



Mapeamento Mensal do Estado da Vegetação no Âmbito das Políticas Públicas de Dados Abertos do projeto SMOS

Mapas Intra-Anuais do Estado da Vegetação direcionados para o público em
geral e produzidos com imagens Sentinel-2

Pedro Luís Pires Fernandes

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre em Ciência e Sistemas
de Informação Geográfica

Mapeamento Mensal do Estado da Vegetação no Âmbito das Políticas Públicas de Dados Abertos do projeto SMOS

Mapas Intra-Anuais do Estado da Vegetação direcionados para o público em geral e produzidos com imagens Sentinel-2

Tese orientada por

Professor Doutor Mário Caetano

coorientada por

Doutor Pedro Benevides

30 de Novembro 2022

DECLARAÇÃO DE ORIGINALIDADE

Declaro que o trabalho contido neste documento é da minha autoria e não de outra pessoa. Toda a assistência recebida de outras pessoas está devidamente assinalada e é efetuada referência a todas as fontes utilizadas (publicadas ou não).

O trabalho não foi anteriormente submetido ou avaliado na NOVA Information Management School ou em qualquer outra instituição.

Campus de Campolide - Lisboa, 30 de Novembro 2022

Pedro Luís Pires Fernandes

[a versão assinada pelo autor foi arquivada nos serviços da NOVA IMS]

DEDICATÓRIA

À minha avó Luísa.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Mário Caetano, pela orientação, paciência e oportunidade de trabalhar na DGT num projeto com utilidade real e resultados práticos.

Ao Doutor Pedro Benevides, pela imensa paciência na revisão e refinação da estrutura e conteúdo desta tese, e pela partilha da sua experiência pessoal.

Ao Doutor Rafael Lopes da Silva, que mesmo não tendo qualquer obrigação de me ajudar ou atender às minhas dúvidas, foi muito além da boa educação e simpatia no processo de estruturação desta tese, correndo o risco de fazer um amigo.

Ao Francisco, da equipa técnica da DGT, pela paciência nas respostas às minhas inúmeras questões dos mais variados assuntos, e pela qualidade dos exemplos apresentados.

À equipa técnica da DGT, pelo suporte e cooperação no desenvolvimento dos MIAEV, e por toda a aprendizagem e experiência derivada das nossas conversas.

À Inês, porque acreditou em mim desde o início, e me deu a liberdade de acreditar em mim próprio. Pela atenção, pelo carinho e porque num mundo de dúvidas e incertezas, há coisas que fazem sentido.

Ao meu irmão Nuno, por me ter acompanhado ao longo de já mais de duas décadas, pela inspiração, e por consistentemente me surpreender no seu desenvolvimento pessoal.

À minha Mãe, Luísa, que nunca desistiu de me dar todas as oportunidades que precisei, muito para além do que seria expectável e provavelmente muito para além do que eu, na minha ignorância, merecia.

Mapeamento Mensal do Estado da Vegetação no Âmbito das Políticas Públicas de Dados Abertos do projeto SMOS

Mapas Intra-Anuais do Estado da Vegetação direcionados para o público em geral e produzidos com imagens Sentinel-2

RESUMO

Este trabalho concentra num documento as partes principais da pesquisa, construção e justificação de um dos novos produtos do projeto SMOS, os Mapas Intra-Anuais do Estado da Vegetação. A DGT, dentro das suas competências, já produz uma Carta de Uso e Ocupação do Solo (COS) com uma periodicidade de 3 anos, e uma COS Simplificada (COSc) com periodicidade de 1 ano. Estes novos produtos pretendem preencher a necessidade da avaliação intra-anual (mensal) do estado da vegetação, num produto capaz de captar a variabilidade da paisagem. Fundamentalmente, este trabalho pergunta: “Como avaliar intra-anualmente o estado da vegetação?” de Portugal continental, usando imagens de satélite e atendendo a critérios como a maximização da especificidade espacial, da precisão e independência dos dados e minimizando os custos e a redundância dos produtos. A metodologia é pragmática, interessada maioritariamente nos melhores resultados possíveis, e passa pela utilização de imagens do satélite Sentinel-2, recolhidas do servidor da THEIA, as quais são utilizadas para produzir compósitos mensais que por sua vez são a base dos MIAEV. Os produtos resultantes são mensuravelmente capazes de detetar e avaliar qualitativamente o estado da vegetação, provando-se úteis no acompanhamento do estado de culturas intra-anuais, no destacar de mudanças bruscas no estado da vegetação e na deteção de anomalias em relação a um período homólogo. Estas contribuições, nomeadamente a disponibilização de uma série temporal de imagens desde 2017 até 2022 atualizada em tempo quase real, estabelecem uma base sólida e factual de produtos capazes de avaliar intra-anualmente o estado da vegetação, permitindo a um qualquer indivíduo ou instituição explorar e apresentar estudos mais específicos.

Monthly Vegetation Status Mapping within SMOS's Public Policies of Open Data

Intra-Annual Vegetation Status Maps directed towards the general public and produced with Sentinel-2 imagery

ABSTRACT

This document is a summary of the all the work, research, and reasoning behind the new SMOS products, the MIAEV. DGT already produces products like the “Carta de Uso e Ocupação do Solo” (COS), every 3 years, and “COS Simplificada” (COSc), every year. These new products (MIAEV) aim to fill the need of a more frequent evaluation of the vegetation status, more specifically on a month-to-month basis. At its core, this document asks: “How can vegetation status be measured intra-annually?” within the spatial scope of the entire country, using satellite imagery and taking into account the maximization of spatial resolution, of the precision and independence of data while at the same time minimizing production costs and any redundancy that might arise. Methodology follows a pragmatic viewpoint, aiming to produce the best possible results, and begins in the collection of Sentinel-2 imagery from THEIA’s server, imagery that is then used to produce monthly composites that become the foundation of the MIAEV. The resulting products are measurably capable of detecting and evaluating the status of vegetation, presenting as particularly useful for the tracking of the status of intra-annual cultures, the highlighting of sudden changes in vegetation status and the detection of vegetation status anomalies when compared to an homologous period. These contributions, in particular the availability of a temporal series of satellite imagery from 2017 to 2022 that is updated in close to real-time, establish a solid and factual foundation of products capable of evaluating the vegetation status on a monthly basis, that in itself provides freedom for the exploration of more specific studies by any individual or institution.

PALAVRAS-CHAVE

MIAEV

DGT

SMOS

SENTINEL-2

NDVI

SÉRIE TEMPORAL

ESTADO DA VEGETAÇÃO

KEYWORDS

MIAEV

DGT

SMOS

SENTINEL-2

NDVI

TEMPORAL SERIES

VEGETATION STATUS

ACRÓNIMOS

A.C. – Antes de Cristo

AGIF - Agência para a Gestão Integrada de Fogos Rurais

AVHRR – NOAA – Advanced Very High-Resolution Radiometer – National Oceanic and Atmospheric Administration

BRP – Band Ratio Parameter

COS – Carta de Ocupação do Solo

COSc – Carta de Ocupação do Solo Simplificada

CTVI - Corrected Transformed Vegetation Index

DGRF – Direção Geral dos Recursos Florestais

DGT – Direção Geral de Território

DMP – Dry Matter Productivity

DMVV – Diferença Mensal da Verdura da Vegetação

DVI - Difference Vegetation Index

ERTS - Earth Resources Technology Satellite

ESA – European Space Agency

EVI - Enhanced Vegetation Index

GPS – Global Positioning System

ICNF - Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas

IFAP - Instituto de Financiamento da Agricultura e Pescas

IVC – Infravermelho de Onda Curta (ver SWIR)

IVP – Infravermelho Próximo

LAI – Índice de Área Foliar

MDNVI - Modified Normalized Difference Vegetation Index

MIAEV – Mapa(s) Intra-Anual(ais) do Estado da Vegetação

MSAVI - Modified Soil-Adjusted Vegetation Index

MSI – Multi-Spectral Instrument

MSR - Modified Simple Ratio

NBR – Normalized Burn Ratio

NDII - Normalized Difference Infrared Index

NDVI – Normalized Difference Vegetation Index

NDWI - Normalized Difference Water Index

OSAVI - Optimized Soil Adjusted Vegetation Index

PHVV – Percentil Homólogo da Verdura da Vegetação

PROVA-V - Project for On-Board Autonomy - Vegetation

PVI – Perpendicular Vegetation Index

RDVI - Renormalized Difference Vegetation Index

RE – Red-Edge

SAVI - Soil-Adjusted Vegetation Index

SMOS – Sistema de Monitorização da Ocupação do Solo

SNIG – Sistema Nacional de Informação Geográfica

SR – Simple Ratio

SRWI - Simple Ratio Water Index

SWIR – Short Wave Infrared (Infravermelho de Onda Curta)

TCB – Tasseled Cap Brightness Index

TCG – Tasseled Cap Greenness Index

TCT / TCI - Tasseled Cap Transformation ou Tasseled Cap Index

TCW – Tasseled Cap Wetness Index

TSAVI-1 - Transformed Soil-Adjusted Vegetation Index

TTVI - Thiam's Transformed Vegetation Index

TVI - Transformed Vegetation Index

VCI – Vegetation Condition Index

viSMOS – Visualizadores SMOS (ver SMOS)

VV – Verdura da Vegetação

WDRVI - Wide Dynamic Range Vegetation Index

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - CARACTERÍSTICAS DO SATÉLITE SENTINEL-2	16
TABELA 2 - CARACTERÍSTICAS DOS MIAEV	17

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - ESTRUTURA DO TRABALHO	4
FIGURA 2 - PADRÃO ESPECTRAL DA VEGETAÇÃO (RELVA)	19
FIGURA 3 - VERDURA DA VEGETAÇÃO ANO AGRÍCOLA 2021 - DISTRITO: SANTARÉM	
CONCELHO: CHAMUSCA - ESCALA: 1:19000	23
FIGURA 4 - PERCENTIL HOMÓLOGO DA VERDURA DA VEGETAÇÃO ANO AGRÍCOLA 2021 -	
DISTRITO: SANTARÉM CONCELHO: CHAMUSCA - ESCALA: 1:19000.....	23
FIGURA 5 - DIFERENÇA MENSAL DA VERDURA DA VEGETAÇÃO ANO AGRÍCOLA 2021 -	
DISTRITO: SANTARÉM CONCELHO: CHAMUSCA - ESCALA: 1:19000.....	24
FIGURA 6 - VERDURA DA VEGETAÇÃO - ANO AGRÍCOLA 2019 -2021 - INCÊNDIO DE	
22/07/2019.....	25
FIGURA 7 – PERCENTIL HOMÓLOGO DA VERDURA DA VEGETAÇÃO - ANO AGRÍCOLA	
2019 -2021 - INCÊNDIO DE 22/07/2019	25
FIGURA 8 - DIFERENÇA MENSAL DA VERDURA DA VEGETAÇÃO - ANO AGRÍCOLA 2019 -	
2021 - INCÊNDIO DE 22/07/2019.....	26
FIGURA 9 - VERDURA DA VEGETAÇÃO - ANO AGRÍCOLA 2019 - DISTRITO: SANTARÉM	
CONCELHO: CORUCHE - ESCALA: 1:11000	27
FIGURA 10 - VERDURA DA VEGETAÇÃO - ANO AGRÍCOLA 2020 – 2021 - DISTRITO:	
SANTARÉM CONCELHO: CORUCHE - ESCALA: 1:11000.....	28
FIGURA 11 - PERCENTIL HOMÓLOGO DA VERDURA DA VEGETAÇÃO - ANO AGRÍCOLA	
2019 - DISTRITO: SANTARÉM CONCELHO: CORUCHE - ESCALA: 1:11000.....	29
FIGURA 12 – PERCENTIL HOMÓLOGO DA VERDURA DA VEGETAÇÃO ANO AGRÍCOLA	
2019 - DISTRITO: SANTARÉM CONCELHO: CORUCHE - ESCALA: 1:11000.....	29
FIGURA 13 – DIFERENÇA MENSAL DA VERDURA DA VEGETAÇÃO - ANO AGRÍCOLA 2020 -	
2021 - DISTRITO: SANTARÉM CONCELHO: CORUCHE - ESCALA: 1:11000.....	30
FIGURA 14 - VERDURA DA VEGETAÇÃO ANO AGRÍCOLA 2021 - DISTRITO: AVEIRO -	
CONCELHO: VAGOS - ESCALA: 1:30000	30
FIGURA 15 - VERDURA DA VEGETAÇÃO (ESQUERDA) - MAPA DO NÚMERO DE	
OBSERVAÇÕES MENSAIS (DIREITA) - JANEIRO 2021	31
FIGURA 16 - DIFERENÇA MENSAL DA VERDURA DA VEGETAÇÃO (ESQUERDA) - MAPA DO	
DIA DA OBSERVAÇÃO MAIS RECENTE (DIREITA) - MARÇO 2022.....	32

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1 - VERDURA DA VEGETAÇÃO - ANO AGRÍCOLA 2021 - CULTURAS INTRA-ANUAIS	42
ANEXO 2 - PERCENTIL HOMÓLOGO DA VERDURA DA VEGETAÇÃO - ANO AGRÍCOLA 2021 - CULTURAS INTRA-ANUAIS	43
ANEXO 3 - DIFERENÇA MENSAL DA VERDURA DA VEGETAÇÃO - ANO AGRÍCOLA 2021 - CULTURAS INTRA-ANUAIS	44
ANEXO 4 - VERDURA DA VEGETAÇÃO - ANO AGRÍCOLA 2019 - INCÊNDIO DE 22/07/2019	45
ANEXO 5 - VERDURA DA VEGETAÇÃO - ANO AGRÍCOLA 2020 - INCÊNDIO DE 22/07/2019	46
ANEXO 6 - VERDURA DA VEGETAÇÃO - ANO AGRÍCOLA 2021 - INCÊNDIO DE 22/07/2019	47
ANEXO 7 - PERCENTIL HOMÓLOGO DA VERDURA DA VEGETAÇÃO - ANO AGRÍCOLA 2019 - INCÊNDIO DE 22/07/2019	48
ANEXO 8 - PERCENTIL HOMÓLOGO DA VERDURA DA VEGETAÇÃO - ANO AGRÍCOLA 2020 - INCÊNDIO DE 22/07/2019	49
ANEXO 9 - PERCENTIL HOMÓLOGO DA VERDURA DA VEGETAÇÃO - ANO AGRÍCOLA 2021 - INCÊNDIO DE 22/07/2019	50
ANEXO 10 - DIFERENÇA MENSAL DA VERDURA DA VEGETAÇÃO - ANO AGRÍCOLA 2019 - INCÊNDIO DE 22/07/2019.....	51
ANEXO 11 - VERDURA DA VEGETAÇÃO - ANO AGRÍCOLA 2019 - CORTES DE VEGETAÇÃO	52
ANEXO 12 - VERDURA DA VEGETAÇÃO - ANO AGRÍCOLA 2020 - CORTES DE VEGETAÇÃO	53
ANEXO 13 - VERDURA DA VEGETAÇÃO - ANO AGRÍCOLA 2021 - CORTES DE VEGETAÇÃO	54
ANEXO 14 - PERCENTIL HOMÓLOGO DA VERDURA DA VEGETAÇÃO - ANO AGRÍCOLA 2019 - CORTES DE VEGETAÇÃO.....	55
ANEXO 15 - PERCENTIL HOMÓLOGO DA VERDURA DA VEGETAÇÃO - ANO AGRÍCOLA 2020 - CORTES DE VEGETAÇÃO.....	56

ANEXO 16 - PERCENTIL HOMÓLOGO DA VERDURA DA VEGETAÇÃO - ANO AGRÍCOLA	
2021 - CORTES DE VEGETAÇÃO	57
ANEXO 17 - DIFERENÇA MENSAL DA VERDURA DA VEGETAÇÃO - ANO AGRÍCOLA 2019 -	
CORTES DE VEGETAÇÃO.....	58
ANEXO 18 - DIFERENÇA MENSAL DA VERDURA DA VEGETAÇÃO - ANO AGRÍCOLA 2020 -	
CORTES DE VEGETAÇÃO.....	59
ANEXO 19 - DIFERENÇA MENSAL DA VERDURA DA VEGETAÇÃO - ANO AGRÍCOLA 2021 -	
CORTES DE VEGETAÇÃO.....	60

ÍNDICE DO TEXTO

DECLARAÇÃO DE ORIGINALIDADE.....	iii
DEDICATÓRIA.....	iv
AGRADECIMENTOS	v
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
PALAVRAS-CHAVE.....	viii
KEYWORDS	viii
ACRÓNIMOS	ix
ÍNDICE DE TABELAS	xii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE ANEXOS	xiv
1. Introdução.....	1
1.1 Temática e Problema de Investigação	1
1.2 Pergunta de Partida e Perguntas Derivadas	2
1.3 Objetivos do Estudo – Geral e Específicos	3
1.4 Estrutura do Trabalho	3
2. Revisão de Literatura.....	5
3. Metodologia.....	13
3.1 Paradigmas, Metodologia e Métodos	13
3.2 Critérios, Dados e Instrumentos	15
4. Apresentação e Discussão de Resultados	21
4.1 Produtos Obtidos	21
4.2 Apresentação e Discussão de Resultados	22
4.2.1 Culturas Agrícolas Intra-Anuais.....	22
4.2.2 Perda e Recuperação de Vegetação (Fogos)	24
4.2.3 Perda e Recuperação de Vegetação (Cortes).....	27
5. Conclusões.....	34
Referências Bibliográficas.....	36
Anexos	41

1. Introdução

1.1 Temática e Problema de Investigação

*“Informação existe de forma independente,
mas o conhecimento está inerentemente ligado a pessoas.”*

Paul A. Longley (2001)

Desde os vales da cidade de Jericó na Palestina (c. 10,000-8500 A.C.), à cidade de Memphis na margem no rio Nilo (c. 3600-3050 A.C.), passando pelas mais variadas cidades contemporâneas que é evidente a ancestral e constante necessidade do urbanismo e gestão territorial (Cowgill, 2004). Essa mesma necessidade, em conjunção com a quantidade exponencial de informação espacial disponível, deu origem à criação de grupos centralizados que se especializaram na recolha, processamento e disponibilização de informação espacial de um qualquer território. Esta informação espacial pode depois ser analisada e convertida em produtos temáticos, como é o caso dos mapas de ocupação do solo, que permitem uma gestão territorial mais precisa e informada. No caso português, foi em 1788 que foi criada a “Comissão para os Trabalhos de Triangulação do Reino”, aquela que desde 2012 conhecemos como a “Direção-Geral do Território” (DGT), uma “Instituição de referência na promoção do desenvolvimento territorial, reconhecida pela investigação e experimentação para inovação, bem como pelas suas práticas de transparência e abertura institucional.” (Direção-Geral do Território, 2022). Foi através desta visão que a DGT se comprometeu em desenvolver e implementar o projeto SMOS (Sistema de Monitorização de Ocupação do Solo) que visa “(...) produzir um conjunto de produtos cartográficos de uso e ocupação do solo a partir de imagens de satélite (...)” (Direção-Geral do Território, 2020). A DGT, que é a entidade responsável pela produção de cartografia temática oficial para o uso e ocupação do solo em Portugal Continental, já produz dentro das suas capacidades uma Carta de Uso e Ocupação do Solo (COS) com uma periodicidade de 3 anos, e uma COS Simplificada (COSc) com periodicidade de 1 ano.

Este trabalho, desenvolvido em conjunção com a equipa da DGT, pretende preencher a necessidade de uma avaliação do estado da vegetação com periodicidade inferior a um ano, capaz de captar a variabilidade da paisagem. Os produtos desenvolvidos neste trabalho são um compromisso entre acessibilidade e quantidade de informação e entre especificidade espacial e custo, procurando maximizar a precisão e independência dos dados e o aproveitamento eficiente dos recursos da DGT. É esta a origem dos Mapas Intra-Anuais do Estado da Vegetação (MIAEV). Os MIAEV são limitados a Portugal Continental sendo que este trabalho foi desenvolvido no decorrer dos anos de 2021/2022.

1.2 Pergunta de Partida e Perguntas Derivadas

O enquadramento do subcapítulo anterior revela uma contextualização da qual facilmente se retira uma pergunta de partida, sendo que a resposta à mesma será condicionada pelos critérios apresentados no desenrolar deste trabalho:

P.P.: *“Como avaliar intra-anualmente o estado da vegetação?”*

Desta pergunta podem derivar-se outras, chamadas perguntas derivadas, remetentes à utilidade dos MIAEV:

P.D.1:

“Qual a capacidade dos MIAEV de detetar cortes na vegetação entre meses consecutivos?”

P.D.2:

“Qual a capacidade dos MIAEV de detetar mudanças intra-anuais no vigor da vegetação?”

P.D.3:

“Qual a capacidade dos MIAEV de detetar anomalias no estado da vegetação usando um período histórico?”

1.3 Objetivos do Estudo – Geral e Específicos

“Objetivos não são ordens; São compromissos.”

Peter Druckler (1965)

OBJETIVO GERAL: Avaliar intra-anualmente o estado da vegetação, obtido através de imagens de satélite, usando os MIAEV.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Análise exploratória da avaliação do estado da vegetação;
- Definir um método de Detecção Remota para a avaliação do estado da vegetação;
- Definir o Satélite a utilizar para a avaliação do estado da vegetação;
- Definir o(s) Índice(s) a utilizar na avaliação do estado da vegetação;
- Garantir o cumprimento dos critérios de produção dos MIAEV, apresentados posteriormente;
- Justificação dos métodos escolhidos e apresentação de exemplos do comportamento dos MIAEV;

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho divide-se em 5 capítulos, começando pela Introdução, onde são definidas as Perguntas de Partida e os Objetivos. De seguida atravessa uma Revisão de Literatura pertinente ao tema, onde navego pela Bibliografia à procura de antecedentes, conceitos fundamentais e trabalhos relevantes à resposta da Pergunta de Partida. Segue-se um breve capítulo de Metodologia, onde descrevo os paradigmas, métodos e instrumentos utilizados juntamente com os dados utilizados e os critérios condicionantes dos MIAEV. A Apresentação e Discussão de Resultados responde à Pergunta de Investigação e Perguntas Derivadas, apresentado exemplos práticos da utilidade dos MIAEV. O trabalho termina na Conclusão, onde exponho as limitações da investigação, os contributos e os possíveis desafios para investigações futuras. O esquema geral da estrutura do trabalho pode ser observado na Figura 1.

