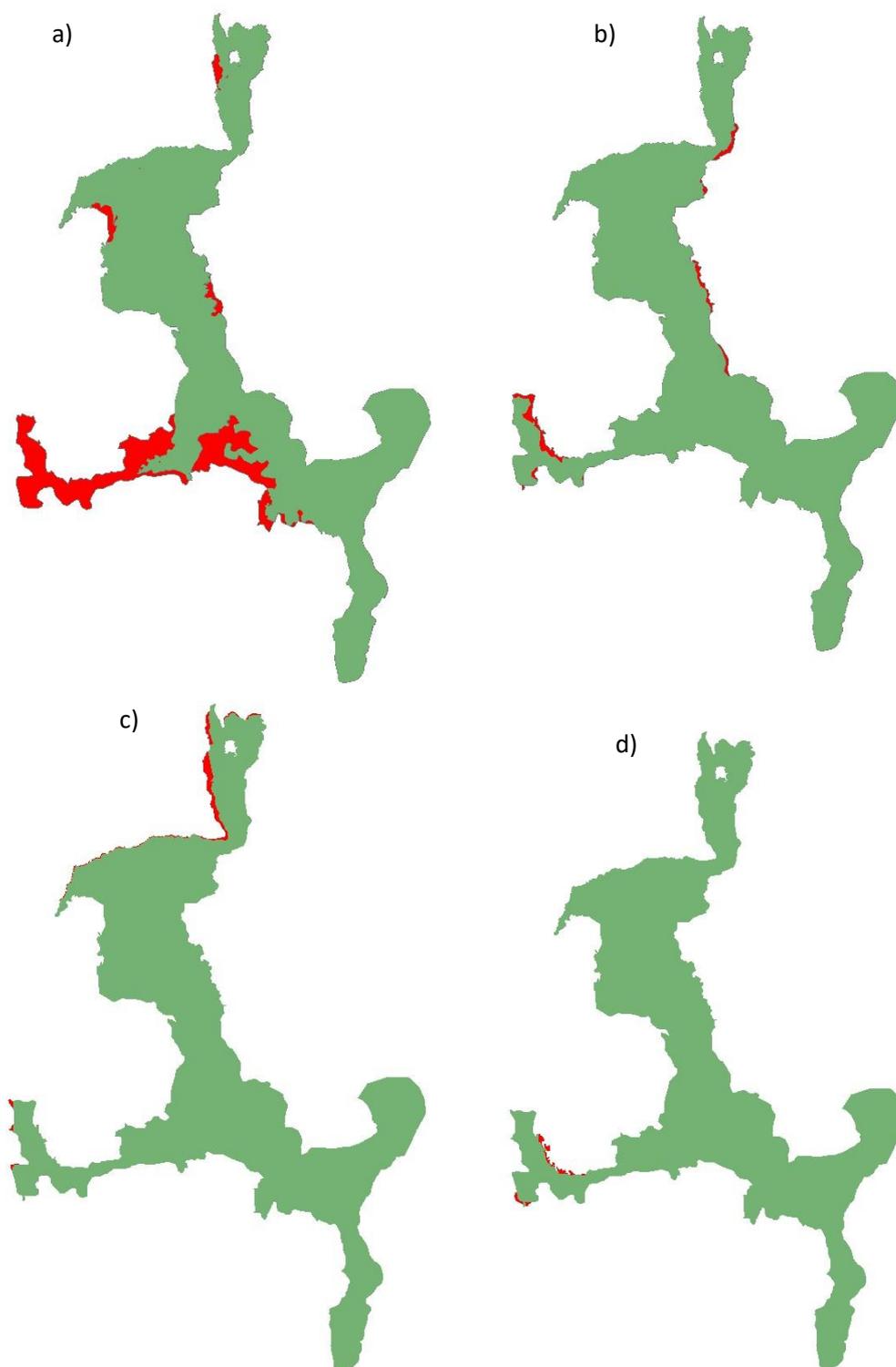


Figura 30 - Contornos vectoriais dos limites das escoadas de lava com indicação (verde) de zonas onde houve mudança em relação ao contorno vectorial anterior (vermelho), em:

a) 23/12/2014; b) 24/1/2014; c) 25/12/2014; d) 28/12/2014;

As zonas indicadas com setas nas imagens dos contornos vectoriais (figuras 29 e 30), correspondem a pequenas mudanças nas suas formas entre datas consecutivas, marcando por isso zonas onde se prevê que as lavas tenham fluído nessas datas ou datas anteriores próximas. Através da observação dos 8 contornos vectoriais relativos às escoadas de lava e respectivas datas (figuras 29 e 30) é possível verificar que a área afectada à escoadas de lavas varia mais nos primeiros dois meses da erupção, havendo poucas ou nenhuma alteração entre datas consecutivas no final da erupção. Por outro lado, é possível observar que numa primeira fase, 26/11/2014, as escoadas vão maioritariamente para Norte e para Sul em relação ao foco da erupção. Por volta de 12/12/2014, a erupção chega um pouco mais a Norte contornando o Monte Amarelo. Esta altura coincide com a destruição da aldeia da Bangaeira. Por volta de 23/12/2014, há a deslocação das escoadas para Oeste do foco da erupção formando um “braço” nessa direcção. A partir desta data, existem apenas algumas modificações da forma do contorno vectorial na zona Oeste e Norte da escoada, correspondentes a avanços inexpressivos.

Estes contornos vectoriais representam a totalidade da área coberta pelas escoadas de lava, desde o início da erupção até à data do contorno vectorial. Nas imagens MODIS correspondentes a datas em que há contorno vectorial das lavas, não é expectável que os pixels identificados como termicamente anómalos cubram a totalidade do contorno vectorial, mas sim, apenas o caminho entre o foco da erupção e as zonas para onde as lavas fluem. Para três das datas em que existem contornos vectoriais, existem também imagens MODIS com boa qualidade. Aplicaram-se uma vez mais os limiares de estudo aos NTI destas imagens e compararam-se as localizações dos pixels termicamente anómalos com a posição dos contornos vectoriais. As figuras 31, 32 e 33 são referentes a 26/11/2014, 25/12/2014 e 28/12/2014.

