

Relatório Intermédio

Semestre de Verão 2024/2025



Sistema de Cálculo de Captura de CO2 pelo Coberto Vegetal em Ambiente Urbano

Diogo Fonseca, 49345

Tiago Pereira, 49368

Orientadores: Prof. João Casaleiro

Prof. António Serrador

Lisboa, abril 2025\

Índice

1.	Introdução	3
1.1.	Contexto e Motivações.....	3
1.2	Objetivos gerais do projeto.....	3
1.3	Objetivos do Relatório Intermédio.....	3
2.	Projeto a desenvolver	5
2.1.	Programa para Automatização e Quantificação dos Valores de CO ₂	5
2.2	Fase Inicial – Recolha e Utilização de Dados de Satélite	5
2.2.1	Recolha e Processamento de Dados.....	5
2.2.2	Identificação e Classificação da Vegetação e da Zona em Estudo ...	5
2.2.3	Cálculo da Captura de CO ₂	5
2.3	Fase Futura – Integração do Drone com LIDAR.....	6
3.	Modelo para estimativa da captura de CO ₂	7
3.1	Modelo CASA (Carnegie-Ames Stanford Approach).....	7
3.2	Motivação para a utilização do modelo CASA	7
3.3	Equação Principal do Modelo CASA.....	8
4.	Desenvolvimento e Progresso	9
4.1	Fluxo de Processamento de Dados.....	9
4.1.1	Fluxo Atual.....	9
4.1.2	Fluxo Futuro	10
4.2	Parâmetros já obtidos	11
4.2.1	Radiação solar total incidente (SOL).....	11
4.2.2	<i>Fraction of Photosynthetic Active Radiation</i> (FPAR)	11
4.2.3	<i>Water Stress Coeficient</i> (WSC)	12
4.2.4	Fatores de stresse térmico $T\varepsilon_1$ e $T\varepsilon_2$	13
4.3	Parâmetros Pendentes.....	14
4.3.1	Produção Primária Líquida (NPP)	14
4.3.2	Radiação Solar Total (SOL)	15

P33 - Sistema de Cálculo de Captura de CO₂ pelo Coberto Vegetal em
Ambiente Urbano

4.3.3 Eficiência máxima de conversão (ϵ_{max}).....	15
5. Conclusões e discussão	15
5.1 Dificuldades Encontradas.....	15
5.2 Aprendizagens Essenciais	16
6 - Trabalho futuro.....	16
6.1 - Eficiência máxima de conversão (ϵ_{max}) e máscara de vegetação	16
6.2 Produção Primária Líquida (NPP)	17
Referências.....	18

1. Introdução

1.1. Contexto e Motivações

O desenvolvimento deste projeto apresenta contribuições significativas para a sociedade, destacando-se o seu papel no combate às alterações climáticas através da quantificação do impacto da vegetação urbana na absorção de dióxido de carbono (CO₂) – um dos principais gases responsáveis pelo efeito de estufa e aquecimento global. Ao permitir uma análise precisa da capacidade de captura de CO₂ pela vegetação, o projeto apoia entidades responsáveis no planeamento urbano sustentável, facilitando decisões informadas sobre a criação de áreas verdes, corredores ecológicos e ações de reflorestamento. Estas medidas promovem zonas urbanas ecologicamente equilibradas, com benefícios diretos para a saúde pública, como a melhoria da qualidade do ar e a regulação da temperatura.

Adicionalmente, o projeto contribui para o cumprimento de metas ambientais, como as estabelecidas no Acordo de Paris [1], ao permitir a monitorização do impacto de políticas climáticas e a justificação de investimentos em infraestruturas verdes. A sua versatilidade destaca-se pela possibilidade de replicação do estudo inicialmente aplicado à zona de Oeiras e de Lisboa – mas genérico para ser aplicado em qualquer região do globo com cobertura dos satélites utilizados, ampliando assim o seu alcance e utilidade global.

1.2 Objetivos gerais do projeto

Esta proposta teve origem na [U!REKA European University](#) e é desenvolvida em colaboração com a [Câmara Municipal de Oeiras](#) e a [Câmara Municipal de Lisboa](#) tendo como principal objetivo calcular a capacidade de captura de carbono (CO₂) da mancha vegetal do concelho. Para tal, serão avaliadas as diferentes capacidades de captura de CO₂ associadas a várias espécies de árvores presentes na região com base nos dados de satélite.

1.3 Objetivos do Relatório Intermédio

Neste Relatório Intermédio faremos um breve balanço do progresso do projeto até ao momento: apresentaremos de forma sucinta o modelo *Carnegie-Ames-Stanford Approach* (CASA) escolhido [2], descreveremos o pipeline de processamento implementado (aquisição de imagens dos satélites Sentinel [3], pré-processamentos aplicados no *Sentinel Application Platform* (SNAP) [4], cálculo de índices de vegetação), resumiremos o estado atual de desenvolvimento dos módulos concluídos e das tarefas em curso, e, por fim, definiremos as próximas etapas até à obtenção dos primeiros resultado

2. Projeto a desenvolver

2.1. Programa para Automatização e Quantificação dos Valores de CO₂

O presente projeto centra-se no desenvolvimento de um programa informático destinado a automatizar a recolha, o processamento e a análise de dados para quantificar a captação de carbono (CO₂) pela vegetação urbana numa área geográfica previamente definida. A aplicação será implementada com base em dados e imagens multiespectrais provenientes dos satélites, Sentinel-2 e Sentinel-3 enquadrados nos programas Copernicus da ESA [5], permitindo a identificação das áreas de vegetação e a estimativa dos valores de CO₂ captado.