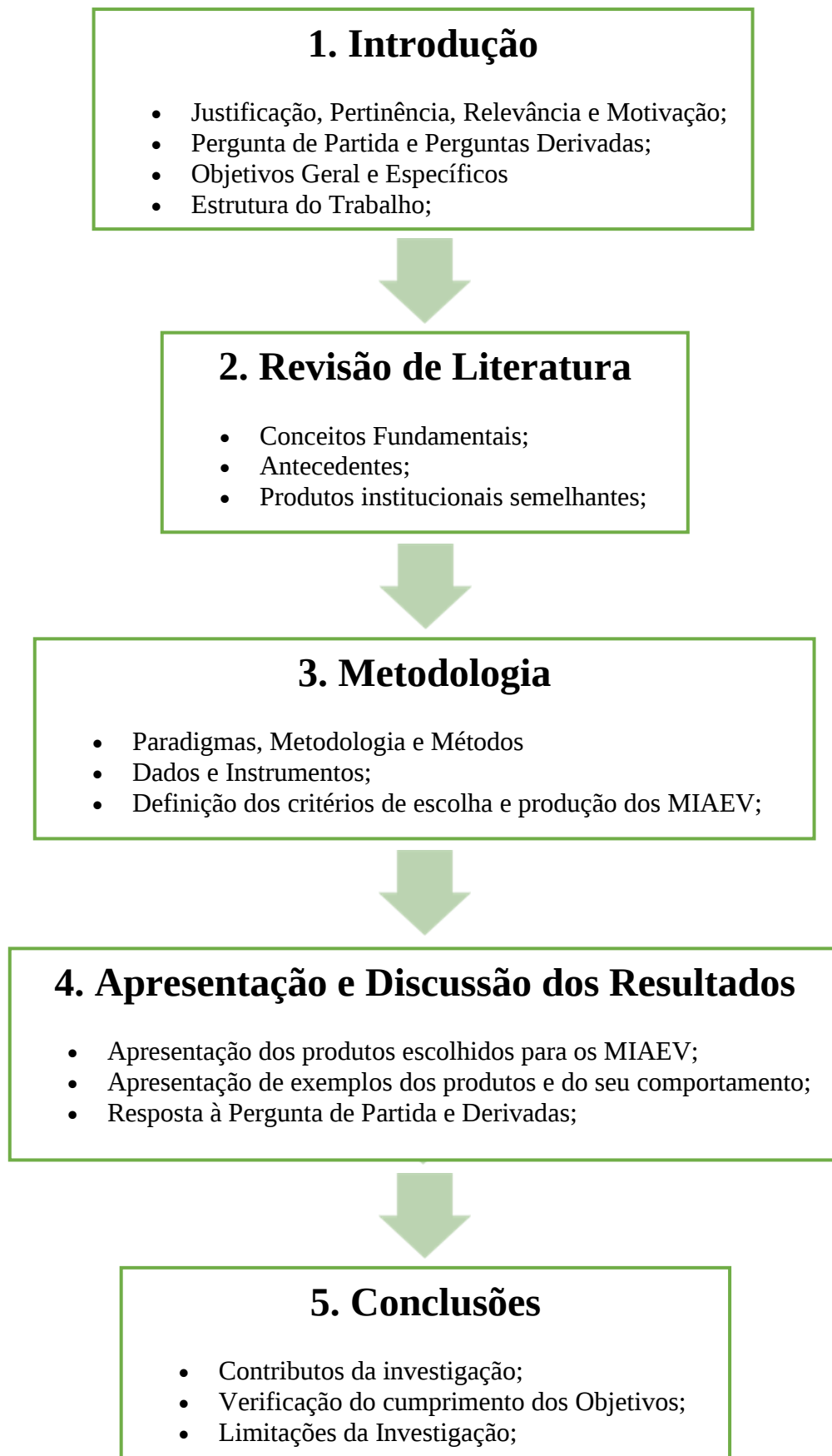


Figura 1 - Estrutura do Trabalho

2. Revisão de Literatura

*“Se vi mais longe que outros,
foi porque me apoiei nos ombros de gigantes.”*

Newton (1675)

Para melhor responder à Pergunta de Partida, é relevante rever o estado da arte, numa tentativa de estabelecer fundações sólidas e conceitos fundamentais que vão não só permitir uma melhor consolidação do conhecimento existente como também facilitar qualquer inovação subsequente.

Neste caso, antes de passar para a sua possível avaliação, é pertinente começar pelo conceito de “estado da vegetação”, presente como ponto central da pergunta de partida. O termo “Estado da Vegetação” aparece recorrentemente na literatura. O mesmo procura representar uma avaliação geral das características biofísicas da vegetação e consequentemente da sua saúde, especialmente na literatura revelante a este trabalho (Gitelson, 2004).

Existem vários métodos de avaliação do estado da vegetação, como o trabalho de campo feito pela Direcção-Geral dos Recursos Florestais (DGRF) que define parcelas circulares no terreno através de GPS e atribui uma classe de ocupação ao terreno e um estado à vegetação, relativo a cortes ou queimas (IFN 2006). Devido às necessidades das instituições nacionais, nomeadamente a elevada periodicidade requerida (mensal) e cobertura espacial extensa (nacional), que não pode ser atingida de forma economicamente e temporalmente viável com trabalho de campo, é necessário explorar outros métodos de avaliação do estado da vegetação como a Deteção Remota. Deteção Remota pode ser definida da seguinte forma: “Deteção Remota é a ciência e arte de obter informação acerca de um objeto, área ou fenómeno através da análise de dados adquiridos por um dispositivo que não está em contacto com o objeto, área ou fenómeno sobre investigação.” (Lillesand, Kiefer & Chipman, 2015). Em suma, toda a Deteção Remota é baseada na captura e análise de radiação, refletida pelo objeto a

estudar. A fonte da radiação original é, na maioria dos casos, o Sol, mas também pode ser emitida por um qualquer sensor, denominado sensor ativo (Erdle, 2011). Este trabalho limita-se a estudar os sensores passivos, que apenas capturam a radiação refletida. Dentro da Detecção Remota, existem diferentes métodos com a capacidade de avaliar o estado da vegetação, como a instalação de câmaras no terreno que tiram fotografias regulares da vegetação (Vrieling et al., 2018), fotografias aéreas que capturam a radiação refletida de uma determinada área e imagens de satélite, com sensores capazes de avaliar áreas muito extensas (Lillesand, Kiefer & Chipman, 2015). Tendo em conta os objetivos desejáveis de periodicidade mensal, a cobertura espacial muito extensa e a natural minimização de custos, este trabalho foca-se nas imagens de satélite e aprofunda a sua utilidade para a avaliação do estado da vegetação.

O espectro eletromagnético é vasto e nem sempre é simples ou viável analisar a totalidade da sua extensão. Felizmente, a vegetação possui características biofísicas que lhe conferem um padrão espectral relativamente localizado, com um pico de reflexão no verde, um aumento substancial na região red-edge (750 nm) – que estabiliza ao longo de todo o infravermelho próximo – e ainda alguns picos na zona do infravermelho de onda curta. (Gates et al., 1965). Este tipo de padrão espectral limita o interesse de captação da radiação maioritariamente ao infravermelho próximo, ao vermelho e à zona do infravermelho de onda curta, variáveis que dentro de determinados intervalos podem ser associadas respetivamente ao nível de clorofila, estrutura física da folha e quantidade de água presente nas folhas (Jensen, 1983). As variáveis em questão também estão correlacionadas com outras métricas associadas a vegetação saudável, como o Índice de Área Foliar (LAI) e a biomassa (Kamat et al., 1983).

Através destas associações é então possível avaliar o estado da vegetação usando combinações de diferentes bandas (intervalos) do espectro eletromagnético, que se podem apresentar como divisões, fórmulas ou normalizações das bandas utilizadas e às quais é atribuído o nome de “Índices de Vegetação” (European Space Agency, 2013). É importante mencionar que os Índices de Vegetação são trabalhados numa estrutura de dados *raster*, que consiste numa grelha de quadrados cuja unidade mínima (pixel) corresponde a um quadrado com o lado igual à resolução espacial, neste caso, do satélite de origem. Tanto a especificidade espacial como o espaço de armazenamento crescem com o aumento da resolução espacial. (Lillesand, Kiefer & Chipman, 2015).

Existem milhares de artigos e estudos sobre diferentes Índices de Vegetação. A sua origem, altamente correlacionada a características biofísicas e assente em princípios matemáticos, confere-lhes uma resistência natural à passagem do tempo. Desta forma, Índices ou relações descobertas no século XX são tão ou mais válidas que as mais recentes do século XXI, tendo ainda a vantagem de poderem ter sobrevivido ao teste do tempo, mantendo-se em utilização e sobrevivendo a iterações mais recentes. Um exemplo deste fenómeno é o “Normalized Difference Vegetation Index” (NDVI), explorado em baixo, que surgiu em 1974 e sobreviveu até hoje com uma elevada frequência de utilização.

Os vários Índices de Vegetação existentes já foram classificados entre “Slope-Based”, que se baseiam principalmente nas discrepâncias entre as respostas espectrais de duas ou mais bandas e “Distance-Based”, que se baseiam na diferença entre a refletância de um determinado pixel e a refletância de um pixel de solo nu (Jackson & Huete, 1991). Este trabalho foca-se maioritariamente em Índices de Vegetação “Slope-Based”, pela sua maior facilidade de interpretação e execução operacional. A título de exemplo, alguns índices “Distance-Based” são o “Perpendicular Vegetation Index” (PVI) e as suas derivações, o “Difference Vegetation Index” (DVI) (Richardson & Wiegand, 1977) ou o “Transformed Soil-Adjusted Vegetation Index” (TSAVI-1) (Baret et al, 1989).

Uma das primeiras utilizações de um Índice de Vegetação em publicações é referente ao “Simple Ratio” (SR), que se apresenta como um rácio entre a refletância do infravermelho e do vermelho (Birth & McVey 1968). Seis anos depois, aparece a sua forma normalizada, através do “Band Ratio Parameter” (BRP), calculado com as bandas do satélite ERTS (mais tarde denominado Landsat-1) e definido pela diferença entre as bandas 5 (vermelho) e 7 (infravermelho) dividida pela sua soma, num domínio [-1,1] (Rouse et al, 1974). Este Índice é mais tarde conhecido como “Normalized Difference Vegetation Index” (NDVI), um dos índices mais utilizados no mundo, com recorrentes aparições na literatura, inúmeros estudos subsequentes e utilizações institucionais. No entanto, o NDVI sofre de uma excessiva influência do brilho do solo nos seus valores próximos de 0 (Huete, 1987) e de uma saturação demasiado rápida nos seus valores superiores a 0.8 (Sellers, 1985). Esta lacuna proveniente do NDVI, em conjugação com a necessidade de avaliações mais específicas da vegetação, do solo ou da água, motivou o

desenvolvimento de vários índices de vegetação. Dentro desses índices encontra-se o “Soil-Adjusted Vegetation Index” (SAVI), que se tentou impor como um melhoramento ao NDVI, utilizando um parâmetro “L” ajustável dentro da sua equação numa tentativa de minimizar o impacto do brilho do solo (Alam, 1988). Por defeito, este valor é de 0.5, mas produz melhores resultados quando ajustado de acordo com o LAI (Bausch, 1993). Embora existam maneiras de modelar o LAI através de correlações entre o mesmo e outros índices afim de ajustar o parâmetro “L” (Blinn et al, 2019), continua a existir uma dependência no cálculo de fatores externos para obter os melhores resultados do SAVI. Foram propostos alguns ajustes ao SAVI, por exemplo através de uma fórmula mais complexa com o “Modified Soil-Adjusted Vegetation Index” (MSAVI) (Qi et al, 1994) ou da fixação do parâmetro L em 0.16, com o “Optimized Soil Adjusted Vegetation Index” (OSAVI), que apresenta melhorias em relação ao NDVI tanto em áreas de pouca vegetação como de vegetação densa (Rondeaux, Steven & Baret, 1996).

Também a saturação em valores altos conduziu à tentativa de melhoramento, com o aparecimento do “Wide Dynamic Range Vegetation Index” (WDRVI), que introduz um parâmetro “a” ajustável com o objetivo de diminuir o efeito do infravermelho. (Gitelson, 2004). Outras tentativas basearam-se em fórmulas mais complexas, com o nascimento do “Modified Normalized Difference Vegetation Index” (MNDVI) que mais recentemente se encontra como “Enhanced Vegetation Index” (EVI). O EVI inclui fatores de correção da influência de aerossóis (C_1 , C_2 , juntamente com a banda azul), ajustáveis de acordo com o nível de correção atmosférica da imagem e fatores de correção do brilho do solo, numa lógica semelhante à do SAVI (Liu, 1995).

Correções e transformações matemáticas também estão presentes na literatura, como o “Transformed Vegetation Index” (TVI), que utiliza a raiz quadrada do NDVI e a soma de uma constante para evitar trabalhar com valores negativos e aproximar a distribuição de valores a uma distribuição normal (Deering & Rouse, 1975). O “Corrected Transformed Vegetation Index” (CTVI) vem tentar corrigir o TVI, utilizando valores absolutos para eliminar completamente possíveis valores negativos (Perry & Lautenschlager, 1984). Outros autores sugerem utilizar apenas parte do CTVI, formando o “Thiam’s Transformed Vegetation Index” (TTVI) numa tentativa de obter melhores resultados (Thiam, 1997). É sugerida a utilização de uma simples diferença entre o infravermelho próximo e o espectro visível, o “Difference Vegetation Index”

(DVI), e a sua re-normalização origina o “Renormalized Difference Vegetation Index” (RDVI) (Roujean & Breon, 1995). São sugeridas outras alterações ao índice que deu origem ao NDVI, o SR, transformando-o no “Modified Simple Ratio” (MSR), que usa uma divisão entre a diferença entre o SR e 1 e a soma entre o SR e 1 (Chen, 1996). Nenhuma destas transformações parece apresentar melhorias consistentes em comparação com o NDVI, especialmente face ao aumento de complexidade operacional.

Naturalmente, nem todos os índices se focam nos mesmos intervalos do espectro eletromagnético, existindo também um foco na utilização de infravermelho de onda curta (SWIR) de forma a aproveitar a correlação com o nível de água nas folhas. O “Normalized Burn Ratio” (NBR) foi desenvolvido com o objetivo de detetar mudanças bruscas na vegetação, nomeadamente detetar as áreas afetadas por um qualquer incêndio (Garcia & Caselles, 1991). O NBR também foi alvo de algumas derivações como o NBR2, que usa duas bandas SWIR (United States Geological Survey, 2022) e mais recentemente o NBR+, que usa o azul, verde, infravermelho próximo e SWIR2, do satélite Sentinel-2 (Alcaras et al., 2022).

Outros índices tentam quantificar a quantidade de água presente na vegetação, através da correlação com a refletância no infravermelho de onda curta. Tal é o caso do “Normalized Difference Water Index” (NDWI) (Gao, 1996), do “Normalized Difference Infrared Index” (NDII) (Fensholt & Sandholt, 2003) e do “Simple Ratio Water Index” (SRWI), no caso de índices não normalizados (Zarco-Tejada, Rueda & Ustin, 2003). Uma comparação feita entre estes índices e as suas correlações com métricas de quantidade de água na vegetação, como “Espessura de Água Equivalente” (quantidade de água por unidade de área de folha em g/cm^2) ou “Conteúdo de Água na Cobertura” (quantidade de água por unidade de área do chão em kg/m^2), conclui que o NDII é o mais correlacionado com as métricas anteriores, embora a utilização destes índices seja mais precisa tendo conhecimento prévio do LAI (Zhang et al., 2018). O NDII está altamente correlacionado com o NDVI, a níveis correspondentes a um coeficiente de correlação Pearson “r” igual ou superior a 80% de correlação, sendo muitas vezes superior a 90% (Sriwongsitanon et al., 2015). O NDMI também está altamente correlacionado com o NDVI, a níveis superiores a 90% de correlação, segundo o coeficiente de correlação Pearson “r” (Bhattacharya et al., 2021).

A “Tasseled Cap Transformation” ou “Tasseled Cap Index” (TCI) utiliza quase todas as bandas presentes num determinado satélite, definindo-se como uma soma ponderada de bandas com coeficientes diferentes para cada satélite (Kauth & Thomas, 1976). Nedkov (2017) apresenta uma abordagem para o cálculo destes coeficientes mas Shi & Xu (2019) defendem que essa mesma abordagem é espacialmente dependente e separa o cálculo para imagens com 6 ou 13 bandas. O TCI divide-se em 3 componentes: “Brightness Index” (TCB), “Wetness Index” (TCW) e “Greenness Index” (TCG) (Kauth & Thomas, 1976). A componente “Greenness Index” tem uma elevada correlação com o NDVI, acima de 90%, medida através do coeficiente de correlação Pearson “r” (Samarawickrama, Piyaratne & Ranagalage, 2017). A componente “Wetness Index” também tem uma elevada correlação mas desta vez com o NDMI, acima de 95%, como medido através do coeficiente de correlação Pearson “r” (Jin & Sader, 2005).

O NDVI parece ser um dos índices que mais reage a um grande distúrbio na vegetação (nomeadamente um incêndio), pelo menos até 1 ano depois do fogo, onde é ultrapassado pelo NBR. Foram estudados os índices NDVI, NBR, SAVI, NDMI, TCG, TCW, TCA e NBR2 (Hislop et al, 2018).

Nem sempre as evoluções no campo dos Índices de Vegetação são feitas através do desenvolvimento de novos índices. Por vezes, a evolução passa pela utilização de uma componente estatística em conjunção com o histórico disponível de um qualquer índice pré-existente. Tal é o caso do “Vegetation Condition Index” (VCI) que se define como o valor do NDVI do presente dentro do intervalo limitado pelos valores máximo e mínimo do seu histórico, em percentagem (Kogan, 1990), tendo sido utilizado por exemplo para monitorizar secas regionais (Liu & Kogan, 1996). Também a aritmética simples entre imagens do mesmo índice aparece como métrica de avaliação de mudanças entre dois períodos temporalmente distintos, nomeadamente a diferença entre uma imagem “antes” de um determinado acontecimento, e uma “depois”, como é o caso da utilização do $dNDVI / \Delta NDVI$ (Stankova, 2015) ou $dNBR$ (Bright et al, 2019).

Este tipo de diferença entre índices também pode ser usado na modelação da biomassa, combinando vários índices diferentes para modelar o aumento ou diminuição de biomassa num determinado pixel através da soma ponderada de vários parâmetros

como o dNDVI, dNBR e alguns dados estatísticos das imagens utilizadas (Jin et al., 2013).

Outra abordagem é a utilização de estimativas do cálculo de biomassa, aproveitando-se de correlações desenvolvidas entre Índices de Vegetação e valores de biomassa medidos no terreno. A biomassa, dentro destes modelos, depende de uma qualquer fórmula que inclua, por exemplo, o NDVI (Aranha et al., 2020). Estão presentes na literatura outros artigos que exploram este tipo de modelação, com índices tais como o RDVI, MSR, MSAVI e OSAVI (Das & Singh, 2012). Mesmo sendo linear, a modelação de biomassa pode ser mais complexa, incluindo outras variáveis como dados de precipitação anual, temperatura acumulada anual e uma determinação prévia do tipo de ecossistema (Li et al., 2016).

A disponibilidade de um registo consistente, periódico e temporalmente extenso de imagens de satélite capturadas de forma sistemática permite um outro tipo de análise: as séries temporais. As séries temporais permitem analisar padrões estatísticos e anomalias na distribuição do comportamento de um conjunto de imagens e dos seus produtos derivados, como é o caso dos Índices de Vegetação (Lillesand, Kiefer & Chipman, 2015). A utilização de séries temporais tem algumas vantagens, como o preenchimento de lacunas espaciais ou temporais nos dados e o melhoramento geral dos resultados da modelação de biomassa (Nguyen et al., 2020). Este tipo de análise não é dependente de um determinado índice, tendo sido utilizada por exemplo com o Tasseled Cap Index (Frazier et al., 2014), NDVI, NBR e EVI (Spadoni et al., 2020) e SAVI (Lu et al., 2015).

Naturalmente, este não é o primeiro trabalho nem a primeira instituição que apresenta uma qualquer iteração de produtos representativos do estado da vegetação. Assim sendo, é pertinente explorar alguns dos produtos semelhantes já existentes.

A European Space Agency (ESA), dentro da sua “Climate Change Initiative”, criou um “Projeto Biomassa” que pretende modelar a quantidade de Biomassa acima do solo, as emissões de carbono e os distúrbios em florestas, aproveitando-se da experiência de projetos passados (European Space Agency, 2022). Outros produtos da ESA incluem por exemplo a “Verdura Sazonal” do NDVI, com subprodutos estatísticos como a Média, o Desvio-Padrão e métricas de qualidade como o número de compósitos

válidos (European Space Agency, 2017). Dentro do Programa de Observação da Terra da União Europeia, denominado “Copernicus”, são apresentados produtos como a “Dry Matter Productivity” (DMP) que representa a taxa de crescimento ou aumento da biomassa seca, com unidades para propósitos agro-estatísticos, com uma resolução espacial de 300m e temporal de 10 dias (Copernicus, 2022). A estimativa da biomassa seca é feita através de um modelo que utiliza dados meteorológicos e de ocupação do solo, entre outros (Monteith, 1972). Também dentro do Copernicus, um dos produtos é o NDVI, com resolução espacial 300m, resolução temporal de 10 dias, cobertura global e baseado no satélite Sentinel-3 (Copernicus, 2022). O VCI também está presente, com resolução espacial de 1km, resolução temporal de 10 dias, cobertura global e baseado no satélite PROBA-V (Copernicus, 2022). Nos Estados Unidos, dentro do “United States Forest Service”, existem produtos como a “Visual Greenness”, onde se compara a vegetação com uma referência muito verde como um campo de golf. Também existe a “Relative Greenness”, que compara o quão verde está a vegetação com o quão verde a vegetação esteve no período de 1989-2003, e a “Departure from Average”, que compara o quão verde a vegetação está com a média de verdura do histórico dessa semana, sendo o histórico o período de 1989-2003 (United States Forest Service, 2022). No continente da Oceânia, o governo Australiano usa o NDVI e o desvio do NDVI da média a longo prazo, num produto cujo objetivo é apresentar uma métrica de avaliação da quantidade de vegetação saudável, capaz de captar anomalias no comportamento espectral, com resolução espacial 1km, resolução temporal mensal e baseado no satélite AVHRR – NOAA. (Australian Government, 2022).

Tendo estabelecido fundações sólidas para os resultados, apresentado conceitos fundamentais e explorado o estado da arte, é importante agora especificar a Metodologia, apresentada no capítulo 3 – Metodologia.

3. Metodologia

3.1 Paradigmas, Metodologia e Métodos

De forma a especificar a maneira como a pesquisa deste trabalho foi feita, é importante definir alguns conceitos, como paradigma, metodologia e método. Um paradigma é um sistema de princípios, crenças e valores que orienta uma determinada metodologia, também existindo na literatura como “filosofias”, “abordagens” ou “escolas de pensamento” (Coutinho, 2015; Saunders, Lewis & Thornhill, 2019). A metodologia representa a teoria por detrás de como é que a pesquisa de um determinado trabalho deve ser feita. Por fim, um método define-se como uma técnica ou procedimento utilizado para obter e analisar informação (Saunders, Lewis & Thornhill, 2019). Assim sendo, e resumidamente, “(...) podemos afirmar que os paradigmas orientam as metodologias, e que as metodologias enformam e aferem os métodos, que constituem, por sua vez, um conjunto de técnicas que determinam o sentido orientador de uma investigação.” (Rosado, 2015).

No que toca a paradigmas, é suficiente dizer que, de forma geral, foi utilizado um paradigma pragmático neste trabalho. Pragmatismo define como conhecimento aceitável aquele que possibilita ações bem-sucedidas, focando-se na resolução de problemas e no significado prático do conhecimento em contextos específicos (Saunders, Lewis & Thornhill, 2019).

De forma a melhor cumprir os objetivos, é necessária uma abordagem metodológica mista, que utilize informação e métodos quantitativos (como a análise do comportamento dos MIAEV nas perdas de vegetação) e qualitativos (como a pesquisa teórica na revisão de literatura e revisão interna na DGT). Uma abordagem mista permite captar ao máximo a qualidade teórica da revisão de literatura, filtrando os resultados por uma componente prática que beneficia da experiência presente na DGT, tendo sempre em conta os critérios apresentados no subcapítulo 3.2.