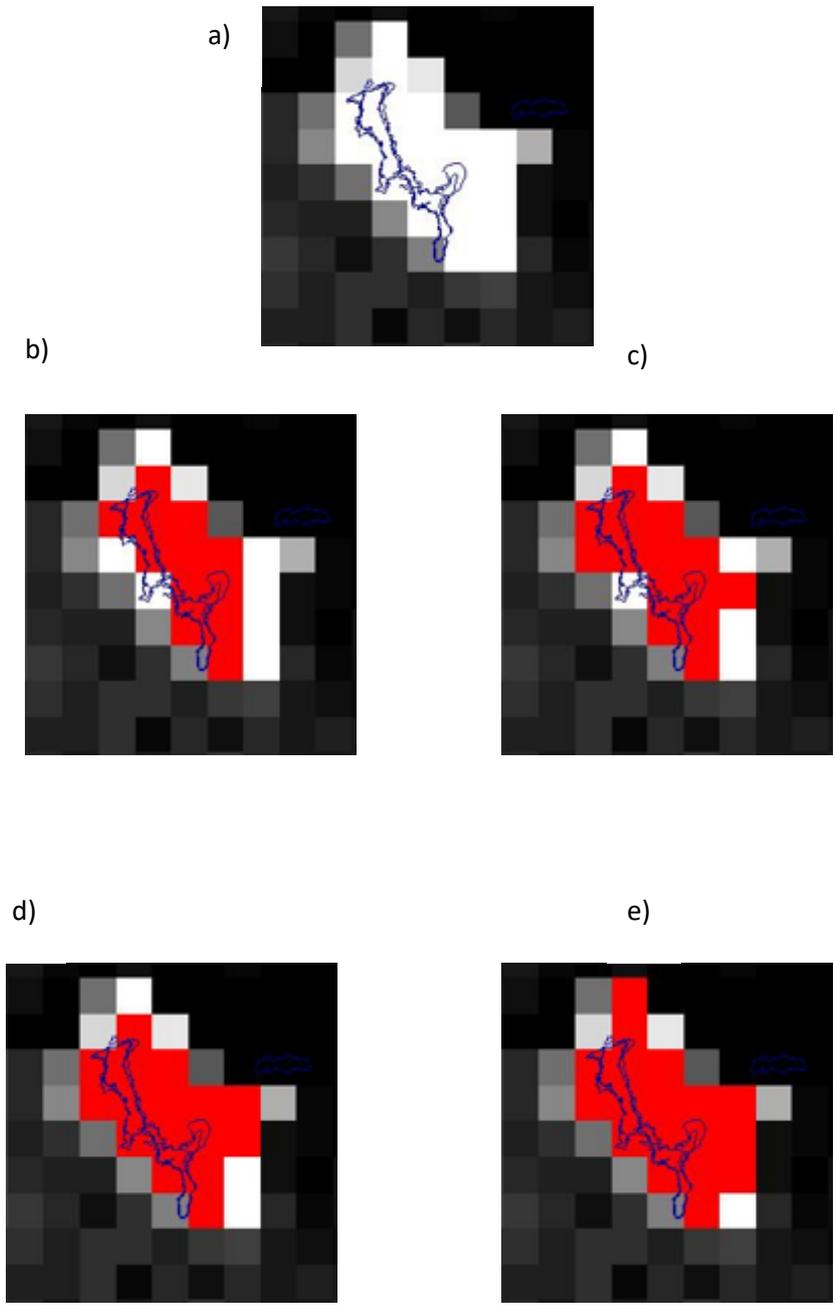


Figura 31 - Comparação do posicionamento dos pixels identificados como termicamente anómalos para os 4 limiares de estudo com a posição do contorno vectorial das lavas para a mesma data de 26/11/2014: (a) NTI; (b) limiar -0.78; (c) limiar -0.80; (d) limiar -0.82; (e) limiar -0.84.

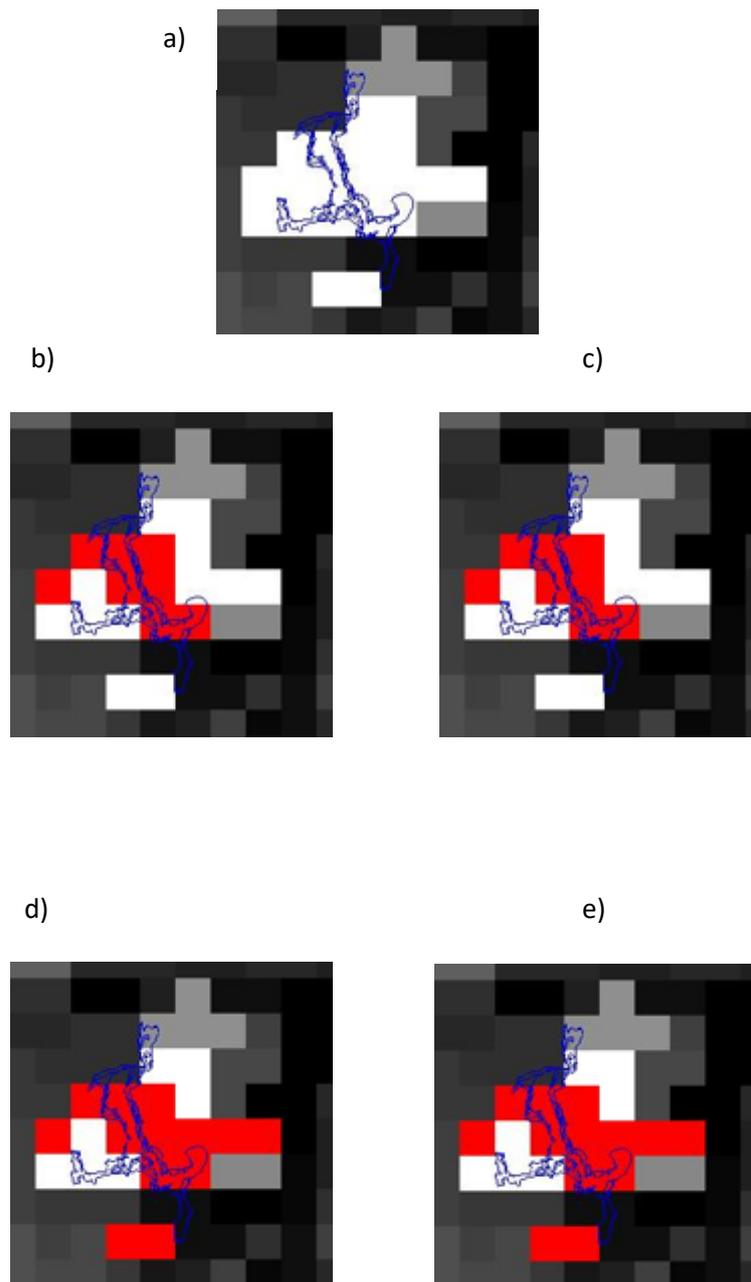


Figura 32 - Comparação do posicionamento dos pixels identificados como termicamente anómalos para os 4 limiares de estudo com a posição do contorno vectorial das lavas para a mesma data de 25/12/2014: (a) NTI; (b) limiar -0.78; (c) limiar -0.80; (d) limiar -0.82; (e) limiar -0.84.