2.2 Fase Inicial – Recolha e Utilização de Dados de Satélite

2.2.1 Recolha e Processamento de Dados

Iremos implementar módulos para a aquisição automática de imagens dos satélites Sentinel (nomeadamente Sentinel-2 e Sentinel-3), pertencentes à ESA (Agência Espacial Europeia) [5]. O processamento inicial será efetuado através da aplicação SNAP através de gráficos de processamento bem como da API do SNAP (esa_snappy) [7], permitindo a correção, preparação e extração de dados relevantes para uma análise posterior, que servirá de base para o processamento destas imagens e para o cálculo da captação de CO₂ pela vegetação.

2.2.2 Identificação e Classificação da Vegetação e da Zona em Estudo

Desenvolvimento de algoritmos para processar as imagens e identificar as áreas de cobertura vegetal, bem como classificar as diferentes espécies presentes e as suas características em meios urbanos, desenvolvimento ainda de um algoritmo de extração da zona em estudo (Concelho de Oeiras) nas imagens provenientes dos satélites Sentinel.

2.2.3 Cálculo da Captura de CO₂

Aplicação de modelos matemáticos e métodos automatizados para estimar a quantidade de CO₂ sequestrado pela vegetação, com base nos dados recolhidos.

2.3 Fase Futura – Integração do Drone com LIDAR

Embora a aplicação seja inicialmente desenvolvida com dados de satélite, a integração de um drone equipado com tecnologia LIDAR [\[8\]](#) está planeada para fases posteriores. Esta integração permitirá: a obtenção de dados volumétricos mais precisos das espécies vegetais. O que permite calibrar e validação as estimativas obtidas através dos satélites, aprimorando a fiabilidade dos resultados

3. Modelo para estimativa da captura de CO₂

3.1 Modelo CASA (Carnegie-Ames Stanford Approach)

O modelo CASA é um modelo desenvolvido na década de 1990 bastante utilizado na estimação da Produção Primária Líquida (NPP) – um indicador que quantifica o carbono absorvido pela vegetação após deduzir as perdas por respiração. Este modelo combina dados de deteção remota (provenientes de satélites), com variáveis ambientais (temperatura, precipitação, radiação solar e tipo de solo) para simular a interação entre a vegetação e o ambiente [2].

Inicialmente o modelo **CASA** era aplicado com medições no terreno porem mais tarde foi aprimorada para dados de detenção remota por estes serem de mais fácil e de menos demorada obtenção, é este modelo CASA aprimorada que iremos utilizar.

A sua principal inovação reside em equações biofísicas que relacionam a radiação fotossinteticamente ativa (FPAR) com a eficiência de conversão (ϵ), ajustada por fatores de stresse térmico e hídrico. Esta abordagem permite mapear a capacidade dos ecossistemas em sequestrar carbono, tornando-o uma referência em estudos de alterações climáticas e gestão territorial sustentável.

Neste projeto, a implementação do modelo baseou-se na adaptação proposta por [2] para monitorização de pastagens alpinas, ajustando-a às particularidades do meio urbano.

3.2 Motivação para a utilização do modelo CASA

Os modelos de simulação de NPP podem ser divididos em 3 categorias: modelos de relatividade climática, modelos de processo e modelos de eficiência do uso da luz (LUE) onde se enquadra o modelo CASA.

O modelo **CASA** foi escolhido pela sua capacidade de **integração de dados provenientes de várias áreas**, como imagens de satélite, variáveis meteorológicas e características do solo, esta integração permite uma análise abrangente da produtividade dos ecossistemas urbanos, essencial para quantificar a absorção de CO₂ pela vegetação, decidimos também escolher este modelo pois tem sido amplamente utilizado para estimar valores de NPP ao longo de centenas de estudos publicados.

A **escalabilidade** do modelo é um trunfo central, aplica-se tanto a escalas locais, como municípios, como globais, utilizando dados de satélite de alta resolução. Além disso, a sua **dinâmica temporal** é capaz de fornecer estimativas semanais, mensais ou

anuais da produção primária líquida (NPP), captando variações sazonais importantes para estudos climáticos.

A **validação científica** deste modelo é comprovada em estudos internacionais, garantindo resultados fiáveis e confiáveis. O seu **custo-eficiência** – com dados facilmente acessíveis e sem custos operacionais – e o **suporte a políticas públicas**, como o Acordo de Paris [1], reforçam a sua relevância prática, orientando decisões de planeamento urbano sustentável.

Ao longo do projeto iremos adotar uma versão melhorada do modelo CASA, nomeadamente uma versão baseada maioritariamente em informações de satélite, a eficiência deste modelo é comprovada em alguns estudos que consultámos resultando diversas vezes em valores de NPP mais precisos que os do modelo CASA convencional, aliando esta vantagem ao facto de este modelo melhorado não necessitar de tantas medições realizadas no terreno, chegámos á conclusão que o numero de vantagens é superior ao de desvantagens.

