



Sensoriamento Remoto

Fundamentos e Aplicações em Agricultura de Precisão

Sensoriamento Remoto Aplicado à Agricultura de Precisão

Uma Abordagem Técnica e Prática

PROGRAMA

Mestrado/Doutorado em Produção Vegetal

DISCIPLINA

Tecnologias Digitais na Agricultura

CONTEÚDO

Fundamentos Físicos • Sensores e Plataformas • Índices de Vegetação •
Processamento de Imagens • Aplicações Práticas

DURAÇÃO

Aula Teórica – 2h

Objetivos da Aula

1

Fundamentos Físicos

Compreender os princípios de radiação eletromagnética, espectro e interação com objetos terrestres.

2

Sensores e Plataformas

Conhecer tipos de sensores remotos, plataformas (satélites, drones) e suas características técnicas.

3

Índices de Vegetação

Dominar cálculo e interpretação de NDVI, EVI, SAVI e outros índices para monitoramento de culturas.

4

Processamento de Imagens

Aplicar técnicas de calibração, correção atmosférica e georreferenciamento de imagens de satélite.

5

Aplicações Práticas

Implementar sensoriamento remoto em agricultura de precisão para tomada de decisão.

6

Análise Crítica

Avaliar limitações, desafios e oportunidades de pesquisa em sensoriamento remoto agrícola.

Contexto Histórico

1970s

Landsat 1 (1972)

Primeiro satélite de observação terrestre dedicado, marcando o início do monitoramento sistemático.

1980s

Expansão Global

Lançamento de múltiplos satélites internacionais (SPOT, IRS) e desenvolvimento de índices de vegetação.

1990s

Revolução Digital

Avanços no processamento computacional de imagens e integração com Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

2000s

Alta Resolução

Surgimento de satélites comerciais com resolução submétrica e popularização do GPS na agricultura.

2010s

Dados Abertos & Drones

Programa Copernicus (Sentinel) e popularização de VANTs (drones) para mapeamento agrícola de precisão.

2020s

IA & Automatização

Machine Learning, análise em tempo real, constelações de nanossatélites e Digital Twins na agricultura.

Aplicação em Agricultura: O sensoriamento remoto evoluiu de uma ferramenta de pesquisa para um componente essencial da Agricultura de Precisão, permitindo o monitoramento contínuo de culturas, mapeamento de variabilidade espacial e otimização de manejo em tempo real.

Radiação Eletromagnética: Conceitos Fundamentais

Definição

A energia eletromagnética é emitida por qualquer corpo que possua temperatura acima do zero absoluto (0 Kelvin). Ela não necessita de um meio material para se propagar, movendo-se na forma de ondas eletromagnéticas.

