

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



**Cartografia de áreas ardidadas do Norte de Portugal
Continental com recurso a imagens multiespectrais do
satélite Sentinel-2**

Rita Martins

**Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica – Tecnologias e
Aplicações**

Trabalho de Projeto orientado por:
Prof. Dr. João Catalão Fernandes
Prof. Dra. Ana Cristina Navarro Ferreira

2017

Resumo

O presente estudo tem como finalidade desenvolver uma metodologia que permita cartografar áreas ardidas com base em informação de satélite com elevada resolução espacial. Existe uma cartografia de área ardida em Portugal, produzida pelo Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas, mas possui uma resolução espacial de 250 metros. Este trabalho pretende, com recurso a imagens multiespectrais do satélite Sentinel-2 com uma resolução de 10 metros, cartografar áreas ardidas no Norte de Portugal Continental para o ano de 2016, seguindo uma metodologia de Bastarrika, *et al.*, (2011) e com esta análise avaliar as vantagens em usar imagens de satélite com melhores resoluções espaciais.

Ao longo do trabalho vai-se desenvolver uma metodologia para a criação de oito índices de áreas ardidas (NDVI, BAI, GEMI, NBR5, BAIS, NBRL, BAIML e MIRBI) agrupados em três grupos espectrais localizados na região do infravermelho próximo, médio e longo. Como resultado, foram produzidos três mapas de áreas ardidas pertencentes aos diferentes grupos espectrais, em que a classificação obtida vai ser validada a partir da construção de uma matriz de confusão, que nos permite obter dados da exatidão da classificação.

Desta forma vamos ver que o grupo espectral na região do infravermelho próximo e médio é o mais adaptado para a determinação de áreas ardidas, assim como vai ser visível as lacunas na classificação que é efetuada pelo ICNF para o ano de 2016.

Palavras-chave: Sentinel-2, incêndios, áreas ardidas, ICNF, matriz de confusão

Abstract

The aim of this study is to develop a methodology that allows mapping of burned areas. There is a cartography of an area burned in Portugal, produced by ICNF, but it has a spatial resolution of 250 meters. This work intends to map areas burned in the North of Continental Portugal using multi-spectral images of the Sentinel-2, with a resolution of 10 meters following a methodology by Bastarrika, et al. (2011) and with this analysis evaluate the advantages in using satellite images with better spatial resolutions.

In this project, a methodology will be developed eight indices of burned areas (NDVI, BAI, GEMI, NBR5, BAIR, NBRL, BAIRL and MIRBI) organized into three spectral groups according to the location in the near, medium and long infrared. As a result, three maps of burned areas belonging to the different spectral groups were produced, in which the classification obtained will be validated based on a confusion matrix, which allows us to obtain classification accuracy data.

In this way we will show that the spectral group in the near and medium infrared region is the one that is better in the determination of burned areas and errors in the classification of the ICNF for the year 2016.

Keywords: Sentinel-2, fires, burned areas, ICNF, confusion matrix

Agradecimentos

Em primeiro lugar, ao Prof. Dr. João Catalão Fernandes, o meu orientador desta dissertação, pela disponibilidade e simpatia demonstrada, pela partilha de conhecimentos e sugestões durante a realização deste trabalho.

À minha família, especialmente aos meus pais pelo carinho e incentivo para todos os dias dar o meu melhor, por me ensinarem que com trabalho e esforço tudo é possível. À minha irmã Laura por ser a melhor irmã do mundo e me inspirar a ser melhor e a dar o exemplo, aos meus irmãos Henrique e Miguel por serem os melhores irmãos do mundo e ao meu namorado Pedro pelo apoio demonstrado ao longo destes anos.

Aos meus amigos, especialmente Filipa Silva, Sara Bastos e Francisco Agostinho.

Aos meus colegas de trabalho, nomeadamente Mafalda Félix.

Aos colegas e amigos de mestrado que me acompanharam nesta importante etapa, nomeadamente à Mariana Costa, Sónia Vila e André Adro.

Índice

| | |
|---|----|
| 1. Introdução..... | 10 |
| 1.1. Enquadramento e motivação | 10 |
| 1.1.1. Portugal Continental e os incêndios florestais..... | 10 |
| 1.2. Objetivos | 12 |
| 1.3. Estado da Arte | 12 |
| 1.4. Estrutura da tese | 15 |
| 2. Conceitos teóricos | 16 |
| 2.1. Detecção Remota | 16 |
| 2.2. Missão Sentinel 2 | 19 |
| 2.3. Exatidão da classificação..... | 22 |
| 3. Metodologia e dados | 23 |
| 3.1. Área de estudo..... | 23 |
| 3.2. Dados..... | 24 |
| 3.3. Metodologia..... | 26 |
| 4. Delimitação da área ardida no norte de Portugal em 2016..... | 32 |
| 4.1. Áreas Ardidas e ocorrências em Portugal Continental no ano de 2016 | 32 |
| 4.2. Recorrência de incêndios (2006-2016)..... | 35 |
| 4.3. Cálculo dos índices de área ardida | 37 |
| 4.3.1. Regras de classificação..... | 42 |
| 4.3.2. Filtragem | 49 |
| 4.4. Análise espacial – áreas ardidas | 50 |
| 4.5. Matriz de confusão binária | 53 |
| 4.6. Discussão..... | 57 |
| 5. Conclusão e perspectivas futuras | 63 |
| Referências Bibliográficas | 65 |

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 - Distribuição dos usos do solo em Portugal continental para 2010. Fonte: 6.º Inventário Florestal Nacional..... | 11 |
| Figura 1.2 - Espécies florestais dominantes em Portugal Continental. Fonte: 6.º Inventário Florestal Nacional. | 11 |
| Figura 2.1 - Processo de Detecção Remota (Chipman, 2004) | 16 |
| Figura 2.2 - Radiação eletromagnética (CCRS, 2015)..... | 17 |
| Figura 2.3 - Espectro eletromagnético. Fonte: NASA..... | 17 |
| Figura 2.4 - Curvas de refletância espectral para vários tipos de materiais. (Chipman, 2004)..... | 19 |
| Figura 2.5 - Níveis de processamento de dados do Sentinel 2-A. Fonte: ESA | 21 |
| Figura 3.1 - Delimitação da área de estudo, 8 distritos do Norte de Portugal..... | 23 |
| Figura 3.2 - Cartografia dos Focos de incêndio (a) e áreas ardidas para o ano de 2016 (b). Fonte ANPC e ICNF respetivamente..... | 24 |
| Figura 3.3 - Imagens Sentinel 2-A, a) imagem de 30-04-2016 e b) imagem de 28-08-2016. Fonte: ESA | 25 |
| Figura 3.4 – Etapas de cartografia de área ardida..... | 26 |
| Figura 3.5 - Fluxograma da metodologia utilizada para o grupo da deteção remota..... | 27 |
| Figura 3.6 - Fluxograma da metodologia utilizada para o grupo da análise espacial..... | 28 |
| Figura 3.7 - Aplicações informáticas utilizadas no trabalho..... | 31 |
| Figura 4.1 - Área ardida mensal no ano de 2016, entre maio e novembro..... | 32 |
| Figura 4.2 - Localização geográfica - Área ardida por NUTS II em 2016..... | 33 |
| Figura 4.3 - Área ardida entre 2006-2016 | 34 |
| Figura 4.4 - Incêndios florestais e área ardida nos anos de 2006-2016..... | 35 |
| Figura 4.5 - Mapa de ocorrência de incêndio para o Norte de Portugal Continental..... | 36 |
| Figura 4.6 - Mapa de ocorrência de incêndio para Portugal Continental..... | 36 |
| Figura 4.7 - Subconjunto da imagem de 30/04/2016 (ENVI 5.3)..... | 37 |
| Figura 4.8 - Índices pré e pós incêndio calculados com bandas na região do visível e do infravermelho próximo (VIS+NIR): a) e b) NDVI, c) e d) GEMI, e) e f) BAI. Em cada mapa é apresentado o norte do país (à direita) e uma ampliação (à esquerda)..... | 38 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.9 - Índices pré e pós incêndio calculados com bandas na região do visível, infravermelho próximo e infravermelho próximo (VIS+NIR+1SWIR): a) e b) NBRS, c) e d) BAIMS. Em cada mapa é apresentado o norte do país (à direita) e uma ampliação (à esquerda)..... | 39 |
| Figura 4.10 - Índices pré e pós incêndio calculados com bandas na região do visível e do infravermelho médio (VIS+NIR+2SWIR): a) e b) NBRL, c) e d) BAIML, e) e f) MIRBI. Em cada mapa é apresentado o norte do país (à direita) e uma ampliação (à esquerda)..... | 39 |
| Figura 4.11 - Área de validação correspondente à área ardida na freguesia de Janarde (pormenor à esquerda) para verificação dos valores dos índices de acordo com as regras de classificação impostas..... | 43 |
| Figura 4.12 - Diff NDVI – área ardida (branco), correspondente a valores menores que -0.17767 e área não ardida (preto), correspondente a valores maiores que -0.17767..... | 44 |
| Figura 4.13 - Diff GEMI – área ardida (valor 1), correspondente a valores inferiores a -0.11578 e área não ardida (valor 0), correspondente a valores superiores a -0.11578..... | 44 |
| Figura 4.14 - Post NDVI – área ardida (valor 1), correspondente a valores inferiores a 0.14413 e área não ardida (valor 0), correspondente a valores superiores a 0.14413..... | 45 |
| Figura 4.15 - Diff BAI – área ardida (valor 1), correspondente a valores superiores a 144.3835 e área não ardida (valor 0), correspondente a valores superiores a 144.3835..... | 45 |
| Figura 4.16 - Post BAI – área ardida (branco), correspondente a valores superiores a 188.88 e área não ardida (preto), correspondente a valores inferiores a 188.88..... | 46 |
| Figura 4.17 - Diff BAIMS – área ardida (branco), correspondente a valores superiores a 46.8143 e área não ardida (preto), correspondente a valores inferiores a 46.8143..... | 46 |
| Figura 4.18 - Post NBRS – área ardida (branco), correspondente a valores menores de -0.17079 e área não ardida (preto), correspondente a valores maiores de -0.17079..... | 47 |
| Figura 4.19 - Diff BAIML – área ardida (branco), correspondente a valor superior a 56.2384 e área não ardida (preto), correspondente a valores inferiores a 56.2384..... | 47 |
| Figura 4.20 – Post MIRBI – área ardida (branco), correspondente a valores superiores a 1.8514 e área não ardida (preto), correspondente a valores inferiores a 1.8514..... | 48 |
| Figura 4.21 - Post NBRL – área ardida (branco), correspondente a valores inferiores a -0.15006 e Área não ardida (preto), correspondente a valores superiores a -0.15006..... | 48 |
| Figura 4.22 – Mapas binários dos 3 grupos espectrais com o filtro aplicado : VIS+NIR_Filtro, VIS+NIR+1SWIR_Filtro e VIS+NIR+2SWIR_Filtro..... | 49 |
| Figura 4.23 - Mapa das áreas ardidas calculadas para o grupo espectral VIS+NIR, em 2016..... | 51 |
| Figura 4.24 - Mapa das áreas ardidas calculadas para o grupo espectral VIS+NIR+1SWIR, em 2016..... | 51 |
| Figura 4.25 - Mapa das áreas ardidas calculadas para o grupo espectral VIS+NIR+2SWIR, em 2016..... | 52 |
| Figura 4.26 - 2 Imagens Sentinel-2 de 28-08-2016 com sobreposição das áreas ardidas do ICNF e pormenores da imagem no lado direito..... | 58 |
| Figura 4.27 - 2 Imagens com pormenores dos índices NDVI de 28-08-2016, com sobreposição das áreas ardidas do ICNF e áreas ardidas calculadas do grupo VIS+NIR..... | 59 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.28 - 2 Imagens com pormenores dos índices NDVI de 28-08-2016, com sobreposição das áreas ardidas do ICNF e áreas ardidas calculadas do grupo VIS+NIR+1SWIR..... | 60 |
| Figura 4.29 - 2 Imagens com pormenores dos índices NDVI de 28-08-2016, com sobreposição das áreas ardidas do ICNF e áreas ardidas calculadas do grupo VIS+NIR+2SWIR..... | 61 |
| Figura 5.1 - Mapa de densidade de focos de incêndio e áreas ardidas em 2016..... | 62 |

Índice de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 2.1 - Bandas do Sentinel 2-A. Fonte: ESA..... | 20 |
| Tabela 3.1 - Distritos da área de estudo, extensão (km ²) e população (hab.)..... | 23 |
| Tabela 3.2 - Dados usados no projeto..... | 24 |
| Tabela 3.3 - Características das duas imagens Sentinel 2-A utilizadas..... | 25 |
| Tabela 3.4 - Índices espectrais e referência..... | 29 |
| Tabela 3.5 - Índices espectrais e respetiva equação..... | 29 |
| Tabela 3.6 - Intervalo de valores do algoritmo NBR..... | 30 |
| Tabela 4.1 - Área ardida e número de ocorrências em Portugal continental nos anos de 2006-2016..... | 33 |
| Tabela 4.2 - Grupos de índices de área ardidas e as respetivas bandas espectrais..... | 40 |
| Tabela 4.3 - Estatísticas para cada índice..... | 40 |
| Tabela 4.4 - Estrutura base da matriz de confusão binária..... | 53 |
| Tabela 4.5 - Matriz de confusão binária adaptada ao caso em estudo (áreas ardidas calculadas em S2 e áreas ardidas do ICNF)..... | 53 |
| Tabela 4.6 - Matriz confusão grupo VIS+NIR, valores em hectares..... | 55 |
| Tabela 4.7 - Erros de classificação e parâmetros de avaliação – PU,PP,EC,EO, Sensibilidade, Especificidade e exatidão para grupo vis+nir..... | 55 |
| Tabela 4.8 - Matriz confusão grupo VIS+NIR+ISWIR, valores em hectares..... | 56 |
| Tabela 4.9 - Erros de classificação e parâmetros de avaliação – PU,PP,EC,EO, Sensibilidade, Especificidade e Exatidão para grupo VIS+NIR+ISWIR..... | 56 |
| Tabela 4.10 - Matriz confusão grupo VIS+NIR+2SWIR, valores em hectares..... | 57 |
| Tabela 4.11 - Erros de classificação e parâmetros de avaliação – PU,PP,EC,EO, Sensibilidade, Especificidade e exatidão para grupo VIS+NIR+2SWIR..... | 57 |

Lista de Abreviaturas e Acrónimos

1SWIR – Infravermelho-médio

2SWIR – Infravermelho-longo

BAI – Burned Area Index

DIFF – Diferença entre pós e pré incêndio

DR – Detecção Remota

EC – Erro de Comissão

EO – Erro de Omissão

ESA – European Space Agency (Agência Espacial Europeia)

ETRS89/PT-TM06 – European Terrestrial Reference System 1989/Portugal Transverse Mercator 2006

GEMI – Global Environmental Monitoring Index

ICNF – Instituto de Conservação da Natureza e das Florestas

MIRBI – Mid Infrared Burned Index

MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

MSI - Multi-Spectral Instrument

NBR – Normalized Burn Ratio

NDVI – Normalized Difference Vegetation Index

NIR – Infravermelho-Próximo

POST – Pós-incêndio

PP – Precisão do Produtor

PU – Precisão do Utilizador

SNR – Signal-to-Noise Ratio

VIS – Espectro Visível

1. Introdução

1.1. Enquadramento e motivação

1.1.1. Portugal Continental e os incêndios florestais

Portugal é o país do sul da Europa relativamente mais afetado pela ocorrência de incêndios florestais, contabilizando um elevado número de ocorrências e grandes áreas ardidas face à sua área territorial (Pereira *et al.*, 2006).

Nas últimas décadas, em Portugal, tem sido evidente o aumento da ocorrência de incêndios florestais de grandes dimensões (Carvalho *et al.*, 2010). As estatísticas europeias baseadas no sistema EFFIS (European Forest Fires Information System) sobre fogos florestais apontam os cinco países do Sul da Europa (Portugal, Espanha, França, Itália e Grécia) como sendo os mais afetados pelos incêndios florestais.

Segundo o 6º inventário Florestal Nacional publicado pelo ICNF, a distribuição dos usos do solo em Portugal continental para 2010 (mais atualizada), o uso florestal do solo é o uso dominante em Portugal continental, ocupando 35,4% do território, seguindo-se os matos e as pastagens (32%) (Figura 1.1). A superfície florestal de Portugal Continental tem como espécie dominante o eucalipto representando a maior área do país (812 mil ha; 26%), o sobreiro a segunda (737 mil ha; 23%), seguido do pinheiro-bravo (714 mil ha; 23%) (Figura 1.2).

As principais causas dos incêndios florestais investigados pela GNR/SEPNA, segundo ICNF em 2016 foram uso do fogo (25.2%), mão criminosa (21.6%) e situações indetermináveis (34.7%).

No ano de 2016, até 15 de outubro, o distrito de Aveiro foi o que registou maior área ardida de espaços florestais, com 41 620 hectares. Cerca de 53% desta área resultou de um grande incêndio, o maior de 2016, com início na freguesia de Janarde, concelho de Arouca, a 8 de agosto, que percorreu 21 910 hectares de espaços florestais.

No que concerne às áreas mais afetadas pelos incêndios, o pinheiro bravo e o eucalipto são as espécies que mais têm sido afetadas, correspondendo a 74% da área de floresta ardida no período referido. Esta situação tem vindo a contribuir para a forte redução da área de pinheiro bravo (menos 263 mil hectares entre 1995 e 2010) e para o aumento da área de matos, conforme dados apurados pelo 6.º Inventário Florestal Nacional.

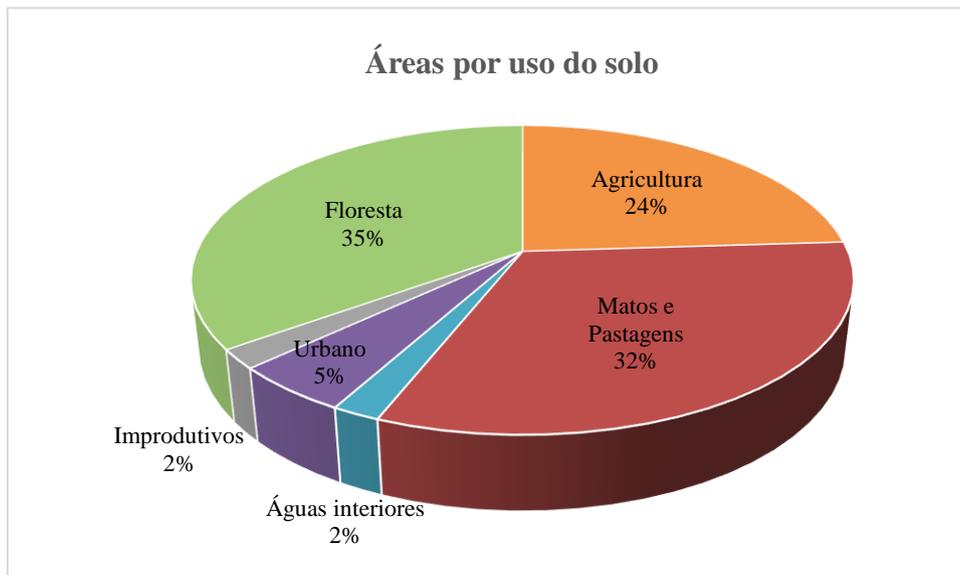


Figura 1.1 – Distribuição dos usos do solo em Portugal continental para 2010. Fonte: 6.º Inventário Florestal Nacional.

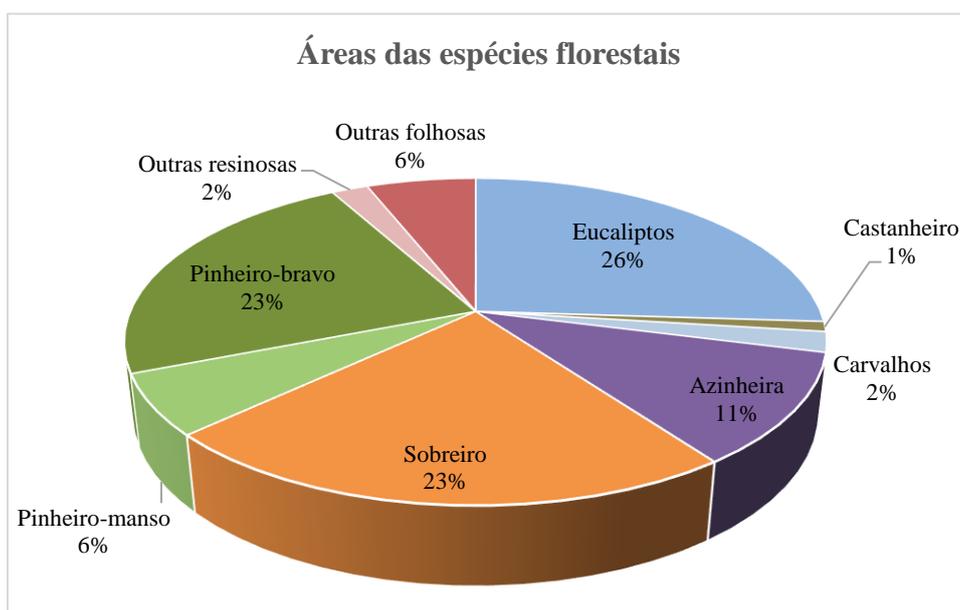


Figura 1.2 – Espécies florestais dominantes em Portugal Continental. Fonte: 6.º Inventário Florestal Nacional.

1.2. Objetivos

O principal objetivo deste estudo é a cartografia de áreas ardidas no Norte de Portugal Continental no ano de 2016, com recurso a imagens multiespectrais do satélite Sentinel-2. Desta forma este trabalho seguiu a metodologia utilizada no estudo de área queimada com recurso ao satélite Landsat 5, realizado por Bastarrika, *et al.*, (2011), no qual foram utilizados oito índices de áreas ardidas, agrupados em três grupos espectrais para determinação de áreas ardidas. As áreas ardidas produzidas neste trabalho vão ser validadas e comparadas com as áreas ardidas produzidas pelo Instituto de Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF) em 2016, fornecidas pelo European Forest Fire Information Service (EFFIS) e baseadas em informação proveniente do sensor MODIS. Desta forma, no final, vai ser possível afirmar se o uso de imagens multiespectrais de maior resolução conduz a melhores resultados e desta forma, apontar também possíveis problemas dos métodos usados pelo ICNF.

1.3. Estado da Arte

O fogo é reconhecido como um grande risco natural (FAO 2007), o que implica perdas severas de vidas humanas, propriedades e outros valores socioeconómicos (Radeloff *et al.*, 2005; Reisen & Brown, 2006). A dimensão do fogo reflete o impacto do fogo sobre o padrão de paisagem (Chuvieco, *et al.*, 2008).

Embora o fogo seja um fator natural em muitos ecossistemas, as atividades humanas desempenham um papel crítico na alteração das condições naturais de fogo, a maioria dos autores reconhece que os seres humanos desempenham um papel fundamental na maioria dos regimes de fogo do mundo (Chuvieco, *et al.*, 2008), seja pelo aumento das ignições (Leone *et al.*, 2003), ou pela supressão de incêndios naturais (Johnson *et al.*, 2001; Keeley *et al.*, 1999). É comum admitir que os regimes de fogo tradicionais implicam condições de equilíbrio e as recentes alterações causadas por fatores socioeconómicos podem ter impactos negativos nas características do ecossistema (Pyne, 2004).

Os efeitos do fogo sobre a vegetação, o solo e a atmosfera estão fortemente associados às características do fogo (densidade, frequência, gravidade, intensidade, sazonalidade, distribuição, etc.), que geralmente são agrupados no regime geral de fogo (Morgan *et al.*, 2001; Stocks *et al.*, 2003).

Vários estudos locais identificaram fatores que são frequentemente associados à ignição pela parte humana, como a distância a estradas, interfaces floresta-agricultura ou floresta-urbana, gestão de uso do solo e conflitos sociais (desemprego, pobreza rural, disputa de caça) (Leone *et al.*, 2003; Martínez *et al.*, 2009; Vega-García *et al.*, 1995).

Devido aos impactos substanciais da queima de biomassa, uma área de pesquisa de deteção remota está focada no desenvolvimento de algoritmos para detetar áreas queimadas anualmente em escala global (Pereira *et al.*, 1997). As abordagens mais utilizadas para a identificação de áreas ardidas são classificadas em dois grupos: as que se baseiam no contraste térmico de incêndios ativos (geralmente denominados hot spots, HSs) e as baseadas nas mudanças de refletância causada pela queima/efeitos do incêndio (alteração da cor da folha e do solo, perda de folhas, etc.) (Bastarrika, *et al.*, 2011; Roy *et al.*, 2005). A abordagem baseada nas mudanças de refletância é mais confiável segundo Padilla *et al.*, (2014)

porque a irradiação térmica (e, conseqüentemente, a amplificação do sinal) aumenta com a temperatura, enquanto as mudanças de refletância relacionadas com o fogo são mais subtis.

Este projeto vai seguir as linhas orientadoras do trabalho de Bastarrika, *et al.*, (2011), que consta numa abordagem de mudanças de refletância referido acima, em que para isso foi desenvolvido um algoritmo para cartografar área ardida com base em imagens Landsat TM/ETM+, que pode ser aplicável a escalas regionais e globais. Para testar a capacidade de generalização do algoritmo, foram considerados diferentes locais de estudo, que incluem diversas condições de incêndio nos ecossistemas principalmente mediterrâneos.

Vários autores, entre eles, Chuvieco *et al.*, (2006); Pereira & Setzer, (1993); Pereira *et al.*, (1999) admitiram que é mais fácil discriminar visualmente áreas queimadas do que automaticamente por detecção remota, devido à ampla diversidade espacial e espectral causada pela gravidade do fogo (fumo, emissão de calor), o tempo decorrido desde a sua extinção e o tipo de vegetação afetada.

Por esta razão a maioria dos algoritmos disponíveis para detetar áreas queimadas, tenta contrabalançar entre a redução de falsas detecções (erros de comissão) e o aumento da taxa de detecção (erros de omissão). O trabalho de Bastarrika, *et al.*, (2011) é um exemplo desta metodologia de detecção.