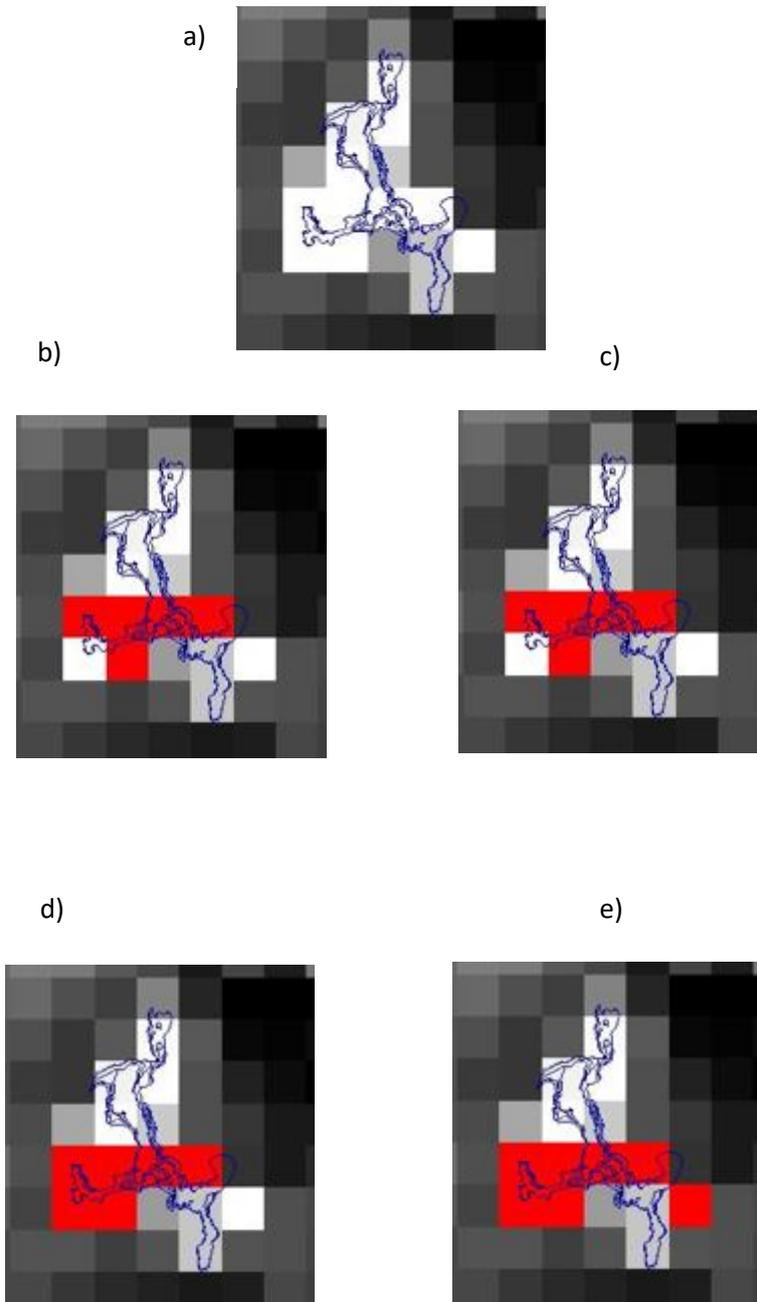


Figura 33 - Comparação do posicionamento dos pixels identificados como termicamente anómalos para os 4 limiares de estudo com a posição do contorno vectorial das lavas para a mesma data de 28/12/2014 : (a) NTI; (b) limiar -0.78; (c) limiar -0.80; (d) limiar -0.82; (e) limiar -0.84.

No dia 26 de Novembro (figura 31), a erupção ainda se encontra numa fase inicial tendo as escoadas fluído maioritariamente para Norte e Sul em relação ao foco da erupção. Na sobreposição do contorno vectorial desta data aos pixels identificados pelos limiares, observa-se essa mesma tendência. Para os limiares -0.78 e -0.80 o contorno vectorial é quase totalmente coberto pelos pixels, existindo apenas algumas zonas onde isso não acontece. A aplicação do limiar -0.82 leva a uma cobertura melhor do contorno vectorial levando apenas a mais uma falsa identificação em relação ao limiar -0.80. A aplicação do limiar -0.84 não resulta em nenhuma melhoria na cobertura do contorno vectorial levando ao aparecimento de mais duas falsas identificações em relação ao limiar -0.82.

No dia 25 de Dezembro as escoadas de lava já se tinham espreado para Oeste do foco da erupção formando um “braço” nessa direcção. Comparando o contorno vectorial desta data com o contorno vectorial da data anterior é possível verificar alterações na zona Norte das escoadas (evidenciado pela seta na Figura 30 a)). Assim, nesta data as lavas terão escoado maioritariamente para Oeste e Norte. Para esta data, a comparação dos pixels identificados pelos limiares e o contorno vectorial não produz resultados satisfatórios uma vez que a zona Oeste das escoadas não se encontra bem representada para nenhum dos limiares usados. Ainda assim, para a totalidade dos limiares, a zona Norte da escoada encontra-se satisfatoriamente representada. Na aplicação dos limiares -0.82 e -0.84, há a identificação de mais dois pixels que se sobrepõem ao contorno vectorial, mas há também maior incidência de falsas identificações, maioritariamente a Este do foco. Um dos pixels adicionalmente identificado que se encontra sobreposto com o contorno vectorial ocorre na zona Sul das escoadas, zona para a qual não há modificação da forma entre datas sucessivas. Isso não quer dizer, no entanto, que não tenha havido fluxo de lava nessa direcção. Para esta data é difícil perceber qual o limiar que produz uma melhor representação da escoada, uma vez que os resultados não são elucidativos. Pode-se também argumentar que o co-registo da imagem MODIS não se encontra perfeitamente ajustado, o que é plausível dada a dificuldade que representa o co-registo de imagens com 1 km de tamanho de pixel, mas isso não explica a falta de continuidade entre pixels identificados, ou seja, a identificação de pixels que não se encontram adjacentes a outros pixels identificados.