3.3 Equação Principal do Modelo CASA

Para integrar de forma eficiente as observações de satélite no cálculo de **NPP**, o CASA combina a radiação solar total (**SOL**) e a fração de radiação fotossinteticamente ativa absorvida (**FPAR**) com uma série de coeficientes que representam a eficiência luminosa e o impacto de condições climáticas. A equação que faz esta convergência de dados é apresentada de seguida:

$$NPP(x, t) = 0,5 \cdot SOL(x, t) \cdot FPAR(x, t) \cdot \varepsilon_{max} \cdot T\varepsilon_1 \cdot T\varepsilon_2 \cdot WSC(x, t) \quad (1)$$

Onde **NPP(x, t)** é a produção primária líquida na célula x no mês t [g C m⁻²/mês] que representa o carbono fixado pela vegetação após dedução da respiração, o fator que corresponde à proporção da radiação solar absorvida pelas plantas na faixa espectral de 0,4–0,7 µm (radiação fotossinteticamente ativa) é de 0,5, o **SOL(x, t)** é a Radiação solar total incidente na célula x no mês t [MJ/m²/mês], **FPAR(x, t)** a fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela vegetação na célula x durante o mês t , **Tε₁** e **Tε₂** os fatores de stresse térmico, que quantificam o impacto de temperaturas extremas (altas e baixas, respetivamente) na eficiência de utilização da luz, **WSC(x, t)** o coeficiente de stresse hídrico na célula x durante o mês t , que reflete a disponibilidade de água no solo e **ε_{max}** a eficiência máxima de conversão de energia [g C MJ⁻¹], alcançada em condições ideais (sem stresse térmico ou hídrico).

4. Desenvolvimento e Progresso

4.1 Fluxo de Processamento de Dados

4.1.1 Fluxo Atual

Na Figura 1 apresenta-se o diagrama de blocos com o fluxo de processamento de dados atual, onde se inicia com a obtenção manual de imagens de satélite através do Copernicus Browser [4], selecionando os sensores dos satélites relevantes para a obtenção das bandas utilizadas para a extração de índices relevantes no modelo. As imagens são importadas para o *software* SNAP, onde são submetidas a vários processamentos como correção atmosférica e ao cálculo de índices de vegetação, como o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) [9], essencial para estimar a atividade fotossintética (FPAR).

Posteriormente, os dados processados no SNAP são utilizados como entrada para diversos *scripts* em Python, que automatizam parcialmente o cálculo dos diversos parâmetros do modelo CASA e posteriormente o cálculo do NPP. Nesta fase do projeto o parâmetro SOL é integrado no modelo a partir de **fontes externas**, nomeadamente dados presentes na plataforma INE (*Instituto Nacional de Estatística*) [10] obtidos a partir de estações meteorológicas pertencentes ao IPMA (*Instituto Português do Mar e da Atmosfera*) [11], e não diretamente das imagens de satélite.

O resultado serão **mapas de NPP** que identificam zonas urbanas com maior ou menor capacidade de absorção de CO₂. No entanto, nesta fase do projeto o processo ainda depende de **intervenção manual** em etapas críticas, como o *download* de imagens, o pré-processamento no SNAP e a integração de dados externos do IPMA [11]. De momento a aplicação apenas trabalha com base numa única imagem por satélite correspondente a uma data específica. Esta abordagem permite-nos validar a metodologia e garantir a correta implementação dos algoritmos e modelos em desenvolvimento. Porém, a utilização de apenas uma imagem limita a precisão e a representatividade fidedigna dos resultados, especialmente considerando a variabilidade temporal da vegetação e das condições ambientais, por este motivo, numa fase futura do projeto, iremos incorporar uma série temporal de imagens adquiridas. Essas imagens são adquiridas em diferentes datas ao longo do ano que permitirá uma estimativa mais robusta e precisa da NPP, ao captar as variações sazonais na cobertura vegetal, na radiação solar e noutros fatores ambientais que influenciam a produtividade da vegetação.

P33 - Sistema de Cálculo de Captura de CO₂ pelo Coberto Vegetal em Ambiente Urbano

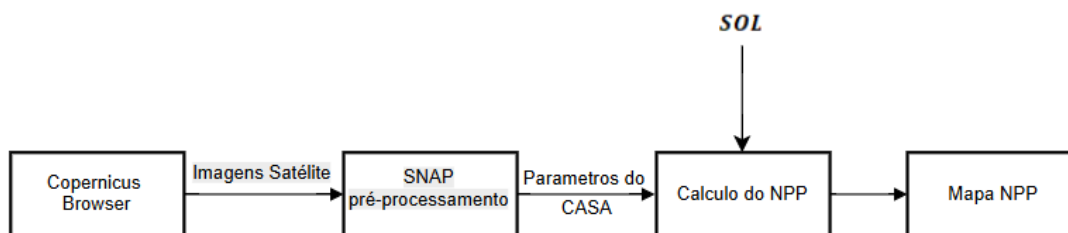


Figura 1 – Diagrama de blocos do Pipeline atual do projeto

4.1.2 Fluxo Futuro

Numa fase futura será implementado o fluxo de processamento apresentado na Figura 2, uma API automatizada substituirá o acesso manual ao Copernicus Browser [4], consultando diretamente bases de dados como o [Sentinel Hub](#) para recolher diversas imagens de satélite em diferentes datas com critérios pré-definidos (datas, cobertura de nuvens). O processamento local, via *script* Python, integrará correção atmosférica e cálculo de índices como NDVI [9] e FPAR, além de derivar a radiação solar total (SOL) diretamente das imagens de satélite da zona em estudo, utilizando bandas espectrais e algoritmos de conversão energética, eliminando a dependência de valores constantes, provenientes de fontes externas e imprecisos.

