

MONITORAMENTO REMOTO DE ÁREAS DE PRODUÇÃO DE CAFÉ CONILON

Imagem: Google Earth Engine



1 DE MARÇO DE 2026

AUTOR:

ROZYMÁRIO BITTENCOURT FAGUNDES

Analista de Dados Geoespaciais
Mestre em Agricultura de Precisão



Av. Jardim Guanabara, 1900, Boa Vista
Vitória da Conquista – BA
www.safradocafe.com.br
contato@safradocafe.com.br
77 98849 1600

Introdução

Este relatório apresenta a análise do monitoramento remoto da cafeicultura no extremo sul da Bahia, região produtora de café conilon (*Coffea canephora*), considerando o período de 1/08/2025 a 23/02/2026, com uso integrado de imagens Sentinel-2AB (MSI), Sentinel-1 (SAR/radar) e dados climáticos da plataforma ERA5 processados no Google Earth Engine (GEE), por meio de integração no Google Colab. Foram avaliados 30 polígonos, totalizando 222,51 hectares.

O intervalo analisado abrange uma das fases mais determinantes da fenologia do conilon nas condições brasileiras, conforme descrito por Belan et al. (2011), sendo marcada pela florada, pegamento, expansão e granação, período de elevada exigência metabólica em que vigor vegetativo, área foliar ativa e equilíbrio nutricional são determinantes para o acúmulo de matéria seca nos frutos. Embora o clima regional tenha sido relativamente homogêneo, observou-se variação na eficiência fisiológica entre os talhões, evidenciando influência direta do manejo e da tolerância ao estresse.

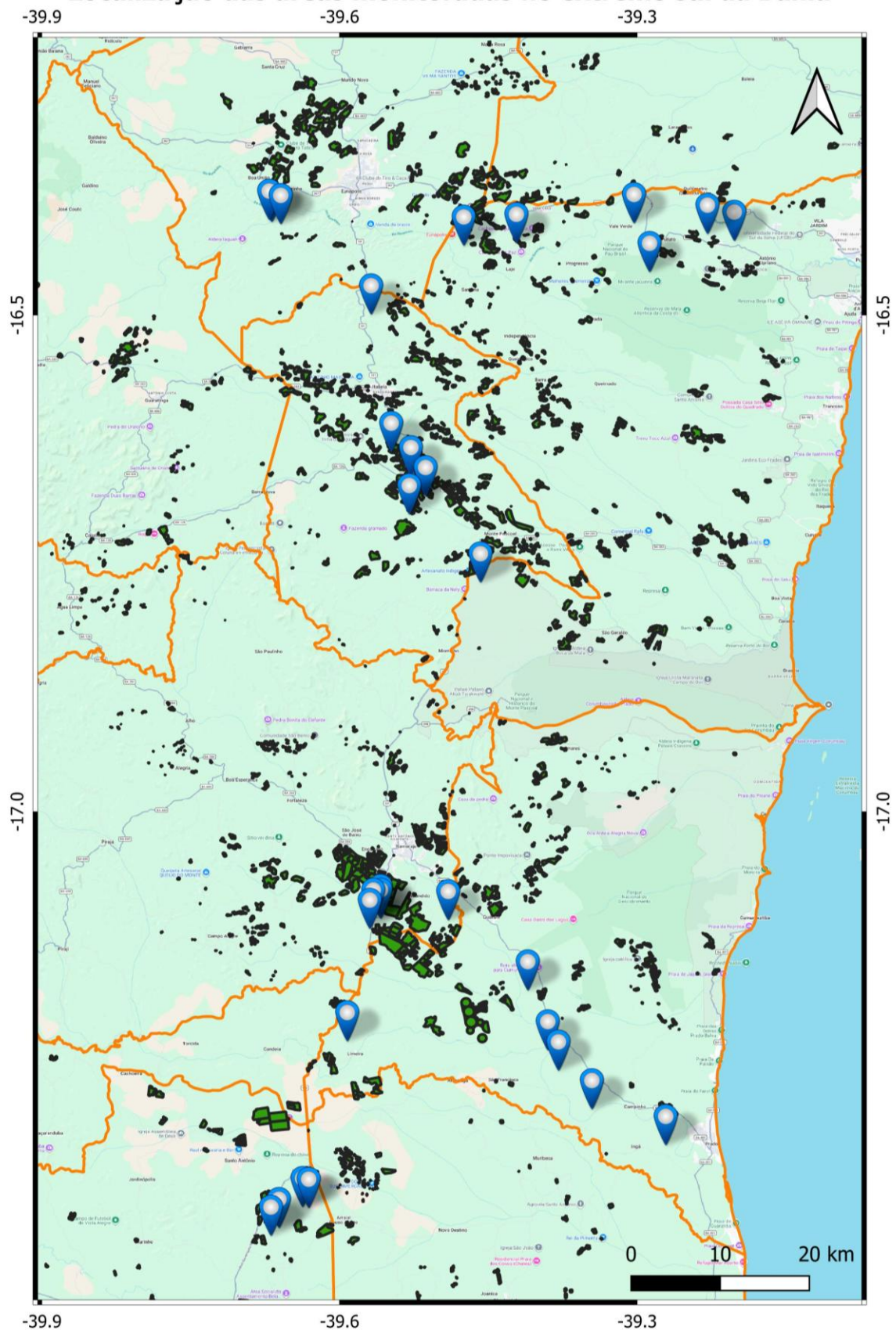
A disponibilidade hídrica destacou-se como principal fator condicionante do desempenho produtivo. Mesmo com volumes de chuva expressivos, muitos talhões apresentaram estresse hídrico moderado durante a granação, o que pode limitar o peso final dos grãos. Em contraste, áreas com maior vigor estrutural, nutrição equilibrada e NDMI positivo demonstraram maior resiliência e melhor perspectiva de consolidação do rendimento, permitindo ao monitoramento remoto antecipar diferenças no potencial produtivo e direcionar prioridades técnicas.

Os resultados da análise indicam base estrutural favorável, com potencial produtivo de moderado a alto na maior parte das áreas, porém com diferenças marcantes na consolidação, sobretudo em função da resposta hídrica e nutricional de cada talhão.

Informações gerais

- 30 polígonos.
- Área total: 222,51 hectares.
- Municípios abrangidos: Eunápolis, Itabela, Porto Seguro, Prado, Itamaraju e Teixeira de Freitas.
- Espécie: *Coffea canephora*

Localização das áreas monitoradas no extremo sul da Bahia



-  Localização dos polígonos de café monitorados
-  Áreas de café (CONAB 2019)
-  Limites dos municípios (SEI-BA)

Informações gerais:
- 30 polígonos
- 222.51 ha (total)

CRS: WGS84 / 24S
Fevereiro de 2026
Autor: Rozymario Fagundes

Materiais e metodologia

- Plataforma Google Colab (linguagem de programação Python)
- Satélite Sentinel-2AB, sensor MSI (MultiSpectral Instrument)
- Satélite Sentinel-1 SAR GRD (radar)
- Plataforma ECMWF Reanalysis v5 (ERA5)
- Software QGIS

O monitoramento remoto foi realizado por meio da plataforma Google Colab, integrada ao Google Earth Engine (GEE) para acesso e processamento de dados, via APIs, em ambiente Python e execução em nuvem. O GEE foi utilizado para a obtenção e processamento das imagens ópticas do Sentinel-2 MSI (S2_SR_HARMONIZED), dados SAR do Sentinel-1 (S1_GRD) e dados climáticos da plataforma ERA5 (ECMWF/ERA5_LAND/DAILY_AGGR). Os dados de satélite e climáticos foram todos selecionados para um mesmo período. Com os dados de satélite, foi realizado o cálculo da série temporal dos valores médios para cada imagem/data, a média geral da série e uma classificação dos valores dos pixels, conforme a literatura científica.

Período de monitoramento

- Data inicial: 1/8/2025 | Data final: 23/2/2026
- Filtro de nuvens para o MSI/Sentinel-2AB: entre 5% e 30%, variando conforme a disponibilidade cada área, sendo adotado o critério mínimo de 5 imagens disponibilizadas para cada polígono. Cada imagem/data corresponde a uma medição.

Índices espectrais e variáveis orbitais

Sentinel-2AB (MSI – sensor óptico):

- NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)
- GNDVI (Green NDVI)
- NDRE (Normalized Difference Red Edge)
- CCCI (Canopy Chlorophyll Content Index)
- NDMI (Normalized Difference Moisture Index)
- NDWI (Normalized Difference Water Index)
- TWI2 (Two-band Water Index 2)
- NBR (Normalized Burn Ratio)

Interpretação dos índices espectrais

- **vigor vegetativo:** NDVI indica o vigor geral da vegetação, variando de solo exposto e baixo desenvolvimento até dossel altamente vigoroso, podendo apresentar saturação em áreas muito densas.
- **estado nutricional:** NDRE, GNDVI e CCCI estimam o teor de clorofila e o equilíbrio nutricional. Valores baixos indicam deficiência ou estresse, valores intermediários representam condição adequada e valores elevados indicam alta atividade fotossintética, com possível excesso de nitrogênio quando muito altos.
- **condição hídrica:** NDMI, NDWI e TWI2 avaliam o status hídrico da vegetação e do solo. Identificam desde estresse hídrico e solo seco até condições adequadas e possíveis excessos de umidade.
- **biomassa e estresse:** NBR indica variações de biomassa e intensidade de estresse, variando de vegetação seca ou degradada até alta biomassa e vigor estrutural.

Ainda para a visualização das imagens do Sentinel-2AB(MSI) no mapa, foram gerados mosaicos para todos os polígonos, sendo exibida a imagem mais recente em composição RGB (visível) e nos índices espectrais, adotando-se o critério geral de filtro de nuvens de 20% para este processamento, especificamente.

Sentinel-1 (SAR – radar)

- Retroespalhamento VV
- Retroespalhamento VH
- Razão VV/VH
- Órbita: Descending

Interpretação dos dados SAR

- **Retroespalhamento VV:** indica a estrutura do dossel e a rugosidade do solo. Valores muito baixos representam solo exposto ou baixa biomassa; os intermediários, lavoura em desenvolvimento; e valores mais altos refletem dossel estruturado, podendo também indicar maior umidade do solo.
- **Retroespalhamento VH:** relaciona-se ao volume vegetativo. Valores baixos indicam pouca cobertura foliar; os intermediários representam desenvolvimento moderado, enquanto os mais elevados indicam dossel denso e maior volume de folhas.

Dados climáticos

- Temperatura do ar (°C)
- Precipitação (mm)
- Radiação solar (MJ/m²)
- Temperatura do ponto de orvalho (°C)
- Buffer circular com raio mínimo de 30 km para cada polígono

Análise por divisão microrregional

Na análise, optou-se por uma avaliação microrregional dos polígonos, conforme a distribuição por municípios, abrangendo as áreas localizadas em Teixeira de Freitas, Porto Seguro, Prado, Itamaraju, Itabela e Eunápolis, sendo 5 talhões para cada, conforme descrito a seguir:

- **Teixeira de Freitas:** Texe01 – 2,03 ha; Texe02 – 30,65 ha; Texe03 – 10,30 ha; Texe04 – 0,68 ha; Texe05 – 31,29 ha.
- **Porto Seguro:** Port01 – 9,12 ha; Port02 – 16,97 ha; Port03 – 10,61 ha; Port04 – 19,62 ha; Port05 – 12,24 ha.
- **Prado:** Padr01 – 2,15 ha; Padr02 – 1,41 ha; Padr03 – 2,58 ha; Padr04 – 1,24 ha; Padr05 – 2,05 ha.
- **Itamaraju:** Itam01 – 3,07 ha; Itam02 – 1,81 ha; Itam03 – 8,93 ha; Itam04 – 1,32 ha; Itam05 – 6,87 ha.
- **Itabela:** Itab01 – 0,79 ha; Itab02 – 2,25 ha; Itab03 – 0,34 ha; Itab04 – 5,86 ha; Itab05 – 9,94 ha.
- **Eunápolis:** Euna01 – 12,60 ha; Euna02 – 5,14 ha; Euna03 – 4,08 ha; Euna04 – 3,43 ha; Euna05 – 3,12 ha.

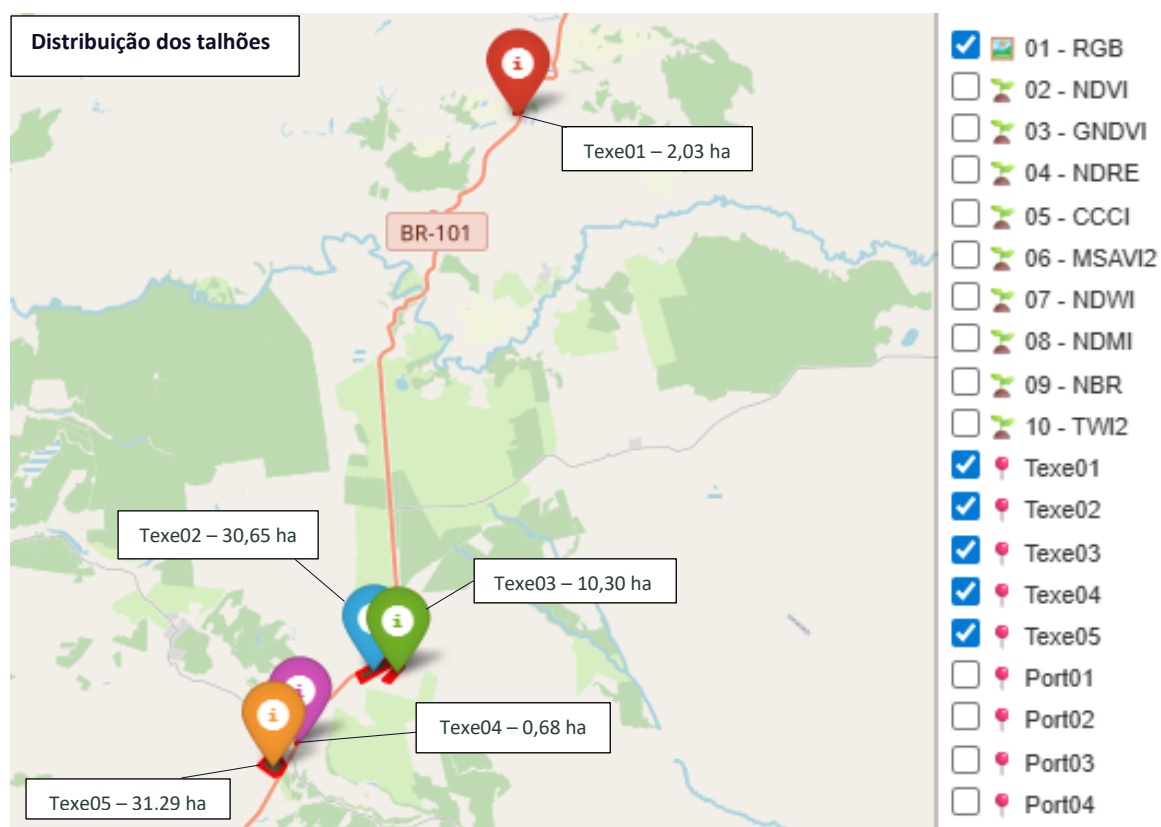
Com essa abordagem, é possível comparar a variabilidade espacial dos índices espectrais e dos parâmetros radar dentro de cada município e entre municípios distintos, considerando diferenças de escala produtiva, tamanho dos talhões e possíveis variações edafoclimáticas regionais.

1. Análise dos talhões da região de Teixeira de Freitas

A análise da região de Teixeira de Freitas indica que, durante o período de florada, pegamento e enchimento dos frutos do café conilon, os talhões apresentaram, de modo geral, boa estrutura vegetativa e condição nutricional compatível com a fase reprodutiva.

Entretanto, os índices espectrais e de umidade revelam ocorrência recorrente de estresse hídrico moderado em parte das áreas, além de variações internas relacionadas ao manejo e à fertilidade do solo.

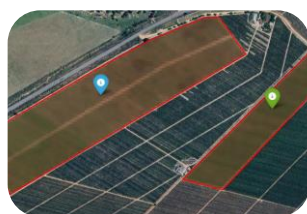
Assim, embora o potencial produtivo seja estruturalmente favorável na maioria dos talhões, a disponibilidade hídrica ao longo do ciclo aparece como o principal fator limitante para consolidação do desempenho produtivo.



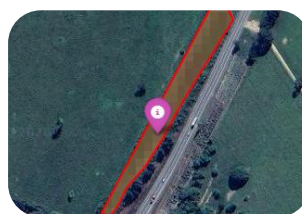
Talhões da região de Teixeira de Freitas: 74,95 ha. Reprodução: Google Colab



Teixe01



Teixe02 (azul) e Teixeira03 (verde)



Teixe04



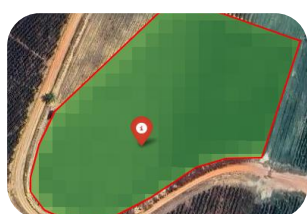
Teixe05

Imagens em composição RGB dos polígonos da região de Teixeira de Freitas. Reprodução: Google Colab/Sentinel-2AB(MSI)

Desenvolvimento vegetativo durante florada e granação

Os índices do Sentinel-2 mostram predominância de vigor moderado a alto na maior parte dos talhões da região de Teixeira de Freitas. No Teixeira01, 60% das medições de NDVI foram classificadas como alto vigor, com média de 0,524, embora ainda ocorram registros pontuais de baixo vigor e solo exposto, evidenciando heterogeneidade interna. O Teixeira02 apresentou NDVI médio de 0,620, com 60% das medições em alto vigor, indicando dossel mais uniforme e estruturado. No Teixeira03, a média de NDVI foi superior (0,657), com presença de classes associadas a vigor máximo e possível saturação, sugerindo elevada densidade foliar. O Teixeira04 apresentou NDVI médio de 0,537, com predominância de vigor moderado (60%), enquanto o Teixeira05 registrou média de 0,571, com 60% das medições em alto vigor.

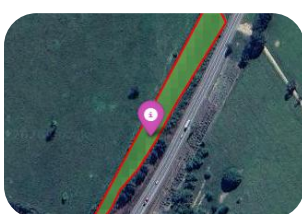
De forma geral, os valores observados indicam que a maioria dos talhões apresenta estrutura vegetativa capaz de sustentar simultaneamente crescimento vegetativo e enchimento de frutos, característica importante no conilon durante fases de alta exigência fisiológica. O GNDVI reforça esse padrão, especialmente em Teixeira02 e Teixeira03, onde predominam níveis muito altos, sugerindo elevado teor de nitrogênio foliar e dossel mais fechado. Já no Teixeira01 e Teixeira05 há maior variabilidade, com presença pontual de deficiência de clorofila ou solo exposto.



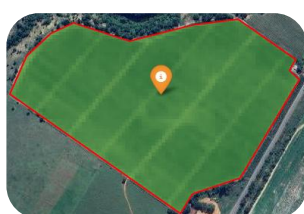
Teixe01



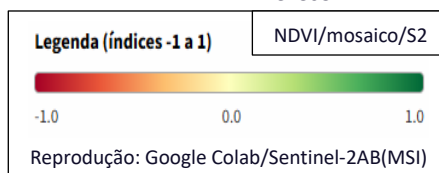
Teixe02 (azul) e Teixeira03 (verde)



Teixe04



Teixe05



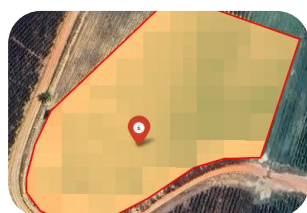
Os dados do Sentinel-1 confirmam estrutura de dossel consolidada em todos os talhões. O Texe02 apresentou VV médio de -10,15 dB, Texe03 -9,87 dB, Texe04 -9,20 dB e Texe05 -9,59 dB, valores compatíveis com dossel fechado ou lavoura adulta. O Texe01, embora sem detalhamento de VV médio explícito, apresentou classificação compatível com dossel em desenvolvimento predominante. A resposta em VH indica volume vegetativo moderado a alto na maioria das áreas, confirmando biomassa consistente e boa estrutura física para suporte à granação.