No estudo de Bastarrika, *et al.*, (2011), a investigação é sustentada por dois conjuntos de dados. O primeiro refere-se a imagens de *input* para testar as diferentes fases do algoritmo, no total 6 imagens pré e pós incêndio, localizadas na bacia do Mediterrâneo, que cobriam diversas áreas da Grécia, França e Espanha. O segundo conjunto correspondia a dados de validação, que cobriu Portugal e o Sul da Califórnia e foram adquiridos em 2003. Para discriminar entre pixels queimados e não queimados, foram criadas 3 categorias de índices de área ardida de acordo com características espectrais, na região do visível, infravermelho próximo, médio e longo – NDVI, BAI, GEMI, BAIMS, BAIML, NBR5, NBRL, MIRBI. Estes índices já foram usados por outros autores como Barbosa *et al.*, (1999) na cartografia de áreas ardidas. A utilização de bandas no infravermelho é vantajoso segundo (Gates, 1980), pois as plantas têm uma assinatura espectral diferenciada, caracterizada por uma baixa refletância na parte visível do espectro solar e uma alta refletância na região do infravermelho próximo. Outros autores como Chen *et al.*, (2005), utilizaram as bandas do infravermelho para estimar o teor de água na vegetação com recurso ao MODIS e calcularam índices de vegetação, entre eles o Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI) e o NDWI, Índice de Água de Diferença Normalizada.

Também Escuin *et al.*, (2008) no seu estudo dos níveis de severidade de áreas ardidas no sul de Espanha, utilizou como índices de áreas ardidas o NBR e NDVI, em que estudou a capacidade dos dois índices, ambos numa perspectiva uni-temporal (pós-fogo) e bi-temporal (pré e pós-fogo), para discriminar níveis de severidade de áreas ardidas.

Um dos índices mais utilizados, tanto do ponto de vista uni-temporal (pós-fogo) quanto bi-temporal (pré /pós-fogo) foi o NDVI (Índice de Vegetação de Diferença Normalizada) (Viedma *et al.*, 1997, Díaz-Delgado 1998, Pereira 1999, Vázquez *et al.*, 1999, Quintano *et al.*, 1999, Chuvieco *et al.*, 2002, Heredia *et al.*, 2003).

Outros índices que combinam as regiões do infravermelho próximo são: BAI (Burnt Area Index) (Chuvieco *et al.*, 2002, Heredia *et al.*, 2003), SAVI (Índice de Vegetação Ajustada ao Solo) (Chuvieco *et al.*, 2002) e GEMI (Global Environmental Index) (Pereira 1999, Chuvieco *et al.*, 2002).

O potencial da região do infravermelho médio do espectro para distinguir áreas queimadas tem sido utilizado em trabalhos realizados em ecossistemas tão díspares como a savana africana (Trigg & Flasse 2001) e as áreas de vegetação mediterrânea (Pereira, 1999).

A vantagem de usar dados na região do infravermelho médio e longo (SWIR) foi também demonstrada em estudos de modelação (Ceccato *et al.*, 2001; Fourty & Baret, 1997; Tucker, 1980; Ustin *et al.*, 1997; Zarco-Tejada *et al.*, 2003), em estudos com recurso a satélites operacionais que evidenciaram benefícios na utilização de bandas SWIR (Ceccato *et al.*, 2002; Chen *et al.*, 2003; Jackson *et al.*, 2004) e em estudos de (Bull, 1991; Gao, 1996; Sims & Gamon, 2002; Penuelas *et al.*, 1993; Roberts *et al.*, 1997) em que a região do infravermelho próximo foi identificada como uma boa opção. Esta região do espectro foi referida como adequada para a normalização porque é relativamente insensível às mudanças do teor de água na vegetação em comparação com os comprimentos de onda mais longos das bandas do infravermelho.

No estudo de áreas ardidas, podem ser considerados dois tipos de abordagem, um com base nas áreas queimadas captadas de imagens de satélite outro com base em dados de fogos ativos (Chuvieco, *et al.*, 2008). Neste caso, os fogos ativos são identificados no momento que está a decorrer um incêndio devido ao contraste radiométrico do fogo com as áreas circundantes (Giglio *et al.*, 2003), assim a sua captação está relacionada com a sincronia da passagem do satélite, a resolução espacial do sensor e a geometria e os níveis de saturação do detetor (Chuvieco, *et al.*, 2008).

No que respeita ao processamento de imagens captadas e à sua interpretação, o sinal de área queimada é menos evidente nas imagens de satélite do que o de incêndios ativos e pode ser de curta duração em regiões tropicais ou agrícolas, mas de longa duração em florestas temperadas e boreais (Chuvieco, *et al.*, 2008).

No trabalho de Bastarrika, *et al.*, (2011), a primeira fase de desenvolvimento do algoritmo para cartografar área ardida foi a determinação dos pixels queimados que se baseou em três critérios: 1) proporção de manchas queimadas detetadas (para três tamanhos diferentes: abaixo de 25 ha, de 25-100 ha e acima de 100 ha); 2) erro de comissão (pixels identificados como área queimada que não foram queimados); 3) erro de omissão (pixels queimados verdadeiros não identificados como tal). A segunda fase foi a consolidação das áreas queimadas, esta fase analisou as propriedades espectrais dos pixels vizinhos dos ‘pixels queimados’, aplicando um algoritmo de crescimento de região para ampliar a dimensão dos pixels queimados previamente detetados. Esta fase visou reduzir os erros de omissão.

Bastarrika, *et al.*, (2011) defendeu que o seu método de deteção era o indicado para ser aplicado em climas temperados. Ora Portugal Continental tem um clima Temperado Mediterrâneo (Csa e Csb), segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, identificando-o assim como um bom candidato à implementação deste método e ao seu sucesso.

O ICNF para cartografar as áreas ardidas em 2016 (áreas essas de validação como referido nos objetivos), utiliza as imagens do sensor MODIS. Este sensor foi desenvolvido pela NASA e é um instrumento a bordo dos satélites Terra (EOS AM-1) e Aqua (EOS PM-1) que tem características específicas para a monitorização de incêndios e tem sido usado para gerar regularmente séries de imagens terrestres globais (Justice *et al.*, 2002) incluindo imagens de fogo ativo de 1 km de resolução (Kaufman *et al.*, 1998; Justice *et al.*, 2002, Giglio *et al.*, 2003) e, mais recentemente, imagens de áreas ardidas com uma resolução de 500 m (Roy *et al.*, 2005). Quanto às suas características, possui 36 bandas espectrais com 250 m, 500 m e 1km e um swath de 2330 km (Fonte: NASA).

1.4. Estrutura da tese

O presente trabalho encontra-se estruturado em 5 capítulos, divididos em subcapítulos.

No primeiro capítulo é apresentado o enquadramento do trabalho, motivação, os objetivos propostos e o estado da arte, o meio para fundamentar o trabalho realizado.

No segundo capítulo é realizada uma abordagem a conceitos teóricos relevantes para a compreensão do trabalho desenvolvido, como a deteção remota, características do satélite Sentinel-2 e a exatidão da classificação.

No terceiro capítulo é feito o enquadramento da área de estudo, enumeração dos dados utilizados para a realização deste projeto, é abordada a metodologia referenciando os índices de áreas ardidas.

No quarto capítulo é introduzido o tema da delimitação da área ardida em Portugal Continental. Neste capítulo vai-se desenvolver o objetivo proposto do trabalho, a cartografia das áreas ardidas.

Por fim, no último capítulo são apresentadas as conclusões relativas aos resultados obtidos e as perspetivas de desenvolvimento futuros.

2. Conceitos teóricos

No presente capítulo é realizada uma abordagem dos vários conceitos teóricos relevantes para a compreensão do trabalho desenvolvido. São apresentados os conceitos de Detecção Remota, a missão Sentinel-2A e a exatidão da classificação.

2.1. Detecção Remota

A deteção remota é a ciência e a arte de obter informações sobre um objeto, área ou fenómeno através da análise de dados adquiridos por um dispositivo que não está em contato com o objeto, área ou fenómeno sob investigação (Chipman, 2004).

Usando vários sensores, recolhe-se por deteção remota dados que, quando analisados, dão-nos informações sobre os objetos, áreas ou fenómenos a ser investigados. Os dados recolhidos podem ser de muitas formas, incluindo variações nas distribuições de força, distribuições de ondas acústicas ou distribuições de energia eletromagnética (Chipman, 2004).

A Figura 2.1 ilustra esquematicamente os processos e elementos envolvidos na deteção remota com recurso a energia eletromagnética. Os dois processos básicos são a aquisição de dados e a análise de dados. Os elementos do processo de aquisição de dados são: fontes de energia (a), propagação de energia através da atmosfera (b), interações de energia com recursos de superfície terrestre, retransmissão de energia através da atmosfera, receção por sensores espaciais (c,d,e), resultando na geração de dados de sensores em imagens e / ou forma digital (f) (Chipman, 2004).

Posteriormente, já com os dados é feita a interpretação e análise, onde são extraídas informações sobre o tipo, dimensão, localização e estado dos vários recursos que o sensor extraiu (g). Esta informação é então compilada (h), normalmente em forma de mapas, tabelas ou dados espaciais que podem ser combinados com camadas de informação em Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Por fim, a informação é utilizada e aplicada para a tomada de decisão (i) por empresas ou indivíduos (Chipman, 2004).

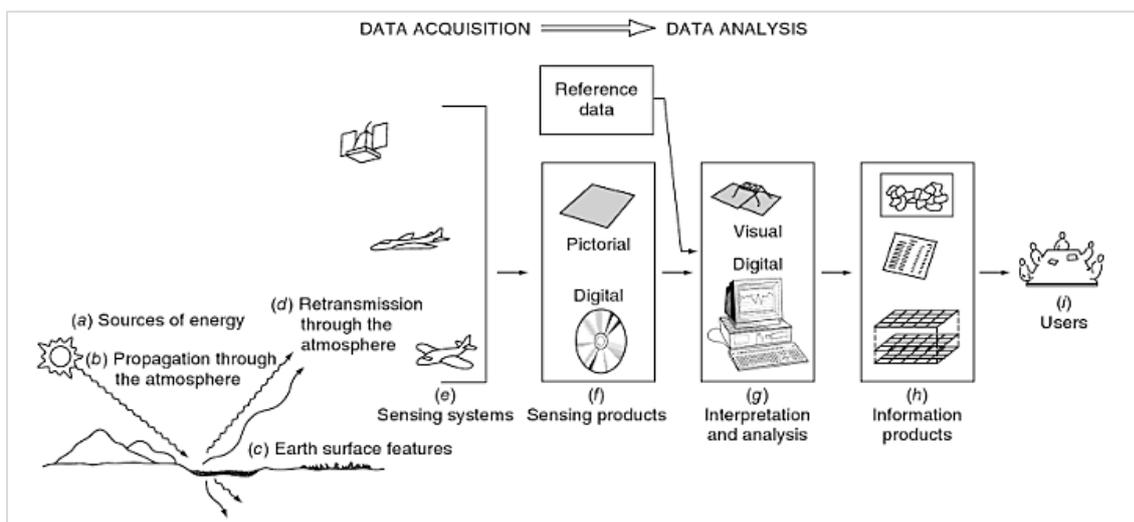


Figura 2.1 - Processo de Detecção Remota (Chipman, 2004)

A energia solar é transferida para a Terra sob a forma de radiação eletromagnética. A propagação é feita sob a forma de ondas eletromagnéticas que se propagam à velocidade da luz. Uma onda eletromagnética consiste num campo elétrico e num campo magnético, ortogonais entre si e que vibram num plano perpendicular à direção de propagação da onda com uma determinada frequência. O comprimento de onda é a distância entre duas cristas sucessivas do campo elétrico (ou magnético) e o produto do comprimento de onda pela respetiva frequência é igual à velocidade da luz (Figura 2.2).

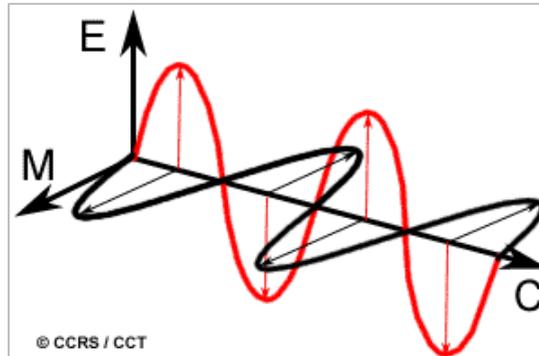


Figura 2.2 - Radiação eletromagnética (CCRS, 2015)

A radiação Eletromagnética

O Espectro Eletromagnético vai desde os grandes comprimentos de onda (incluindo as microondas e as ondas rádio) até aos pequenos comprimentos de onda (incluindo os raios X e Gama) (Figura 2.3).

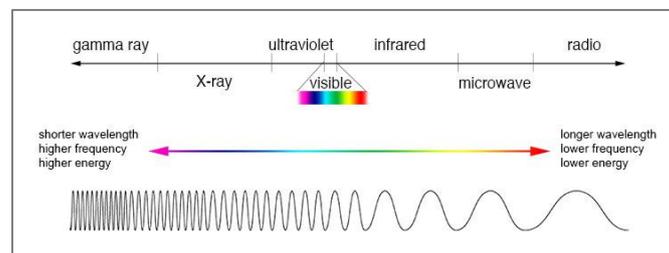


Figura 2.3 - Espectro eletromagnético. Fonte: NASA

O espectro visível vai desde os 0.4 μm a 0.7 μm .

- Violeta: 0.400 - 0.446 μm
- Azul: 0.446 - 0.500 μm
- Verde: 0.500 - 0.578 μm
- Amarelo: 0.578 - 0.592 μm
- Laranja: 0.592 - 0.620 μm
- Vermelho: 0.620 - 0.700 μm

O Infravermelho vai desde 0.7 μm a 100 μm . A região do infravermelho é subdividida em duas regiões: IV refletido (0.7 μm a 3.0 μm) e IV térmico (3.0 μm a 100 μm). A região das microondas vai desde 1mm a 1m (cobre a maior região usada na deteção remota (Catalão, J. 2012).

Na figura 2.4 estão representadas as curvas de refletância espectral para vários tipos diferentes de materiais e o seu comportamento em função do espectro: vegetação saudável, vegetação seca, solo, areia (rochas e minerais), asfalto, betão, neve, nuvens e água.

A curva da **vegetação saudável** tem um comportamento de "pico e vale". Apresenta logo no início valores baixos de refletância na parte visível do espectro. Este comportamento é explicado pela clorofila nas plantas que absorve energia no comprimento de onda situado nos $0.45\mu\text{m}$ e $0.67\mu\text{m}$, refletindo uma quantidade alta de energia na banda verde do espectro.

No caso da **vegetação seca**, a presença de clorofila é menor. O resultado é menos absorção de clorofila nas bandas azul e vermelha. À medida que passamos da parte visível para o infravermelho-próximo do espectro, a refletância da **vegetação saudável** aumenta. Esta característica espectral ocorre entre os comprimentos de onda $0.68\mu\text{m}$ e $1.3\mu\text{m}$. Nos comprimentos de onda de $0.75\mu\text{m}$ a $1.3\mu\text{m}$ (prevalência do espectro infravermelho), as folhas geralmente refletem 40 a 50% da energia incidente. A maior parte da energia restante é transmitida, pois a absorção nesta região espectral é muito pequena (menos de 5%).

Os materiais de construção como o **betão** têm uma baixa refletância até ao comprimento de onda de $0,6\mu\text{m}$ e uma alta refletância entre os comprimentos de onda $0,6\mu\text{m}$ a $1,3\mu\text{m}$. O **asfalto** tem um comportamento semelhante ao betão, mas com níveis mais baixos. A **areia** apresenta comportamentos distintos em 3 regiões devido a absorção de diferentes compostos minerais.

A curva do **solo** apresenta uma variação mais baixa que a vegetação. Os fatores que influenciam a reflexão do solo atuam em bandas espectrais menos específicas. Alguns dos fatores que afetam a refletância do solo são o teor de humidade, quantidade de matéria orgânica, textura do solo, rugosidade da superfície e presença ou não de óxido de ferro. Os solos não têm uma grande refletância no espectro da radiação visível e infravermelha.

Por fim temos a curva da **água**, em que o seu comportamento depende do estado que se encontra. No estado líquido tem baixa refletância nos comprimentos de onda de 0.38 a $0.7\mu\text{m}$ e absorção total a partir de $0.9\mu\text{m}$. As nuvens, nos comprimentos de onda de $0.38\mu\text{m}$ a $2.5\mu\text{m}$ têm uma alta refletância. A neve, de 0.7 a $1.2\mu\text{m}$, tem uma alta refletância e nos comprimentos de onda 0.7 a $1.2\mu\text{m}$ um decréscimo rápido, acabando por ter nos 1.4 a $2.0\mu\text{m}$ uma baixa refletância

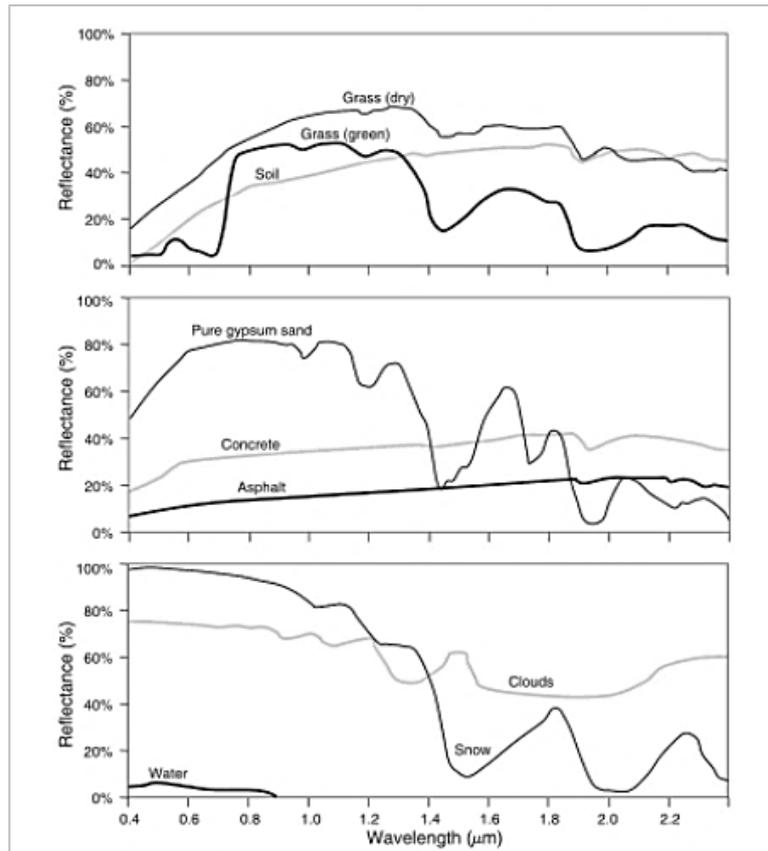


Figura 2.4 - Curvas de refletância espectral para vários tipos de materiais (Chipman, 2004)

2.2. Missão Sentinel 2

Neste projeto vão ser utilizadas duas imagens provenientes do satélite Sentinel 2-A, pelo que é importante abordar vários conceitos desta missão e a sua importância.

O programa europeu 'Monitorização Global do Ambiente e Segurança' (GMES) é uma iniciativa conjunta da União Europeia (EU) e da Agência Espacial Europeia (ESA), concebida para estabelecer uma capacidade europeia para o fornecimento e utilização de informações de monitoramento operacional para aplicações ambientais e de segurança (Drusch *et al.*, 2012). Em dezembro de 2012 a Comissão Europeia mudou o nome do programa para 'Copernicus'.

Este programa funciona de acordo com ideias-chave: a produção e divulgação de informações em matéria de ambiente e segurança com o apoio da UE; são assegurados os mecanismos necessários para garantir um diálogo permanente entre todos os países intervenientes; a existência de um quadro jurídico, financeiro, organizacional e institucional para assegurar o funcionamento do sistema e sua evolução (Drusch *et al.*, 2012).

Dentro do programa Copernicus, a ESA é responsável pelo desenvolvimento da componente espacial, fornecendo dados de observação da Terra para sustentar a informação ambiental na Europa (Drusch *et al.*, 2012).

O objetivo principal da série de satélites Sentinel, desenvolvido pela Agência Espacial Europeia (ESA) é apoiar as necessidades operacionais e políticas do programa Monitoramento Global de Ambiente e Segurança (GMES) (Malenovský, 2012).

A missão do Sentinel-2 neste programa, é proporcionar continuidade nos serviços de observação de imagens ópticas multi-espectrais de alta resolução, em superfícies terrestres globais (Martimort *et al.*, 2007), que complementam as observações do *Landsat* e *SPOT* (Satellite Pour l'Observation de la Terre) e melhorar a disponibilidade de dados para os utilizadores (Drusch *et al.*, 2012).

O programa SPOT foi iniciado em 1978 pela França em parceria com a Bélgica e a Suécia (Drusch *et al.*, 2012). Quanto ao programa Landsat, este começou em 1972 com o lançamento do primeiro satélite (Drusch *et al.*, 2012).

O Sentinel-2 foi criado para assegurar o fornecimento de dados para serviços como a gestão de risco (inundações e incêndios florestais, subsidência e deslizamentos de terra), uso do solo - estado e alterações, monitorização florestal, segurança alimentar (sistemas de alerta - gestão da água e proteção do solo), cartografia do sistema urbano e terrestre para ajuda humanitária e desenvolvimento (Drusch *et al.*, 2012).

O Sentinel-2A foi lançado a 23 de junho de 2015 e o Sentinel-2B a 7 de março de 2017 (Fonte: ESA).

O Sentinel-2A é um satélite de alta resolução multiespectral que possui um instrumento multiespectral o MSI - multi-spectral instrument. Possui 13 bandas espectrais, que vão do visível (VIS) e do infravermelho próximo (NIR) ao infravermelho médio e longo (SWIR), com resoluções espaciais que variam de 10 a 60 metros (tabela 2.1). Tem um 'swath' de 290 km e um período de revisita de 5 dias. A revisita de cinco dias no equador requer 'dois satélites Sentinel-2 idênticos' que operam simultaneamente, favorecendo um satélite pequeno, económico e de baixo risco (Drusch *et al.*, 2012). A órbita é síncrona a 786 km de altitude (14 + 3/10 rotações por dia) com a passagem pelo equador às 10:30 a.m (passagem descendente) (Fonte: ESA).

| Resolução Espacial | Banda | Comprimento de onda (µm) | Nome | SNR |
|--------------------|-------|--------------------------|-----------------------------|-----|
| 60 m | 1 | 443 | Coastal aerosol | 129 |
| 10 m | 2 | 490 | Azul | 154 |
| 10 m | 3 | 560 | verde | 168 |
| 10 m | 4 | 665 | Vermelho | 142 |
| 20 m | 5 | 705 | Vegetation Red Edge | 117 |
| 20 m | 6 | 740 | Vegetation Red Edge | 89 |
| 20 m | 7 | 783 | Vegetation Red Edge | 105 |
| 10 m | 8 | 842 | Infravermelho próximo (NIR) | 174 |
| 20 m | 8a | 865 | Vegetation Red Edge | 72 |
| 60 m | 9 | 940 | Vapor de água | 114 |
| 60 m | 10 | 1 375 | SWIR - cirrus | 50 |
| 20 m | 11 | 1 610 | SWIR 1 | 100 |
| 20 m | 12 | 2 190 | SWIR 2 | 100 |

Tabela 2.1 - Bandas do Sentinel 2-A. Fonte: ESA

Este horário local foi escolhido por forma a minimizar a cobertura de nuvens e garantir uma boa iluminação solar. Esta hora é próxima da passagem local do Landsat 8 (10:11 manhã +/- 15 minutos) e do SPOT, permitindo a combinação de dados Sentinel-2 com imagens históricas para produzir séries temporais de longo prazo.

O Sentinel 2-A apresenta vários níveis de processamento de dados (do nível 0 ao nível 1C), em que todos os dados adquiridos pelo instrumento MSI são sistematicamente processados até chegar ao nível 1C por um instrumento chamado PDGS (Payload Data Ground Segment) (Fonte: ESA).

Os produtos de nível 0 e nível 1A fornecem dados compactados e descompactados, respetivamente. Os dados de nível 1B são radiâncias radiométricas corrigidas. O produto do nível 1C inclui correções radiométricas e geométricas, incluindo retificação ortográfica. As máscaras de nuvem e terra / água são geradas neste nível. Estas máscaras de nuvem fornecem indicação sobre a presença de cirrus. (Fonte: ESA) (Figura 2.5). Neste projeto foram usadas imagens do nível 1B.

Fazendo referência a outros satélites Sentinel incluídos no programa *Copernicus*, para além do Sentinel 2: O *Sentinel-1*, radar de abertura sintética (SAR) contribui principalmente para a pesquisa na área da oceanografia física, medidas da superfície do vento e da circulação oceânica (correntes de superfície) (Malenovský, 2012). O Sentinel-1A foi lançado em 3 de abril de 2014 e Sentinel-1B em 25 de abril de 2016. Este satélite tem como principal aplicação serviços de emergência (Fonte: ESA).

O satélite *Sentinel-3* foi lançado a 16 de fevereiro de 2016, é um satélite multi-instrumento que tem como função principal o monitoramento dos oceanos e da água. Este satélite recolhe informação da topografia da superfície do mar, temperatura, a cor do oceano e a cor da terra (Fonte: ESA).

Está previsto o lançamento nos próximos anos do Sentinel-4, Sentinel-5, 5p e 6.