O modelo CASA será alimentado com estes dados, onde o SOL será calculado através do processamento de imagens através da análise da refletância em bandas específicas, será também combinado com parâmetros calibrados e um ficheiro DEM (*Digital Elevation Model*) da zona em estudo. Esta abordagem garante maior precisão, já que o SOL varia espacial e temporalmente, e evita inconsistências de fontes externas.

Para validação, aquisições pontuais com drone recolherão dados, comparando-os com as estimativas do modelo. Ajustes nos parâmetros (ex.: volume da vegetação) serão feitos para minimizar discrepâncias, resultando em mapas de NPP mais fiáveis para apoio a políticas de sustentabilidade urbana.

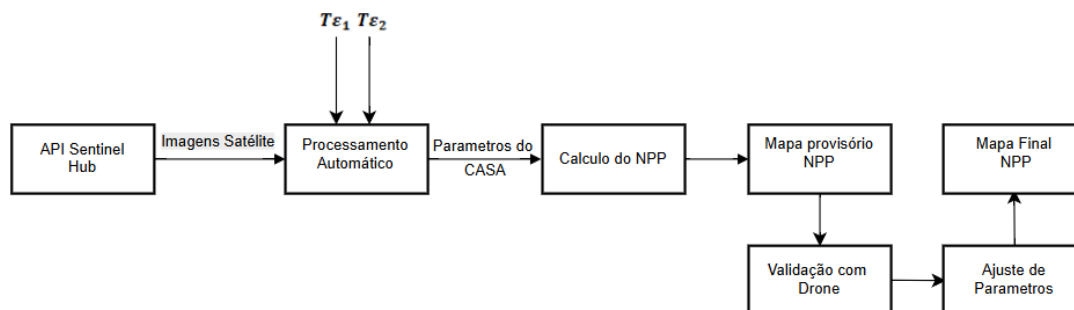


Figura 2 – Fluxo de processamento de dados final do projeto

4.2 Parâmetros já obtidos

De momento já realizámos a obtenção de alguns dos parâmetros essenciais à equação do NPP nomeadamente os descritos nas subsecções seguintes.

4.2.1 Radiação solar total incidente (SOL)

De momento os valores que constituem este parâmetro são obtidos através do portal do Global Solar Atlas [12], estes dados são valores anuais referentes à Área Metropolitana de Lisboa que se enquadra na zona em estudo, de momento estamos a utilizar os valores atualizados ao dia como constante na entrada do parâmetro $SOL(x,t)$ no script python correspondente ao cálculo do NPP.

Direct normal irradiation	DNI	18.23 – 18.92	MJ/m ²
Global horizontal irradiation	GHI	16.72 – 17.13	MJ/m ²

Figura 3 - Valores SOL tabelados zona Metropolitana de Lisboa

4.2.2 Fraction of Photosynthetic Active Radiation (FPAR)

Este parâmetro é calculado através das equações 2 e 3.

$$FPAR = \frac{(NDVI - NDVI_{min}) \times (FPAR_{max} - FPAR_{min})}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} + FPAR_{min} \quad (2)$$

$$NDVI = \frac{(B8 - B4)}{(B8 + B4)} \quad (3)$$

Onde o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) é um índice de vegetação obtido a partir da equação 3 utilizando os dados das bandas B8 (NIR – *Near-infrared*) e B4 (Red) presentes nos produtos Sentinel-2, este índice é obtido após o processamento básico da imagem, através do operador BAND MATHS presente na aplicação SNAP e exportado como um ficheiro .tiff contendo apenas esta banda em particular. O $NDVI_{max}$ e $NDVI_{min}$ são, respetivamente, os valores máximo e mínimo do produto resultante do processo aplicado anteriormente para obtenção do ficheiro .tiff. O $FPAR_{max}$ e $FPAR_{min}$ são constantes, com valores de 0,95 e 0,001, respetivamente. O resultado deste índice (FPAR) é aplicado na equação 2 resultando num mapa com a distribuição dos valores de FPAR com apresentado na Figura 4. Onde os valores variam entre 0,001 e 0,95, zonas mais claras correspondem a índices de FPAR de acordo com a equação 2 mais elevados e zonas mais escuras correspondem a zonas de FPAR mais baixos.

