



INSTITUTO POLITÉCNICO
DE VIANA DO CASTELO

Pedro Alvarinhas Ferreira

Cartografia da *Hakea decurrens* com recurso a VANT, imagens satélite e pacote biomod2

Mestrado em Engenharia do Território e do Ambiente

Trabalho efetuado sob a orientação do

Professor Doutor Joaquim Mamede Alonso

Professor Doutor Cláudio Alexandre da Costa Araújo Paredes

Novembro de 2023

As doutrinas expressas neste trabalho são
da exclusiva responsabilidade do autor.

"A pujança da natureza compreendida na sua diversidade biológica e no ritmo de vida".

Gonçalo Ribeiro Telles

“Nature is the system of laws established by the Creator for the existence of things and for the succession of creatures. Nature is not a thing, because this thing would be everything”.

Georges-Louis Leclerc, Comte de Buffon

ÍNDICE

RESUMO	v
ABSTRACT	vi
AGRADECIMENTOS	vii
LISTA DE ABREVIATURAS.....	viii
ÍNDICE DE QUADROS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
1. Introdução	1
2. A invasão biológica e a deteção remota na produção de cartografia de <i>Hakea decurrens</i>	3
2.1. Espécies invasoras	3
2.1.1. Enquadramento legal europeu e nacional	4
2.1.2. Processo de invasão biológica	5
2.2. As invasões biológicas por <i>Hakea decurrens</i> , biologia da espécie	6
2.2.1. Impactos, plano de gestão e técnicas de controlo	9
2.3. Deteção remota	14
2.3.1. Deteção remota na cartografia e monitorização de espécies invasoras	14
2.3.2. Sentinel-2A	17
2.3.3. VANT e o seu uso para a deteção de invasoras	18
2.4. Modelo de distribuição de espécie	19
3. Metodologia.....	21
3.1. Apresentação e descrição da informação base	22
3.1.1. Produção do ortofotomapa e levantamento das áreas de treino.....	23
3.1.2. Recolha de imagens Sentinel-2A.....	25
3.2. Harmonização de imagens Sentinel-2A	25
3.3. biomod2	26
4. Resultados.....	28

4.1. Área de estudo	28
4.2. Análise da importância das variáveis	30
4.3.1 Análise da importância das variáveis temporais.....	32
4.4. Avaliação estatística e potencial da distribuição da <i>Hakea Decurrens</i>	33
5. Conclusão	35
6. Referência Bibliográficas	37
Anexos.....	46

RESUMO

A propagação de espécies invasoras tem o potencial de prejudicar adversamente a biodiversidade local e comprometer a qualidade serviços prestados pelo ecossistema. A *Hakea decurrens* é um arbusto ou árvore de pequeno porte pertencente à família *Proteaceae* com notável capacidade invasiva. Esta espécie pode ainda causar impactos socioeconómicos no turismo, recreação, património arquitetónico e arqueológico, na saúde humana e impactos associados ao aumento do risco de incêndio. Através da georreferenciação de áreas invadidas (áreas de presença) com recurso de um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) e imagens multiespectrais do satélite Sentinel-2 foi possível aplicar uma metodologia com o intuito de detetar de forma semi-automática espaços invadidos no município de Vila Nova de Cerveira. As imagens multiespectrais recolhidas compreendem diferentes datas entre os dias 20 de agosto de 2022 a 15 de março 2023 tendo sido posteriormente processadas pelo algoritmo de super resolução DSen2. A informação recolhida (informação espectral e áreas de presença) foi processada através da ferramenta biomod2 disponível no software R com o propósito para identificar espaços com comportamento espectral idêntico aos das áreas de treino. Para cada data, foram processadas 12 variáveis espectrais usando 3 classificadores diferentes: Floresta Aleatória (FA), Rede Neural Artificial (RNA), MAXENT.Phillips. Os resultados foram avaliados por três modelos estatísticos: Habilidade Estatística Verdadeira (TSS), Kappa de Cohen (KAPPA) e Característica de Operação do Recetor (ROC). Os resultados mais favoráveis foram obtidos ao analisar o índice estatístico ROC com a utilização do classificador FA, apresentando um valor de 0,974. As classificações demonstraram capacidade de detetar a presença da *Hakea decurrens* em conformidade com a situação presente na área de estudo. Este procedimento possibilitou representar de forma espacialmente explícita espaços invadidos por esta espécie, fornecendo informação vital para o controle e gestão de espaços invadidos.

Palavras-chaves: Invasão biológica, Espécies de Plantas invasoras, *Hakea decurrens*, Sentinel2, biomod2, classificação supervisionada.

ABSTRACT

The spread of invasive species has the potential to adversely affect local biodiversity and compromise the quality of services provided by the ecosystem. *Hakea decurrens* is a small shrub or tree belonging to the Proteaceae family with remarkable invasive capacity. This species can also cause socio-economic impacts on tourism, recreation, architectural and archaeological heritage, human health and impacts associated with increased fire risk. By georeferencing invaded areas (areas of presence) using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and multispectral images from the Sentinel-2 satellite, it was possible to apply a methodology with the aim of semi-automatically detecting invaded areas in the municipality of Vila Nova de Cerveira. The multispectral images collected cover different dates between August 20, 2022 and March 15, 2023 and were then processed using the DSen2 super resolution algorithm. The information collected (spectral information and areas of presence) was processed using the biomod2 tool available in the R software in order to identify spaces with identical spectral behavior to the training areas. For each date, 12 spectral variables were processed using 3 different classifiers: Random Forest (RF), Artificial Neural Network (ANN), MAXENT.Phillips. The results were evaluated using three statistical models: True Skill Analysis (TSS), Cohen's Kappa (KAPPA) and Receiver operating characteristic (ROC). The most favorable results were obtained when analyzing the ROC statistical index using the RF classifier, with a value of 0.974. The classifications were able to detect the presence of *Hakea decurrens* in accordance with the situation in the study area. This procedure made it possible to represent spaces invaded by this species in a spatially explicit way, providing vital information for the control and management of invaded spaces.

Keywords: Biological invasion, Invasive species plants, *Hakea decurrens*, Sentinel2, biomod2, supervised classification.

AGRADECIMENTOS

A elaboração desta dissertação não teria sido possível sem a cooperação e dedicação de diversas pessoas. Gostaria, por este facto, de expressar toda a minha gratidão e apreço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para que esta tarefa se tornasse uma realidade. A todos quero manifestar os meus sinceros agradecimentos.

Em primeiro gostaria de agradecer ao Professor Doutor Joaquim Mamede Alonso, que orientou este presente trabalho, pela sua disponibilidade, transmitindo todo o seu conhecimento.

Ao coorientador Professor Doutor Cláudio Paredes, pela excelente visita de campo, conhecimento da espécie em estudo e fornecimento de dados.

Ao Eng Nuno Mouta, pela sua amizade, paciência, incentivo e disponibilidade que demonstrou ao longo dos anos desde a licenciatura até ao mestrado, sendo fundamental para a concretização desta etapa.

Ao Dr Renato Silva, ao Eng Hélder Amorim, ao Eng Diogo Gonçalves e ao Dr Fernando Portela pela preciosa ajuda e companhia mesmo nos momentos mais complicados.

À Escola Superior Agrária de Ponte de Lima do Instituto Politécnico de Viana do Castelo e aos docentes que lecionaram o mestrado, pelas competências e conhecimentos que me transmitiram o longo da minha jornada académica.

À minha família, por todas as vezes que me apoiaram desde o início da minha formação, que me proporcionaram a continuidade nos estudos, e à chegada desta etapa - os meus eternos agradecimentos!

A todos muito obrigado.

LISTA DE ABREVIATURAS

APA- Agência Portuguesa do Ambiente

CAOP- Carta Administrativa Oficial de Portugal

CBD- Convention on Biological Diversity

cm- Centímetro

COS- Carta de Uso e Ocupação do Solo

DGT- Direção-Geral do Território

DR- Detecção Remota

ENCNB- Estratégia Nacional para a Conservação da Natureza e Biodiversidade

EPPO- European and Mediterranean Plant Protection Organization

ESA-European Space Station

ESAPL- Escola Superior Agrária de Ponte de Lima

FA- Floresta Aleatória

ha- Hectare

ICNF- Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas

IPBES- Intergovernmental Platform on Biodiversity and Ecosystem Services

m – Metro

MDE - Modelos de distribuição de espécies

mm- Milímetro

NIR- Infravermelho Próximo

NUTS - Nomenclatura Comum das Unidades Territoriais Estatísticas

NW - Northwest

RGB- Red, Green e Blue

RNA- Rede Neural Artificial

ROC - Característica de Operação do Recetor

S2- Sentinel-2

SWIR - Infravermelho de Ondas Curtas

TSS- Habilidade Estatística Verdadeira

UE- União Europeia

USACE- United States Army Corps of Engineers

VANT- Veículo Aéreo Não Tripulado

°C - Graus Celsius

µm- Micrómetro

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1. Terminologia e sua definição tendo em conta os processos de invasão por plantas.....	4
Quadro 2.2. Bandas mais frequente utilizadas na ótica da DR.....	15
Quadro 2.3. Bandas espectrais utilizadas pelo S2.	18
Quadro 3.1. Síntese de dados geográficos.	22
Quadro 3.2. Síntese de imagens utilizadas.	25
Quadro 4.1. Valores de teste, sensibilidade, especificidade e corte para cada índice estatístico utilizado.	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. As principais fase do processo de invasão biológica (Fonte: Marchante, 2014).....	6
Figura 2.2. Categorias taxonómicas pertencentes à espécie <i>Hakea decurrens</i> (Fonte: UTAD, 2023).....	7
Figura 2.3. Aspeto geral da <i>Hakea decurrens</i> (a), pormenor das folhas (b), flores (c) e fruto (d) (fonte: Invasoras, 2023).	8
Figura 2.4. Ciclo de gestão de plantas invasoras (Fonte: Invasoras, 2023).....	11
Figura 2.5. Interação sol, superfície terrestre e sensor do satélite (Fonte: Albuquerque 2012).....	14
Figura 2.6. Espectro eletromagnético (USACE, 2003)..	15
Figura 2.7. Assinaturas espectrais para diferentes alvos (Cruz et al., 2021).	16
Figura 2.8. Alguns exemplos de VANT: Multicopter (a) (fonte: Colomina e Molina, 2014); Quadricóptero (b) (fonte: DJI, 2023); Helicóptero (c) (fonte: Ft Sistemas, 2023) e Planador de Asa fixa (d) (fonte: Eisenbeiss e Lee, 2011).....	19
Figura 3.1. Fluxograma geral e síntese que engloba todas as fases para cartografar a <i>Hakea decurrens</i> , integrando amostras reais com classificação de imagens de satélite S2 em um modelo de Consenso, a fim de obter espaços espectralmente semelhantes.....	22
Figura 3.2. Drone DJI Matrice 210.....	23
Figura 3.3. Ortofotomapa RGB criado a partir do Agisoft Metashape.	24
Figura 3.4. Dsen2 Super resolution image adaptado de (Lanaras et al., 2018).	25
Figura 4.1. Enquadramento geográfico do concelho de Vila Nova de Cerveira e a sua respetiva altitude.....	28
Figura 4.2. Tipos de rocha presentes no município.....	30

Figura 4.3. Percentagem das variáveis espectrais mais importantes conforme o biomod2.	31
Figura 4.4. Importância das bandas para a classificação da espécie <i>Hakea decurrens</i> . .	31
Figura 4.5. Importância das datas para a classificação da espécie <i>Hakea decurrens</i>	32
Figura 4.6. Distribuição potencial da <i>Hakea decurrens</i> , segundo o modelo de Consenso.	34

1. INTRODUÇÃO

Através da globalização, o ser humano trouxe intencionalmente ou não, espécies para regiões onde não eram naturalmente encontradas, o que resultou no surgimento de espécies exóticas. (Santos & Calafate, 2018). Dentro das espécies exóticas, as mais impactantes são as espécies invasoras, que se estabelecerem num determinado território fora de sua distribuição geográfica natural, conseguindo-se reproduzir e aumentar sua população nesse novo território. As espécies invasoras constituem uma ameaça à biodiversidade, aos serviços dos ecossistemas, à segurança e saúde humana (Ziller & Zalba, 2017), alterando os ciclos de fogo, os ciclos biogeoquímicos, processos geomorfológicos e ciclos hidrológicos (Bem, 2015).

A introdução das espécies invasoras, seja com fins económicos ou ornamentais, tem sido um problema que tem causado uma transformação significativa nas nossas paisagens. A invasão de espécies de plantas invasoras tem causado a perda de paisagens tradicionais, que podem ter consequências irreparáveis, a menos que sejam tratados adequadamente com os recursos e capacidades técnicas adequados (Santos, 2020).

Algumas espécies possuem a capacidade invasora melhorada pela sua adaptação e/ou resistência ao fogo, visto que o fogo pode estimular a germinação de sementes, a abertura de frutos e/ou o rebentamento de touças. Outras espécies têm uma distribuição ampla na região de origem, produzem grande quantidade de sementes que possuem longa duração, além de serem facilmente dispersas por vertebrados (Silva, 2019).

Nos países membros da união europeia foram implementadas políticas e leis em vigor que lidam com o problema das invasões biológicas, através do Regulamento Europeu N° 1143/2014, de 22 de outubro de 2014, que tem como objetivo prevenir e gerir a introdução e propagação de espécies exóticas invasoras. O Regulamento mencionado acima cita a existência de 12000 espécies exóticas na Europa, das quais entre 10% a 15% são classificadas como espécies invasoras. Já a nível nacional, desde a década de 1990, têm se manifestado grande preocupação com esta questão. Em 1999, a legislação nacional reconheceu a seriedade desse problema com a aprovação do Decreto-Lei n° 565/99, de 21 de dezembro, que estabelece regulamentações para a introdução de espécies não nativas (exóticas) na natureza. Mais recentemente, em 2019, o Decreto-Lei 92/2019 foi divulgado no contexto da Estratégia Nacional para a Conservação da Natureza e Biodiversidade até 2030, que inclui a Lista Nacional de Espécies Invasoras.

Caso as espécies invasoras sejam identificadas precocemente através da monitorização do território, a sua limitada distribuição, possibilita o controlo com custos relativamente baixos, sendo uma resposta mais eficaz e mais acessível às capacidades da política local. Existem muitos estudos que utilizam a deteção remota para apoiar o problema da invasão biológica, sendo cada vez mais aplicada na deteção de espécies invasoras e na análise dos riscos e impactos associados, de forma a identificar, avaliar e prever a distribuição temporal e espacial da invasão das espécies (Marques, 2019). A *Hakea decurrens* manifesta um comportamento invasivo a Norte de Portugal devido à sua capacidade de disseminação/propagação e ausência de predadores ou competidores naturais.

O objetivo da presente dissertação é cartografar áreas da *Hakea decurrens*, utilizando para tal, técnicas de Deteção Remota (DR) com o auxílio de veículos aéreos não tripulados (VANT) e imagens multiespectrais capturadas pelo satélite Sentinel-2A da plataforma Copernicus. Para isso, foram utilizados conjuntos de variáveis multiespectrais no modelo biomod2 3.4.6, operado pelo software "R" 4.0., para identificar pixels com comportamentos espectrais semelhantes. Através do biomod2 foram aplicados três algoritmos distintos para fins de classificação. Esses algoritmos foram a Floresta Aleatória (FA), Rede Neural Artificial (RNA) e MAXENT.Phillips. Após a aplicação desses algoritmos, os resultados obtidos são então submetidos à avaliação de três modelos estatísticos distintos: Habilidade Estatística Verdadeira (TSS), Kappa de Cohen (KAPPA) e Característica de Operação do Recetor (ROC). Os resultados finais obtiveram avaliações positivas (>95%) e foram capazes de espacializar de forma explícita espaços invadidos com uma resolução espacial compatível com as necessidades de decisores políticos para a elaboração de estratégias de gestão.

2. A INVASÃO BIOLÓGICA E A DETECÇÃO REMOTA NA PRODUÇÃO DE CARTOGRAFIA DE *HAKEA DECURRENS*

2.1. Espécies invasoras

As espécies invasoras incorporam todo o tipo de espécies podem ser plantas, animais, agentes patogénicos ou outros organismos, cujo as suas introduções podem causar danos económicos, ambientais e afetar a saúde humana (Vitousek et al., 1997; Pimentel et al., 2001; Secretariat of the CBD, 2005; CBD, 2009; Vilà et al., 2010; Vicente et al., 2011; Paredes, 2015).

As invasões biológicas são um dos principais problemas mundiais, sendo considerada uma das principais causas pela perda da biodiversidade (IPBES, 2023). Este fenómeno potencializa impactos negativos não só a nível da biodiversidade mas também poem em risco os serviços dos ecossistemas devido à competição, predação, ocupação do espaço e/ou na transmissão de agentes patogénicos às espécies nativas (Vitousek e D'Antonio, 1997; Pimentel et al., 2001; Secretariat of the CBD, 2005; CBD, 2009; Vilà et al., 2010; Vicente et al., 2011; Paredes, 2015).

As invasões biológicas podem ocorrer em todo o tipo de ecossistemas, no entanto alguns ecossistemas são mais aptos a esta invasão. Perturbações de natureza humana promovem o surgimento de novas invasões (CBD, 2006; Vicente., et al. 2011).