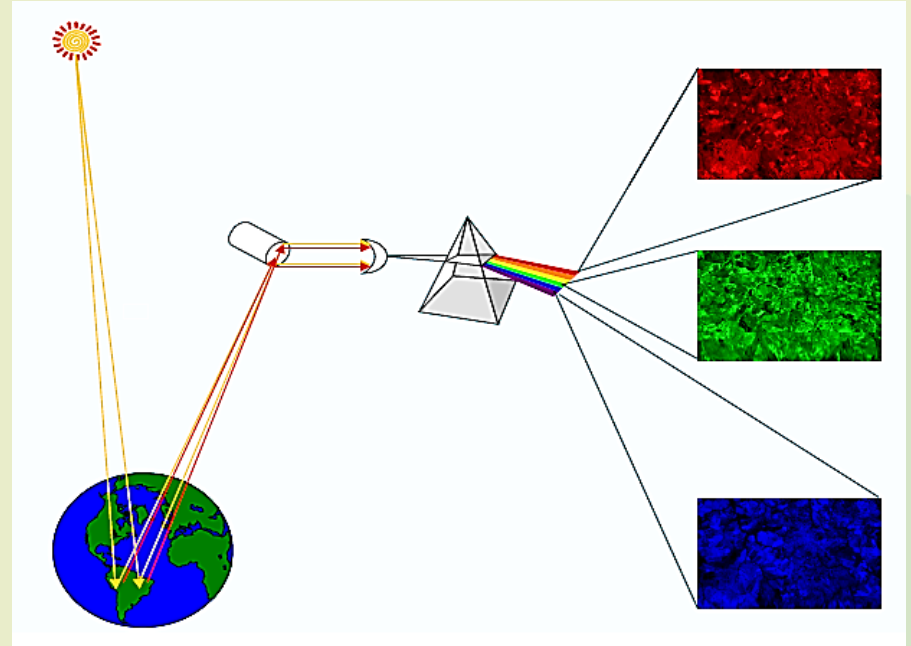
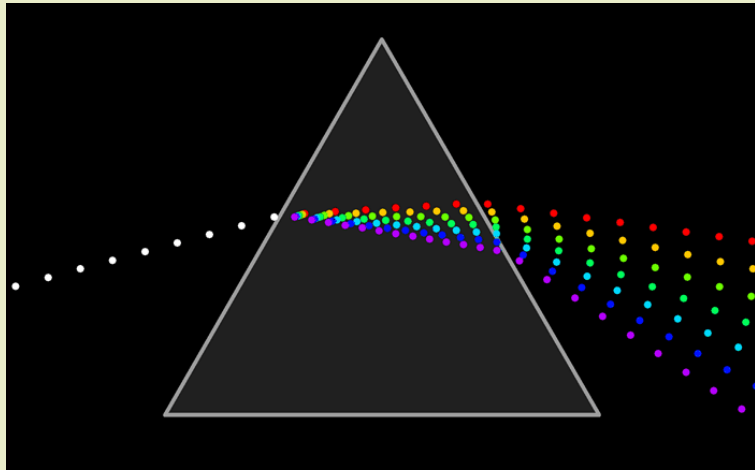
$$c = f \cdot \lambda$$

- c** Velocidade da luz (m/s)
- f** Frequência (Hz ou ciclos/s)
- λ** Comprimento de onda (m)

Velocidade de Propagação

No vácuo, a radiação eletromagnética viaja à velocidade da luz: **$c \approx 300.000 \text{ km/s}$** (ou $3 \times 10^8 \text{ m/s}$). A relação fundamental demonstra que a frequência e o comprimento de onda são inversamente proporcionais.

Radiação Eletromagnética: Conceitos Fundamentais



Energia Eletromagnética e Constante de Planck

FÓRMULA DE PLANCK

$$Q = h \cdot f = h \cdot c / \lambda$$

☰ Variáveis e Unidades

- Q** Energia (Joule - J)
- h** Constante de Planck ($6,625 \times 10^{-34}$ J·s)
- f** Frequência (Hertz - Hz ou ciclos/s)
- c** Velocidade da luz (3×10^8 m/s)
- λ** Comprimento de onda (metros - m)

⚖ Relações Físicas

A energia (Q) é **diretamente proporcional** à frequência (f) e **inversamente proporcional** ao comprimento de onda (λ).

💡 Exemplo Prático: Espectro Visível

Luz Azul ($\lambda \approx 0,45 \mu\text{m}$)

Menor $\lambda \rightarrow$ **Maior Energia**

Luz Vermelha ($\lambda \approx 0,65 \mu\text{m}$)