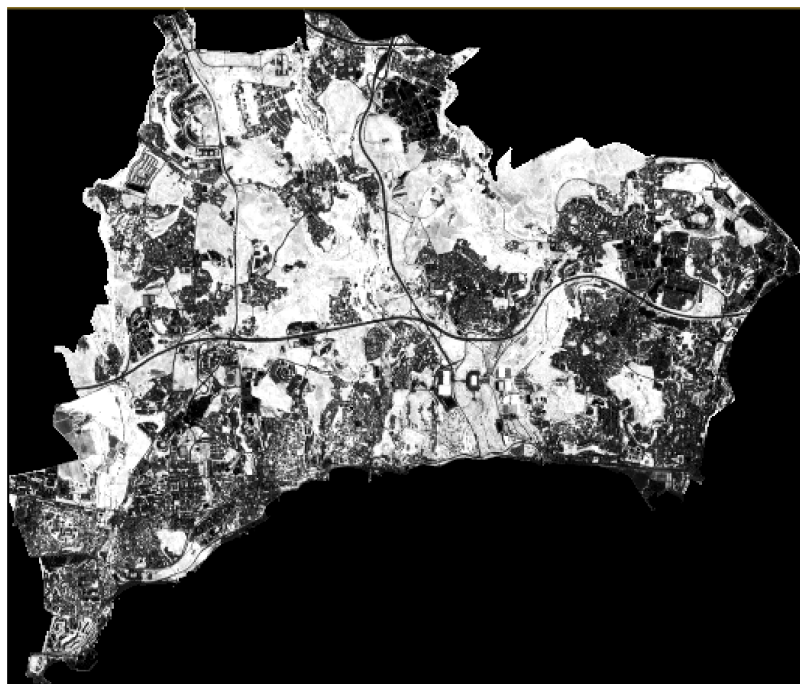


Figura 4 - Mapa FPAR (Fraction of Photosynthetic Absorbed Radiation)

4.2.3 Water Stress Coefficient (WSC)

O WSC reflete o efeito do conteúdo de água disponível na eficiência de utilização da radiação solar pelas plantas, variando de 0,5 (condições de seca extrema) a 1,0 (humidade extrema).

Considerando a relação negativa entre a refletância da banda 11, SWIR (short wave infra-red) e o teor de água superficial, vários estudos propõem diversos índices de humidade relativa do solo (RS) para o teor de água. Referindo-se à forma e à conotação do índice de humidade do solo no SWIR (SIMI), reescrevemos a fórmula do WSC da seguinte forma:

$$WSC = 0,5 + 0,5 (1 - N_{SIMI}) \quad (4)$$

$$N_{SIMI} = \frac{(SIMI - SIMI_{min})}{(SIMI_{max} - SIMI_{min})} \quad (5)$$

$$SIMI = 0,7071 \sqrt{SWIR_1^2 + SWIR_2^2} \quad (6)$$

Onde na equação 4 WSC representa o coeficiente de estresse hídrico, o N_{SIMI} na equação 5 representa o SIMI normalizado (variando de 0 a 1) e obtido pela equação 6. O $SIMI_{max}$ e $SIMI_{min}$ são os valores máximo e mínimo, respetivamente, dos valores SIMI. O $SWIR_1$ e $SWIR_2$ são a refletância infravermelha de ondas curtas, respetivamente, das bandas B11 e B12 dos produtos provenientes do sentinel-2. O resultado gera um mapa de WSC como o apresentado na Figura 5, onde o valor dos pixéis variam entre 0,5 e 1, correspondendo os valores mais baixos a zonas mais escuras e os valores mais altos a zonas mais claras.



Figura 5 - Mapa WSC (Water Stress Coefficient)

4.2.4 Fatores de stresse térmico $T\epsilon_1$ e $T\epsilon_2$

Os fatores $T\epsilon_1$ e $T\epsilon_2$ são parâmetros utilizados em modelos de produtividade vegetal, como o CASA, para quantificar o impacto de temperaturas extremas na eficácia fotossintética das plantas. Os valores de $T\epsilon_1$ e $T\epsilon_2$ são obtidos a partir das seguintes expressões:

$$T\epsilon_1 = 0,8 + 0,02 \times T_{opt} - 0,0005 \times (T_{opt})^2 \quad (7)$$

$$T\epsilon_2 = 1,1814 / [1 + e^{0,2(T_{opt}-10-T)}] \times [1 / (1 + e^{0,3(-T_{opt}-10+T)})] \quad (8)$$

$$T = 0,5 \times (T_{day} + T_{night}) \quad (9)$$

Onde T_{day} e T_{night} representam, respetivamente, as temperaturas diurna e noturna provenientes do produto LST (*Land Surface Temperature*) do sentinel-3 [13], para obtenção destes parâmetros procedemos à obtenção destes dois produtos do sentinel-3 em horários diferentes ao longo do mesmo dia, um durante o dia e outro durante a noite. Onde T_{opt} representa o valor médio de T de todos os pixéis da imagem.