Condição nutricional na fase reprodutiva

Os índices NDRE e CCCI evidenciam variações entre os talhões, com predominância nutricional moderada a adequada. No Texe01, 70% das medições de NDRE indicaram vigor nutricional em desenvolvimento, com média de 0,330, enquanto o CCCI médio de 0,162 indica condição geral positiva, embora com 30% das medições associadas a estresse severo, demonstrando variabilidade entre os talhões.

O Texe02 apresentou NDRE médio de 0,429 e CCCI médio de 0,357, indicando maior teor de clorofila e melhor equilíbrio nutricional. No Texe03, o NDRE médio foi de 0,458, com ocorrência simultânea de classes associadas a possível excesso e a déficit pontual, refletindo heterogeneidade no manejo ou fertilidade. Já, o Texe04 apresentou NDRE médio de 0,322 e CCCI médio de 0,285, com predominância de vigor nutricional adequado, enquanto Texe05 teve NDRE médio de 0,375 e CCCI médio de 0,239, caracterizando condição nutricional satisfatória, embora com registros isolados de estresse ou possível excesso.

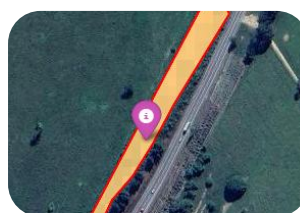
De maneira geral, a maioria dos talhões demonstra suporte nutricional compatível com a fase de enchimento dos frutos, ainda que existam pontos localizados com desequilíbrios.



Texe01



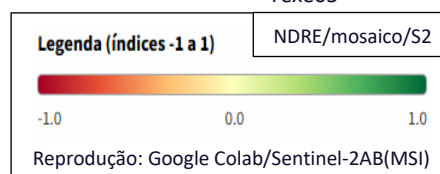
Texe02 (azul) e Texe03 (verde)



Texe04



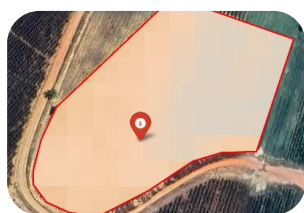
Texe05



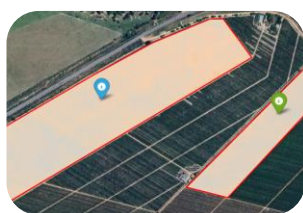
Condição hídrica

Os dados climáticos apontam precipitação acumulada entre 627 e 645 mm no período, temperatura média de aproximadamente 24,3 °C e radiação média próxima de 19,3 MJ/m², condições favoráveis ao desenvolvimento do conilon. Apesar disso, os índices de umidade mostram tendência a restrição hídrica superficial em parte das áreas.

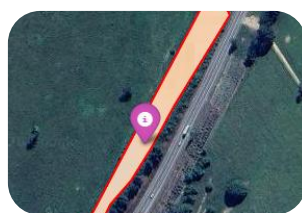
No Texe01, 70% das medições de NDWI sugerem solo seco e 70% das medições de NDMI apontaram risco de estresse hídrico. O NBR médio de 0,220 reforça presença de estresse moderado. No Texe02 e Texe03, embora haja registros de solo seco em parte das medições, observa-se maior equilíbrio hídrico relativo, com NDMI médio de 0,092 (Texe02) e 0,115 (Texe03), indicando disponibilidade hídrica moderada. Ainda assim, o NBR médio variando entre 0,319 e 0,357 aponta estresse moderado recorrente.



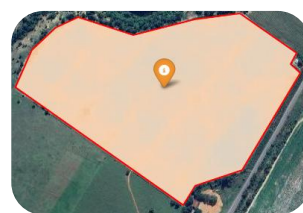
Texe01



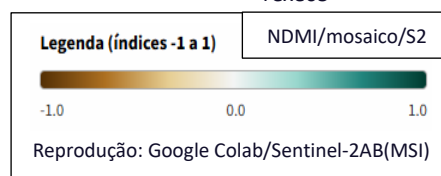
Texe02 (azul) e Texe03 (verde)



Texe04



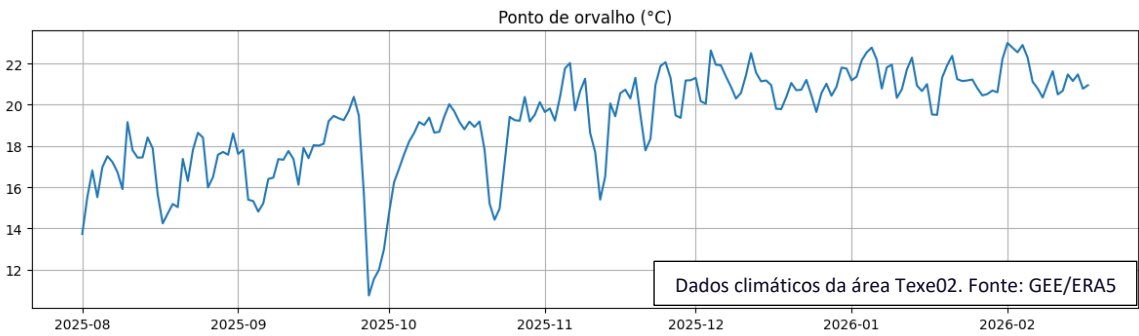
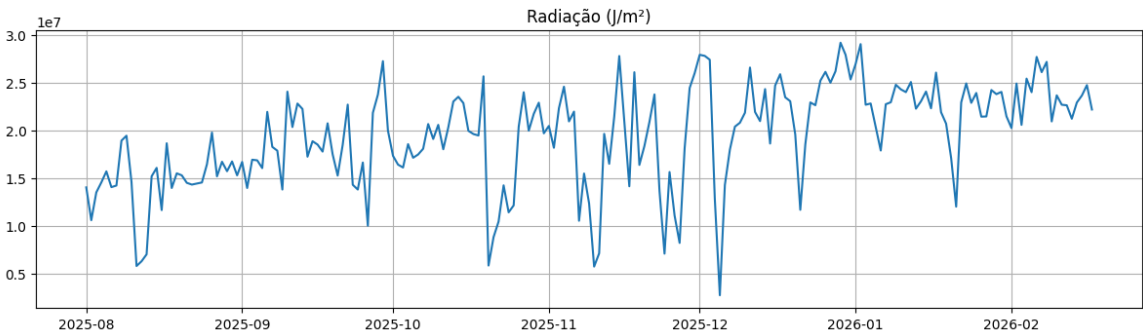
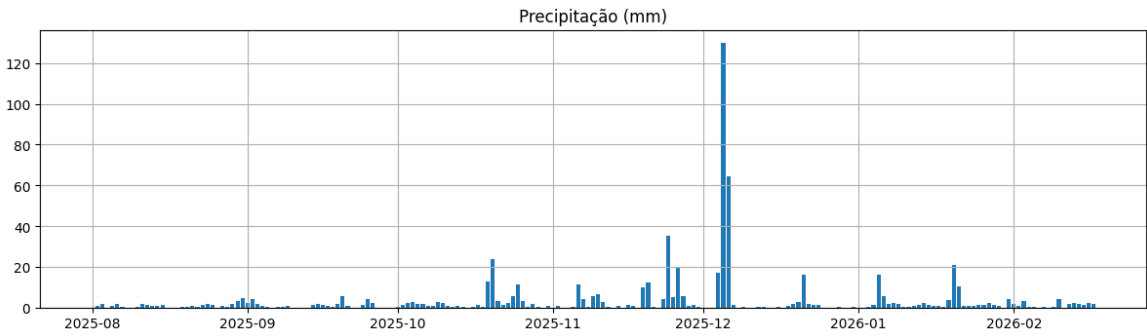
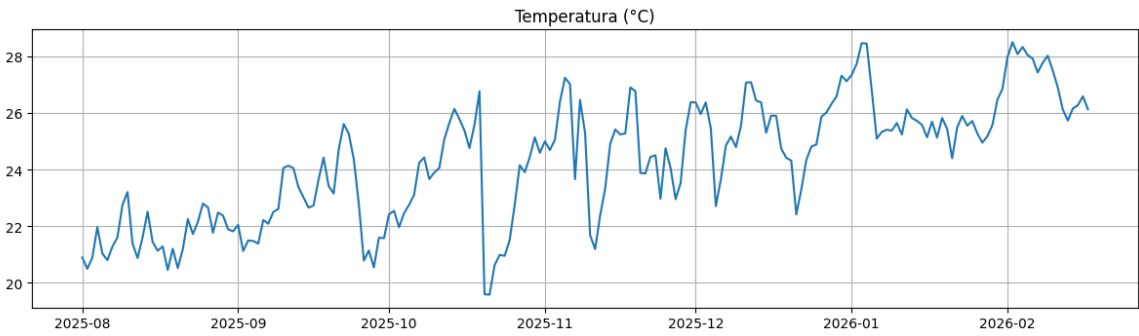
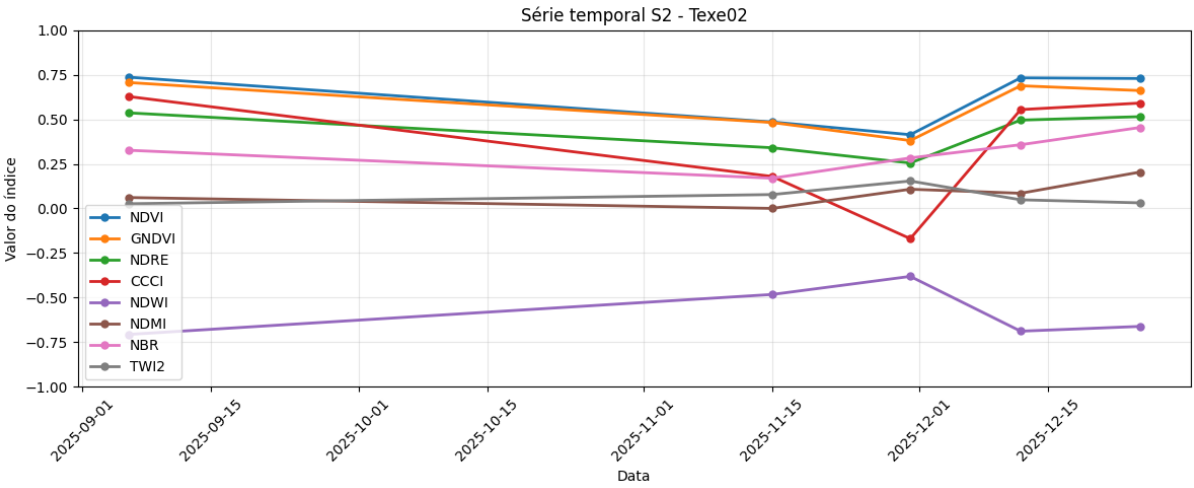
Texe05



O Texe04 apresentou risco de estresse hídrico em 100% das medições de NDMI, mesmo com NDVI estruturalmente adequado, indicando possível limitação hídrica durante fase crítica. O Texe05 apresentou 60% das medições com risco de estresse hídrico, com NBR médio de 0,322, caracterizando estresse moderado predominante. O TWI2 permaneceu majoritariamente em condição intermediária em todos os talhões, indicando ausência de excesso hídrico persistente no dossel.

Integração entre clima, fisiologia e resposta espectral

Como as variáveis climáticas foram praticamente homogêneas entre os talhões, as diferenças observadas nos índices espectrais e radar refletem predominantemente fatores locais, como manejo nutricional, histórico de irrigação, fertilidade e características do solo.



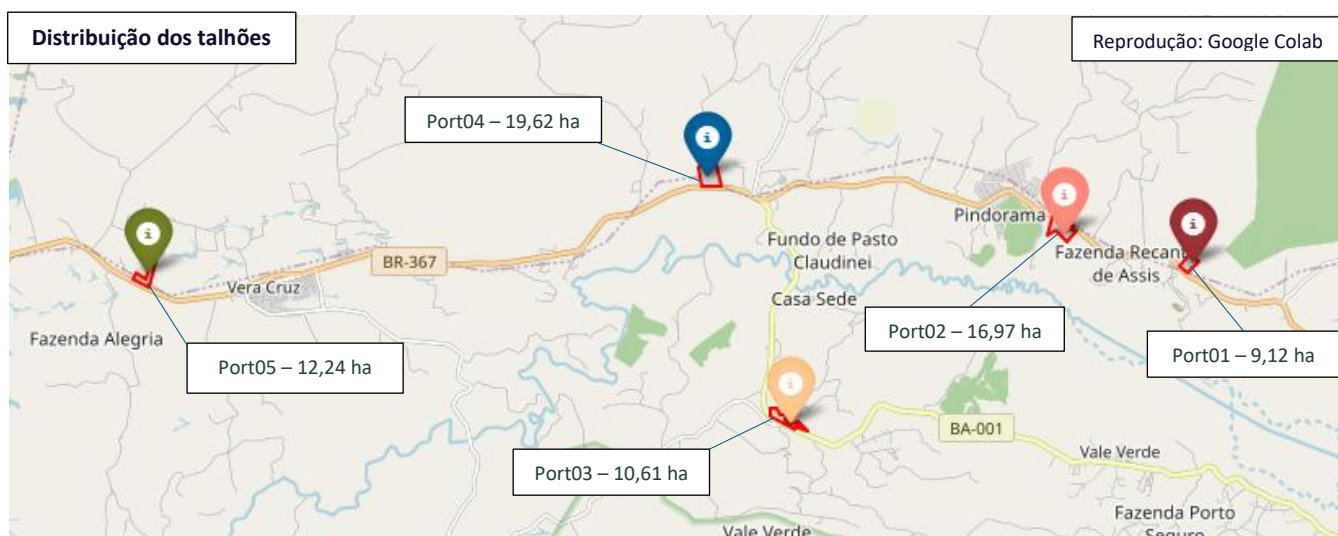
Texe02 e Texe03 destacam-se por combinação de alto vigor vegetativo, boa estrutura de dossel e condição nutricional mais consistente, sugerindo maior estabilidade fisiológica durante a fase de enchimento. Texe04 apresenta boa estrutura, porém com maior sinal de restrição hídrica. Texe01 demonstra maior heterogeneidade interna, com áreas pontuais de solo exposto e estresse hídrico mais evidente. Texe05 apresenta vigor adequado, porém com recorrência de estresse moderado.

2. Análise dos talhões da região de Porto Seguro

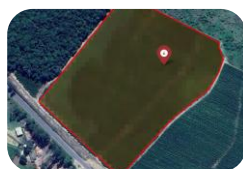
A análise dos talhões Port01 a Port05 indica que, durante o período de florada, pegamento e enchimento dos frutos do café conilon, as áreas apresentaram desempenho contrastante, com Port01 e Port02 se destacando pelo maior vigor vegetativo e melhor equilíbrio nutricional, ainda que sob indícios de estresse hídrico moderado. Os índices espectrais e de umidade revelam que Port03, Port04 e Port05 enfrentam limitações mais evidentes, combinando vigor moderado a baixo, com sinais recorrentes de estresse nutricional e hídrico, especialmente em Port03 e Port05.

Assim, o potencial produtivo mostra-se mais consolidado nos talhões Port02 e, com ressalvas, Port01, enquanto os demais podem ter o desempenho produtivo comprometido pelas restrições hídricas e nutricionais observadas ao longo do ciclo.

Na análise desses talhões foi utilizado filtro de nuvens de 30% para imagens do Sentinel-2AB(MSI), tendo sido gerado entre 6 e 7 imagens para análise.



Talhões monitorados na região de Porto Seguro: 68,56 hectares



Port01



Port02



Port03



Port04



Port05

Imagens em composição RGB dos polígonos da região de Porto Seguro. Reprodução: Google Colab/Sentinel-2AB(MSI)

Desenvolvimento vegetativo durante florada e granação

Os talhões Port01 e o Port02 apresentaram as melhores condições, com 66,7% de suas medições de NDVI classificadas como "Alto vigor" ou "Vigor máximo do cafeeiro". Em contraste, o Port03, Port04 e Port05 mostraram um vigor mais moderado ou baixo. O Port03, por exemplo, teve 33,3% de suas medições de NDVI em "Alto vigor", mas também registrou ocorrências de "Baixo vigor" e "Solo exposto" (16,7% cada), resultando em NDVI médio de 0,379, o mais baixo entre os cinco. Port04 e Port05 apresentaram dominância de "Vigor moderado" (42,9% e 50,0%, respectivamente), indicando uma capacidade fotossintética intermediária durante este período crítico de demanda metabólica para a formação e enchimento dos frutos.



Port01



Port02



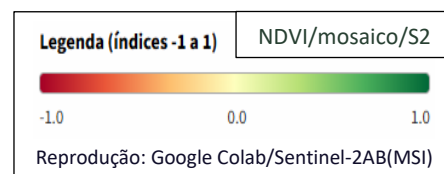
Port03



Port04



Port05

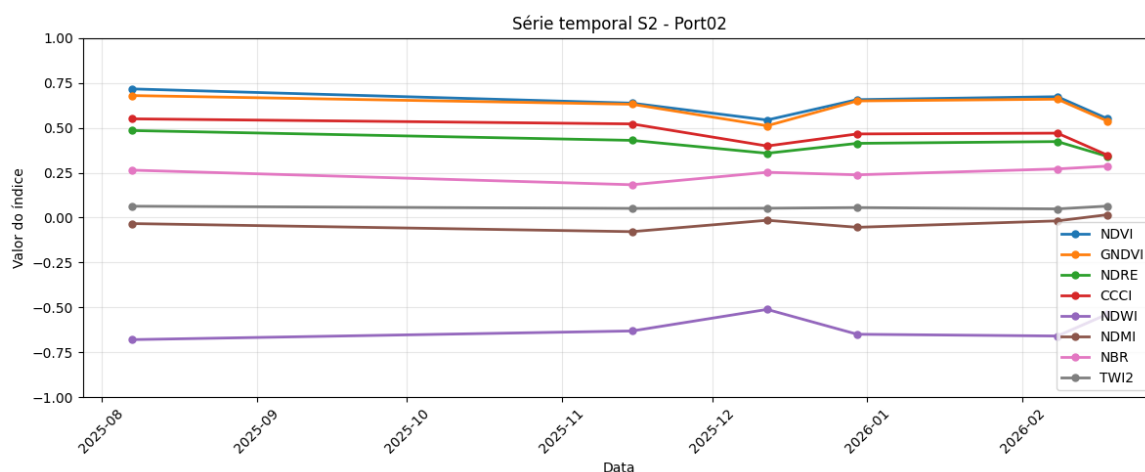


Os dados do Sentinel-1 corroboram as diferenças na estrutura do dossel. No Port01, 100% das medições de VV indicam "Dossel fechado / lavoura adulta", o que demonstra uma estrutura de planta mais desenvolvida e com maior volume de biomassa.