Espaços perturbados ou em habitats ligados á atividade antrópica não agricultados, como margens de estradas e caminhos, culturas edificações pousio etc. (Vitousek e D'Antonio, 1997; Almeida e Freitas, 2000; Richardson et al., 2000; Paredes, 2015) são propensos a sofrerem invasões.

O impacto gerado pela espécie invasora na comunidade biótica nativa vai depender da posição trófica da espécie. Se a espécie invasora pertencer a um nível trófico inferior (produtor primário ou herbívoro), ela tende a controlar o sistema de bottom-up, modificando as quantidades energéticas (Thomsen et al., 2014; Freitas, 2019). Caso a espécie pertencer ao mesmo nível trófico, poderá competir com os recursos disponíveis (Thomsen et al., 2014; Freitas, 2019). Se o nível trófico é superior, a espécie passará a comportar-se como um predador, podendo reduzir ou aumentar os níveis de biomassa (Freitas, 2019).

No seguinte quadro apresenta-se uma terminologia para as espécies de plantas invasoras e a sua definição sugerida por Richardson et al. (2000) citado por Marchante et al. (2014).

Quadro 2.1. Terminologia e sua definição tendo em conta os processos de invasão por plantas.

Terminologia	Definição
Planta exótica (planta alienígena ou não indígena)	Planta introduzida numa determinada região que resulta da introdução de forma intencional ou accidental, por ação humana, ultrapassando barreiras biogeográficas.
Planta nativa (planta autóctone ou indígena)	Planta própria da região, pois cresce dentro das suas barreiras naturais.
Planta exótica casual (Adventícia)	Espécie alóctone que pode ocasionalmente reproduzir-se, no entanto não consegue sustentar as suas populações a longo prazo, mantendo -se em pequenas populações.
Planta naturalizada	Espécie alóctone que se reproduz constantemente e mantém as suas populações durante vários ciclos de vida, sem necessidade de intervenção humana.
Infestante	Planta que pode ser nativa ou exótica que se desenvolve em locais onde não é desejada. As infestantes geralmente causam prejuízos ambientais e económicos.
Planta invasora	Planta naturalizada que produz descendentes férteis em grande número, com forte potencial a partir da planta-mãe.

Fonte: Richardson et al. (2000), citado por Marchante et al. (2014).

2.1.1. Enquadramento legal europeu e nacional

Na Europa para minimizar os impactos e efeitos indesejáveis das espécies invasoras surgiu o Regulamento (UE) 1143/2014 de 22 Outubro 2014, com o objetivo de estabelecer regras para impedir, minimizar e atenuar os impactos causados pelas espécies invasoras. Esta legislação refere que existem 12 000 espécies exóticas no continente europeu do qual entre 10 a 15% têm comportamento invasor. Este regulamento foca-se em três tipos de intervenção a prevenção, a deteção precoce e controlo rápido e gestão, e serve de base numa lista de espécies invasoras que suscitam preocupação na União Europeia a Lista da União (artigos 4º e 5º). As espécies presentes nesta lista não poderão ser introduzidas no território da UE, criadas, comercializadas, usadas e libertadas no ambiente, de forma a criar um sistema de deteção precoce e controlo rápido (artigo 7º e 14º).

Fica aos países da UE responsabilidade de tomar medidas de recuperação adequadas, de forma a recuperar os ecossistemas danificados, destruídos e degradados por espécies com comportamento invasivo. Essas medidas abrangem, medidas destinadas a melhorar a capacidade dos ecossistemas expostos à perturbação provocadas pelas espécies invasoras (artigo 20º).

A nível nacional este tipo de temática começou a ter a sua relevância com a Lei n.º 1951, de 9 de março de 1937, que foi alterada pelo Decreto-Lei n.º 28039, de 14 de setembro de 1937, onde foi condicionado a sementeira ou a plantação de *Acacia dealbata*, *Eucalyptos spp* e *Ailanthus altissima*. Mais tarde, o Decreto-Lei n.º 165/74, de 22 de abril estabeleceu medidas para evitar a proliferação do jacinto-aquático (*Eichhornia crassipes*).

Com a existência de inúmeras espécies exóticas em Portugal com valor económico, introdução de espécies exóticas nos ecossistemas levanta várias questões como por exemplo a capacidade real da espécie ocupar nichos e utilizar os recursos disponíveis pelas espécies nativas. Essas perguntas foram debatidas em Portugal nos anos 90, de forma a originar a publicação do Decreto-Lei n.º 565/99, de 21 de dezembro, que regula a introdução na natureza de espécies não indígenas.

O Decreto-Lei n.º 565/99, de 21 de dezembro, foi substituído pelo Decreto-Lei n.º 92/2019, de 10 de julho que estabelece o regime jurídico aplicável ao controlo, à detenção, à introdução na natureza e ao repovoamento de espécies exóticas. Esta legislação inclui todas as espécies exóticas, incluindo as espécies invasoras reconhecidas neste decreto-lei pela Lista Nacional de Espécies Invasoras (Anexo II). De acordo com o Artigo 16º, é interdita a detenção, cultivo, criação, comércio, introdução na natureza e o repovoamento de espécies incluídas na Lista Nacional de Espécies Invasoras. O diploma executa uma das medidas previstas na Estratégia Nacional para a Conservação da Natureza e Biodiversidade para 2030 (ENCNB 2030). A ENCNB 2030 procura melhorar do estado de conservação do património natural, identificando medidas que o preservem face às principais ameaças (Decreto-Lei n.º 92/2019).

2.1.2. Processo de invasão biológica

Uma espécie para ser invasora tem que passar por uma sequência de etapas que começa na sua introdução e acaba na invasão. No entanto, antes de ser introduzida a espécie tem que sobreviver ao transporte da região doadora para a receptora. Pois se o propágulo chegar à região receptora, terá de sobreviver às condições colocadas pelo novo ecossistema (Freitas, 2019). A introdução é momento em que a espécie é introduzida num local onde não existia anteriormente (Marchante et al., 2014; Marques, 2019). Se contarmos todas as espécies exóticas introduzidas pelo Homem ou por via natural numa nova região, na maioria das vezes a sua distribuição permanece restrita (Marchante, et al., 2014). Porém,

um número reduzido de espécies introduzidas podem causar o surgimento de novas populações que se adaptam autonomamente ao ecossistema recetor, estas espécies são chamadas de espécies naturalizadas (Richardson et al., 2000; Vicente, et al., 2011).

A etapa da naturalização representa a capacidade da espécie conseguir reproduzir, e manter as populações estáveis e o equilíbrio com as outras espécies (Marchante et al, 2014; Marques, 2019), porém em algumas condições a sua distribuição pode aumentar significativamente (Richardson et al., 2000; Marchante et al., 2008; Vicente, et al., 2011), de forma a expandir a sua distribuição espacial colonizando novas áreas (Freitas, 2019).

Este crescimento resulta de um estímulo rápido da sua distribuição, de forma a surgir a ocorrência do processo a invasão biológica. Esse estímulo pode ser originado por fenómenos de perturbação causada pelas atividades humanas, como alterações do uso do solo, ou perturbação natural, como a adaptação de um agente que disperse as sementes ou de um polinizador, um incêndio, a ocorrência de uma tempestade ou mudanças climáticas (Marchante, 2014). Somente uma pequena fração de espécies exóticas são capazes de neutralizar e invadir com êxito o ecossistema recetor (Freitas, 2019). Na Figura 2.1. podemos observar as principais fases do processo de invasão biológica desde a sua introdução até à sua invasão.

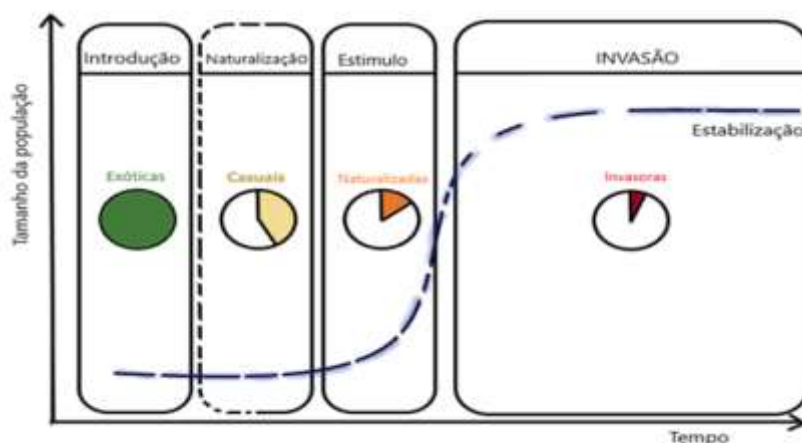


Figura 2.1. As principais fases do processo de invasão biológica (Fonte: Marchante, 2014).

2.2. As invasões biológicas por *Hakea decurrens*, biologia da espécie

A *Hakea decurrens* R.Br. (também conhecida como háquea-picante) pertence à família *Proteaceae* (Figura 2.2.) e é nativa do sudeste da Austrália. Esta espécie possui amplas áreas de distribuição biogeográfica e atualmente ocupa quase 60% dos biomas

mediterrâneos da Austrália nas regiões sudoeste e sudeste (Cardillo et al., 2017; Jacobson et al., 2023) e representa uma séria ameaça à biodiversidade em vários ecossistemas fora de sua área nativa (Moll & Trinder-Smith, 1992; Van Wilgen et al., 2012; Moodley et al., 2014; Morais et al., 2021; Jacobson et al., 2023). A *H. decurrens* tornou-se uma espécie invasora em vários países sendo das 622 espécies invasoras mais perigosas do mundo (Richardson & Rejmánek, 2011), onde foi reconhecida como espécie invasora na África do Sul (EPPO 2022).



Figura 2.2. Categorias taxonômicas pertencentes à espécie *Hakea decurrens* (Fonte: UTAD, 2023).

Esta planta é composta por um caule único, lenhoso que cresce até a uma altura de 2 a 5 m com folhas perenes em forma de agulha com cerca de 1 mm de diâmetro e com 4 a 7 cm de comprimento (Kluge e Richardson, 1983; Gordon, 1993; Weston et al., 2007; Queirós et al., 2019), sendo consideradas folhas tarete, onde a seção transversal é circular. Essas folhas aumentam com a idade da planta (Groom et al., 1997) e têm taxas de transpiração mais baixas, que é um mecanismo de adaptação para evitar o estresse hídrico conhecido como prevenção da seca (Richard et al., 1997; Jacobson et al., 2023). A *Hakea decurrens* também possui frutos compostos por folículos lenhosos, que contêm cada um duas sementes e inflorescências de cor creme (Kluge e Richardson, 1983; Gordon, 1993, Weston et al., 2007; Queirós et al., 2019).

Essa espécie cresce em solos xistosos e arenosos (EPPO, 2012; Paredes, 2015), sendo considerada o gênero mais esclerófilo do mundo, ou seja, resistente ao frio e seca (Lamont et al., 2016). A *Hakea decurrens* apresenta raízes proteoides, os quais consistam em pequenos aglomerados de centenas de radículas ao longo da raiz principal que são mais eficientes ao absorver nutrientes e água do que as raízes normais (Paredes, 2015). Os fatores relevantes na formação da raiz proteoide são as características químicas e físicas

do solo. A distância vertical da raiz em relação à superfície do solo, a compactação do solo e a falta de fósforo promovem a formação das raízes proteoides (Lamont, 1972; Lamont, 1973; Dell et al., 1980). Por outro lado, a presença de altos níveis de matéria orgânica e azoto no solo inibe a formação das raízes proteoides (Lamont, 1973). Desta forma, a *Hakea decurrens* apresenta uma clara adaptação em solos pobres em nutrientes e a secas, podendo aparecer até em locais montanhosos (Paredes, 2015), entre os 0 e os 1400 metros de altitude (EPPO, 2012).

As flores são de cor branca reunidas em fascículos axilares com 1-7 flores. Os frutos são folículos lenhosos de cor castanho-escuro (Invasoras, 2023), composto por duas valvas, onde cada valva contém uma semente alada preta, onde permanece no interior do fruto, agarradas á árvore ao longo da vida da planta. As sementes têm cerca de 8mm de comprimento e 5 mm de largura, onde são libertadas após a exposição a altas temperaturas, como por exemplo um incêndio ou após a morte da planta (Figura 2.3.). Algumas sementes podem ser levadas pelo vento atingindo distâncias consideráveis, criando novos focos de invasão (Kluge et al., 1991, Gordon et al., 1993; Queirós et al., 2019). Segundo Kluge e Richardson (1983); Wood e Morris (2007) e Paredes (2015) cada planta com 15 anos de idade pode acumular 75 milhões de sementes/ha. Esta planta forma pequenos bosques densos impedindo o desenvolvimento de vegetação autóctone, reduzindo a qualidade dos recursos hídricos superficiais e aumentando a possibilidade de ocorrência de fogos (Marchante et al., 2014). A floração da *H. decurrens* ocorre entre Janeiro e Abril (Invasoras, 2023).



Figura 2.3. Aspeto geral da *Hakea decurrens* (a), pormenor das folhas (b), flores (c) e fruto (d) (fonte: Invasoras, 2023).

Em Portugal, esta espécie foi introduzida para fins ornamentais e de produção de mel, e como planta de sebe de proteção (Vieira et al., 2002). A *H. decurrens* é conhecida e nível nacional como uma espécie com comportamento invasivo, estando listada como espécie invasora (Decreto-Lei nº 92/2019). De acordo com Marchante et al. (2014) e Morais et

al. (2021) esta espécie constitui uma grave ameaça aos habitats naturais dominados por *Pinus pinaster* no centro e no norte de Portugal, onde a sua propagação está diretamente ligada aos fogos florestais.

Esta espécie consegue germinar em condições de nutrição deficiente durante 200 dias. A percentagem de germinação a uma temperatura entre os 10 e os 20°C é de 90 %, enquanto que entre os 20 e 30°C 1-3% das sementes germinam (Mustart e Cowling, 1991; Paredes, 2015). Grande parte das sementes da *H. decurrens* germinam próximas da árvore mãe de forma a provocar uma povoação densa. As sementes restantes se dispersam por ação do vento e também por ação das águas superficiais (Whelan, 1986; Paredes, 2015). No entanto, as sementes com três ou mais anos podem morrer durante a germinação pois demoram muito tempo a emergir e a iniciar o seu desenvolvimento (Le Maitre, 1990).

A elevada taxa de produção de sementes da *H. decurrens*, a presença de um extenso reservatório de sementes na folhagem no dossel, a dispersão de sementes no solo, a disseminação em longas distâncias e as adaptações para sobreviver a incêndios recorrentes são fatores cruciais no processo de estabelecimento dessa planta. Em geral, espécies invasoras apresentam uma maior propensão para estabelecer dispersão a longa distância (Richardson et al., 1987; Mason et al., 2008, Hammill et al., 1998; Marchante, 2001).

2.2.1. Impactos, plano de gestão e técnicas de controlo

Do estudo das *Hakea decurrens* têm sido apontados vários impactos. Primeiramente, destaca-se o impacto socioeconómico dessa espécie. A presença da *H. decurrens* acarreta custos económicos significativos, representando uma ameaça para a indústria florestal da África do Sul, com prejuízos estimados em milhões de euros (Serralheiro, 2018). Além disso, do ponto de vista social, essa planta é considerada desagradável e espinhosa, formando coberturas arbustivas impenetráveis que restringem o acesso às áreas montanhosas (Serralheiro, 2018). Também é importante mencionar outros impactos causados pelas espécies de plantas invasoras de forma geral, como os impactos no turismo, recreação, património arquitetónico e arqueológico, e na saúde humana (Fernandes, 2008; Paredes, 2015).

Outro impacto relevante é o aumento do risco de incêndios associado à *Hakea decurrens*. Alguns estudos apontam que a presença dessa espécie resulta em um acréscimo de 60% na carga de combustível e na redução do teor de humidade de 155 para 110% (Wilgen e

Richardson, 1985; Serralheiro, 2018). Áreas densamente ocupadas por *H. decurrens* podem apresentar intensidades de fogo elevadas, aumento na frequência e extensão dos incêndios, além de modificações no tipo e sazonalidade dos mesmos (Fernandes, 2008).

A invasão de *Hakea decurrens* também afeta a hidrologia local. As áreas com alta densidade dessa espécie reduzem o escoamento nas bacias hidrográficas de montanhas (Serralheiro, 2018). Estas plantas capturam uma grande quantidade de água do solo. As suas copas capturam a água precipitável, de forma a aumentar as perdas por evaporação (Fernandes, 2008).

A biodiversidade também sofre impactos significativos devido à presença da *Hakea decurrens*. O Cape Floral Kingdom, localizado na África do Sul, é considerado um dos oito reinos florais do mundo, mas a introdução e proliferação da *Hakea decurrens* resultaram em uma redução significativa da diversidade de espécies florais (Richardson et al., 1989; Serralheiro, 2018). Além disso, as espécies invasoras podem causar alterações nas cadeias alimentares e até mesmo a extinção de espécies nativas (Marchante, 2001).

Por fim, outro impacto relevante é no ciclo dos nutrientes. A presença de espécies invasoras, como a *Hakea decurrens*, leva ao aumento das taxas de liberação de nutrientes provenientes da decomposição de folhas. Isso ocorre devido ao rápido crescimento das folhas e ao maior teor de nutrientes presentes nas espécies invasoras (Parker et al., 1999; Paredes, 2015).