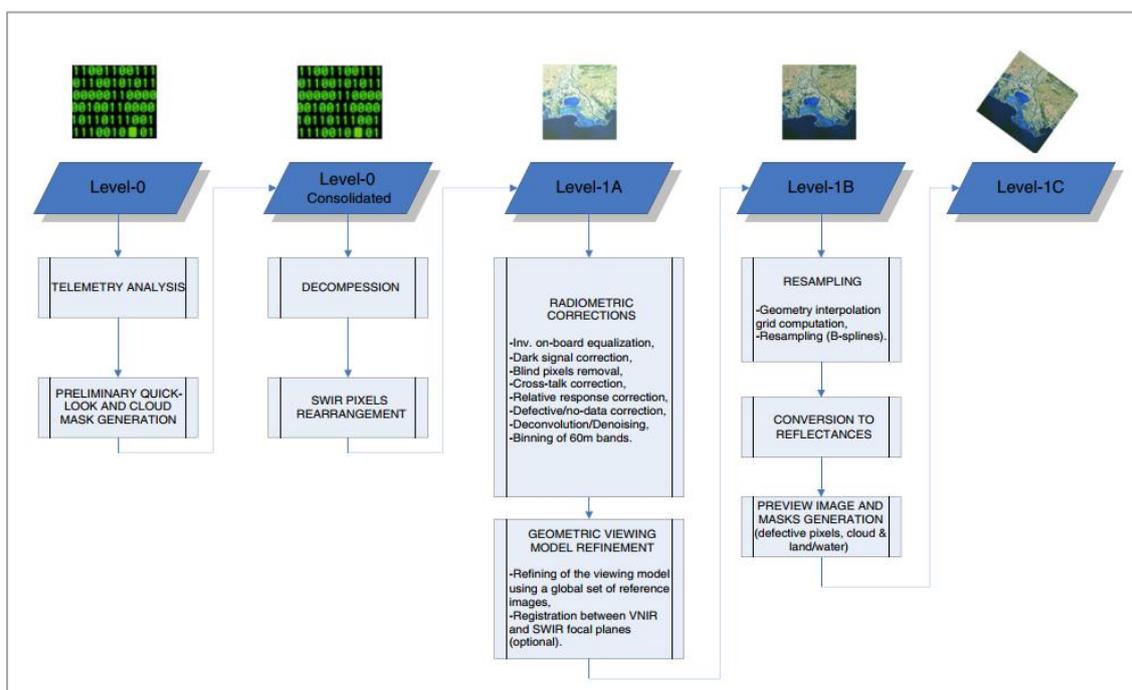


Figura 2.5 – Níveis de processamento de dados do Sentinel 2-A. Fonte: ESA

2.3. Exatidão da classificação

A classificação na deteção remota é um processo complexo e requer consideração de muitos fatores. Os principais passos da classificação da imagem podem incluir determinação de um sistema de classificação adequado, seleção de amostras de treino, pré-processamento de imagem, extração de recursos, seleção de abordagens de classificação adequadas, processamento pós-classificação e avaliação de exatidão (Lu *et al.*, 2007).

A avaliação dos resultados da classificação é um processo importante no procedimento de classificação. Podem ser utilizadas diferentes abordagens, que vão desde uma avaliação qualitativa baseada em conhecimento especializado até uma avaliação de exatidão quantitativa baseada em estratégias de amostragem. Para avaliar o desempenho de um método de classificação (Cihlar *et al.* 1998) propôs seis critérios: exatidão, capacidade de reprodução, robustez, capacidade de utilizar todo o conteúdo dos dados, flexibilidade e objetividade.

A abordagem da matriz de confusão é a mais utilizada na avaliação de exatidão (Foody, 2002).

Após a criação de uma matriz de confusão são calculados parâmetros de avaliação de exatidão, como a exatidão geral, o erro de omissão, erro de comissão e o coeficiente kappa (Lu *et al.*, 2007).

Seguindo a teoria de Foody, (2002) neste trabalho seguiu-se a abordagem de matriz de confusão, de forma a analisar estatisticamente cada um dos grupos espectrais produzidos, assim foi elaborado para cada grupo uma matriz de confusão (ou matriz de erros), no Excel, onde foram calculados os erros de comissão, omissão e precisão de produtor e utilizador.

3. Metodologia e dados

3.1. Área de estudo

Este trabalho incide na elaboração da cartografia de áreas ardidas na região do Norte de Portugal continental no ano de 2016. Neste trabalho, a região Norte de Portugal está delimitada pelos 8 distritos: Viana do Castelo, Braga, Porto, Vila Real, Bragança, Aveiro, Viseu e Guarda.

A região do Norte é, segundo os censos de 2011 (INE), a região com mais população residente (tabela 3.1).

| Distritos | Área total (km ²) | População (hab.) |
|-------------------------|-------------------------------|------------------|
| Aveiro | 2.798,54 | 714.200 |
| Braga | 2.673 | 848.185 |
| Bragança | 6.608 | 136.252 |
| Guarda | 5.518 | 168.898 |
| Porto | 2.395 | 2.027,19 |
| Viana de Castelo | 320.25 | 250.390 |
| Vila Real | 4.328 | 213.775 |
| Viseu | 5.007 | 391.215 |

Tabela 3.1 – Distritos da área de estudo, extensão (km²) e população (hab.)

A escolha desta região prendeu-se com o facto de ter sido a região com mais hectares de área ardida no ano de 2016 e apresenta uma maior suscetibilidade a nível de recorrência de incêndios, tendo esta região o maior registo de áreas ardidas comparativamente às restantes regiões em 2016.

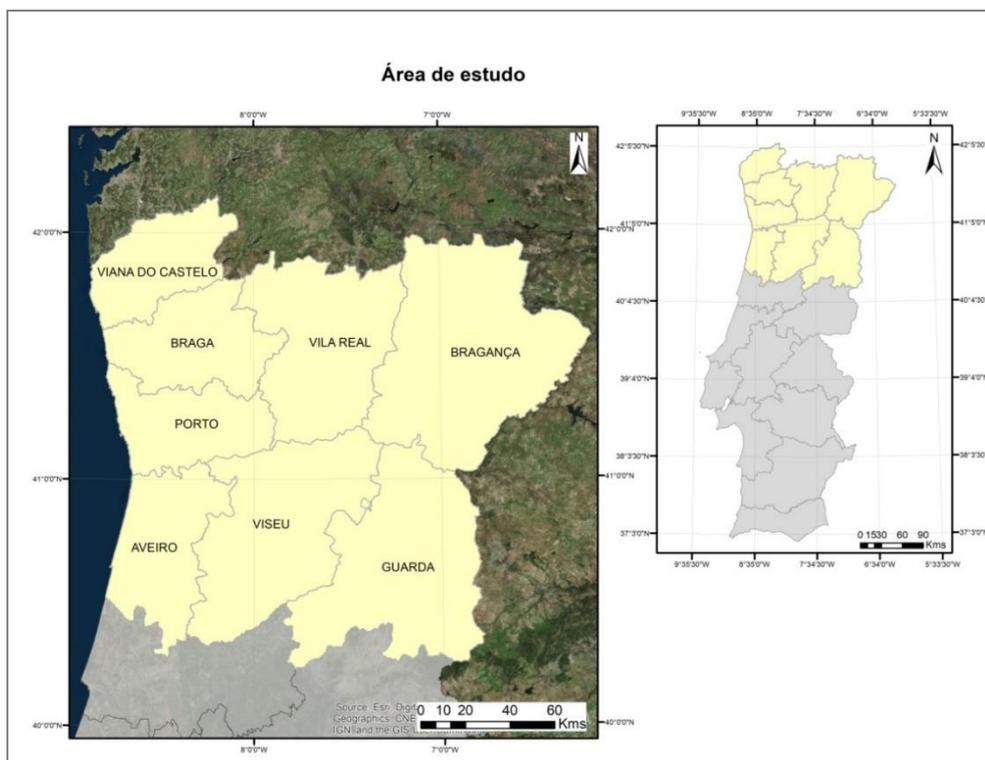


Figura 3.1 – Delimitação da área de estudo, 8 distritos do Norte de Portugal.

3.2. Dados

Neste projeto foram utilizados dados dos focos de incêndio do ano de 2016, cedidos pela Autoridade Nacional da Proteção Civil, as áreas ardidas de 2016, fornecidas pelo Instituto de Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF) e os limites administrativos de Portugal Continental da DGT.

| Informação | Fonte |
|------------------------------------|---------------------|
| Focos de incêndio 2016 | ANPC - SADO |
| Áreas ardidas 2016 | ICNF - EFFIS-JRC/CE |
| Limites administrativos (CAOP2016) | DGT |

Tabela 3.2 – Dados usados no projeto

Os focos de incêndio provêm da ANPC com base no Sistema de Apoio à Decisão Operacional (SADO) (Figura 3.2a). De notar que a cartografia fornecida pelo ICNF (Figura 3.3.) foi disponibilizada pelo Sistema Europeu de Informação de Incêndios Florestais do Centro de Investigação Comum da Comissão Europeia (EFFIS-JRC/CE), resultando da análise de imagens do satélite MODIS com uma resolução espacial de 250 metros. (Figura 3.2b)

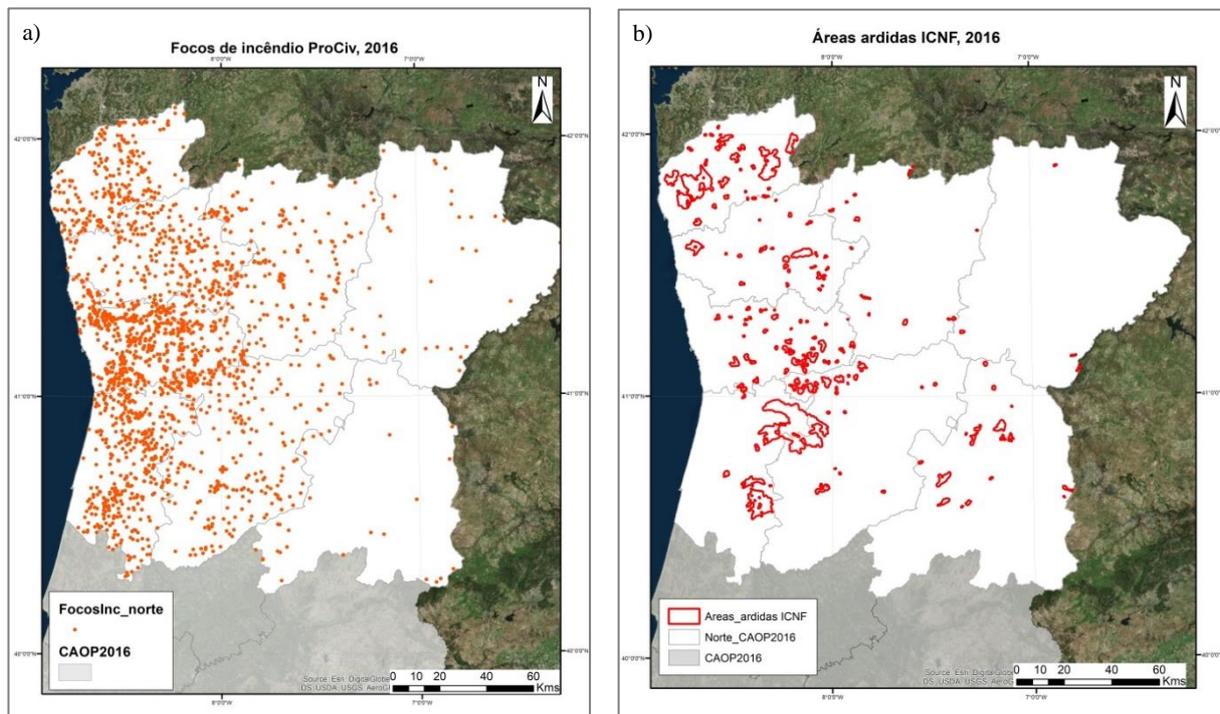


Figura 3.2 - Cartografia dos Focos de incêndio (a) e áreas ardidas para o ano de 2016 (b). Fonte ANPC e ICNF respetivamente

Além dos dados anteriormente apresentados, foram descarregadas duas imagens do Sentinel-2 (Figura 3.3) correspondentes à área do Norte de Portugal no portal Copernicus Open Access Hub da ESA, onde

a ideia, seguindo o artigo base, foi retirar imagens que representassem datas de pós-incêndio e pré-incêndio, de modo a ser possível fazer uma comparação. Desta forma, e mediante disponibilidade de imagens no portal, sabendo que o satélite Sentinel-2 tem um período de revisita de 10 dias sob os mesmos ângulos e que por vezes as imagens podem estar afetadas com nuvens ou fumo, foram descarregadas imagens das datas 30/04/2016 (abril) para pré-incêndio e 28/8/2016 (agosto) para pós-incêndio. Ambas as imagens tinham a mesma dimensão.

| Imagem Pré-incêndios: 30/04/2016 |
|--|
| Instrumento: MSI |
| Satélite: Sentinel-2 |
| Tipo de produto: S2_MSI_Level-1C |
| Dimensões originais: 40980 pixels x 30978 pixels |
| Dimensões subset: 10993 pixels x 13278 pixels |
| Imagem Pós-incêndios: 28/08/2016 |
| Instrumento: MSI |
| Satélite: Sentinel-2 |
| Tipo de produto: S2_MSI_Level-1C |
| Dimensões originais: 40980 pixels x 30978 pixels |
| Dimensões subset: 10993 pixels x 13278 pixels |

Tabela 3.3 - Características das duas imagens Sentinel 2-A utilizadas.

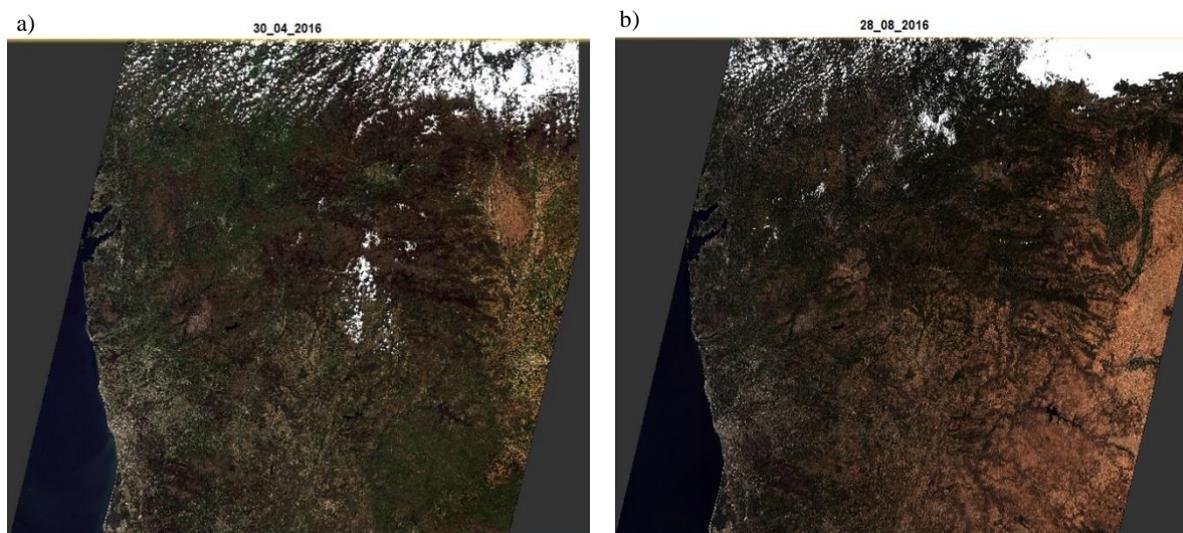


Figura 3.3 – Imagens Sentinel 2-A, a) imagem de 30-04-2016 e b) imagem de 28-08-2016. Fonte: ESA

3.3. Metodologia

A presente seção destina-se à abordagem das diversas etapas da metodologia aplicadas para a realização do trabalho e à caracterização da zona de estudo. A metodologia divide-se em cinco etapas: (1) o processamento das imagens Sentinel-2, (2) a criação dos índices de áreas ardidas (3) classificação dos índices em grupos espectrais, (4) produção dos mapas das áreas ardidas, (5) avaliação da exatidão da classificação com matriz de confusão binária e a validação dos resultados obtidos (Figura 3.4).

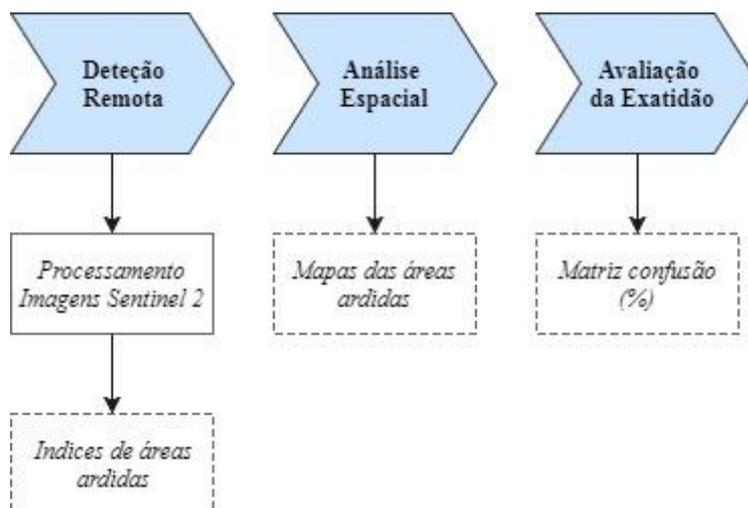


Figura 3.4 – Etapas de cartografia de área ardida

A metodologia deste trabalho tem como objetivo a determinação de áreas ardidas do Norte de Portugal Continental no ano de 2016 com recurso ao Satélite Sentinel-2 e a sua comparação com as áreas ardidas produzidas pelo ICNF no mesmo ano com recurso ao sensor MODIS. Para a concretização deste objetivo, seguiu-se a metodologia desenvolvida por Bastarrika, *et al.*, (2011) com a criação de índices de áreas ardidas. Para tal foram desenvolvidas 2 fases, baseadas em regras de decisão espectrais/temporais e em técnicas contextuais. Primeiro, uma fase de identificação de pixels-chave, que visava minimizar o erro de comissão, aplicando uma série de critérios para determinar os pixels com maior probabilidade de corresponderem a área ardida. Em segundo lugar, uma fase contextual, que fez a análise de regiões de crescimento para melhorar a delimitação de manchas queimadas.

Sistematizando as etapas contidas na metodologia e agrupando-as em 3 grupos, temos: o grupo da detecção remota constituído pelas etapas (1) o processamento das imagens Sentinel-2, (2) a criação dos índices de áreas ardidas e (3) classificação dos índices em grupos espectrais, sumarizadas em 9 passos: Aquisição das imagens do Sentinel 2, reamostragem, calibração radiométrica, criação dos 8 índices e grupos espectrais e exportação para ArcMap (Figura 3.5).

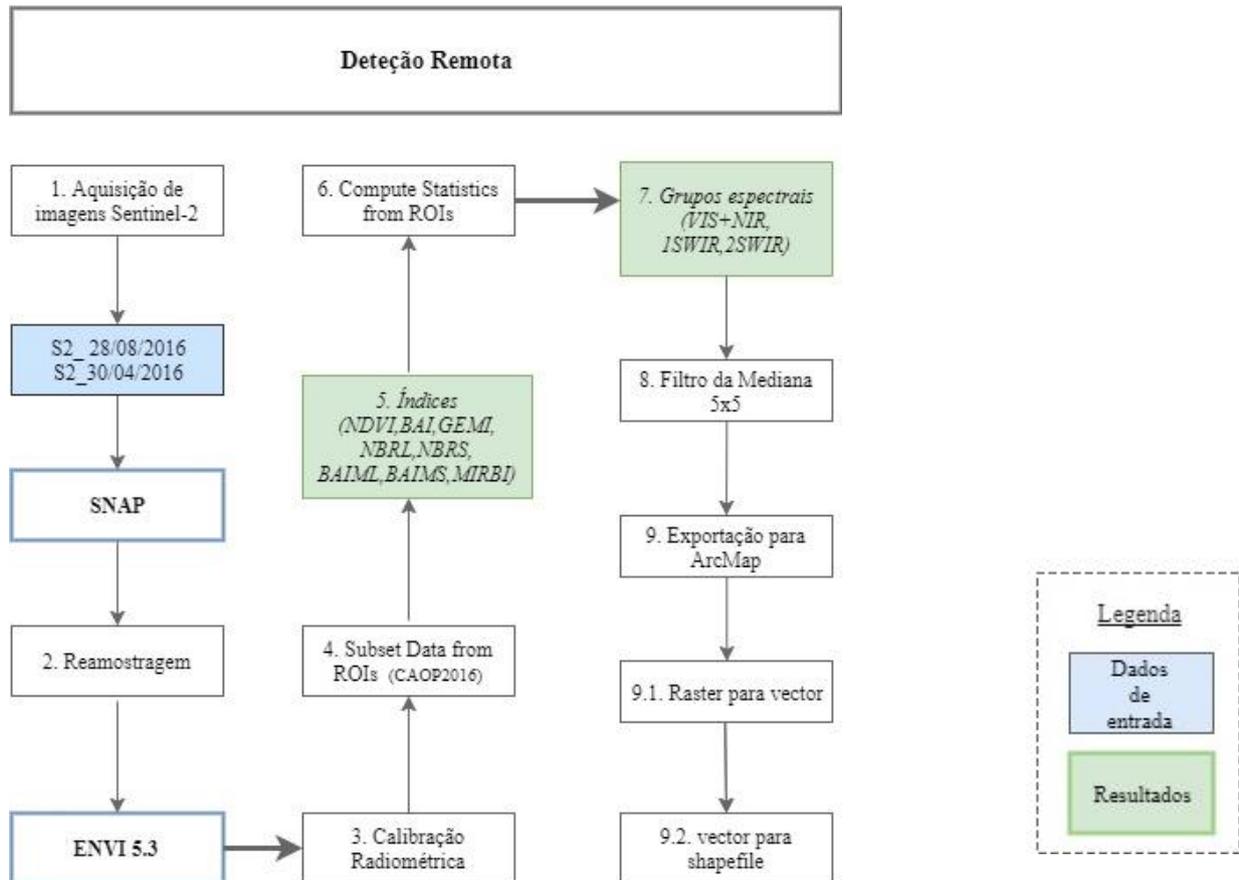


Figura 3.5 - Fluxograma da metodologia utilizada para o grupo da deteção remota

O segundo grupo é o da análise espacial onde se realizou a etapa nº 4 de produção dos mapas das áreas ardidas. Para esta etapa foram utilizados os resultados do grupo de deteção remota (etapas 1, 2, 3), que originou 3 mapas de áreas ardidas de acordo com os 3 grupos espectrais VIS+NIR, VIS+NIR+1SWIR, VIS+NIR+2SWIR (Figura 3.6).

O terceiro grupo é o da avaliação estatística onde se criou a matriz de confusão binária. Os cálculos foram feitos com folha de cálculo Excel.

Como foi referido, foram calculados índices de áreas ardidas. Agrupando os índices em 3 grupos espectrais temos:

- a. VIS (banda 4) + NIR (banda 8): NDVI, BAI, GEMI
- b. VIS+NIR +1SWIR (banda 11): NBR, BAIMS
- c. VIS+NIR+2SWIR (banda 12): NBRL, BAIML, MIRBI

Estes 8 índices foram calculados na ferramenta “band math” do ENVI 5.3, tendo como base as equações mencionadas no artigo base (Bastarrika, *et al.*, 2011) para cada índice. Foi necessário adequar os números das bandas a usar nos cálculos com o satélite usado (Sentinel-2) uma vez que no artigo os autores usaram o satélite Landsat 5. A síntese das bandas e índices usados no projeto é apresentado nas tabelas 3.4 e 3.5.