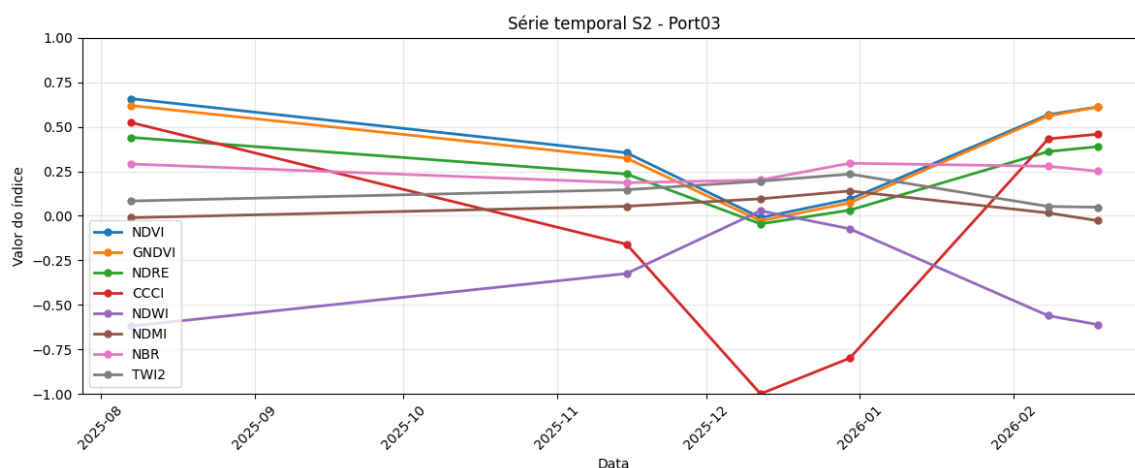
Já nos talhões Port04 e Port05, a classificação predominante foi "Dossel em desenvolvimento" (52,9% e 94,1%, respectivamente), sugerindo que essas áreas possuem uma arquitetura vegetativa menos densa, o que pode impactar a capacidade de suporte à produtividade.

Condição nutricional na fase reprodutiva

A análise dos índices GNDVI, NDRE e CCCI expõe contrastes significativos no estado nutricional. O Port02 se destaca positivamente, com 100% de suas medições de NDRE e CCCI classificadas como "Vigor nutricional moderado/em desenvolvimento" e "adequado", respectivamente. O Port01, apesar do alto vigor (NDVI), apresenta um alerta: 66,7% das medições de GNDVI indicam "Níveis muito altos", o que sugere a necessidade de investigar um possível excesso de nitrogênio ou um dossel excessivamente fechado que pode estar saturado.



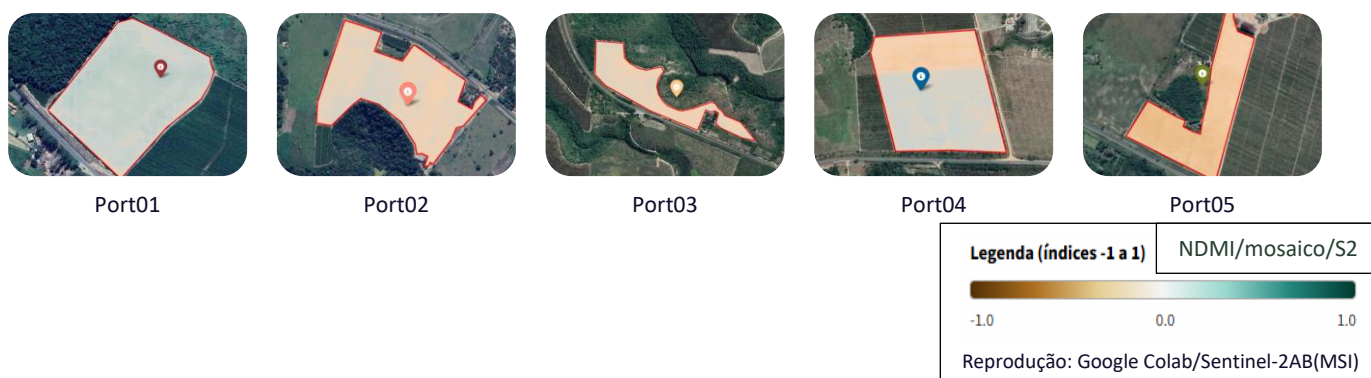
No extremo oposto, os talhões Port03, Port04 e Port05 exibem sinais de deficiência. O Port03, por exemplo, teve 50% de suas medições de CCCI classificadas como "Estresse nutricional severo / baixa clorofila", enquanto o Port05 mostrou 33,3% na mesma categoria. Essas limitações na disponibilidade de nitrogênio e clorofila durante a granação podem comprometer diretamente a taxa fotossintética e o acúmulo de matéria seca nos frutos, mesmo que os valores se mostrem mais recuperados para datas mais atuais.



Condição hídrica e influência nas fases de pegamento e enchimento

A disponibilidade hídrica, um fator determinante para o pegamento dos frutos e seu enchimento, apresentou comportamentos distintos entre os talhões. O NDWI indicou que 50% das medições no Port01 mostraram "Solo muito seco", enquanto no Port02 e Port04, 100% e 71,4% das medições, respectivamente, apontaram para "Solo seco". O Port03 e Port05, por outro lado, registraram situações de "Solo úmido" em 33,3% de suas medições.

O NDMI, que reflete a umidade na vegetação e no solo, revela um cenário preocupante para a maioria. Todos os 100% das medições nos talhões Port04 e Port05, e no Port02, foram classificadas como "Risco de estresse hídrico".



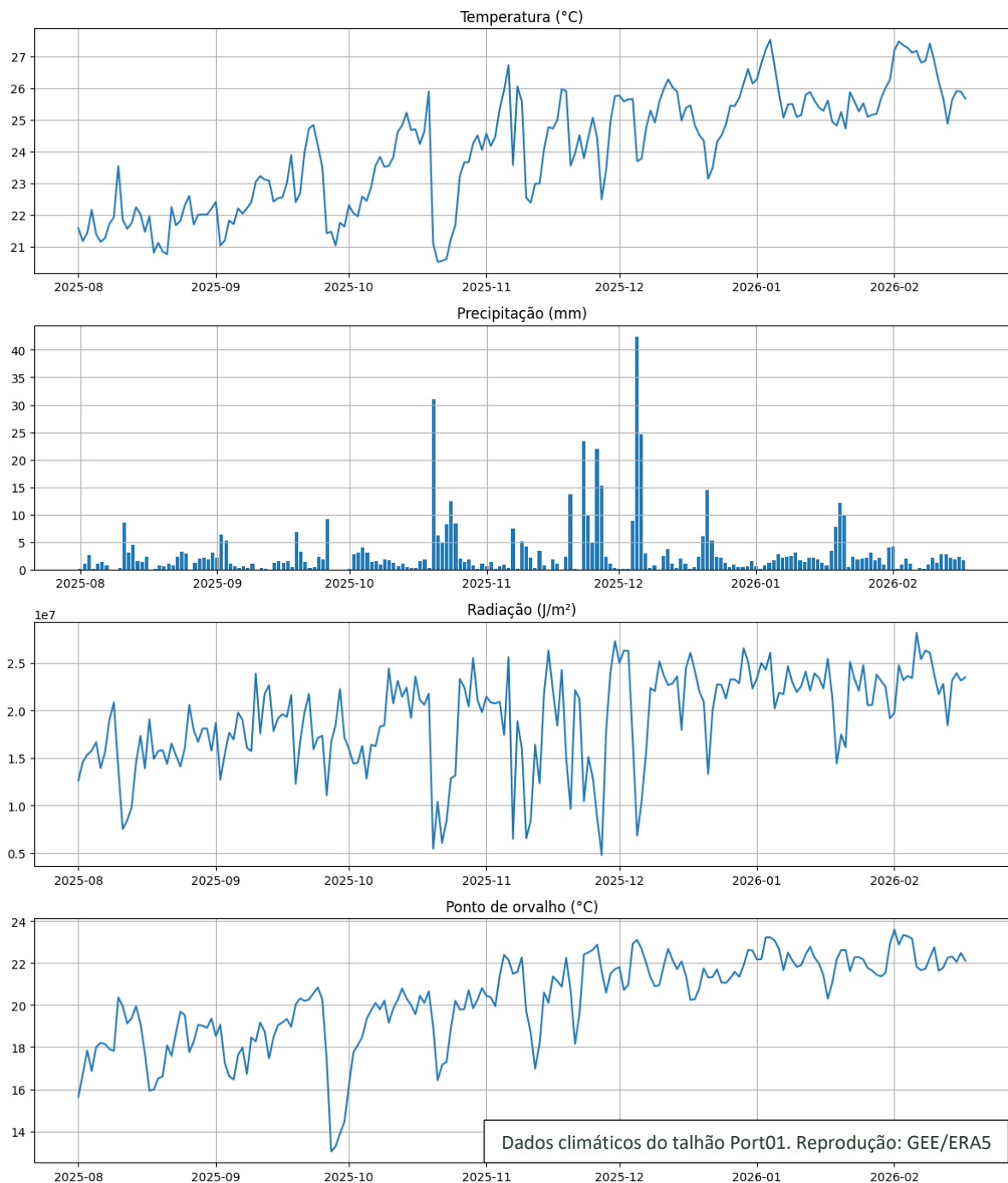
Apesar disso, o NBR no Port02 mostrou "Estresse moderado" em 83,3% dos casos, enquanto no Port05 essa classificação foi mais severa, com 66,7% das medições indicando "Alto risco de estresse hídrico / secamento". Isso sugere que, embora a demanda evaporativa e a condição do solo indiquem déficit, o Port02 conseguiu manter um estresse mais controlado na vegetação.

O TWI2, indicador de umidade no dossel, foi classificado como "Condição intermediária" em 100% das medições para todos os talhões, exceto o Port01, que teve 83,3% nessa classe e 16,7% em "Alta umidade", descartando a ocorrência de excesso hídrico generalizado que pudesse elevar o risco fitossanitário.

Integração entre clima, fisiologia e resposta espectral

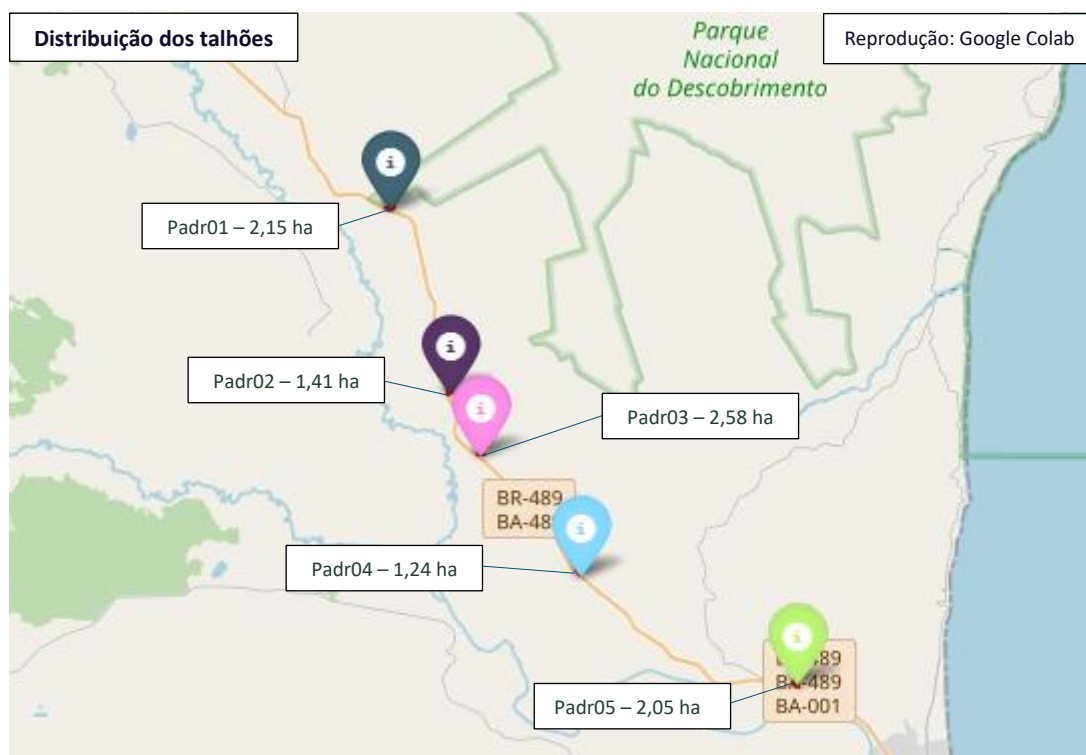
Os dados climáticos do ERA5 são notavelmente homogêneos para todos os talhões, com temperatura média de aproximadamente 24°C e precipitação total entre 548 mm e 568 mm. Essa uniformidade climática reforça que as diferenças observadas nos índices espectrais e

de radar são majoritariamente influenciadas por fatores locais de manejo, como fertilidade do solo, histórico da lavoura e práticas culturais.



3. Análise dos talhões da região de Prado

A análise dos cinco polígonos localizados na região de Prado revela um cenário heterogêneo quanto ao desenvolvimento vegetativo, condição nutricional e status hídrico do café conilon ao longo das fases de florada, frutificação e início da granação. Embora as condições climáticas sejam praticamente uniformes, devido à proximidade entre as áreas, com temperatura média entre 24,3°C e 24,4°C, precipitação entre 616,4 mm e 625,7 mm e radiação média próxima de 19 MJ/m², os índices espectrais e dados de radar indicam respostas fisiológicas distintas entre os talhões, refletindo diferenças estruturais e possivelmente de manejo do café e do solo. Para essas áreas, foi utilizado filtro de nuvens de 20% a 30%, tendo cada área retornando entre 5 a 6 imagens em condições de serem analisadas.



Os talhões da região de Prado somam 9,43 hectares.



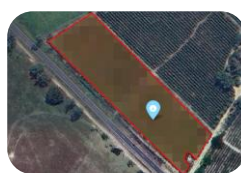
Padr01



Padr02



Padr03



Padr04



Padr05

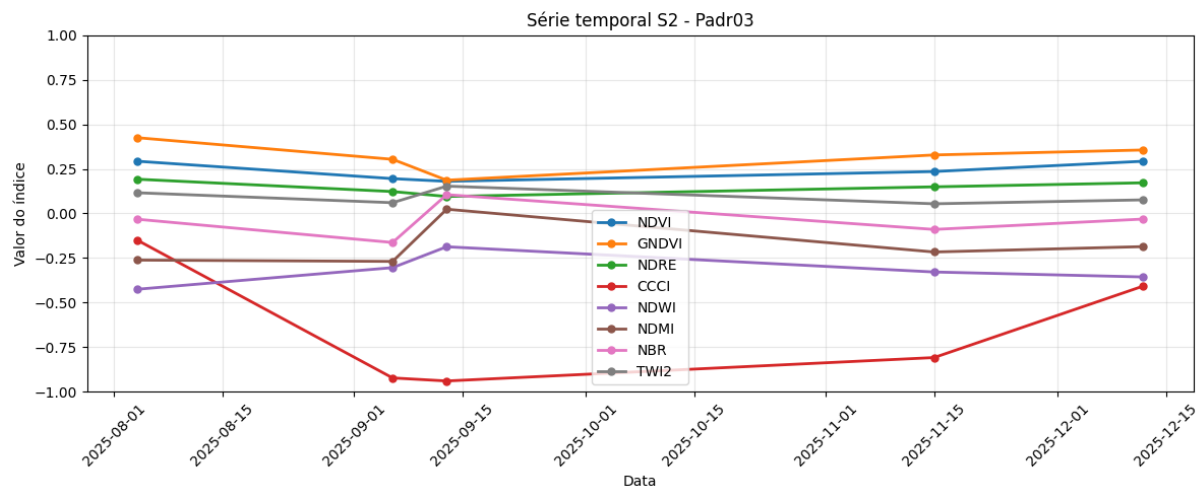
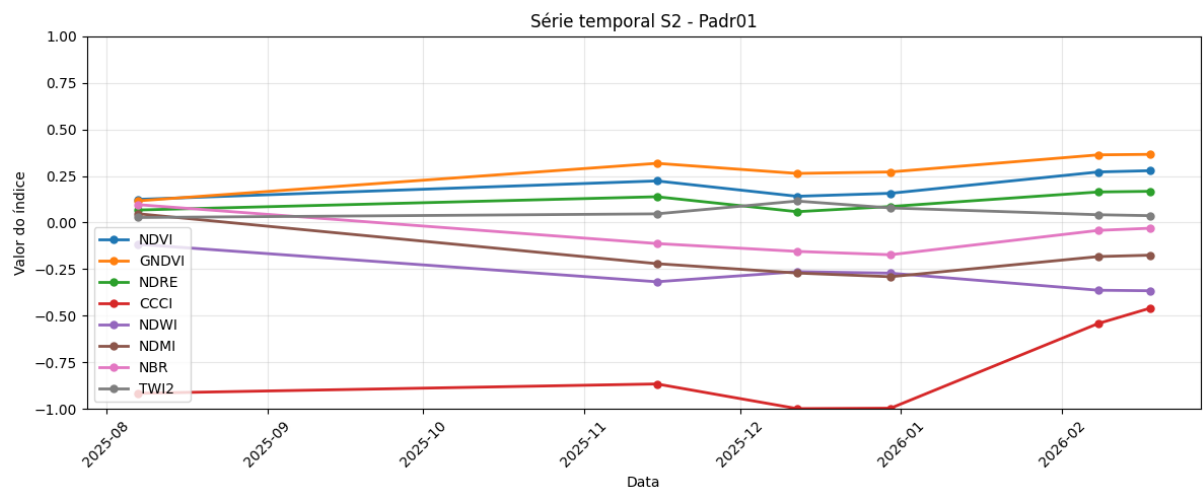
Imagens em composição RGB dos polígonos da região de Prado. Reprodução: Google Colab/Sentinel-2AB(MSI)

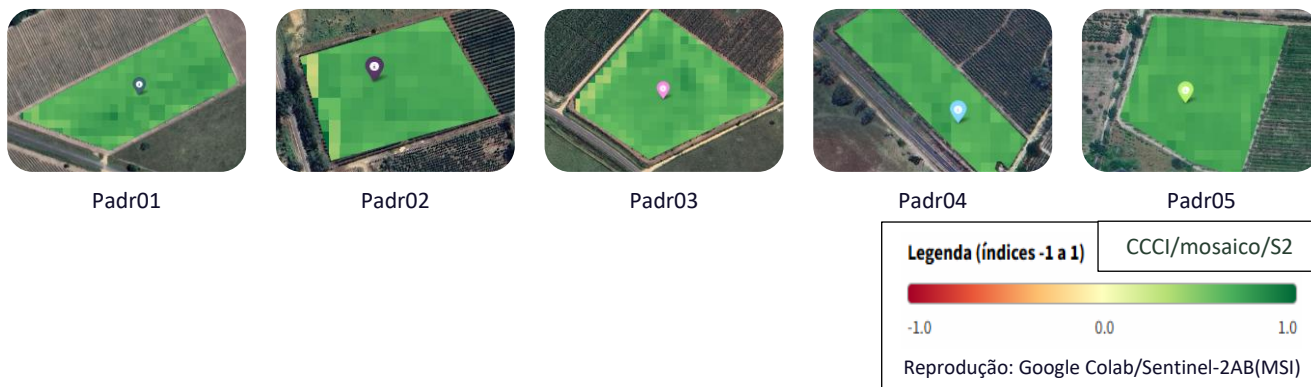
Desenvolvimento vegetativo na florada e granação

Os índices de vegetação do Sentinel-2 demonstram nítida divisão entre os talhões. O Padr05 se destaca com 100% de suas medições de NDVI classificadas como "Alto vigor" (média de 0,646), seguido pelo Padr04 com 80% (média de 0,523), indicando excelente capacidade fotossintética.