Os habitats presentes na Rede Natura 2000 mais vulneráveis à sua invasão são as Charnechas secas europeias (4030) e os Matos termomediterrânicos pré-desérticos (5330). O primeiro habitat está organizado por bosques de sobreirais e azinhalis, onde a sua distribuição local está bastante limitada pela forte antropização da paisagem, dominada pelas explorações agropecuárias. Neste habitat, as áreas de montado com matagal foram incorporadas, pois nessas formações, o estrato herbáceo já foi substituído por um estrato arbustivo bem diferenciado. As espécies mais dominantes são dos géneros *Erica* e *Ulex* (ICNF, 2023a). O segundo é composto por vários aglomerados de matagais, altos e baixos, presentes em regiões mediterrânicas notavelmente secas. Essas comunidades mediterrânicas, compostas por arbustos de alturas variadas, manifestam-se de forma proeminente como estágios pré-florestais, ocasionalmente assumindo características arborescentes e abrangendo uma ampla diversidade de espécies vegetais. Portanto, trata-se de um habitat heterogêneo tanto na sua composição florística e estrutura, congregando

exclusivamente comunidades arbustivas mediterrânicas, embora apresentem estratégias adaptativas muito diversas (ICNF, 2023b).

Considerando os impactos causados pelas espécies invasoras, é importante implementar um plano de gestão e controlo, porém esse mesmo plano é um processo bastante demorado e dispendioso. Contudo o adiamento desta operação leva ao agravamento das situações, de forma a possibilitar a perdas irreversíveis com resultando do aumento dos custos envolvidos. Desta forma é importante prevenir, apostando em algumas das principais estratégias de intervenção a prevenção, a deteção precoce e resposta rápida que impedem a invasão biológica de espécies exóticas (Figura 2.4.). É essencial estabelecer prioridades em cada área invadida, levando em consideração a relação das espécies com a região, de modo a escolher os métodos de controlo mais adequados para a espécie. A execução desta metodologia deve ser correta de modo a evitar erros, destacando nas três sequencias de controlo (controlo inicial, de seguimento e de manutenção) (Invasoras, 2023).



Figura 2.4. Ciclo de gestão de espécies de plantas invasoras (Fonte: Invasoras, 2023).

A gestão de espécies invasoras leva em conta diversas fases. A primeira fase é a prevenção, que tem como objetivo impedir a introdução de espécies com potencial invasor e reduzir o uso de espécies invasoras já presentes na área. A prevenção envolve três medidas fundamentais: legislação que regula a entrada de novas espécies, impedindo a sua inclusão; criação e manutenção de um sistema de exclusão de espécies potencialmente invasoras onde é feita análise de risco para avaliar o potencial invasor das espécies, e investimento em ações de educação ambiental onde se informa e sensibiliza o

publico, adotando comportamentos que contribuem para evitar a introdução intencional e acidental (Invasoras, 2023). A segunda fase é a detecção precoce e resposta rápida. Nessa fase, é realizada a monitorização do território, especialmente em locais de interesse para conservação, a fim de identificar precocemente a invasão de espécies introduzidas. A detecção precoce permite a eliminação das espécies de forma eficaz e com custos reduzidos. Estratégias e métodos adequados devem ser definidos antecipadamente e aplicados após a identificação da espécie na área (Invasoras, 2023). A terceira fase é o controlo. Quando as espécies invasoras começam a invadir a área e a erradicação se torna improvável, é necessário realizar o controlo das espécies. A seleção da metodologia adequada para cada tipo de espécie e a correta identificação das espécies são fundamentais nessa fase. É importante planejar bem as ações no terreno, identificar a causa da invasão, avaliar o impacto, estabelecer prioridades e delimitar a área invadida. Também é necessário avaliar e aplicar o método de controlo mais apropriado, além de monitorar a recuperação da área controlada. Medidas de controlo mal planeadas, precipitadas ou adiadas podem agravar a situação e aumentar os custos. O controlo é mais eficaz quando realizado nas fases iniciais após a introdução da espécie (Invasoras, 2023).

A metodologia de controlo deve incluir três fases sequenciais: controlo inicial, que reduz as populações de espécies invasoras, geralmente com custos elevados; controlo de seguimento, que deteta e controla a regeneração por rebentos de touça ou raiz, germinação de sementes, entre outros; e controlo de manutenção, que assegura um controlo eficaz dos focos esporádicos da espécie invasora a longo prazo (Invasoras, 2023).

O êxito das metodologias varia devido à existência de bancos de sementes abundantes com longevidade, à forma de dispersão das sementes vindas da espécie invasora mãe, e à recuperação das espécies nas áreas não controladas, devido à ausência de monitorização.

Antes do controlo, é essencial encontrar os estados mais vulneráveis do ciclo fenológico da espécie. Os fatores mais importantes são (a densidade populacional e idade da espécie invasora, tipos e as condições das comunidades nativas, as condições de acesso ao terreno, disponibilidade financeira e a mão de obra). As técnicas de controlo mais usadas são: controlo físico (arranque, corte, descasque, etc.); controlo químico (pincelagem, injeção, pulverização, etc.); controlo biológico (libertação de inimigos naturais originários da mesma região nativa da espécie invasora). Muitas das vezes opta-se pela combinação de múltiplas metodologias, provendo um reforço à melhoria dos resultados (Invasoras, 2022).

Desta forma o controlo da *Hakea decurrens* exige uma gestão bem planeada, incluindo a identificação das causas da invasão, determinação da área invadida, definição das prioridades de intervenção, avaliação dos impactes, seleção das metodologias de controlo adequadas e sua aplicação. Mais tarde, será importante fazer a sua monitorização e análise da eficácia metodológica e da recuperação da área intervencionada, por forma a realizar, quando necessário, um controlo de evolução de cada área (Marchante, 2014; Paredes, 2015).

Para o controlo de uma espécie invasora existem vários métodos de controlo, mais precisamente para esta espécie poderão ser implementados métodos de controlo químico, físico e biológico:

- I. Controlo químico: O controlo das plantas é através da aplicação foliar de herbicida glifosato. Normalmente aplica-se a plantas jovens ou germinação elevada (Invasoras.pt, 2022). Essa aplicação deve ser evitada junto de áreas agrícolas, para não contaminar os solos e as linhas de água, que afetam diretamente a qualidade dos alimentos. É um dos métodos mais caros (Marchante & Freitas, 2005; Serralheiro, 2018).
- II. Controlo físico:
Arranque manual- Este método é utilizado geralmente em plântulas e plantas jovens. Em solos mais compactos, o arranque deve ser realizado na época das chuvas para facilitar a remoção do sistema radicular (Invasoras.pt, 2022).
Corte- Este método é preferencialmente utilizado para plantas jovens e adultas. O corte do tronco deve ser o mais próximo possível do solo e normalmente é feito com o recurso a equipamentos manuais e/ou mecânicos. A metodologia deve ser realizada antes da maturação das sementes. Depois do corte as plantas cortadas devem ser deixadas a secar por 12 a 18 meses até começarem a libertar sementes. Depois de secar, deve ser queimada a biomassa que sobra, provocando a morte das sementes restantes e das plântulas (Invasoras.pt, 2022). O fogo controlado deve ser apenas realizado por técnicos credenciados, em dias específicos e em áreas com continuidade de combustível, ou seja, em parcelas densas de *Hakea decurrens*. É um método bastante eficaz, mas dispendioso (Marchante & Freitas, 2005).
- III. Controlo biológico: A realização deste tipo de controlo é baseada na utilização de inimigos naturais (Invasoras, 2014). Como foi comprovado na África do Sul, tem

se obtido resultados positivos com a libertação de *Erytenna consputa* Pascoe (Coleoptera: *Curculionidae*), um gorgulho que se alimenta das sementes e de *Carposina autologa* Meyrick (Lepidoptera: *Carposinidae*), que destrói também as sementes. No entanto em Portugal, nenhum destes agentes foi ainda testado (Marchante & Freitas, 2005).

2.3. Detecção remota

A Detecção Remota (DR) é a ciência que permite obter informação sobre uma superfície, através da análise de informação registrada por um sensor sem contacto direto com objeto, área, ou fenómeno estudado (Figura 2.5.) (Rocha e Sousa, 2007).

A interação entre o Sol, a superfície terrestre e os sensores de satélites desempenham um papel crucial no registro de dados por detecção remota. O Sol emite radiação eletromagnética que atinge a Terra. Parte dessa radiação é refletida, absorvida e emitida pela superfície terrestre. Sensores em satélites capturam essa radiação refletida e emitida, detetando variações na radiação, em diferentes zonas do espectro eletromagnético (IBGE 2001).



Figura 2.5. Interação sol, superfície terrestre e sensor do satélite (Fonte: Albuquerque 2012).

2.3.1. Detecção remota na cartografia e monitorização de espécies invasoras

Para o estudo da DR é importante mencionar que a radiação eletromagnética é composta por um conjunto de comprimentos de onda que é conhecido como espectro eletromagnético, sendo dividido num certo número de regiões espectrais (Figura 2.6.).

Atualmente podemos detetar ou gerar radiação eletromagnética em comprimentos de onda na faixa de 108 metros a 0,01 μm (Quadro 2.2) (Aggarwal, 2003; Martins, 2012).

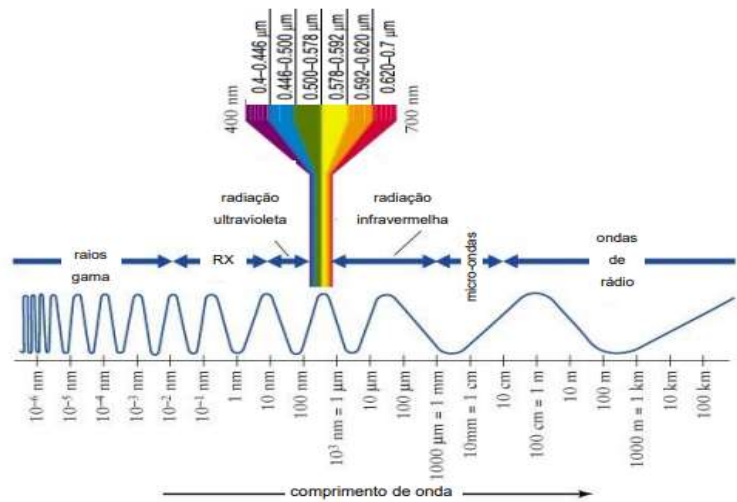


Figura 2.6. Espectro eletromagnético (USACE, 2003).

Na ótica da DR é importante destacar as regiões do espectro eletromagnético mais frequente temente utilizadas (Quadro 2.2.).

Quadro 2.2. Bandas mais frequente utilizadas na ótica da DR.

Tipos de radiação	Comprimento de Onda	Descrição
Espectro visível	0,4 a 0,7 μm	Sendo considerada a única radiação eletromagnética que é visível pelo olho humano. Esta radiação é composta pelas bandas elementares azul com radiação entre 0,4 a 0,5 μm , o verde com radiação entre 0,5 a 0,6 μm e vermelho de 0,6 a 0,7 μm .
Infravermelho próximo	0,7 a 1,3 μm	É importante pela sua capacidade de detetar vegetação e concentrações de humidade.
Infravermelho médio	1,3 a 8 μm	Esta radiação é importante para estimar o conteúdo de humidade da vegetação e detecção de focos de altas temperaturas.
Infravermelho distante	8 a 14 μm	Inclui uma fração emissiva do espectro terrestre onde se deteta o calor.
Micro-ondas	partir de 1 cm	Energia bastante transparente a cobertura de nuvens

Fonte: Chuvieco, 1995

Os sensores captam a radiação eletromagnética que é refletida ou emitida pela superfície da Terra e convertida em dados que podem ser analisados para obter informações sobre o ambiente. A refletância é definida como a razão entre a energia refletida pelos objetos e a energia incidente, dependendo do intervalo do espectro eletromagnético (do comprimento de onda), do ângulo de incidência da luz (que pode variar de acordo com a

hora do dia ou da estação do ano, no caso da existência de luz solar) e das características físicas e natureza do corpo. A nível espectral cada objeto possui o seu próprio padrão de refletância nas diferentes bandas do espectro, desta forma a sua assinatura espectral pode variar ao longo do tempo, o que acontece com a vegetação ao longo das estações do ano. A assinatura espectral dos vários elementos da superfície terrestre pode ser definida como a reflectância desses elementos em diferentes intervalos do espectro eletromagnético, permitindo distinguir os objetos entre si (Figura 2.7.).

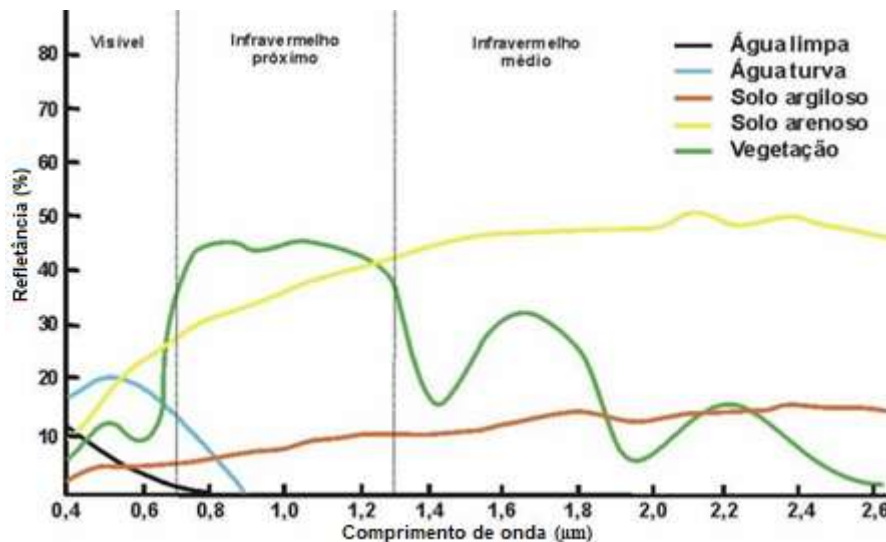


Figura 2.7. Assinaturas espectrais para diferentes alvos (Cruz et al., 2021).

De acordo com a Figura 2.7. a assinatura espectral da vegetação é muito diferente dos restantes alvos, pois apresenta picos na zona do infravermelho próximo. Isto deve-se ao mecanismo de defesa das plantas que reflete a totalidade das ondas neste intervalo, evitando o sobreaquecimento das folhas. Ao analisar a assinatura espectral das plantas é possível distinguir as espécies vegetais, os diferentes estados evolutivos e os seus níveis de saúde. Através das assinaturas espectrais também é possível analisar a presença de determinados tipos de rochas e minerais numa região (Mather, 2004; Amorim, 2015).

A DR é considerada um dos auxílios para estudar ecossistemas morfologicamente complexos (Joshi et al., 2004; Martins, 2012). Pois fornece um amplo tipo de sistemas, nos quais inclui fotografias aéreas, sensores aéreos multiespectrais, imagens de baixa e alta resolução espectral e espacial (Martins, 2012).

Esta ciência tem sido uma ferramenta fundamental para a cartografia e monitorização de espécies invasoras, bem como fornece dados que permite prever zonas suscetíveis à invasão (Martins, 2012). Para o estudo da invasão biológica a integração da DR contribui

também no entendimento dos processos de invasão e impactos na biodiversidade (Bolch et al., 2020). A DR é muito estimada sendo ferramenta favorita para a cartografia de espécies invasoras, por causa da sua capacidade de fornecer informação em grandes extensões geográficas, podendo aceder em locais inacessíveis (Rouse et al., 1975).

Existem duas razões que comprovam que o uso da DR para a cartografia de espécies invasoras é a alternativa mais viável (He et al., 2015). Em primeiro lugar, quando existe um crescimento dominante por parte da espécie invasora dando à formação de grandes manchas homogêneas, é mais fácil treinar um classificador para as reconhecer (Bolch et al., 2020). Em segundo lugar, se a espécie invasora apresenta uma fenologia única, ou seja, uma flor, é mais fácil diferenciar das plantas autóctones durante algumas partes do ano. Porém, cada espécie e habitat apresenta diferentes desafios na identificação das espécies invasoras usando DR (Bolch et al., 2020).

A aquisição de imagens repetidamente sobre a mesma área possibilita o estudo da tendência de distribuição da espécie, de forma a permitir um controlo eficaz da espécie invasora. Por outro lado, as áreas ainda não invadidas, a prevenção é a solução para evitar a colonização por parte das espécies invasoras.

Para uma gestão territorial correta é necessária informação atual e espacialmente explícita. A deteção de espécies de plantas invasoras atempadamente de uma forma gratuita e sem grandes necessidades computacionais potencia a deteção e atuação no controlo com base em conhecimentos científicos.

2.3.2. Sentinel-2A

Neste estudo, utilizou-se o satélite Sentinel-2 (S2), que é operado pela European Space Station (ESA), este recolhe dados de alta resolução com 13 bandas espectrais (Quadro 2.3.) (ESA, 2018).

A existência de imagens de multiespectrais e multitemporais disponíveis gratuitamente é uma vantagem significativa na criação de séries temporais para a análise do comportamento vegetativo. A qualidade espacial das informações é bastante boa, o que viabiliza a realização de estudos sobre o comportamento espectrais ao nível local.