A pesquisa e conclusões deste trabalho passaram maioritariamente pelo método dedutivo, que defende que se as premissas utilizadas são verdade, então a conclusão consequente também é verdade, viajando do geral para o específico e permitindo

estabelecer fundações sólidas para a escolha de produtos presentes nos MIAEV. Estas fundações permitem a formulação de produtos simples e eficientes que vão diretamente beneficiar o cidadão comum, como por exemplo os visualizadores *on-line* do projeto SMOS, que permitem ao utilizador observar uma métrica de vegetação saudável, detetar mudanças bruscas ou suaves na vegetação e compreender se essas medições são consideradas anomalias face ao histórico disponível. Esta simplicidade, proveniente maioritariamente da preferência de dados factuais ao invés de modelos, não compromete a eficácia necessária para a utilização destes produtos por parte de instituições como o “Instituto da Conservação da Natureza e Florestas” (ICNF), o “Instituto de Financiamento de Agricultura e Pescas” (IFAP) ou a “Agência para a Gestão Integrada de Fogos Rurais” (AGIF), entre outras.

A combinação do paradigma pragmático com a metodologia mista e o método dedutivo permite obter conclusões práticas, focadas nos melhores resultados possíveis, suportadas pela literatura e que aproveitam o conhecimento prévio presente na DGT.

3.2 Critérios, Dados e Instrumentos

A pesquisa, implementação e produção dos MIAEV implicou o seguimento de determinados critérios, apresentados de seguida. Os mesmos representam não só ambições mas também limitações, servindo de guia para a seleção de produtos compatíveis com as competências da DGT.

Critérios de produção e implementação dos MIAEVs:

- **Maximização da Especificidade Espacial:** providenciar dados o mais espacialmente específicos possível, mantendo o cumprimento dos outros critérios;
- **Minimização do Custo de Produção:** Preferência por dados base gratuitos;
- **Maximização da Precisão dos Dados:** Preferência pelo trabalho no presente e passado (por oposto a previsões para o futuro) e pelos dados factuais e não previsões ou modelos;
- **Minimização de Redundância:** Aproveitamento eficiente dos recursos da DGT;
- **Maximização da Independência dos Dados:** evitar ao máximo usar fontes de dados que se possam revelar inconsistentes, comprometendo a produção e também a utilização de MIAEVs no futuro;
- **Dentro das Competências da DGT:** Limitar os produtos a áreas académicas dentro das competências da DGT;
- **Periodicidade:** Intra-Anual, mais especificamente mensal;
- **Cobertura Espacial:** Portugal Continental;

A revisão de literatura e os critérios de produção apresentados expõem a necessidade da utilização de imagens de satélite ao invés de um qualquer outro método de avaliação do estado da vegetação. Existem inúmeros satélites em órbita que diferem em características relevantes à sua utilidade para a produção de MIAEVs, como a sua resolução espacial, temporal ou espectral. A necessidade de uma resolução espectral que incluísse no mínimo as bandas do vermelho e infravermelho, em conjunto com uma

resolução temporal inferior a 30 dias limita as possíveis escolhas. Utilizando os critérios de Maximização da Especificidade Espacial e Minimização do Custo de Produção, foi escolhido o satélite Sentinel-2, que apresenta uma resolução espacial de 10m e possibilita o acesso gratuito a imagens com um período de revisita semanal. As características do Sentinel-2 são descritas na Tabela 1.

Altitude de Órbita (km)	786	
Swath (km)	290	
Sensor	MSI (Multi-Spectral Instrument)	
Resolução Espacial (m)	10m – Visível 20m – Red-Edge e IV Próximo 60m – B1, IV Onda Curta	
Número de Bandas	13	
Resolução Espectral (μm)	B1 (Litoral)	0.43-0.46
	B2 (Azul)	0.45-0.54
	B3 (Verde)	0.53-0.59
	B4 (Vermelho)	0.65-0.68
	B5 (RE)	0.69-0.71
	B6 (RE)	0.73-0.75
	B7 (RE)	0.77-0.80
	B8 (IVP)	0.76-0.91
	B8a (IVP)	0.85-0.88
	B9 (Vapor de água)	0.93-0.96
	B10 (IVC)	1.34-1.41
	B11 (IVC)	1.54-1.69
	B12 (IVC)	2.10-2.32

Tabela 1 - Características do Satélite Sentinel-2

A produção dos MIAEV passa primeiro pela recolha de imagens do Sentinel-2, corrigidas atmosféricamente (nível 2), do centro de dados e serviços “THEIA”, criado em 2012 por um conjunto de 9 instituições francesas. De seguida, é aplicada uma máscara que permite retirar possíveis ocorrências de nuvens nas imagens. Essas imagens, que por norma são mais do que uma por mês, são combinadas internamente num compósito mensal da mediana dos valores que representam o mês em questão. Existindo nuvens, o espaço vazio resultante é preenchido através de interpolação linear, utilizando os valores do histórico disponível. Desta forma, os compósitos mensais

herdam as características das imagens Sentinel-2, sendo apenas retiradas as bandas 1, 9 e 10.

As imagens utilizadas no decorrer deste trabalho e na produção dos MIAEV estão limitadas ao período dos Anos Agrícolas 2017 – 2022 (sendo o ano agrícola de 2017 o período entre Outubro 2016 e Setembro de 2017), e foram produzidas pelo pessoal técnico da DGT utilizando os compósitos mensais mencionados anteriormente. Os MIAEV naturalmente herdam características dos compósitos mensais ou das imagens diárias, traduzindo-se nas características apresentadas na Tabela 2, sendo que as diferenças entre MIAEV passam mais pelo processamento dos dados dos compósitos ou imagens através do cálculo de índices de vegetação, aritmética entre os mesmos ou comparações com o período histórico.

Resolução Espacial	10 m
Periodicidade	Mensal
Formato	Raster
Disponibilidade	viSMOS, SNIG
Projeção Geográfica	ETRS89 Portugal TM06 EPSG:3763

Tabela 2 - Características dos MIAEV

Foram usados instrumentos como o software ArcGIS Pro e ArcMap (ESRI, 2012) para a visualização e criação de mapas de teste e exemplo, tal como para a criação de *colormaps* ilustrativos da informação a transmitir. Sendo um mapa uma demonstração inerentemente visual, as cores a utilizar e a transição entre as mesmas foram alvo de vários testes até chegar à fase de produção. A linguagem de programação R (R Core Team, 2021), através do Rstudio, possibilitou a automatização de determinados processos como a implementação de vários índices de vegetação e a criação de legendas dos visualizadores SMOS. Alguns exemplos dos índices que foram implementados são: NDVI, SAVI, SAVI L-Ajustado, NBR, no caso de índices sem histórico, e VCI (em percentagem ou apenas utilizando o máximo histórico), NDVI vs o seu Máximo Sazonal, dNBR e dNDVI, no caso de índices que usam várias imagens ao longo do tempo. Também foram implementadas várias reclassificações dos mesmos. Esta automatização permitiu expandir o processo de teste e iteração, aumentando a

amostra de imagens exemplo e fortalecendo as fundações das decisões tomadas na escolha dos produtos a apresentar.

Tendo definido a necessidade de utilização de imagens de satélite e a utilização do Sentinel-2, é ainda pertinente justificar as escolhas dos produtos que integram os MIAEV. Sendo produtos representativos do estado da vegetação, a extensão do espectro eletromagnético relevante concentra-se maioritariamente no vermelho, infravermelho e no infravermelho de onda curta. A combinação destas bandas, como visto na Revisão de Literatura (Capítulo 2), pode chamar-se “Índice de Vegetação”.

A avaliação do estado atual da vegetação pode ser alcançada usando vários métodos como a utilização de Índices de Vegetação (como o NDVI, SAVI, EVI, etc.) ou a utilização de modelos de biomassa (correlações lineares entre índices de vegetação e biomassa ou modelos incluindo precipitação, temperatura e tipo de ecossistema). O critério da “Maximização da Precisão dos Dados” prefere a utilização de dados factuais por oposto a previsões ou modelos. Este critério, juntamente com a “Maximização da Independência dos Dados” orientou a escolha para a utilização de índices de vegetação, que se focam em dados factuais e não costumam depender de variáveis externas que se possam revelar inconsistentes, como por exemplo uma métrica da precipitação anual. A utilização de índices como o SAVI, EVI, MSAVI, OSAVI é descartada pelas mesmas razões, juntamente com a sua maior complexidade operacional. As restantes iterações do NDVI (MNDVI, WDRVI, TVI, CTVI, TTVI, DVI, RDVI) tal como outras transformações (TCI) aumentam em complexidade operacional e não aparentam apresentar melhorias que justifiquem essa complexidade. Outros índices, como o NDII, NDWI e SRWI, que se focam na quantificação da quantidade de água presente na vegetação, apresentam elevadas correlações com o NDVI. Desta forma, e também em conformidade com a escolha de outras instituições de relevância internacional, como o Copernicus, o índice escolhido para a avaliação momentânea do estado da vegetação foi o NDVI, constituindo o produto “Verdura da Vegetação”, elaborado no capítulo 4. Este índice é capaz de produzir uma avaliação simples, factual e independente do estado da vegetação. Engloba também uma avaliação da quantidade de água da vegetação através da sua elevada correlação com o NDII e NDWI, evitando a elaboração de um outro produto através do critério da “Minimização de Redundância”.

A escolha do NDVI como índice base dos MIAEV também se solidifica quando se explora a sua capacidade de avaliar o estado da vegetação através da sua refletância. A Figura 2 apresenta o padrão espectral da vegetação (especificamente relva) verde ou seca e as partes desse padrão que são capturadas pelas bandas do Sentinel-2. O NDVI trabalha com as bandas 4 e 8, zonas onde a diferença entre vegetação seca (linha castanha) e vegetação vigorosa (linha verde) é máxima. Essa diferença é calculada e normalizada, traduzindo-se depois num número no intervalo $[-1,1]$, onde quanto maior o número maior o vigor da vegetação. Desta forma, usando o NDVI, é possível obter uma métrica da quantidade de vegetação com vigor, altamente correlacionada com a quantidade de água na vegetação.

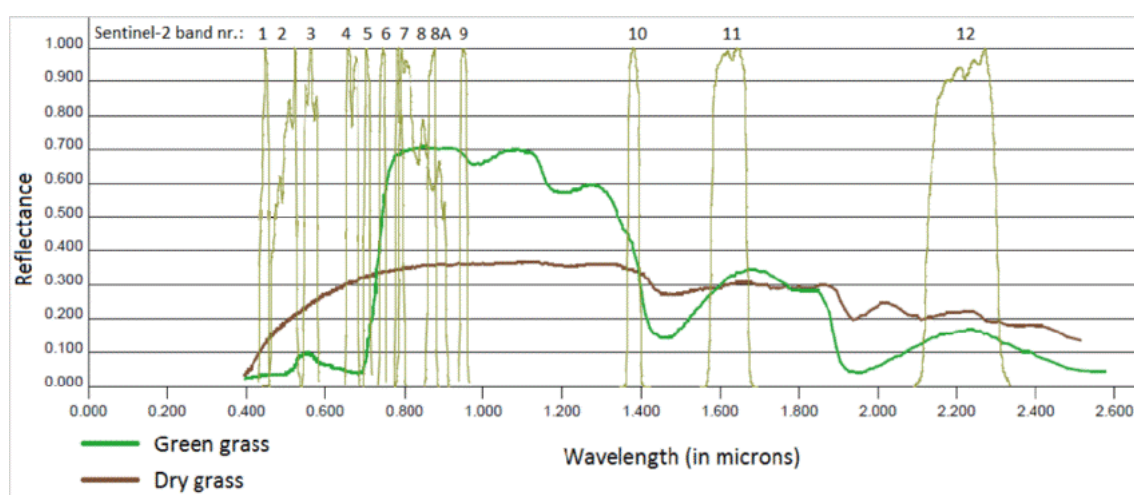


Figura 2 - Padrão Espectral da Vegetação (relva) | Nota: Adaptado de Bekkema (2018)

A detecção de anomalias inclui por necessidade um histórico e pode ser alcançada com produtos como o VCI, que utiliza o histórico total de imagens. Discussões e testes internos na DGT transformaram o VCI num produto que utiliza apenas o histórico homólogo, numa tentativa de alcançar um produto capaz de detetar anomalias entre meses homólogos. Este produto, que apresentava uma percentagem, foi depois transformado num percentil. Esta transformação remete para uma mais fácil compreensão do produto por parte dos utilizadores. Como um percentil homólogo não é dependente de nenhum índice, e tendo escolhido o NDVI anteriormente, este produto utiliza a “Verdura da Vegetação” como histórico. Assim nasceu o “Percentil Homólogo da Verdura da Vegetação”, apresentado no capítulo 4.

A detecção de mudanças bruscas na vegetação, nomeadamente de mudanças entre meses consecutivos, pode ser alcançada utilizando índices de vegetação como o NBR e NBR2 (desenhados para a detecção de áreas de incêndios) juntamente com aritmética simples entre índices. No entanto, Hislop et al (2018), num estudo comparativo entre a resposta de vários índices de vegetação a um distúrbio, apresenta o NDVI como sendo o índice que mais reage a um grande distúrbio na vegetação. Consequentemente, foi escolhido o NDVI, minimizando o custo de produção. Desta forma surgiu a “Diferença Mensal da Verdura da Vegetação”, apresentado no capítulo 4.

É importante mencionar que um aumento de complexidade operacional também se traduz numa maior dificuldade de compreensão por parte dos utilizadores e que consequentemente deverá ser evitada, especialmente quando o rácio entre complexidade adicional e melhorias for desfavorável.

A utilização desta metodologia, juntamente com a prévia revisão de literatura, culminou na formulação dos produtos descritos e apresentados no capítulo 4 – Produtos Obtidos, Apresentação e Discussão de Resultados. De notar que a fase de teste, formulação dos produtos e escolha de produtos finais para produção na DGT foi acompanhada de perto e validada pelos técnicos desta mesma instituição.

4. Apresentação e Discussão de Resultados

4.1 Produtos Obtidos

Estes produtos são baseados na pesquisa feita na Revisão de Literatura, orientada pela Metodologia, juntamente com os vários testes e iterações realizados internamente e na experiência presente na DGT. Todos esses fatores culminaram em 3 produtos principais que compõem a primeira versão oficial dos MIAEV (disponível para visualização nos visualizadores do projeto SMOS), apresentada de seguida:

1. Verdura da Vegetação:

A Verdura da Vegetação (VV) é uma avaliação absoluta e qualitativa do vigor atual da vegetação. Produzida usando um compósito mensal da mediana de várias imagens, este produto utiliza o NDVI para apresentar uma variação do vigor da vegetação no intervalo [0,100]. Os valores negativos do NDVI são reclassificados para zero porque não são relevantes no que toca a vegetação, sendo o valor máximo (100) equiparado ao valor 1 do NDVI, de maneira a que um valor de 0.5 no NDVI equivale a 50 na VV. Assim sendo, a fórmula utilizada é a seguinte:

$$\text{Verdura da Vegetação (VV)} = \frac{\text{Infravermelho Próximo} - \text{Vermelho}}{\text{Infravermelho Próximo} + \text{Vermelho}} * 100$$

2. Percentil Homólogo da Verdura da Vegetação:

O Percentil Homólogo da Verdura da Vegetação (PHVV) é uma avaliação relativa qualitativa do vigor atual da vegetação em comparação com o histórico homólogo de compósitos mensais da mediana disponíveis. Este produto varia no intervalo [0,100], e como qualquer percentil, representa quantos valores no histórico estão acima ou abaixo do valor introduzido. Neste caso, introduzido o valor atual de cada pixel do NDVI retira-se um número que representa a quantidade em percentagem de valores do histórico do NDVI que estão acima ou abaixo do NDVI atual.

3. Diferença Mensal da Verdura da Vegetação;

A Diferença Mensal da Verdura da Vegetação (DMVV) é uma avaliação absoluta das mudanças no vigor da vegetação entre o mês atual e mês anterior, ou do primeiro mês anterior no caso de existirem imagens durante esse mês com cobertura persistente de nuvens. O valor da diferença é depois multiplicado por 100. Desta forma, uma mudança do NDVI de 1 para -1 originaria um valor de -200, uma mudança máxima na direção decrescente. O oposto também se verificaria de -1 para 1, com um valor de 200, uma mudança máxima na direção crescente. No entanto, valores perto dos extremos são extremamente raros, e acontecem maioritariamente em zonas não interessantes (água). Desta forma, o intervalo foi reclassificado para -100 a 100. No caso de não existirem observações no mês atual, este produto deixa os pixéis vazios (sem dados). Importa mencionar que são utilizadas imagens diárias na produção deste MIAEV e não os compósitos mensais.

$$\text{Diferença Mensal da Verdura da Vegetação (DMVV)} = \\ \text{Verdura da Vegetação (Mês Atual)} - \text{Verdura da Vegetação (Mês Anterior)}$$

4.2 Apresentação e Discussão de Resultados

Os resultados deste trabalho dividem-se na capacidade dos produtos obtidos de captar variações intra-anuais do estado da vegetação, na distinção do ponto temporal em que ocorrem e na sua intensidade, tanto entre meses consecutivos como face ao histórico disponível. Estas variações surgem, naturalmente, de uma qualquer mudança no estado da vegetação a estudar. Desta forma, os exemplos escolhidos passam por situações onde é espectável existir uma mudança no estado da vegetação, provando a capacidade dos produtos de captar e apresentar uma avaliação qualitativa dessa variação.

4.2.1 Culturas Agrícolas Intra-Anuais

A Figura 3, ilustrativa do produto “Verdura da Vegetação”, destaca a vermelho uma cultura temporária com duas colheitas por ano, onde é possível destacar a mudança do estado da vegetação ao longo dos vários meses do ano. No espaço de apenas quatro meses é possível observar um sinal de verdura muito forte a cair até valores mínimos,

revertendo a sinais elevados ao longo dos dois meses seguintes. Este produto apresenta uma utilidade mensurável para qualquer produtor agrícola, que agora poderá monitorizar remotamente o estado atual das suas culturas, o seu progresso ao longo do tempo e usar essa informação para tentar otimizar uma possível rotação de culturas. No Anexo 1 encontra-se o percurso do sinal ao longo do ano agrícola de 2021.



Figura 3 - Verdura da Vegetação Ano Agrícola 2021 - Distrito: Santarém Concelho: Chamusca - Escala: 1:19000

Na Figura 4, o produto “Percentil Homólogo da Verdura da Vegetação” acusa um enquadramento do sinal dentro do seu histórico homólogo. Em Março de 2021, o sinal é elevado em comparação a outros Marços. O oposto acontece em Abril de 2021, onde o sinal é muito baixo em comparação com os outros meses de Abril, devido ao corte da vegetação. Em Maio a vegetação começa a crescer, em valores acima da média de outros Maiores. Por fim, em Junho o sinal é muito elevado em comparação a todos os outros Junhos. Este produto não é tão útil para um qualquer produtor agrícola como a Verdura da Vegetação, mas pode ter utilidade para a comparação entre o estado de uma cultura num determinado mês com outros meses homólogos. No Anexo 2 encontra-se o percurso do produto ao longo do ano agrícola de 2021.

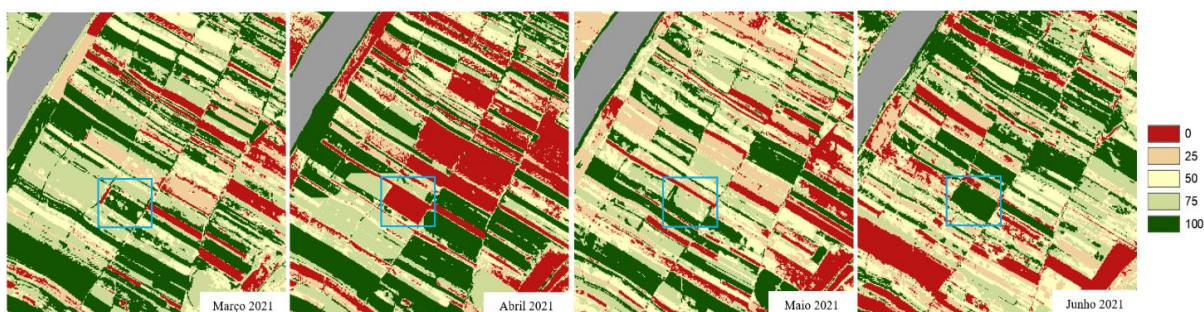


Figura 4 - Percentil Homólogo da Verdura da Vegetação Ano Agrícola 2021 - Distrito: Santarém Concelho: Chamusca - Escala: 1:19000

A “Diferença Mensal da Verdura da Vegetação”, para a mesma situação, capta apenas a intensidade das mudanças de um mês em comparação com o mês anterior. Assim sendo, na Figura 5, é fácil observar a queda intensa do sinal no mês de Abril e o crescimento presente nos dois meses seguintes. Um qualquer produtor agrícola pode utilizar este produto para observar a intensidade do crescimento das suas culturas, tal como monitorizar a colheita. No Anexo 3 podem observar-se as diferenças entre os meses consecutivos do ano agrícola de 2021.

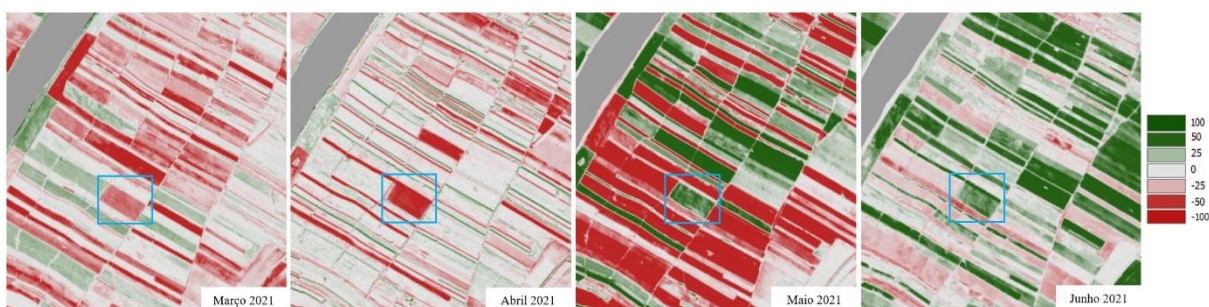


Figura 5 - Diferença Mensal da Verdura da Vegetação Ano Agrícola 2021 - Distrito: Santarém
Concelho: Chamusca - Escala: 1:19000

4.2.2 Perda e Recuperação de Vegetação (Fogos)

Uma outra situação onde é expectável a mudança do estado da vegetação é depois da ocorrência de um incêndio. Na Figura 6 pode observar-se a área afetada pelo incêndio de 22 de Julho de 2019, destacada a vermelho. A “Verdura da Vegetação” é capaz de captar o estado da vegetação em cada mês em questão, apresentando um sinal forte antes do incêndio, muito fraco imediatamente depois, e crescente ao longo dos meses seguintes até à recuperação total da zona. A utilidade deste MIAEV nesta situação é transversal a todas as classes de vegetação, mas é particularmente interessante na monitorização de Florestas e Matos, algo que é de elevado interesse para a Proteção Civil e para os utilizadores que queiram monitorizar o estado atual dos seus terrenos, de forma a melhor compreenderem, por exemplo, o impacto de um determinado incêndio. Nos Anexos 4, 5 e 6 pode observar-se a evolução do produto ao longo dos anos agrícolas de 2019, 2020 e 2021, respetivamente, e a sua evolução relativamente ao incêndio em questão.