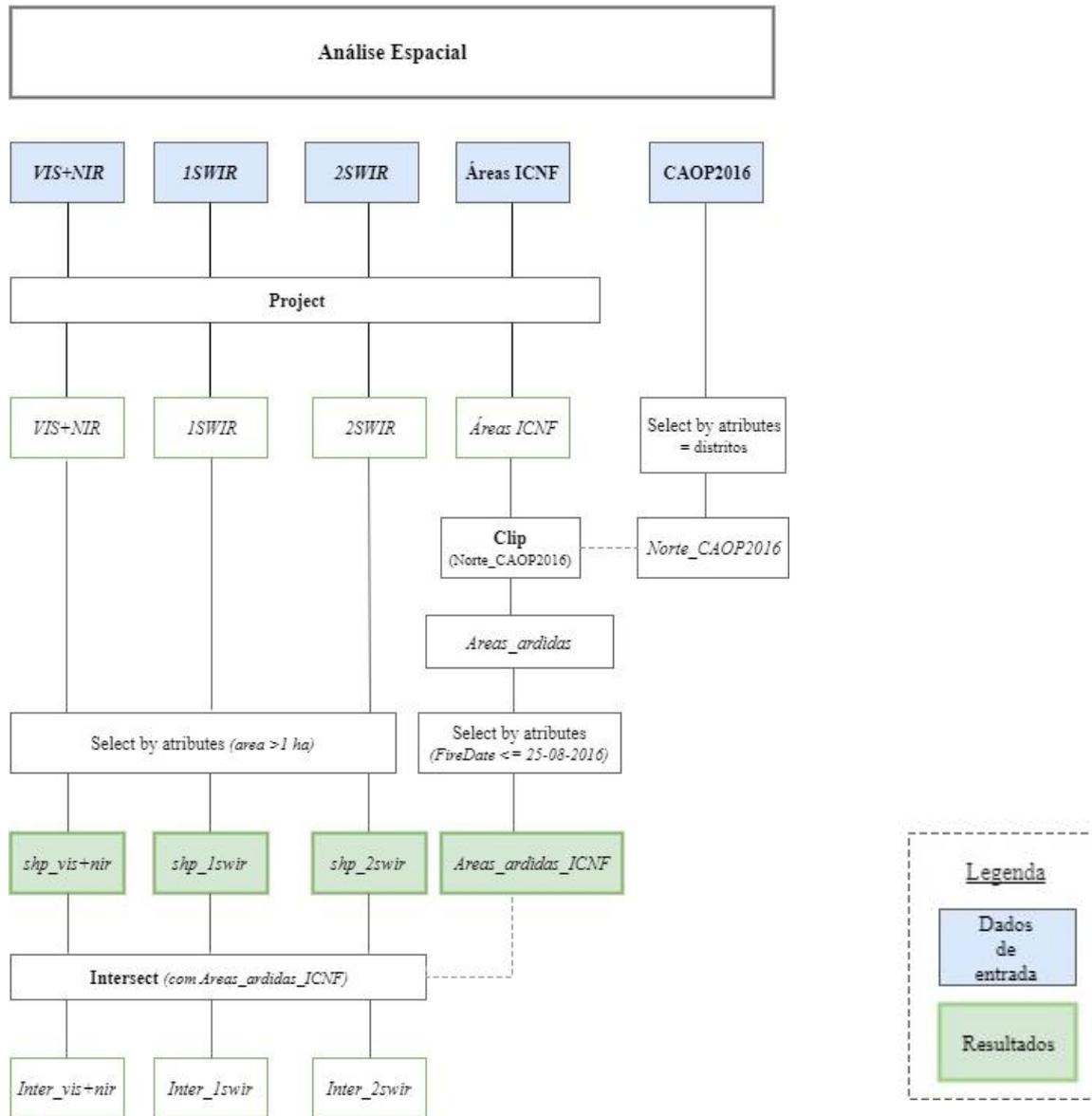


Figura 3.6 - Fluxograma da metodologia utilizada para o grupo da análise espacial

| Índices | Designação | Referência |
|---------|--|--------------------------|
| NDVI | Normalized Difference Vegetation Index | Rouse et al., 1974 |
| GEMI | Global Environmental Monitoring Index | Pinty & Verstraete, 1992 |
| BAI | Burned Area Index | Martín et al., 1998 |
| BAIMS | | Martín et al., 2005 |
| BAIML | | |
| NBRS | Normalized Burn Ratio | Key & Benson, 1999 |
| NBRL | | |
| MIRBI | Mid Infrared Burned Index | Trigg & Flasse, 2001 |

Tabela 3.4- Índices espectrais e referência

| Grupo | Índices | Equação |
|----------------------|---------|--|
| VIS+NIR | NDVI | $\frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R}$ |
| | GEMI | $\frac{\eta(1-0.25\eta) - (\rho_R - 0.125)}{(1-\rho_R)} \eta = \frac{2(\rho_{NIR}^2 - \rho_R^2) + 1.5\rho_{NIR} + 0.5\rho_R}{(\rho_R + \rho_{NIR} + 0.5)}$ |
| | BAI | $\frac{1}{(\rho_{NIR} - \rho_{cNIR})^2 + (\rho_R - \rho_{cR})^2}$ |
| VIS+NIR+1SWIR | NBRS | $\frac{\rho_{NIR} - \rho_{SSWIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{SSWIR}}$ |
| | BAIMS | $\frac{1}{(\rho_{NIR} - \rho_{cNIR})^2 + (\rho_{SSWIR} - \rho_{cSSWIR})^2}$ |
| VIS+NIR+2SWIR | NBRL | $\frac{\rho_{NIR} - \rho_{LSWIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{LSWIR}}$ |
| | BAIML | $\frac{1}{(\rho_{NIR} - \rho_{cNIR})^2 + (\rho_{LSWIR} - \rho_{cLSWIR})^2}$ |
| | MIRBI | $10\rho_{LSWIR} - 9.8\rho_{SSWIR} + 2$ |

Tabela 3.5 – Índices espectrais e respetiva equação

➤ Índices com base no domínio espectral vermelho-infravermelho próximo:

- O Índice **NDVI** (Normalized Difference Vegetation Index) é um dos mais conhecidos índices de vegetação. Este índice tem sido extensivamente utilizado na discriminação de áreas queimadas (Fernández *et al.* 1997, Kasischke & French, 1995). O NDVI é calculado do visível e do infravermelho próximo refletidos pela vegetação. Este índice tem como principais aplicações a monitorização de ecossistemas. Os seus valores variam de -1 a +1, correspondendo a ausência de vegetação a valores próximos de zero e a existência de uma grande densidade de vegetação a valores próximos de um.
- O índice **GEMI** (Global Environmental Monitoring Index) é um índice que é menos afetado pelo solo e variações atmosféricas do que o NDVI (Pinty & Verstraete, 1992). O GEMI é calculado a partir do vermelho e do infravermelho próximo e com valores de referência expressos na equação da tabela 3.5. Varia entre 0 e + 1 em áreas continentais. É mais sensível à discriminação da área queimada do que o NDVI (Pereira, 1999).
- O índice **BAI** (Burned Area Index) foi projetado especificamente para a discriminação de terra queimada no domínio espectral vermelho-infravermelho próximo (Chuvieco *et al.*, 2002). Este índice é calculado a partir da distância espectral de cada pixel a um ponto espectral de referência, onde as áreas recentemente queimadas tendem a convergir. Tem como valores de referência 0.06 e 0.1.

➤ Índices com base no domínio espectral vermelho-infravermelho próximo e infravermelho médio:

- O índice **NBR** (Normalized Burn Ratio), foi definido para evidenciar áreas queimadas. A sua equação é muito semelhante à do NDVI, em que no NDVI sendo aqui utilizadas a banda Infravermelho próximo (B8) e no NBR é utilizado o infravermelho médio (B11). Os seus valores variam entre + 1 e - 1 (tabela 3.6).

| Δ NBR | Gravidade |
|--------------|--------------------------------------|
| < -0.25 | Crescimento pós-fogo elevado |
| -0.25 a -0.1 | Baixa regeneração pós-fogo |
| -0.1 a +0.1 | Não queimado |
| 0.1 a 0.27 | Queima de baixa gravidade |
| 0.27 a 0.44 | Queima de gravidade moderada e baixa |
| 0.44 a 0.66 | Queima de gravidade moderada e alta |
| > 0.66 | Queima muito grave |

Tabela 3.6 – Intervalo de valores do algoritmo NBR

- O índice **BAIMS** (Burned Area Index), é muito útil para discriminar as áreas afetadas pelo fogo. Este índice é calculado de forma semelhante ao índice BAI, sendo utilizados o infravermelho próximo e no BAIMS o infravermelho médio (B11). Os valores de referência são de 0.05 e 0.02.

➤ Índices com base no domínio espectral vermelho-infravermelho próximo e Infravermelho longo:

- O índice **NBRL** (Normalized Burn Ratio), definido para evidenciar áreas queimadas. A sua equação é muito semelhante à do NBR, sendo no NBR utilizado o infravermelho médio (B11) e no NBRL utilizado o infravermelho longo (B12). O NBR combina informações nas regiões do infravermelho próximo e do infravermelho médio tem sido usada na discriminação de áreas queimadas no Mediterrâneo, usando uma imagem pós-fogo (López *et al.*, 1991, Heredia *et al.*, 2003)
- O índice **BAIML** (Burned Area Index) é muito útil para discriminar as áreas afetadas pelo fogo. Este índice é calculado de forma semelhante ao índice BAIMS, sendo no BAIMS utilizado o infravermelho médio (B11) e no BAIML o infravermelho longo (B12). Os valores de referência são de 0.05 e 0.02
- O índice **MIRBI** (Mid Infrared Burned Index), é uma combinação de duas bandas no infravermelho-médio (B11). O MIRBI foi projetado no espaço discriminante SMIR-LMIR, para fornecer alta sensibilidade às mudanças espectrais causadas pela queima e baixa sensibilidade à variabilidade. Desta forma tem potencial para detetar áreas queimadas usando imagens de satélite, embora este potencial seja confirmado usando dados detetados em resoluções espaciais mais grossas e contendo pixels mistos de vegetação queimada e pré-queimada (Trigg and Flasse 2001). Os valores de referência são de 10, 9.8 e 2.

Para a realização do projeto utilizaram-se diversas aplicações, nomeadamente, ArcGis 10.4 para Análise Espacial, Envi 5.3 e SNAP para deteção remota.



Figura 3.7 - Aplicações informáticas utilizadas no trabalho

4. Delimitação da área ardida no norte de Portugal em 2016

4.1. Áreas Ardidas e ocorrências em Portugal Continental no ano de 2016

Um uso de solo ardido é, segundo o ICNF, um povoamento florestal que devido à passagem de um incêndio está maioritariamente ocupado por árvores queimadas. Pressupõe-se a sua regeneração em menos de 5 anos.

As principais razões apontadas para esta tendência crescente de áreas ardidas segundo Pereira, (2017) são: a meteorologia severa, o abandono rural e a baixa eficácia de prevenção e combate.

Quanto a ocorrências de incêndio, segundo Pereira (2017), um pequeno número de grandes incêndios costuma ser responsável por grande parte da área queimada. A severidade de uma época depende do número de grandes fogos e não do nº total de fogos. O sistema de prevenção, deteção e combate pode extinguir rapidamente, digamos, 99% das ignições.

Podemos ver na figura 4.1 os meses do ano de 2016 mais propícios a ocorrências de incêndio. Em que agosto, com 118.2205 hectares de área ardida, foi o mês mais fustigante a nível de incêndios florestais no nosso país. De reparar que o gráfico só inclui o intervalo temporal de maio-novembro, pois as imagens de satélite usadas neste projeto datam de maio a agosto, tendo maio registado uma área ardida de 336 ha.

Em termos de localização (figura 4.2), podemos afirmar que em 2016 houve mais ocorrências de incêndios florestais na região do Norte, com 112939 ha de área ardida (Nuts II), seguindo-se a região do Centro (38110 ha), Algarve (6642 ha) e Alentejo (2050 ha). As sub-regiões de Tâmega, Minho-Lima e Entre Douro e Vouga foram as mais afetadas pelos incêndios em termos de área ardida (ha). A região do Tâmega apresentou 22441 ha de área ardida, Entre Douro e Vouga 31781 ha e Minho-Lima 30515 ha (segundo dados fornecidos pelo ICNF).

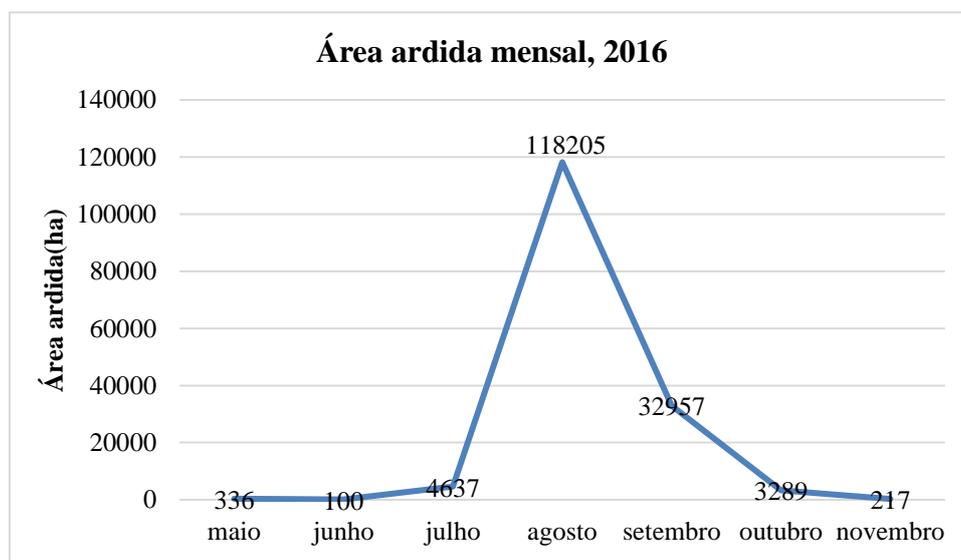


Figura 4.1 - Área ardida mensal no ano de 2016, entre maio e novembro.

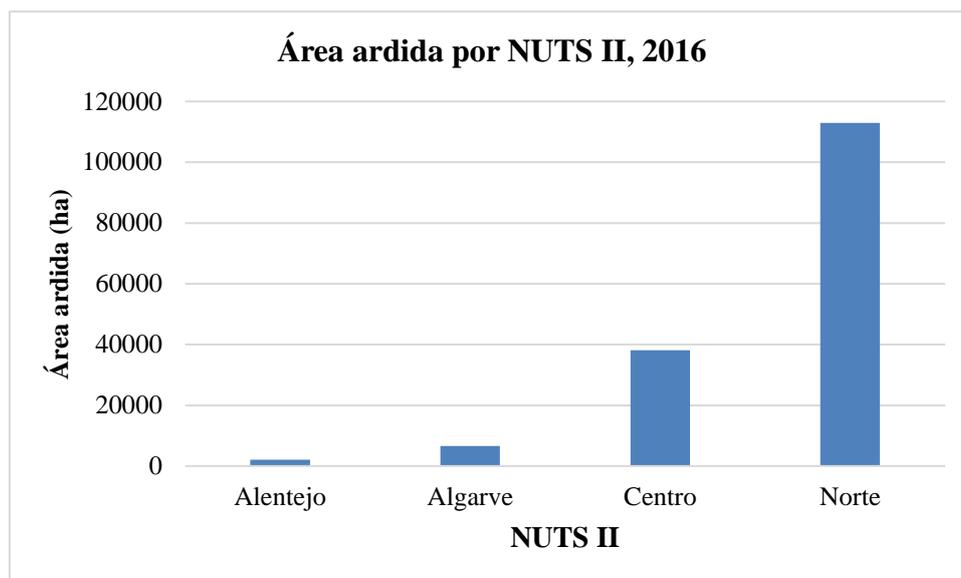


Figura 4.2 - Localização geográfica - Área ardida por NUTS II em 2016

No que se refere a áreas ardidas e ocorrências, segundo dados do ICNF, no período compreendido entre 1 de janeiro e 15 de outubro de 2016, houve um total de 18.441 ocorrências (incêndios florestais e fogachos) que resultaram em cerca de 160.00 hectares de área ardida (159.741 hectares), entre povoamentos e matos (Tabela 4.1).

| Anos | Área Ardida (ha) | Ocorrências incêndios (nº) |
|--------------------------|------------------|----------------------------|
| 2006 | 76.201 | 20.246 |
| 2007 | 20.331 | 12.231 |
| 2008 | 15.613 | 13.113 |
| 2009 | 85.314 | 25.087 |
| 2010 | 130.929 | 20.917 |
| 2011 | 67.535 | 22.203 |
| 2012 | 110.179 | 21.004 |
| 2013 | 149.476 | 18.344 |
| 2014 | 19.488 | 6.841 |
| 2015 | 63.855 | 15.328 |
| 2016 | 159.741 | 18.441 |
| Média (2006-2016) | 81.697 | |

Tabela 4.1 - Área ardida e número de ocorrências em Portugal continental nos anos de 2006-2016.

Observando o gráfico 4.3, também podemos afirmar que a área ardida em 2016 foi de 159.741 ha e a média entre 2006 e 2016 foi de 81.697 ha, ou seja ardeu quase o dobro da média da área ardida nesse período. (Segundo dados do ICNF). Ao longo destes últimos 11 anos, o ano de 2016 foi o ano com mais hectares de área ardida, de seguida o ano de 2013 com 149476 ha e 2010 com 130929 ha de área ardida. (Tabela 4.1)

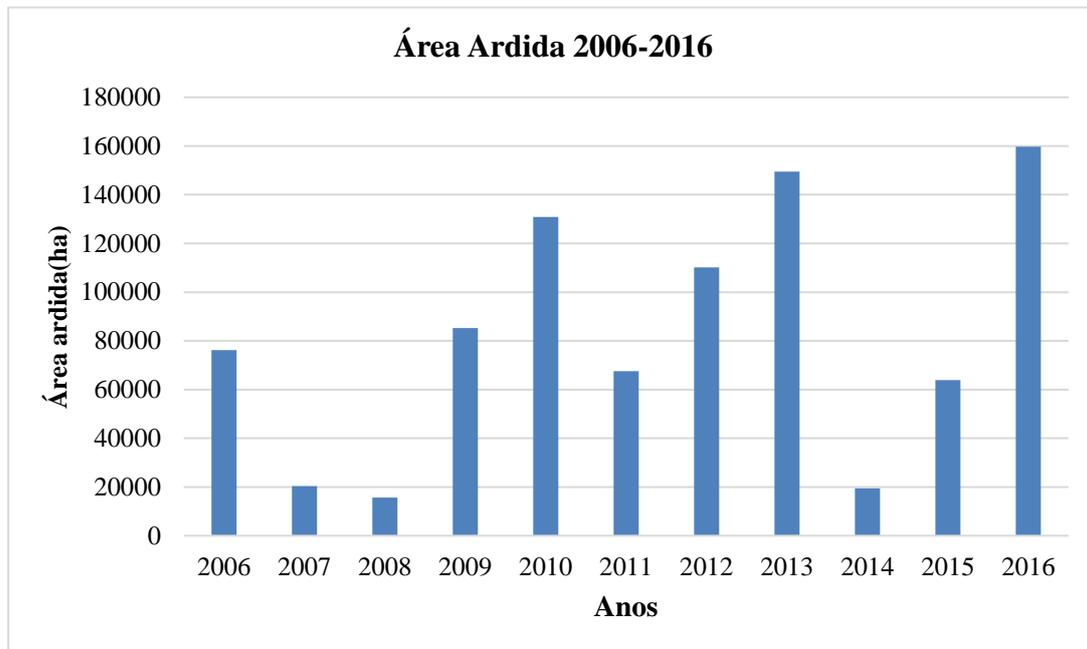


Figura 4.3 – Área ardida entre 2006-2016

Neste ano de 2016 houve grandes incêndios que queimaram áreas de cerca de 21 910 hectares, quase 14% da área total ardida no ano, como é o caso do incêndio no concelho de Arouca a 8 de agosto. Estes grandes incêndios, que tendem a ocorrer em alturas de maior calor, secura e vento mais forte, conseguem propagar-se mesmo através de áreas com menores cargas de combustível e/ou vegetação mais húmida. As áreas agrícolas são úteis como estruturas de compartimentação da paisagem e contenção do fogo, mas não sob condições meteorológicas extremas (Pereira, 2017). Nesse caso, o combate é um complemento indispensável da prevenção baseada na gestão de combustíveis e ordenamento do espaço rural.

Já os fogos mais pequenos queimam apenas os tipos de vegetação mais combustíveis, sendo detidos por áreas agrícolas, vinhas e olivais, bem como por manchas recém-queimadas.

Observando a figura 4.4, que faz uma comparação entre áreas ardidas e ocorrências, no decorrer do ano de 2016, foram registadas 18.441 ocorrências (fonte: Autoridade Nacional da Proteção Civil (ANPC)) com base no Sistema de Apoio à Decisão Operacional (SADO), entre elas de mato, povoamento florestal e área agrícola. Foram nos distritos do Porto (4352), Braga (1853) e Lisboa (1487) onde se registou um maior número de ocorrência, com o predomínio de áreas de mato afetadas. Os distritos com menos ocorrências registadas foram Faro (341) e Portalegre (361) também com prevalência em áreas de mato. Comparativamente aos últimos 11 anos, o ano de 2009, 2011 e 2012 foram os anos com mais registo de ocorrências (+de 20.000), ainda que não com maior área ardida. Os anos onde se registou menos de

20.000 ocorrências foram os anos com mais hectares de área ardida, os anos de 2013 e 2016 (figura 4.4). Segundo Pereira (2017), a grande maioria da área ardida concentra-se num pequeno número de fogos, que ocorrem num pequeno número de dias, estes são os mais perigosos e difíceis de combater.

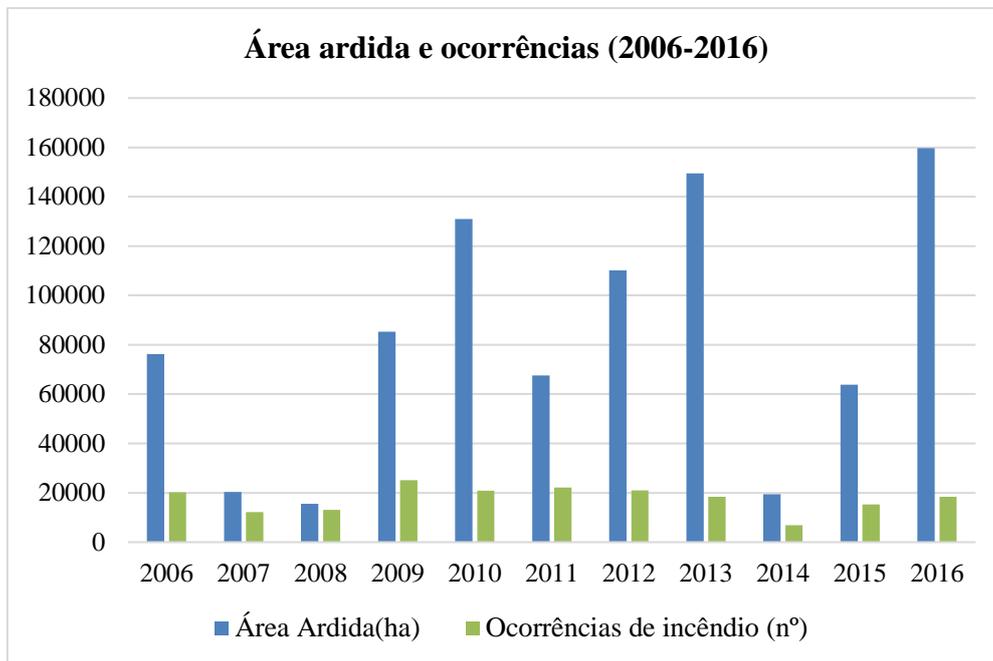


Figura 4.4 – Incêndios florestais e área ardida nos anos de 2006-2016

4.2. Recorrência de incêndios (2006-2016)

A probabilidade de ocorrência de incêndio pode ser analisada como resultado da conjugação dos fatores de risco que conduzem a uma maior possibilidade de ocorrência de incêndio causal (natural ou humano).

A recorrência de incêndio foi calculada através das áreas ardidas do ICNF entre os anos 2006-2016 (figura 4.5). As cores laranja e vermelho representam valores mais elevados de reincidência de incêndio. Para este cálculo foi necessário converter-se todos os anos em formato raster e no fim reclassificaram-se com valores de 0 e 1, em que o valor 1 correspondia às áreas com valores e o valor 0 ao 'No Data'.

Foram produzidos dois mapas, um focando o Norte (figura 4.5) pertencente à zona de estudo e outro mapa para Portugal Continental (figura 4.6). Podemos ver, a partir das classes que o Norte é a região que apresenta uma maior suscetibilidade a nível de recorrência de incêndios, tendo esta região o maior registo de áreas ardidas comparativamente às restantes regiões, esta foi uma das razões da escolha desta região para este estudo.

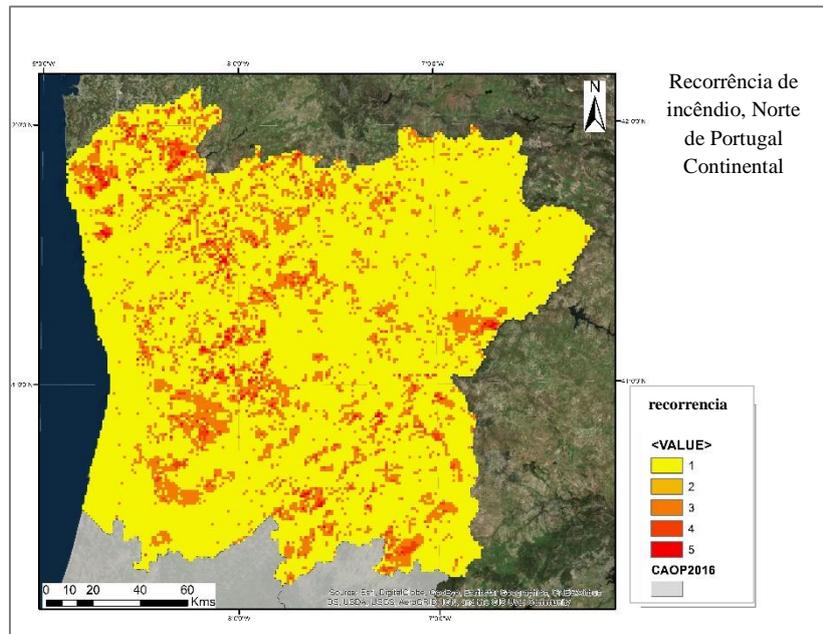


Figura 4.5 - Mapa de recorrência de incêndio para o Norte de Portugal Continental

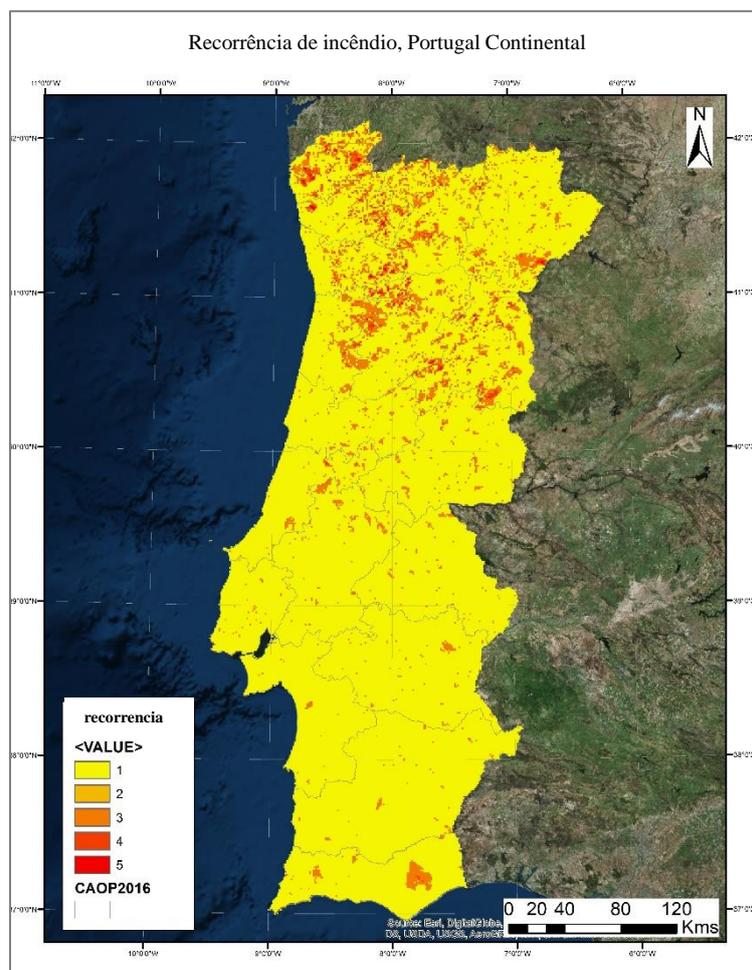


Figura 4.6 - Mapa de recorrência de incêndios para Portugal Continental

4.3. Cálculo dos índices de área ardida

Nesta etapa de processamento e tratamento dos dados para o cálculo dos índices de área ardida, em primeiro lugar usou-se o software SNAP, onde se selecionou para cada imagem pré e pós (30/04/2016 e 28/8/2016) as bandas usadas no cálculo dos índices propostos (b4, b8, b11 e b12) removendo as restantes, sendo de seguida feita a reamostragem dessas quatro bandas para ficarem com uma resolução espacial de 10 metros. Desta forma, pixel a pixel, as bandas ficaram com dimensões iguais e assim foi possível calcular os índices. Exportou-se as bandas com as novas resoluções para prosseguir o processamento no software ENVI 5.3 onde foi feita a correção radiométrica das bandas (Radiometric Correction > Radiometric Calibration). A calibração tenta compensar os erros radiométricos dos defeitos do sensor, as variações no ângulo de varredura e o ruído do sistema para produzir uma imagem que represente uma radiação espectral real no sensor. A ferramenta de Calibração Radiométrica do ENVI fornece opções para calibrar imagens para radiação, reflexão ou brilho.