O S2 apresenta resoluções espaciais variadas dependendo da sua banda, podendo ser de 10, 20 ou 60 metros. No caso das bandas azul, verde, vermelho e NIR, o S2 captura imagens com uma resolução espacial de 10 metros. Já as bandas vermelho borda 1, 2, 3

e 4, assim como as bandas SWIR 1 e 2, possuem uma resolução espacial de 20 metros. Por fim, as bandas restantes, como aerossol, vapor de água e cirrus, possuem uma resolução espacial de 60 metros (Quadro 2.3.) (Xavier, 2019).

Quadro 2.3. Bandas espectrais utilizadas pelo S2.

Nome da banda	Número da Banda	Comprimento de onda central (nm)	Resolução Espacial (m)
Aerossois Costeiros	B01	442.7	60
Azul	B02	492.4	10
Verde	B03	559.8	10
Vermelho	B04	664.6	10
Vermelho Borda 1	B05	704.1	20
Vermelho Borda 2	B06	740.5	20
Vermelho Borda 3	B07	782.8	20
Infravermelho Próximo (NIR)	B08	832.8	10
Vermelho Borda 4	B08A	864.7	20
Vapor de Água	B09	945.1	60
Cirrus	B10	1373.5	60
Infravermelho de Ondas Curtas 1 (SWIR 1)	B11	1613.7	20
Infravermelho de Ondas Curtas 2 (SWIR 2)	B12	2202.4	20

2.3.3. VANT e o seu uso para a detecção de espécies invasoras

Para gerir os terrenos ocupados pela propagação das espécies de plantas invasoras, é necessário monitorizar o ecossistema. Os dados que fornecem informações sobre padrões espaciais e tendências de espécies de plantas invasoras são essenciais para esta monitorização. Desta forma, existem abordagens tradicionais para observação e monitorização de ecossistemas baseadas no uso de satélites e métodos terrestres. Cada abordagem tem as suas próprias limitações: imagens de satélite cobrem grandes áreas, mas não fornecem detalhes para escalas mais finas, enquanto o levantamento de solo, apesar de sua capacidade de fornecer detalhes em escalas mais finas, é trabalhoso. Os Veículos aéreos não tripulados (VANTs ou drones) fornecem dados em escala intermediária, com resolução espacial muito maior do que dados de satélite e com mais cobertura espacial do que levantamentos terrestres (Figura 2.8.). Sensores VANTs combinam os benefícios da monitorização mais tradicional por satélite e terrestre,

permitindo observar ecossistemas, incluindo a monitorização de espécies de plantas invasoras (Huelsman & Epstein, 2021).

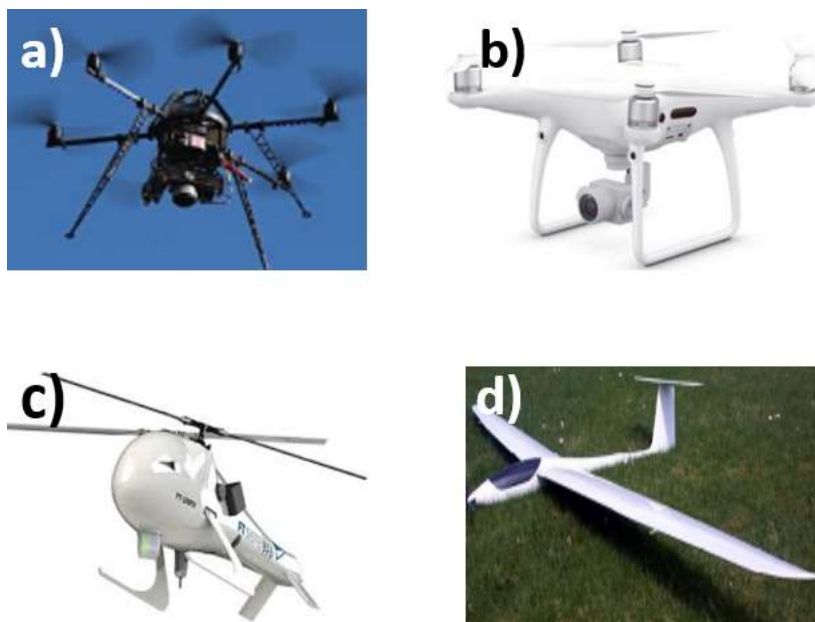


Figura 2.8. Alguns exemplos de VANT: Multicopter (a) (fonte: Colomina e Molina, 2014); Quadricóptero (b) (fonte: DJI, 2023); Helicóptero (c) (fonte: Ft Sistemas, 2023) e Planador de Asa fixa (d) (fonte: Eisenbeiss e Lee, 2011).

Algumas vantagens e potencialidades a ser destacadas incluem: i) Pode ser aplicado em situações de alto risco; ii) Acesso a áreas de difícil alcance; iii) Captura de imagens em tempo real; iv) Permite avaliar em tempo real a qualidade da imagem; v) Baixo custo, tanto em termos operacionais quanto na aquisição e produção de imagens; vi) Capacidade de produzir imagens de alta resolução espacial; vii) Realização de coberturas periódicas em momentos específicos; viii) Geração de nuvens de pontos tridimensionais, com uma densidade de até 100 pontos por m^2 (Lin et al., 2010; Colomina e Molina, 2014).

Em contrapartida, o uso VANT, conforme mencionado por Lin et al. (2010), pode acarretar certas restrições ou inconveniências, tais como: i) limitações no seu peso; ii) considerável deformação geométrica, resultando em custos mais elevados para correções; iii) cobertura estreita de cada imagem; iv) elevada quantidade de dados para pré-processamento; v) autonomia controlada.

2.4. Modelo de distribuição de espécie

Modelos de distribuição de espécies (MDEs) são ferramentas com base em algoritmos estatísticos e machine learning, que correlacionam espécie presenças e ausências com

fatores ambientais, com o objetivo de modelar as preferências ecológicas das espécies (Estopinan et al., 2022). Esta ferramenta pode ser utilizada para medir a importância de fatores específicos e para prever a distribuição das espécies no território, bem como para examinar as consequências ecológicas e a mudança ambiental (Franklin, 1995; Guisan & Thuiller, 2005; Miller & Rogan, 2007). Os MDEs são úteis para uma série de domínios, incluindo a ecologia, a biologia da conservação e a biologia evolutiva. Esta abordagem de modelação é conhecida por vários termos, incluindo "distribuição de espécies", "nicho ecológico", "nicho ambiental", "adequação do habitat" e "envelope bioclimático" (Pearson, 2007).

Estes modelos para além da distribuição espacial das espécies podem incorporar cenários climáticos futuros, presentes ou passados, relacionando sua ocorrência com as variáveis preditoras (Guisan & Zimmermann, 2000). Podem ser utilizados também para testar previsões do potencial de invasão utilizando registos de ocorrência da distribuição invadida ou para planear e orientar o trabalho de campo em áreas onde existe uma maior probabilidade de descobrir novas populações de uma espécie conhecida (Pearson, 2007). Os MDEs são considerados úteis, no entanto, na maior parte das vezes, não são suficientes para representar as áreas invadidas e caracterizar várias dimensões normalmente exigidas pelos decisores políticos que precisam de detetar rápida e precisamente as áreas invadidas para planear ações. Isto deve-se ao facto de os MDEs dependerem de fatores ambientais (como o clima, a geomorfologia e o solo), que frequentemente têm resoluções elevadas, inadequadas para os esforços de controlo ou gestão.

Os MDEs também podem ser úteis para fazer classificação supervisionada tendo por base a informação espectral recolhida e a aplicação de técnicas de "fusão de classificadores" ou métodos de "empilhamento" denominados de Consenso. A combinação de diferentes algoritmos usando métodos de classificação supervisionada, permite a criação de um consenso final apto para discriminar a presença e ausência de uma espécie com base em dados espectrais de satélite (Mouta et al., 2021).

3. METODOLOGIA

Neste capítulo, são expostas as metodologias utilizadas no decorrer do desenvolvimento deste trabalho, as quais desempenharam um papel fundamental na obtenção dos resultados. A realização deste estudo foi viabilizada graças à implementação de quatro etapas distintas:

I. Revisão bibliográfica

- i) Revisão abrangente aos tópicos pertinentes a este trabalho, destacando-se os procedimentos de invasão, o estudo da espécie exótica invasora em questão, a utilização da Detecção Remota na cartografia e a introdução do Modelo de distribuição de espécie (MDEs);

II. Trabalho de campo e etapa inicial na elaboração do trabalho

- i) Identificação uma grande área de *Hakea decurrens* por fotointerpretação através do “Google Earth Pro”;
- ii) Deslocamento à área de estudo para condução de um voo com o VANT DJI Matrice 210;
- iii) Obtenção de imagens de satélite ao longo de vários meses, utilizando o satélite Sentinel-2A, por meio do projeto Copérnicos;

III. Tratamento e análise dos dados recolhidos em campo

- i) Utilização do software "Agisoft Metashape" para processar imagens aéreas capturadas por drone e gerar um ortofotomapa;
- ii) Elaboração de polígonos no “ArcGIS Pro” para retratar as manchas invadidas pela espécie;
- iii) Harmonização das imagens das bandas do Sentinel-2 por meio da aplicação do algoritmo de super-resolução DSen 2;

IV. Utilização do software "R", com a aplicação do pacote biomod2, para criar o Modelo de Distribuição da Espécie (MDEs) e gerar a previsão final, referida como Consenso.

A fim de simular a distribuição potencial da *Hakea decurrens* na área de intervenção, foram executados vários procedimentos, os quais serão detalhados ao longo deste capítulo. A Figura 3.1. apresenta uma síntese desses procedimentos.

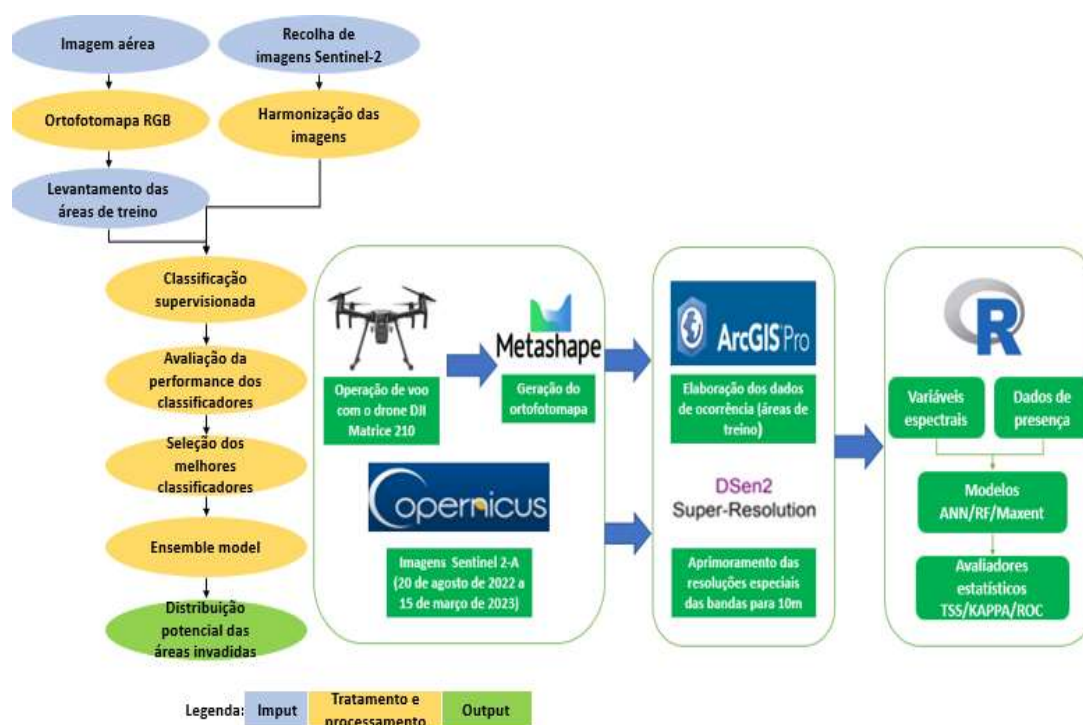


Figura 3.1. Fluxograma geral e síntese que engloba todas as fases para cartografar a *Hakea decurrens*, integrando amostras reais com classificação de imagens de satélite S2 em um modelo de Consenso, a fim de obter espaços espectralmente semelhantes.

3.1. Apresentação e descrição da informação base

Para a realização deste estudo, foi desenvolvido-se uma base de dados geográfica compilada a partir de várias fontes (Quadro 3.1). Esta base de dados incorpora informações dos limites administrativos (CAOP, 2018), rede hidrográfica, carta de solos, modelo digital do terreno, carta de ocupação do solo e imagens de satélite adquiridas pelo S2A. Todos esses dados estão referenciados no sistema de coordenadas ETRS 1989 Portugal TM06.

Quadro 3.1. Síntese de dados geográficos.

Dados geográficos	Formato	Fonte
Limites administrativos (CAOP)	Shapefile	DGT
Rede hidrográfica de Portugal continental	Shapefile	DGT
Carta de Solos	Shapefile	APA
Modelos Digitais de Terreno	Raster	ESAPL
Imagens de satélite (2022-2023)	Raster	Copernicus Sentinel2-A
COS2018	Shapefile	DGT

3.1.1. Produção do ortofotomapa e levantamento das áreas de treino

Numa fase inicial, foi identificado uma grande área de *Hakea decurrens* por fotointerpretação através do software Google Earth Pro. Este local é o miradouro da Alta Castanheira, uma área situada a poucos quilómetros da Escola Superior Agrária de Ponte de Lima. É uma das poucas zonas onde é possível observar a *Hakea* através de imagens de satélite, dada a sua elevada propagação. No entanto, essa grande zona não é uma área homogénea em relação à espécie em estudo. Pois os ecossistemas são complexos e dinâmicos onde não existem áreas homogéneas relativamente a um único tipo de espécie.

Para a formação das áreas de treino foi necessário o auxílio de um VANT DJI Matrice 210 equipado com uma câmara MicaSense RedEdge-MX, na qual foram capturadas as imagens RGB. Após o processo de ortocorreção, obteve-se uma resolução espacial altamente precisa (com um pixel de tamanho $3.75 \mu\text{m}$). Durante o voo, a sobreposição de imagens foi de 70% longitudinal por 80% lateral, e a altitude do drone foi ajustada de acordo com a altimetria do terreno, já que esta variável impactava na sobreposição das imagens (Figura 3.2.).



Figura 3.2. Drone DJI Matrice 210.

A informação recolhida pelo drone DJI Matrice 210 foi, posteriormente, utilizada para gerar ortofotomapas detalhados que ajudaram a definir geograficamente as regiões invadidas por meio do uso do software Agisoft Metashape.

Após a conclusão dos voos, as imagens foram inseridas no software Agisoft Metashape para processamento. A etapa inicial envolveu o alinhamento das fotografias, onde o programa buscou pontos comuns entre as imagens e os combinou entre diferentes pares de imagens próximas, resultando na formação de uma "sparse point cloud". A etapa seguinte consistiu na criação da "dense point cloud", que foi baseada em "mapas de profundidade" obtidos através da correspondência densa entre pares estéreos de imagens. A última fase consistiu na geração do ortofotomapa, que é uma imagem combinada criada pela fusão das imagens originais projetadas na superfície dos objetos e transformadas no sistema de projeção selecionado.

As delimitações das áreas de treino são bastante importantes para alcançar resultados precisos. Desta forma, foram cartografadas manchas de áreas de *Hakea decurrens* no software "ArcGIS Pro" sobre ortofotomapa criado anteriormente, com uma área nunca menor do que um pixel de 10m (Figura 3.3.). Num total foram delimitadas 41 áreas de treino apenas de presenças abrangendo algumas zonas próximas ao Miradouro do Alto da Castanheira.



Figura 3.3. Ortofotomapa RGB criado a partir do Agisoft Metashape.

3.1.2. Recolha de imagens Sentinel-2A

Para a execução deste estudo, contou-se com a utilização do satélite S2, que é operado pela European Space Station (ESA) que capta dados de alta resolução com 13 bandas espectrais. As imagens S2A no nível L2A com baixa percentagem de nuvens ($< 15\%$) foram integrados no fluxo de trabalho. No total 7 imagens de Agosto 2022 a Março de 2023 foram recolhidas (Quadro 3.2.)

Quadro 3.2. Síntese de imagens utilizadas.

Datas analisadas	20 de agosto 2022	19 de setembro 2022	5 de novembro 2022
24 de janeiro 2023	3 de fevereiro 2023	6 de fevereiro 2023	15 de março 2023

3.2. Harmonização de imagens Sentinel-2A

Foi executado um processo preliminar nas imagens utilizando o Dsen2, que é um algoritmo de super-resolução baseado em uma rede neural deep learning (Figura 3.4.). Esse algoritmo tem a capacidade de uniformizar a resolução espacial das diversas bandas do S2. O DSen 2 é utilizado para aprimorar a resolução das imagens obtidas pelo S2. Ele é composto por duas partes. Um dos modelos tem a finalidade de aumentar a resolução das imagens de 20 m para 10 m, enquanto o outro tem como objetivo aumentar a resolução das imagens de 60 m para 10 m.