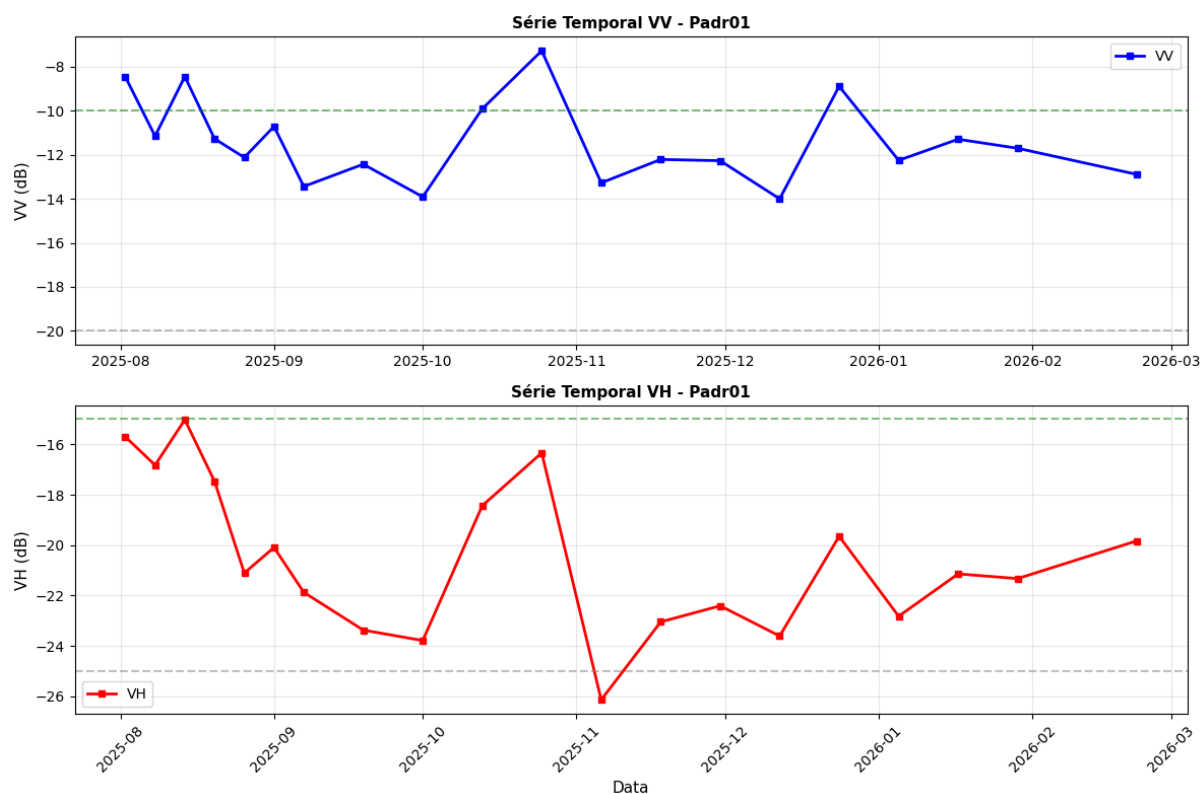
Em contrapartida, 100% das medições de NDVI do Padr01 e Padr03 foram classificadas como "Baixo vigor", com médias de apenas 0,199 e 0,240, revelando cenário preocupante para sustentar a demanda metabólica da granação.

As séries temporais dos valores médios dos índices espectrais desses dois polígonos mostram semelhança entre si. A maioria dos índices permanece no mesmo patamar na série, havendo recuperação apenas do CCCI, mas ainda assim em nível crítico.

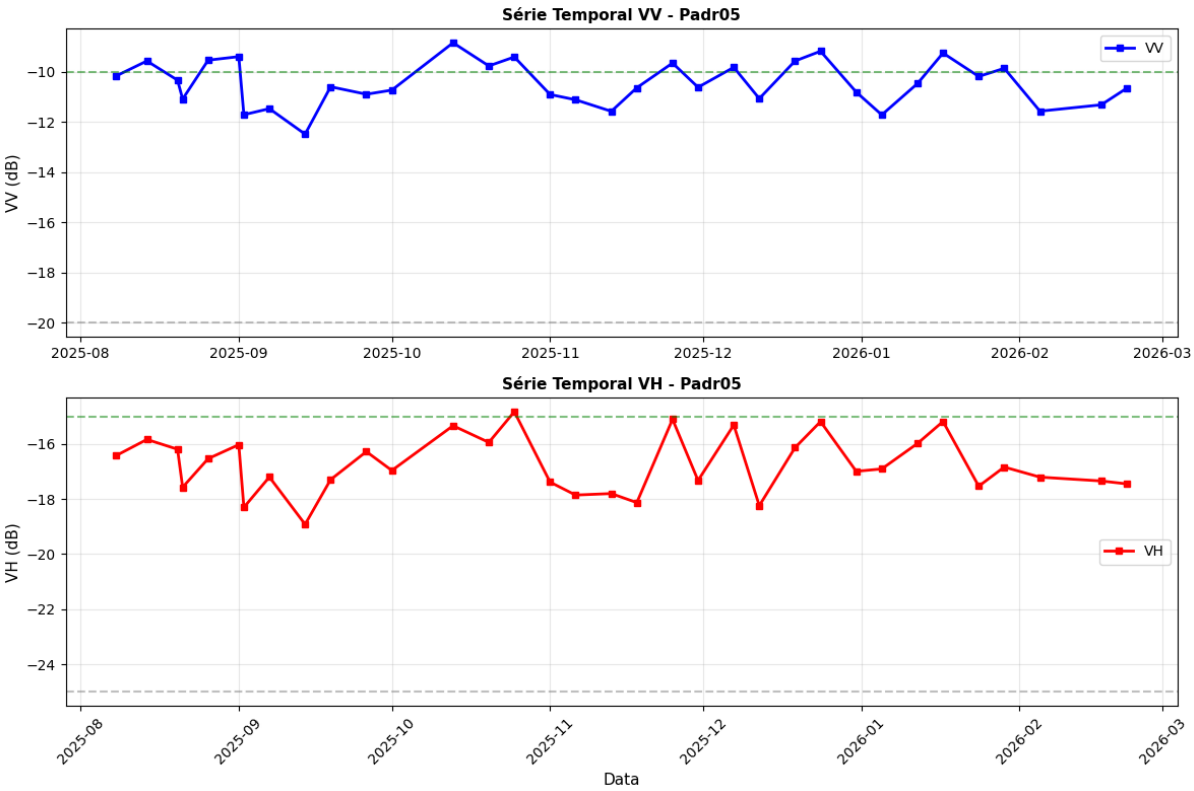
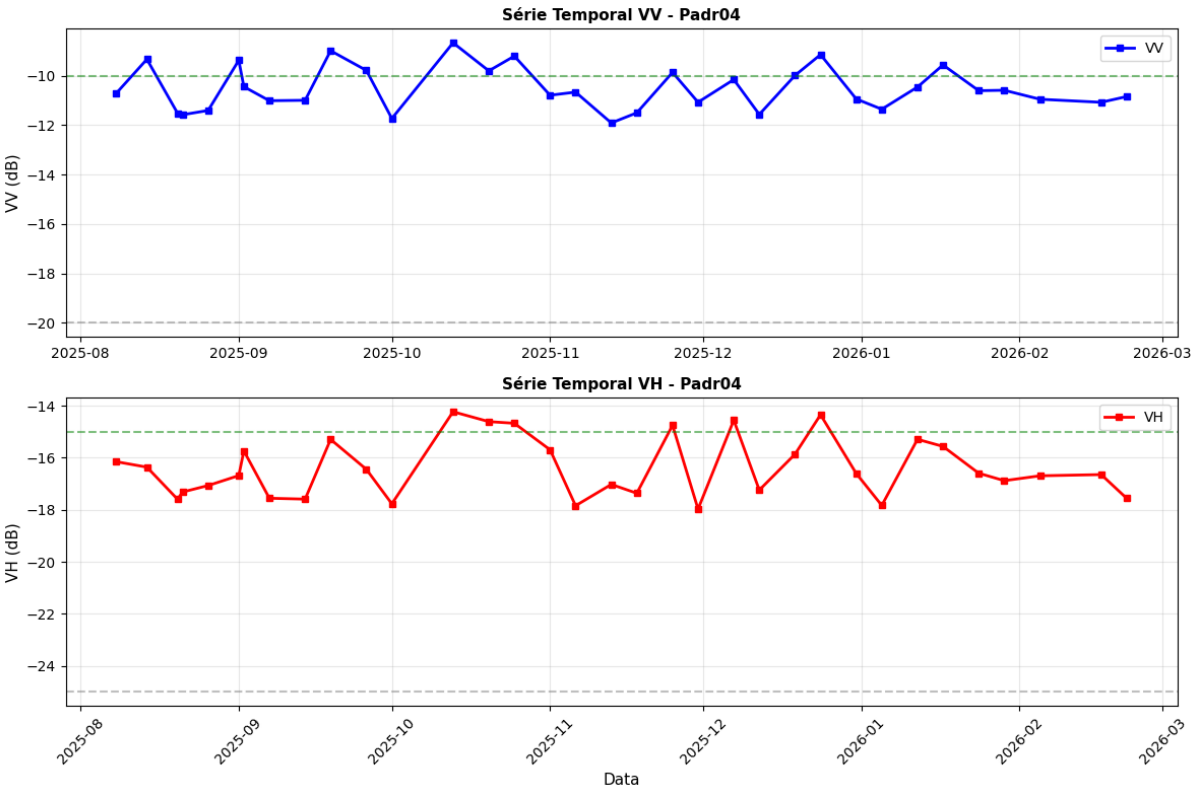




Essa diferença é corroborada pelos dados de radar do Sentinel-1. No Padr01, a estrutura do dossel é a mais frágil, com 55% das medições de VH indicando "Baixo volume vegetativo" e média de VH de -20,50 dB, a mais baixa entre os talhões com dados disponíveis -- Padr02 e Padr03 não registraram dados SAR.



Já nos Padr04 e Padr05, predomina o "Volume vegetativo moderado" (82,4% e 97,1% das medições de VH), com médias de VH em -16,39 dB e -16,76 dB, respectivamente, e uma parcela significativa de "Dossel fechado" (cerca de 33% nas medições de VV), confirmando uma arquitetura vegetal mais estabelecida.



Condição nutricional na fase reprodutiva

A avaliação dos índices sensíveis à clorofila e ao nitrogênio, como GNDVI, NDRE e CCCI, demonstra diferenças marcantes no estado nutricional das áreas. Padr05 apresentou GNDVI médio de 0,644 e NDRE médio de 0,447, com 100% das medições de NDRE classificadas como vigor nutricional moderado ou adequado e 100% das medições de CCCI em vigor nutricional adequado, indicando manutenção da atividade fotossintética e boa relação entre clorofila e biomassa.

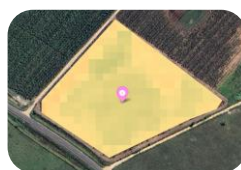
Padr04 apresentou NDRE médio de 0,346, com 80% das medições em vigor moderado ou adequado e 80% das medições de CCCI classificadas como adequadas, sinalizando condição nutricional compatível com a fase reprodutiva. Já Padr02 registrou NDRE médio de 0,342, com 80% das medições em vigor moderado, embora 20% tenham sido classificadas como déficit nutricional, evidenciando variabilidade interna.



Padr01



Padr02



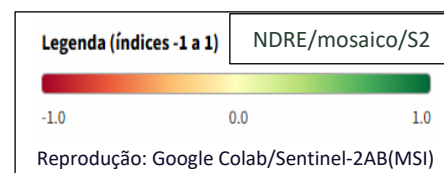
Padr03



Padr04



Padr05



Em contraste, Padr03 apresentou NDRE médio de 0,147, com 80% das medições associadas a risco de início de deficiência nutricional e 100% das medições de CCCI classificadas como estresse nutricional severo. Padr01 apresentou NDRE médio de 0,114, com 50% das medições em déficit nutricional e 100% das medições de CCCI em estresse severo, indicando limitação importante da eficiência fotossintética durante fases críticas de pegamento e enchimento dos frutos.

Condição hídrica

Os índices NDWI, NDMI e NBR evidenciam contrastes relevantes quanto ao status hídrico e possível estresse fisiológico. Padr05 apresentou NDWI médio de -0,644, com 80% das medições classificadas como solo seco e 20% como solo muito seco, enquanto o NDMI médio foi de -0,015, com 100% das medições classificadas como risco de estresse hídrico.

Padr04 apresentou NDWI médio de -0,507, com 80% das medições em solo seco, e NDMI médio de 0,011, com 80% das medições em risco de estresse hídrico, embora com maior equilíbrio estrutural.

O talhão Padr02 registrou NDWI médio de -0,519, com 80% das medições em solo seco, e NDMI médio de -0,014, com 60% das medições em risco de estresse hídrico. Já Padr03 e Padr01 apresentaram NDWI médios de -0,320 e -0,283, respectivamente, com 60% e 66,7% das medições classificadas como solo úmido. Porém, ambos apresentaram NDMI médios negativos, de -0,182 em ambos os casos, com 80% e 83,3% das medições associadas a estresse hídrico moderado, sugerindo que a umidade superficial não necessariamente se traduziu em condição fisiológica plenamente favorável.

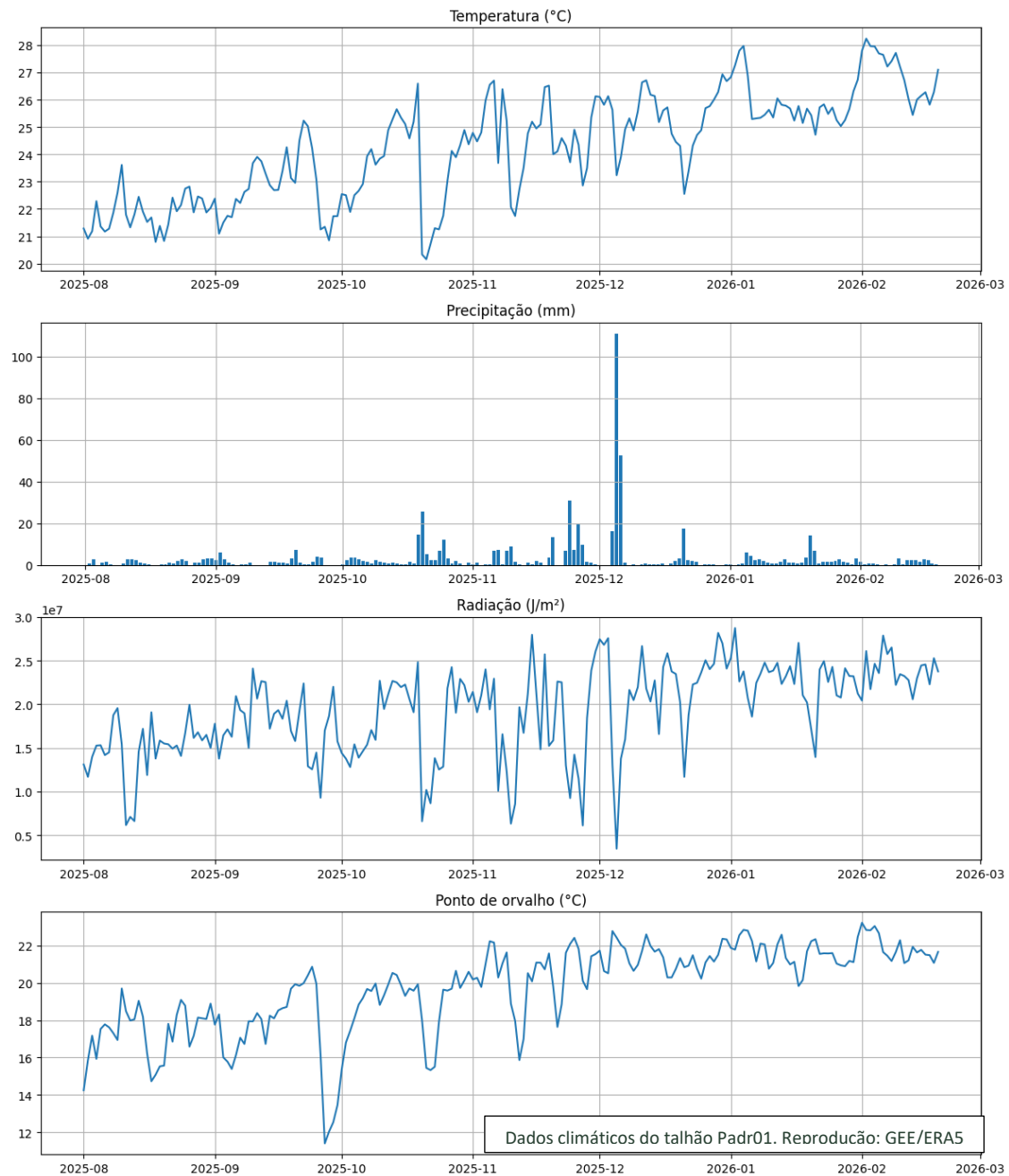
Integração entre clima, fisiologia e resposta espectral

Os dados climáticos do ERA5 foram homogêneos entre os talhões, com precipitação acumulada variando entre 616,4 mm e 625,7 mm e temperatura média em torno de 24,3°C.

Apesar do volume de chuvas, os índices espectrais revelam que o estresse hídrico afetou todas as áreas, embora de formas distintas. Os índices de umidade do solo (NDWI) mostram que 80% das medições nos talhões de maior vigor (Padr02, Padr04, Padr05) indicam "Solo seco". Paradoxalmente, nos talhões com baixo vigor (Padr01 e Padr03), o NDWI aponta majoritariamente para "Solo úmido" (66,7% e 60%), sugerindo que a baixa cobertura vegetal expõe o solo, cuja umidade é detectada pelo sensor, mas não está sendo eficientemente aproveitada pela cultura.

O NDMI, que reflete a umidade na vegetação, é mais elucidativo: 100% das medições do Padr05 e 80% do Padr04 indicam "Risco de estresse hídrico". Nos talhões críticos, Padr01 e Padr03, o NDMI aponta majoritariamente (83,3% e 80%) para "Estresse hídrico moderado".

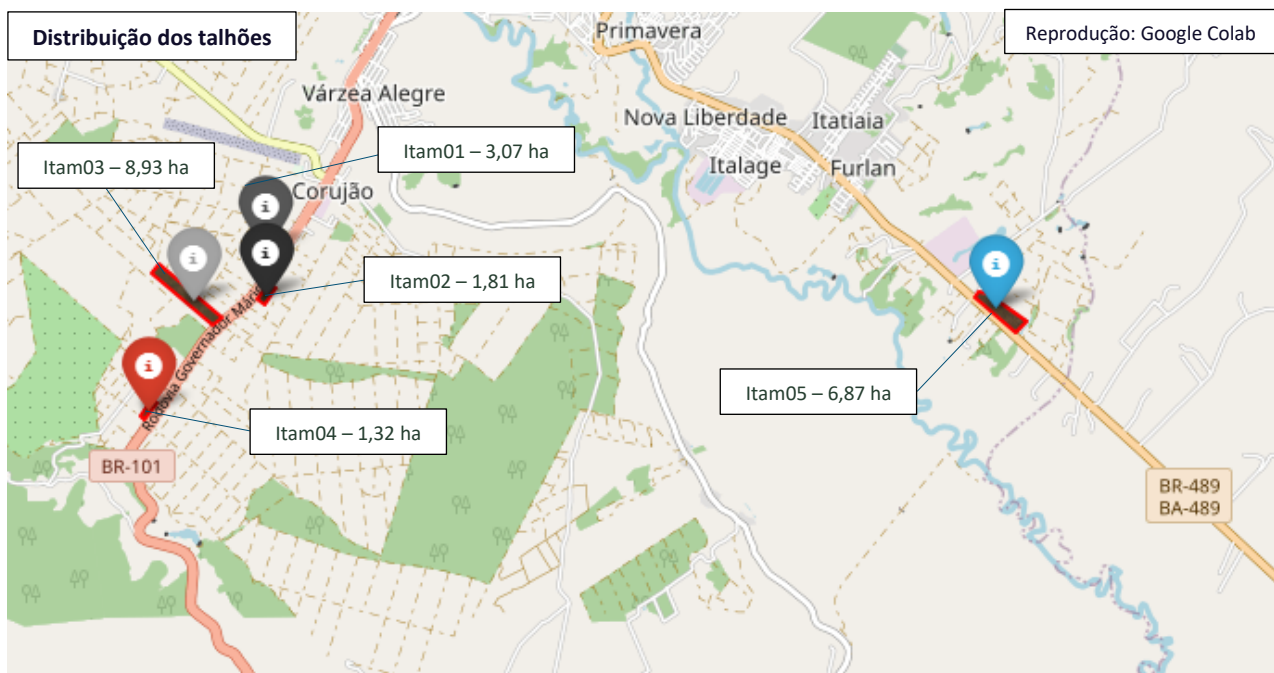
O NBR, sensível à severidade do estresse, classifica 83,3% das medições do Padr01 e 80% do Padr03 como "Vegetação severamente seca / degradada", enquanto nos talhões vigorosos (Padr04 e Padr05) a classificação oscila entre "Estresse moderado" e "Alto risco de secamento". O TWI2, indicador de umidade no dossel, foi classificado como "Condição intermediária" em 100% das medições de todas as áreas, descartando riscos fitossanitários por excesso de umidade na parte aérea.