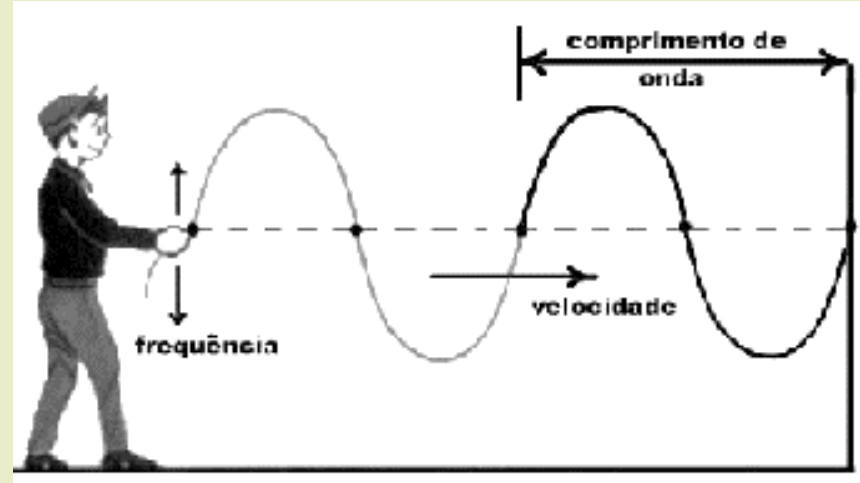
Maior $\lambda \rightarrow$ **Menor Energia**

**Sensores que operam em comprimentos de onda maiores (ex: microondas) detectam fótons com menor energia, exigindo áreas de coleta maiores ou tempos de integração mais longos.*

Energia Eletromagnética e Constante de Planck

FÓRMULA DE PLANCK

$$Q = h \cdot f = h \cdot c / \lambda$$



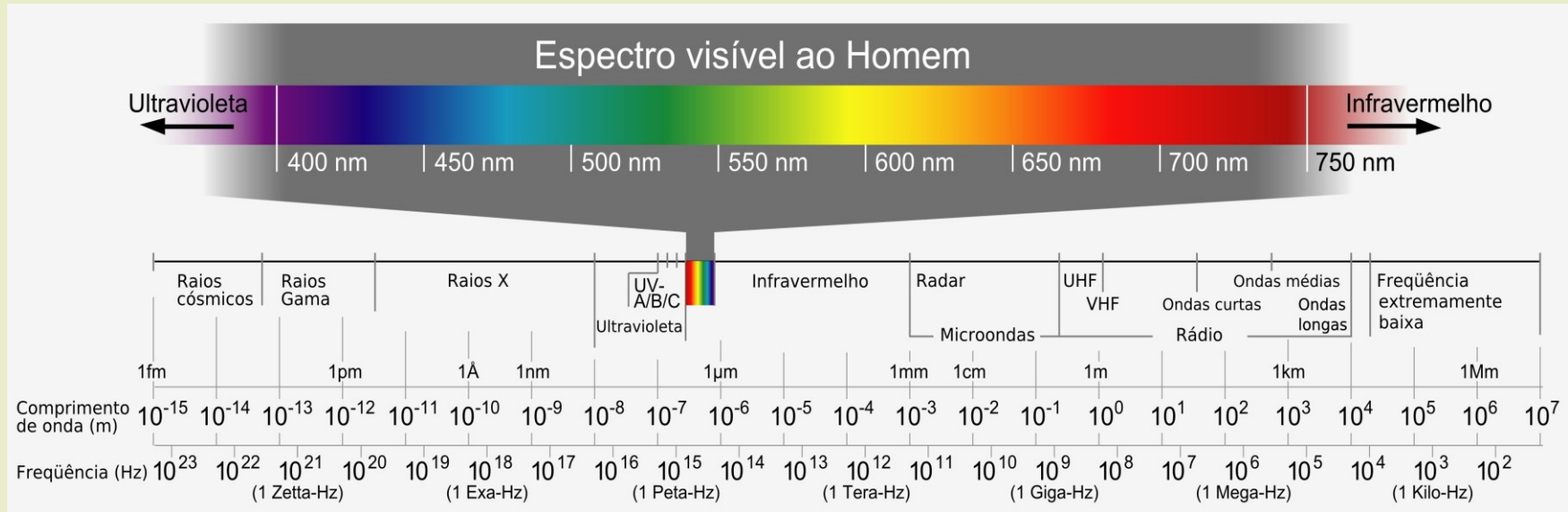
Comprimento de onda depende da **frequência** com que você agita a corda e também da **velocidade** com que as ondas podem se propagar através dela.