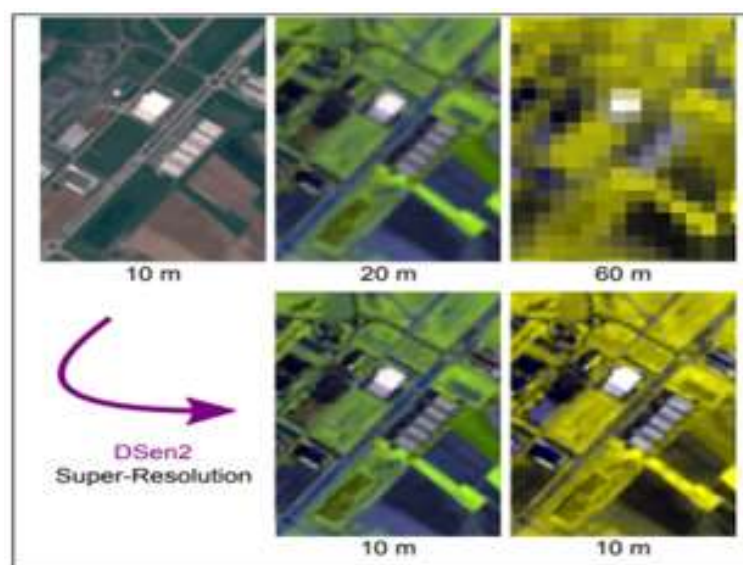


Figura 3.4. Dsen2 Super resolution image adaptado de (Lanaras et al., 2018).

3.3. biomod2

Com os avanços no o domínio do conhecimento estatístico e da tecnologia da informação ampliaram consideravelmente o conjunto de ferramentas, técnicas e opções de modelação estatística e machine learning, incluindo aquelas que são aplicadas no desenvolvimento de Modelos de distribuição de espécies (SDMs) (Guisan & Zimmermann, 2000; Araújo & New, 2007).

O biomod2 é uma plataforma de modelação de distribuição de espécies que possibilita a integração de vários algoritmos de modelação numa previsão final denominada de Consenso. O objetivo da criação do Consenso é controlar as incertezas presentes nos modelos individuais e identificar a solução ótima com base em um conjunto de previsões (Thuiller et al., 2009). Como uma plataforma para análise de distribuição de espécies, o biomod2 permite a execução de até 10 modelos de classificação diferentes que descrevem e modelam a relação entre a espécie e o ambiente através da análise das correlações entre variáveis ambientais e áreas de treino.

Além das variáveis ambientais como clima e topografia, o biomod2 tem um bom desempenho quando se trata de variáveis espectrais. Isso se deve à habilidade do modelo em construir pilhas de informação raster e fundir informação gerada (Consenso) a partir de correlações entre pixéis de cada modelo.

Em termos gerais, esses progressos se refletem na habilidade das entidades gestoras e das partes interessadas em aproveitar a disponibilidade de dados e procedimentos analíticos, permitindo-lhes realizar avaliações mais precisas, de forma a monitorizar de forma mais eficaz e desenvolver estratégias mais robustas para o controle de espécies invasoras (Mouta et al., 2021).

A presente dissertação foi executada por meio da utilização da versão 3.4.6 do pacote biomod2 no software estatístico R (R Development Core Team 2012), versão 4.0. Esta análise é apoiada por vários algoritmos de classificação supervisionada, com base em métodos estatísticos e de machine learning, incluindo os classificadores Rede Neural Artificial (RNA), Floresta Aleatória (FA) e MAXENT.Phillips.

Para o conjunto de dados de entrada, um conjunto de pseudo-ausências e 30 repetições de modelo foram executados usando as opções padrão do biomod2. Para avaliar o desempenho dos modelos de classificação, utilizou-se validação cruzada. Esta técnica consiste em dividir o conjunto de dados em partes, sendo que 80% foram utilizados para

treinamento e os 20% restantes para avaliação. Adicionalmente, foi garantida uma prevalência de 0,4, o que significa que as pseudo-ausências têm um maior peso no processo de calibração do modelo do que as presenças.

Para descobrir áreas com características espectrais similares às da *Hakea decurrens* para cada dia foram utilizadas 12 variáveis espectrais analisadas ao longo de 7 datas, perfazendo um total de dados de entrada composto por 84 variáveis independentes.

Para avaliar o desempenho geral dos classificadores calculamos os avaliadores estatísticos Habilidade Estatística Verdadeira (TSS), Kappa de Cohen (KAPPA) e a área sob a Característica de Operação do Recetor (ROC). Os dois primeiros avaliadores oscilam dentro da faixa de valores compreendida entre o intervalo numérico de -1 a 1, ao passo que o ROC está contido no intervalo que vai de 0 a 1. Valores mais próximos de 1 indicam classificadores com melhor performance e maior capacidade discriminatória. Adicionalmente a essas medidas, também realizamos o cálculo da sensibilidade e especificidade. Sensibilidade refere-se à proporção das presenças observadas que são previstas e, portanto, quantifica os erros de omissão, enquanto a especificidade é a proporção das ausências observadas que são previstas corretamente e, portanto, quantifica os erros de comissão. No geral, sensibilidade é a probabilidade de que o algoritmo de classificação classifique corretamente as presenças, enquanto a especificidade é a probabilidade de que o modelo classifique corretamente as ausências (Mouta et al., 2021).

4. RESULTADOS

4.1. Área de estudo

A área de estudo enquadra-se no noroeste de Portugal, na sub-região Alto Minho (NUTS III), no município de Vila Nova de Cerveira. Este concelho está confinado confinando a norte com o município de Valença, a este com os municípios de Paredes de Coura e de Ponte de Lima, a sul com o município de Caminha, a Oeste com o rio Minho e a vizinha Galiza (Figura 4.1.). A topografia heterogénea da região cria espaços com declives acentuados dominados por matos, em zonas de declive menos acentuado encontramos florestas de produção. Neste espaço a *Hakea decurrens* assumiu o controlo de vastas áreas do ecossistema existente, o que requer uma intervenção urgente, precisa e eficiente para reverter essa situação.

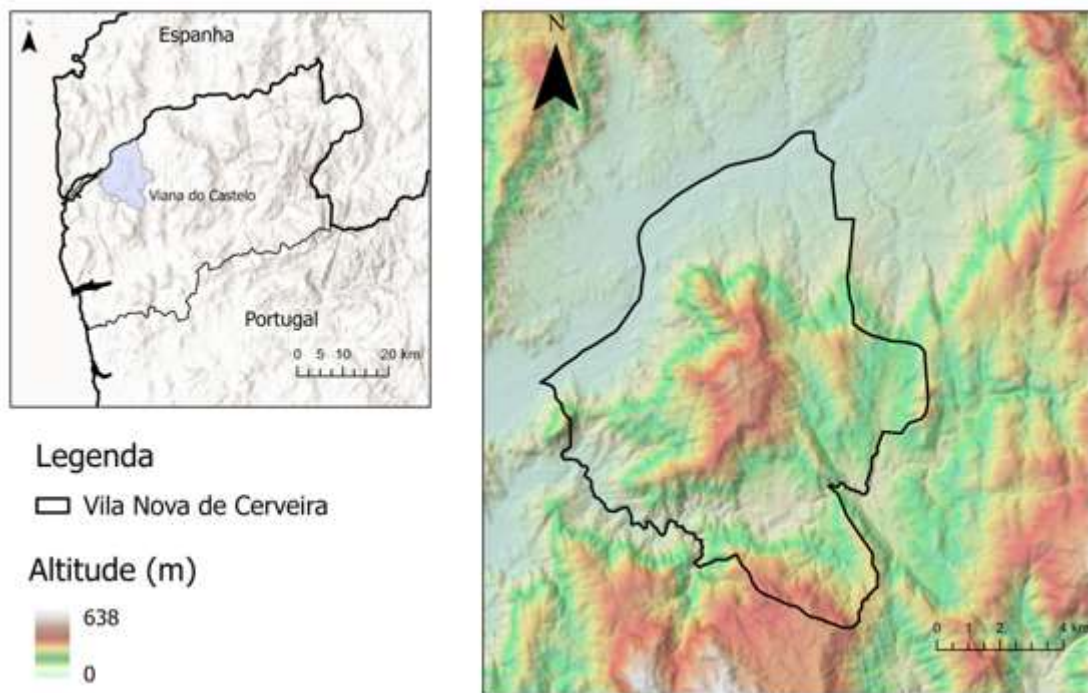


Figura 4.1. Enquadramento geográfico do concelho de Vila Nova de Cerveira e a sua respetiva altitude.

O município de Vila Nova de Cerveira é notavelmente caracterizado pela presença de dois vales fluviais distintos. A norte, encontra-se o amplo vale do rio Minho, que possui uma notável presença. Na parte sul do município, situa-se o vale do rio Coura. Esses vales são separados pela Serra da Salgosa. O ponto mais elevado da área é localizado no alto de São Paio, atingindo a altitude de 638 metros. A variação altimétrica abrange desde os

10 metros até os 638 metros, com a maioria das altitudes situando-se entre 10 e 300 metros (76,23% do território).

Em termos de ocupação do solo, revela uma notável diversidade em termos de uso. De fato, exibe uma variedade bastante evidente, embora haja categorias que se destacam mais. Ao nível de territórios artificializados, merece realce o tecido urbano, que ocupa cerca de 805 ha, correspondendo a 7,42% da extensão total do município. As áreas agrícolas e agroflorestais constituem uma parte significativa do território, abrangendo uma superfície total de 1.754,85 ha. Neste âmbito, merece destaque particular as culturas temporais de regadio, que ocupam aproximadamente 838 ha, seguindo-se os sistemas culturais e parcelares complexos com aproximadamente 308 ha. No que diz respeito a áreas de floresta, meios naturais e seminaturais, são claramente as categorias mais notáveis no território de Vila Nova de Cerveira, representando um total de 7.801,69 ha, ou seja, aproximadamente 72% da área total do município. Os terrenos caracterizados por matos também possuem alguma expressão, consistindo predominantemente em vegetação arbustiva de pequeno porte, além de incluírem algumas pastagens naturais pobres e áreas de pinhal em estado de degradação.

O povoamento florestal desta área é dominado pelo pinheiro bravo com 2.407 ha seguindo-se em importância os matos, as florestas mistas de resinosas, e os povoamentos de eucaliptos. Também é importante mencionar as grandes áreas ocupadas por espécies invasoras lenhosas, de *Acacia dealbata* (mimosa) e *Acacia melanoxylon* (austrália) na forma pura, mista, ou em sub coberto (sobretudo da austrália), de *Hakea saligna*, e de *Hakea decurrens* que ocupa de forma extrema uma proporção importante dos cerca de 2.600 ha ocupados por matos.

Dado que o estudo deste trabalho é determinado pela localização da *Hakea decurrens* é importante saber que tipos de rochas existem no concelho sendo que, o solo xistoso possui uma notável presença, ocupando 6.247,40 ha da área, correspondendo a 58,29% (Figura 4.2.).

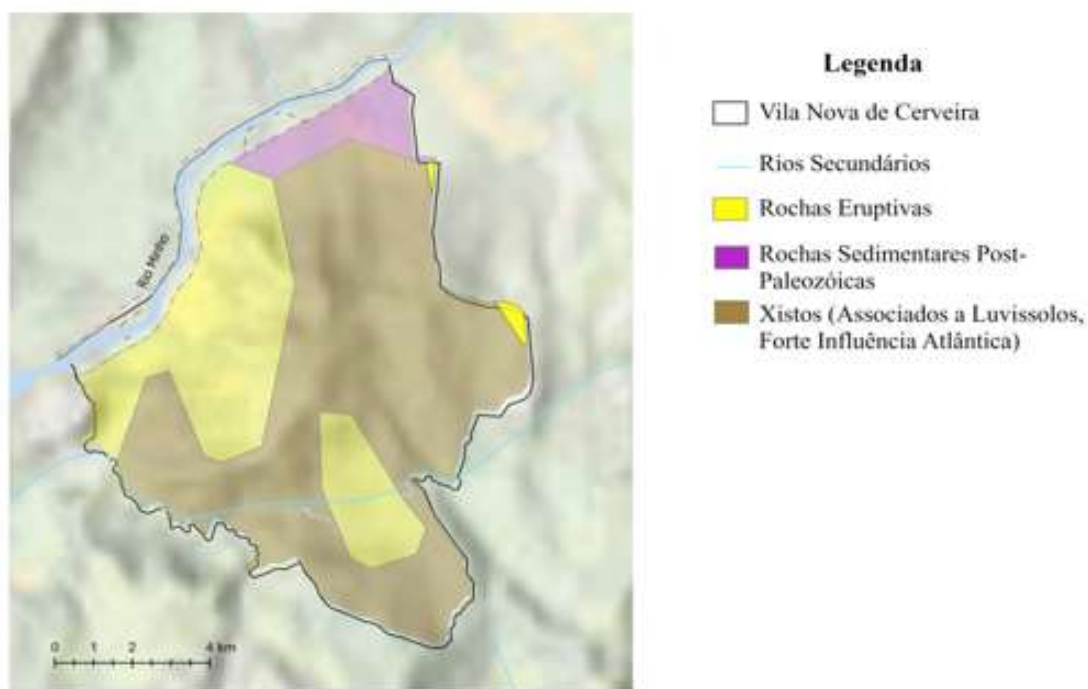


Figura 4.2. Tipos de rocha presentes no município.

4.2. Análise da importância das variáveis

O estudo da importância das diferentes variáveis espectrais utilizadas nesta dissertação desenvolveu-se através da opção “*Variable Importance*” do biomod2, que permite perceber qual o grau de contribuição das bandas para cada imagem no resultado final. Desta forma a identificação da importância das variáveis pode ser relevante no entendimento dos motivos por detrás das distribuições de espécies e ao tomar decisões a respeito de iniciativas de preservação ou administração.

Destacam-se de entre as 10 variáveis que mais contribuíram para o desempenho final do modelo de Consenso a banda 11 (relacionada com a zona espectral do SWIR 1), a banda 6 (relacionada com a zona espectral do Vermelho Borda 2), banda 5 (relacionada com a zona espectral do Vermelho Borda 1), banda 9 (relacionada com a zona espectral do Vapor de Água), banda 8a (relacionada com a zona espectral do Vermelho Borda 4) e banda 7 (relacionada com a zona espectral do Vermelho Borda 3) (Figura 4.3.).

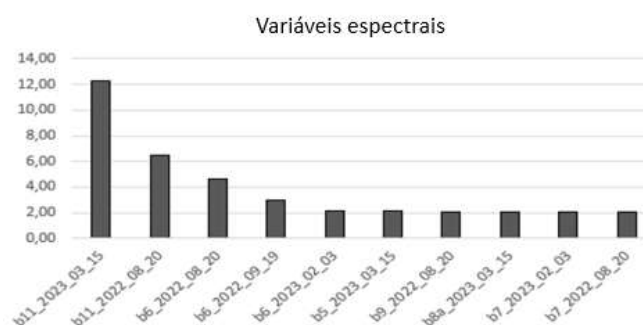


Figura 4.3. Percentagem das variáveis espectrais mais importantes conforme o biomod2.

Os resultados individuais de cada variável representadas por tabela no Anexo 3.

A banda que mais contribui para o modelo foi a banda 11, que apresenta um valor médio de 3,46%. Esta banda é composta por um “outlier” de 12,31%, influenciando a média total da banda. Estes valores indicam que a banda SWIR 1 pode ser influenciado pela humidade do solo, visto que a *Hakea decurrens* têm taxas de transpiração baixas devido à sua estrutura foliar do tipo agulha. A seguir a banda mais importante foi a banda 6, visto que apresenta um valor médio de 2,15% e um “outlier” de 4,63%, revelando-se útil para a monitorização da saúde das plantas e na distinção dos diferentes tipos de cobertura da vegetação. Para além das bandas já abordadas é de realçar também a banda 8a, banda 7, banda 9 e banda 8 pelo seu desempenho. Em contrapartida, as variáveis espectrais que menos contribuíram para o desenvolvimento do modelo foram as bandas 3, 4, 2 e 1 (Figura 4.4.). Os valores médios das bandas encontram-se representadas por um quadro no Anexo 4

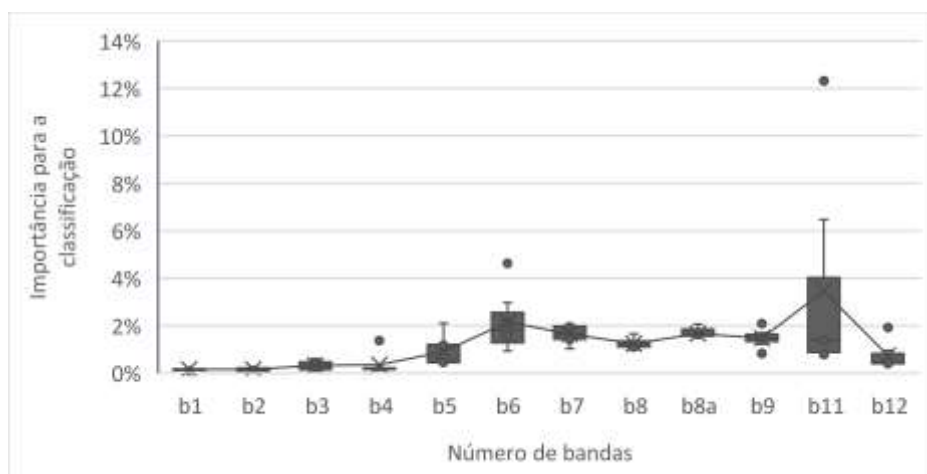


Figura 4.4. Importância das bandas para a classificação da espécie *Hakea decurrens*.