4. Análise dos talhões da região de Itamaraju

A análise dos cinco talhões de café conilon na região de Itamaraju revela um panorama favorável durante as fases críticas de florada, pegamento, expansão e início da granação. Sob condições climáticas homogêneas, caracterizadas por temperaturas médias entre 24,1°C e 24,2°C, radiação próxima a 19,25 MJ/m² e precipitação acumulada de 618,8 mm a 629,2 mm, as variações de desempenho entre as áreas decorrem primordialmente da resposta estrutural e nutricional de cada lavoura.

Enquanto 80% dos polígonos (Itam01, Itam02, Itam04 e Itam05) apresentaram alto vigor vegetativo e máxima capacidade fotossintética, o talhão Itam03 (20%) exibiu vigor moderado com restrições pontuais. Contudo, os dados indicam que o estresse hídrico foi um fator transversal a todas as áreas, atuando em diferentes intensidades como o principal condicionante do potencial produtivo da região no período avaliado. Para cada área, foram geradas 6 imagens do Sentinel-2AB(MSI) ao ser aplicado filtro de nuvens de 30%.



Os talhões da região de Itamaraju somam 22 hectares.



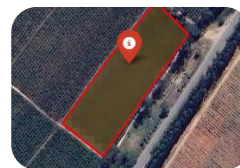
Itam01



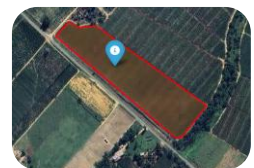
Itam02



Itam03



Itam04



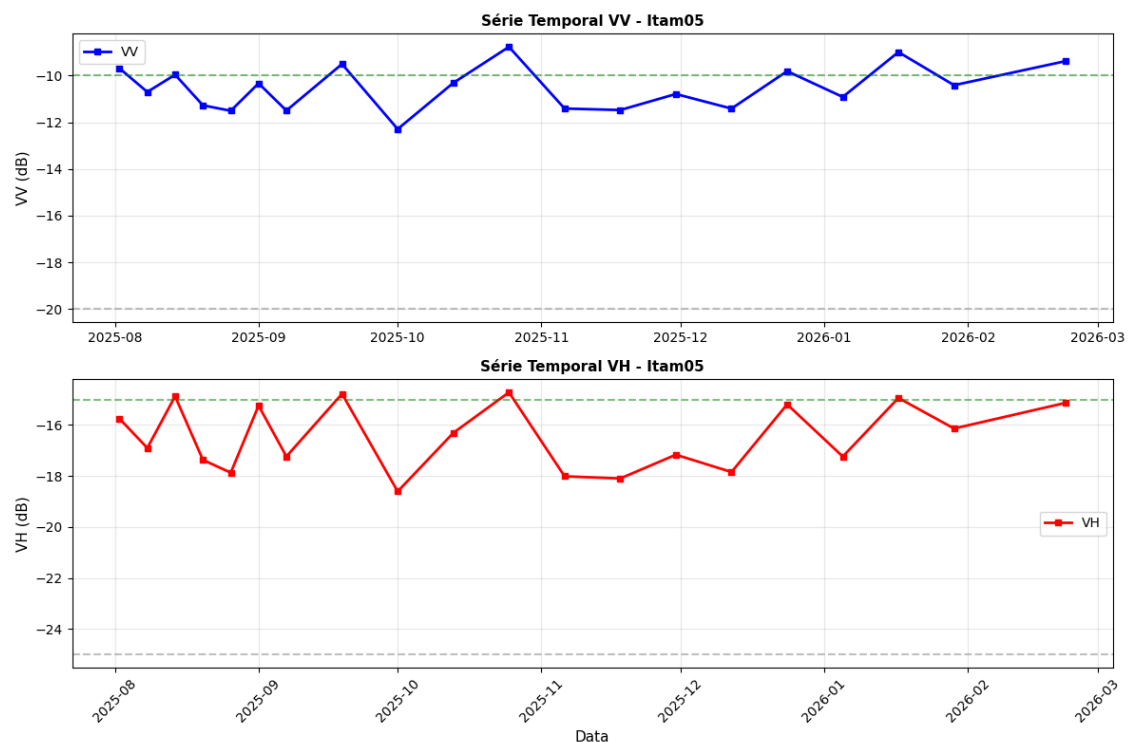
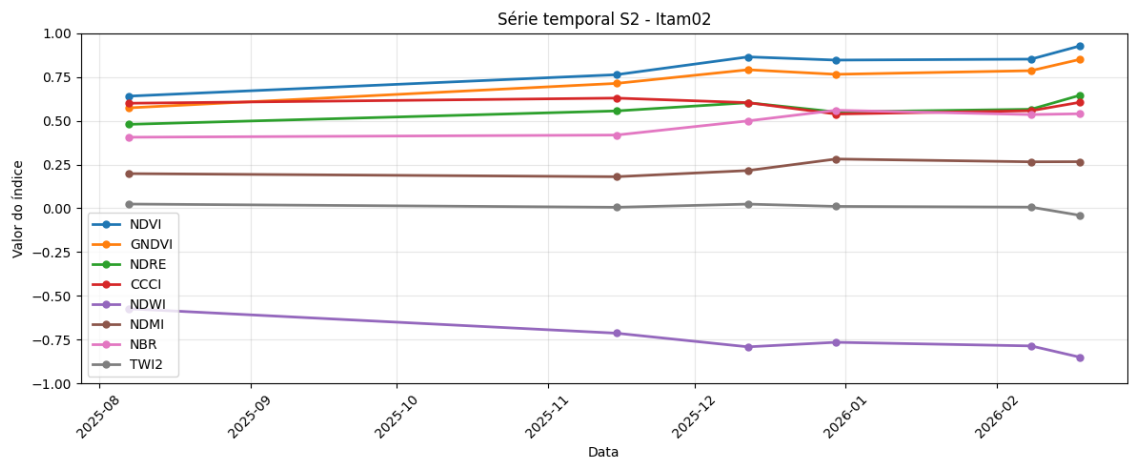
Itam05

Imagens em composição RGB dos polígonos da região de Itamaraju. Reprodução: Google Colab/Sentinel-2AB(MSI)

Desenvolvimento vegetativo e estrutura do dossel

A análise do desenvolvimento vegetativo dos talhões da região de Itamaraju revela disparidades estruturais significativas. O Itam02 consolidou-se como a área de maior performance fisiológica, registrando o NDVI médio mais elevado da região (0,816). Neste polígono, 83,3% das medições indicaram saturação ou vigor máximo.

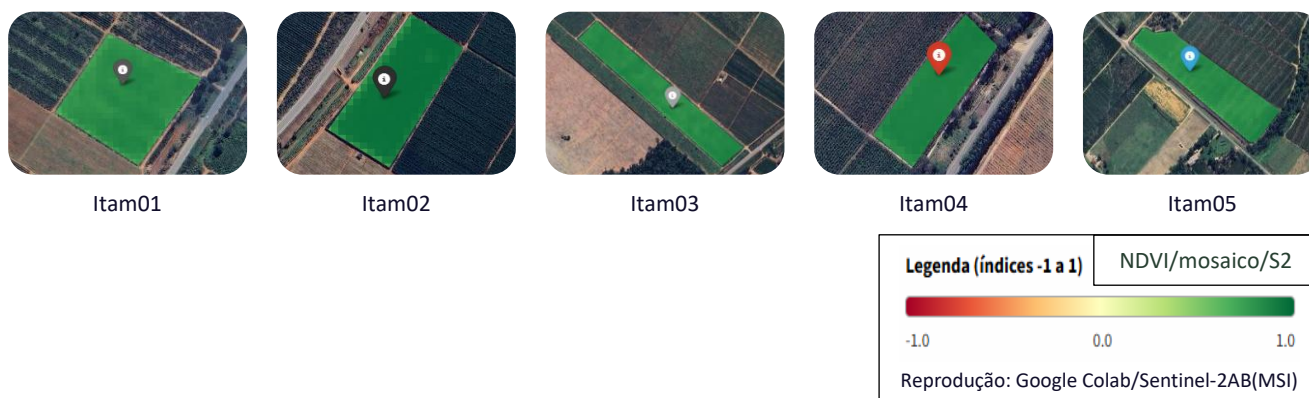
Por outro lado, o Itam04 destaca-se pela maturidade física do dossel, sendo o único a apresentar 100% de suas medições de NDVI em "Alto vigor" (média 0,700), corroborado pelos dados de radar VV, onde 60% das leituras (média -10,09 dB) classificam a área como dossel fechado ou lavoura adulta, sugerindo uma arquitetura de planta mais complexa e desenvolvida.



Em um patamar intermediário de vigor, os talhões Itam01 e Itam05 apresentaram médias de NDVI de 0,618 e 0,610, respectivamente. Enquanto o Itam01 manteve 83,3% das medições em alto vigor, o Itam05 registrou 66,7%, embora este último tenha demonstrado, junto ao Itam02, as maiores proporções de alto volume foliar nas medições de VH (entre 15% e 20%).

Em ambas as áreas, predomina a classificação de dossel em desenvolvimento (65% a 75% das medições VV), com médias entre -10,25 dB e -10,91 dB, evidenciando uma estrutura vegetativa consistente, porém em fase de consolidação.

O cenário mais restritivo foi observado no Itam03, que reportou o menor NDVI médio (0,498) e 16,7% de ocorrência de solo exposto, indicando uma densidade foliar reduzida. Apesar dessas variações, a estabilidade da biomassa aérea é um traço comum na região, com mais de 80% das medições de VH classificadas como volume vegetativo moderado, o que sugere capacidade de suporte necessária para a manutenção do enchimento dos frutos e da maturação nos meses seguintes, até a colheita.



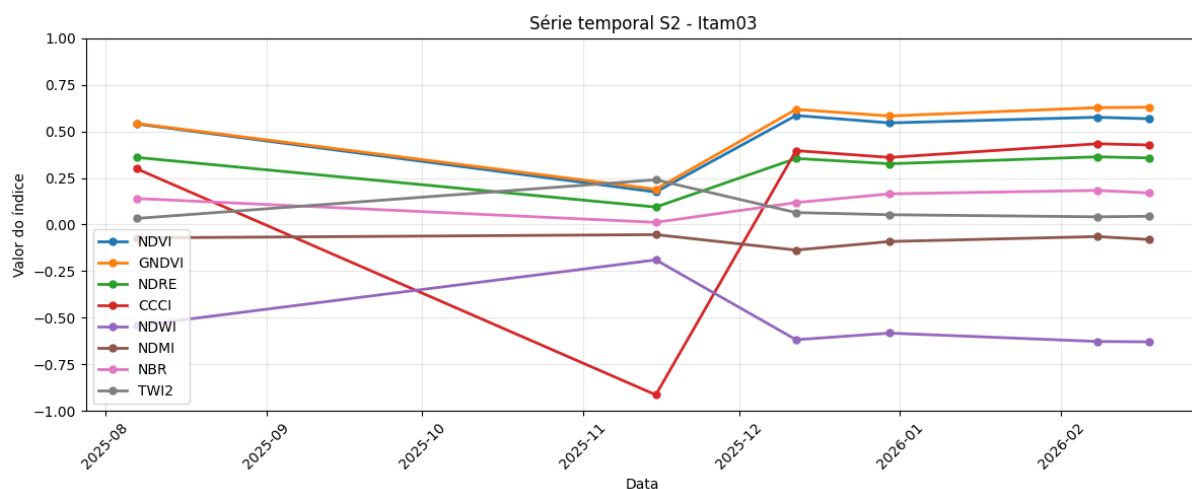
Condição nutricional

A análise do estado nutricional e dos teores de clorofila, fundamentada nos índices NDRE, CCCI e GNDVI, demonstra alta performance produtiva na maior parte da região de Itamaraju, com destaque para o talhão Itam02. Esta área apresentou NDRE médio de 0,567, com 83,3% das medições indicando vigor nutricional adequado ou alta clorofila, além de 66,7% das leituras de CCCI sugerindo possível excesso de nitrogênio ou clorofila muito alta.

Esses indicadores apontam para um dossel intensamente ativo do ponto de vista fotossintético durante a fase de granação. De forma semelhante, o Itam04 manteve 100% de suas medições de CCCI em patamares de vigor adequado, embora com um NDRE médio de 0,471 e 100% das medições classificadas em vigor moderado, evidenciando um equilíbrio nutricional estável.

Os talhões Itam01 e Itam05 demonstram uma condição nutricional predominantemente satisfatória, mas com sinais de saturação ou instabilidade pontual. O Itam01, apesar do NDRE médio de 0,402, apresentou 33,3% das medições de GNDVI em níveis muito altos, sugerindo atenção a possíveis excessos de nitrogênio.

O Itam05 registrou NDRE médio de 0,424, com 50% das medições de GNDVI também em níveis muito altos; no entanto, este talhão apresentou 16,7% das medições de CCCI em risco de estresse nutricional, indicando flutuações na disponibilidade de nutrientes.

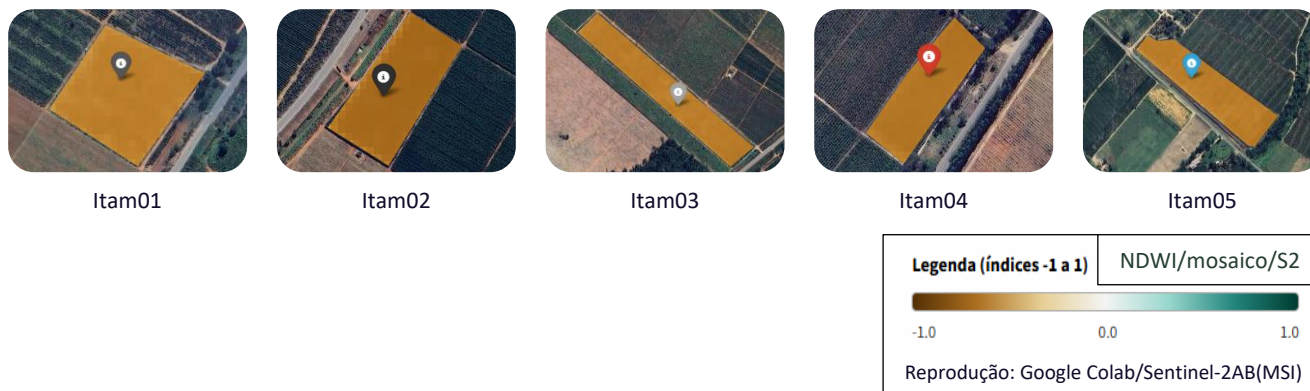


O talhão Itam03 exibe o comportamento mais heterogêneo e restritivo da região, apresentando as menores médias de NDRE (0,310) e CCCI (0,167). Embora 83,3% de sua área apresente vigor nutricional moderado, a ocorrência de 16,7% das medições em estado de estresse nutricional severo confirma uma maior variabilidade interna e uma menor eficiência metabólica em comparação aos demais polígonos. Apesar desse cenário, este talhão se mostra com boa capacidade de recuperação nutricional, tendo certa estabilidade nos índices, de grande importância para a fase de granação.

Condição hídrica

Os dados climáticos provenientes do ERA5 indicam um cenário de relativa homogeneidade meteorológica entre os talhões, com precipitação acumulada variando de 618,8 mm a 629,2 mm e temperatura média estabilizada em torno de 24,2°C. No entanto, apesar do volume pluviométrico expressivo, os índices de umidade revelam que o estresse hídrico se manifestou de forma heterogênea nas lavouras.

O índice de umidade do solo (NDWI) aponta que entre 83,3% e 100% das medições em todas as áreas classificam-se como "Solo seco" ou "Solo muito seco", sugerindo que a água precipitada não permaneceu na camada superficial, sendo rapidamente drenada ou consumida pelas plantas.



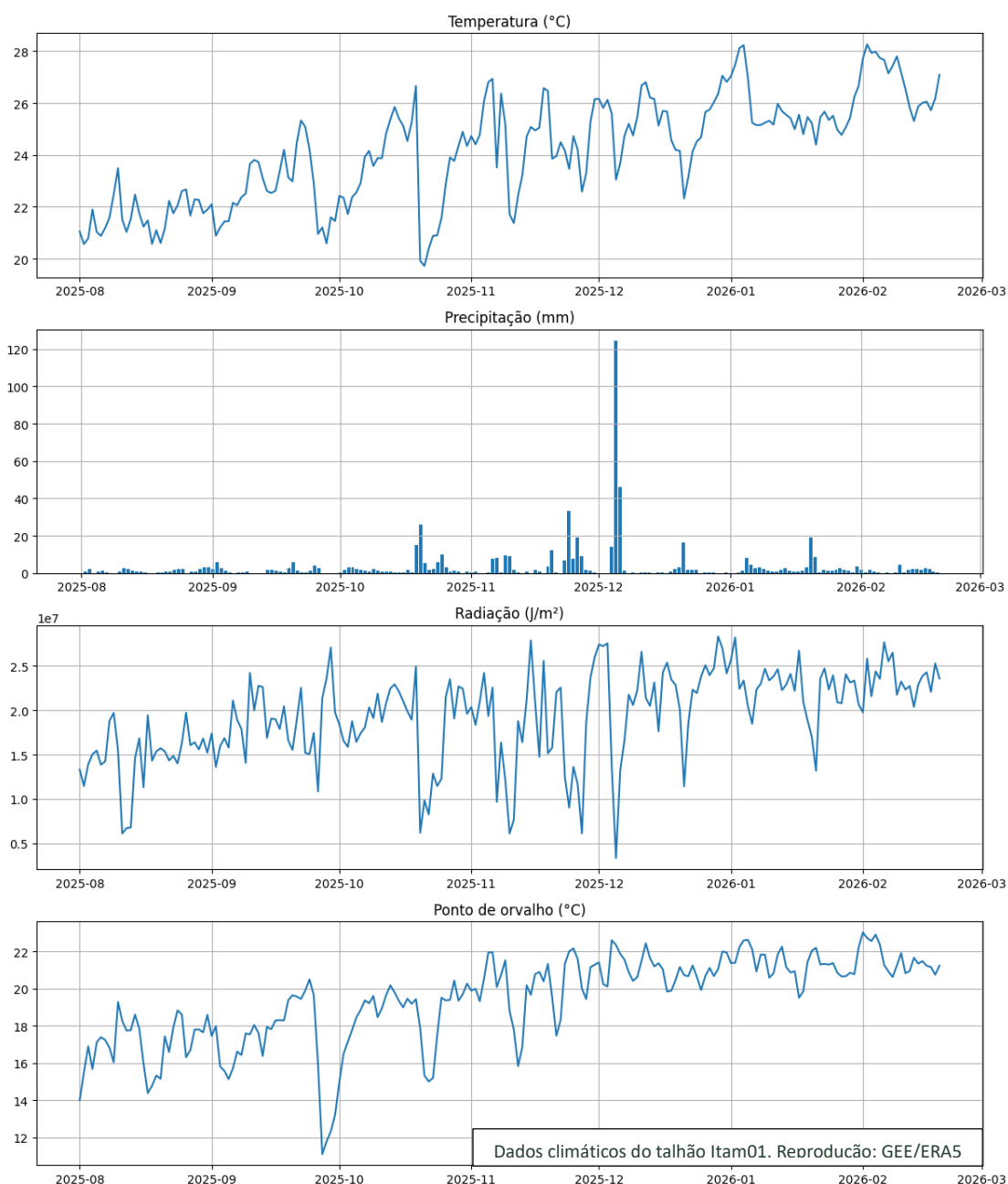
A análise do conforto hídrico na vegetação (NDMI) e da severidade do estresse (NBR) expõe contrastes significativos entre os polígonos. O Itam02 destaca-se pelo equilíbrio hídrico pleno, com 100% de suas medições em condições adequadas tanto para NDMI (média de 0,235) quanto para NBR, o que sustenta seu alto desempenho fisiológico. Em oposição direta, o Itam03 apresenta a maior vulnerabilidade da região durante a fase de enchimento dos frutos, com NDMI médio negativo (-0,083) e 100% das medições de NBR indicando alto risco de estresse hídrico ou secamento.