Para produzir ondas curtas você precisa agitar a corda com frequência mais alta, isto é, transferir mais rapidamente energia para a corda

Ondas de comprimento de onda curto transportam mais energia por segundo

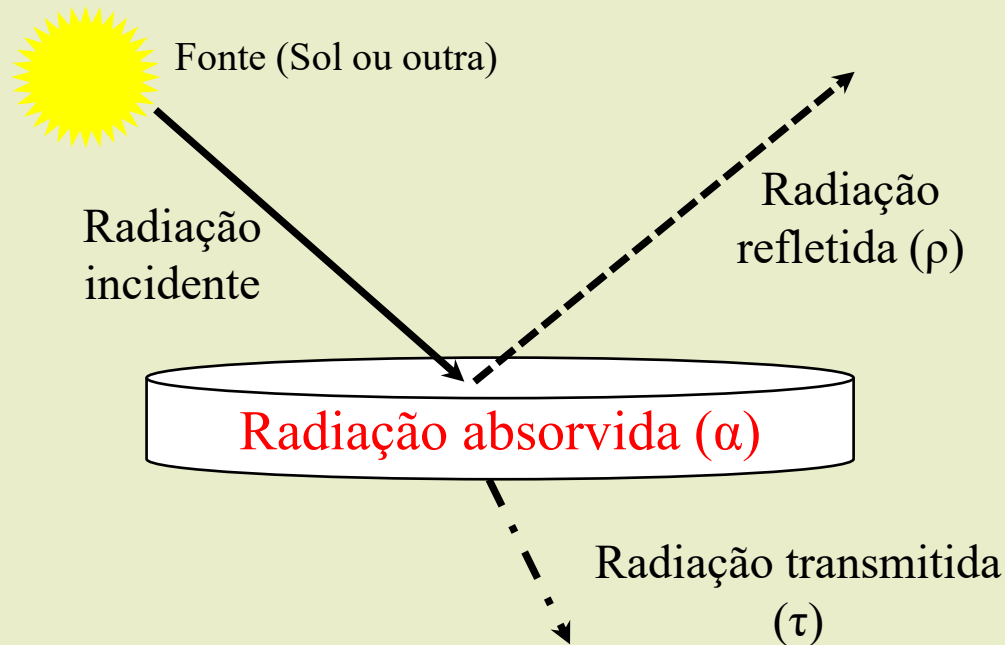
Energia Eletromagnética

Espectro eletrmagnético



Energia Eletromagnética

Espectro eletrmagnético



Reflectância (ρ)