4.3.1 Análise da importância das variáveis temporais

Através da escolha da opção "Variable_Importance" no biomod2, é possível identificar o dia mais significativo para cada imagem no resultado final. Os dias mais significativos que impactaram o desempenho final do modelo de Consenso foram registrados nos dias 15 de março de 2023, 20 de agosto de 2022 e 19 de setembro de 2022. O modelo destacou o dia 15 de março de 2023 como o mais importante, exibindo uma média de 2,03%. No entanto, é importante observar que o valor de 12,31% é considerado um "outlier" dentro desse dia específico, exercendo uma influência substancial na média total do dia. Isso ocorre devido aos demais valores relacionados a esse dia, que são significativamente inferiores. Em seguida, o dia de maior importância foi o 20 de agosto de 2022, com uma média de 1,70%. No entanto, também se destaca a presença de dois "outliers" neste dia, com valores de 6,47% e 4,63%, respectivamente. Esses valores atípicos contribuem para a complexidade da interpretação do desempenho médio desse dia em particular. O terceiro dia mais crucial ocorreu em 19 de setembro de 2022 evidenciando uma média de 1,03% e atingindo um valor máximo de 2,97%. O dia menos importante foi o dia 6 de fevereiro de 2023, com uma média de 0,81% e um valor máximo de 1,46% (Figura 4.5.).

No geral, não foram observadas diferenças significativas em relação aos valores médios de cada data, visto que as condições atmosféricas como as presenças de nuvens não afetaram a qualidade das imagens, as distintas estações do ano não provocaram mudanças na vegetação e a iluminação solar relacionada à posição do sol em relação ao satélite não exerceu impacto a aparência das características da superfície terrestre nas imagens. Os valores médios das datas encontram-se representadas por um quadro no Anexo 5.

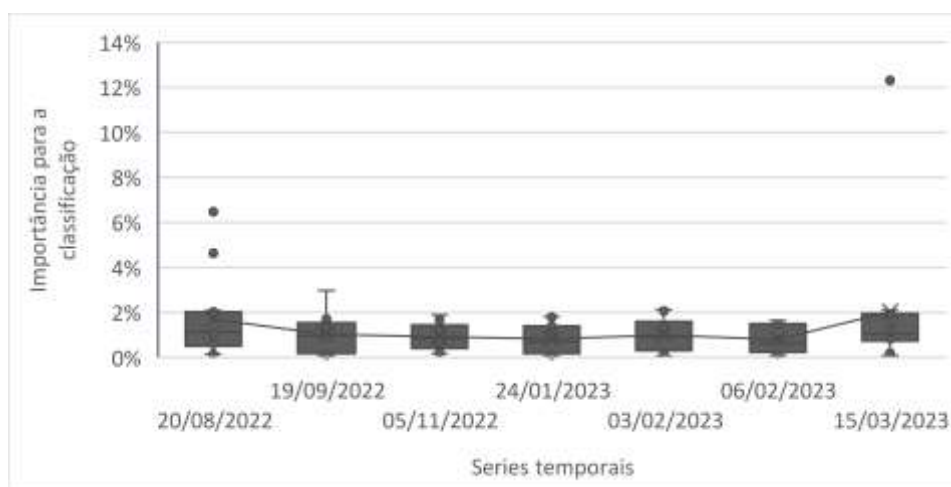


Figura 4.5. Importância das datas para a classificação da espécie *Hakea decurrens*.

4.4. Avaliação estatística e potencial da distribuição da *Hakea decurrens*

Os resultados mais favoráveis foram obtidos ao analisar o índice estatístico ROC com a utilização do classificador FA, apresentando valores superiores a 0,974 (Anexo 8). Além disso, é importante observar que o índice ROC obteve resultados consistentes com valores acima de 0,885 para todos os classificadores (Anexo 8). A avaliação do modelo apresentou variações notáveis ao considerar os valores de TSS e KAPPA entre os diferentes classificadores. Especificamente, no caso do FA, os modelos com base em TSS variaram entre 0,68 e 1 (Anexo 6), enquanto os modelos que se basearam em KAPPA obtiveram resultados variando entre 0,736 e 1 (Anexo 7). É importante destacar que o classificador RNA registrou os valores menos satisfatórios, com um TSS de 0,68 (Anexo 6).

Conforme evidenciado no quadro 4.1., podemos analisar os resultados referentes aos testes de corte, sensibilidade e especificidade para cada um dos índices estatísticos utilizados neste estudo. O valor teste demonstra um elevado poder de previsão (superior a 0,95). O valor de corte adotado corresponde ao valor do índice TSS (665), sendo a opção mais apropriada, uma vez que avalia tanto a presença quanto a ausência de forma precisa.

Valores acima desse limiar indicam áreas com semelhanças espectrais às áreas de treino. No que concerne à sensibilidade, obtemos valores de 96,266% para os índices KAPPA e TSS, indicando que o algoritmo de classificação tem uma probabilidade de 96,266% de corretamente identificar as presenças. Já o índice ROC apresenta uma sensibilidade maior onde o classificador tem uma probabilidade de 97,266% de classificar acertadamente a presenças. Quanto à especificidade, os valores de KAPPA e TSS atingem os 99,2%, o que significa que o algoritmo de classificação tem uma probabilidade de 99,2% de corretamente classificar as ausências. Ao contrário da sensibilidade o ROC apresenta uma especificidade com valores inferiores aos outros avaliadores (98,4%).

Quadro 4.1. Valores de teste, sensibilidade, especificidade e corte para cada índice estatístico utilizado.

	Valores de teste	Valores de corte	Sensibilidade	Especificidade
KAPPA	0.959	665	96.266	99.2
TSS	0.955	665	96.266	99.2
ROC	0.998	613	97.095	98.4

O biomod2 apresentou capacidade de distinguir áreas potencialmente invadidas de não invadidas, sendo o modelo de Consenso aquele que melhor descremina áreas do município

de Vila Nova de Cerveira com similaridade às áreas de treino com a *Hakea decurrens* (Figura 4.6.).

A previsão obtida neste estudo coincide com os padrões que ocorrem no local, onde a probabilidade de ocorrência desta espécie acontece maioritariamente nas áreas dominadas por matos onde rochas xistosas predominam. Outros fatores que podem influenciar a propagação da espécie são:

- Maior exposição solar a sudoeste facilita o crescimento da planta;
- Zonas de elevada altitude não tem muito valor comercial para o eucalipto;
- Área dominadas por florestas de produção, o que de tempos a tempos, implica o corte do coberto florestal e a movimentação das terras.

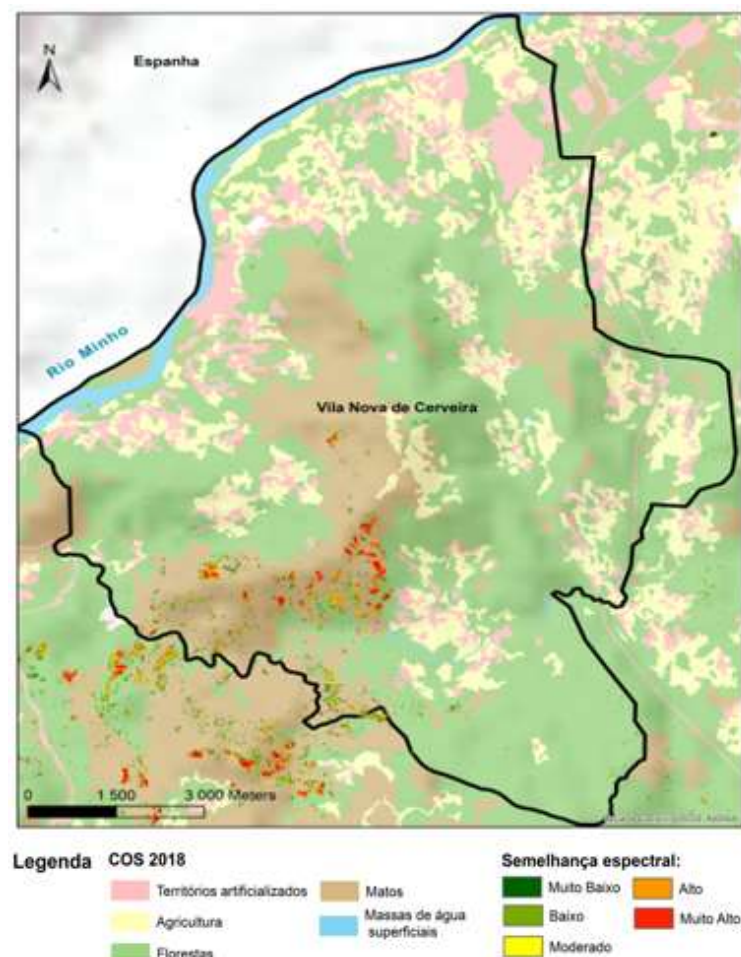


Figura 4.6. Distribuição potencial da *Hakea decurrens*, segundo o modelo de Consenso.

5. CONCLUSÃO

As espécies introduzidas em novas regiões devido às ações antrópicas são chamadas de espécies exóticas. Entre essas espécies, há um subgrupo conhecido como espécies exóticas invasoras, que inclui animais, vegetais e outros organismos que se estabeleceram e se difundiram, provocando impactos negativos na diversidade biológica, nos ecossistemas locais e nas diferentes espécies. Além disso, é importante destacar que muitas dessas espécies invasoras também afetam a capacidade da natureza de fornecer recursos essenciais para as pessoas, o que engloba conceitos como os serviços prestados pelos ecossistemas e a qualidade de vida (IPBES., 2023).

A detecção remota é cada vez mais uma solução viável para o estudo da invasão biológica permitindo monitorizar invasões, prever a dispersão de espécies invasoras, entender os processos de invasão e os impactos sobre a biodiversidade. Portanto, é essencial analisar e compreender o comportamento desta espécie no espaço e no tempo em relação à sua expansão territorial, sendo fundamental reduzir os impactos a médio e longo prazo.

Esta dissertação resulta na elaboração da cartografia das áreas invadidas pela *Hakea decurrens* para o município de Vila Nova de Cerveira (NW de Portugal). Para tal, a criação dos ortofotomapas com o auxílio do VANT DJI Matrice 210 e do software Agisoft Metashape são fundamentais para a discriminação desta planta, onde o Arc GIS Pro cartografa por fotointerpretação as manchas de áreas invadidas por esta espécie. Por outro lado, descarregamento de imagens do satélite (Sentinel-2A) e a correção de resolução dessas imagens por meio algoritmo de super-resolução DSen2 são essenciais para a construção metodológica desta dissertação. O biomod2 correlaciona as áreas criadas no Arc GIS Pro com as imagens satélite para classificar zonas espectralmente idênticas a fim de reconhecer as zonas invadidas por esta espécie. Esta classificação é composta por diversas bandas e datas (uma série de 7 datas entre agosto de 2022 e março de 2023).

Os resultados indiciam que a banda 11 foi a mais importante devido à *Hakea decurrens* ter taxas de transpiração baixas. Também é importante citar que o ROC em combinação com FA foi o melhor resultado obtido, apresentando valores superiores a 0,974. Em relação à probabilidade de ocorrência da *Hakea decurrens* acontece em áreas onde as rochas xistosas e os matos prevalecem.

No futuro seria crucial considerar o desenvolvimento e análise de séries temporais mais extensas e transversais a diversas estações e períodos de anos com vantagens da análise

de tendência e qualidade das classificações. Também seria fundamental experimentar outros índices de vegetação com o intuito de melhorar a detetabilidade e separabilidade desta espécie invasora. Quanto às áreas de treino, seria benéfico que estas fossem mais amplamente distribuídas e aprimoradas, permitindo uma marcação diferenciada com base no estágio de desenvolvimento da espécie (seja ela jovem ou adulta). Isso possibilitaria a detecção precoce de áreas sujeitas a invasão.

A obtenção de uma maior relevância no resultado final torna-se essencial ao incorporar um método de validação, podendo este abranger tanto a análise de fotografias aéreas capturadas por meio de drones ou então a ida às áreas designadas pelo biomod2, utilizando a interpretação visual direta.

Em adição, seria benéfico incorporar e cruzar a radiometria das imagens com diversos níveis de informação, tais como variáveis ambientais (por exemplo, temperatura ou índices bioquímicos), índices de paisagem, além de considerar atividades relacionadas ao uso humano ou pressão exercida sobre o ambiente. Poderia ser interessante implementar a mesma abordagem em várias regiões, como, por exemplo, na Serra de Arga, onde a *Hakea decurrens* é predominantemente encontrada, e comparar os resultados.

Os resultados obtidos pelo biomod2 revelam a capacidade de cartografar com resolução adequada possibilitando compreender e simular cenários contribuindo para a tomada de decisão que visa proteger e monitorizar os recursos sociais, ecológicos e económicos. A simplicidade de tratamento e acesso à informação capacita o aproveitamento dessas ferramentas de modelação, facilitando a compreensão do meio e dos processos bem como, fundamentar ou estabelecer possíveis formas de gestão e de resposta.

6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Espacial Europeia (ESA)., 2018. Introduzindo o Sentinel-2 URL: https://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel2/Introducing_Sentinel-2>. (Consultado em 6 de Janeiro de 2023)
- Aggarwal S., 2003. Principles of Remote Sensing Satellite. In: Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Agricultural Meteorology, pp. 23-38
- Almeida, R., 2020. Sentinel-2 Super-Resolution: High resolution for al (Bands). Up 42 URL: <https://up42.com/blog/tech/sentinel-2-superresolution> (Consultado em 14 Janeiro de 2023)
- Almeida, J., Freitas, H., 2000. A flora exótica e invasora de Portugal. Portugaliae Acta Biologica 19, pp. 159–176 acerca de algumas plantas vasculares invasoras em Portugal continental
- Almeida, J., Freitas, H., 2002. Acerca de algumas plantas vasculares invasoras em Portugal continental. Studia botanica 21, pp. 27–35
- Amorim, A., 2015. Detecção remota e geoprocessamento automático no estudo da evolução de margens estuarinas (Estuário do Tejo). Dissertação Mestrado em Geologia do Ambiente, Riscos Geológicos e Ordenamento do Território. Universidade de Lisboa
- Araújo, M., New, M., 2007. Ensemble forecasting of species distributions. Trends in Ecology & Evolution, 22, 42–47
- Bem, N. 2015. Gestão de plantas exóticas e invasoras no Parque Nacional de Escotismo da Caparica. Dissertação de Mestrado em Ecologia e Gestão Ambiental, Universidade de Lisboa Faculdade de Ciências
- Bolch, E., Santos, M., Ade, C., Khanna, S., Basinger, N., Reader, M., Hestir., E. 2020. Remote Detection of Invasive Alien Species. Remote Sensing of Plant Biodiversity pp 267-307
- Brando, V., Phinn, S., 2007. Coastal Aquatic Remote Sensing Applications for Environmental Monitoring and Management. Journal of Applied Remote Sensing
- Cardillo, M., Weston, P., Reynolds, Z., Olde, P., Mast, A., Lemmon, E., Lemmon, A., Bromham, L., 2017. The phylogeny and biogeography of *Hakea* (Proteaceae) reveals the role of biome shifts in a continental plant radiation. Evolution, 71, 1928–1943
- CBD (Secretariat of the Convention on Biological Diversity)., 2006. Global Biodiversity Outlook 2. Montreal. URL <http://www.biodiv.org> (Consultado em 6 Janeiro de 2023)
- CBD (Secretariat of the Convention on Biological Diversity)., 2009. What are Invasive Alien Species? Convention on Biological Diversity. URL: <http://www.cbd.int/idb/2009/about/what/> (Consultado em 19 de Janeiro de 2023)

- Chuvieco, E., 1995. Fundamentos de Teledetección Espacial. 2º ed. Madrid: Ediciones Rialp
- Colomina, I., Molina, P., 2014. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 92, pp. 79-97
- Comissão Europeia., 2014. Regulamento (EU) n.º 1143/2014 do Parlamento Europeu e do Conselho de 22 de Outubro de 2014, relativo à prevenção e gestão da introdução e propagação de espécies exóticas invasoras. *Jornal Oficial da União Europeia*. 4 de Novembro de 2014. 21 pp
- Costa, E., Seabra, V., 2019. Escala e tempo na análise da paisagem Scale and time in landscape analysis. *Revista Tamoios* 15(1):46
- Crosta, A., 1993. Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto. Campinas: IG/Unicamp
- Cruz, X., Parreiras, T., Vieira, F., Santos, J., 2021. Conceitos, comportamento espectral dos alvos e fotointerpretação de imagens no QGIS. Manual Núcleo do Conhecimento
- Dell, B., Kuo, J., Thomson, G., 1980. Development of proteoid roots in *Hakea obliqua* R. Br.(Proteaceae) grown in water culture. *Aust. J. Bot.*, 28, 27–37
- DJI., 2023. Support for Phantom 4 Pro. URL: <https://www.dji.com/pt/phantom-4> (Consultado em 10 Julho 2023)
- Eisenbeiss, H., Lee, K., 2011. UAV Photogrammetry. In 7th ISPRS Student Consortium and Wg VI/5 Summer School Spatial Information Sciences for Environmental Monitoring. 8-12
- EPPO., 2012. *Hakea sericea* (Proteaceae). European and Mediterranean Plant Protection Organization. [WWW Document]. URL: http://www.eppo.int/INVASIVE_PLANTS/iap_list/Hakea_decurrens.htm (Consultado em 2 Janeiro de 2023)
- EPPO., 2018. Pest Risk Analysis for *Hakea decurrens*. URL: http://www.iap-risk.eu/media/files/prs_exp_HKASE.pdf (Consultado em 10 Julho 2023)
- EPPO., 2022. *Hakea decurrens*. EPPO Bull. 2022. URL: <https://gd.eppo.int/taxon/HKASE> (Consultado em 10 Julho 2023)
- Estopianan, J., Sarvajean, M., Bonnet, P., Munoz, F., Joly, A., 2022. Deep Species Distribution Modeling From Sentinel-2 Image Time-Series: A Global Scale Analysis on the Orchid Family. *Front. Plant Sci.*, Vol 13
- ESRI., 2019. Environmental Systems Research Institute, product ArcGIS. URL: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/about-arcgis/overview> (Consultado em 27 Janeiro de 2023)
- European Space Agency (ESA)., 2019. – “Sentinel” - URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/home> (Consultado em 15 Janeiro 2023)
- Fernandes, M., 2008. Recuperação Ecológica de áreas invadidas por *Acacia dealbata* no vale do rio Gerês: um trabalho de Sísifo?. Dissertação de