De modo a delimitar a área de estudo (Norte), e uma vez que a imagem com as dimensões de origem abrangia outras áreas, principalmente um pouco do noroeste da Península Ibérica (Galiza), foi feito um recorte da imagem (Subset Data from ROIs) com uma área de interesse - shapefile dos limites administrativos de Portugal Continental (CAOP 2016), em que deste modo a imagem ficou com dimensões mais reduzidas (tabela 3.3 e figura 4.7).

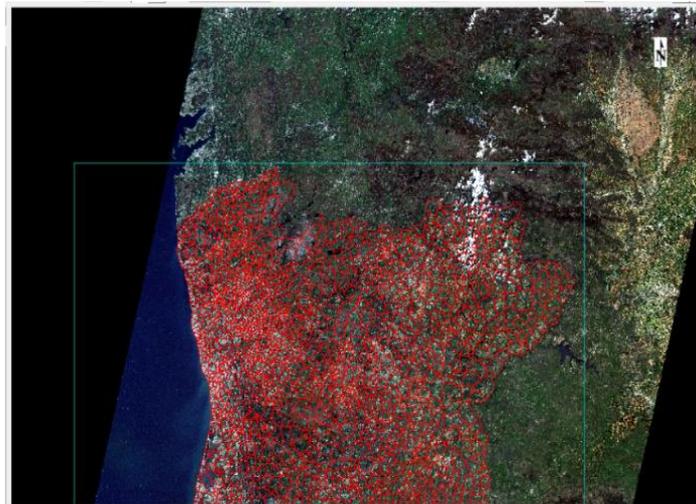


Figura 4.7 – Subconjunto da imagem de 30/04/2016 (ENVI 5.3)

Com as duas imagens reamostradas, incluindo a correção radiométrica e cortadas, foram calculados os 8 índices espectrais. As características refletivas e térmicas das áreas queimadas levaram ao uso de vários índices espectrais definidos na tabela 3.4 para a discriminação da área queimadas. Deste modo, foram criadas três categorias de índices de acordo com características espectrais: a) Visível (VIS, 0.4–0.7 μm) e Infravermelho próximo (NIR, 0.7–1.2 μm); b) Visível, NIR e uma banda no Infravermelho médio (1SWIR, 1.5–1.8 μm) e c) Visível, NIR e Infravermelho longo (2SWIR, 2 - 2.2 μm).

Os índices agrupados em categorias são:

- a) VIS (banda 4) + NIR (banda 8): NDVI, BAI, GEMI
- b) VIS+NIR+1SWIR (banda 11): NBR5, BAIS

c) VIS+NIR+2SWIR (banda 12): NBRL, BAIML, MIRBI

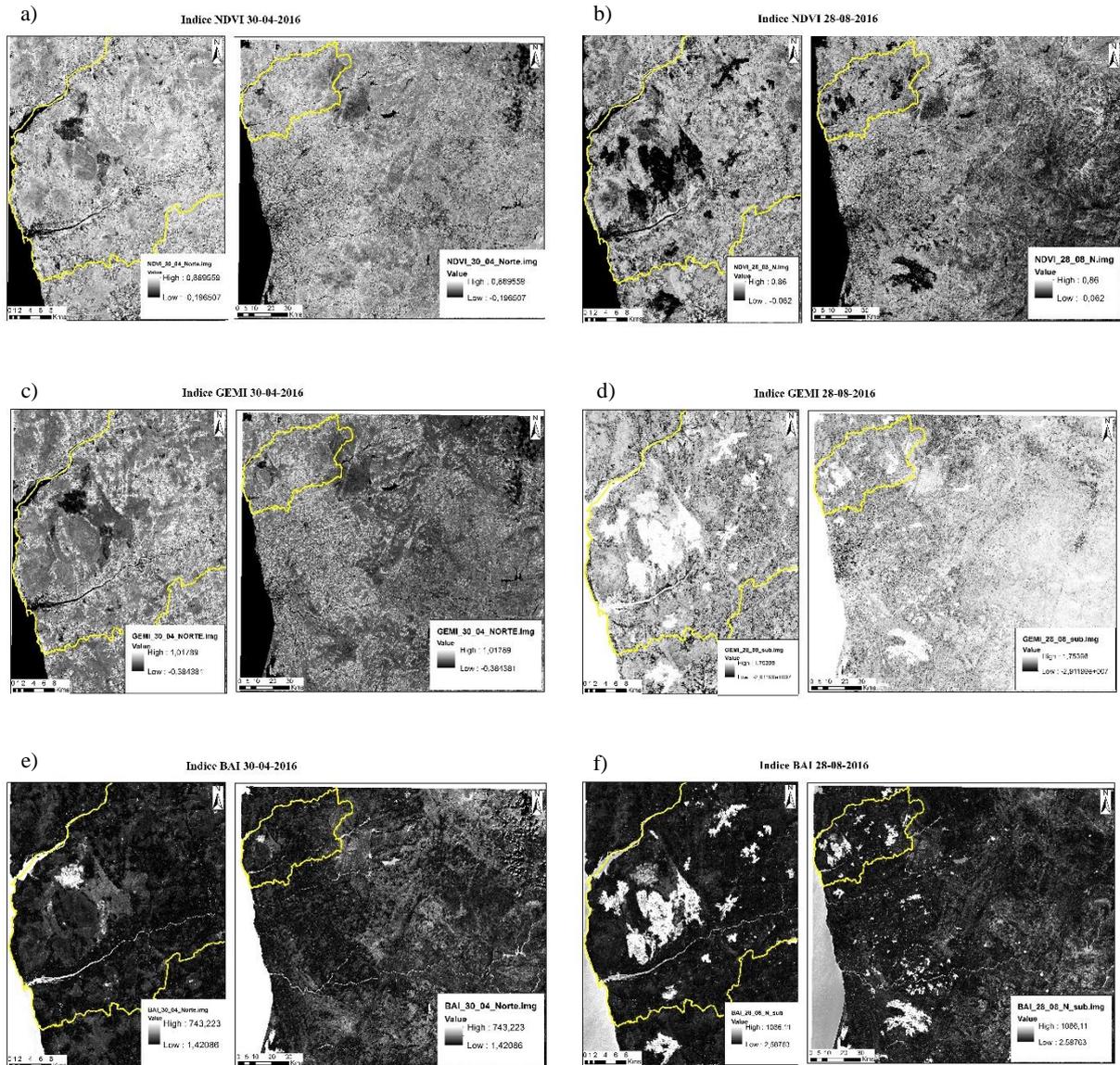
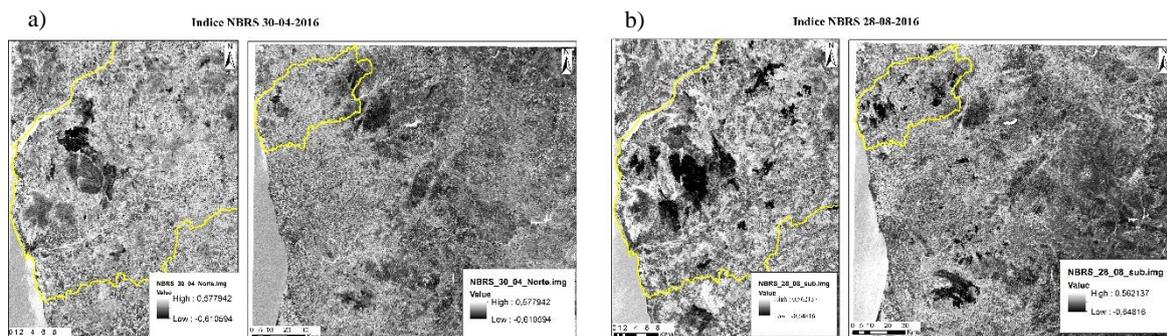


Figura 4.8 - Índices pré e pós incêndios calculados com bandas na região do visível e do infravermelho próximo (VIS+NIR): a) e b) NDVI, c) e d) GEMI, e) e f) BAI. Em cada mapa é apresentado o norte do país (à direita) e uma ampliação (à esquerda).



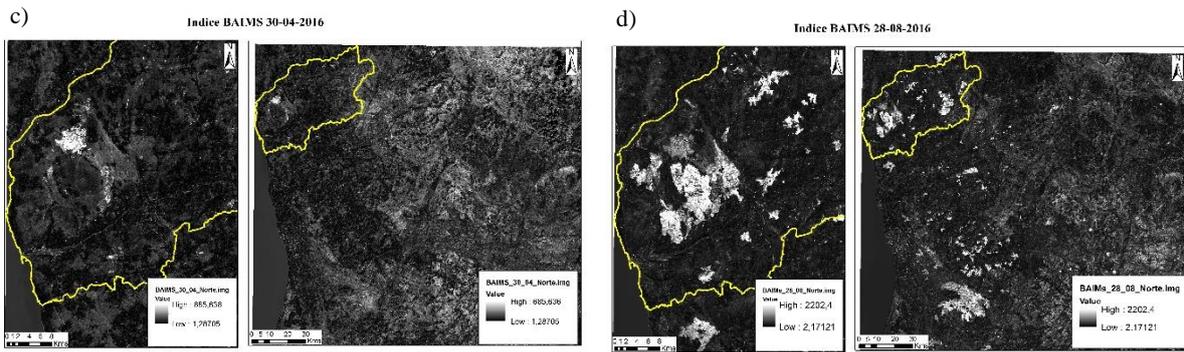


Figura 4.9 - Índices pré e pós incêndios calculados com bandas na região do visível, infravermelho próximo e infravermelho próximo (VIS+NIR+1SWIR): a) e b) NBRS, c) e d) BAIMS. Em cada mapa é apresentado o norte do país (à direita) e uma ampliação (à esquerda).

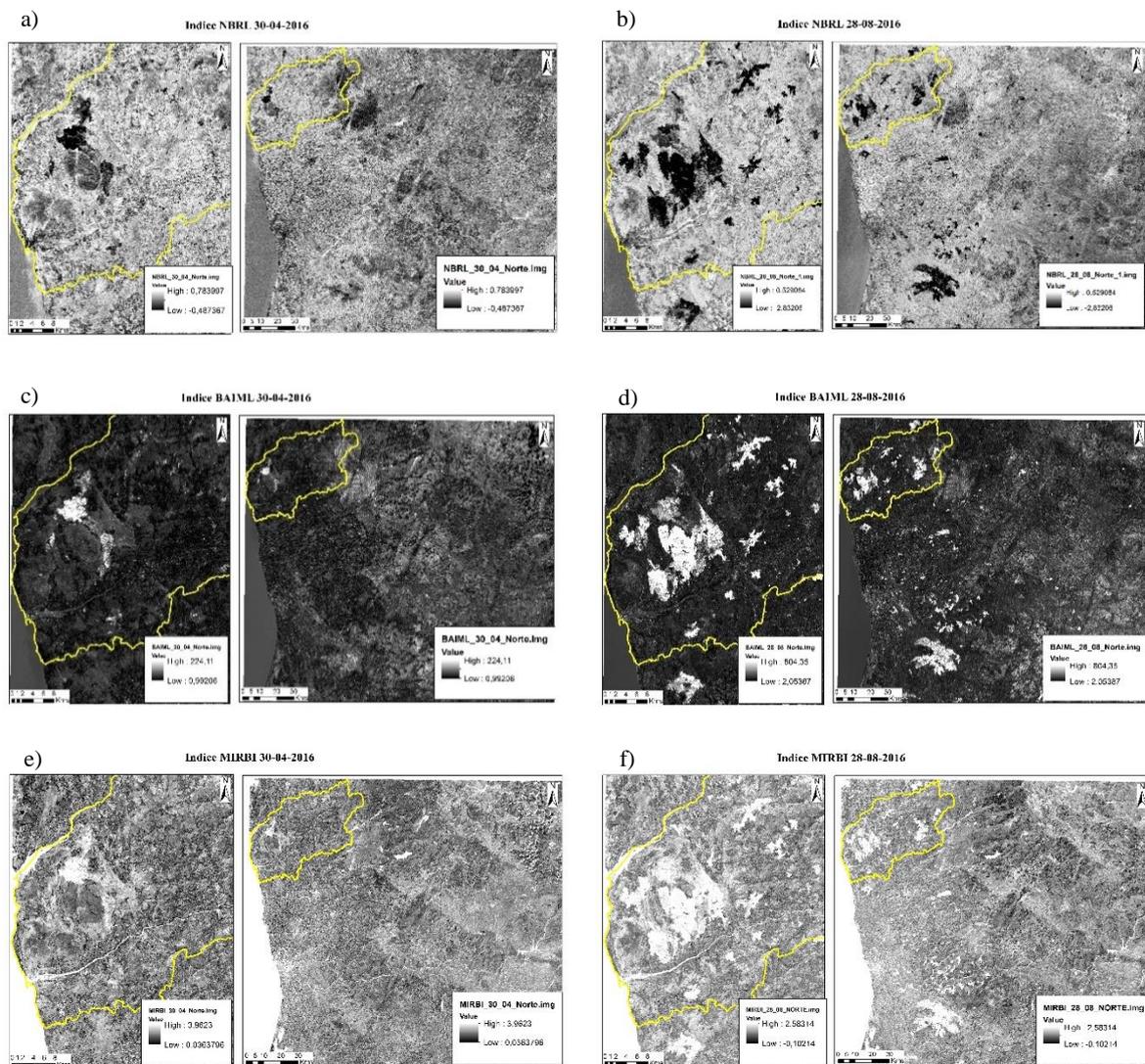


Figura 4.10 - Índices pré e pós incêndios calculados com bandas na região do visível e do infravermelho médio (VIS+NIR+2SWIR): a) e b) NBRL, c) e d) BA1ML, e) e f) MIRBI. Em cada mapa é apresentado o norte do país (à direita) e uma ampliação (à esquerda).

Na tabela 4.2 apresentam-se os índices agrupados por grupo espectral conjuntamente com as respetivas bandas do Sentinel-2 utilizadas no cálculo de cada índice, cálculos estes, já apresentados no subcapítulo 3.3 assim como a descrição de cada um dos índices.

| Grupo | Índice | Bandas |
|---------------|------------------------|---------|
| VIS+NIR | NDVI GEMI BAI | B4, B8 |
| VIS+NIR+1SWIR | NBRS BAIMS | B8, B11 |
| VIS+NIR+2SWIR | NBRL BAIML MIRBI | B8, B12 |

Tabela 4.2 – Grupos de índices de área ardidas e as respetivas bandas espectrais

Já com os resultados apresentados nas figuras 4.8, 4.9 e 4.10, podemos fazer algumas considerações acerca dos índices, relacionadas com o resultado enquanto índices de áreas ardidas. Estas considerações vão ter em conta os valores médios e o *índice M* presentes na tabela 4.3. Com o índice M é possível comparar variações de índices de escalas diferentes. Este índice é calculado a partir das diferenças das médias nos dois períodos (pré e pós) dividindo pela soma dos desvios padrão nesses períodos para cada índice.

De forma a calcular valores estatísticos relevantes para cada índice, foi selecionada uma área específica igual para todos os índices correspondente às áreas ardidas 2016 do ICNF e assim ser possível comparar o valor dos índices nas áreas ardidas nas duas datas (pré-incêndio e pós-incêndio). Assume-se aqui que as áreas ardidas do ICNF são áreas de validação

Na tabela 4.3 podemos observar os valores da média e desvio padrão para cada índice. Em que os valores máximos correspondem aos índices BAI, BAIMS e BAIML, quer na imagem pós e pré incêndio. Quanto ao desvio padrão, sabendo que corresponde à raiz quadrada da variância, quanto maior for, maior será a dispersão dos dados. Assim, onde temos uma grande variabilidade entre os dados é nos índices BAI, BAIMS e BAIML.

| Data Imagem | Índices | Média | Desvio Padrão (σ) | Data Imagem | Índices | Média | Desvio Padrão (σ) | Índice M |
|----------------------------|---------|---------|----------------------------|----------------------------|---------|----------|----------------------------|----------|
| 30/04/2016 Pré incêndio | NDVI | 0,5087 | 0,1201 | 28/08/2016 Pós incêndio | NDVI | 0,2501 | 0,2032 | 1,095583 |
| | GEMI | 0,3960 | 0,1270 | | GEMI | 0,3936 | 0,1244 | 0,013500 |
| | BAI | 50,8726 | 861,0864 | | BAI | 287,3656 | 258,1294 | 0,263079 |
| | BAIMS | 38,8546 | 46,4138 | | BAIMS | 147,202 | 218,33 | 0,485408 |
| | BAIML | 29,9103 | 14,0696 | | BAIML | 131,9876 | 207,4959 | 0,490821 |
| | NBRS | 0,0792 | 0,1391 | | NBRS | -1,0716 | 0,5946 | 1,884538 |
| | NBRL | 0,3359 | 0,1682 | | NBRL | -0,8611 | 0,7138 | 1,632236 |
| | MIRBI | -2,7327 | 0,1551 | | MIRBI | -2,4412 | 0,4157 | 0,656987 |

Tabela 4.3 – Estatísticas para cada índice

Em primeiro lugar, é importante esclarecer que as áreas queimadas são caracterizadas por depósitos de carvão e cinzas, ausência de vegetação e alteração da estrutura da vegetação (Pereira *et al.*, 1997; Roy *et al.*, 1999). Assim, no índice **NDVI**, observamos áreas ardidas nas áreas de cor preta, isto é, associadas com valores mais baixos do índice (negativos). Na imagem pré-incêndio temos valores de 0.51, já na imagem pós-incêndio valores mais baixos com 0.25, em que algumas das zonas com vegetação correspondem agora a valores mais baixos de NDVI, indicando possível vegetação queimada, mas podendo também corresponder a uma zona de solo nú, ou de corte de árvores. Este índice apresenta uma variação significativa em relação à média, índice $M = 1.095$, significando que o NDVI pode ser um bom indicador de área ardida.

No índice **BAI**, as áreas ardidas correspondem a zonas brancas, associadas a valores mais altos. Na imagem do pré-incêndio temos um valor de 50.87 e na imagem do pós-incêndio o valor é mais elevado, com um valor de 287.26. Na imagem do pós-incêndio este índice tem uma boa expressão na cartografia de áreas ardidas. Este índice apresenta uma variação não significativa entre os dois períodos (índice $M = 0.26$), revelando pouca sensibilidade para a discriminação de áreas ardidas.

No índice **GEMI** as áreas ardidas estão representadas a branco, associadas a valores mais altos. Na imagem do pré incêndio apresenta um valor de 0.396 e na imagem do pós-incêndio os valores são muito parecidos, de 0.393. Este índice contrastado com o índice NDVI do mesmo grupo espectral não oferece uma diferença muito contrastante, em que as áreas ardidas não são facilmente evidentes. Podemos observar o valor do índice de variação (índice M) que tem um valor muito próximo de 0, sendo 0.013, ou seja não tem quase variação. Esta ideia alia-se à ideia de (Chuvieco *et al.*, 2002) que defende que em contraste, o GEMI oferece o menor coeficiente de variação, o que implica uma menor sensibilidade à discriminação das variações internas dentro das áreas queimadas.

No segundo grupo, temos o índice **NBRS**, com áreas mais escuras significando áreas ardidas, com valores pré-incêndio de 0.079 e na imagem pós incêndio os valores das áreas ardidas mais baixos, chegando mesmo a negativos, com -1.071. Este índice com tem variações significativas pré e pós incêndio ($M=1.88$) sendo um bom indicador de área ardida.

O índice **BAIMS** tem uma variação pouco significativa (índice $M=0.48$), variando entre 38.85 e 147.20 na imagem pré e pós-incêndio, respetivamente.

No terceiro grupo temos o índice **NBRL**, cujo comportamento é semelhante ao NBRS, em que as áreas escuras (valores negativos) correspondem a áreas ardidas. Assim temos valores para as áreas ardidas no pré incêndio de 0.335 e no pós-incêndio valores negativos de -0.861. Assim, como no NBRS, este índice também apresenta valores de deteção de áreas ardidas altos, com índice M a registar valores de 1.63.

No índice **BAIML**, o valor de variação situa-se nos 0.49, apresentando uma distinção média do ardido-não ardido, ligeiramente melhor que o BAIMS. Desta forma temos para a imagem pré incêndio valores para as áreas ardidas de 29.91 e na imagem pós-incêndio valores de 131.98.

No índice **MIRBI**, as áreas ardidas correspondem a áreas brancas com valores mais elevados que os restantes. Este índice tem como valor de variação de 0.65, fazendo uma boa distinção de áreas ardidas-não ardidas. Na imagem do pré-incêndio as áreas ardidas têm valores mais baixos de -2.73 e na imagem pós-incêndio valores de -2.44.

Desta forma os índices que apresentam uma melhor distinção de áreas ardidas são o NDVI, NBRS e NBRL. Os índices que contribuem para uma menor distinção são o GEMI, BAI e o BAIMS. Esta conclusão é fundamentada pela análise da diferença normalizada, índice M, que nos indica o nível de significância da diferença da média de duas amostras independentes. Assim, esta conclusão é também sustentada por (Chuvieco *et al.*, 2008; Chuvieco *et al.*, 2002; Koutsias & Karteris, 2000; Trigg & Flasse, 2001) que afirmaram que a região espectral do infravermelho próximo é sensível a áreas onde ocorreram incêndios recentes, uma vez que a vegetação verde e a vegetação seca apresentam uma maior refletância no NIR do que as áreas queimadas.

De forma a calcular valores estatísticos relevantes para cada índice, foi selecionada uma área específica igual para todos os índices correspondente às áreas ardidas 2016 do ICNF e assim ser possível comparar o valor dos índices nas áreas ardidas nas duas datas (pré-incêndio e pós-incêndio). Assume-se aqui que as áreas ardidas do ICNF são áreas de validação

Na tabela 4.3 podemos observar os valores da média e desvio padrão para cada índice. Em que os valores máximos correspondem aos índices BAI, BAIMS e BAIML, quer na imagem pós e pré incêndio. Quanto ao desvio padrão, sabendo que corresponde à raiz quadrada da variância, quanto maior for, maior será a dispersão dos dados. Assim, onde temos uma grande variabilidade entre os dados é nos índices BAI, BAIMS e BAIML.

4.3.1. Regras de classificação

Depois de calcular as três categorias empíricas de índices sugeridos pelos autores Bastarrika, *et al.*, (2011) e obter as respetivas estatísticas, foram atribuídos critérios de decisão conforme os autores, de forma a identificar áreas ardidas. Assim, as áreas ardidas foram obtidas comparando os diferentes índices nos períodos multitemporais (Diff) de pré e pós incêndio (datas de abril e agosto) ou somente o pós-incêndio (Post), originando assim uma única imagem para cada grupo, isto é, para os grupos VIS+NIR, VIS+NIR+1SWIR e VIS+NIR+2SWIR. Estes critérios originaram imagens binárias, pois foram atribuídos intervalos de valor específico aos índices, com limites de maior ou menor a um certo valor, fazendo com que a imagem resultante fosse de 0 e 1, não ardido e ardido respetivamente.

Os critérios de decisão dos três grupos espectrais anteriormente mencionados resultaram das seguintes regras de classificação (Bastarrika, *et al.*, 2011):

a) **VIS+NIR:** Diff_BAI>144.3835 AND Diff_NDVI<-0.17767 AND Post_NDVI<0.14413 AND Diff_GEMI<-0.11578

b) **VIS+NIR+1SWIR:** Diff_BAIMS>46.8143 AND Diff_NDVI<-0.17767 AND Post_NBRS<-0.17079 AND Post_BAI>188.88

c) **VIS+NIR+2SWIR:** Diff_BAIML>56.2384 AND Diff_NDVI<-0.17767 AND Post_MIRBI>1.8514 AND Post_NBRL<-0.15006

De forma a apresentar os resultados destas regras de classificação para cada um dos índices, foi seleccionada uma área ardida correspondente à área ardida da freguesia de Janarde no distrito de Aveiro (figura 4.11), registada na data de 2016-08-15, segundo dados do ICNF e que ardeu uma área de 26.593 hectares, a maior área ardida no ano de 2016.

De seguida são apresentados os resultados das diferentes regras aplicadas a cada índice, de forma a verificar a aplicabilidade dos intervalos de valores propostos pelo autor. Assim podemos ver para cada índice uma imagem ilustrativa e a sua descrição.

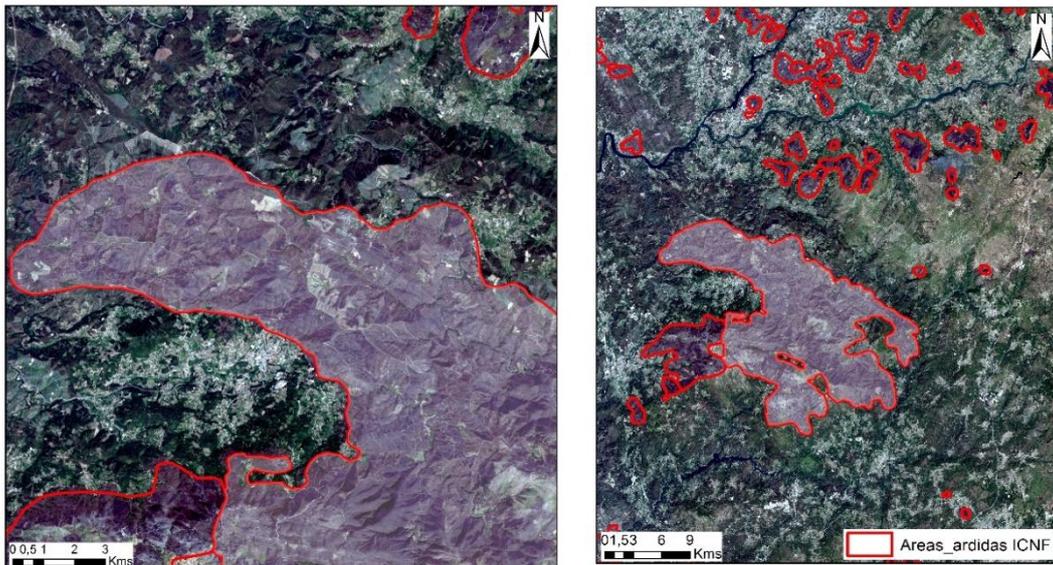


Figura 4.11 - Área de validação correspondente à área ardida na freguesia de Janarde (pormenor à esquerda) para verificação dos valores dos índices de acordo com as regras de classificação impostas.