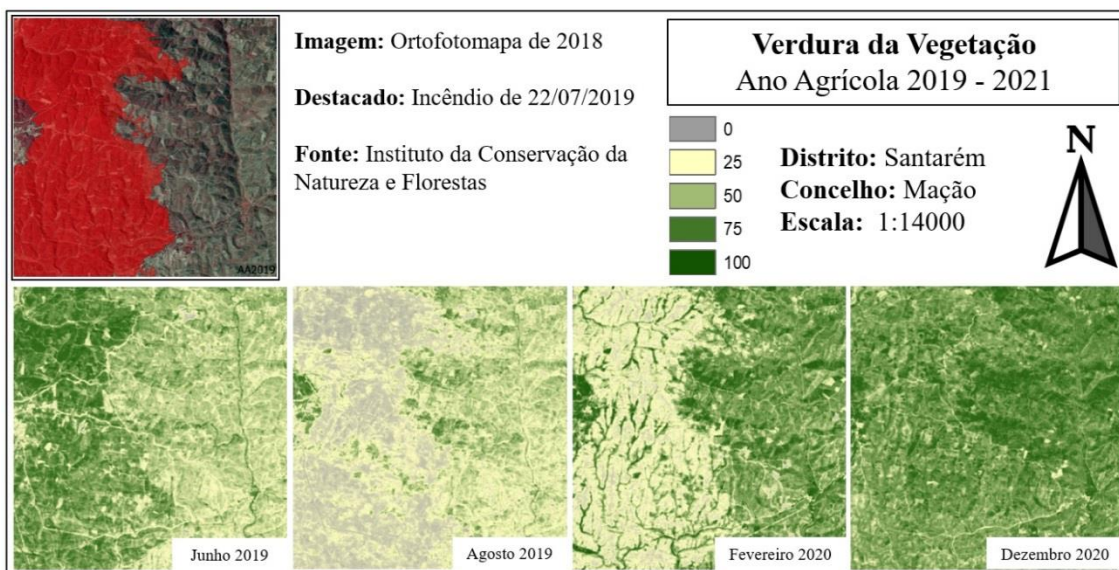


Figura 6 - Verdura da Vegetação - Ano Agrícola 2019 -2021 - Incêndio de 22/07/2019

O “Percentil Homólogo da Verdura da Vegetação”, na Figura 7, composta maioritariamente por floresta e mato, acusa o expectável. Antes do incêndio, cada pixel está a ser comparado com os seus mínimos e máximos homólogos, originando uma distribuição pouco padronizada. Imediatamente a seguir ao incêndio, praticamente todos os valores na área afetada acusam valores muito próximos ao mínimo histórico (ou seja, percentis próximos ou iguais a 0). A recuperação só começa a ser visível quando os valores se começam a aproximar aos valores pré-incêndio para o mês correspondente.

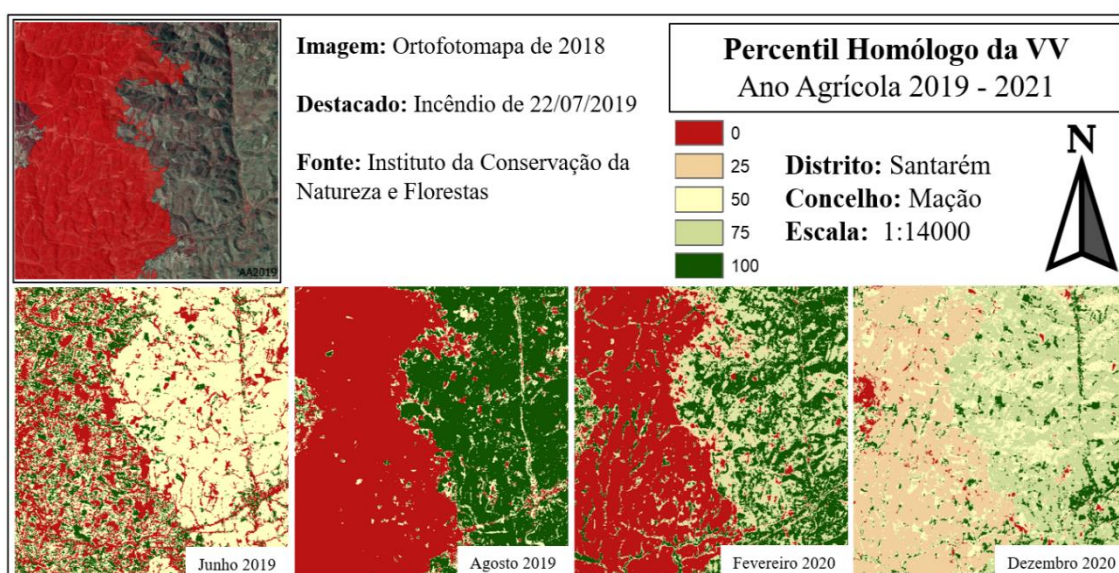


Figura 7 – Percentil Homólogo da Verdura da Vegetação - Ano Agrícola 2019 -2021 - Incêndio de 22/07/2019

A parte direita da Figura, correspondente também a uma zona de Floresta e Mato, está dentro do período de recuperação de um incêndio mais antigo, que ocorreu em 2017. Essa recuperação provavelmente explica a existência de valores acima da média homóloga em Agosto e Fevereiro, acusando uma recuperação em comparação aos meses dos anos anteriores. Este produto pode servir como indicador do retorno à normalidade, provando-se útil para autoridades locais e nacionais no acompanhamento das consequências de um determinado incêndio. Nos Anexos 7, 8 e 9 pode observar-se a evolução do produto ao longo dos anos agrícolas de 2019, 2020 e 2021, respetivamente, e a sua reação ao incêndio em questão, incluindo uma aproximação aos valores normais (percentil 50), indicando uma recuperação.

Por fim, a “Diferença Mensal da Verdura da Vegetação”, ilustrada na Figura 8, para o mesmo incêndio, apenas acusa grandes mudanças no mês de Julho, o mês em que efetivamente se deu o distúrbio. Este produto pode ser útil para a identificação geral de zonas afetadas por um determinado incêndio por parte de utilizadores comuns, tal como quaisquer rápidas recuperações. Um qualquer utilizador detentor de um terreno terá interesse em perceber se o seu terreno foi afetado por um determinado incêndio ou se valerá a pena verificar pessoalmente. No Anexo 10 pode observar-se a evolução do produto no ano agrícola do incêndio (2019).

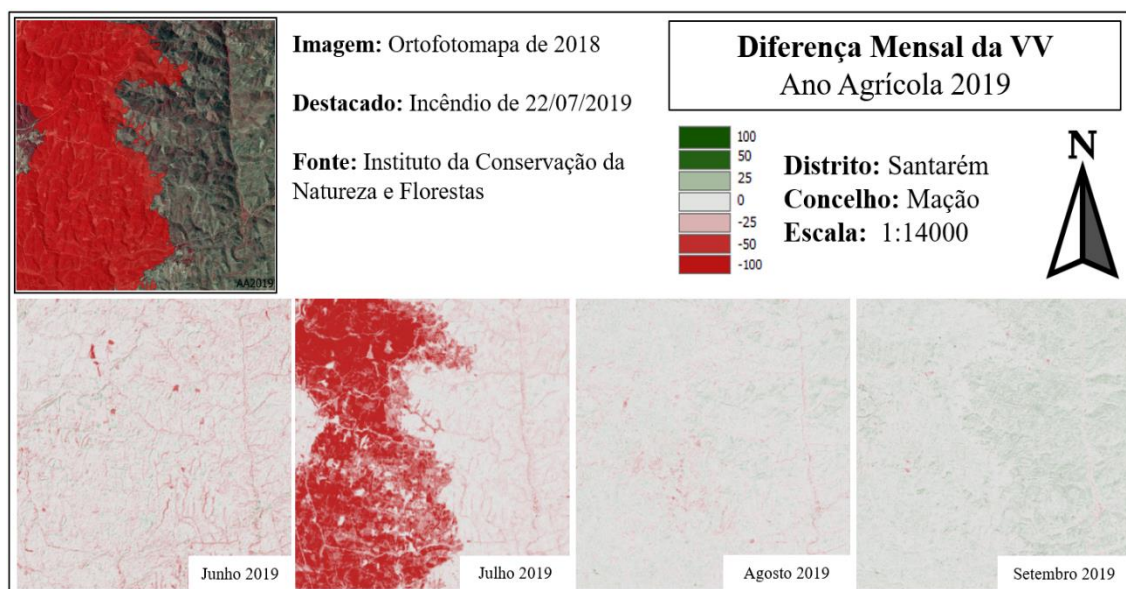


Figura 8 - Diferença Mensal da Verdura da Vegetação - Ano Agrícola 2019 -2021 - Incêndio de 22/07/2019

O conjunto destes três MIAEV tem utilidade em situações em que a monitorização da recuperação da vegetação e a existência de uma métrica de retorno à normalidade são importantes, como por exemplo em zonas de Floresta. Os MIAEV permitem avaliar o tempo de recuperação de uma determinada área florestal. Uma recuperação demasiado rápida acusa a presença de Matos ou vegetação herbácea, por oposto a uma recuperação lenta ou muito lenta que pode indicar Florestas. Ou talvez exista uma área definida especificamente para plantar uma determinada espécie num determinado terreno (como é comum em áreas de pinheiro ou outras espécies de árvores protegidas) e a velocidade da recuperação do sinal seja demasiado rápida, o que pode indicar a presença de, por exemplo, eucaliptos, ou invés de pinheiros que demoram consideravelmente mais tempo a crescer.

4.2.3 Perda e Recuperação de Vegetação (Cortes)

Uma das ocorrências mais comuns de mudança do estado da vegetação é a perda de vegetação derivada de um corte em zona florestal ou de mato. O produto “Verdura da Vegetação”, na Figura 9 (que representa uma área de exploração de floresta), apresenta uma série de quedas de valores em várias faixas retangulares ao longo dos quatro meses. Estas tonalidades amarelas que vão surgindo nos meses de Junho, Julho e Agosto representam as sequências de cortes ou limpezas de terreno ao longo do Ano Agrícola de 2019.

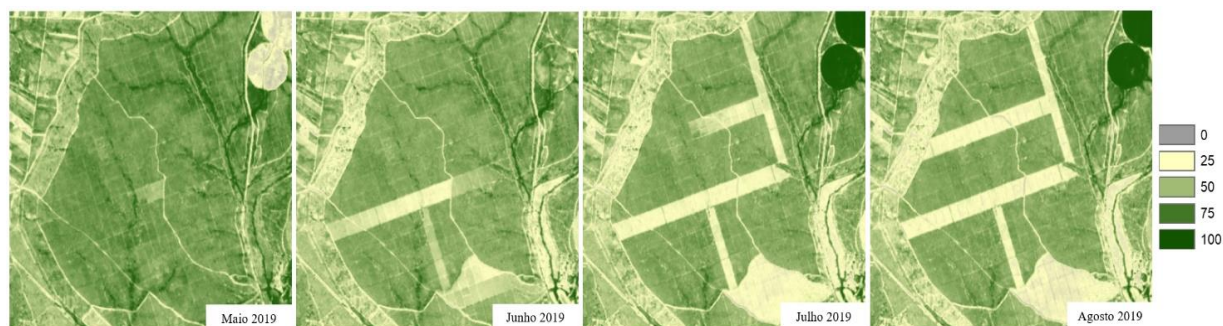


Figura 9 - Verdura da Vegetação - Ano Agrícola 2019 - Distrito: Santarém Concelho: Coruche - Escala: 1:11000

Tal como qualquer outra perda de vegetação, é possível acompanhar a sua recuperação com este produto. A Figura 10 apresenta outros quatro meses distribuídos ao longo dos anos agrícolas de 2020 e 2021, onde se podem observar outros cortes ao longo da mesma área de estudo, representados pelo surgimento de tonalidades amarelas,

tal como a eventual recuperação da vegetação, representada pelos valores mais verdes onde anteriormente eram amarelos.

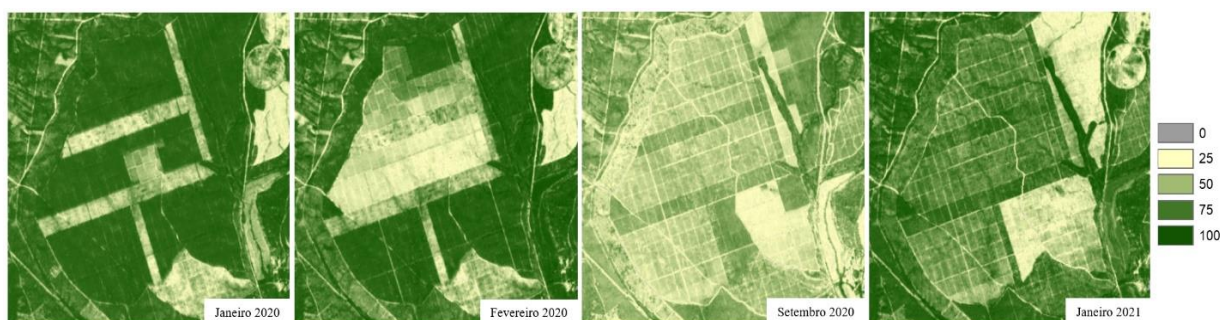


Figura 10 - Verdura da Vegetação - Ano Agrícola 2020 – 2021 - Distrito: Santarém - Concelho: Coruche - Escala: 1:11000

É importante mencionar que a “Verdura da Vegetação” deteta e acompanha a recuperação de cortes (ou secas) ao longo de todas as classes de vegetação da COS, sejam elas Pastagens Espontâneas (vegetação herbácea), Florestas ou Matos (ou Agricultura, descrita anteriormente). É claro que o comportamento das diferentes classes dentro do produto é diferente, especialmente no que toca à resposta proveniente da quantidade de água na vegetação. A vegetação herbácea é a mais sensível a variações sazonais, seguida dos Matos e por fim, com pouca variação, as Florestas.

Este produto poderá ter particular importância para produtores de matérias-primas como por exemplo plantações de madeira. Esses utilizadores utilizar este produto como metodologia de monitorização do crescimento, corte e recuperação dos seus terrenos, comparando-os com o que seria expectável dentro do planeamento. Também poderá ser útil para as autoridades municipais, que poderão querer confirmar se determinadas zonas foram tratadas de acordo com a legislação atual. Nos Anexos 11, 12 e 13 pode observar-se a sequência de cortes e de recuperação da vegetação ao longo dos anos agrícolas de 2019, 2020, 2021.

O “Percentil Homólogo da Verdura da Vegetação”, na Figura 11, reconhece que os cortes da vegetação não são comuns nos históricos dos meses respetivos, apresentando valores mínimos. Mesmo assim, é possível reconhecer algum tipo de recuperação ao longos dos quatro meses da Figura 12, onde os valores de algumas zonas já se começam a aproximar da normalidade (cor amarela, representativa do percentil 50). Este produto distingue eficazmente zonas de corte de zonas de recuperação ou

“normais”, e pode ser útil na comparação entre aproveitamentos anuais. Um determinado produtor de madeira pode confirmar se a exploração do ano corrente foi feita com a mesma intensidade e rigorosidade que nos anos anteriores, bem como acompanhar a plantação e recuperação correspondente. Nos Anexos 14, 15 e 16 pode observar-se o comportamento deste produto ao longo dos anos agrícolas de 2019, 2020, 2021, onde se pode observar o começo de um retorno aos valores médios após o corte.



Figura 11 - Percentil Homólogo da Verdura da Vegetação - Ano Agrícola 2019 - Distrito: Santarém Concelho: Coruche - Escala: 1:11000



Figura 12 – Percentil Homólogo da Verdura da Vegetação Ano Agrícola 2019 - Distrito: Santarém - Concelho: Coruche - Escala: 1:11000

A “Diferença Mensal da Verdura da Vegetação”, como mencionado anteriormente, foca-se nas diferenças entre cada mês consecutivo. Desta forma, os resultados que apresenta neste exemplo podem interpretar-se como “O que foi cortado este mês?” ou “Qual foi a recuperação da vegetação deste mês?”. Um corte ou uma recuperação rápida, que são alterações bruscas, são mais facilmente identificáveis através das zonas mais vermelhas ou verdes. Ao longo dos primeiros três meses da Figura 13 podem observar-se as zonas que foram cortadas de um mês para o seguinte. Os Anexos 17, 18 e 19 acompanham este produto nos anos agrícolas 2019, 2020 e 2021.

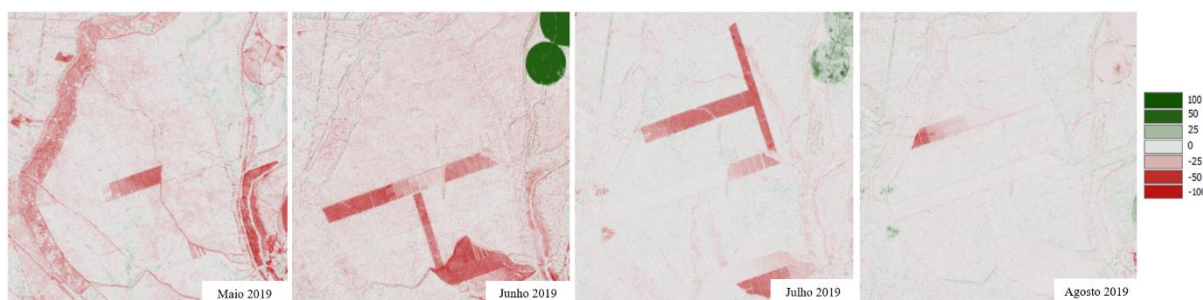


Figura 13 – Diferença Mensal da Verdura da Vegetação - Ano Agrícola 2020 - 2021 - Distrito: Santarém Concelho: Coruche - Escala: 1:11000

É importante relembrar que a gestão de faixas de interface urbano-rural, dentro do Sistema de Gestão Integrada de Fogos Rurais, do qual a DGT faz parte, pode ser também um exemplo de aplicação dos MIAEV. Estes produtos, neste caso específico a “Verdura da Vegetação”, possibilitam a monitorização do estado da vegetação nas faixas de interface de áreas edificadas. A resolução espacial de 10m permite uma monitorização ainda mais espacialmente específica do que o limite de tamanho mínimo da faixa de gestão, previsto no Artigo 60º do Decreto-Lei nº 82/2021 de 13 de Outubro, de 50 a 100 m dependendo das circunstâncias. Na Figura 14 podem observar-se imagens de Janeiro e Agosto de 2021, tanto do produto “Verdura da Vegetação” como imagens de Falsa Cor (RGB - Infravermelho Próximo, Vermelho, Verde). Pode observar-se a drástica redução de valores dentro do *Buffer* de 100 m em Agosto de 2021 em comparação com antes do corte em Janeiro de 2021.

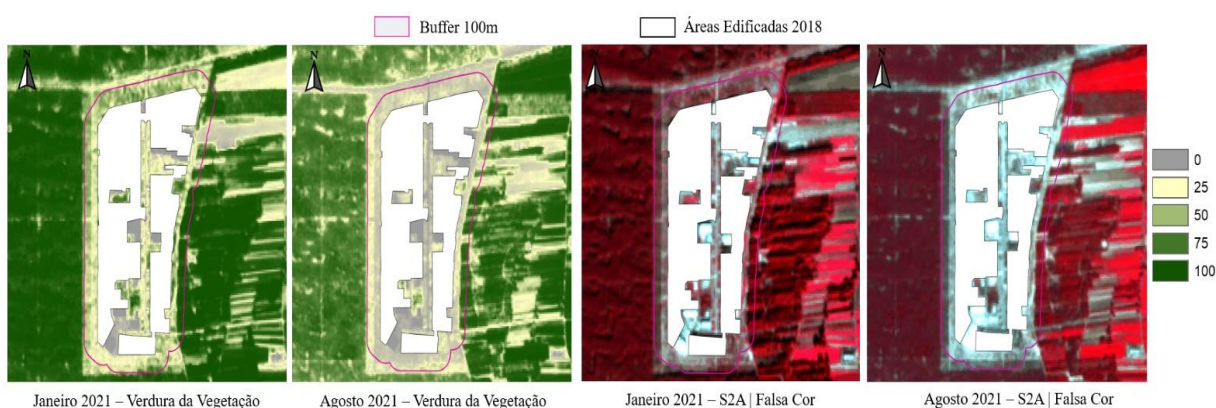


Figura 14 - Verdura da Vegetação Ano Agrícola 2021 - Distrito: Aveiro - Concelho: Vagos - Escala: 1:30000

Por fim é relevante mencionar que foram produzidos alguns subprodutos dos MIAEV, como um mapa do número de observações mensais de um compósito e um mapa da data da última observação utilizada na produção do DMVV. Estes subprodutos não foram disponibilizados oficialmente devido a limitações operacionais na DGT. Este tipo de subprodutos permite compreender a rara ocasião em que certas zonas de um MIAEV parecem não ser congruentes com a qualidade geralmente verificada no resto do mapa. Na Figura 15 pode observar-se o MIAEV da Verdura da Vegetação de Janeiro 2021 (esquerda) e o seu respetivo mapa do número de observações mensais (direita). A vermelho encontra-se destacada uma zona para a qual não existem imagens naquele mês, impossibilitando a disponibilização de valores reais. Por oposto a apresentar um vazio, o MIAEV apresenta um preenchimento dessa zona através de interpolação linear, mencionada no Capítulo 3.

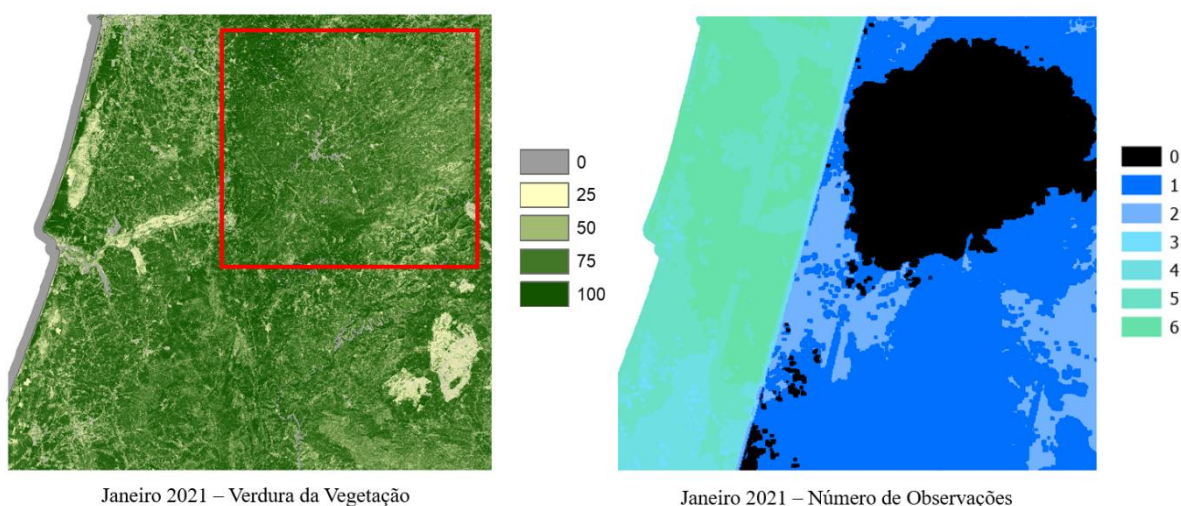


Figura 15 - Verdura da Vegetação (esquerda) - Mapa do Número de Observações Mensais (direita) - Janeiro 2021

Na rara ocasião em que não existam observações num determinado mês, o produto DMVV apresenta um vazio (pixéis sem valores). Tal é contextualizado com a utilização do mapa do dia da última observação utilizada no DMVV. Na Figura 16 pode observar-se o DMVV de Março 2022 (esquerda) e o subproduto em questão (direita). A preto encontram-se as zonas sem observações mensais e que consequentemente apresentam valores vazios no DMVV.