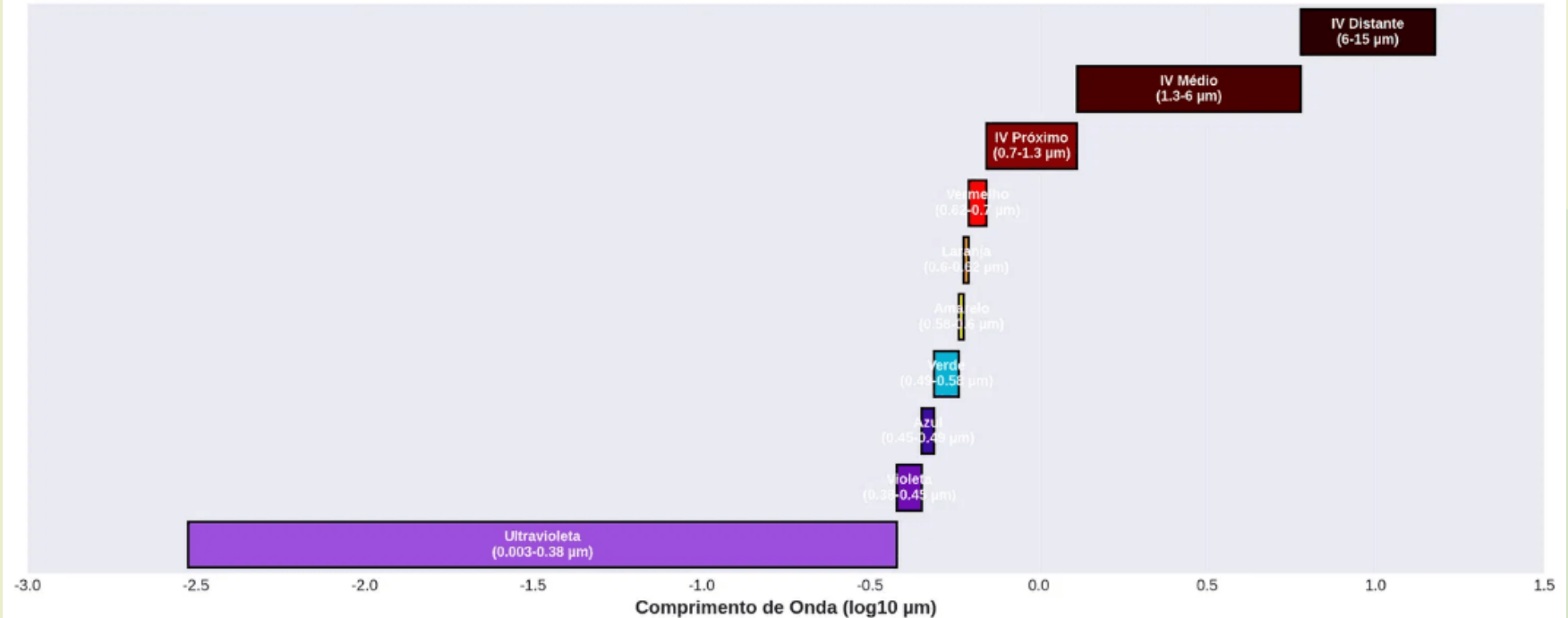
Absortância (α)

Transmitância (τ)

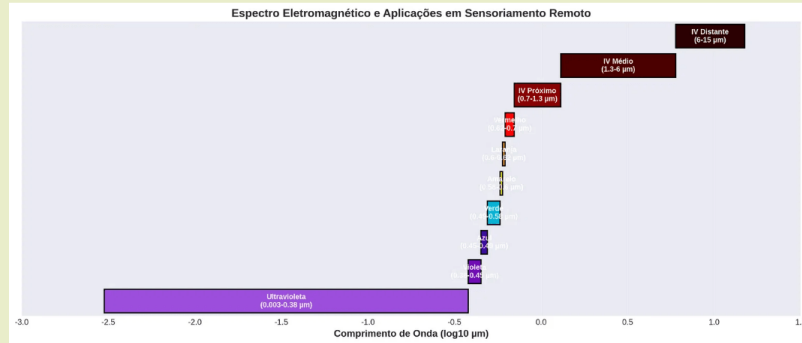
$$\rho + \alpha + \tau = 1$$

Espectro Eletromagnético

Espectro Eletromagnético e Aplicações em Sensoriamento Remoto



Espectro Eletromagnético



Faixa de Sensoriamento Remoto

0,3 μm a 15 μm (com microondas também)