VIS+NIR

Um aspeto comum aos três critérios, é a inclusão da regra $\text{DIFF NDVI} < -0.17767$ (figura 4.12), que é a diferença do índice NDVI no pós e o pré-incêndio. Atribui-se, assim um limiar para este índice de -0.17767 , fazendo com que imagem se transforme em binários (0 e 1) em que o 1 corresponde a valores menores que -0.17767 e o 0 corresponde aos restantes valores superiores a -0.17767 , como podemos observar nas duas imagens, a branco valor 1 e preto valor 0. Este índice é muito utilizado na discriminação de terras queimadas (Fernández *et al.* 1997, Kasischke e French, 1995).

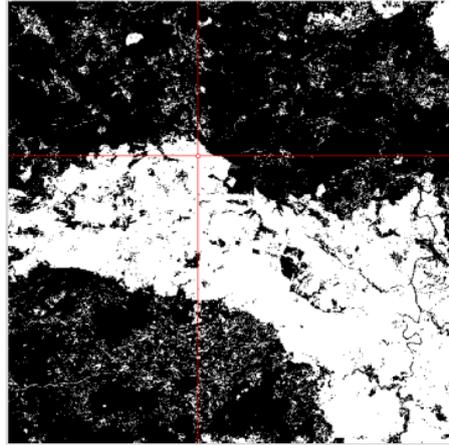


Figura 4.12 - Diff NDVI – área ardida (branco), correspondente a valores menores que -0.17767 e área não ardida (preto), correspondente a valores maiores que -0.17767

Outro aspeto é a inclusão nestas regras de classificação de critérios envolvendo diferenças multitemporais BAI e BAIM (calculadas com bandas dos infravermelhos próximos, médios e longos – B8, B11 e B12). Na regra de classificação **VIS+NIR**, está incluída a Diff BAI, na **VIS+NIR+1SWIR** a Diff BAIMS e o Post BAI e na regra **VIS+NIR+2SWIR** está somente incluído a Diff BAIML.

Para a imagem Diff_GEMI<-0.11578 (figura 4.13), imagem correspondente à diferença multitemporal do índice GEMI, em que para valores menores de -0.11578 o valor é 1 (branco) que representa áreas queimadas e valores maiores de -0.11578 o valor é 0, que significa ausência de áreas queimadas (preto).

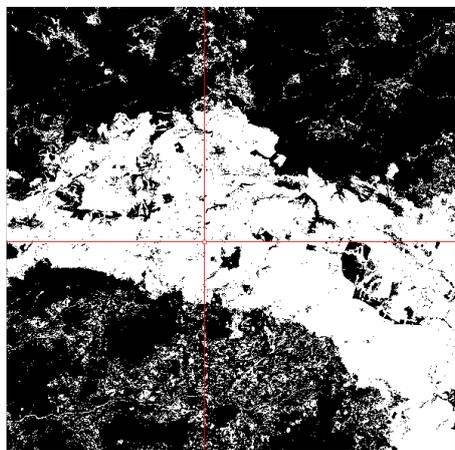


Figura 4.13 – Diff GEMI – área ardida (valor 1), correspondente a valores inferiores a -0.11578 e área não ardida (valor 0), correspondente a valores superiores a -0.11578

Para Post_NDVI<0.14413 considerando o índice NDVI na data de pós-incêndio de agosto, o valor 1 corresponde a valores inferiores a 0.14413, ou seja área queimadas (branco) e o valor 0 (preto) a valores superiores a 0.14413, representando área não ardida (figura 4.14).

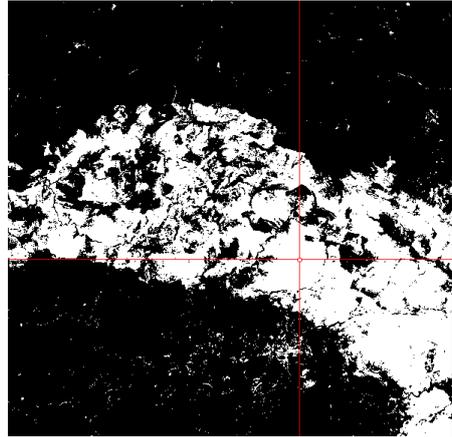


Figura 4.14 – Post NDVI – área ardida (valor 1), correspondente a valores inferiores a 0.14413 e área não ardida (valor 0), correspondente a valores superiores a 0.14413

Para a imagem Diff BAI > 144.3835 (figura 4.15), imagem correspondente à diferença multitemporal do índice BAI, em que para valores de pixels superiores a 144.3835, o valor resultante foi 1, ou seja presença de áreas ardidas e para valores inferiores a 144.3835, o valor 0, ausência de áreas ardidas.

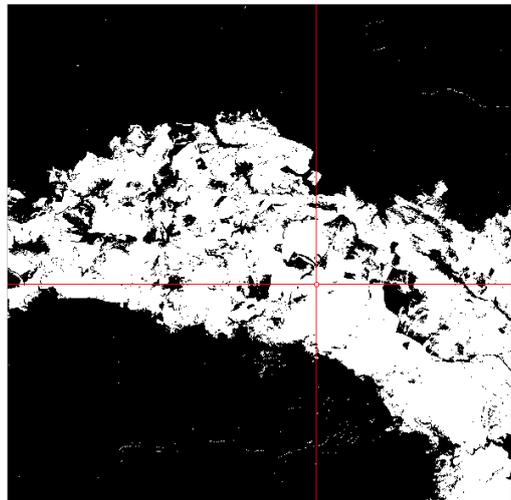


Figura 4.15 - Diff BAI – área ardida (valor 1), correspondente a valores superiores a 144.3835 e área não ardida (valor 0), correspondente a valores superiores a 144.3835

VIS+NIR+1SWIR:

Podemos observar os resultados para Diff BAIMS > 46.8143 e Post BAI > 188.88 nas figuras 4.13 e 4.14, respetivamente. Estes índices são muito úteis para discriminar as áreas afetadas pelo fogo. Este índice é calculado a partir da distância espectral de cada pixel para um ponto espectral de referência, para o qual as áreas recentemente queimadas tendem a convergir.

A interpretação destas imagens é semelhante à do DIFF NDVI, em que as imagens são transformadas em binário, com valores 0 e 1, em que para Diff BAIMS > 46.8143, o valor 1 corresponde a valores superiores a 46.8143, representando áreas queimadas e o valor 0 corresponde a valores menores que 46.8143, ou seja, áreas não queimadas. Para Post BAI > 188.88, considerando o índice BAI na data de

pós-incêndio de agosto, o valor 1 corresponde aos valores maiores a 188.88, áreas queimadas (branco) e o valor 0 (preto) a valores menores a 188.88 representando áreas não-queimadas.

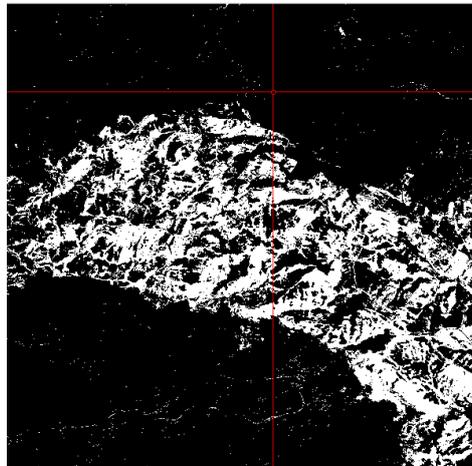


Figura 4.16– Post BAI – área ardida (branco), correspondente a valores superiores a 188.88 e área não ardida (preto), correspondente a valores inferiores a 188.88

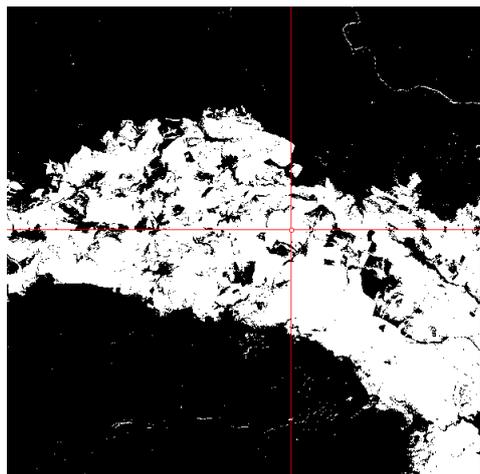


Figura 4.17 - Diff BAIMS – área ardida (branco), correspondente a valores superiores a 46.8143 e área não ardida (preto), correspondente a valores inferiores a 46.8143.

Para a imagem Post_NBRS<-0.17079 (figura 4.18), imagem correspondente ao índice NBRS na data pós-incêndio, em que para valores menores de -0.17079 o valor é 1 (branco) que representa áreas queimadas e valores maiores de -0.17079 o valor é 0, que significa ausência de áreas queimadas (preto).

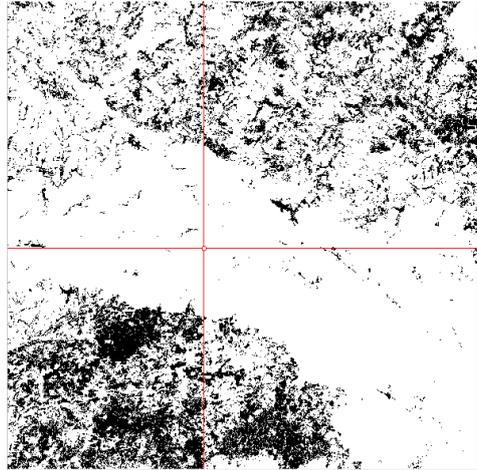


Figura 4.18 – Post NBRS – área ardida (branco), correspondente a valores menores de -0.17079 e área não ardida (preto), correspondente a valores maiores de -0.17079

VIS+NIR+2SWIR:

Em relação à imagem DIFF BAIML > 56.2384 (figura 4.19), imagem representante da diferença multitemporal do índice BAIML, o valor 1 foi atribuído aos pixels com valor superior a 56.2384, que significa presença de áreas ardidas e o valor 0 a áreas não ardidas, com valores inferiores a 56.2384.

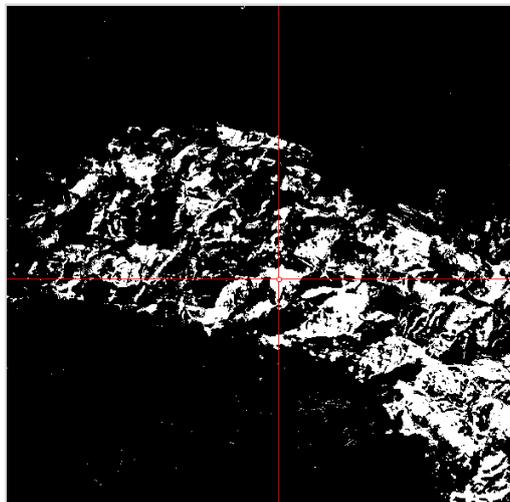


Figura 4.19 - Diff BAIML – área ardida (branco), correspondente a valor superior a 56.2384 e área não ardida (preto), correspondente a valores inferiores a 56.2384.

Para a imagem Post MIRBI > 1.8514 (figura 4.20), foi utilizada a imagem pós-incêndio do índice MIRBI, em que para valores de pixels superiores a 1.8514, o valor resultante foi 1, ou seja presença de áreas ardidas e para valores inferiores a 1.8514, o valor 0.

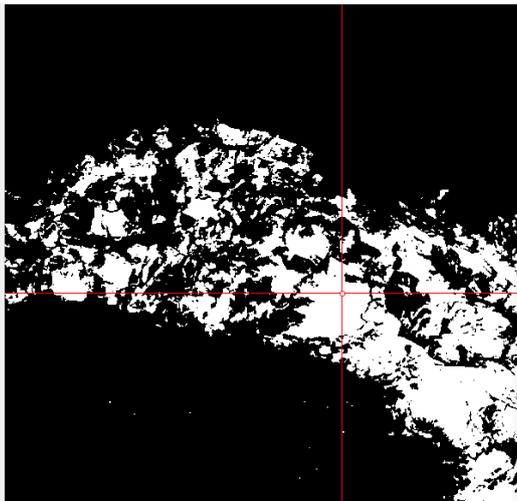


Figura 4.20 – Post MIRBI – área ardida (branco), correspondente a valores superiores a 1.8514 e área não ardida (preto), correspondente a valores inferiores a 1.8514

Para a imagem Post_NBRL<-0.15006 (figura 4.21), foi utilizada a imagem pós-incêndio do índice NBRL, em que para valores de pixels inferiores a -0.15006 , com o valor 1, representava presença de áreas ardidas (branco) e para valores superiores a -0.15006 , o valor 0, ausência de áreas ardidas (preto).

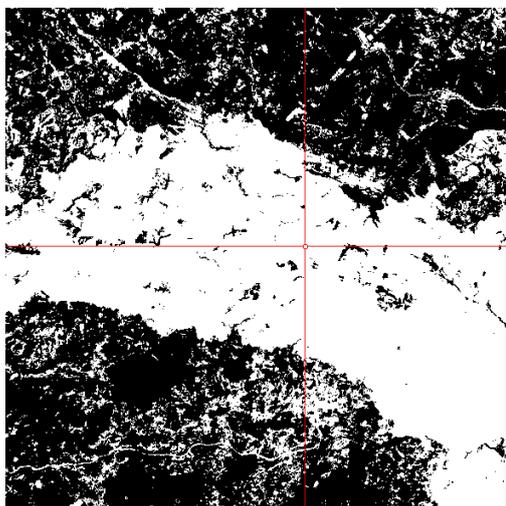


Figura 4.21 - Post NBRL – área ardida (branco), correspondente a valores inferiores a -0.15006 e área não ardida (preto), correspondente a valores superiores a -0.15006

4.3.2. Filtragem

Depois de obtermos o resultado da aplicação dos diferentes grupos espectrais, sendo eles VIS+NIR, VIS+NIR+1SWIR e VIS+NIR+2SWIR, e como resultado mapas binários, sendo que 0 corresponde a área não ardida, e 1 correspondem valores de áreas queimadas, foi necessário usar um filtro de redução de ruído das imagens, ou seja suavizar a informação contida nas imagens. Para isso, foi aplicado um filtro da Mediana sobre as 3 imagens resultantes (Convolutions and morphology > median filter (5x5)), com um kernel de tamanho 5. Este filtro da mediana, é um filtro Passa-Baixa não linear, em que tem como objetivo suavizar a imagem atenuando as altas frequências, que correspondem as transições abruptas, isto é, fronteiras radiométricas e os detalhes. No filtro da mediana a intensidade de cada pixel é substituída pela mediana das intensidades na vizinhança daquele pixel, desta forma as imagens resultantes ficam visualmente mais ligeiras e com menos informação redundante. Podemos observar o resultado da aplicação do filtro nas três imagens da Figura 4.23. Estas imagens diferem entre elas pela percentagem de área ardida, que se nota pelo contraste existente entre brancos e pretos. Estas diferenças vão ser abordadas nas seções seguintes.

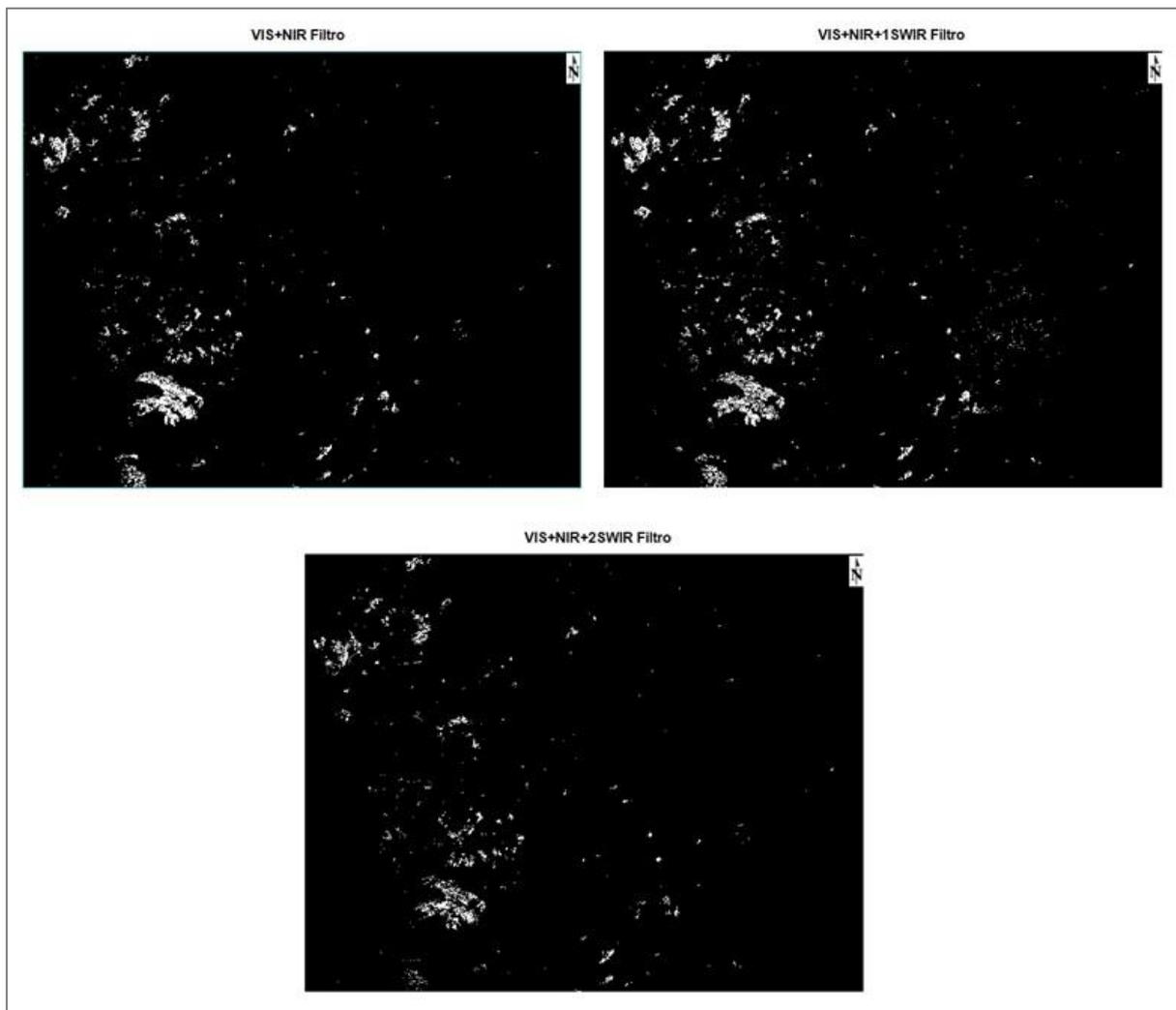


Figura 4.22 – Mapas binários dos 3 grupos espectrais com o filtro aplicado : VIS+NIR_Filtro, VIS+NIR+1SWIR_Filtro e VIS+NIR+2SWIR_Filtro

4.4. Análise espacial – áreas ardidas

Para posterior análise em ambiente vetorial os pixéis com valor 1 foram agrupadas em polígonos e vetorizadas. Em ambiente Arcmap, os polígonos das áreas ardidas para os três grupos, primeiramente foram projetados para o sistema de referência global ETRS89/PT-TM06 e de seguida foram eliminadas as áreas ardidas inferiores a 1 hectare por uma questão de visualização e redundância de dados. Desta forma os mapas resultaram nas seguinte tipologias: a verde - áreas ardidas calculadas para o grupo espectral VIS+NIR, a azul - áreas ardidas calculadas para o grupo espectral VIS+NIR+1SWIR, e a laranja – áreas ardidas para o grupo espectral VIS+NIR+2SWIR. (Figuras 4.23, 4.24 e 4.25)

De seguida, de modo a comparar as diferenças a nível geométrico entre as áreas ardidas calculadas e as áreas ardidas calculadas pelo ICNF (áreas de validação), procedeu-se à interseção espacial entre os dois conjuntos de polígonos. Para a interseção foram utilizadas como *input* as shapefiles das áreas ardidas calculadas e a shapefile das áreas ardidas do ICNF para 2016 e recorreu-se à ferramenta do arcmap *intersect*, no total produziu-se 3 mapas. Os polígonos resultantes da interseção são: *intersect_NIR+VIS*; *intersect_1SWIR* e *intersect_2SWIR*. Os dados da cartografia do *intersect* servirão para o cálculo da matriz de confusão (matéria abordada no capítulo seguinte).

Uma nota importante, no processo de comparação entre os polígonos de área ardida calculados neste projeto e os fornecidos pelo ICNF, foram usados os polígonos do ICNF com a área ardida com data até 25 de agosto de 2016, data da última imagem Sentinel-2.

Nos três mapas de áreas ardidas calculadas são visíveis diferenças em termos de quantidade de área cartografada. Podemos constatar um maior volume de área ardida no mapa do grupo espectral VIS+NIR+1SWIR e em segundo lugar o mapa do grupo espectral VIS+NIR. Estes contrastes são muito visíveis através do mapa de pormenor que está incluído no lado esquerdo dos três mapas (Figuras 4.23, 4.24 e 4.25).

Fazendo referência às considerações do estudo de Bastarrika, *et al.*, (2011) sobre a constituição dos três grupos, temos no grupo VIS+NIR, o pós NDVI e o Diff GEMI que contribuiram para reduzir ligeiramente os problemas com superfícies escuras (sombras e água), no VIS+NIR+1SWIR, as variáveis pós NBRS e pós BAI e no grupo VIS+NIR+2SWIR o pós MIRBI e NBRL foram seleccionadas com o mesmo objetivo, tentando ultrapassar a confusão entre as áreas urbanas e agrícolas.

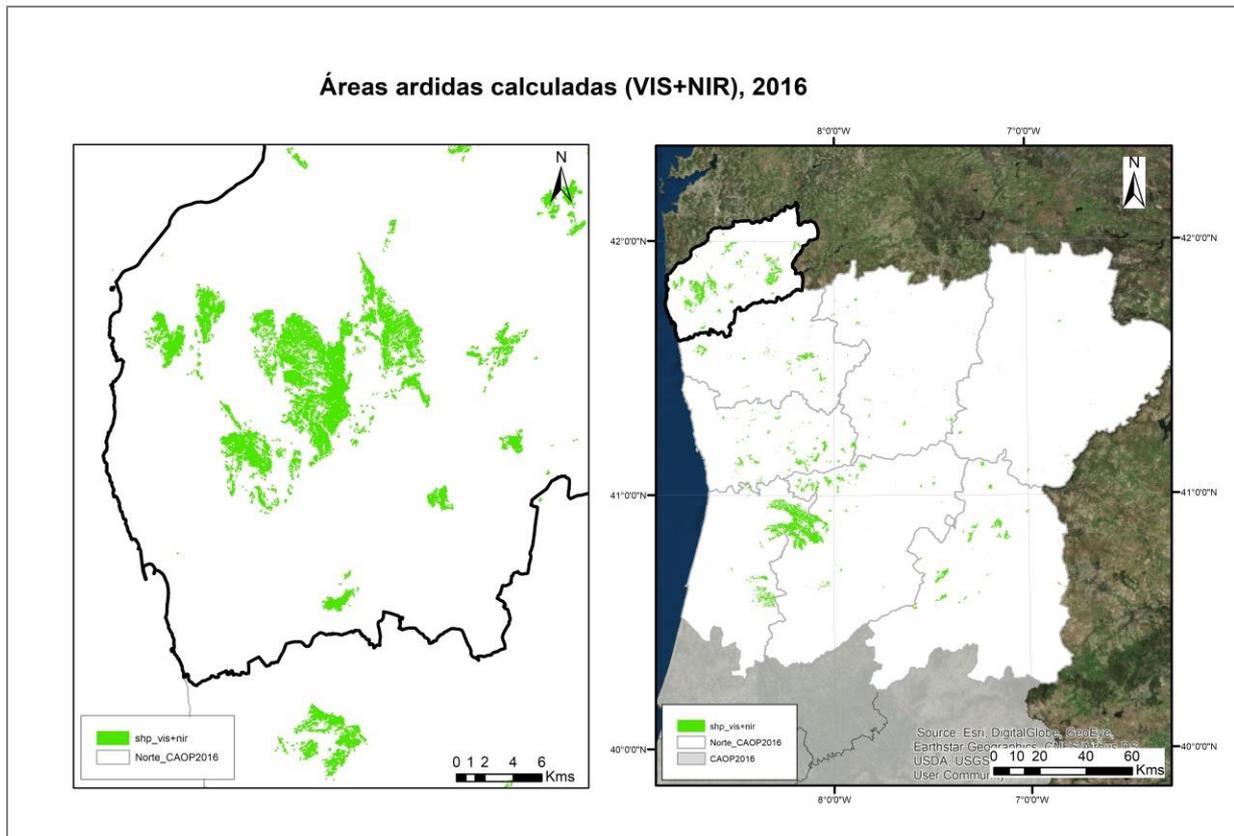


Figura 4.23 – Mapa das áreas ardidas calculadas para o grupo espectral VIS+NIR, em 2016