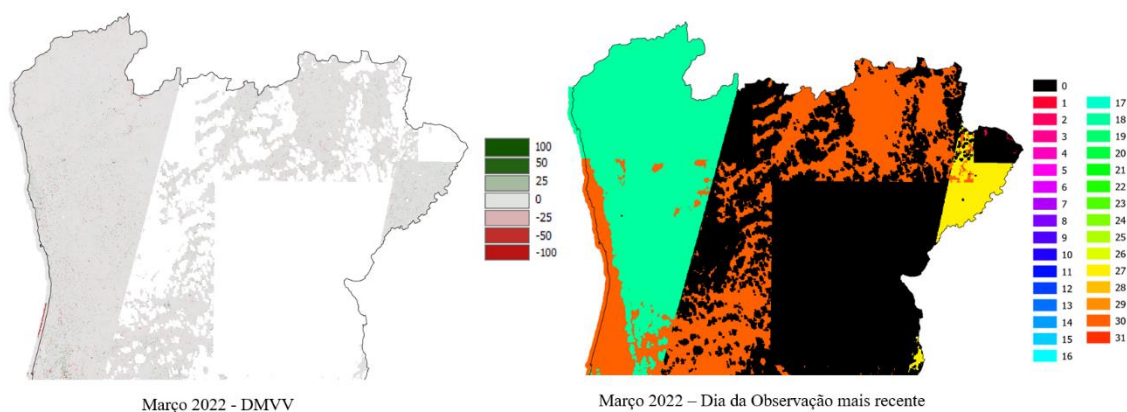


Figura 16 - Diferença Mensal da Verdura da Vegetação (esquerda) - Mapa do Dia da Observação mais recente (direita) - Março 2022

Tendo apresentado vários exemplos dos três produtos, pode concluir-se que estes se especializam em vertentes diferentes de monitorização do estado da vegetação. A “Verdura da Vegetação” é uma análise do “agora”, do “estado atual” ou do “presente”. No entanto, apenas com este produto não é facilmente visível a intensidade das mudanças entre cada mês consecutivo, nem existe uma perceção da existência de anomalias ao longo do tempo no estado da vegetação. Estas duas lacunas são preenchidas, respetivamente, pela “Diferença Mensal da Verdura da Vegetação”, que é um produto especializado na quantificação das diferenças no estado da vegetação entre meses consecutivos e pelo “Percentil Homólogo da Verdura da Vegetação”, que se foca na deteção de anomalias no estado da vegetação.

É importante mencionar que estes produtos são focados em classes de ocupação do solo relacionadas com a vegetação, tais como “Agricultura, Pastagens, Superfícies Agroflorestais, Florestas ou Matos” e que não são indicados para qualquer tipo de avaliação fora deste domínio.

Sendo baseados em compósitos mensais, seria benéfico disponibilizar ao público alguns dos subprodutos produzidos, como o mapa de número de observações representativo da quantidade de imagens de satélite utilizadas para produzir cada pixel do produto mensal. Uma particularidade dos compósitos é o facto de se a última imagem utilizada para o compósito mensal de Janeiro 2023 for, por exemplo, a do dia 25/01/2023, e existir um incêndio dia 26/01/2023, esse incêndio só será reportado no

mapa de Fevereiro 2023. Assim sendo, outro subproduto disponibilizado poderia ser um mapa do último dia utilizado como observação para cada pixel num determinado compósito mensal. A disponibilização deste tipo de subprodutos providenciaria uma maior contextualização e transparência na produção dos MIAEV.

Assim sendo, os produtos apresentados são uma métrica sólida, simples e eficiente de avaliação intra-anual do estado da vegetação (Pergunta de Partida), capazes de detetar cortes na vegetação (Pergunta Derivada 1), mudanças intra-anuais no vigor da vegetação (Pergunta Derivada 2) e anomalias no estado da vegetação (Pergunta Derivada 3).

5. Conclusões

Este trabalho comprometeu-se a avaliar intra-anualmente o estado da vegetação usando os MIAEV. Esse processo incluiu objetivos mais específicos, como uma análise exploratória da avaliação do estado da vegetação e a definição de um método de Detecção Remota, de um Satélite e do(s) Índice(s) de Vegetação a utilizar. Estas decisões foram tomadas garantindo o cumprimento dos critérios de produção do subcapítulo 3.2 e justificando os métodos utilizados, apresentando por fim exemplos do comportamento dos produtos desenvolvidos. A revisão de literatura explorou diferentes métodos de avaliação do estado da vegetação, métodos de detecção remota e índices existentes na literatura. Esta pesquisa, em conjunção com o conhecimento prático presente na DGT e um longo processo de testes e iterações suportados pela automatização implementada na linguagem R, culminou na escolha do NDVI, proveniente de imagens do Sentinel-2, como base para os MIAEV. Os critérios que envolveram esta escolha tal como a sua justificação estão presentes no capítulo 3. Assim nasceram os três diferentes produtos que compõem os MIAEV. Estes produtos, apresentados no capítulo 4, apresentam uma capacidade mensurável de avaliar o estado da vegetação, juntamente com possíveis anomalias no mesmo. Esta capacidade estende-se para o acompanhamento do estado de culturas intra-anuais e para a detecção de cortes na vegetação (de causas humanas ou naturais) tal como para a avaliação da intensidade dessas mudanças e para o acompanhamento da sua recuperação. Estas capacidades são transversais às várias classes de ocupação do solo que correspondem a vegetação. Os MIAEV têm imenso potencial no que toca à sua aplicabilidade prática, permitindo aos utilizadores (individuais ou coletivos) monitorizar remotamente o estado das suas culturas, avaliar as consequências gerais de diferentes condições de solo ou rega e medir a intensidade do seu crescimento ou colheita, tal como qualificar e definir espacialmente o impacto de um determinado incêndio. Esta capacidade de monitorização da recuperação da vegetação permite, por exemplo, uma comparação do valor real apresentado nos MIAEV com o valor expectável para cada objetivo e podem levantar alertas para uma fiscalização mais específica por parte do utilizador. Estes produtos também podem ser usados para monitorizar as faixas de interface de áreas edificadas, como descrito no capítulo anterior. É importante mencionar que a disponibilidade de uma série temporal

de imagens desde 2017 até 2022, e continuamente a ser atualizada pela DGT em tempo quase real (15 dias entre a produção e a disponibilização no SNIG e viSMOS), é uma mais valia para estudos ao nível da evolução da vegetação. Assim sendo, os resultados deste trabalho apresentam-se como um conjunto de produtos de base sólida e factual, capazes de avaliar intra-anualmente o estado da vegetação, que vão permitir a elaboração de estudos mais específicos por parte de um qualquer indivíduo ou instituição.

Referências Bibliográficas

- Alam, M. J. et al. (1988). A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Bangladesh Medical Research Council Bulletin*, 22 (1), 27–32. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
- Alcaras, E. et al. (2022). Normalized Burn Ratio Plus (NBR+): A New Index for Sentinel-2 Imagery. *Remote Sensing*, 14 (1727), 1–19. <https://doi.org/10.3390/rs14071727>
- Aranha, J. et al. (2020). Shrub biomass estimates in former burnt areas using Sentinel-2 images processing and classification. *Forests*, 11 (5), 1–19. <https://doi.org/10.3390/F11050555>
- Australian Government, 2022, *Normalized Difference Vegetation Index*. (URL: <http://www.bom.gov.au/climate/austmaps/about-ndvi-maps.shtml>, consulta em 16-11-2022)
- Baret, F. et al. (1989). TSAVI: A Vegetation Index Which Minimizes Soil Brightness Effects on LAI and APAR Estimation. *12th Canadian Symposium on Remote Sensing Geoscience and Remote Sensing Symposium* (Vancouver: Canada).
- Bausch, W. C. (1993). Soil background effects on reflectance-based crop coefficients for corn. *Remote Sensing of Environment*, 46, 213–222. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(93\)90096-g](https://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90096-g)
- Bekkema, M. E., & Eleveld, M. (2018). Mapping grassland management intensity using sentinel-2 satellite data. *GI_Forum*, 1 , 194–213. https://doi.org/10.1553/GISCIENCE2018_01_S194
- Bhattacharya, S. et al. (2021). Assessment of Drought Using Multi-Parameter Indices, In *Advances in Water Resources Management for Sustainable Use*. editado por P.K. Roy, M.B. Roy & Supriya Pal, (Singapura: Springer) , Vol.131, pp. 243–255. https://doi.org/10.1007/978-981-33-6412-7_18
- Birth, G.S. & McVey, G. (1968). Measuring the color of growing turf with a reflectance spectroradiometer, *Agronomy Journal*, 60, 640-643.
- Blinn, C. E. et al. (2019). Landsat 8 based leaf area index estimation in loblolly pine plantations. *Forests*, 10, 1–18. <https://doi.org/10.3390/f10030222>
- Bright, B. C. et al. (2019). Examining post-fire vegetation recovery with Landsat time series analysis in three western North American forest types. *Fire Ecology*, 15 (1). <https://doi.org/10.1186/s42408-018-0021-9>

- Chen, J. M. (1996). Evaluation of vegetation indices and a modified simple ratio for boreal applications. *Canadian Journal of Remote Sensing*, **22** (3), 229–242. <https://doi.org/10.1080/07038992.1996.10855178>
- Copernicus Global Land Service, 2022, *Dry Matter Productivity*. (URL: <https://land.copernicus.eu/global/products/dmp>, consulta em 16-11-2022)
- Copernicus Global Land Service, 2022, *Normalized Difference Vegetation Index*. (URL: <https://land.copernicus.eu/global/products/ndvi>, consultado em 16-11-2022)
- Copernicus Global Land Service, 2022, *Vegetation Condition Index*. (URL: <https://land.copernicus.eu/global/products/vci>, consulta em 16-11-2022)
- Coutinho, C. (2015). *Metodologia de Investigação em Ciências Sociais e Humanas: Teoria e Prática*. Coimbra: Almedina.
- Cowgill, G. L. (2004). Origins and Development of Urbanism: Archaeological Perspectives. *Annual Review of Anthropology, Kansas State University*, **33**, 525-49
- Das, S., & Singh, T. P. (2012). Correlation analysis between biomass and spectral vegetation indices of forest ecosystem. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, **1** (5), 1–13.
- Deering, D. & Rouse, J. (1975) Measuring ‘Forage Production’ of Grazing Units from Landsat MSS Data, *10th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, pp. 1169-1178.
- Direção-Geral do Território, 2022, *Quem somos*. (URL: <https://www.dgterritorio.gov.pt/dgt/quem-somos>, consulta em 16-11-2022)
- Direção-Geral do Território, 2022, *SMOS – Ficha de Projeto*. (URL: https://www.dgterritorio.gov.pt/sites/default/files/ficheiros-dgt/SMOS-Ficha_de_projeto.pdf, consulta em 16-11-2022)
- Environmental Systems Research Institute (ESRI). (2012). ArcGIS Release 10.1. Redlands, CA.
- Erdle, K., Mistele, B., & Schmidhalter, U. (2011). Comparison of active and passive spectral sensors in discriminating biomass parameters and nitrogen status in wheat cultivars. *Field Crops Research*, **124** (1), 74–84. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.06.007>
- European Space Agency, 2013, *Vegetation Indices*. (URL: https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_Global_EN/SEMC6FNW91H_0.html, consulta em 16-11-2022)
- European Space Agency, 2022, *Project Biomass* (URL: <https://climate.esa.int/en/projects/biomass/about/>, consulta em 16-11-2022)

- European Space Agency, 2017, NDVI Seasonality Product. Product User Guide (URL: https://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/download/ESACCI-LC-Ph2-PUGv2_2.0.pdf, consulta em 16-11-2022)
- Fensholt, R. & Sandholt, I. (2003). Derivation of a shortwave infrared water stress index from MODIS near-and shortwave infrared data in a semiarid environment. *Remote Sensing Environment*, **87** (1), 111–121. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.07.002>
- Frazier, R. J. et al. (2014). Characterization of aboveground biomass in an unmanaged boreal forest using Landsat temporal segmentation metrics. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **92**, 137–146. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.03.003>
- Gao, B. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space, *Remote Sensing Environment*, **58**, 257–266 [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- García, M. J. L., & Caselles, V. (1991). Mapping burns and natural reforestation using thematic mapper data. *Geocarto International*, **6**, 31–37. <https://doi.org/10.1080/10106049109354290>
- Gates, D. M., et al. (1965). Spectral Properties of Plants. *Applied Optics*, **4**, 11-20. <https://doi.org/10.1364/ao.4.000011>
- Gitelson, A. A. (2004). Wide Dynamic Range Vegetation Index for Remote Quantification of Biophysical Characteristics of Vegetation. *Journal of Plant Physiology*, **161**, 165–173. <https://doi.org/10.1078/0176-1617-01176>
- Hislop, S. et al. (2018). Using landsat spectral indices in time-series to assess wildfire disturbance and recovery. *Remote Sensing*, **10** (3), 1–17. <https://doi.org/10.3390/rs10030460>
- Huete, A. R. (1987). Soil-Dependent Spectral Response in a Developing Plant Canopy. *Agronomy Journal*, **79**, 61–68. <https://doi.org/10.2134/agronj1987.00021962007900010013x>
- IFN, 2006, *Instruções para o trabalho de campo do inventário florestal nacional*. (UR: <https://www.icnf.pt/api/file/doc/f0c4bae340904de8>, consulta em 16-11-2022)
- Jackson, R.D., & Huete, A.R. (1991). Interpreting vegetation indices. *Preventive Veterinary Medicine*, **11**, 185-200.
- Jensen, J. R. (1983). Review Article: Biophysical Remote Sensing. *Annals of the Association of American Geographers*, **73** (1), 111–132.

- Jin, S. et al. (2013). A comprehensive change detection method for updating the National Land Cover Database to circa 2011. *Remote Sensing of Environment*, **132**, 159–175. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.01.012>
- Jin, S., & Sader, S. A. (2005). Comparison of time series tasseled cap wetness and the normalized difference moisture index in detecting forest disturbances. *Remote Sensing of Environment*, **94** (3), 364–372. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.10.012>
- Kamat, A. D. S., et al. (1983). Spectral assessment of leaf area index, chlorophyll content, and biomass of chickpea. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **49** (12), 1721–1727.
- Kauth, R. J. & Thomas, G. S. (1976). The tasseled Cap - A Graphic Description of the Spectral-Temporal Development of Agricultural Crops as Seen by LANDSAT. *LARS Symposia*, pp. 4B-41/4B-51
- Kogan, F. N. (1990). Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas. *International Journal of Remote Sensing*, **11** (8), 1405–1419.
- Li, F. et al. (2016). Modeling grassland aboveground biomass using a pure vegetation index. *Ecological Indicators*, **62**, 279–288. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.11.005>
- Lillesand, T.M., Kiefer, R., W. & Chipman, J.W. (2015) *Remote Sensing and Image Interpretation* (7th Ed). Wiley
- Liu, H. Q., & Huete, A. (1995). Feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **33** (2), 457–465. <https://doi.org/10.1109/36.377946>
- Liu, W. T., & Kogan, F. N. (1996). Monitoring regional drought using the vegetation condition index. *International Journal of Remote Sensing*, **17** (14), 2761–2782
- Lu, L. et al. (2015). Evaluation of three MODIS-derived vegetation index time series for dryland vegetation dynamics monitoring. *Remote Sensing*, **7** (6), 7597–7614. <https://doi.org/10.3390/rs70607597>
- Monteith, J. L. (1972). Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystems. *The Journal of Applied Ecology*, **9** (3), 747. <https://doi.org/10.2307/2401901>
- Nedkov, R. (2017). Orthogonal transformation of segmented images from the satellite Sentinel-2. *Comptes Rendus De l'Academie Bulgare des Sciences*, **70** (5), 687–692
- Nguyen, T. H., et al. (2020). Landsat time-series for estimating forest aboveground biomass and its dynamics across space and time: A review. *Remote Sensing*, **12** (1), 1–25. <https://doi.org/10.3390/RS12010098>

- Perry, C. R., & Lautenschlager, L. F. (1984). Functional equivalence of spectral vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, **14**, 169–182. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(84\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(84)90013-0)
- Qi, J. et al (1994). A modified soil vegetation adjusted index. *Remote Sensing of Environment*, **48**, 119–126. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90134-1](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90134-1)
- R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Richardson, A.J. & C.L. Wiegand, (1977). Distinguishing Vegetation from Soil Background Information, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **43** (12), 1541-1552.
- Rondeaux, G., Steven, M., & Baret, F. (1996). Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, **55**, 95–107. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00186-7](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00186-7)
- Rosado, D. (2015). *Sociologia da Gestão e das Organizações*. (1ª Ed.). Gradiva
- Roujean, J. & Breon, F. (1995). Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. *Remote Sensing Environment*, **51**, 375–384.
- Rouse, J.W. et al. (1974) Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. In *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, Volume 1: Technical Presentations, Section B*, editado por S.C. Freden, E.P. Mercanti, & M.A. Becker (Washington: NASA), pp. 309-317
- Samarawickrama, U., Piyaratne, D., & Ranagalage, M. (2017). Relationship between NDVI with Tasseled Cap Indices: A Remote Sensing based Analysis. *International Journal of Innovative Research in Technology*, **3** (12), 13–19
- Saunders, M. K., Lewis, P. & Thornhill, A. (2019). *Research Methods for Business Students*. (8th Ed.). Pearson
- Sellers, P. J. (1985). Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *International Journal of Remote Sensing*, **6** (8), 1335–1372. <http://dx.doi.org/10.1080/01431168508948283>
- Shi, T., & Xu, H. (2019). Derivation of Tasseled Cap Transformation Coefficients for Sentinel-2 MSI At-Sensor Reflectance Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, **12** (10), 4038–4048. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2019.2938388>
- Spadoni, G. L. et al. (2020). Analysis of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) multi-temporal series for the production of forest cartography. *Remote*

Sensing Applications: Society and Environment, **20**, 1-12.
<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100419>

Sriwongsitanon, N. et al. (2015). The Normalized Difference Infrared Index (NDII) as a proxy for soil moisture storage in hydrological modelling. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, **12** (8), 8419–8457. <https://doi.org/10.5194/hessd-12-8419-2015>

Stankova, N. (2015). Monitoring forest regrowth with different burn severity using aerial and landsat data Department of Aerospace Information, Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, pp. 2166–2169.

Thiam, A.K. (1997). *Geographic Information Systems and Remote Sensing Methods for Assessing and Monitoring Land Degradation in the Sahel: The Case of Southern Mauritania*. Dissertação de Doutorado, Clark University, Worcester Massachusetts.

United States Forest Service, 2022, *AVHRR NDVI Greenness - Wildland Fire Assessment System* (URL: <https://www.wfas.net/index.php/avhrr-ndvi-moisture--drought-47>, consulta em 16-11-2022)

United States Geological Survey, 2022, *Landsat Normalized Burn Ratio 2* (URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-normalized-burn-ratio-2>, consulta em 16-11-2022)

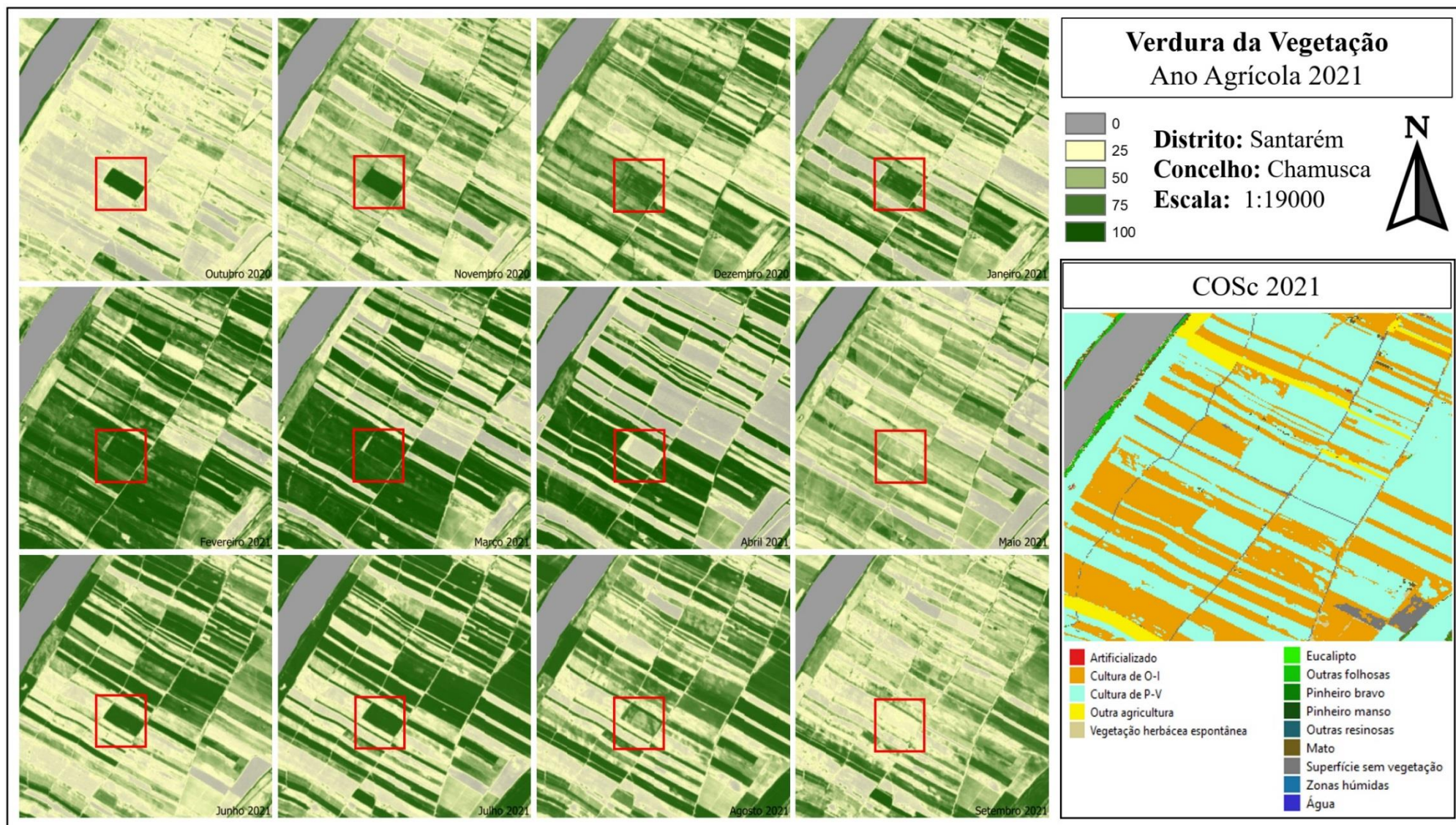
Vrieling, A. et al. (2018). Vegetation phenology from Sentinel-2 and field cameras for a Dutch barrier island. *Remote Sensing of Environment*, **215**, 517–529. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.03.014>

Zarco-Tejada, P. J., Rueda, C. A. & Ustin, S. L. (2003). Water content estimation in vegetation with MODIS reflectance data and model inversion methods. *Remote Sensing Environment*, **85** (1), 109–124 [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00197-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00197-9)