Após aplicação das equações 7, 8 e 9 obtivemos mapa de $T\epsilon_2$, apresentado:

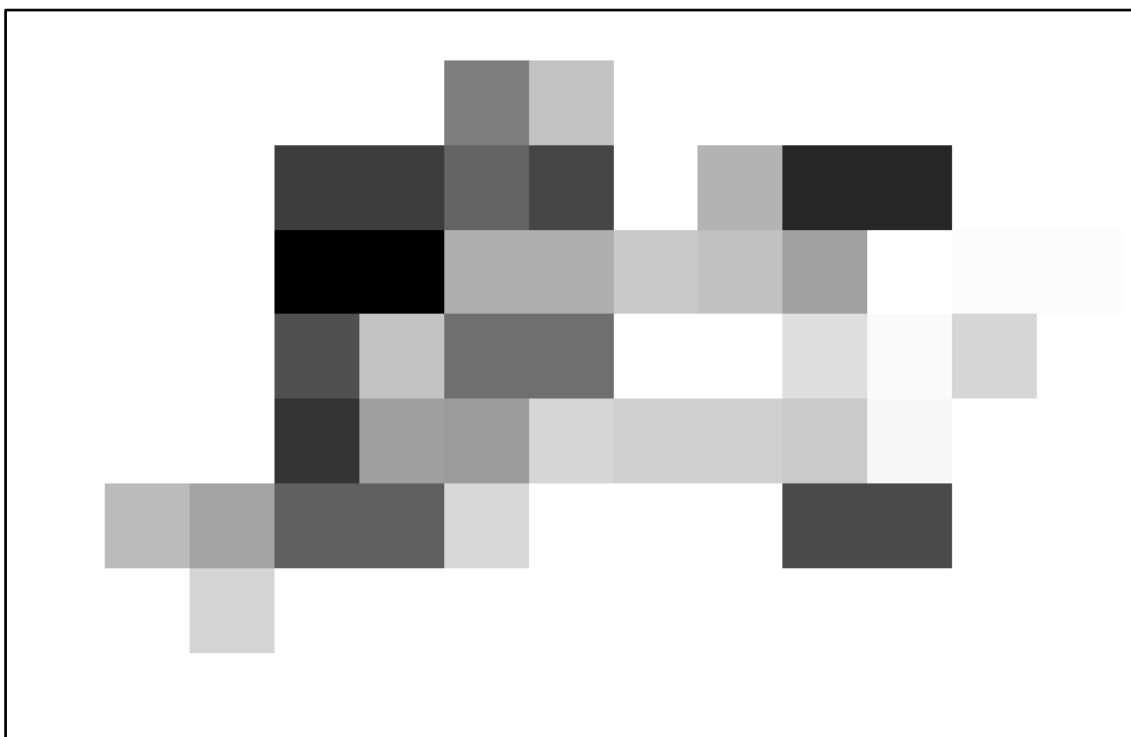


Figura 6 Factor de stress térmico (Te_2) obtido utilizando a equação 8.

O sentinel-3 nomeadamente o produto deste sensor (LST) apenas se encontra disponível com resolução bastante baixa, na ordem dos 1 km x 1 km daí o mapa ser constituído por tão poucos pixéis, os valores dos pixéis variam entre 0,977577 para os valores mais escuros e 0,996637 para os valores mais claros.

O TE_1 representa a redução da capacidade da vegetação em converter luz em biomassa sob calor excessivo, enquanto o TE_2 reflete limitações causadas por temperaturas anormalmente baixas, como geadas. Ambos atuam como limitações fisiológicas, reduzindo a eficiência fotossintética sempre que as temperaturas saem da faixa ideal. O cálculo do TE_1 resulta num valor constante a passar para o cálculo do NPP.

4.3 Parâmetros Pendentes

4.3.1 Produção Primária Líquida (NPP)

Devido às diferentes resoluções espaciais dos produtos provenientes de diversos sensores, os valores de NPP calculados em cada pixel não são diretamente comparáveis. Por isso, iremos aplicar métodos de reamostragem, ou interpolação, que convertam todas as imagens para uma única resolução espacial, garantindo que cada pixel corresponda ao mesmo tamanho em terreno antes de executar o cálculo de NPP.

4.3.2 Radiação Solar Total (SOL)

Para já, dispomos apenas de valores médios mensais constantes, obtidos de bases de dados climatológicas genéricas, como apresentado na Figura 4. Estes valores não refletem a variabilidade local real de Oeiras. A curto prazo, continuaremos a usar estes constantes para teste, mas planeamos integrar dados mais detalhados que permitam captar flutuações reais de radiação nas zonas de Lisboa e Oeiras.

O nosso objetivo neste parâmetro será a utilização do *software* ARCGIS 10 nomeadamente do modulo “AreaSolarRadiation()” [14] que leva em consideração a influência das condições atmosféricas, latitude, altitude, ângulo do zênite solar e ângulo do azimute, sombra do terreno, o seu declive e espectro para realizar um cálculo preciso da radiação solar total incidente na zona em estudo.

4.3.3 Eficiência máxima de conversão (ϵ_{max})

Este coeficiente depende das espécies e das condições fisiológicas da vegetação, pelo que precisamos de informações mais precisas da zona de Oeiras/Lisboa. Estamos a recolher dados junto da Câmara Municipal e de inventários florestais locais para calibrar o parâmetro ϵ_{max} de forma adequada ao nosso contexto, em vez de usar valores genéricos fora de contexto.

5. Conclusões e discussão

5.1 Dificuldades Encontradas

Durante a fase inicial do projeto, deparamo-nos com desafios significativos no cálculo do parâmetro **SOL** (*radiação solar total incidente*), fundamental para o modelo CASA. Devido á complexidade reside na necessidade de integrar múltiplas variáveis, como a posição geográfica, ângulo solar e cobertura de nuvens, que influenciam diretamente a quantidade de radiação que atinge a superfície. Inicialmente, tentámos derivar o SOL diretamente de imagens de satélite, utilizando algoritmos baseados em refletância espectral, no entanto, os resultados obtidos apresentavam inconsistências graves. Para garantir avanço no projeto, optámos, nesta fase, por utilizar **valores fixos de SOL** obtidos de fontes externas confiáveis, como a base de dados do INE, que oferecem estimativas anuais.