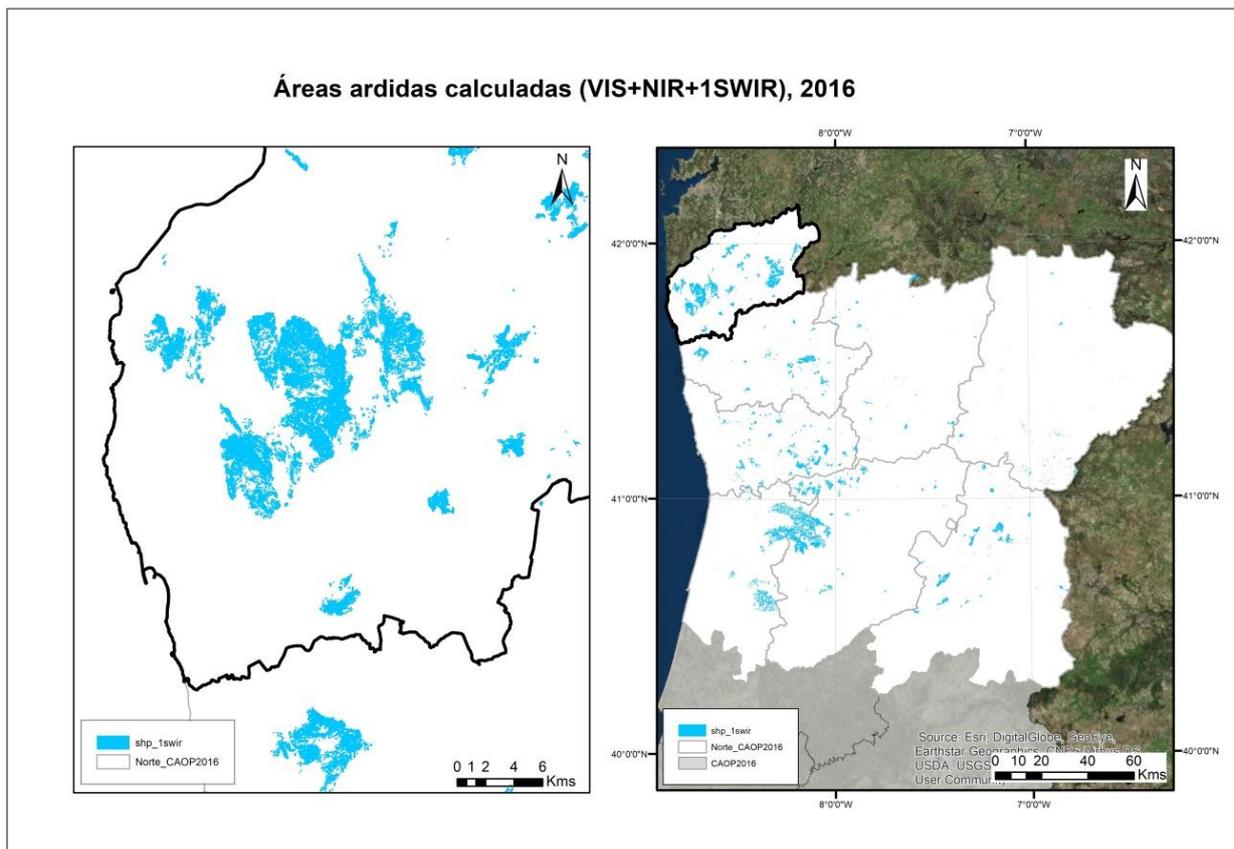


Figura 4.24 - Mapa das áreas ardidas calculadas para o grupo espectral VIS+NIR+1SWIR, em 2016

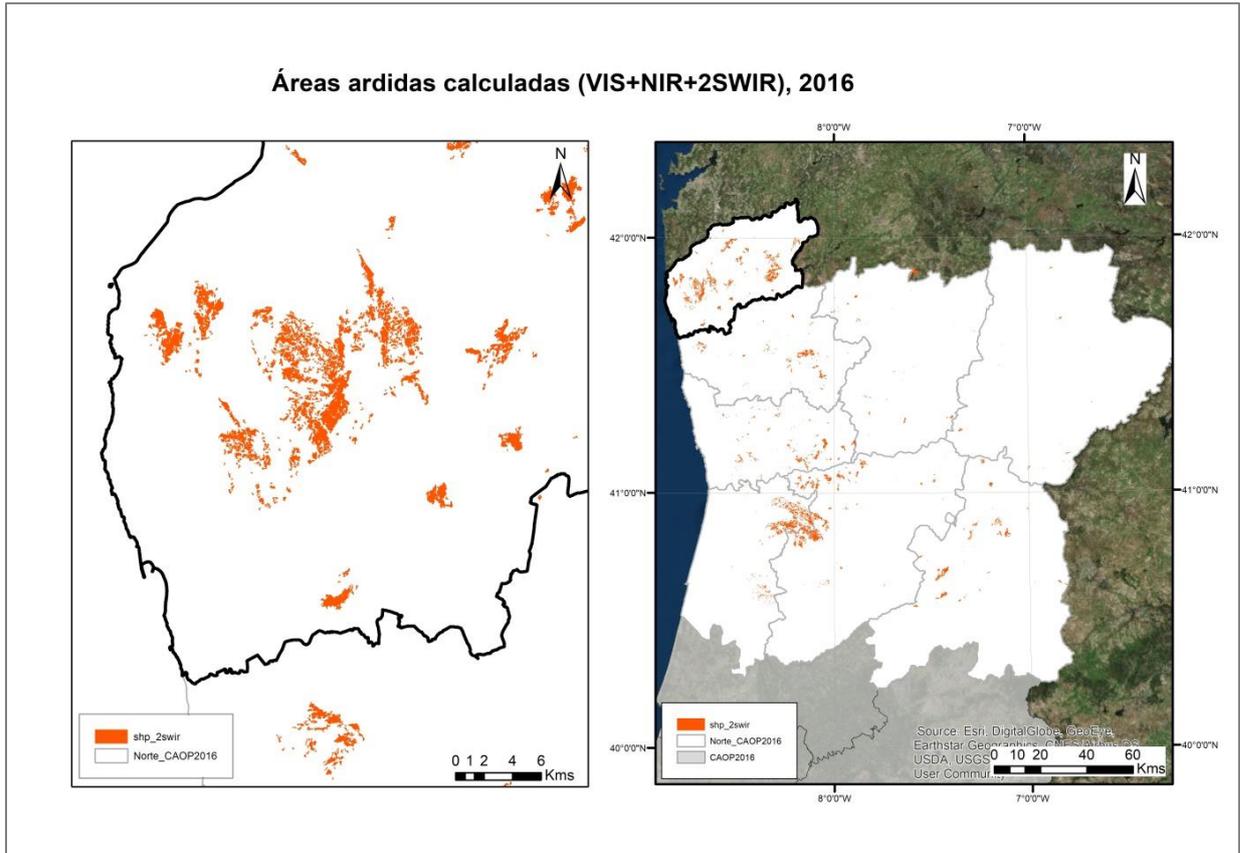


Figura 4.25- Mapa das áreas ardidas calculadas para o grupo espectral VIS+NIR+2SWIR, em 2016

4.5. Matriz de confusão binária

Para a criação da matriz de confusão foram necessários os polígonos das áreas ardidas dos 3 grupos espectrais (VIS+NIR; VIS+NIR+1SWIR e VIS+NIR+2SWIR, descritos na seção anterior), a interseção com os polígonos de área ardida do ICNF e a tabela das áreas ardidas de 2016 do ICNF, que era comum a todos.

De modo a uniformizar os dados, com resultados nas mesmas unidades de medida, na tabela de atributos foram calculadas as áreas para todos os polígonos, em hectares no ‘Calculate Geometry’. Este procedimento permitiu evitar erros primários nos cálculos.

Para efeito de cálculo da matriz de confusão, as áreas dos polígonos foram exportadas para Excel.

Para avaliar a exatidão da classificação da imagem, foi criada uma matriz de confusão para cada um dos grupos espectrais. Na matriz de confusão o ‘Não ardido’ não foi classificado, tendo sido apenas deduzido por negação (complementaridade), em que somente foi classificada a área ardida calculada com o uso do Sentinel-2 ‘Ardido S2’. A matriz de confusão deu-nos os valores para os erros de classificação e precisões. Estes cálculos foram efectuados em ambiente Excel.

A maneira mais direta de avaliar o desempenho da classificação feita baseia-se na análise da matriz de confusão. A tabela 4.5 ilustra a base da matriz de confusão para um problema de duas classes com valores reais e previstos (Batista *et al.*, 2004).

| | Positive Prediction | Negative Prediction |
|----------------|----------------------|---------------------|
| Positive Class | True Positive (TP) | False Negative (FN) |
| Negative Class | False Positive (FP) | True Negative (TN) |

Tabela 4.4 – Estrutura base da matriz de confusão binária

Desta forma, adaptou-se a estrutura desta matriz para o caso em estudo. Neste caso foram consideradas duas classes (por isso o termo binária), as áreas ardidas e as áreas não ardidas. Considerou-se os totais das linhas como *resultados da classificação* a área ardida de acordo com o Sentinel (S2) e área não ardida de acordo com o Sentinel (S2) e totais das colunas como *dados de referência* (‘ground truth’) a área ardida do ICNF e a área não ardida do ICNF. As categorias usadas na análise desta matriz são: falsos positivos, verdadeiros positivos, falsos negativos e verdadeiros negativos (Tabela 4.6).

| | Ardido (ICNF) | Não ardido (ICNF) |
|-----------------|---------------|-------------------|
| Ardido (S2) | TP | FN |
| Não ardido (S2) | FP | TN |

Tabela 4.5 – Matriz de confusão binária adaptada ao caso em estudo (áreas ardidas calculadas em S2 e áreas ardidas do ICNF)

De referir que, segundo Batista *et al.*, (2004), temos:

verdadeiros positivos - % de área ardida corretamente classificada como área ardida;

verdadeiros negativos - % de área não ardida corretamente classificada como área não ardida;

falsos negativos - % de área não ardida mal classificada como pertencente à área ardida;

falsos positivos - % de área ardida mal classificada como pertencente à área não ardida.

A partir dessa matriz, é possível extrair uma série de métricas amplamente utilizadas para medir o desempenho dos sistemas, como a Exatidão, Sensibilidade e Especificidade (Batista *et al.*, 2004).

Segundo Hastie *et al.*, (2009), estas métricas podem ser descritos da seguinte forma: a sensibilidade é a exatidão do produtor da classe positiva (área ardida) enquanto que a especificidade é a exatidão do produtor para a classe negativa (área não ardida). Deste modo, a sensibilidade está relacionada com a capacidade do classificador reconhecer os casos positivos (área ardida) enquanto que a especificidade está relacionada com a capacidade do classificador identificar a classe negativa (não ardido).

Sumarizando, estes parâmetros de avaliação podem ser descritos como:

Exatidão = $(TP+TN) / (TP+TN+FP+FN)$

Sensibilidade = $TP / (TP+FN)$

Especificidade = $TN / (TN+FP)$

Assim, com a matriz de confusão podemos inferir sobre a exatidão da classificação feita. Para isso foi necessário obter resultados dos erros da classificação, os erros de comissão e omissão.

Discriminando os conceitos desses erros e precisões incluídos na matriz de confusão, temos:

- Erro de comissão EC (inclusão) - Pixeis identificados como área ardida que de fato não são área queimada, ou seja, houve um acréscimo no número de pixeis classificados. Refere-se à precisão do utilizador (em %).
Adquire valores altos, por vezes, porque são confundidos com classes de superfície (água, asfalto, sombras topográficas e nuvens, solo exposto, área urbana e vegetação). Casos de confusão são descritos por Escuin *et al.* (2008), Quintano *et al.* (2006) e Bastarrika *et al.* (2011) como sombra, área urbana e água, porém as confusões com solo exposto e vegetação normalmente não são referidas.
- Erro de omissão EO (exclusão) - Pixeis queimados que não foram identificados como tal, ou seja, existe uma omissão/falta de valores nessa classe. Refere-se à precisão do produtor (em %). Pode contribuir para este erro, a sombra provocada pelas copas das árvores que atenuam o sinal radiométrico numa situação pós-incêndio, tornando-os indetetáveis, contribuindo para o aumento do erro de omissão (Giglio *et al.*, 2009). Neste caso de estudo, os valores do erro de omissão também têm outra explicação que veremos mais à frente e que esclarecem os resultados obtidos.
- A precisão do produtor é a probabilidade de um valor de uma determinada classe ter sido classificada corretamente. Corresponde a 1-EO.
- A precisão do utilizador é a probabilidade de um valor previsto numa classe ser realmente dessa classe. A probabilidade é baseada na fração de valores corretamente previstos para o número total de valores previstos de uma classe. Corresponde a 1-EC.

Analisando a matriz de confusão para cada um dos grupos espectrais, com as respectivas áreas calculadas, sabendo que área total da imagem é de 3.150.870 ha, temos três grupos:

1. Grupo VIS+NIR

Neste grupo de domínio espectral vermelho-infravermelho próximo, o erro de omissão é como o nome indica uma classe que é omitida, ou seja, quando uma determinada classe ('Ardido S2') não é classificada como tal. Neste caso, a área ardida foi de 54.073 ha e a área ardida fornecida pelo ICNF de 108.396 ha (tabela 4.6). Quer dizer que está em falta cerca de 50% da área ardida (54,37%). A precisão do produtor foi de aproximadamente 45%, correspondendo à métrica Sensibilidade.

Quanto ao erro de comissão, este indica que pixels foram classificados a mais. Ou seja, o que foi classificado como área ardida e não era realmente área ardida. Para este grupo espectral o erro de comissão foi de 8,5%, com uma precisão de utilizador de mais de 90% e um pequeno erro de comissão comparado com o erro de omissão (tabela 4.7).

A exatidão foi de 97,90% para este grupo, correspondendo à percentagem de classificação correta.

| Área (ha) | Ardido (ICNF) | Não ardido (ICNF) | Total |
|----------------------|---------------|-------------------|--------------|
| Ardido S2 | 49458 | 4615 | 54073 |
| Não ardido S2 | 58938 | 3037859 | 3096797 |
| Total | 108396 | 3042474 | |

Tabela 4.6 – Matriz confusão grupo VIS+NIR, valores em hectares.

| % | PU | PP |
|------------------|-------|-------|
| Ardido S2 | 91,47 | 45,63 |
| | EC | EO |
| | 8,5 | 54,37 |

| | |
|-----------------------|--------|
| Sensibilidade | 45,63% |
| Especificidade | 99,85% |
| Exatidão | 97,90% |

Tabela 4.7 - Erros de classificação e parâmetros de avaliação – PU,PP,EC,EO, Sensibilidade, Especificidade e exatidão para grupo VIS+NIR.

2. Grupo VIS+NIR+1SWIR

Neste grupo de domínio espectral infravermelho próximo e infravermelho médio, a área ardida calculada foi de 64.514 ha e a área ardida fornecida pelo ICNF de 108.396 ha (Tabela 4.8).

O erro de omissão foi de menos de 50% (49,15%) e é como o nome indica uma classe em que pixels foram omitidos, ou seja, quando uma determinada classe, neste caso ‘Ardido S2’ não é classificada como tal. Significando que faltou classificar 49,15% da área ardida. Desta forma a precisão do produtor foi de 50,85%, correspondente à métrica Sensibilidade.

Quanto ao erro de comissão, 14,6% dos pixels foram classificadas a mais, como áreas ardidas. A precisão do utilizador foi de 85,44 %.

A exatidão foi de 98,91% para este grupo, correspondendo à percentagem de classificação correta. (Tabela 4.9)

| Área (ha) | Ardido (ICNF) | Não ardido (ICNF) | Total |
|----------------------|---------------|-------------------|--------------|
| Ardido S2 | 55119 | 9395 | 64514 |
| Não ardido S2 | 53277 | 3033079 | 3086356 |
| Total | 108396 | 3042474 | |

Tabela 4.8 - Matriz confusão grupo VIS+NIR+ISWIR, valores em hectares.

| % | PU | PP |
|-----------------------|--------|-------|
| Ardido S2 | 85,44 | 50,85 |
| | EC | EO |
| | 14,6 | 49,15 |
| Sensibilidade | 50,85% | |
| Especificidade | 99,69% | |
| Exatidão | 98,01% | |

Tabela 4.9 - Erros de classificação e parâmetros de avaliação – PU,PP,EC,EO, Sensibilidade, Especificidade e Exatidão para grupo VIS+NIR+ISWIR.

3. Grupo VIS+NIR+2SWIR

Para o terceiro e último grupo, no domínio do infravermelho próximo e infravermelho longo, os valores apresentados mostram que a área ardida calculada foi de 35.889 ha, ao passo que a área ardida fornecida pelo ICNF foi de 108.396 ha (tabela 4.10).

O erro de omissão foi bastante elevado, em que cerca de 70% dos pixels ficaram por classificar como áreas ardidas - classe ‘Ardido S2’. A precisão do produtor foi aproximadamente de 30%, correspondendo à métrica Sensibilidade.

Com este grupo espectral foram classificadas a mais cerca de 10% dos pixels, representando o erro de comissão, ou seja foram classificados pixels como áreas ardidas de forma errada, pois representavam outras áreas com características radiométricas diferentes. Assim, a precisão de utilizador foi de 90% (Tabela 4.11). A exatidão foi de 97,47% para este grupo, correspondendo à percentagem de classificação correta.

| Área (ha) | Ardido (ICNF) | Não ardido (ICNF) | Total |
|----------------------|---------------|-------------------|--------------|
| Ardido S2 | 32335 | 3554 | 35889 |
| Não ardido S2 | 76060 | 3038921 | 3114981 |
| Total | 108396 | 3042474 | |

Tabela 4.10 - Matriz confusão grupo VIS+NIR+2SWIR, valores em hectares.

| % | PU | PP |
|------------------|-------|-------|
| Ardido S2 | 90,10 | 29,83 |
| | EC | EO |
| | 9,9 | 70,17 |

| | |
|-----------------------|--------|
| Sensibilidade | 29,83% |
| Especificidade | 99,88% |
| Exatidão | 97,47% |

Tabela 4.11 - Erros de classificação e parâmetros de avaliação – PU,PP,EC,EO, Sensibilidade, Especificidade e exatidão para grupo VIS+NIR+2SWIR.

Com estes valores apresentados pelos três grupos, podemos concluir que:

- ✓ O grupo VIS+NIR apresenta o menor valor de erro de comissão e precisão de utilizador e está em 2º lugar com a área ardida calculada, com 54.073 ha.
- ✓ O grupo VIS+NIR+1SWIR tem o melhor valor para erro de omissão e precisão de produtor (49%), e o valor mais baixo de Precisão de utilizador. Apresenta a maior área ardida calculada (S2) de 64.514 ha. Tem a melhor percentagem de classificação correta (exatidão) com 98.01%
- ✓ O grupo VIS+NIR+2SWIR tem o valor mais baixo de hectares ardidos, com 35.889 ha calculados e o valor mais alto de erro de omissão e precisão de produtor (70%). Tem também o valor mais baixo de % de classificação correta, com 97.47% (exatidão).

4.6. Discussão

Os valores do erro de omissão tão elevados, como o caso do grupo espectral VIS+NIR+2SWIR, podem ser explicados pela existência das chamadas ‘zonas falsas’ nas áreas ardidas do ICNF. Podemos ver pelos exemplos que se seguem que a delimitação das áreas ardidas do ICNF não é muito rigorosa, havendo zonas vastas que foram classificadas como áreas ardidas, mas que na realidade não o são, sendo uma das causas para os erros de omissão serem tão elevados, pois foram pixéis que estavam caracterizados como queimados, mas que na classificação não foram incluídos nessa classe, mas sim na classe ‘Não ardido’. É importante referir aqui a grande disparidade de áreas queimadas obtidas com os três critérios, em que observámos que nestes critérios 54.073 ha obtidos com o 1º critério, 64.514 ha com o 2º critério e 35.889 ha com o 3º critério, diferenciando-se muito dos 108.396 ha registados pelo ICNF. É de reforçar também, que outra possível causa, não a principal defendida neste projeto, é que os

limiares utilizados foram os utilizados por Bastarrika, *et al.*, (2011) para outro sensor, o Landsat, com resolução espacial e resolução espectral diferentes, pode também ter contribuído para os valores de erros existentes.

De seguida são apresentados 4 exemplos que explicam a discrepância dos dados do ICNF com os calculados neste trabalho e que evidenciam a exatidão de cada grupo espectral.

Podemos ver exemplos de cartografia dos três grupos espectrais (VIS+NIR; VIS+NIR+1SWIR e VIS+NIR+2SWIR) com sobreposição do layer das áreas ardidas do ICNF (a vermelho) e o índice NDVI e inclusive a imagem de satélite de 28-08-2016 do Sentinel 2. De notar que, os exemplos se localizam geograficamente no mesmo local de forma a ser possível ver as diferenças. Importa também referir que as duas imagens contêm dois pormenores cada uma.

Nas primeiras duas figuras (Figura 4.26) estão apresentadas duas imagens de 28-08-2016 do Sentinel-2. Nas imagens podemos ver também dois pormenores de forma a ser mais visível os detalhes, onde segundo o ICNF estão classificadas como área ardida (linha a vermelho), mas observando a imagem na realidade não pertence a essa classe. Nos pormenores da primeira figura vemos uma área sinalizada como ardida pelo ICNF que na realidade corresponde a uma área de solo nú e no segundo pormenor uma delimitação pela parte do ICNF a abranger áreas de floresta densa como mostra a imagem de satélite, a verde escuro (Figura 4.26). É possível notar também que há áreas ardidas identificadas na imagem de satélite (tons a roxo) que não estão delimitadas pelas áreas do ICNF e a presença de nuvens na primeira imagem, que condiciona a cartografia efectuada, como vai ser mostrado nos exemplos seguintes.

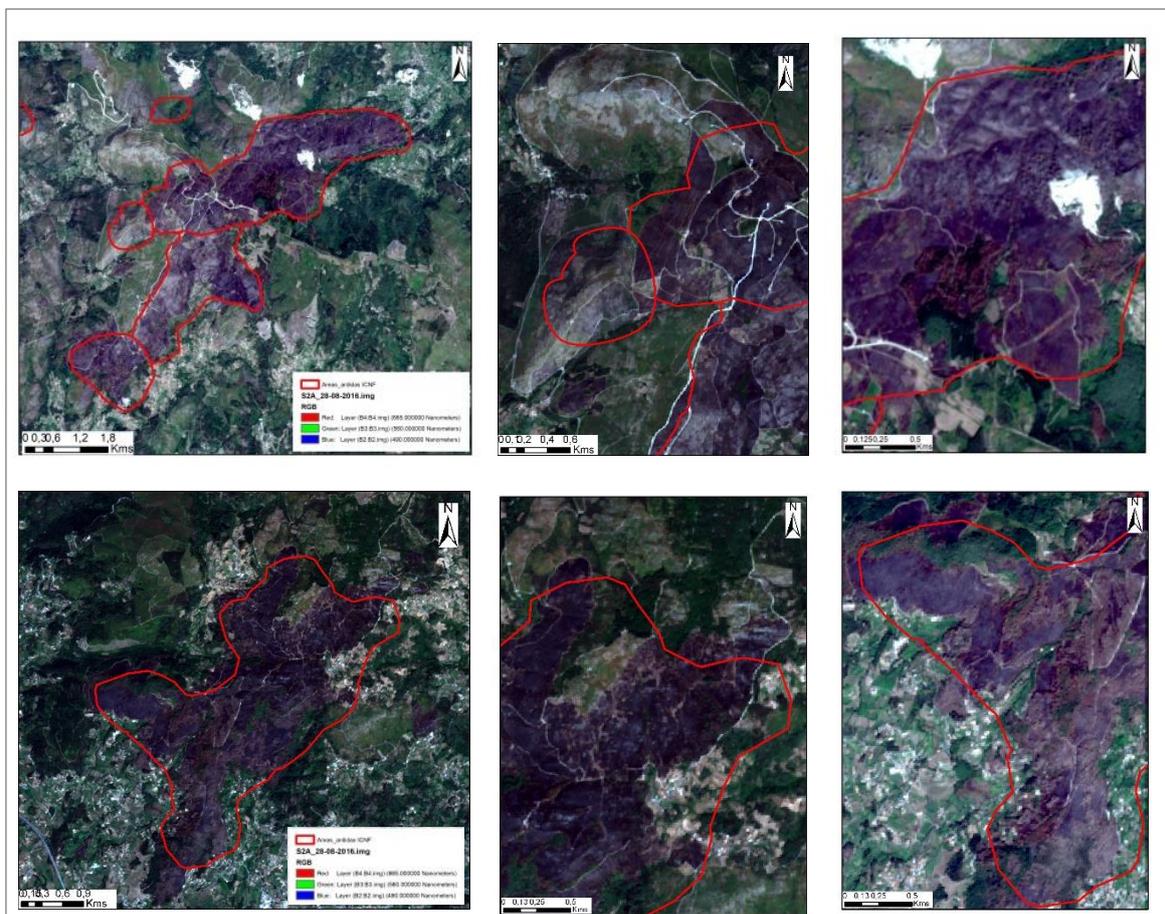


Figura 4.26 – 2 Imagens Sentinel-2 de 28-08-2016 com sobreposição das áreas ardidas do ICNF e pormenores da imagem no lado direito.

No exemplo seguinte (Figura 4.27) são apresentadas as mesmas áreas ardidas calculadas pelo ICNF a vermelho, com a sobreposição das áreas ardidas calculadas com grupo espectral VIS+NIR (a verde) e o NDVI referente à data pós-incêndio.

Desta forma, podemos comprovar com os mesmos pormenores do exemplo anterior, que as áreas calculadas com este grupo espectral não coincidem exactamente com as áreas ardidas do ICNF. Podemos ver nos pormenores da primeira imagem áreas que não foram cartografadas como ardidas (a verde) mas que estão delimitadas pelo ICNF. A interpretação através do índice NDVI também nos dá uma noção das áreas ardidas (escuro), sobressaindo no segundo exemplo uma delimitação mal feita da parte do ICNF onde várias zonas com vegetação (branco) e não cartografadas estão delimitadas a vermelho como área ardida pelo ICNF.

Podemos ver que houve uma mancha escura na imagem do segundo pormenor que não foi identificada por este grupo espectral devido à existência nessa área de nuvens, embora o ICNF a tenha identificado. Nesta imagem sobressai a área circular identificada como ardida pelo ICNF, mas que corresponde a uma área não ardida.

Avançando para a segunda imagem podemos tirar as mesmas conclusões que a primeira imagem, em que áreas não ardidas estão dentro da delimitação efectuada pelo ICNF. É notória a exagerada classificação de área ardida pelo ICNF nesta imagem, onde existe muita área não ardida que foi classificada como ardida, comprovando-se pelos valores do NDVI e pela cartografia do grupo espectral VIS+NIR que tem uma exatidão de 97.90%.