Os demais talhões ocupam posições intermediárias de estresse. O Itam04 registrou NDMI médio de 0,059, com 66,7% das medições em risco de estresse e 83,3% do NBR em nível moderado. Já os talhões Itam01 e Itam05 apresentaram indicadores mais críticos: o Itam01 registrou NDMI de -0,058, com 33,3% das medições de NBR em alto risco, enquanto o Itam05 manteve 100% de seu NDMI em risco de estresse, embora com 83,3% do NBR classificado como moderado.

O índice TWI2 classificou todas as áreas em "Condição intermediária", o que descarta riscos fitossanitários associados ao excesso de umidade no dossel, confirmando que o principal desafio produtivo da região no período foi a gestão do déficit hídrico, e não o excesso.

Integração entre clima, fisiologia e resposta espectral

A integração dos dados revela que, sob um regime climático uniforme de cerca de 24°C e 620 mm de chuva, a variabilidade produtiva da região é ditada pela capacidade de cada talhão em converter recursos em biomassa e tolerar o estresse hídrico. O Itam02 exemplifica a máxima eficiência fisiológica, pois é o único polígono que consegue sustentar um vigor vegetativo e nutricional de topo (NDVI 0,816) em total equilíbrio hídrico, sem os sinais de secamento observados nas demais áreas. Essa sinergia sugere uma lavoura com sistema radicular ou manejo de solo superior, capaz de manter o conforto metabólico mesmo durante a fase crítica de granação.



Em contraste, o Itam04 demonstra que uma estrutura de dossel fechada e madura não garante imunidade ao estresse; apesar de sua robustez física, o talhão já opera em um patamar de estresse moderado, indicando que sua elevada demanda transpiratória pode estar superando a oferta hídrica atual.

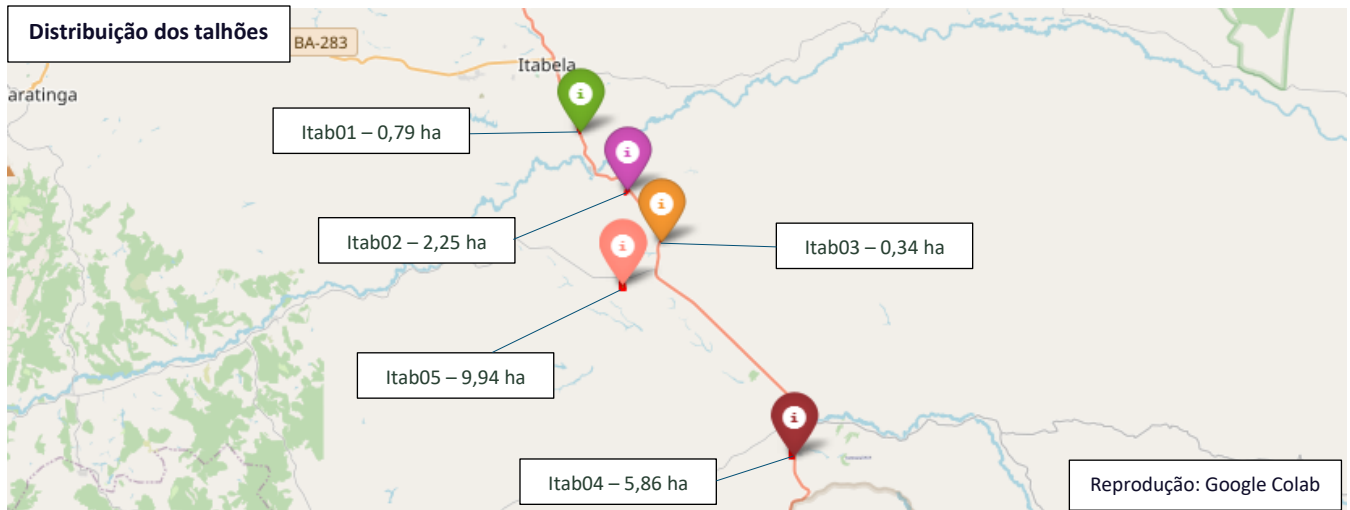
Já os talhões Itam01 e Itam05, embora nutricionalmente estáveis, apresentam um descompasso entre o vigor vegetativo e o suprimento de água, sinalizando um risco de perda de potencial produtivo caso a restrição hídrica se prolongue.

O talhão Itam03 possui uma fragilidade evidenciada pela correlação negativa entre seus baixos índices estruturais e o alto risco de secamento, caracterizando uma área com baixa resiliência e resposta metabólica deficitária frente ao período de maior exigência fisiológica do café conilon.

5. Análise dos talhões da região de Itabela

Nos talhões da região de Itabela, observou-se cenário de desenvolvimento positivo durante as fases de floração e enchimento dos frutos, apesar do clima levemente mais seco e ameno que outras regiões do extremo sul da Bahia. Com temperaturas médias em torno de 23,9°C e chuvas acumuladas entre 535,4 mm e 550,3 mm, o café conilon enfrentou um período de alta demanda de energia, tendo as plantas correspondido bem, conforme os dados ópticos e de radar. Cerca de 80% das áreas (Itab01, 02, 03 e 05) mantiveram alto vigor das folhas e nutrição adequada, demonstrando boa adaptação às condições locais.

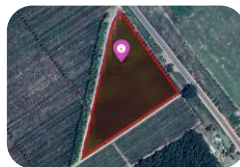
Em contraste, o talhão Itab04 apresentou maior variação interna e pontos de dificuldade no desenvolvimento. Embora a falta de água tenha afetado a região de forma geral, a principal diferença entre os talhões não foi o clima, mas sim a capacidade individual de cada lavoura em manter a hidratação e o vigor sob estresse hídrico, fator que definirá o rendimento final da colheita. Para a análise óptica, com dados do Sentinel-2AB(MSI) foi aplicado filtro de nuvens de 30%, tendo sido disponibilizadas 6 imagens para cada área.



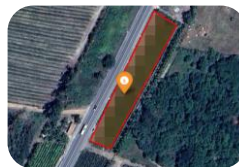
Os talhões da região de Itabela somam 19,18 hectares.



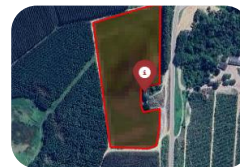
Itab01



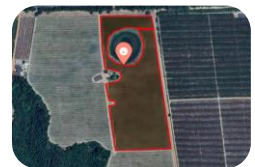
Itab02



Itab03



Itab04

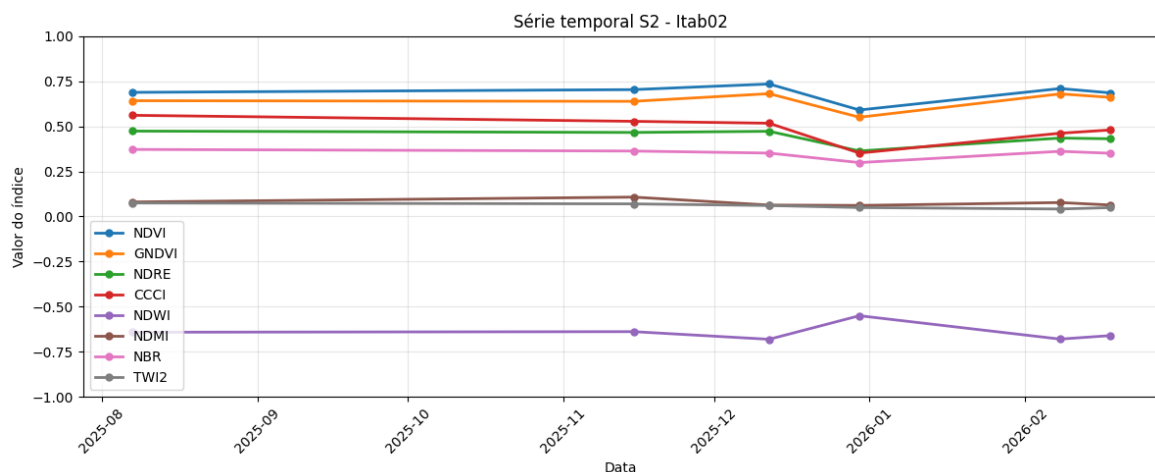


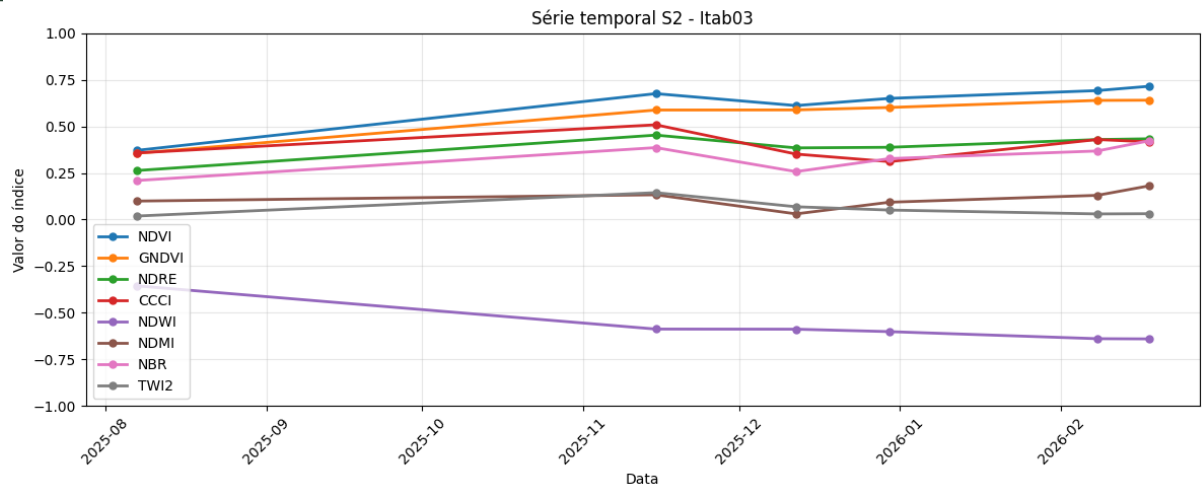
Itab05

Imagens em composição RGB dos polígonos da região de Itabela. Reprodução: Google Colab/Sentinel-2AB(MSI)

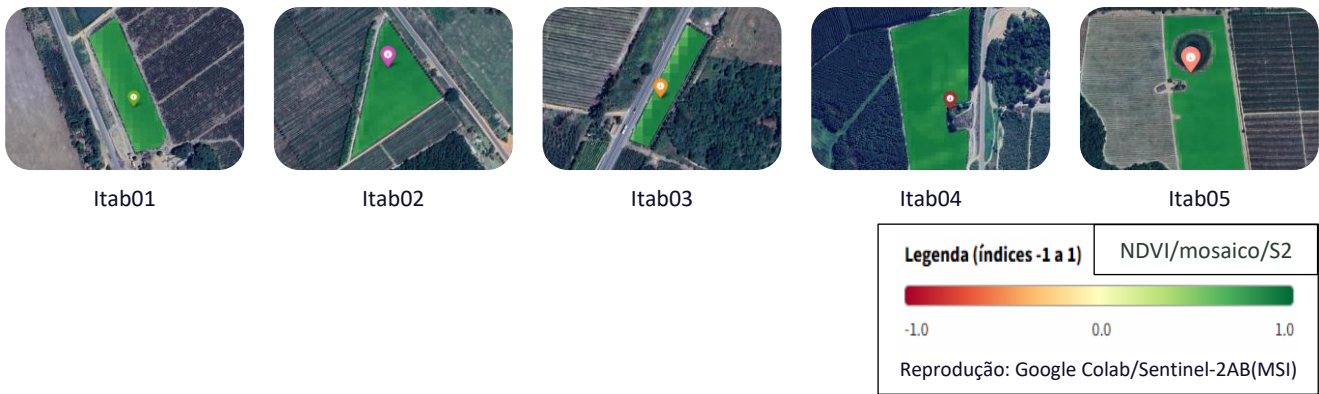
Desenvolvimento vegetativo na florada e granação

A análise do desenvolvimento vegetativo em Itabela demonstra que 80% dos talhões mantiveram NDVI médio acima de 0,60. Os talhões Itab02 e Itab03 lideram em vigor e consolidação: o Itab02 apresenta a maior média de NDVI (0,686), enquanto o Itab03 possui a estrutura física mais amadurecida da região, com 60% de suas medições de radar VV classificadas como dossel fechado ou lavoura adulta (média de -9,83 dB).

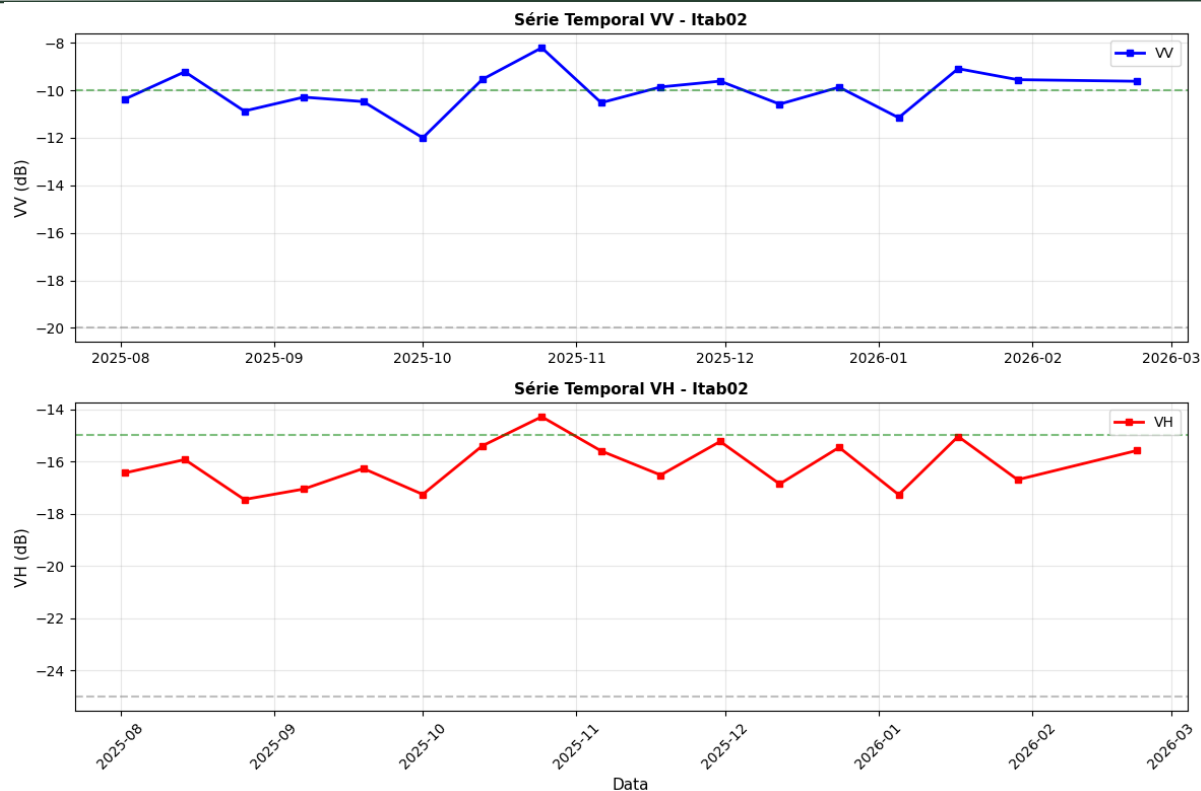




O Itab05 também apresenta destaque, com 66,7% das medições entre alto vigor e vigor máximo, além de registrar o maior acúmulo de biomassa da região, com 25% de alto volume foliar nas medições de VH, o que indica um cafeeiro com grande capacidade de suporte para a granação.



Em um patamar intermediário, o Itab01 exhibe equilíbrio entre vigor alto e moderado, operando com um dossel ainda em desenvolvimento, perfil compartilhado por 65% a 70,6% das medições dos demais talhões menos consolidados. O cenário de maior atenção ocorre no Itab04, que, além de possuir a maior extensão individual (5,86 ha), registrou a menor média de NDVI (0,564) e episódios de baixo vigor em 16,7% da área, indicando uma lavoura com maior desuniformidade estrutural.



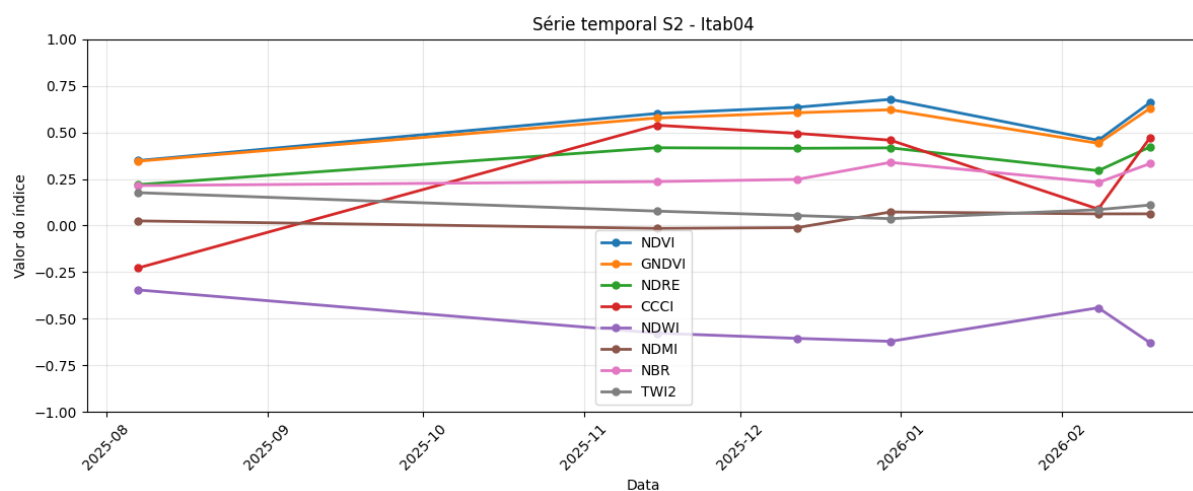
Apesar dessas variações, a manutenção da biomassa aérea foi satisfatória em todo o conjunto, com pelo menos 75% das medições de VH indicando volume vegetativo moderado, garantindo o suporte necessário para o ciclo reprodutivo do conilon.

Condição nutricional

A análise nutricional dos talhões em Itabela indica um estado geral satisfatório durante as fases de reprodução, embora apresente variações importantes na estabilidade metabólica de cada área. Os talhões Itab02 e Itab05 consolidaram-se com os melhores indicadores, registrando médias de NDRE de 0,440 e 0,443 e mantendo 100% das medições de CCCI em patamares de vigor adequado.