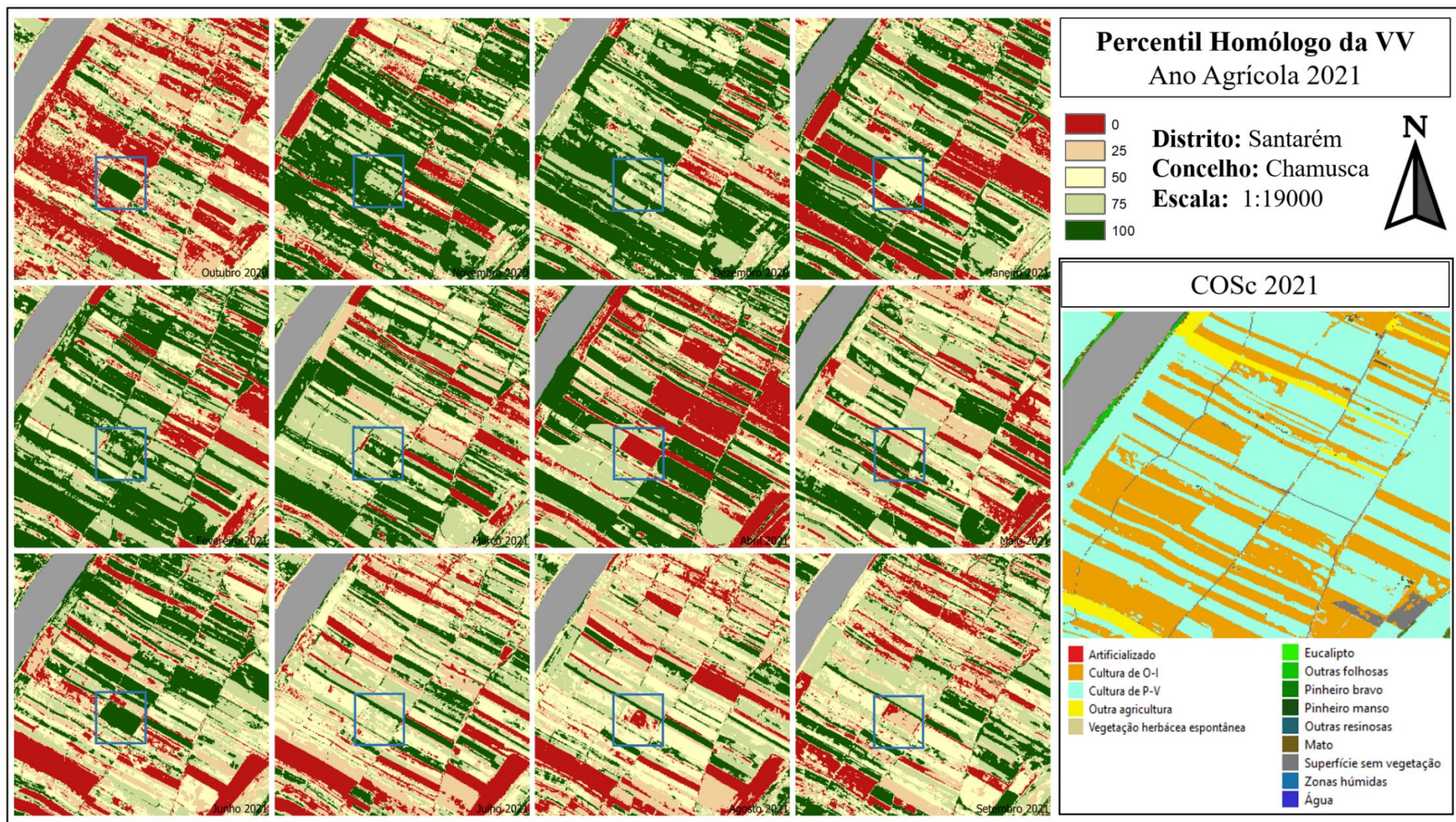
Zhang, C. et al. (2018). Retrieving leaf and canopy water content of winter wheat using vegetation water indices. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, **11** (1), 112–126. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2773625>

Anexos

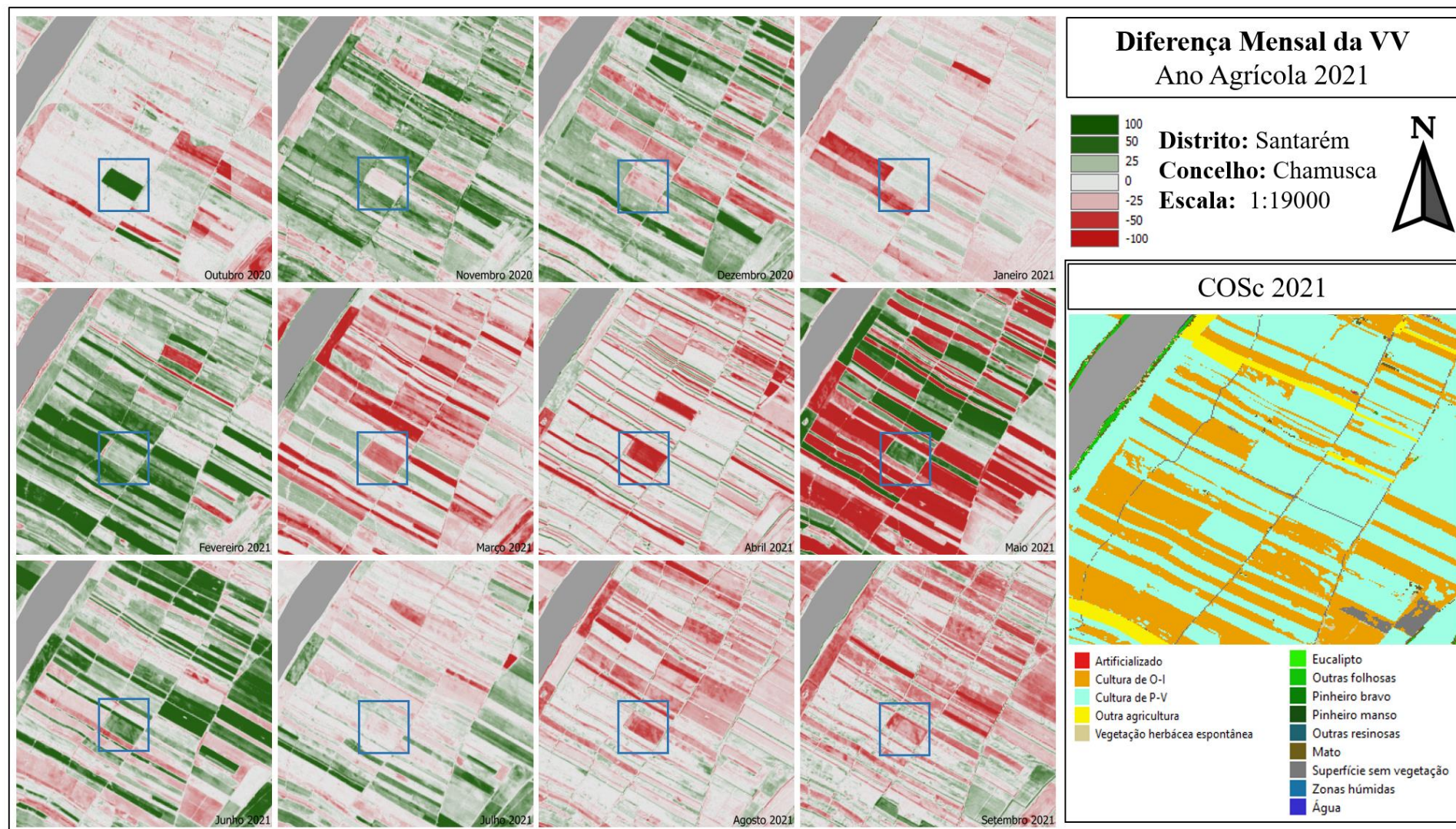
(Página Seguinte)



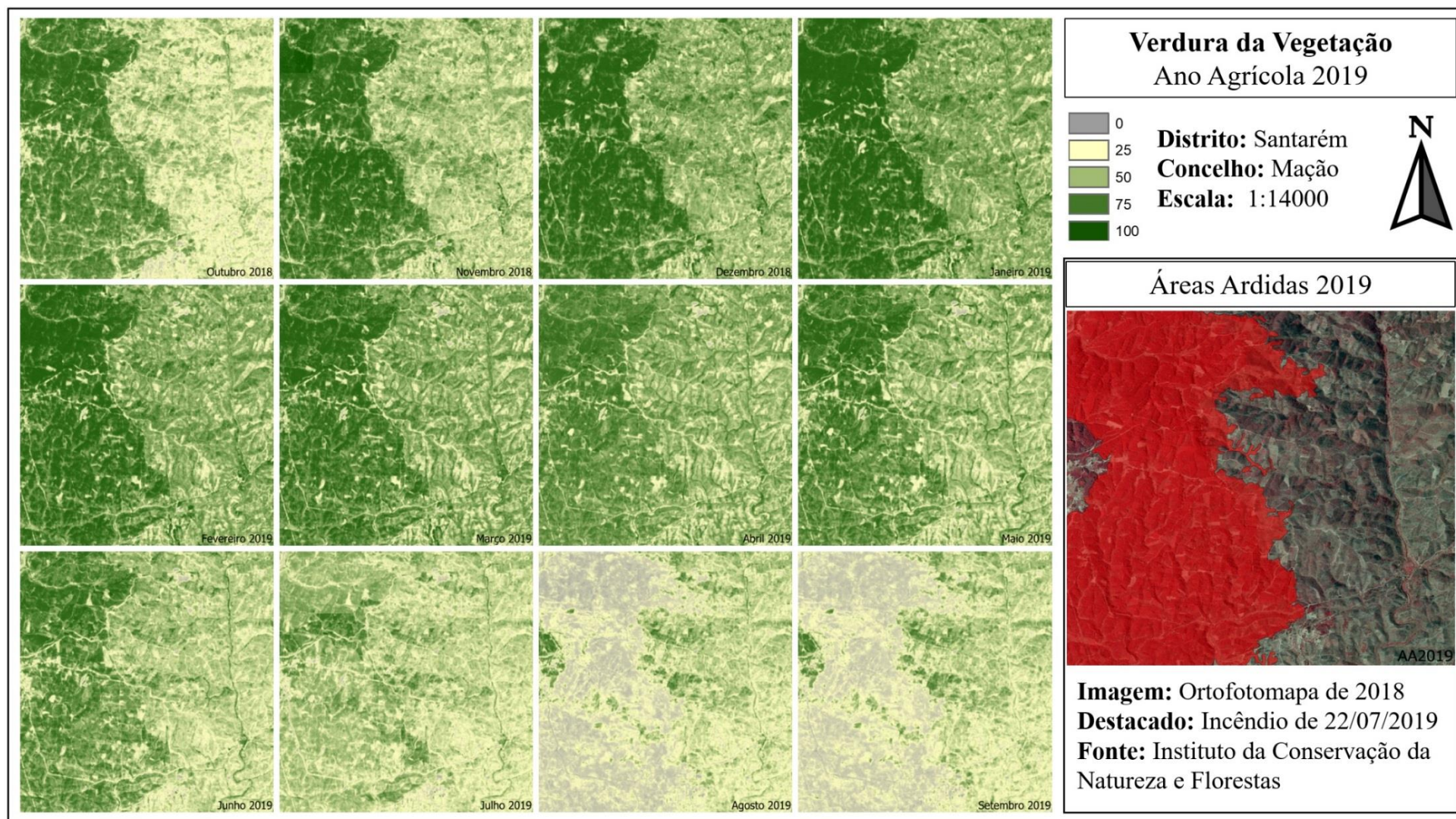
Anexo 1 - Verdura da Vegetação - Ano Agrícola 2021 - Culturas Intra-Anuais



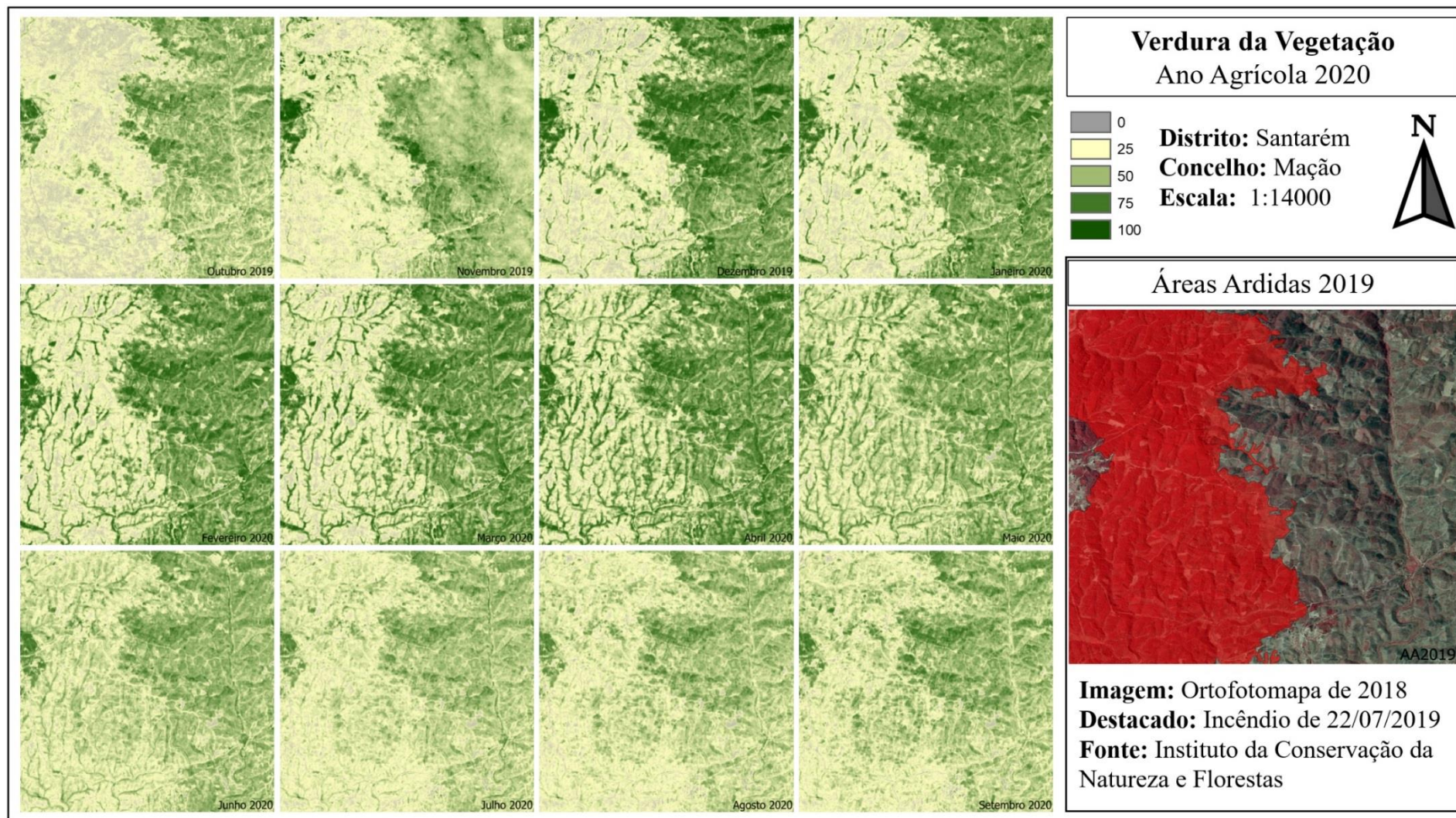
Anexo 2 - Percentil Homólogo da Verdura da Vegetação - Ano Agrícola 2021 - Culturas Intra-Anuais



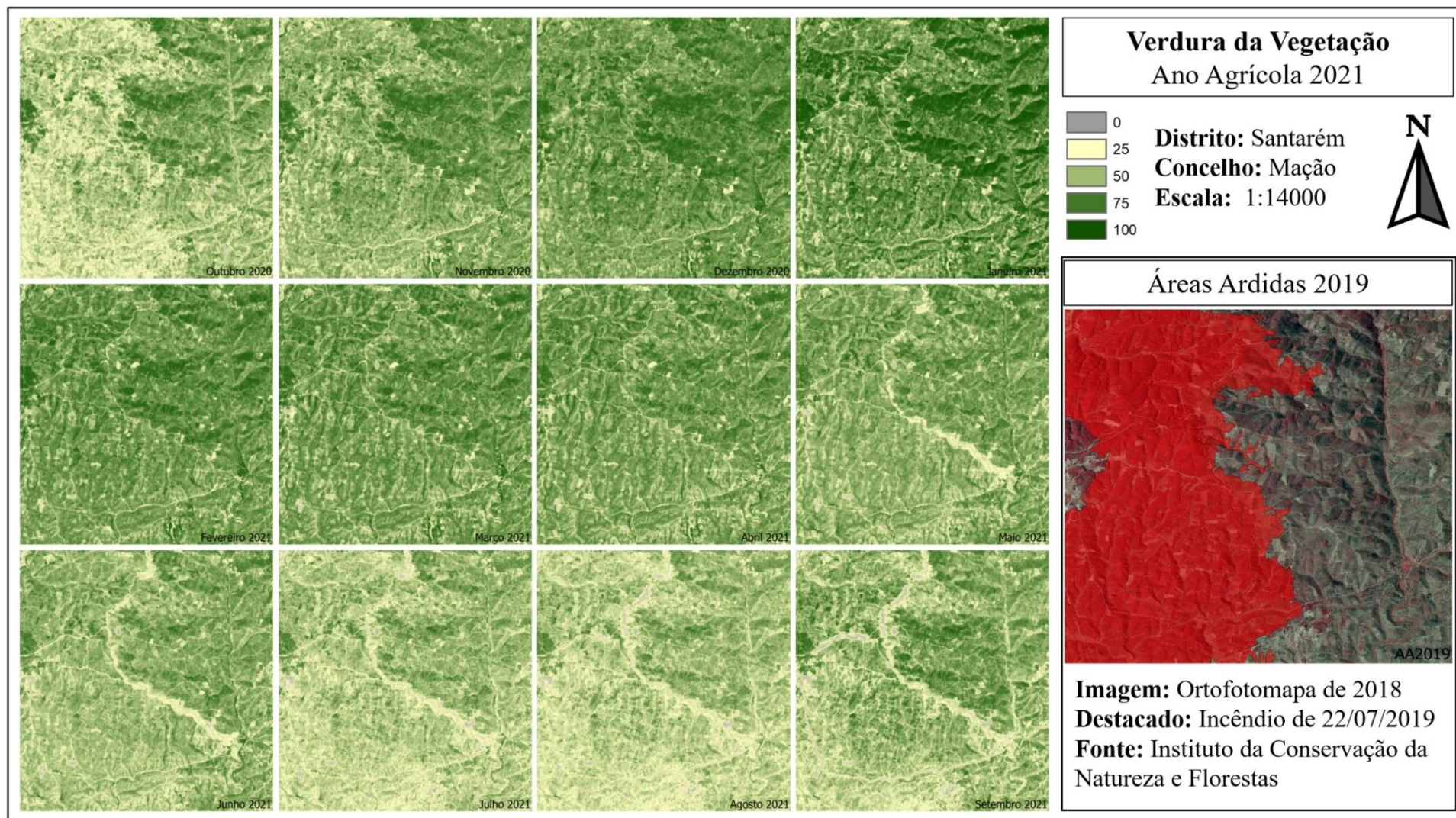
Anexo 3 - Diferença Mensal da Verdura da Vegetação - Ano Agrícola 2021 - Culturas Intra-Anuais



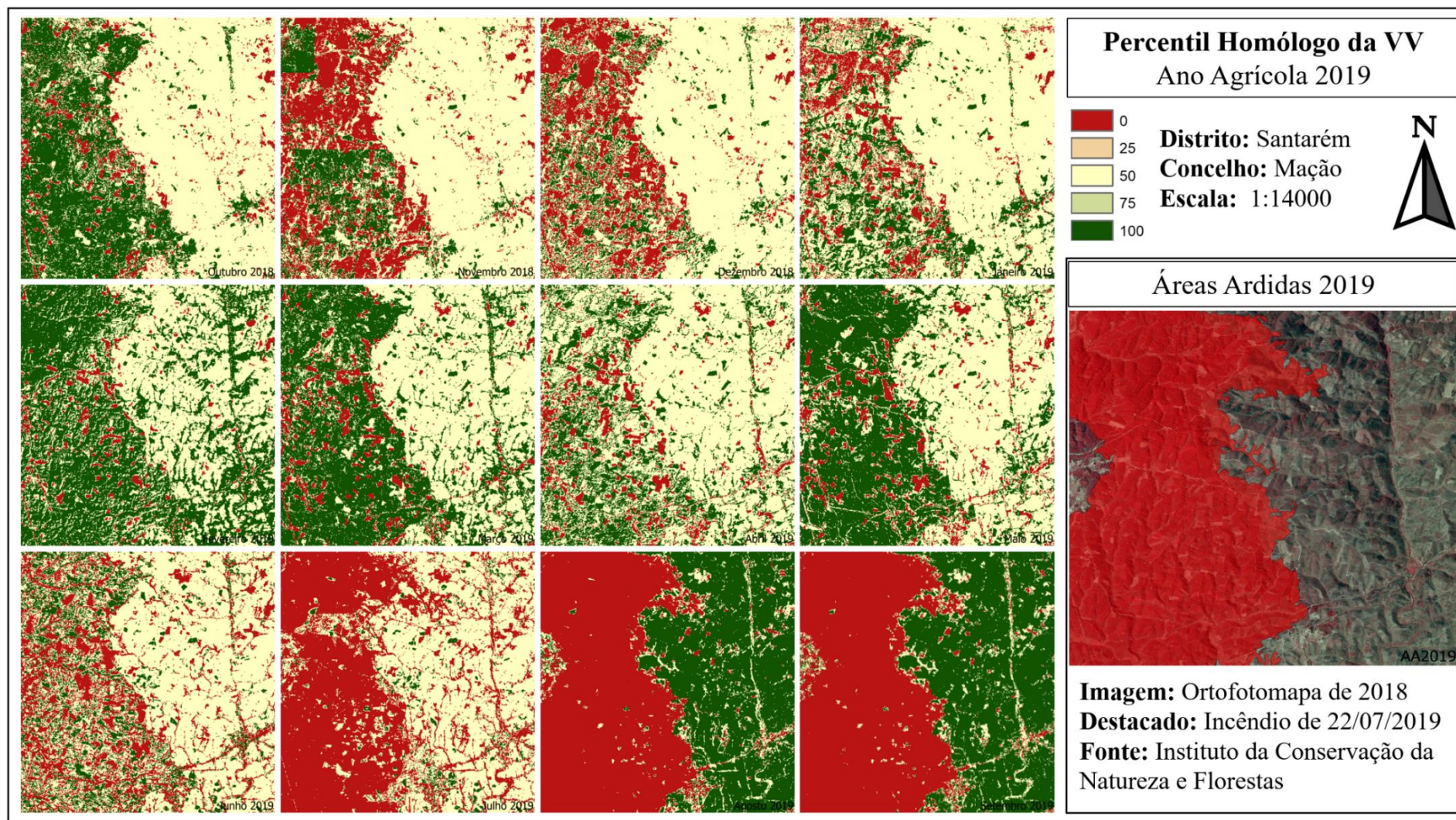
Anexo 4 - Verdura da Vegetação - Ano Agrícola 2019 - Incêndio de 22/07/2019