Regiões Principais

Visível: 0,38-0,70 μm

IV Próximo: 0,70-1,3 μm

IV Médio: 1,3-6 μm

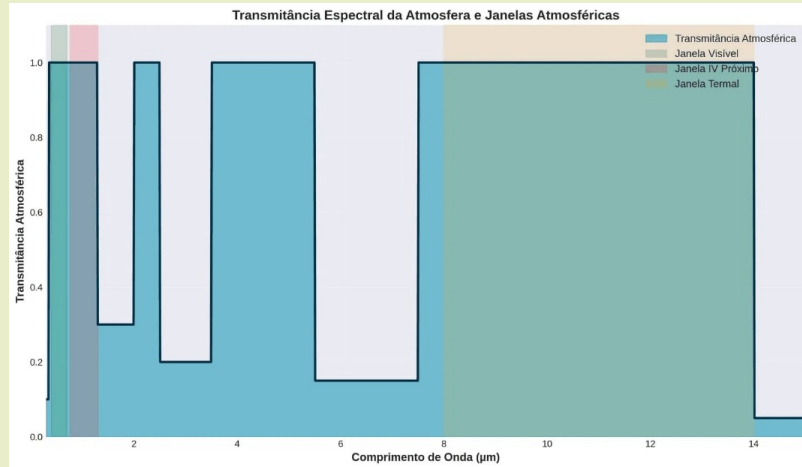
IV Distante: 6-15 μm

Equação Fundamental

$$c = f \cdot \lambda$$

$$c = 300.000 \text{ km/s}$$

Atenuação e Janelas Atmosféricas



Principais Gases Absorvedores

Vapor d'água (H_2O)
Oxigênio (O_2)
Ozônio (O_3)
Dióxido de carbono (CO_2)

Janelas Atmosféricas

Regiões onde a atmosfera é transparente.

Visível: ~70% da energia solar está entre 0,3-0,7 μm .

Térmica: Janela em 9,6 μm para emissão terrestre.

Opacidade

Acima de 14 μm a atmosfera é praticamente opaca.

Interação da Radiação com Objetos Terrestres

Princípio da Conservação de Energia

$$E_I = E_R + E_A + E_T$$

Incidente = Refletida + Absorvida + Transmitida

↩ Reflexão (Reflectância)

Energia que retorna ao meio após atingir a superfície. É a parcela detectada pelos sensores ópticos passivos.

↓ Absorção (Absortância)

Energia retida pelo objeto e convertida em outras formas (ex: calor, energia química na fotossíntese).

➡ Transmissão (Transmitância)

Energia que atravessa o objeto. Em folhas finas, parte da radiação IV próximo é transmitida.

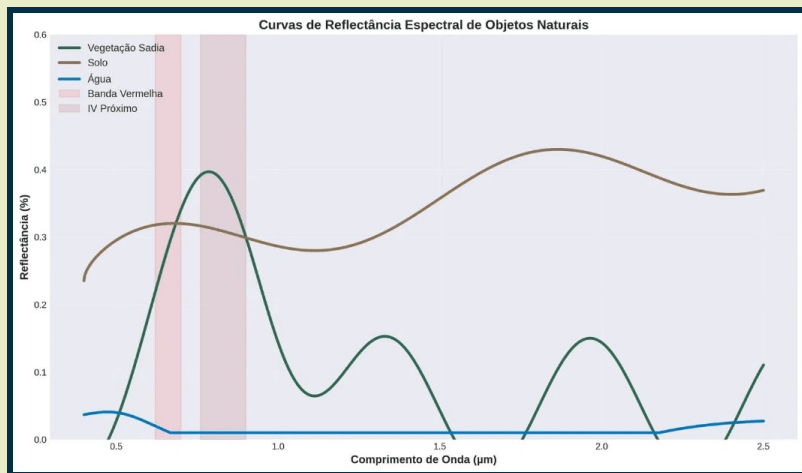
Assinatura Espectral

A **assinatura espectral** é o padrão único de reflectância de um objeto ao longo de diferentes comprimentos de onda do espectro eletromagnético.

Assim como uma impressão digital, cada material (vegetação, solo, água, minerais) interage de maneira diferenciada com a radiação, refletindo mais em certas bandas e absorvendo em outras.

É a variação na assinatura espectral que permite aos sensores remotos distinguir e identificar diferentes alvos na superfície terrestre, sendo a base para a classificação de imagens e cálculo de índices.