No entanto, o Itab02 demanda uma investigação detalhada devido ao fato de 50% de suas medições de GNDVI indicarem níveis muito altos, o que sugere uma possível saturação do dossel ou excesso de aporte nitrogenado. O Itab03 demonstra o cenário mais equilibrado da região, com 100% das medições de CCCI em vigor adequado e 83,3% do NDRE em nível moderado, refletindo uma nutrição constante e sem excessos.

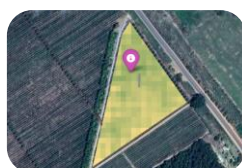
Em contrapartida, os talhões Itab01 e Itab04 manifestam sinais de instabilidade que requerem monitoramento. O Itab01, apesar de manter a maior parte de sua área com vigor adequado, apresentou 33,3% das medições de NDRE com risco de início de deficiência nutricional.



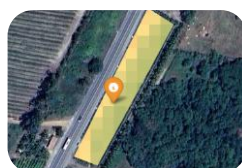
O cenário é mais acentuado no Itab04, que se confirma como o polígono mais heterogêneo da região. Este talhão registrou as menores médias de CCCI (0,304) e NDRE (0,364) do conjunto, com 16,7% das medições classificadas como estresse nutricional severo e outros 16,7% em risco de estresse. Essa desuniformidade fisiológica aponta para limitações nutricionais pontuais que podem comprometer a eficiência da planta durante o período de enchimento dos frutos.



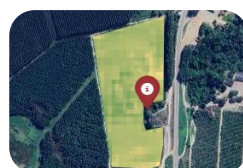
Itab01



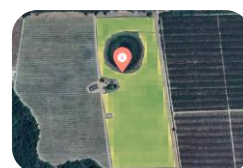
Itab02



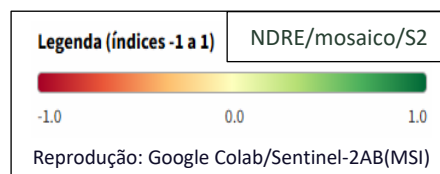
Itab03



Itab04

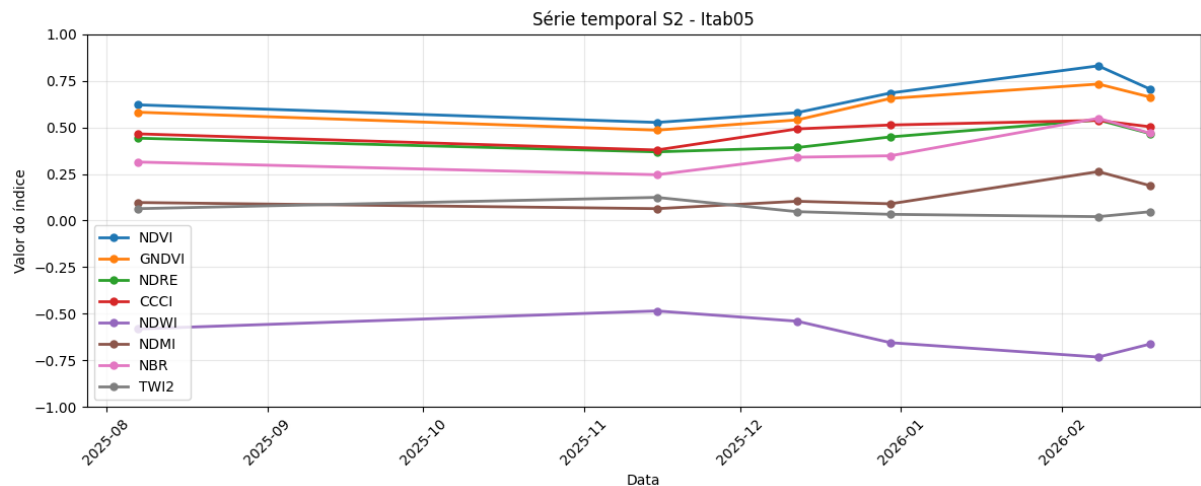


Itab05



Condição hídrica

Os dados climáticos do ERA5 sugerem uma relativa uniformidade entre os talhões de Itabela, com precipitação acumulada entre 535,4 mm e 550,3 mm e temperaturas médias próximas a 23,9°C. Apesar desse volume de chuva, os índices de umidade do solo (NDWI) revelam que entre 66,7% e 100% das medições em todas as áreas apontam para solo seco ou muito seco, sugerindo uma baixa retenção hídrica na camada superficial. Essa restrição manifestou-se de forma variada no conforto hídrico da vegetação, conforme demonstram os índices NDMI e NBR, evidenciando capacidades distintas de cada talhão em lidar com o estresse.



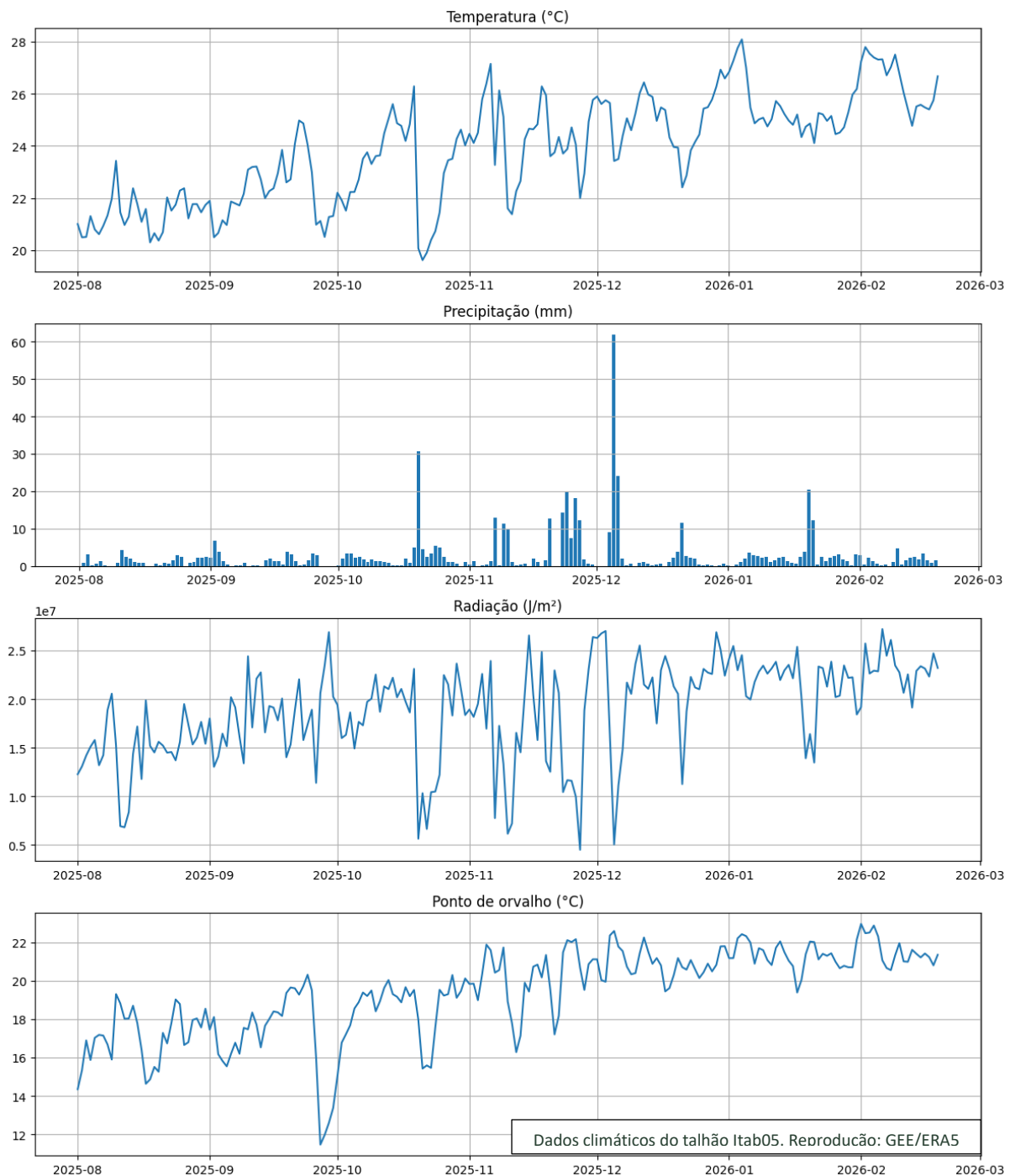
Os talhões Itab03 e Itab05 apresentaram os melhores desempenhos hídricos da região, com 50% de suas medições de NDMI indicando condições adequadas e médias positivas de 0,111 e 0,134, respectivamente. No Itab05, essa maior resiliência é reforçada pelo NBR, que aponta 33,3% da área em condições ideais, enquanto o Itab03 mantém 16,7% nesse patamar. Já o Itab02, embora apresente média de NDMI ainda positiva (0,076), possui 83,3% de suas medições em risco de estresse hídrico e 100% do NBR classificado como estresse moderado, indicando um equilíbrio mais frágil entre a demanda da planta e a oferta de água.

As condições mais críticas foram observadas nos talhões Itab01 e Itab04, onde 100% das medições de NDMI sinalizam risco de estresse hídrico, com médias próximas de zero. No Itab01, a severidade é acentuada pelo NBR, que divide a área igualmente entre estresse moderado e alto risco de secamento. O Itab04, por sua vez, mantém a totalidade de seu NBR em estresse moderado, repetindo o padrão de baixa hidratação foliar. De modo geral, o índice TWI2 classificou todas as áreas em condição intermediária, o que afasta preocupações com excesso de umidade no dossel ou riscos fitossanitários associados, confirmando que o déficit hídrico é o principal limitante fisiológico no período.

Integração entre clima, fisiologia e resposta espectral

Como as variáveis climáticas apresentaram baixa variabilidade entre os talhões, as diferenças espectrais refletem principalmente a capacidade de cada área em converter a disponibilidade hídrica e energética em crescimento vegetativo e estabilidade fisiológica. Itab02 combina NDVI elevado, NDRE consistente e maior proporção de dossel fechado no radar, mesmo sob 100,0% das medições de NDWI classificadas como solo seco, indicando estrutura radicular e fisiológica capaz de sustentar a granação. Itab03 apresenta dossel estruturalmente consolidado e NDMI positivo médio de 0,111, evidenciando melhor equilíbrio hídrico relativo.

Itab05 demonstra boa integração entre vigor estrutural e condição nutricional, com NDMI médio de 0,134 e 50,0% das medições em condição hídrica adequada.

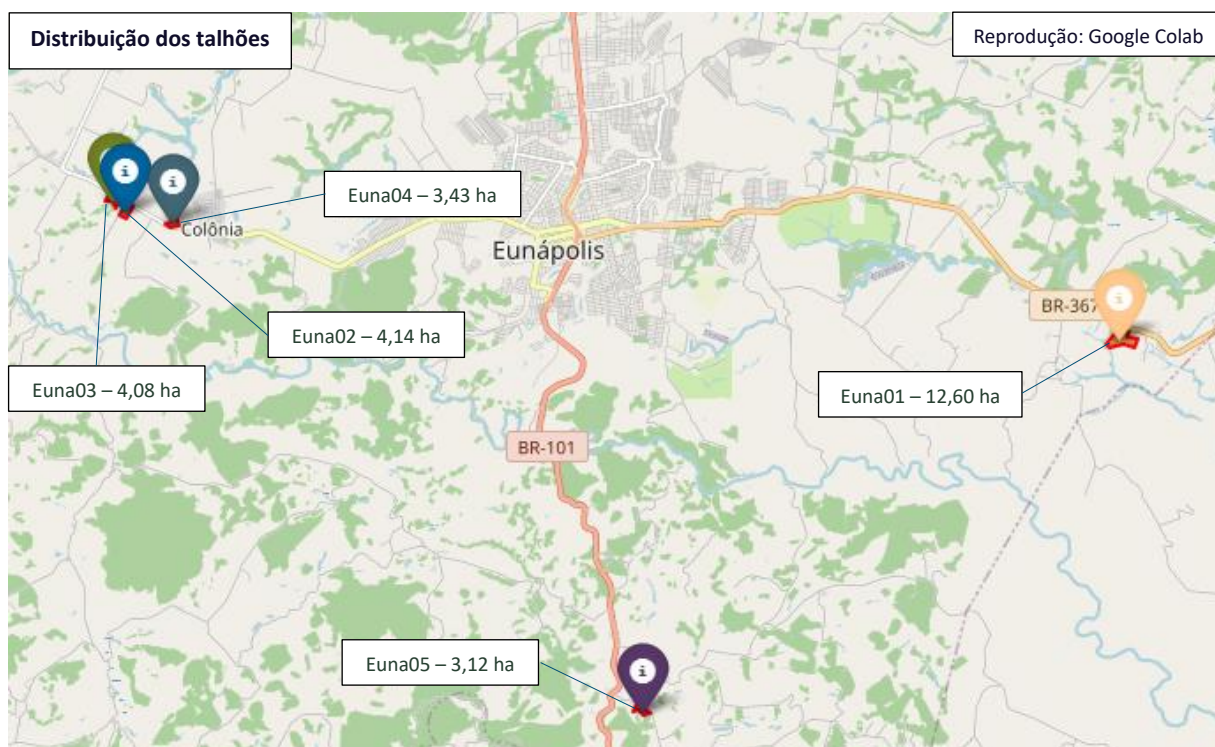


Em contraste, Itab01 e Itab04 apresentam NDMI médios próximos de zero e 100,0% das medições classificadas como risco de estresse hídrico, associados a maior variabilidade nutricional e estrutural, indicando áreas mais sensíveis durante o enchimento dos frutos. Dessa forma, mesmo sob regime climático semelhante, a resposta espectral evidencia diferenças na eficiência fisiológica e na capacidade de sustentação do potencial produtivo ao longo das fases mais exigentes do ciclo do conilon.

6. Análise dos talhões da região de Eunápolis

Os talhões de café conilon em Eunápolis apresentaram na análise desempenho heterogêneo durante as fases de florada, pegamento e granação. Sob condições climáticas estáveis, com médias de 23,7°C e chuvas em torno de 535 mm, as variações espectrais e de radar indicam que fatores de manejo e fertilidade local foram decisivos. Enquanto 40% das áreas (Euna04 e Euna05) sustentaram maior vigor vegetativo (NDVI até 0,547) e nutrição adequada (CCCI positivo), os demais 60% (Euna01, Euna02 e Euna03) apresentaram biomassa reduzida e risco de estresse nutricional severo, o que pode comprometer o peso final dos frutos.

Embora os dados de radar confirmem que todas as lavouras possuem dossel em desenvolvimento, os talhões Euna04 e Euna02 destacam-se por estruturas mais robustas e maior volume foliar. No aspecto hídrico, apesar da umidade moderada no solo em 70% das medições, os índices NDMI e NBR apontaram risco de estresse em 80% das áreas, sugerindo que a restrição hídrica interna foi um limitante adicional. A ausência de excesso de umidade no dossel (TWI2) descarta riscos fitossanitários, concentrando os desafios produtivos na manutenção da capacidade fotossintética e no equilíbrio nutricional para garantir a uniformidade da granação.



Talhões da região de Eunápolis: 28,37 hectares.



Euna01



Euna02



Euna03



Euna04

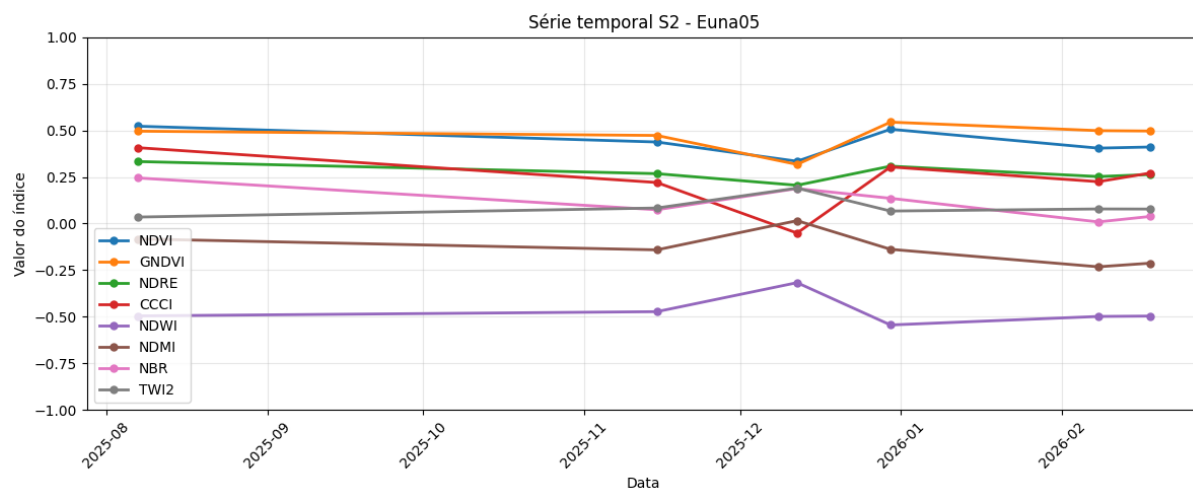
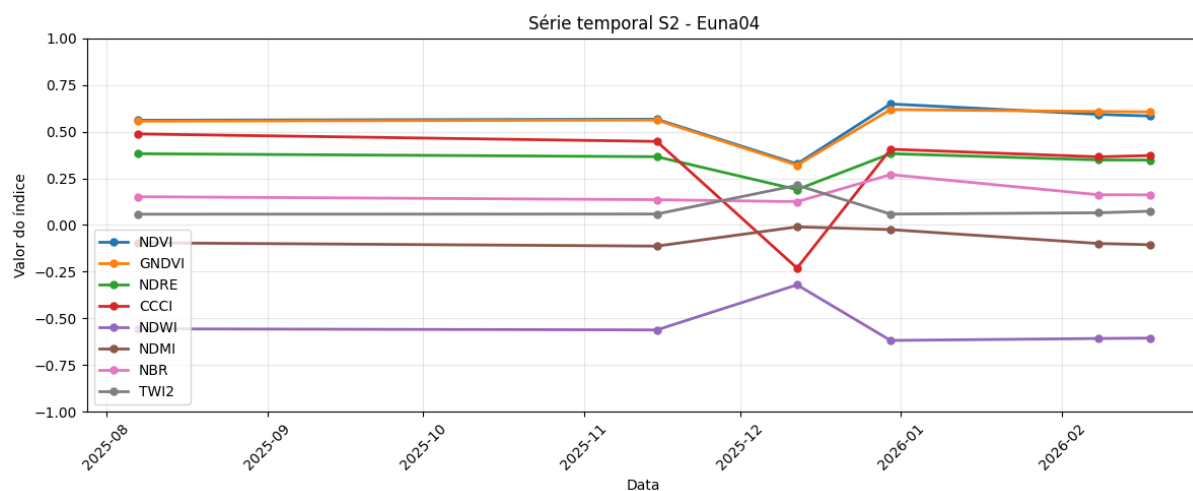


Euna05

Imagens em composição RGB dos polígonos da região de Eunápolis. Reprodução: Google Colab/Sentinel-2AB(MSI)

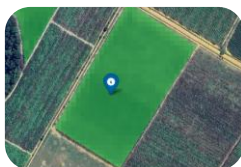
Desenvolvimento vegetativo durante a florada e a granação

Os dados do Sentinel-2 indicam que 60% das áreas analisadas (Euna01, Euna02 e Euna03) apresentaram vigor baixo a moderado, com NDVI médio variando entre 0,246 e 0,342, enquanto 40% das áreas (Euna04 e Euna05) demonstraram vigor moderado a alto, com NDVI médio entre 0,436 e 0,547. Valores mais baixos de NDVI nas áreas Euna01, 02 e 03 indicam menor intensidade fotossintética em um período de elevada demanda metabólica, podendo limitar o suporte ao desenvolvimento reprodutivo.