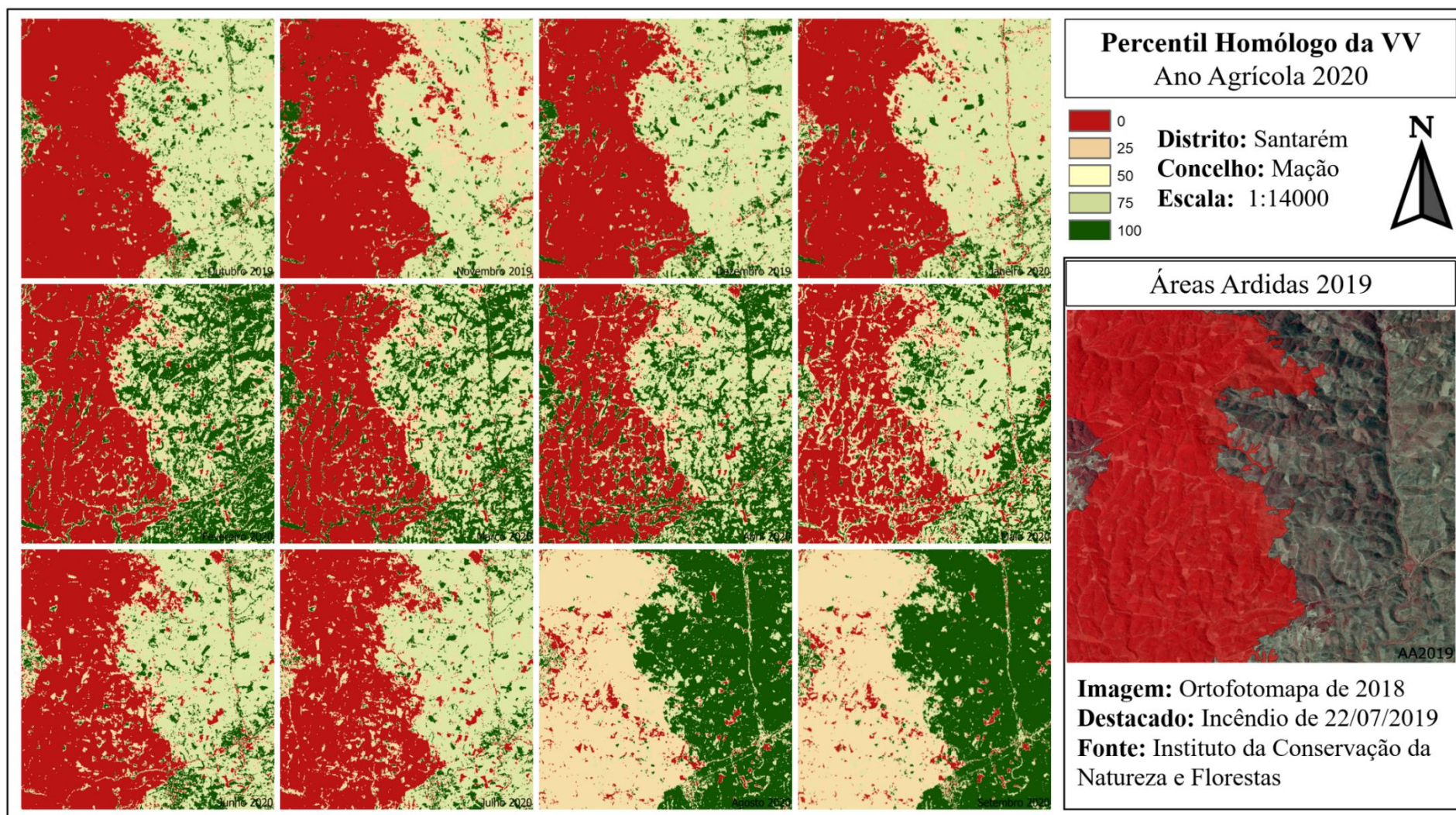
Anexo 5 - Verdura da Vegetação - Ano Agrícola 2020 - Incêndio de 22/07/2019



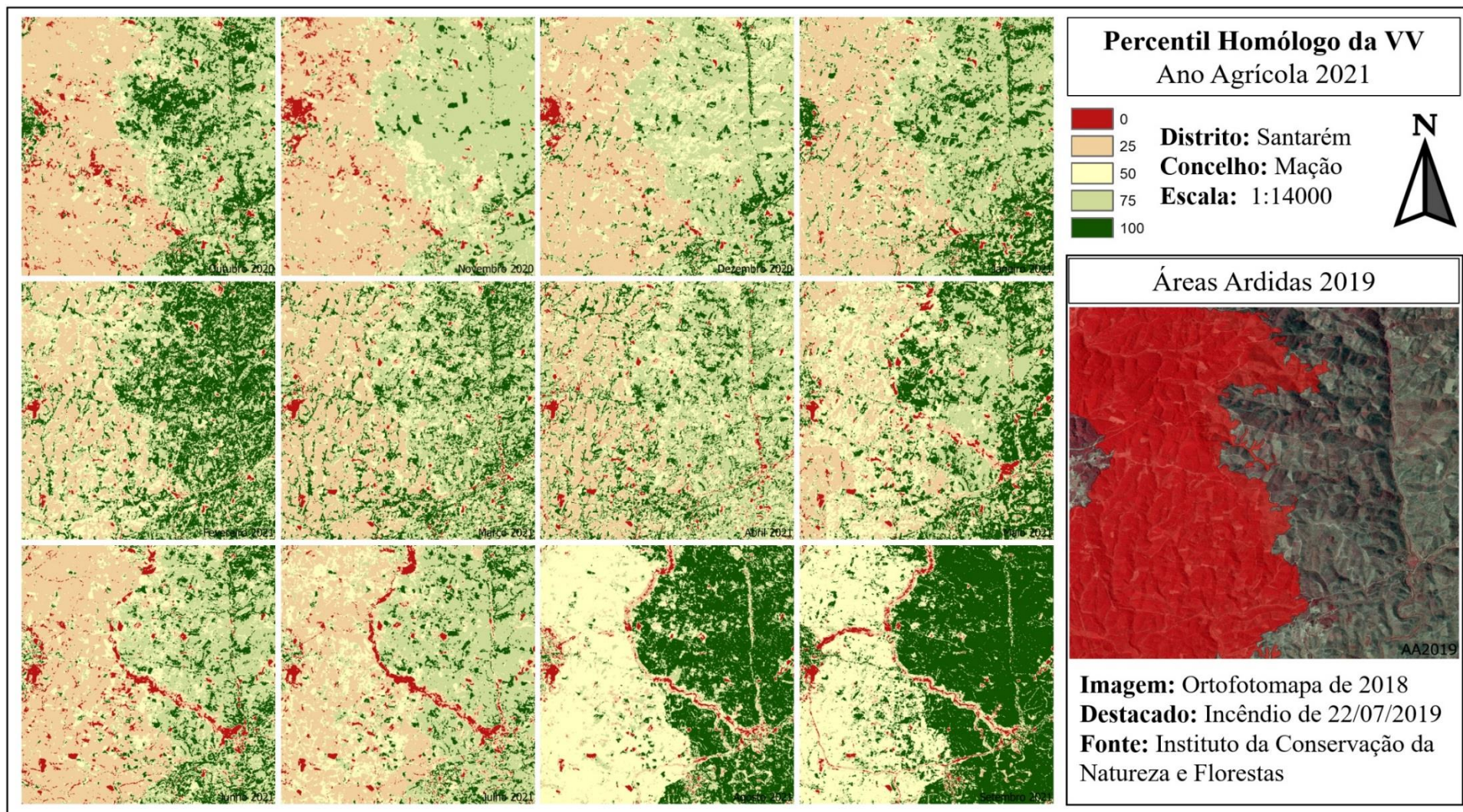
Anexo 6 - Verdura da Vegetação - Ano Agrícola 2021 - Incêndio de 22/07/2019



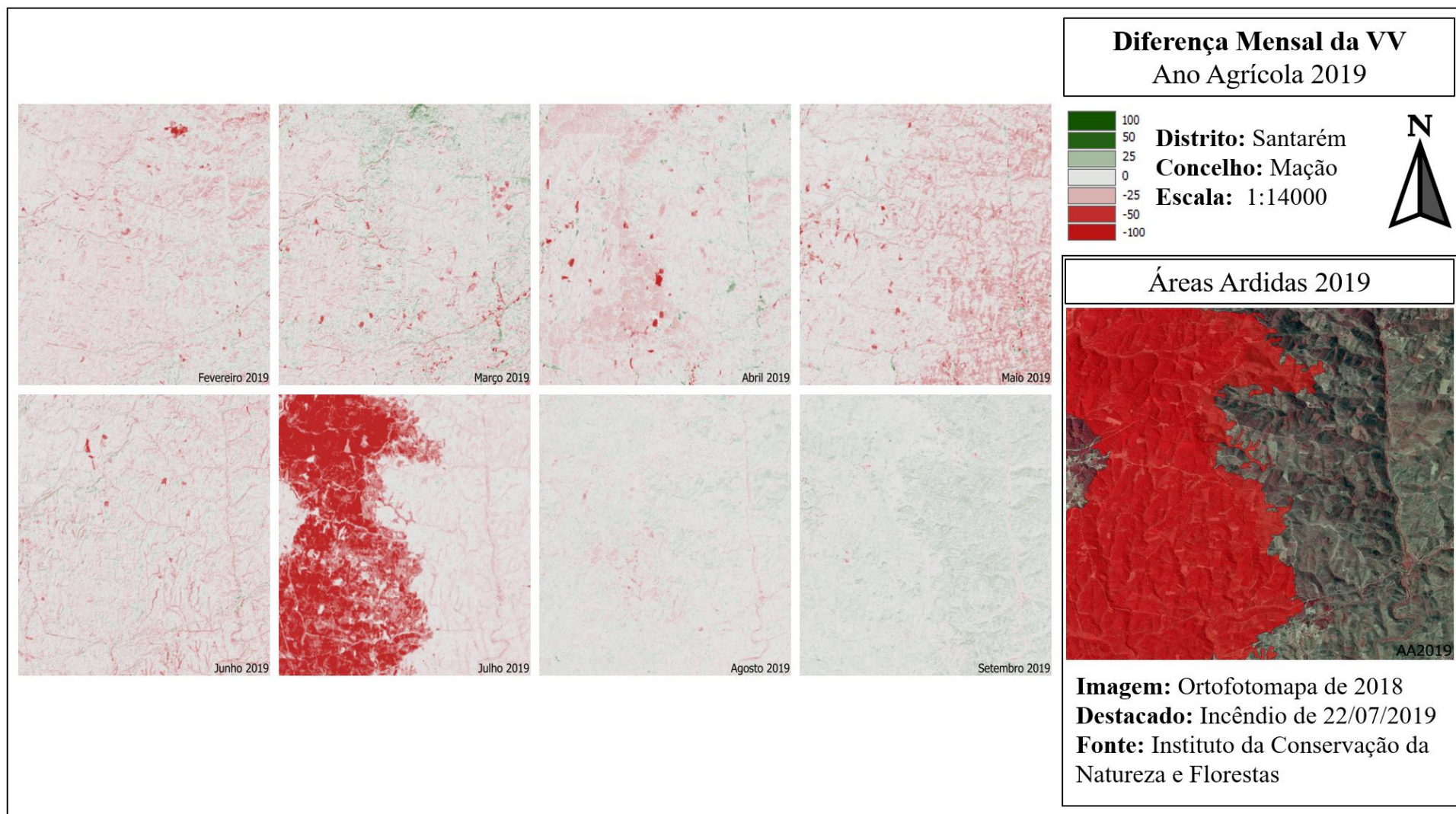
Anexo 7 - Percentil Homólogo da Verdura da Vegetação - Ano Agrícola 2019 - Incêndio de 22/07/2019



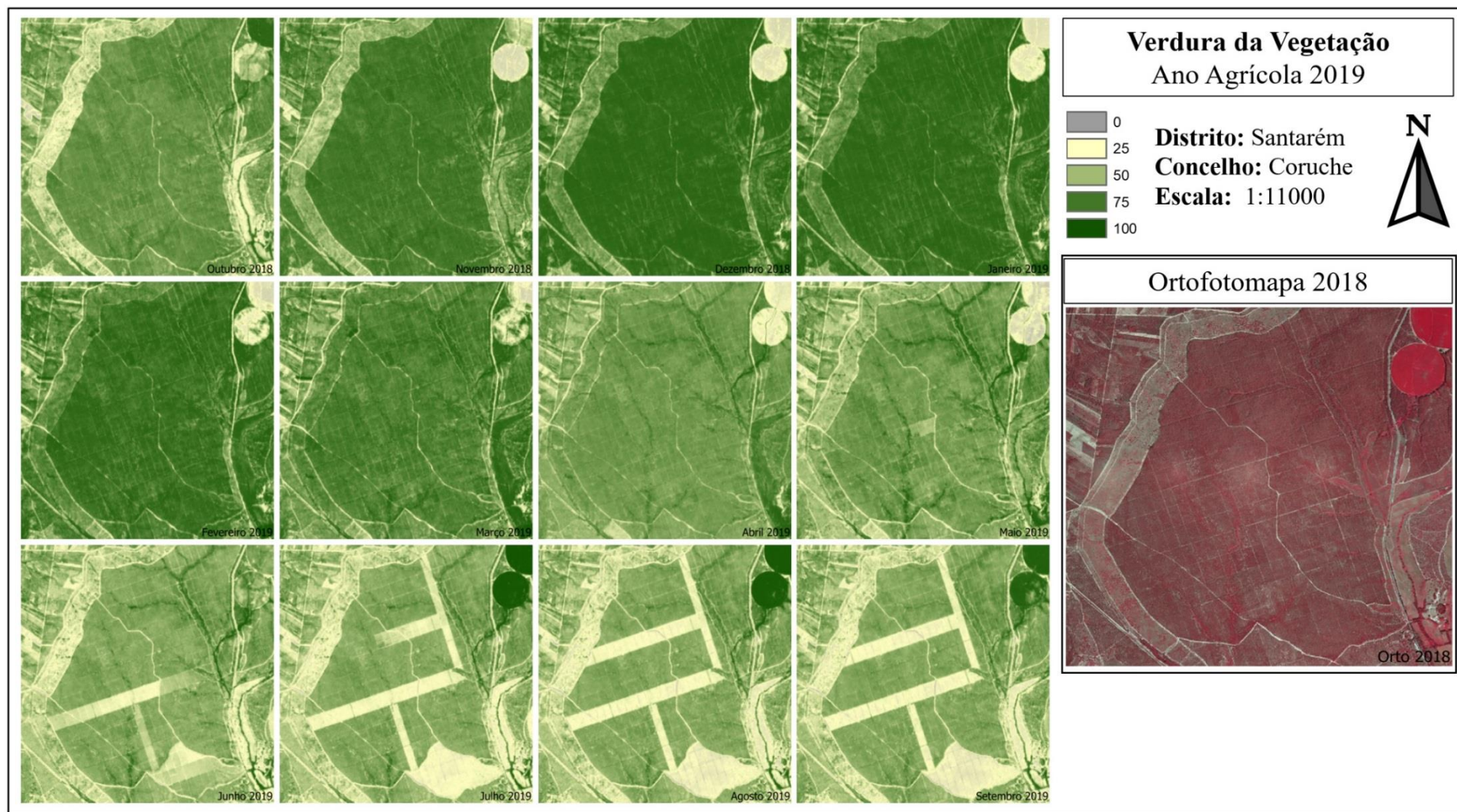
Anexo 8 - Percentil Homólogo da Verdura da Vegetação - Ano Agrícola 2020 - Incêndio de 22/07/2019



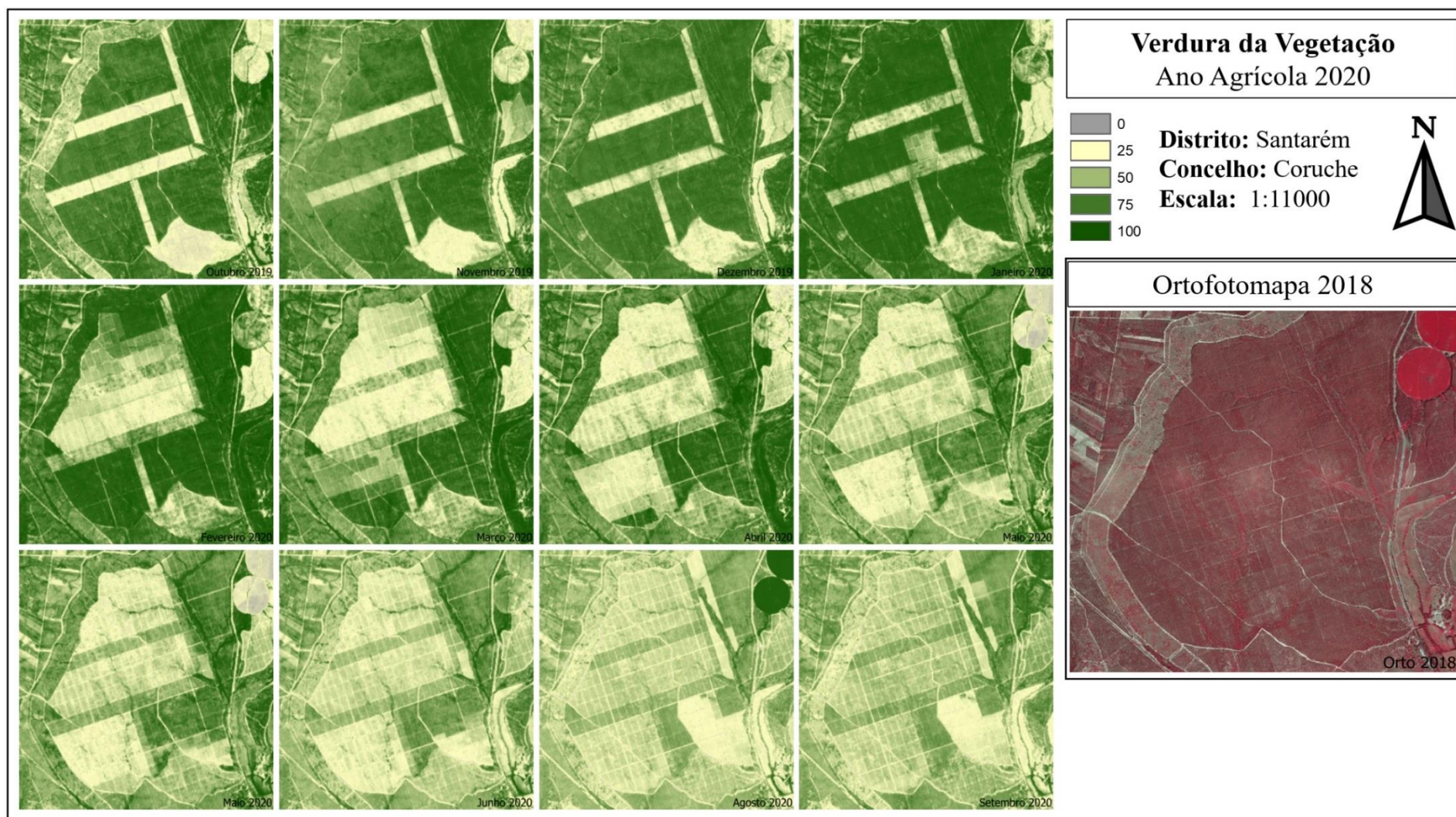
Anexo 9 - Percentil Homólogo da Verdura da Vegetação - Ano Agrícola 2021 - Incêndio de 22/07/2019



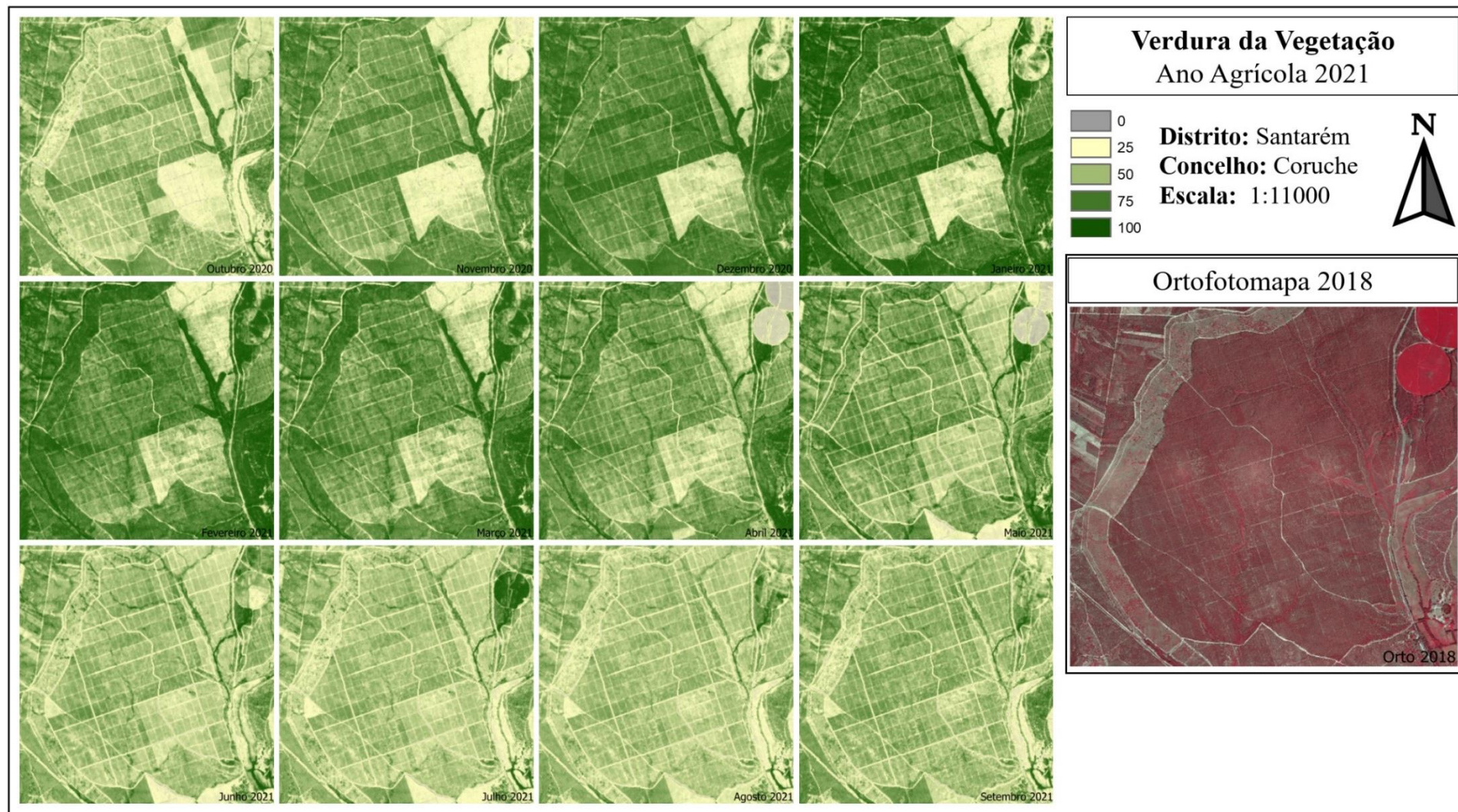
Anexo 10 - Diferença Mensal da Verdura da Vegetação - Ano Agrícola 2019 - Incêndio de 22/07/2019