Outra dificuldade crítica está a ser a **integração de imagens de diferentes sensores**, com resoluções distintas. Por exemplo, ao combinar dados do Sentinel-2 (resolução de 10m, 20m e 60m) com imagens Sentinel-3 SLSTR (resolução de 1 km), surgiram discrepâncias de pixéis e na harmonização temporal, devido a este problema ainda não obtivemos mapas de NPP, mas encontramos-nos neste momento no processo de resolução deste contratempo.

5.2 Aprendizagens Essenciais

Durante a elaboração deste Relatório Intermédio, desenvolvemos competências em **Python**, criando scripts que automatizam o pré-processamento de imagens e manipulam arrays geoespaciais com numpy e xarray, e aprofundámos o uso da **API do SNAP** para executar correções radiométricas, aplicar máscaras de nuvens e calcular índices como o NDVI e FPAR. Aprendemos ainda a harmonizar produtos de diferentes resoluções, recorrendo a reprojeção e reamostragem para garantir que cada pixel tenha a mesma dimensão em terreno antes do cálculo do **NPP**, e traduzi-los em mapas de produtividade que evidenciam padrões espaciais de absorção de CO₂ nas áreas urbanas.

Do ponto de vista teórico, aprofundámos os princípios do **sensoriamento remoto**, percebendo como as bandas espectrais permitem quantificar a vegetação; o **processamento digital de imagens**, explorando fluxos de trabalho no SNAP e a extração de índices biofísicos; a **modelação de ecossistemas**, consolidando os fundamentos do modelo CASA e a interpretação de parâmetros como eficiência luminosa e fatores de stresse térmico e hídrico e métodos de **estatística ambiental**, aplicando validação de resultados, análise de variabilidade espacial e comparação de séries temporais. Estas aprendizagens proporcionam agora uma base sólida para a fase de calibração com drone LIDAR, análise temporal e produção de resultados robustos para o modelo CASA em ambiente urbano.

6 - Trabalho futuro

6.1 - Eficiência máxima de conversão (ϵ_{max}) e máscara de vegetação

Um dos próximos passos é a implementação de um mapa da eficiência máxima de conversão de energia [g C MJ⁻¹], alcançada em condições ideais (sem stresse térmico ou hídrico), para isso iremos utilizar um produto da ESA conhecido como Worldwide land cover mapping [15], este produto consiste num mapa global de cobertura de solo para 2020 e 2021 com resolução de 10 m, desenvolvido e validado com base em dados do Sentinel-1 e Sentinel-2. Na Figura 7 apresenta-se o mapa dos diferentes tipos de vegetação na zona de Oeiras bem como zonas de infraestruturas.

A implementação desta etapa irá ser bastante importante em diversos aspetos do desenvolvimento da nossa aplicação nomeadamente:

Eficiência máxima de conversão (ϵ_{max}): como é possível observar, este mapa indica o tipo de vegetação que cobre diversos locais da zona em estudo, aliando esta informação com o tipo de espécies características de cada tipo de vegetação da zona em estudo fornecidas pela Camara Municipal de Oeiras será possível obter uma maior

precisão do valor de Eficiência máxima de conversão (ϵ_{max}) e consequentemente uma maior precisão no mapa de NPP.

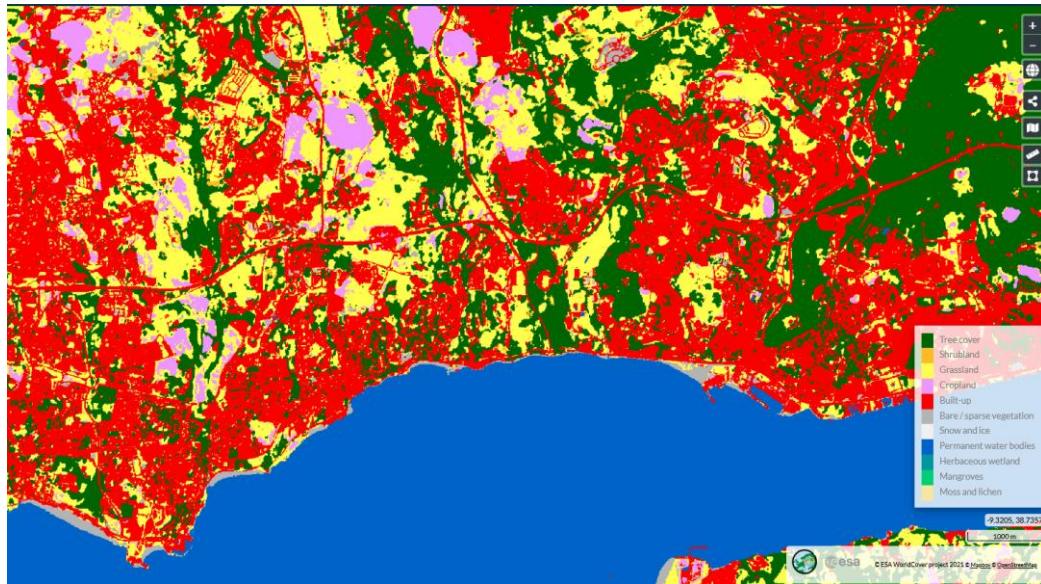


Figura 7 Mapa da eficiência máxima de conversão de energia.