Entre os dias 25/12/2014 e 28/12/2014, observam-se na figura 30 pequenas alterações na forma dos contornos vectoriais na zona Oeste da escoada. Assim, assume-se que entre estas datas as escoadas ter-se-ão deslocado maioritariamente para Oeste. Tal tendência é evidenciada na comparação do contorno vectorial com os pixels identificados por todos os limiares usados. Na aplicação dos limiares -0.78 e -0.80, a zona mais a Oeste das escoadas continua por identificar. Com o limiar -0.82 todo o braço Oeste da escoada é identificado. Por último, o limiar -0.84 adiciona uma falsa identificação de um pixel, sem adicionar nenhuma melhoria em relação ao limiar -0.82. Neste caso, o limiar -0.82 é o mais abrangente sem identificar nenhum pixel erradamente.

O estudo da qualidade de informação espacial referentes aos *hot spots* identificados pelo método mostra que, devido à fraca resolução espacial do MODIS, os resultados são de qualidade muito inferior aos que seriam obtidos pelos satélites usados como comparação nesta etapa do trabalho. Por outro lado, a quantidade de dados disponível é bastante superior devido à muito elevada resolução temporal do MODIS. Para algumas das datas, é possível observar-se a direcção da escorrência das lavas, uma vez que esta erupção teve apenas um foco e conhece-se a sua localização. Assim, o uso destas imagens para o estudo da escorrência das lavas é uma maneira de complementar as informações obtidas entre as datas de duas imagens de sensores de resolução espacial superior. Quanto ao limiar que produz os melhores resultados nesta etapa do trabalho, observou-se que os limiares -0.78 e -0.84 são seguramente os que produzem piores resultados na identificação das zonas abrangidas pelas escoadas, sendo que o primeiro identifica relativamente poucos pixels que pertençam às escoadas e o segundo identifica erradamente muitos pixels. Em relação aos limiares -0.80 e -0.82, o desempenho destes varia consoante o factor que se der mais peso: a identificação correcta de pixels ou a não identificação errada de pixels. O limiar -0.82 identifica geralmente melhor os pixels pertencentes às escoadas, mas também identifica mais pixels erradamente. No entanto, o número de pixels adicionalmente identificados erradamente em relação ao limiar -0.80, contrabalança nos casos observados o número de pixels adicional que identifica correctamente,

4.4 Resultados da Análise de Contexto

Nas análises temporal e espacial procurou-se perceber a aplicabilidade da metodologia proposta e como melhorar os resultados para o estudo desta erupção, através da aplicação de limiares de estudo. A combinação das informações destas duas análises possibilita à partida tirar conclusões sobre o método, o estabelecimento do limiar que melhor se aplica a esta erupção e ajudar a reconstituir o evento eruptivo. No entanto, os resultados só poderão ser válidos se em períodos não eruptivos o método não identificar erradamente *hot spots*.

Numa primeira fase estudou-se quais os valores normais do NTI para ilha, mais especificamente a caldeira, para períodos não eruptivos. Foram seleccionadas imagens da ilha, quer antes, quer depois da erupção de 2014/2015 (anexo A.2). Estas imagens encontram-se afastadas alguns meses do período da erupção.

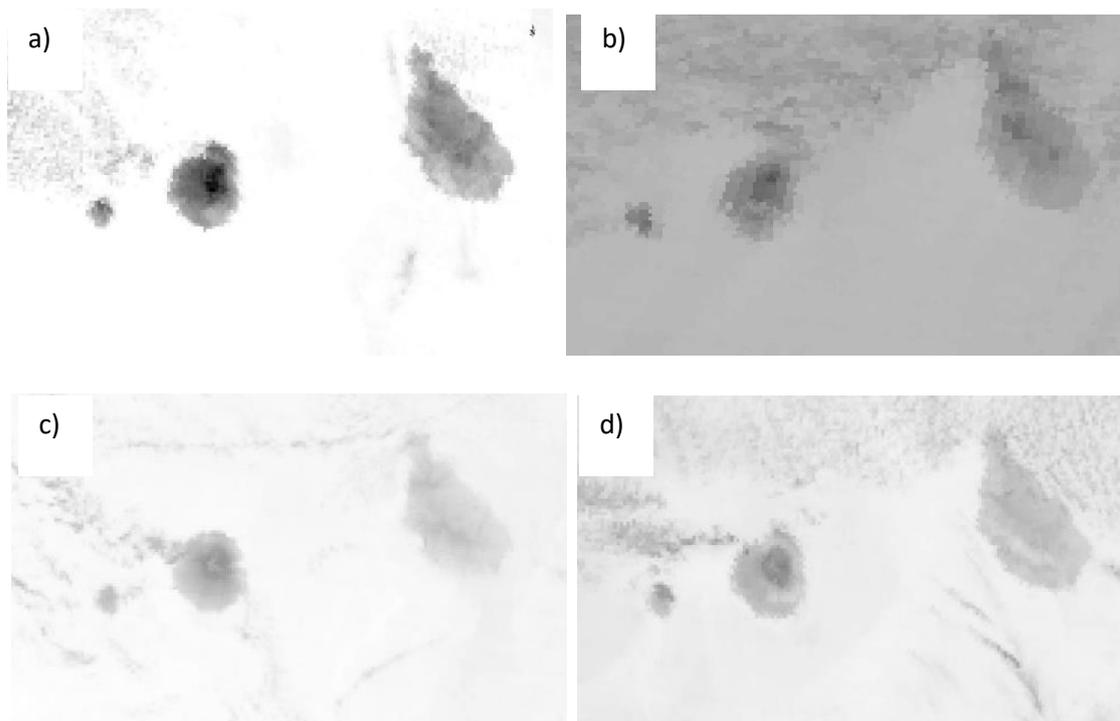


Figura 34 - NTI da imagem MODIS captada no dia: (a) 06/02/2014; b) 10/02/2014; c) 05/09/2016; d) 09/10/2016;

Como é possível verificar na figura 34, em que além da ilha do Fogo ao centro se incluem também as ilhas da Brava (a Oeste) e de Santiago (a Este), em nenhuma das quatro datas o NTI das imagens detecta *hot spot* algum para qualquer dos limiares de estudo. Aliás, a caldeira é até a zona mais fria da ilha (zona mais escura na escala de cinzentos).