Comportamento Espectral da Vegetação



Região do Visível (0,4 - 0,7 μm)

Alta absorção de energia pelos pigmentos foliares, principalmente a **clorofila**, para a realização da fotossíntese. Há forte absorção nas bandas do azul e vermelho, e um pequeno pico de reflectância no verde (o que dá a cor verde às plantas).

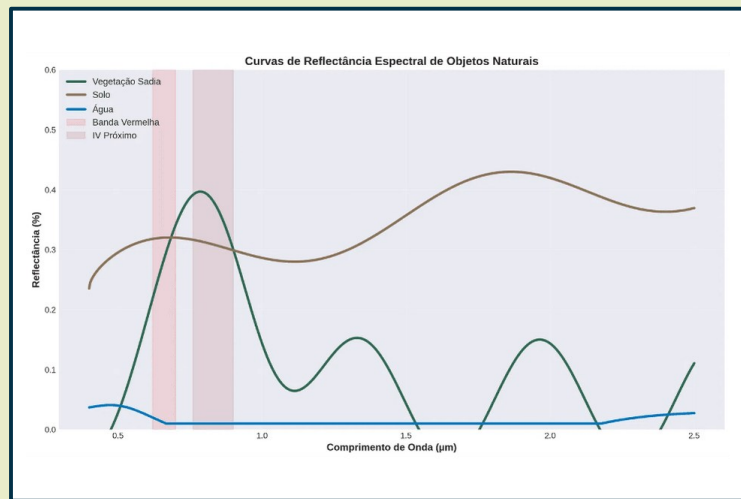
Infravermelho Próximo (0,7 - 1,3 μm)

Alta reflectância (podendo chegar a 50%). A radiação não é absorvida pelos pigmentos e é fortemente espalhada pela **estrutura celular interna** da folha (mesófilo esponjoso). É a região mais sensível ao vigor vegetativo.

Infravermelho Médio (1,3 - 2,5 μm)

A reflectância é controlada principalmente pelo **conteúdo de água** na folha. Apresenta fortes bandas de absorção de água (ex: 1,4 e 1,9 μm). Quanto maior o teor de água, menor a reflectância nesta região.

Comportamento Espectral de Solo e Água



Curvas típicas de reflectância para diferentes alvos.

Reflectância do Solo

- Umidade:** O aumento do teor de água diminui a reflectância em todo o espectro, com fortes bandas de absorção em 1,4 e 1,9 µm.
- Matéria Orgânica:** Solos ricos em matéria orgânica são mais escuros, apresentando menor reflectância geral.
- Granulometria/Textura:** Solos mais rugosos (ex: argilosos) tendem a espalhar mais a luz, reduzindo a reflectância direcional em comparação a solos lisos.
- Mineralogia:** Óxidos de ferro criam bandas de absorção específicas no visível e infravermelho.

Reflectância da Água

- Água Pura:** Baixa reflectância no visível (< 10%) e absorção quase total no infravermelho próximo e médio.
- Sedimentos em Suspensão:** Aumentam significativamente a reflectância no visível, deslocando o pico para o vermelho.
- Matéria Orgânica Dissolvida:** Absorve fortemente no azul, deslocando o pico de reflectância para o verde-amarelo.