Máscara de vegetação: Com este mapa será também possível realizar uma máscara para análise apenas de zonas de vegetação, evitando inconsistências em valores médios, mínimos e somatórios de determinadas zonas, para isso iremos associar a todos os pixéis que não representam vegetação o valor “0” e todos os pixéis que representam vegetação de qualquer tipo o valor “1”, isto garantirá que obtemos um mapa binário que representa uma máscara apenas com zonas de vegetação, posteriormente multiplicaremos o mapa de NPP obtido por este mapa obtendo um mapa final onde existem valores de NPP associados apenas a pixéis onde existe presença de vegetação.

6.2 Produção Primária Líquida (NPP)

No momento estamos já a trabalhar na conversão das imagens para a mesma resolução e georreferencia de forma a poder realizar a multiplicação ponto a ponto de todas as imagens e constantes referidas ao longo deste relatório.

Referências

[1] Agência Portuguesa do Ambiente, “Acordo de Paris,” *Agência Portuguesa do Ambiente*. [Online]. Available: <https://apambiente.pt/clima/acordo-de-paris>. [Accessed: 22-Apr-2025].

[2] C. Wu et al., “Improved CASA model based on satellite remote sensing data: simulating net primary productivity of Qinghai Lake basin alpine grassland,” *Geoscientific Model Development*, vol. 15, no. 17, pp. 6919–6933, Sep. 2022, doi: <https://doi.org/10.5194/gmd-15-6919-2022>.

[3] “Conheça os nossos satélites | Copernicus,” *Copernicus.eu*, 2014. Available: <https://www.copernicus.eu/pt-pt/acerca-do-copernicus/infraestrutura/conheca-os-nossos-satelites>

[4] European Space Agency, “Copernicus Browser,” *dataspace.copernicus.eu*. [Online]. Available: <https://browser.dataspace.copernicus.eu/>. [Accessed: 22-Apr-2025].

[5] “Copernicus,” *ESA.int*. Available: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus

[7] ESA, “SNAP Engine API Documentation,” *Sentinel Toolbox*. [Online]. Available: <https://step.esa.int/docs/v5.0/apidoc/engine/>. [Accessed: 22-Apr-2025].

[7] “How to use the SNAP API from Python,” *Senbox Wiki*. [Online]. Available: <https://senbox.atlassian.net/wiki/spaces/SNAP/pages/19300362/How+to+use+the+SNA P+API+from+Python>. [Accessed: 22-Apr-2025].

[7] Instituto Português do Mar e da Atmosfera, “Mapas de Radiação Mensal,” *IPMA*. [Online]. Available: <https://www.ipma.pt/pt/agrometeorologia/mapas/mensal/index.jsp?page=mrato.xml>. [Accessed: 22-Apr-2025].

- [8] Y. Chen et al., “Estimating surface energy fluxes over heterogeneous landscapes,” *Atmosphere*, vol. 14, no. 7, p. 1161, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/atmos14071161>.
- [9] C. Cole Krehbiel, “Calculate NDVI from Sentinel-2A Data,” *Cole Krehbiel Blog*, Oct. 18, 2017. [Online]. Available: <https://colekrehbiel.wordpress.com/2017/10/18/calculate-ndvi-from-sentinel-2a-data/>. [Accessed: 22-Apr-2025].
- [9] “How to calculate NDVI from Sentinel-2A data using QGIS,” *YouTube*. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=xEwy8UMGu7M>. [Accessed: 22-Apr-2025].
- [9] A. Jiang et al., “Remote sensing of vegetation and its dynamics,” *Remote Sensing*, vol. 13, no. 14, p. 2755, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/rs13142755>.
- [10] L. Zhang et al., “Assessment of water stress using Sentinel-2 imagery,” *Remote Sensing*, vol. 13, no. 21, p. 4281, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/rs13214281>.
- [11] M. Scholz et al., “Vegetation mapping using drone imagery and deep learning,” *Ecological Indicators*, vol. 130, p. 107025, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107025>
- [14] Copernicus Land Monitoring Service, “Land Cover Map Viewer,” *Copernicus Land*. [Online]. Available: <https://land.copernicus.eu/en/map-viewer>. [Accessed: 22-Apr-2025].
- [15] ESA WorldCover, “ESA WorldCover 10m 2020 and 2021 Products,” *esa-worldcover.org*. [Online]. Available: <https://esa-worldcover.org/en>. [Accessed: 22-Apr-2025].

P33 - Sistema de Cálculo de Captura de CO₂ pelo Coberto Vegetal em
Ambiente Urbano

[16] World Bank Group, “Global Solar Atlas,” *Global Solar Atlas*. [Online]. Available: <https://globalsolaratlas.info/map?c=38.777278,-9.325142,10>. [Accessed: 22-Apr-2025].