Mestrado em Instrumentos e Técnicas de Apoio ao Desenvolvimento Rural. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal

- Florenzano, T., 2002. Imagens de satélites para estudos ambientais: São Paulo: Oficina de Textos
- Franklin, J., 1995. Predictive vegetation mapping: geographic modelling of Abiospatial patterns in relation to environmental gradients. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 19(4), 474–499
- Freitas, J., 2019. Influência da macrófita invasora *Egeria densa* na comunidade de macroinvertebra. Dissertação de Mestrado em Ecologia. Universidade do Minho Escola de Ciências, 16-20
- Ft Sistemas., 2023. FT-100 FH Alta eficiência com baixo investimento. URL: <http://flighttech.com.br/rotor-ft/ft-100-fh.html> (Consultado em 28 de Agosto de 2023)
- Genovesi, P., Shine, C., 2004. European Strategy on Invasive Alien Species. Nature and Environment No.137, Council of Europe Publishing. 67 p. URL: http://www.coe.int/t/dg4/cultureheritage/conventions/Bern/T-PVS/sc24_inf01_en.pdf. (Consultado em 28 de Janeiro de 2023)
- Gordon, A., 1993. The impact of the *Hakea* seed-moth Carposina autologa (Carposinidae) on the canopy-stored seeds of the weed *Hakea sericea* (Proteaceae). *Agric. Ecosyst. Environ.* 45, 105– 113
- Groom, P., Lamont, B., Markey, A., 1997. Influence of leaf type and plant age on leaf structure and sclerophylly in *Hakea* (Proteaceae). *Aust. J. Bot.*, 45, 827–838
- Guisan, A., & Thuiller, W., 2005. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, 8(9), 993–1009
- Guisan, A., Zimmermann, N., 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecol. Model.* 135, 147–186
- Hammill, K., Bradstock, R., Allaway, W., 1998. Post-fire seed dispersal and species re-establishment in proteaceous heath. *Aust. J. Bot.*, 46, 407–419
- He, K., Bradley, B., Cord, A., 2015. Will remote sensing shape the next generation of species distribution models?. *Remote Sens Ecol Conserv* 1:4–18
- Huelsman, K., Epstein, A., 2021. Assessing the ability to detect invasive plant species using drone-based leaf-scale visible and near-infrared imaging spectroscopy. University of Virginia
- IBGE., 2001. Introdução ao processamento digital de imagens. Rio de Janeiro: IBGE.
- ICNF., 2023a. Plano Sectorial da Rede Natura 2000 habitats naturais Charnecas secas europeias (4030). URL: <https://www.icnf.pt/api/file/doc/c4378de63d4b88f6> (Consultado em 19 Abril de 2023)

- ICNF., 2023b. Plano Sectorial da Rede Natura 2000 habitats naturais Matos termomediterrânicos pré-desértcos (5330). URL: <https://www.icnf.pt/api/file/doc/feb627a62c1907c3> (Consultado em 19 Abril de 2023)
- Invasoras.pt., 2023. “Ciclo de gestão de planta invasoras” URL:<http://invasoras.pt/gestao-invasoras/esquema-gestao/> (Consultado em 2 de Janeiro de 2023)
- Invasoras.pt., 2023. “*Hakea decurrens*” URL: <https://www.invasoras.pt/pt/planta-invasora/hakea-decurrens> (Consultado em 1 de Janeiro de 2023)
- Jacobson, T., Gerber, D; Azevedo, J., 2023. Invasiveness, Monitoring and Control of *Hakea decurrens*: A Systematic Review. Plants 12 (4), 751
- Joshi, C., Leeuw, J. e van Duren, I., 2004. Remote sensing and GIS applications for mapping and spatial modelling of invasive species. In: ISPRS, Istanbul. 669-677
- Kettunen, M., Genovesi, P., Gollasch, S., Pagad, S., Starfinger, U., Ten Brink, P., Shine, C., 2009. Technical support to EU strategy on invasive alien species (IAS)-Assessment of the impacts of IAS in Europe and the EU. Institute for European Environmental Policy (IEEP), Brussels, Belgium.
- Kluge, R., Richardson, D., 1983. Progress in the fight against hakea. Veld Flora 69, 136–138
- Kluge, R., Beer, H., 1984. Silky hakea. Weeds and Pesticides subdivision. Plant Protection Research Institute. Farming in of South Africa. 2-7
- Kluge, R., Naser, S., 1991. Biological control of *Hakea sericea* (Proteaceae) in South Africa. Agriculture, Ecosystems and Environment, 37, pp. 91-113
- Lamont, B., 1972. The Effect of soil nutrients on the production of proteoid roots by *Hakea* Species. Aust. J. Bot., 20, 27–40
- Lamont, B., 1973. Factors affecting the distribution of proteoid roots within the root systems of two *Hakea* species. Aust. J. Bot., 21, 165–187
- Lamont, B., He, T., Lim, S., 2016. *Hakea*, the world’s most Sclerophyllous genus, arose in Southwestern Australian Heathland and diversified throughout Australia over the past 12 million years. Aust. J. Bot., 64, 77–88
- Lanaras, C., Bioucas-Dias, J., Galliani, S., Baltsavias, E., Schindler, K., 2018. Super-resolution of Sentinel-2 images: Learning a globally applicable deep neural network. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 146, 305–319
- Le Maitre, D., 1990, The influence of seed aging on the plant on seed germination in *Protea neriifolia* (Proteaceae). South African Journal of Botany, 56 (1), pp. 49-53
- Lin, J., Heping, T., Yangchun, W., Huang, Z., 2010. Practical application of unmanned aerial vehicles for mountain hazards survey. In Proceedings

- of 18th International Conference of Geoinformatics, 18-20 June 2010, Beijing, China, pp. 1-5
- Lira, C., Amorim, A., Silva, A., Taborda, R., 2016. Sistemas de Informação Geográfica: Análise de Dados de Satélite. DGRM, Lisboa, Portugal
- MA, 1999. Decreto-Lei nº. 565/99 de 21 de Dezembro. Regula a introdução na Natureza de espécies não indígenas da flora e da fauna. Ministério do Ambiente, Diário da República no295 – I Série – A 9100–9115
- MA, 2019. Decreto-Lei nº 92/2019 de 10 de Julho. Controlo, detenção, introdução na natureza e repovoamento de espécies exóticas da flora e fauna. Ministério do Ambiente, Diário da República no130 – I Série
- Maguire, D., 2008. ArcGIS: General Purpose GIS Software System. Encyclopedia of GIS. pp 25–31
- Marchante, H., 2001. Invasão dos ecossistemas dunares portugueses por *Acacia*: uma ameaça para a biodiversidade nativa. Dissertação de Mestrado, UC, Coimbra
- Marchante, H., Marchante, E., Freitas, H., 2005. Plantas invasoras em Portugal - fichas para identificação e controlo. Ed. Coimbra
- Marchante, H., Morais, M., Freitas, H., Marchante, E., 2014. Guia prático para a identificação de Plantas Invasoras em Portugal. Coimbra. 207 pp. In Imprensa da Universidade de Coimbra, p 12-14
- Martins, F., 2012. Utilização de técnicas de Deteção Remota na identificação de *Acacia* sp. na Região Centro Sul de Portugal Continental. Dissertação de Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica. Instituto Politécnico de Castelo Branco
- Marques, B., 2019. Análise de Espécies Invasoras e Respetiva Proposta de Intervenção – Concelho de Gavião. Tese de Mestrado em Recursos Florestais. Instituto Politécnico de Coimbra
- Mason, R., Coole, J., Toupeiras, A., Leishman, M., 2008. Produção reprodutiva de plantas invasoras versus nativas. Glob. Eco. Biogeogr., 17, 633-640
- Mather, P., 2004. Computer Processing of Remotely-Sensed Images. An Introduction. 3rd ed. John Wiley & Sons Ltd, 2004. ISBN: 0-470-84918-5 (HB); 0-470-84919-3 (PB)
- Melo, D., 2015. Uso de dados ikonos II na análise urbana: Testes operacionais na zona leste de São Paulo. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, INPE-9865-TDI/870
- Miller, J., & Rogan, J., 2007. Using GIS and remote sensing for ecological mapping and monitoring
- Moll, E., Trinder-Smith, T., 1992. Invasion and control of alien woody plants on the Cape peninsula mountains South Africa—30 Years on. Biol. Conserv, 60, 135–143
- Moodley, D., Geerts, S., Rebelo, T., Richardson, D.M., Wilson, J., 2014. Site-specific conditions influence plant naturalization: The case of alien Proteaceae in South Africa. Acta Oecol., 59, 62–71

- Morais, M., Cabral, J., Gonçalves, B., 2021. Seasonal variation in the leaf physiology of co-occurring invasive (*Hakea decurrens*) and native (*Pinus pinaster*) woody species in a Mediterranean-type ecosystem. *Forest Ecology and Management*. vol 480
- Mouta, N., Silva, R., Pais, S., Alonso, J., Gonçalves, J., Honrado, J., & Vicente, J., 2021. ‘The Best of Two Worlds’—Combining Classifier Fusion and Ecological Models to Map and Explain Landscape Invasion by an Alien Shrub. *Remote Sensing*, 13(16)
- Mustart, P., Cowling, R., 1991. Seed germination of four serotinous Agulhas Plain Proteacea. *South African Journal of Botany*, 57 (6), pp. 310-313
- Novo, E. e Ponzoni, F., 2001. Introdução ao Sensoriamento Remoto. São José dos Campos: Instituto Nacional de pesquisas Espaciais, Divisão de Sensoriamento Remoto
- Paredes, C., 2015. Cartografia para a monitorização e controlo de áreas de *Hakea sericea* com processos de detecção remota (satélite e drone). Tese de Doutoramento. Universidade de Vigo
- Parker, I., Simberloff, D., Lonsdale, W., Goodell, K., Wonham, M., Kareiva, P., Williamson, M., Von Holle, B., Moyle, P., Byers, J., Goldwasser, L., 1999. Impact: toward a framework for understanding the ecological effects of invaders. *Biological Invasions* 1, pp. 3-19
- Pearson, R., 2007. Species’ distribution modeling for conservation educators and practitioners. 50.
- Pimentel, D., mcnair, S., Janecka, J., Wightman, J., Simmonds, C., O’Connell, C., Wong, E., Russel, L., Zern, J., Aquino, T., Tsomondo, T., 2001. Economic and environmental threats of alien plant, animal, and microbe invasions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 84, pp. 1–20
- Queirós, C., Cardoso, S., Ferreira, J., Miranda, I., Lourenço, M., Pereira, H., 2019. Characterization of *Hakea sericea* Fruits Regarding Chemical Composition and Extract Properties. *Waste and Biomass Valorization* 11:4859–4870
- Richards, M., Groom, P., Lamont, B., 1997. A Trade-off between Fecundity and drought susceptibility in adults and seedlings of *Hakea* Species as influenced by leaf morphology. *Aust. J. Bot.*, 45, 301–309
- Richardson, D., Van Wilgen, B., Mitchell, D., 1987. Aspects da ecologia reprodutiva de quatro espécies de *Hakea australianas* (Proteaceae) na África do Sul. *Oecologia*, 71, 345-354
- Richardson, D., Macdonald, I., Forsyth G., 1989. Reductions in plant species richness under stands of alien trees and shrubs in the fynbos biome. *South African Forestry Journal*. 149:1-8
- Richardson, D., Pyšek, P., Rejmánek, M., Barbour, MG., Panetta, F., West, C., 2000. Naturalization and invasion of alien plants: concepts and definitions. *Divers Distrib* 6:93-107
- Richardson, D., Rejmánek, M., 2011. Trees and shrubs as invasive alien species—A global review. *Divers. Distrib.*, 17, 788–809

- Rocha, F., Sousa, P., 2007. Integração de dados estatísticos na classificação de imagens de satélite. Estudos para o Planeamento Regional e Urbano nº 70 Centro de Estudos Geográficos. Universidade de Lisboa
- Rouse, J., Benton, A., Toler, R., Haas, R., 1975. Three examples of applied remote sensing of vegetation. In: NASA earth resources survey symposium, vol 1-C. NASA, Houston, pp 1797–1810
- IPBES., 2023. Summary for Policymakers of the Thematic Assessment Report on Invasive Alien Species and their Control of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. IPBES secretariat, Bonn, Germany
- Santos, A. I., Calafate, L., 2018. Espécies Invasoras, Rev. Ciência Elem., V6(01):004
- Santos, C., 2020. Espécies Invasoras no Concelho de Sátão: Mapeamento e propostas de intervenção. Dissertação de Mestrado em Recursos Florestais. Politécnico de Coimbra Escola Superior Agrária
- Secretariat of CBD, 2005. Handbook of the Convention on Biological Diversity Including its Cartagena Protocol on Biosafety, 3rd edition, Biological Conservation. Montreal, Canada
- Serralheiro, D., 2018. Impacte da *Hakea sericea* no ecossistema da ZIF do Marão: Situação atual e cenários evolutivos. Tese de Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica e Ordenamento do Território. Universidade do Porto
- Silva, R., 2019. Avaliação de risco de espécies de plantas exóticas um contributo para a prevenção das invasões biológicas. Dissertação de Mestrado em recursos florestais. Politécnico de Coimbra. Escola Superior Agrária
- Thomsen, M., Byers, J., Schiel, D., Bruno, J., Olden, J., Wernberg, T., Silliman, B., 2014. Impacts of marine invaders on biodiversity depend on trophic position and functional similarity. Marine Ecology Progress Series, 495, 39-47
- Thuiller W., Lafourcade B., Engler R., Araújo M., 2009. BIOMOD – a platform for ensemble forecasting of species distributions, Laboratoire d'Ecologie Alpine, UMR CNRS 5553
- USACE (U. S. Army Corps of Engineers), 2003. Engineering and Design: Remote Sensing: Engineer Manual. Washington
- UTAD, 2014. Jardim Botânico da UTAD. <http://jb.utad.pt/> (Consultado em 10 de Março de 2023)
- Van Wilgen, B., Forsyth, G., Le Maitre, D., Wannenburgh, A., Kotzé, J., Van Den Berg, E., Henderson, L., 2012. An assessment of the effectiveness of a large, national-scale invasive alien plant control strategy in South Africa. Biol. Conserv., 148, 28–38
- Vicente, J., Fernandes, R., Lomba, A., Pinto, A., Alonso, J., Alves, P., Gonçalves, J., Marchante, H., Marchante, E., Honrado, J., 2011. O Desafio atual e futuro da gestão das espécies exóticas invasoras nos espaços florestais do Norte de Portugal. In Tereso, J., HONRADO, J.,

- Pinto, A., Rego, F.C. (Eds.), *Florestas Do Norte de Portugal: História, Ecologia e Desafios de Gestão*. InBio - Rede de Investigação em Biodiversidade e Biologia Evolutiva, Porto, pp. 386–418
- Vieira, R., 2002. *Flora da Madeira: Plantas Vasculares Naturalizadas no Arquipélago da Madeira*. Câmara Municipal do Funchal, Madeira
- Vilà, M., Basnou, C., Pyšek, P., Josefsson, M., Genovesi, P., Gollasch, S., Nentwig, W., Olenin, S., Roques, A., Roy, D., Hulme, P., 2010. How well do we understand the impacts of alien species on ecosystem services? A pan-European, cross-taxa assessment. *Frontiers in Ecology and the Environment* 8, pp. 135–144
- Vitousek, P., D'Antonio, C., 1997. Introduced species: a significant component of human-caused global change. *New Zealand Journal of Ecology* 21, pp. 1–16
- Weber, E., 2003. *Invasive plant species of the world: a reference guide to environmental weeds*. Cabi publishing, 560 pp
- Weston, P., 2007. Proteaceae. In: Kubitzki, K. (ed.) *Flowering Plants · Eudicots. The Families and Genera of Vascular Plants*, pp. 364–404. Springer, Berlin
- Whelan, R., 1986. Seed dispersal in relation to fire. *Seed Dispersal*, (ed. D.R. Murray), pp. 237-271. Academic Press, Sydney, Australia
- Wilgen, B., Richardson, D., 1985. The effects of alien shrub invasions on vegetation structure and fire behaviour in South African fynbos shrublands: a simulation study. *Journal of Applied Ecology*, 22(3):955-966
- Wood, A., Morris, M., 2007. Impact of the gall-forming rust fungus *Uromycladium tepperianum* on the invasive tree *Acacia saligna* in South Africa: 15 years of monitoring. *Biological Control* 41: 68- 77
- Xavier, L., Júnior., Martins, G., Bravo, J., Vieira, B., 2019. Potencial de Imagens Multiespectrais Sentinel-2 na Detecção de Nematoides na Cultura Cafeeira, *Revista Brasileira de Geomática*
- Ziller, S., Zalba, S., 2007. Propostas de ação para prevenção e controle de espécies exóticas invasoras. *Natureza & Conservação* - vol. 5 - nº2

ANEXOS

Anexo 1: Identificação e características da Espécie segundo o invasoras.pt

Nome científico: *Hakea decurrens* R.Br.