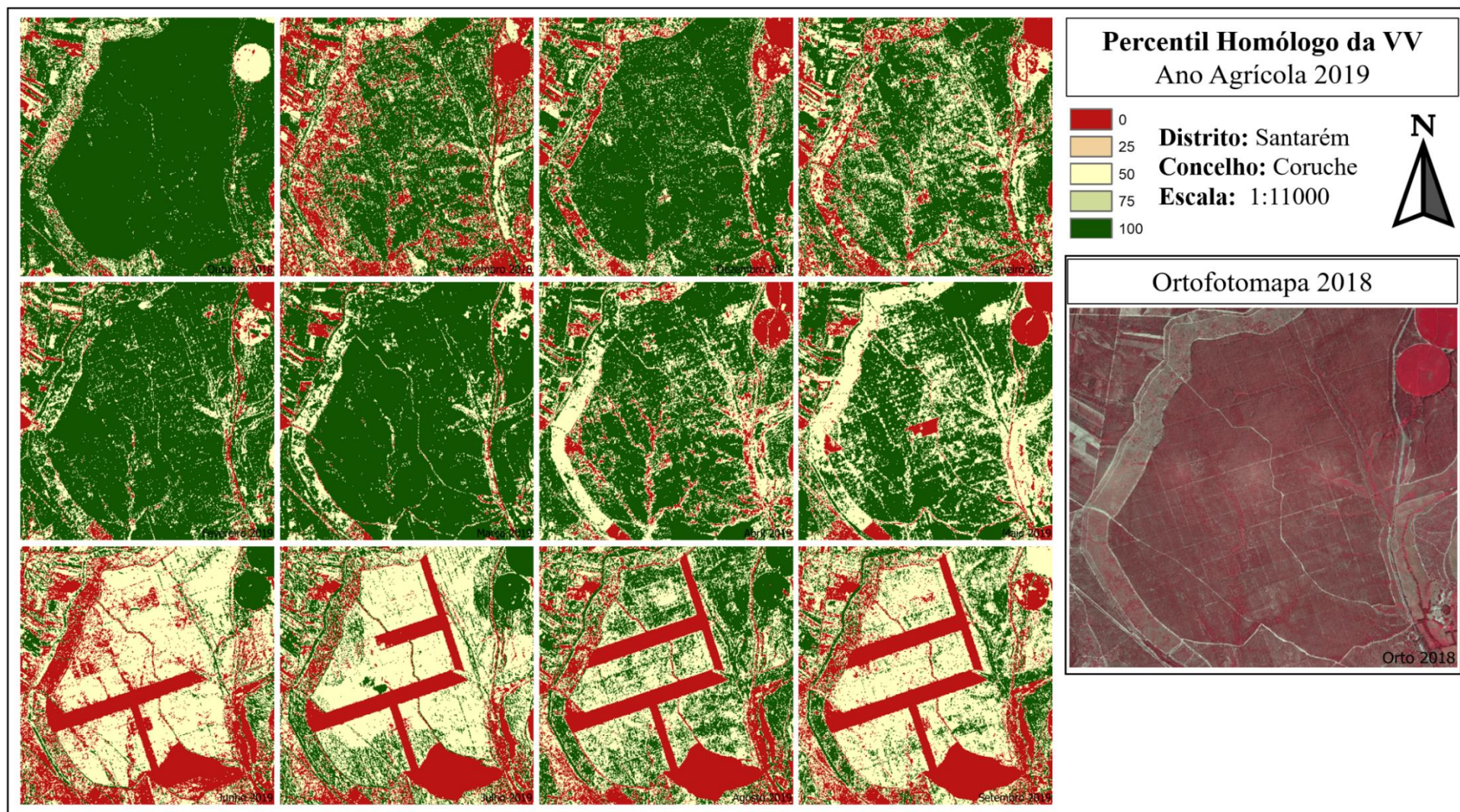
Anexo 11 - Verdura da Vegetação - Ano Agrícola 2019 - Cortes de Vegetação



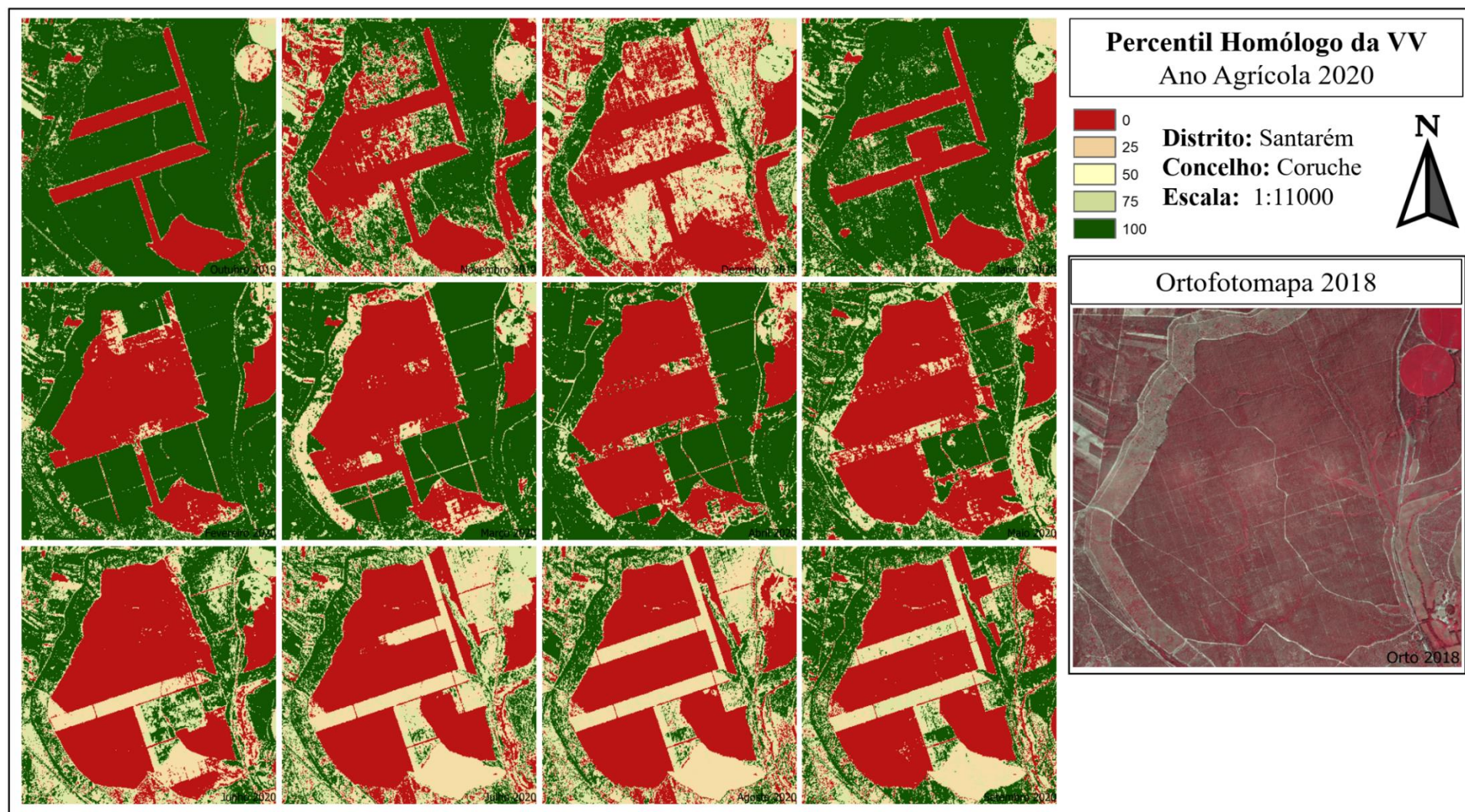
Anexo 12 - Verdura da Vegetação - Ano Agrícola 2020 - Cortes de Vegetação



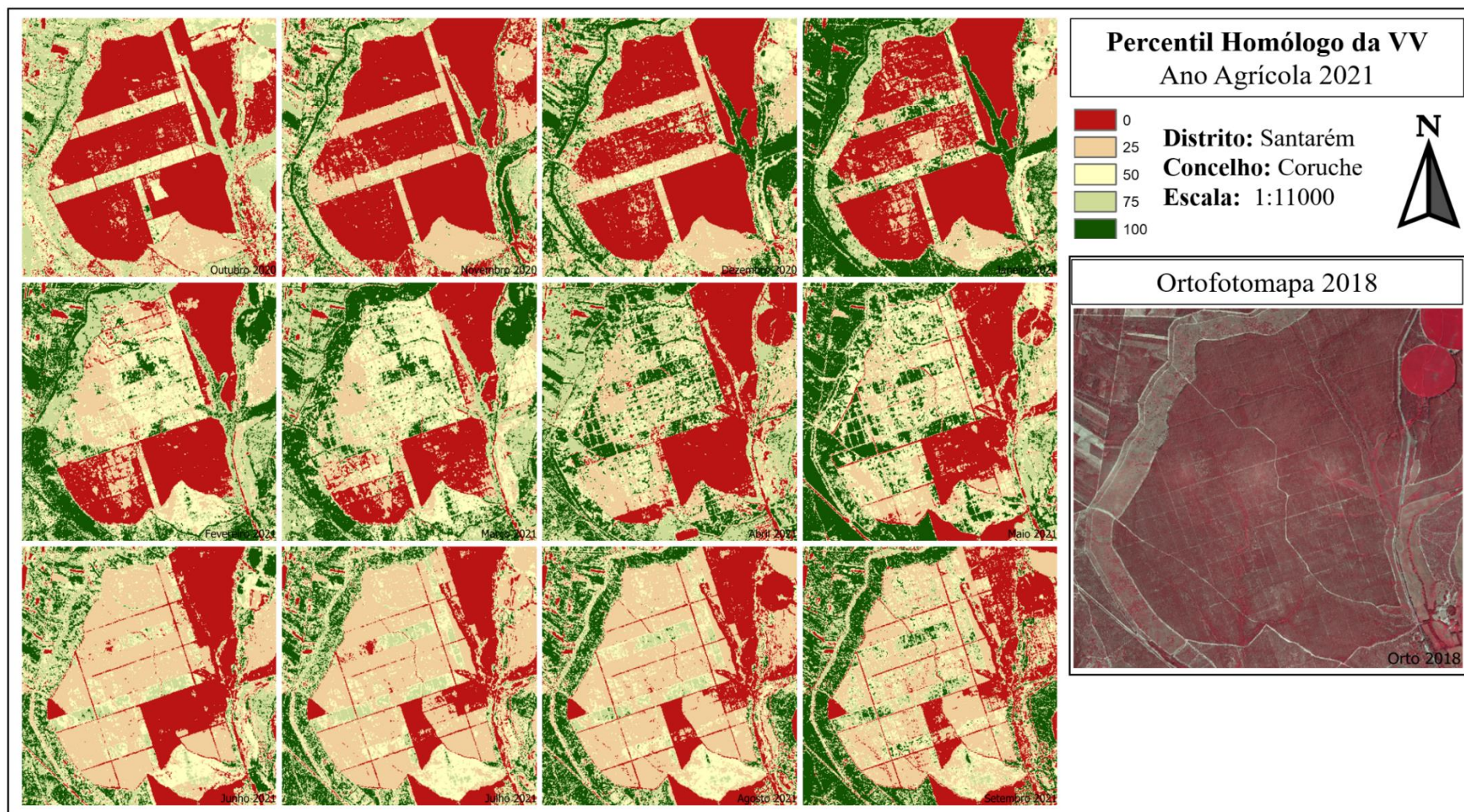
Anexo 13 - Verdura da Vegetação - Ano Agrícola 2021 - Cortes de Vegetação



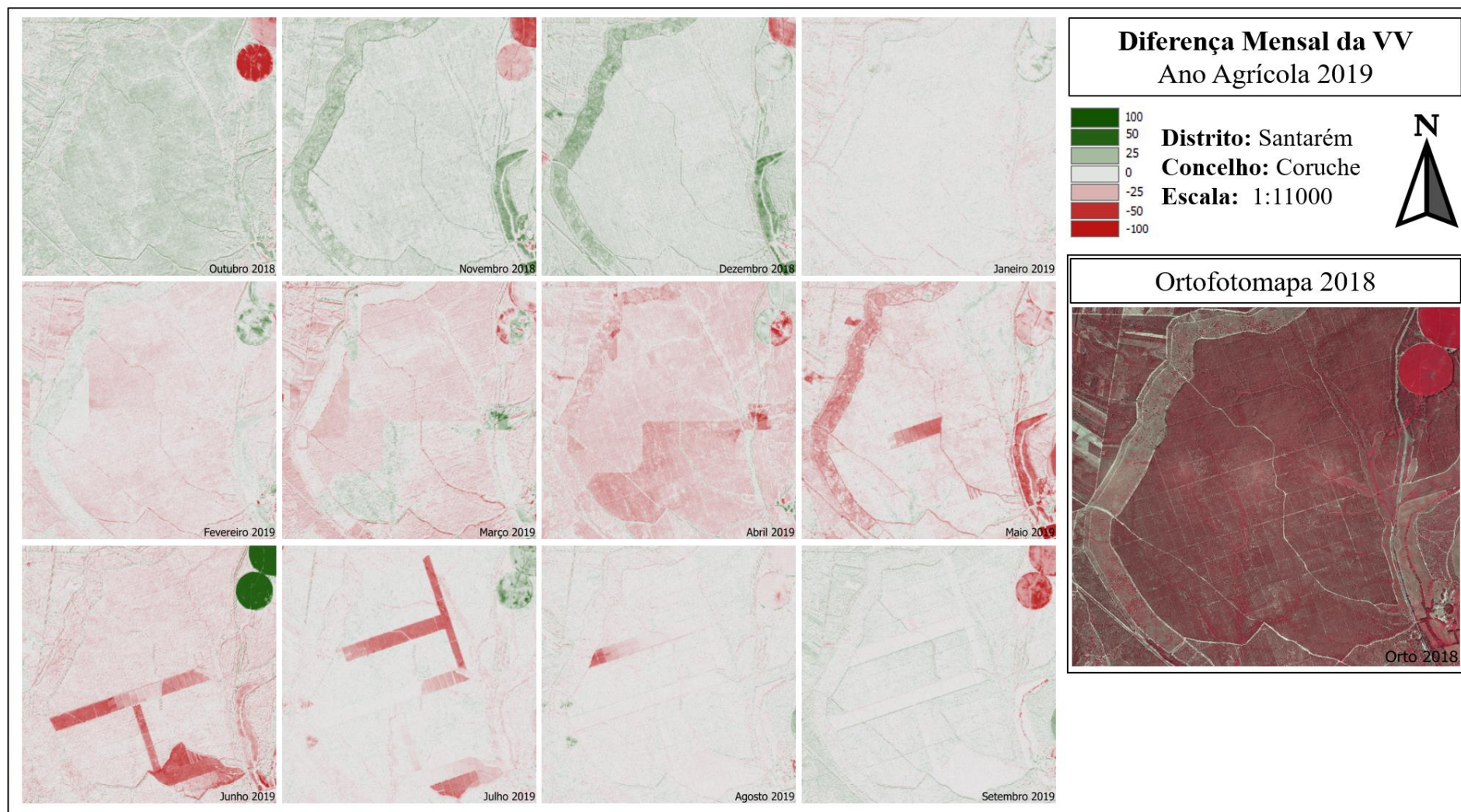
Anexo 14 - Percentil Homólogo da Verdura da Vegetação - Ano Agrícola 2019 - Cortes de Vegetação



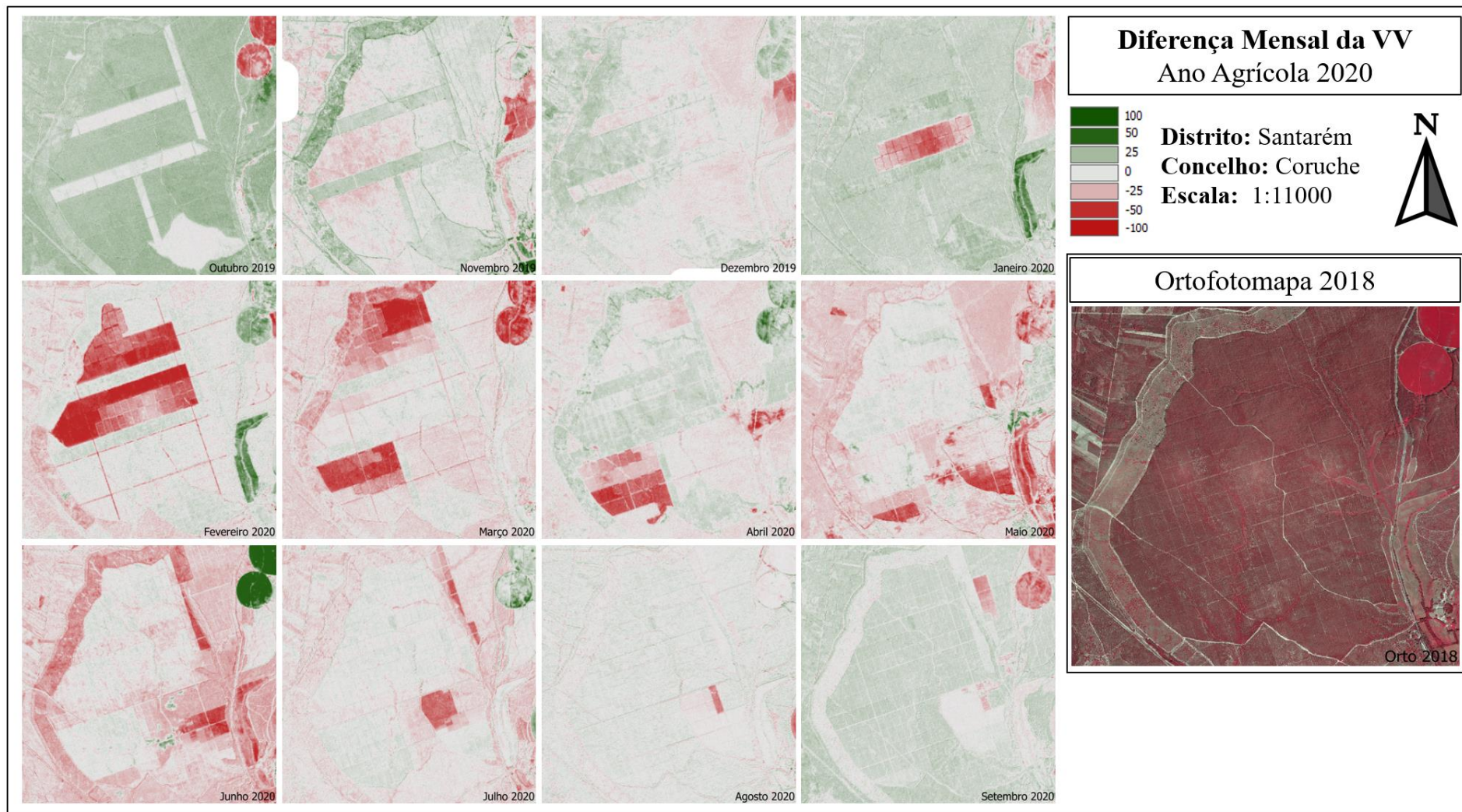
Anexo 15 - Percentil Homólogo da Verdura da Vegetação - Ano Agrícola 2020 - Cortes de Vegetação



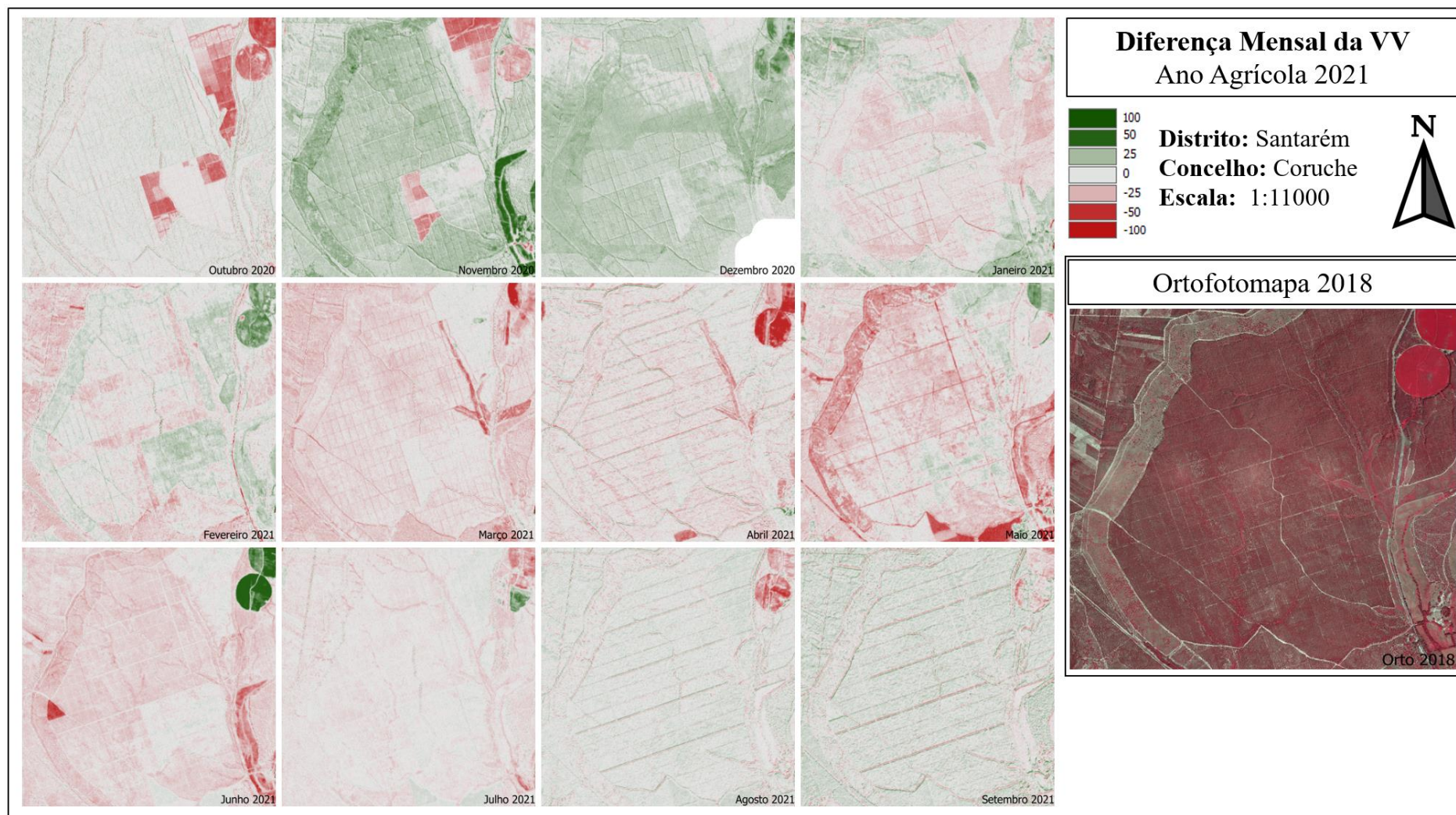
Anexo 16 - Percentil Homólogo da Verdura da Vegetação - Ano Agrícola 2021 - Cortes de Vegetação



Anexo 17 - Diferença Mensal da Verdura da Vegetação - Ano Agrícola 2019 - Cortes de Vegetação



Anexo 18 - Diferença Mensal da Verdura da Vegetação - Ano Agrícola 2020 - Cortes de Vegetação



Anexo 19 - Diferença Mensal da Verdura da Vegetação - Ano Agrícola 2021 - Cortes de Vegetação