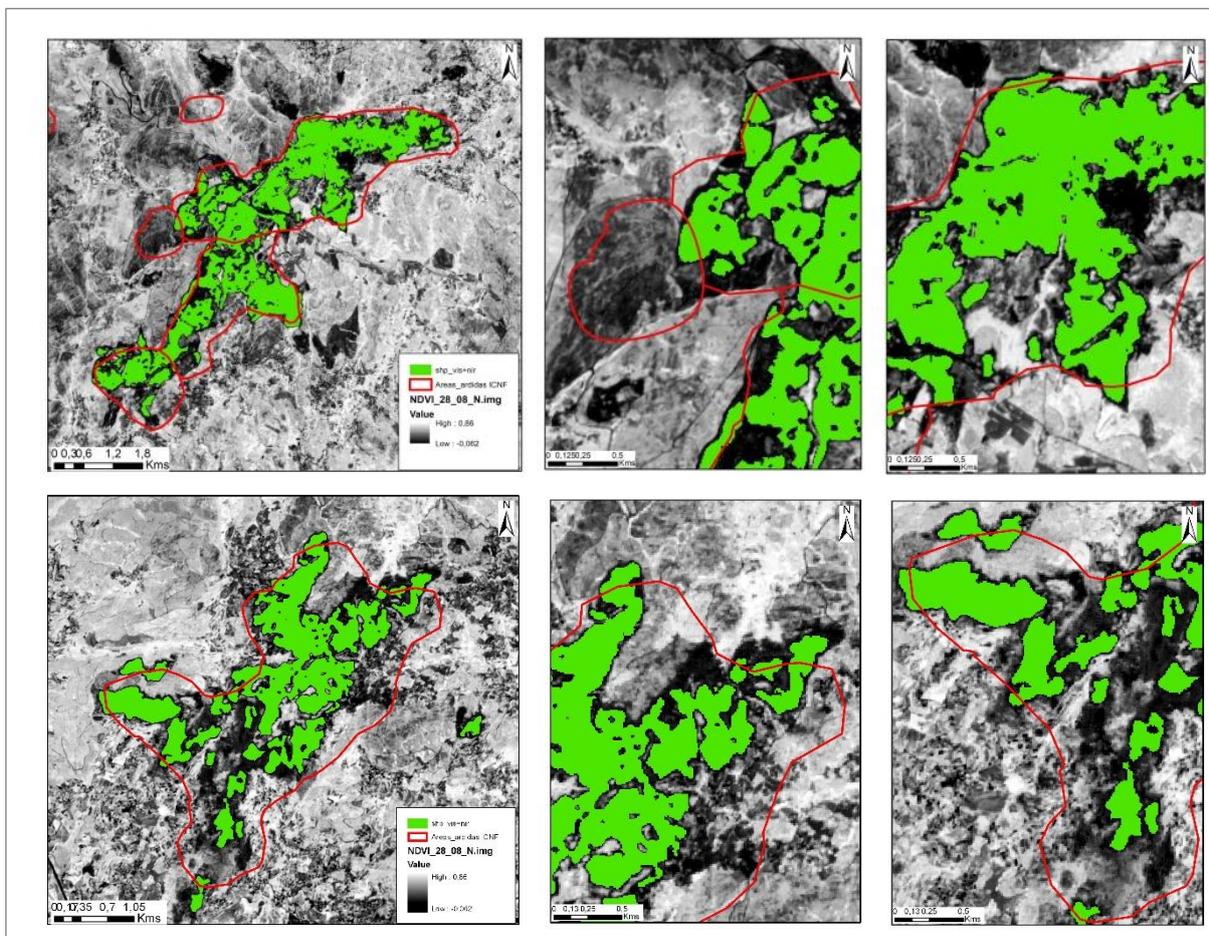


Figura 4.27– 2 Imagens com pormenores dos índices NDVI de 28-08-2016, com sobreposição das áreas ardidas do ICNF e áreas ardidas calculadas do grupo VIS+NIR.

Seguindo para o terceiro exemplo (Figura 4.28) temos imagens pertencentes a duas regiões, com a cartografia do grupo espectral VIS+NIR+1SWIR, grupo este que tem a melhor exatidão de 98,01%, comparativamente aos outros dois grupos.

À semelhança do exemplo anterior, têm como base o índice NDVI referente à data pós-incêndio e podemos ver claramente a partir dos pormenores que existem áreas que não foram cartografadas como ardidas (a azul) mas que estão delimitadas pelo ICNF. Havendo uma cartografia excessiva pela parte do ICNF, muito visível na segunda imagem, onde uma grande parte de vegetação (branco) foi delimitada como ardida.

Podemos ver também que devido à existência de nuvens na primeira imagem, não foi cartografada pelo grupo espectral, apenas de estar como ardida pelo ICNF.

À semelhança do primeiro exemplo vemos na primeira imagem que existe uma zona circular correspondente a solo nú que foi identificada como ardida pelo ICNF, mas que o grupo espectral não a identificou. Este grupo espectral foi o que apresentou uma melhor percentagem de classificação de área ardida, e um erro de omissão de 49,15%, o mais baixo dos três grupos. Desta forma, podemos concluir que este valor do erro se deve principalmente a esta excessiva classificação de área ardida calculada pelo ICNF.

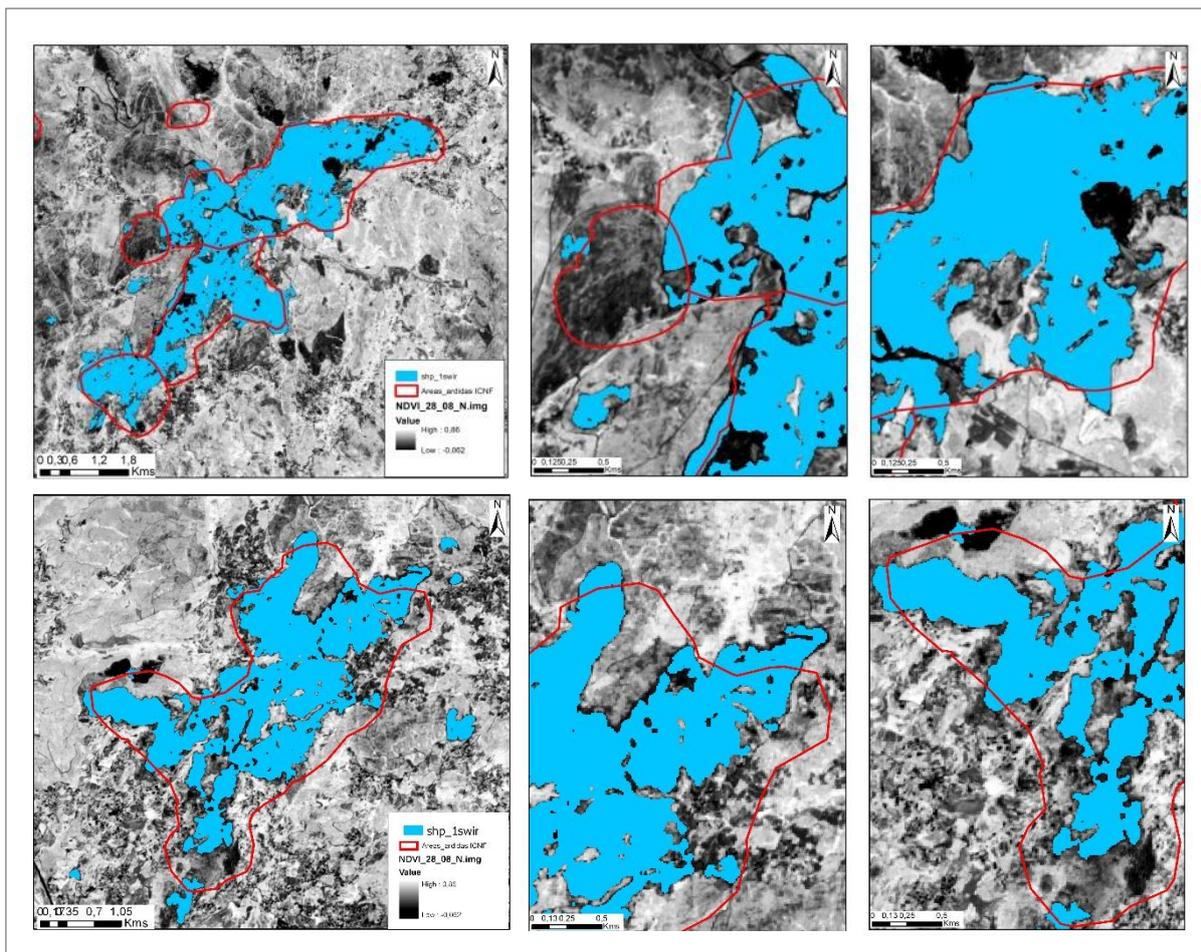


Figura 4.28– 2 Imagens com pormenores dos índices NDVI de 28-08-2016, com sobreposição das áreas ardidas do ICNF e áreas ardidas calculadas do grupo VIS+NIR+1SWIR

No quarto e último exemplo (Figura 4.29) estão apresentadas duas imagens com os índices espectrais VIS+NIR+2SWIR, o grupo que teve a pior exatidão (97,47%).

Podemos ver comparativamente aos outros dois exemplos anteriores dos grupos espectrais que este tem uma menor área ardida cartografada (laranja). Mesmo assim, é possível observar, através dos valores do NDVI que há uma cartografia excessiva pela parte do ICNF, onde áreas com vegetação foram cartografadas como ardidas. É possível também perceber que este grupo espectral tem muitas áreas classificadas como não-ardidas que comparativamente aos outros índices e aos valores do NDVI correspondem a áreas-ardidas, criando por isso um valor de erro de omissão tão elevado (70,17%).

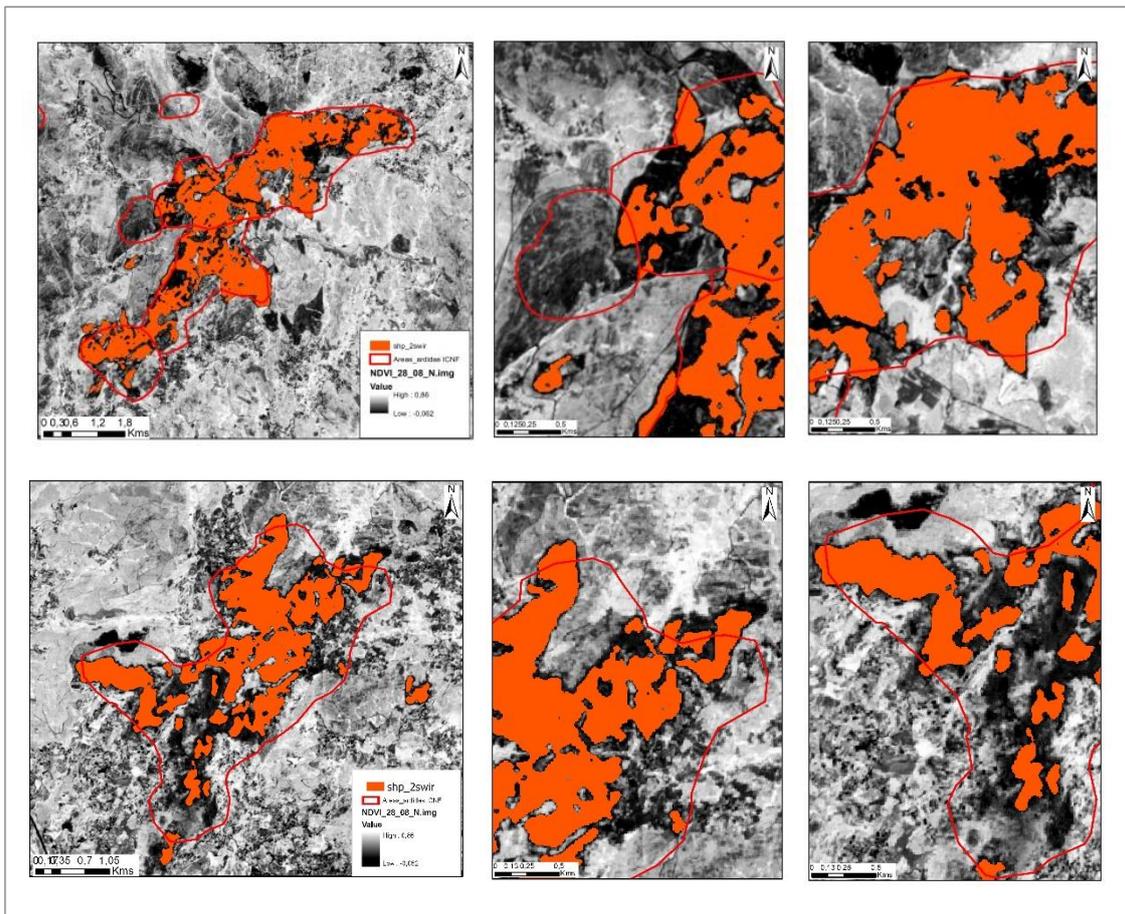


Figura 4.29– 2 Imagens com pormenores dos índices NDVI de 28-08-2016, com sobreposição das áreas ardidas do ICNF e áreas ardidas calculadas do grupo VIS+NIR+2SWIR

Por fim, no que se refere a ocorrências de incêndios, em Portugal no ano de 2016, o número de ocorrências de incêndio foi de 18.442 e a área ardida para Portugal Continental de 159.741 hectares. Na figura 5.1, podemos observar um mapa de sobreposição de densidade dos focos com as áreas ardidas calculadas com o grupo espectral que obteve a melhor percentagem de exatidão (VIS+NIR+1SWIR), em que podemos observar que existiu uma grande concentração de focos de incêndio que mais rapidamente foram extintos, não dando origem a incêndios, contrariamente a outros, especialmente o incêndio no concelho de Arouca que foi mais difícil de controlar, devido a vários fatores, devido à pouca acessibilidade das vias de comunicação, às condições meteorológicas, ao declive e altitude do terreno, à presença de vegetação densa (eucaliptos e pinheiros) e por isso se tenha tornado mais difícil o combate, havendo uma grande propagação. Podemos concluir seguindo a opinião de Pereira, (2017) que um pequeno número de grandes incêndios costuma ser responsável por grande parte da área

queimada, em que a severidade de uma época depende do número de grandes fogos (associados à ocorrência de condições meteorológicas particularmente adversas) e não do número total de fogos.

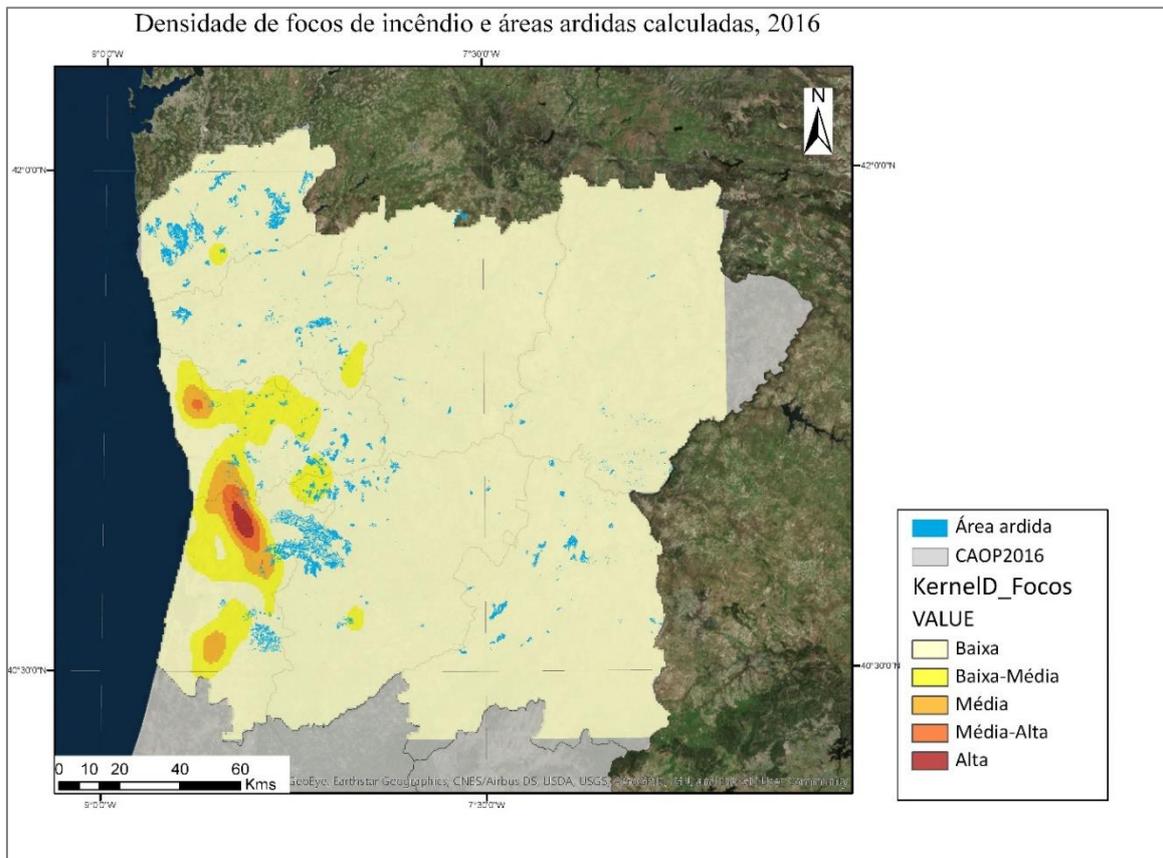


Figura 5.1 – Mapa de densidade de focos de incêndio e áreas ardidas em 2016

5. Conclusão e perspetivas futuras

A metodologia usada para a identificação das áreas ardidas propostas por Bastarrika, *et al.*, (2011), adequou-se ao objetivo deste trabalho, o de cartografar áreas ardidas em países com clima temperado, como o de Portugal. Os 8 índices de áreas ardidas utilizados permitiram, no seu conjunto identificar as áreas queimadas. Os critérios de classificação propostos pelo autor deram-nos a cartografia final de áreas ardidas com diferentes exatidões. Estes critérios baseados na definição de limiares, permitiram delinear as áreas queimadas nos diferentes índices.

Desta forma, o uso de índices espectrais mostrou ser uma ferramenta muito útil para a deteção de áreas ardidas. A metodologia proposta neste trabalho possibilitou a comparação de duas imagens de satélite com diferentes datas e a obtenção de informações através de ferramentas de deteção remota e análise espacial. A partir das observações e análise das imagens, foi possível, apesar de algumas semelhanças e diferenças entre os índices, chegar à cartografia de áreas ardidas com uma boa classificação. Os índices que melhor se ajustaram a esta cartografia foram o NDVI, NBR5 e NBR7 com o melhor valor de variação do índice M e o melhor grupo espectral com maior percentagem de classificação correta incluiu-se na região do Infravermelho próximo e médio (VIS+NIR+1SWIR) com 98,01%, conduzindo a uma conclusão importante, que para a discriminação de terra queimada as melhores precisões são obtidas no domínio espectral infravermelho-próximo e médio (NIR-SWIR).

As áreas ardidas do ICNF de 2016, que funcionaram como áreas de validação neste trabalho, foram obtidas com recurso a imagens do sensor MODIS, com uma resolução de 250 metros, resolução mais elevada comparativamente às imagens utilizadas neste trabalho, do satélite Sentinel-2 com uma resolução de 10 metros. Estas áreas mostraram-se pouco adequadas neste estudo, com lacunas verificadas pela sua excessiva delimitação de áreas ardidas. Assim concluiu-se que o uso de imagens multiespectrais de maior resolução, como as do Sentinel-2, é muito eficaz na cartografia de áreas ardidas para Portugal.

Perspetivas Futuras:

- Nível de regeneração dos terrenos pós incêndio - Delimitação das áreas que apresentaram mudança no padrão de uso e cobertura do solo através de índices de vegetação como o NDVI, nos últimos 20/30 anos.
- Cartografia das áreas ardidas, que explore as sinergias das imagens SAR e óticas adquiridas pelos satélites S-1 e S-2. Em que as imagens SAR do Sentinel 1 neste trabalho serviriam para ‘validar’ as áreas ardidas produzidas pelo S-2.
- Comparar a nível estatístico se as áreas ardidas são influenciadas de alguma forma pela área de floresta que é limpa a partir de dados fornecidos pelas CCDRS. Desta forma podemos saber se a maior parte dos incêndios se localizam ou não em áreas por limpar (áreas de mato, floresta).

Referências Bibliográficas

- Barbosa, P. M., Grégoire, J. M., & Pereira, J. M. C. (1999). An algorithm for extracting burned areas from time series of AVHRR GAC data applied at a continental scale. *Remote Sensing of Environment*, 69(3), 253-263.
- Bastarrika, A., Chuvieco, E., & Martín, M. P. (2011). Mapping burned areas from Landsat TM/ETM+ data with a two-phase algorithm: Balancing omission and commission errors. *Remote Sensing of Environment*, 115(4), 1003-1012.
- Batista, G. E., Prati, R. C., & Monard, M. C. (2004). A study of the behavior of several methods for balancing machine learning training data. *ACM Sigkdd Explorations Newsletter*, 6(1), 20-29.
- Carvalho, A., Flannigan, M. D., Logan, K. A., Gowman, L. M., Miranda, A. I., & Borrego, C. (2010). The impact of spatial resolution on area burned and fire occurrence projections in Portugal under climate change. *Climatic Change*, 98(1), 177-197.
- Catalão, J. (2012) Apontamentos de Princípios e Aplicações da Detecção Remota. Texto não publicado, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Chipman, J. W., Kiefer, R. W., & Lillesand, T. M. (2004). *Remote sensing and image interpretation*. New York. 000 pp.
- Chuvieco, E., Giglio, L., & Justice, C. (2008). Global characterization of fire activity: toward defining fire regimes from Earth observation data. *Global Change Biology*, 14(7), 1488-1502.
- Chuvieco, E., Martin, M. P., & Palacios, A. (2002). Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination. *International Journal of Remote Sensing*, 23(23), 5103-5110.
- Chuvieco, E., Riaño, D., Danson, F. M., & Martin, P. (2006). Use of a radiative transfer model to simulate the postfire spectral response to burn severity. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 111(G4).
- Cihlar, J., Xiao, Q., Chen, J., Beaubien, J., Fung, K., & Latifovic, R. (1998). Classification by progressive generalization: A new automated methodology for remote sensing multichannel data. *International Journal of Remote Sensing*
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., ... & Meygret, A. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25-36.
- ESA (2017) “Processing Levels”, <https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/processing-levels> , acedido em setembro de 2017.
- ESA (2017) “Programa Copernicus”, http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Overview4 , acedido em setembro de 2017.

- ESA (2017) “The spatial resolution of Sentinel-2”, <https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/spatial> , acessido em setembro de 2017.
- Escuin, S., Navarro, R., & Fernandez, P. (2008). Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from LANDSAT TM/ETM images. *International Journal of Remote Sensing*, 29(4), 1053-1073.
- Foody, G. M. (2002). Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote sensing of environment*, 80(1), 185-201.
- Garcia, C. V., Woodard, P. M., Titus, S. J., Adamowicz, W. L., & Lee, B. S. (1995). A logit model for predicting the daily occurrence of human caused forest-fires. *International Journal of Wildland Fire*, 5(2), 101-111.
- Giglio, L., Csiszar, I., & Justice, C. O. (2006). Global distribution and seasonality of active fires as observed with the Terra and Aqua Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sensors. *Journal of geophysical research: Biogeosciences*, 111(G2).
- Giglio, L., Descloitres, J., Justice, C. O., & Kaufman, Y. J. (2003). An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS. *Remote sensing of environment*, 87(2), 273-282.
- Giglio, L., Loboda, T., Roy, D. P., Quayle, B., & Justice, C. O. (2009). An active-fire based burned area mapping algorithm for the MODIS sensor. *Remote Sensing of Environment*, 113(2), 408-420.
- Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). Overview of supervised learning. In *The elements of statistical learning* (pp. 9-41). Springer New York.
- ICNF (2017) “Informação Geográfica - Cartografia nacional de áreas ardidas”, <http://www.icnf.pt/portal/florestas/dfci/inc/info-geo> , acessido em julho e agosto de 2017.
- ICNF (2017) “Informação sobre áreas ardidas e ocorrências de 2001 a 2017”, <http://www.icnf.pt/portal/florestas/dfci/relat/rel-if> , acessido em julho e agosto de 2017.
- ICNF (2017) “Relatório provisório de incêndio florestais de 2016”, <http://www.icnf.pt/portal/florestas/dfci/Resource/doc/rel/2016/9-rel-prov-1jan-15out-2016.pdf> , acessido em agosto de 2017.
- Justice, C. O., Giglio, L., Korontzi, S., Owens, J., Morisette, J. T., Roy, D., ... & Kaufman, Y. (2002). The MODIS fire products. *Remote Sensing of Environment*, 83(1), 244-262.
- Kaufman, Y. J., Tanré, D., Remer, L. A., Vermote, E. F., Chu, A., & Holben, B. N. (1997). Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D14), 17051-17067.
- Leone, V., Koutsias, N., Martínez, J., Vega-García, C., Allgöwer, B., & Lovreglio, R. (2003). The human factor in fire danger assessment. In *Wildland Fire Danger Estimation and Mapping: The Role of Remote Sensing Data* (pp. 143-196).
- Lu, D., & Weng, Q. (2007). A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *International journal of Remote sensing*, 28(5), 823-870.

Malenovsky, Z., Rott, H., Cihlar, J., Schaepman, M. E., García-Santos, G., Fernandes, R., & Berger, M. (2012). Sentinels for science: Potential of Sentinel-1,-2, and-3 missions for scientific observations of ocean, cryosphere, and land. *Remote Sensing of environment*, 120, 91-101.

Pereira, J. (2017) *Ecologia e Gestão do fogo*. Texto não publicado, Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa

Pereira, J. M. C., Carreiras, J. M. B., Silva, J. M., & Vasconcelos, M. J. (2006). Alguns conceitos básicos sobre os fogos rurais em Portugal. *Incêndios florestais em Portugal: caracterização, impactes e prevenção*, 133-161.

Pereira, J. M., Sá, A. C., Sousa, A. M., Silva, J. M., Santos, T. N., & Carreiras, J. M. (1999). Spectral characterisation and discrimination of burnt areas. In *Remote sensing of large wildfires* (pp. 123-138). Springer Berlin Heidelberg.

Trigg, S., & Flasse, S. (2001). An evaluation of different bi-spectral spaces for discriminating burned shrub-savannah. *International Journal of Remote Sensing*, 22(13), 2641-2647.