Nomes vulgares: háquea-picante, espinheiro-bravo, salina, háquea-espinhosa

Família: Proteaceae

Estatuto em Portugal: integra a Lista Nacional de Espécies Invasoras (anexo II do Decreto-Lei nº 92/2019, de 10 julho), ainda que surja com o nome *Hakea sericea* Schrader.

Nível de risco: 21 | Valor obtido de acordo com um protocolo adaptado do Australian Weed Risk Assessment), segundo o qual valores acima de 13 significam que a espécie tem risco de ter comportamento invasor no território Português

Arbusto ou pequena árvore de até 4 m, de copa irregular.

Folhas: perenes, em agulha de 0,5-1,5 mm de diâmetro, muito robustas, com 4-8 cm, extremamente aguçadas, verde-escuras a verde-acinzentadas.

Flores: brancas, pouco vistosas, reunidas em fascículos axilares com 1-7 flores.

Frutos: folículos lenhosos, com 3 (-4) cm, castanho escuros, com crista e bico patentes, contendo duas sementes aladas, pretas. Flores pouco vistosas, reunidas em pequenos grupos nas axilas das folhas

Floração: janeiro a abril

Reproduz-se por via seminal. sementes são libertadas quando a árvore é queimada ou morre.

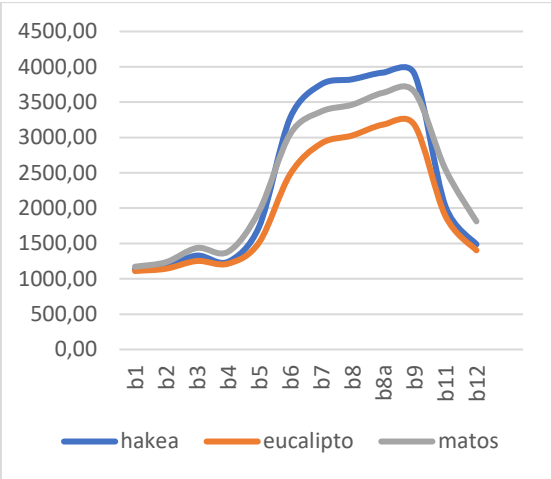
Distribuição em Portugal: Portugal continental (Trás-os-Montes, Minho, Douro Litoral, Beira Baixa, Beira Litoral, Estremadura, Ribatejo, Baixo Alentejo, Algarve).

Espécie é invasora também na Espanha, África do Sul, Nova Zelândia.

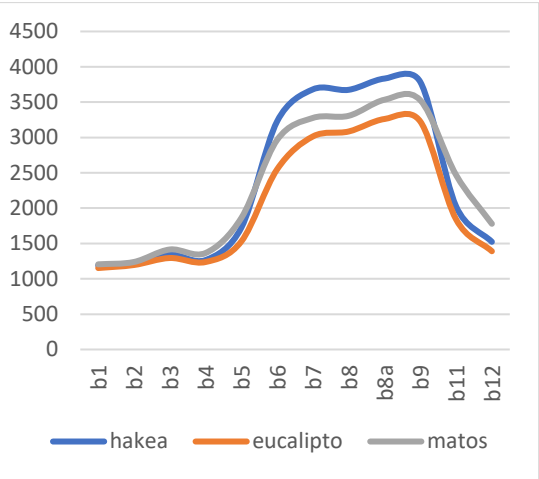
Razão da introdução para fins ornamentais e para formação de sebes de proteção.

Anexo 2: Valor médio de refletância de cada dia para cada cobertura do solo.

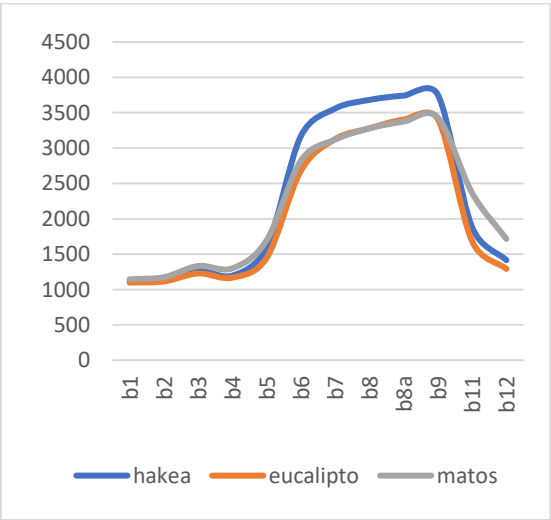
20/08/2022



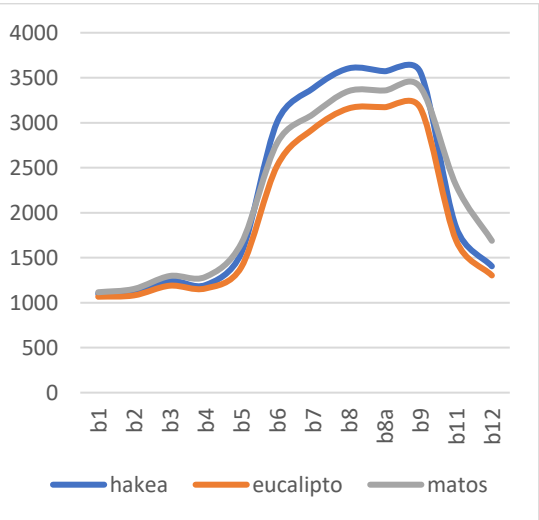
19/09/2022



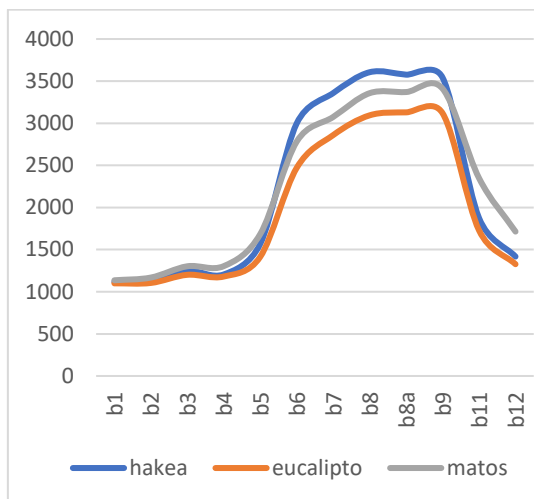
05/11/2022



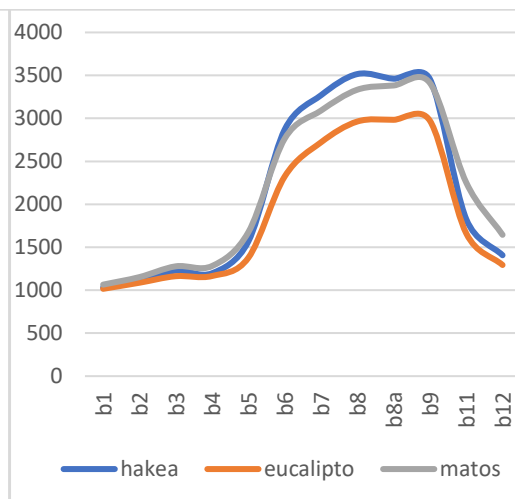
15/03/2023



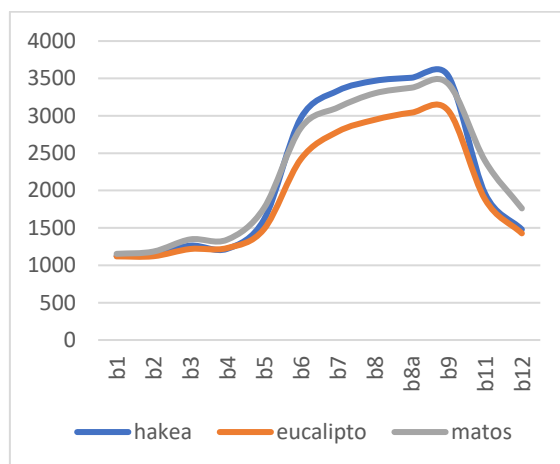
03/02/2023



06/02/2023



15/03/2023



Anexo 3 Importância das variáveis

	Variáveis	%		Variáveis	%		Variáveis			Variáveis	%
1	b11_20230315	12,31	22	b11_20230203	1,59	43	b11_20220919	0,97	64	b2_20221105	0,25
2	b11_20220820	6,47	23	b9_20221105	1,57	44	b12_20220919	0,95	65	b4_20221105	0,25
3	b6_20220820	4,63	24	b8a_20220919	1,50	45	b6_20230315	0,94	66	b2_20230315	0,19
4	b6_20220919	2,97	25	b9_20230203	1,47	46	b9_20230315	0,82	67	b4_20230124	0,18
5	b6_20230203	2,14	26	b9_20230206	1,46	47	b11_20230206	0,80	68	b4_20220820	0,18
6	b5_20230315	2,11	27	b7_20230124	1,46	48	b12_20220820	0,69	69	b4_20230203	0,18
7	b9_20220820	2,09	28	b7_20221105	1,41	49	b11_20221105	0,68	70	b1_20221105	0,18
8	b8a_20230315	2,07	29	b11_20230124	1,39	50	b3_20220820	0,61	71	b1_20220919	0,18
9	b7_20230203	2,06	30	b4_20230315	1,37	51	b3_20221105	0,50	72	b1_20230206	0,16
10	b7_20220820	2,02	31	b8_20230203	1,36	52	b5_20230206	0,47	73	b3_20220919	0,16
11	b7_20220919	1,95	32	b8_20220919	1,33	53	b12_20221105	0,46	74	b1_20220820	0,16
12	b12_20230315	1,93	33	b5_20221105	1,23	54	b3_20230315	0,45	75	b2_20220820	0,15
13	b8a_20221105	1,89	34	b9_20230124	1,21	55	b5_20230203	0,45	76	b4_20230206	0,15
14	b8a_20230124	1,81	35	b5_20220820	1,18	56	b5_20230124	0,45	77	b3_20230124	0,14
15	b6_20230124	1,79	36	b8_20220820	1,17	57	b5_20220919	0,44	78	b4_20220919	0,12
16	b9_20220919	1,71	37	b8_20230206	1,11	58	b12_20230124	0,41	79	b2_20230124	0,12
17	b8_20221105	1,66	38	b8_20230315	1,11	59	b12_20230203	0,39	80	b1_20230315	0,09
18	b8a_20230203	1,65	39	b8a_20220820	1,08	60	b12_20230206	0,35	81	b3_20230206	0,09
19	b7_20230206	1,65	40	b7_20230315	1,03	61	b1_20230203	0,31	82	b2_20220919	0,08
20	b8a_20230206	1,63	41	b6_20221105	0,98	62	b3_20230203	0,30	83	b2_20230203	0,06
21	b6_20230206	1,59	42	b8_20230124	0,97	63	b2_20230206	0,27	84	b1_20230124	0,06

Anexo 4 Valor médio das bandas espectrais mais importantes em percentagem (%).

	Bandas espectrais do sentinel-2	Percentagem da importância média (%)
1.º	Banda 11	3,46
2.º	Banda 6	2,15
3.º	Banda 8a	1,67
4.º	Banda 7	1,60
5.º	Banda 9	1,43
6.º	Banda 8	1,30
7.º	Banda 5	0,92
8.º	Banda 12	0,75
9.º	Banda 3	0,33
10.º	Banda 4	0,19
11.º	Banda 2	0,18
12.º	Banda 1	0,12

Anexo 5 Valor médio das datas mais importantes em percentagem (%).

	Serias temporal	Percentagem da importância média (%)
1.º	15/03/2023	2,03
2.º	20/08/2022	1,70
3.º	19/09/2022	1,03
4.º	03/02/2023	1,00
5.º	05/11/2022	0,92
6.º	24/01/2023	0,83
7.º	06/02/2023	0,81

Anexo 6 Índice estatístico TSS

Resultados finais de modelo estatístico TSS PA1

	RUN1	RUN2	RUN3	RUN4	RUN5	RUN6	RUN7	RUN8	RUN9	RUN10	Full
RNA	0.819	0.859	0.92	0.877	0.958	0.8	0.899	0.779	0.938	0.877	0.959
MAXENT	0.838	0.918	0.819	0.797	0.958	0.859	0.819	0.938	0.878	0.835	0.942
FA	0.875	0.918	1	0.958	1	0.979	0.938	0.958	0.96	0.856	1

Resultados finais de modelo estatístico TSS PA2

	RUN1	RUN2	RUN3	RUN4	RUN5	RUN6	RUN7	RUN8	RUN9	RUN10	Full
RNA	1	0.918	0.939	0.938	0.92	0.899	0.859	0.8	0.918	0.939	0.934
MAXENT	0.88	0.856	0.816	0.776	0.859	0.837	0.857	0.819	0.837	0.917	0.967
FA	1	0.918	0.938	0.939	1	0.897	0.918	0.917	0.896	0.899	1

Resultados finais de modelo estatístico TSS PA3

	RUN1	RUN2	RUN3	RUN4	RUN5	RUN6	RUN7	RUN8	RUN9	RUN10	Full
RNA	0.918	0.96	0.899	0.938	0.918	0.939	0.917	0.938	0.68	0.939	0.975
MAXENT	0.897	0.838	0.918	0.837	0.899	0.979	0.897	0.918	0.795	0.878	0.963
FA	0.939	0.918	0.979	0.837	0.939	0.979	0.939	0.939	0.875	0.918	1

Anexo 7 Índice estatístico KAPPA

Resultados finais de modelo estatístico KAPPA PA1

	RUN1	RUN2	RUN3	RUN4	RUN5	RUN6	RUN7	RUN8	RUN9	RUN10	Full
RNA	0.843	0.876	0.938	0.852	0.94	0.84	0.908	0.81	0.911	0.852	0.946
MAXENT	0.846	0.91	0.843	0.789	0.94	0.876	0.843	0.911	0.878	0.797	0.922
FA	0.827	0.91	1	0.94	1	0.97	0.911	0.94	0.969	0.843	1

Resultados finais de modelo estatístico KAPPA PA2

	RUN1	RUN2	RUN3	RUN4	RUN5	RUN6	RUN7	RUN8	RUN9	RUN10	Full
RNA	1	0.91	0.939	0.911	0.938	0.908	0.876	0.84	0.91	0.939	0.917
MAXENT	0.906	0.824	0.793	0.761	0.876	0.821	0.849	0.843	0.821	0.883	0.958
FA	1	0.91	0.911	0.939	1	0.881	0.91	0.883	0.855	0.908	1

Resultados finais de modelo estatístico KAPPA PA3

	RUN1	RUN2	RUN3	RUN4	RUN5	RUN6	RUN7	RUN8	RUN9	RUN10	Full
RNA	0.91	0.969	0.908	0.911	0.91	0.939	0.883	0.911	0.736	0.939	0.97
MAXENT	0.881	0.846	0.91	0.821	0.908	0.97	0.906	0.91	0.766	0.878	0.952
FA	0.939	0.91	0.97	0.843	0.939	0.97	0.939	0.939	0.873	0.91	1

Anexo 8 Índice estatístico ROC

Resultados finais de modelo estatístico ROC PA1

	RUN1	RUN2	RUN3	RUN4	RUN5	RUN6	RUN7	RUN8	RUN9	RUN10	Full
RNA	0.906	0.946	0.96	0.962	0.98	0.898	0.949	0.886	0.991	0.965	0.995
MAXENT	0.934	0.949	0.933	0.899	0.969	0.922	0.904	0.959	0.943	0.925	0.983
FA	0.977	0.991	1	0.996	1	0.998	0.988	0.996	0.998	0.98	1

Resultados finais de modelo estatístico ROC PA2

	RUN1	RUN2	RUN3	RUN4	RUN5	RUN6	RUN7	RUN8	RUN9	RUN10	Full
RNA	1	0.974	0.974	0.993	0.96	0.947	0.925	0.92	0.965	0.966	0.984
MAXENT	0.94	0.937	0.919	0.885	0.937	0.925	0.922	0.917	0.915	0.964	0.986
FA	1	0.991	0.993	0.995	1	0.983	0.992	0.989	0.983	0.991	1

Resultados finais de modelo estatístico ROC PA3

	RUN1	RUN2	RUN3	RUN4	RUN5	RUN6	RUN7	RUN8	RUN9	RUN10	Full
RNA	0.962	0.979	0.955	0.99	0.978	0.972	0.965	0.991	0.887	0.979	0.995
MAXENT	0.946	0.907	0.98	0.917	0.958	0.985	0.974	0.976	0.924	0.941	0.983
FA	0.997	0.974	0.999	0.979	0.995	0.994	0.998	0.997	0.982	0.986	1