Seleccionaram-se em seguida imagens de datas próximas do período da erupção, nomeadamente a data imediatamente anterior ao começo da erupção (22/11/2014) e a data imediatamente a seguir ao seu término (09/11/2015).

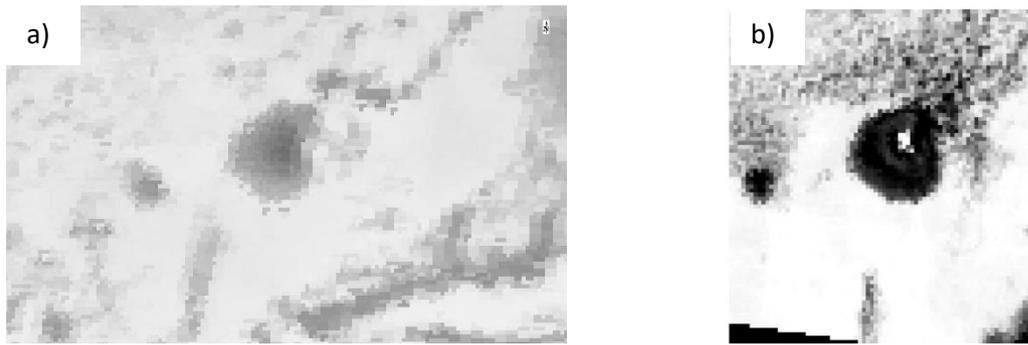


Figura 35 - NTI da imagem MODIS captada no dia: (a) 22/11/2014; b) 09/02/2015;

Na data anterior à erupção, 22/11/2014, não se verifica qualquer anomalia térmica na ilha (Figura 35a)). A caldeira é na realidade a zona mais fria da ilha. Assim, através deste método seria impossível prever o acontecimento da erupção nos dias anteriores à erupção. Esse facto é confirmado pelo tipo de erupção característico da ilha do Fogo, no qual as lavas ascendem rapidamente de uma câmara principal que se encontra no manto e possuem um tempo de residência curto em câmaras secundárias superficiais, como sugere Mata et al. (2017).

No dia 9/02/2015 (figura 35b)), data após o término da erupção, a caldeira encontra-se mais quente (níveis de cinzento mais claros que o resto da ilha). No entanto, nenhum dos limiares de estudo causam detecção de *hot spots*. Para causar a detecção de *hot spots* para esta data seria necessário utilizar um limiar de -0.87, que levaria à detecção de três pixels junto ao foco da erupção, como é possível observar na figura 36.



Figura 36 - NTI da imagem MODIS captada no dia 09/02/2015 com a aplicação do limiar de -0.87

Por último, uma vez que a caldeira ainda se encontra com temperaturas elevadas no dia após o final da erupção, procurou-se determinar o tempo que demorou o arrefecimento da caldeira. Seleccinaram-se imagens espaçadas entre si por alguns dias e calculou-se, para cada, o NTI com o intuito de encontrar a primeira ocorrência de imagem (sem ruído) para a qual a caldeira não apresente uma temperatura superior à registada nas áreas restantes da ilha.

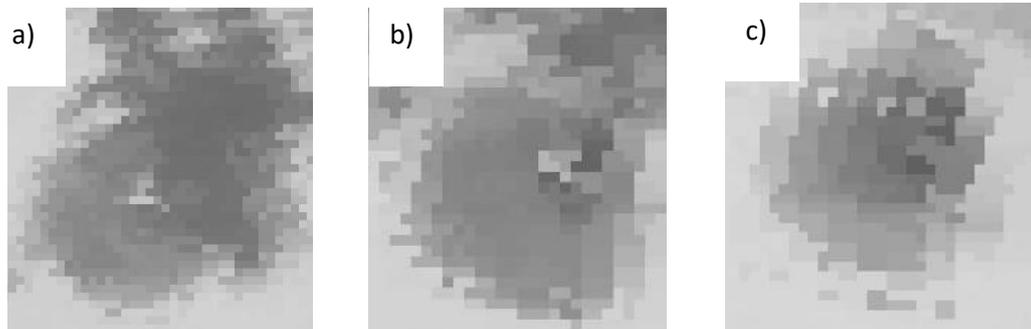


Figura 37 - a) NTI da imagem MODIS captada no dia 19/02/2014; b) NTI da imagem MODIS captada no dia 26/02/2015; b) NTI da imagem MODIS captada no dia 05/03/2015;

Na figura 37, a ilha encontra-se a arrefecer mas é ainda notório que alguns pixels no interior da caldeira se encontram mais claros que os restantes. Em nenhuma destas datas há a identificação de *hot spots* quando se aplicam os limiares de estudo. Pensa-se que a situação topográfica da caldeira (vertente elevada de um lado, a Bordeira, e o Pico do Fogo do outro) favoreça um certo isolamento que potencia o arrefecimento mais lento. A 05/03/2015 (figura 37c)), a caldeira já se encontra suficientemente fria para não se conseguir observar nenhuma zona da caldeira com pixels mais claros. Assim, conclui-se que a caldeira arrefeceu consideravelmente em menos de um mês.

Em nenhuma das imagens analisadas nesta fase do trabalho existem situações em que o método identifique erradamente *hot spots* em datas não eruptivas, pelo que se reforça que este é adequado, tal como qualquer um dos outros limiares escolhidos é adequado segundo esta perspectiva.

5. Conclusões e trabalhos futuros

A erupção da ilha do Fogo de 2014/2015 serviu para se desenvolver e testar uma metodologia de reconstituição de um evento vulcânico utilizando por base imagens de baixa resolução espacial, mas elevada resolução temporal. A metodologia baseada nos algoritmos de detecção de *hot spots* vulcânicos através do estabelecimento de um limiar fixo, e mais especificamente o algoritmo MODVOLC, foi aplicada e avaliada não só para a detecção de pixels termicamente anómalos, mas também para estabelecer a qualidade da informação disponibilizada na reconstituição do evento ao longo da erupção.