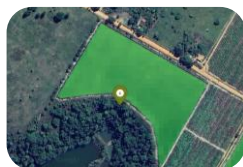




Euna01



Euna02



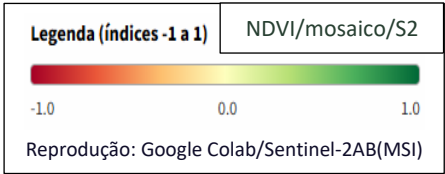
Euna03



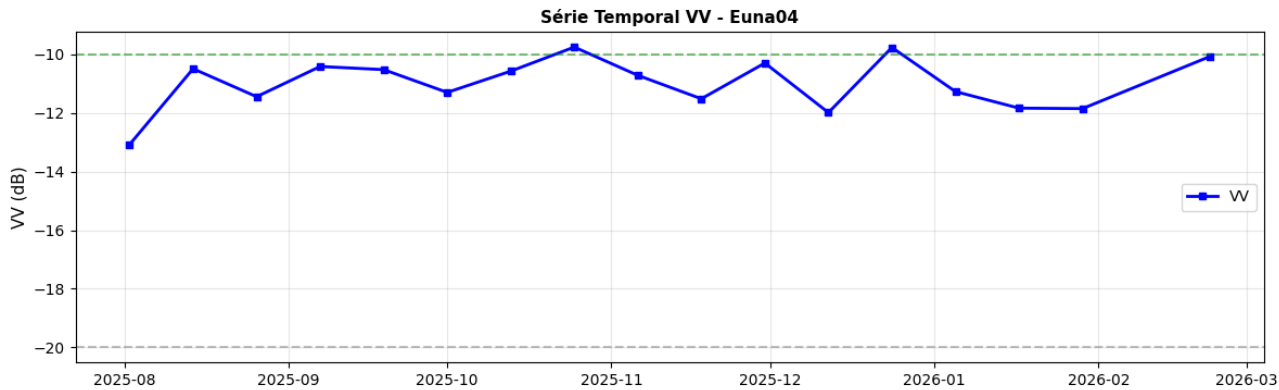
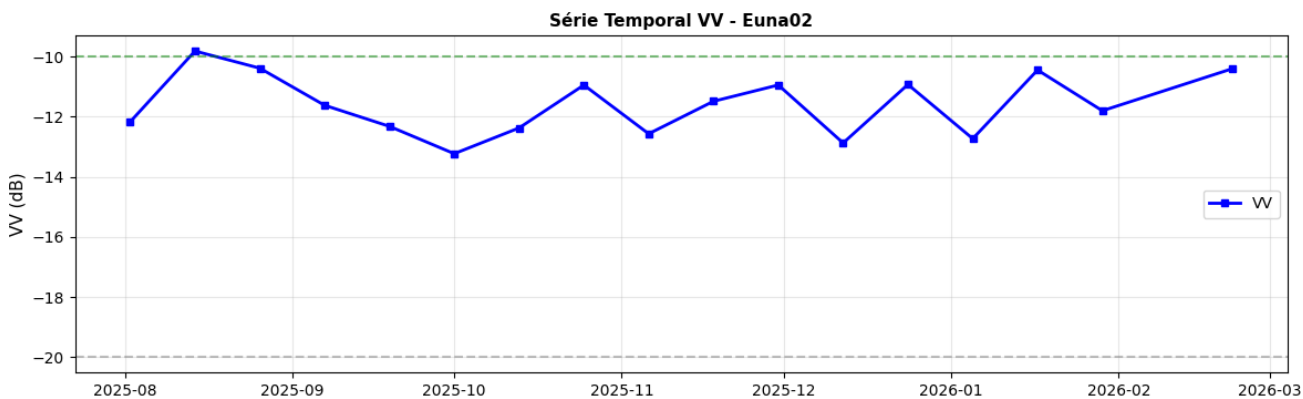
Euna04



Euna05

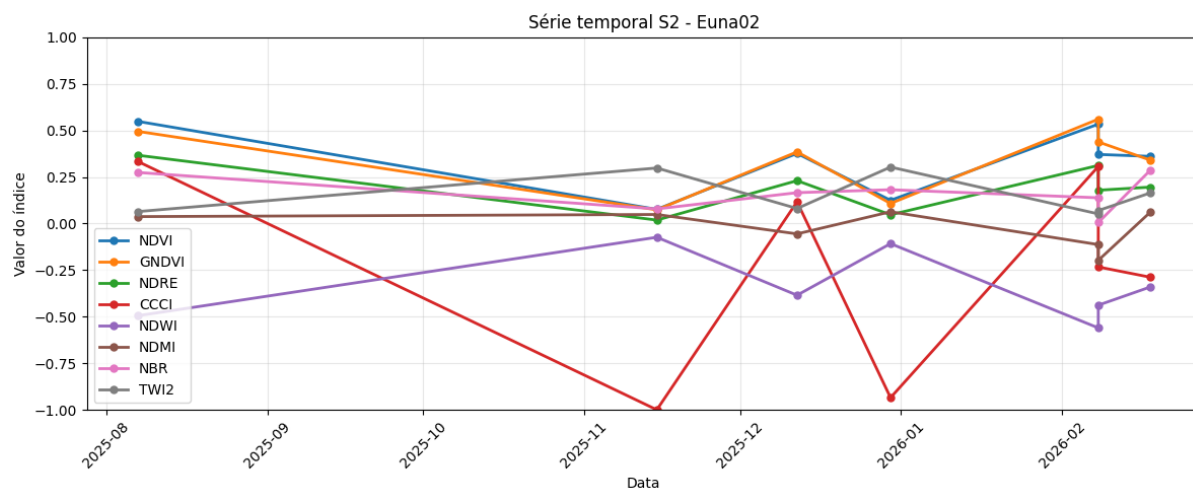
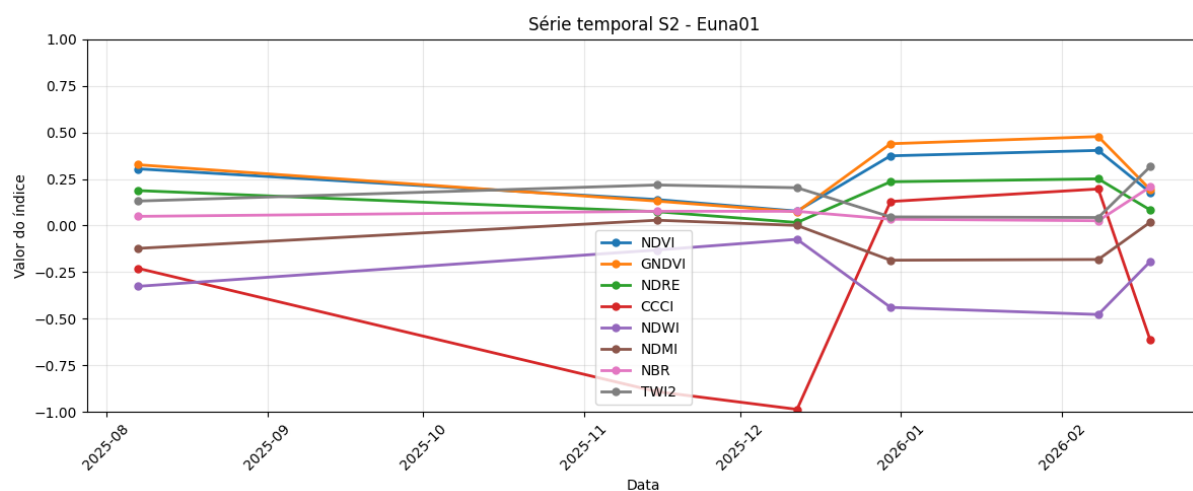


Os dados do Sentinel-1 mostram predominância de dossel em desenvolvimento em 100% das áreas, com médias de VV entre -13,24 dB e -10,99 dB, evidenciando que todas as lavouras possuem estrutura estabelecida, porém com diferenças de biomassa e densidade. Talhões com VV menos negativo, como Euna04 (-10,99 dB) e Euna02 (-11,60 dB), sugerem maior volume vegetativo e estrutura mais robusta, compatível com melhor suporte físico ao enchimento dos frutos.



Condição nutricional na fase reprodutiva

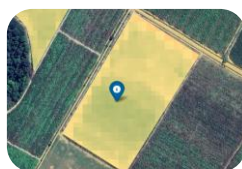
Os índices relacionados ao teor de clorofila e ao estado nutricional indicam contraste relevante entre os talhões. Em 60% das áreas (Euna01, Euna02 e Euna03), predominam classificações associadas a risco de deficiência nutricional ou estresse nutricional, com médias de NDRE entre 0,141 e 0,193 e valores médios de CCCI negativos, chegando a -0,400. Como durante a granação do conilon ocorre intensa formação de endosperma e acúmulo de reservas nos frutos, limitações nutricionais nesse período podem comprometer o enchimento e reduzir o peso final do fruto.



Em contrapartida, 40% das áreas (Euna04 e Euna05) apresentaram NDRE entre 0,272 e 0,336 e CCCI positivo, até 0,308, indicando maior teor de clorofila e melhor atividade fotossintética. Esse comportamento sugere maior equilíbrio nutricional e maior capacidade fisiológica para sustentar o enchimento dos frutos durante a fase crítica do ciclo.



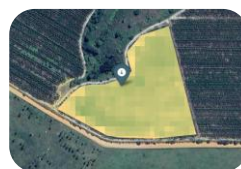
Euna01



Euna02



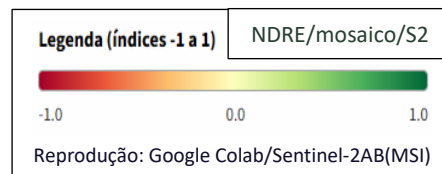
Euna03



Euna04



Euna05



Análises climáticas e respostas espectrais

No período analisado, a precipitação acumulada variou entre 527,9 e 542,0 mm, com temperatura média entre 23,6 e 23,8 °C, condições favoráveis ao desenvolvimento do conilon. O NDWI indicou solo úmido ou umidade moderada em aproximadamente 70% das medições, cenário que favorece o pegamento após a florada e o crescimento inicial dos frutos.

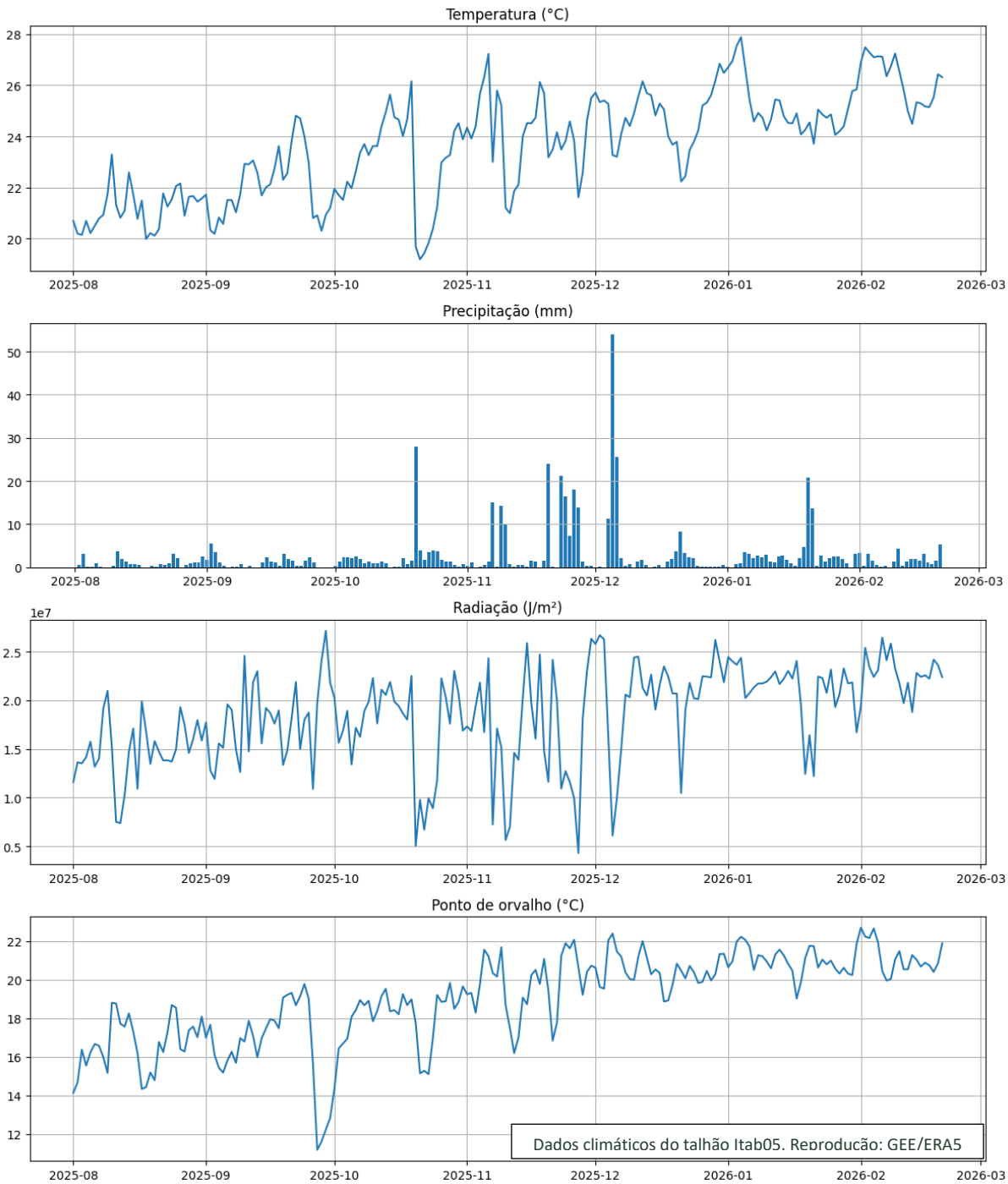
Entretanto, os índices NDMI e NBR apontaram risco de estresse hídrico moderado a alto em 80% das áreas (Euna01, Euna02, Euna03 e Euna05), com NBR médio variando entre 0,078 e 0,182. Durante a fase de enchimento, restrições hídricas podem reduzir a taxa de crescimento dos frutos e comprometer sua uniformidade.

O TWI2 foi classificado majoritariamente como condição intermediária em 100% das áreas, indicando ausência de excesso hídrico persistente no dossel e baixo risco fitossanitário associado à umidade excessiva, mas também ausência de excedente hídrico expressivo durante a granação.

Integração entre clima, fisiologia e resposta espectral

Como os dados climáticos foram relativamente homogêneos entre os talhões, as diferenças observadas nos índices espectrais e radar indicam influência predominante de fatores locais, como manejo, fertilidade do solo e histórico produtivo das áreas.

Durante o período de florada, pegamento e enchimento, Euna04 e Euna05 apresentaram combinação de maior vigor vegetativo, melhor condição nutricional e estrutura de dossel mais consistente, enquanto Euna01, Euna02 e Euna03 demonstraram maior frequência de limitações nutricionais e indícios de restrição hídrica.



7. Análise geral do potencial produtivo no extremo sul da Bahia

De forma consolidada, as áreas avaliadas no extremo sul da Bahia apresentam base produtiva estruturalmente favorável, com predominância de dossel estabelecido, biomassa adequada e, em parte significativa dos talhões, bom equilíbrio nutricional durante florada, pegamento e granação.

O fator mais recorrente e determinante em todas as regiões foi a restrição hídrica moderada durante o enchimento dos frutos. Mesmo sob volumes acumulados de chuva relativamente expressivos, os índices de umidade indicaram solo superficial seco e risco de estresse hídrico em grande parte das áreas, evidenciando que a diferença produtiva não foi climática, mas sim relacionada à capacidade fisiológica de cada talhão em manter hidratação foliar, eficiência radicular e equilíbrio nutricional sob déficit.

Principais destaques:

- **Itamaraju e Itabela** concentram os talhões mais equilibrados estrutural e fisiologicamente, com maior proporção de áreas de alto potencial produtivo;
- **Teixeira de Freitas** apresenta bom potencial estrutural, porém condicionado à limitação hídrica recorrente;
- **Porto Seguro e Prado** mostram maior heterogeneidade interna, com contraste acentuado entre áreas de alto e baixo desempenho;
- **Eunápolis** apresenta o cenário mais restritivo, com predominância de limitações nutricionais associadas ao estresse hídrico.

Neste contexto, o extremo sul da Bahia demonstra **potencial produtivo global moderado a alto**, porém fortemente dependente da eficiência de manejo hídrico e nutricional durante a fase de granação.

Tabela comparativa: áreas com maior e menor potencial produtivo

MUNICÍPIO	MAIOR POTENCIAL PRODUTIVO	FATORES POSITIVOS	MENOR POTENCIAL PRODUTIVO	FATORES LIMITANTES
TEIXEIRA DE FREITAS	Texe02, Texe03	Alto vigor (NDVI), boa uniformidade de dossel, equilíbrio nutricional	Texe01, Texe04	Heterogeneidade estrutural, estresse hídrico recorrente
PORTO SEGURO	Port02 (principal), Port01	Alto vigor, boa estrutura de dossel, nutrição estável	Port03, Port05	Baixo vigor, estresse nutricional severo, limitação hídrica
PRADO	Padr05, Padr04	Alto NDVI, dossel consolidado, nutrição adequada	Padr01, Padr03	Baixo vigor estrutural, deficiência nutricional, estresse hídrico severo
ITAMARAJU	Itam02 (destaque regional), Itam04	Vigor máximo, alto NDRE, equilíbrio hídrico (Itam02)	Itam03	Baixa densidade foliar, deficiência nutricional, alto risco de secamento
ITABELA	Itab02, Itab03, Itab05	Boa biomassa, NDMI positivo, nutrição estável	Itab04	Desuniformidade estrutural, instabilidade nutricional, risco hídrico elevado
EUNÁPOLIS	Euna04, Euna05	Melhor NDVI regional, CCCl positivo, estrutura mais robusta	Euna01, Euna03	NDRE muito baixo, estresse nutricional severo, restrição hídrica

Referências

BELAN, Leônidas Leoni; SILVA, Kmila Gomes; TOMAZ, Marcelo Antônio; JESUS JUNIOR, Waldir Cintra; AMARAL, José Augusto Teixeira do; AMARAL, José Francisco Teixeira do. Aspectos fisiológicos do cafeeiro conilon: uma abordagem sistemática. *Nucleus*, v. 8, n. 1, p. 225–240, abr. 2011. DOI: 10.3738/1982.2278.551.

Fagundes et al. (2025). Red-Edge Spectral Indices for Nitrogen Mapping in Coffee Crops Using Sentinel-2 Imagery. *Geomatics* 2025, 5(2), 19; Disponível em: <https://doi.org/10.3390/geomatics5020019>.

FAGUNDES, Rozymario Bittencourt. Sensoriamento remoto e redes neurais na estimativa da produtividade do café arábica na Bahia. 2025. Dissertação (Mestrado em Agricultura de Precisão) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 19 mar. 2025. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/35196>.

MANOEL, M. C. et al. Integração de imagens multissensores (Sentinel-1, Sentinel-2 e Landsat 8) na classificação de áreas cafeeiras. *Revista da ANPEGE*, Dourados, 2025. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/anpege/article/view/19756>.

MASKELL, G. et al. Integration of Sentinel optical and radar data for mapping coffee production systems. *Remote Sensing of Environment*, v. 264, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425721004296>.

TOLENTINO, F. M. et al. Potencial de séries temporais de atributos extraídos de imagens SAR/Sentinel-1 na discriminação de cafeeiros. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR), 2023. Anais [...]. Disponível em: <https://proceedings.science/sbsr-2023/trabalhos/potencial-de-series-temporais-de-atributos-extraidos-de-imagens-sarsentinel-1-na?lang=pt-br>.