A avaliação do desempenho da metodologia proposta passou pela descrição da actividade vulcânica ao longo da erupção, do posicionamento das lavas e direcção provável de fluxo, pela adequabilidade do método para datas não eruptivas e à comparação dos resultados obtidos para as imagens MODIS com informações provenientes de outras fontes. Estes passos compõem as três análises de execução do método: temporal, espacial e de contexto. Destas três análises resultam informações complementares quanto à fidedignidade do método, que por sua vez resultam no estabelecimento do limiar que melhor descreve o evento (uma vez que se trata de uma metodologia baseada num algoritmo de limiar fixo).

Na análise temporal estudou-se o historial de actividade vulcânica através do número de pixels identificados como termicamente anómalos ao longo do decorrer da erupção. Foi feita a comparação com os dados de efusividade calculados por Mathieu Gouhier a partir de dados do SEVIRI e foram obtidas correlações positivas entre o número de identificações e o valor da efusividade média para cada dia e cada limiar de estudo. Atingiu-se o valor de correlação máximo para o limiar de -0.82, sendo este de 0.6971. Assim, considerou-se que o método é adequado para descrever a intensidade vulcânica da erupção ao longo do tempo.

Na análise espacial estudou-se a posição relativa dos pixels identificados como termicamente anómalos com a localização conhecida das escoadas de lava para datas nas quais há informação adicional de fontes que providenciam informação de maior pormenor espacial. Nesta análise, foi possível verificar que para a maior parte das datas estudadas os pixels identificados como termicamente anómalos se encontravam, de uma forma geral, em localizações esperadas, tendo em conta os limites conhecidos das lavas. Verificaram-se no entanto para duas datas, 24/11/2014 e 25/12/2014, alguns erros na posição dos pixels. Para a primeira data (24/11/2014), há um excesso de pixels identificados, o que se pensa poder ser o resultado do calor emitido por plumas e fumo e pela

forma côncava da caldeira que retém o calor no seu interior. Na segunda data (25/12/2014) há um misto de falsas identificações com falta de identificações correctas de certos pixels. Considerou-se que na maior parte dos casos de estudo, o limiar de -0.82 foi o que produziu melhores resultados na identificação de pixels termicamente anómalos sem resultar na identificação excessiva de falsos positivos. O método não pode ser encarado como substituto da análise de imagens de resolução espacial superior, mas como um estudo complementar que fornece dados adicionais para as datas em que essas imagens não existam.

Numa última fase de implementação do método, considerou-se importante que este fosse fidedigno, não só para descrever os períodos eruptivos, mas também para descrever convenientemente os períodos não eruptivos, isto é, não detectar *hot spots* nessas alturas. Para tal, aplicou-se o método a imagens de datas prévias e póstumas à erupção e com espaçamentos temporais maiores ou menores. Em nenhuma das datas estudadas se verificou a detecção incorrecta de pixels termicamente anómalos. Nesta análise estudou-se também com maior pormenor as datas adjacentes ao início e término da erupção. Para a data imediatamente anterior à erupção (22/11/2014) não existe nenhuma anomalia térmica que permita antever o acontecimento da mesma. No dia imediatamente após ao término da erupção (09/02/2015) não há a identificação de nenhum pixel como termicamente anómalo para a aplicação dos limiares de estudo. No entanto, é visível no NTI que a caldeira se encontra ainda mais quente que a o resto da ilha. Verificou-se que o arrefecimento da caldeira leva menos de um mês, não sendo visível nenhum indício de calor latente no NTI da imagem de 05/03/2015. Considera-se por isso, que o método funciona devidamente para alturas não eruptivas o que consolida a fidedignidade do mesmo.

Em suma, considera-se que o método desenvolvido é adequado ao estudo reconstitutivo da erupção do vulcão da ilha do Fogo, produzindo resultados com interesse para o maior conhecimento do fenómeno e das técnicas de estudo de vulcanologia através da utilização de imagens de detecção remota térmica. Tendo em vista a continuação deste estudo em trabalhos futuros, propõe-se a aplicação do método para reconstituir outras erupções, adaptando-o à realidade regional destas, e eventualmente utilizar o método para descrever uma erupção em tempo real, comparando sempre que possível com as análises de imagens de elevada resolução espacial que forem sendo captadas durante o evento.

6. Referências bibliográficas

Bagnardi M., González P. J., Hooper A. 2016. High-resolution digital elevation model from tri-stereo Pleiades-1 satellite imagery for lava flow volume estimates at Fogo Volcano. *Geophysical Research Letter*, 43, 6267–6275.

Cappello A., Ganci G., Calvari S., Pérez N. M., Hernández P. A., Silva S. V., Cabral J., e Negro C. D. 2016. Lava flow hazard modeling during the 2014–2015 Fogo eruption, Cape Verde. *Journal of Geophysical Research*, 121, 2290–2303.

Coppola D., Laiolo M., Donne D. D., Ripepe M. e Cigolini C. 2014. Hot-spot detection and characterization of strombolian activity from MODIS infrared data. *International Journal of Remote Sensing*, 35, 3403-3426.

Day S.J., Heleno S.I.N., Fonseca J.F.B.D. 1999. A past giant lateral collapse and present-day flank instability of Fogo, Cape Verde Islands. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 94, 191-218.

Di Bello G., Filizzola C., Lacava T., Marchese F., Pergola N., Pietrapertosa C., Piscitelli S., Scaffidi I. e Tramutoli V.. 2004. Robust satellite techniques for volcanic and seismic hazards monitoring. *Annals of Geophysics*, 47, 49-64.

González P. J., Bagnardi M., Hooper A. J., Larsen Y., Marinkovic P., Samsonov S. V., e Wright T. J. 2015. The 2014–2015 eruption of Fogo volcano: Geodetic modeling of Sentinel-1 TOPS interferometry. *Geophysical Research Letter*, 42, 9239–9246.

Gouhier M., Harris A., Calvari S., Labazuy P., Guéhenneux Y., Donnadieu F., Valade S. *Lava discharge during Etna's January 2011 fire fountain tracked using MSG-SEVIRI. Bull Volcanol* (2012), 74:787–793.

Harris A. 2013. *Thermal Remote Sensing of Active Volcanos – A User's Manual*. Cambridge.

Heleno S. 2003. *O vulcão do Fogo – Estudo Sismológico*. Instituto Português de Apoio ao Desenvolvimento.

Higgins J. e Harris A. 1997. VAST: A Program To Locate And Analyse –volcanic Thermal Anomalies Automatically From Remotely Sensed Data. *Computers & Geoscience*, 23, 627-645.

Kenneson G., Dean, Jonathan e Dehn J. 2013. *Monitoring Volcanoes in the North Pacific*. Springer.

Koeppen W. C., Pilger E. e Wright R. 2010. Time series analysis of infrared satellite data for detecting thermal anomalies: a hybrid approach. *Bull Volcanol*, 73, 577-593.

Mata J., Martins S., Mattielli N., Madeira J., Faria B., Ramalho R., Silva P., Moreira M., Caldeira R., Moreira M., Rodrigues J., Martins L., *The 2014–15 eruption and the short-term geochemical evolution of the Fogo volcano (Cape Verde): Evidence for small-scale mantle heterogeneity. Lithos* 288-289 (2017), 91-107.

Murphy S.W., Wright R., Oppenheimer C., Souza Filho C.R. 2013. MODIS and ASTER synergy for characterizing thermal volcanic activity. *Remote Sensing of Environment*, 131, 195–205.

Pina P. 2016. Plataformas e Sensores. Material de apoio da disciplina Detecção Remota, Mestrado em Engenharia Geológica e de Minas, Instituto Superior Técnico.

Ramalho R., Winckler G., Madeira J., Helffrich G. Hipólito A., Quartau R., Adena K., Schaefer J. 2015. Hazard potential of volcanic flank collapses raised by new megatsunami evidence. *Science Advances*, 02/10/2015: E1500456.

Ribeiro O. 1998. A ilha do Fogo e as suas erupções. Comissão Nacional para as Comemorações dos Descobrimentos Portugueses 1997.

Steffke A. M. e Harris A. J. L. 2011. A review of algorithms for detecting volcanic hot spots in satellite infrared data. *Bulletin of Volcanology*, 73, 1109–1137.

Vieira D., Teodoro A., Gomes A. 2016. Analysing Land Surface Temperature variations during Fogo Island (Cape Verde) 2014-2015 eruption with Landsat 8 images. *Proc. of SPIE*, 10005, 1000508-14.

Wright R., Flynn L. P., Garbeil H., Harris A. J.L., Pilger E. 2002. MODVOLC: near-real-time thermal monitoring of global volcanism. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 135, 29-49.

Observatório Vulcanológico e Geotérmico Dos Açores. <http://ovga.centrosciencia.azores.gov.pt/noticia/vulc%C3%A3o-do-fogo-cabo-verde-lavas-amea%C3%A7am-o-per%C3%ADmetro-florestal-de-monte-velha>. Consultado pela última vez a 23 de junho de 2017.

Buzzle. <http://www.buzzle.com/articles/volcanic-eruptions-what-causes-volcanoes-to-erupt.html>. Consultado pela última vez a 22 de junho de 2017.

Anexo A

Seleccção e aquisição de dados

Neste anexo encontram-se a totalidade dos dados seleccionados para a elaboração do trabalho, com respectiva data e hora de aquisição/elaboração. No anexo A.1 encontram-se descritos os dados referentes ao período eruptivo do vulcão da ilha do Fogo (de 24-11-2014 a 08-02-2015), dados que foram utilizados nas análises temporal e espacial do método. No anexo A.2 encontram-se descritos os dados referentes ao período não eruptivo do vulcão da ilha do Fogo, que foram usados na análise de contexto do método.

Anexo A. 1 – Dados adquiridos referentes ao período da erupção:

EO1-ALI	Data	Hora Copernicus	Data	Hora
	10-12-2014	10:41:54	25-11-2014	09:09:30
	16-12-2014	11:04:02	25-11-2014	18:11:03
	18-12-2014	10:39:02	26-11-2014	21:53:55
	24-12-2014	11:01:03	05-12-2014	14:06:14
	29-12-2014	10:46:54	05-12-2014	15:56:59
	17-01-2015	10:51:22	05-12-2014	16:02:28
	22-01-2015	10:37:08	05-12-2014	18:34:09
			10-12-2014	20:41:27
Landsat8_OLI	Data	Hora	24-12-2014	14:38:07
	24-11-2014	11:58:49	07-01-2015	17:17:09
	10-12-2014	11:58:43	08-01-2015	22:37:54
	26-12-2014	11:58:43	08-01-2015	22:39:56
	11-01-2015	11:58:11	09-01-2015	10:29:12
	27-01-2015	11:58:35	09-01-2015	10:33:19
			09-01-2015	10:34:46
EO1-Hyperion	Data	Hora	09-01-2015	10:38:17
	29-12-2014	10:46:55	12-01-2015	10:27:39
	17-01-2015	10:51:22		
	22-01-2015	10:37:07		

MODIS AQUA	Data	Hora	MODIS AQUA	Data	Hora
	23-11-2014	02:55:00		02-01-2015	03:45:00
	24-11-2014	03:35:00		03-01-2015	02:50:00
	25-11-2014	02:40:00		04-01-2015	03:30:00
	26-11-2014	03:25:00		05-01-2015	02:35:00
	28-11-2014	03:15:00		06-01-2015	03:20:00
	29-11-2014	03:55:00		07-01-2015	04:00:00
	30-11-2014	03:00:00		08-01-2015	03:05:00
	01-12-2014	03:45:00		09-01-2015	03:50:00
	02-12-2014	02:50:00		10-01-2015	02:55:00
	03-12-2014	03:30:00		11-01-2015	03:40:00
	04-12-2014	02:35:00		12-01-2015	02:45:00
	05-12-2014	03:20:00		13-01-2015	03:25:00
	06-12-2014	04:00:00		15-01-2015	03:15:00
	07-12-2014	03:05:00		16-01-2015	03:55:00
	08-12-2014	03:50:00		17-01-2015	03:00:00
	09-12-2014	02:55:00		18-01-2015	03:45:00
	10-12-2014	03:35:00		19-01-2015	02:50:00
	11-12-2014	02:40:00		20-01-2015	03:30:00
	12-12-2014	03:25:00		21-01-2015	02:35:00
	14-12-2014	03:15:00		22-01-2015	03:20:00
	15-12-2014	03:55:00		23-01-2015	04:00:00
	16-12-2014	03:00:00		24-01-2015	03:05:00
	17-12-2014	03:45:00		25-01-2015	03:50:00
	18-12-2014	02:50:00		26-01-2015	02:55:00
	19-12-2014	03:30:00		27-01-2015	03:40:00
	20-12-2014	02:35:00		28-01-2015	02:45:00
	21-12-2014	03:20:00		29-01-2015	03:25:00
	22-12-2014	04:00:00		31-01-2015	03:15:00
	23-12-2014	03:05:00		01-02-2015	03:55:00
	24-12-2014	03:50:00		02-02-2015	03:00:00
	25-12-2014	02:55:00		03-02-2015	03:45:00
	26-12-2014	03:40:00		04-02-2015	02:50:00
	27-12-2014	02:40:00		05-02-2015	03:30:00
	27-12-2014	02:45:00		06-02-2015	02:35:00
	28-12-2014	03:25:00		07-02-2015	03:20:00
	30-12-2014	03:15:00			
	31-12-2014	03:55:00			
	01-01-2015	03:00:00			

Anexo A.2 – Dados adquiridos referentes ao período não eruptivo:

Imagem de referência Landsat8_OLI	Data	Hora
	23-10-2014	11:58:51

MODIS AQUA	Data	Hora
	06-02-2014	03:05:00
	10-02-2014	02:45:00
	22-11-2014	03:50:00
	09-02-2015	03:05:00
	19-02-2015	03:45:00
	26-02-2015	04:50:00
	05-03-2015	03:50:00
	05-09-2016	03:05:00
	09-10-2016	03:50:00

Anexo B

Dados da análise Temporal do método

Neste anexo encontram-se os dados referentes à efusividade, calculados por Mathieu Gouhier e a contagem de pixels identificados como termicamente anómalos para cada um dos limiares de estudo. Estes dados foram utilizados para a produção dos histogramas (figuras 13, 14, 15 e 16) e os diagramas de dispersão (figuras 17, 18, 19 e 20)

Anexo B. 1 – Dados referentes à efusividade e a contagem de pixels identificados como termicamente anómalos para cada um dos limiares de estudo:

Data	Nº de pixels identificados para o limiar de -0.78	Nº de pixels identificados para o limiar de -0.80	Nº de pixels identificados para o limiar de -0.82	Nº de pixels identificados para o limiar de -0.84	Efusividade máxima diária (m ³ /s)	Efusividade média diária (m ³ /s)
24-11-2014	25	27	36	41	20.837298	8.557455425
25-11-2014	22	30	36	45	45.08785	7.08152935
26-11-2014	12	14	16	18	14.211263	4.452618447
28-11-2014	9	10	10	11	14.352098	4.967843898
29-11-2014	23	26	28	34	15.451096	5.624830657
30-11-2014	20	20	20	20	14.593547	4.691900278
01-12-2014	19	19	19	21	21.186757	3.340345289
02-12-2014	18	18	18	20	9.6003659	3.752869021
03-12-2014	10	13	15	15	14.40071	3.410793056
04-12-2014	30	30	30	30	15.665801	1.504196654
05-12-2014	2	6	5	7	21.483408	0.939023321
07-12-2014	14	17	20	21	13.879446	2.867424955
08-12-2014	24	24	24	24	10.552787	3.309752329
09-12-2014	10	13	13	18	7.5556578	2.801386466
10-12-2014	3	3	3	3	14.001975	0.619795219
11-12-2014	11	11	11	14	22.831237	1.759389231
12-12-2014	4	5	7	9	15.989039	1.249687493
14-12-2014	7	8	10	12	11.660678	0.694365961
15-12-2014	0	0	0	0	14.3101	2.288370212
16-12-2014	12	12	12	18	7.3653532	2.119024682
18-12-2014	10	10	10	20	10.785104	1.21751354
19-12-2014	1	1	1	4	9.2952893	0.736492175
20-12-2014	0	0	0	0	7.7410316	0.697225153
21-12-2014	5	5	8	14	11.564276	0.216795846
22-12-2014	0	0	0	10	0	0
23-12-2014	4	4	4	5	0	0
25-12-2014	8	8	13	13	5.0759789	0.224020452
27-12-2014	0	0	0	3	0	0
28-12-2014	5	5	6	7	7.8235591	0.109108386
30-12-2014	20	20	20	20	5.295243	0.27463931
31-12-2014	0	0	0	0	0	0
02-01-2015	0	0	0	2	0	0
04-01-2015	0	0	1	3	0	0
06-01-2015	0	0	0	1	0	0
08-01-2015	0	0	0	0	2.521867	0.026269448
09-01-2015	0	0	0	0	2.521867	0.051644889
10-01-2015	0	0	0	3	2.5670097	0.197524817
11-01-2015	0	0	0	3	5.0243874	0.100596833

Data	Nº de píxels identificados para o limiar de -0.78	Nº de píxels identificados para o limiar de -0.80	Nº de píxels identificados para o limiar de -0.82	Nº de píxels identificados para o limiar de -0.84	Efusividade máxima diária (m ³ /s)	Efusividade média diária (m ³ /s)
13-01-2015	0	0	0	1	0	0
15-01-2015	0	0	1	2	0	0
16-01-2015	0	0	0	0	0	0
17-01-2015	0	0	0	0	16.434708	0.372570674
18-01-2015	0	0	5	5	5.7347683	0.224831345
20-01-2015	1	1	1	4	2.5283161	0.14837164
22-01-2015	0	3	3	3	3.3462191	0.380641468
24-01-2015	0	0	0	0	0	0
26-01-2015	0	0	0	0	0	0
29-01-2015	0	0	1	2	0	0
31-01-2015	2	2	2	3	7.6881313	0.210813176
01-02-2015	0	0	0	0	10.835859	0.165345253
02-02-2015	0	0	1	1	13.526055	0.615363102
03-02-2015	0	0	0	0	14.576263	0.395562147
07-02-2015	2	2	2	3	15.887128	0.626221209
08-02-2015	0	0	0	0	5.5596498	0.416501666