Assinatura Espectral: Identificação de Objetos

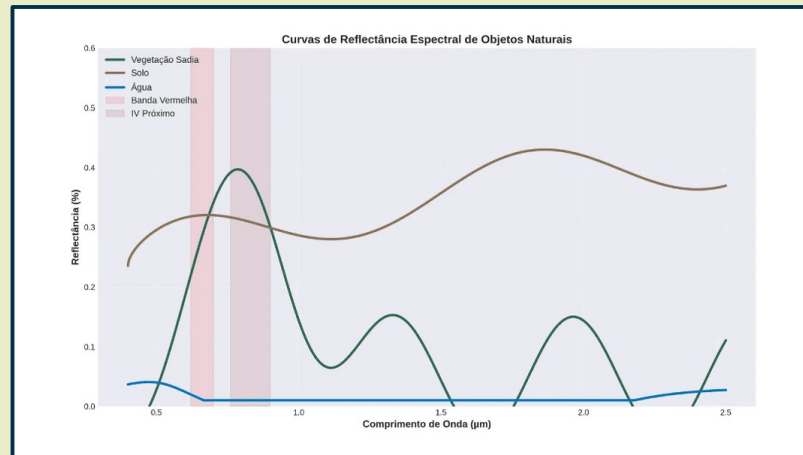


O Conceito de Assinatura

A **assinatura espectral** é o padrão característico de reflectância ou emitância de um material em função do comprimento de onda. Assim como uma impressão digital, cada alvo na superfície terrestre (diferentes culturas, solos, corpos d'água) possui uma curva espectral única, determinada por suas propriedades físico-químicas.

Importância na Análise de Imagens

É a diferença nas assinaturas espectrais que permite aos algoritmos de processamento de imagens classificar o uso do solo, identificar espécies agrícolas, detectar anomalias e calcular índices de vegetação de forma automatizada.



Discriminação de Alvos

Ao analisar a reflectância em múltiplas bandas (ex: Vermelho e IV Próximo), podemos separar facilmente a vegetação (alta reflectância no IV, baixa no Vermelho) do solo (reflectância crescente) e da água (baixa reflectância geral).

Plataformas de Sensoriamento Remoto



SATÉLITES

i Características

- **Altitude:** 400 a 900 km (órbita baixa)
- **Cobertura:** Global e sistemática
- **Sensores:** Multiespectrais, hiperspectrais, radar

+ Vantagens

- Cobertura de grandes extensões territoriais
- Série temporal histórica (ex: Landsat desde 1972)
- Muitos dados gratuitos (Landsat, Sentinel)

- Desvantagens

- Dependência de condições climáticas (nuvens)
- Resolução espacial e temporal fixas



AVIÕES

i Características

- **Altitude:** 1.000 a 10.000 metros
- **Cobertura:** Regional, sob demanda
- **Sensores:** Câmeras métricas, LiDAR, hiperspectrais pesados

+ Vantagens

- Alta resolução espacial (submétrica)
- Capacidade de carregar sensores pesados e complexos
- Flexibilidade de agendamento de voos

- Desvantagens

- Alto custo operacional e de mobilização
- Logística complexa (aeroportos, autorizações)



DRONES (UAS)

i Características

- **Altitude:** 10 a 120 metros (típico)
- **Cobertura:** Local (talhões específicos)
- **Sensores:** RGB, multiespectrais leves, termais

+ Vantagens

- Altíssima resolução espacial (centimétrica)
- Voos abaixo das nuvens (independência climática parcial)
- Alta resolução temporal (voos diários se necessário)

- Desvantagens

- Cobertura de área limitada por voo
- Restrições de bateria e capacidade de carga

Satélite Landsat: Características Técnicas

Especificações (Landsat 8)



Resolução Espacial

30 metros

(15m na banda pancromática)



Resolução Temporal

16 dias

Tempo de revisita ao mesmo ponto



Resolução Espectral

11 bandas

Visível, NIR, SWIR e Termal (TIRS)



Resolução Radiométrica

12 bits

4.096 níveis de cinza (Landsat 5 tinha 8 bits)



Histórico e Legado

O programa Landsat (NASA/USGS) é a missão de observação da Terra mais longa da história, iniciada em 1972. O **Landsat 5** operou por quase 30 anos, fornecendo a série temporal mais consistente para estudos agrícolas e ambientais. O **Landsat 8** (lançado em 2013) e o **Landsat 9** (2021) continuam este legado com sensores aprimorados.

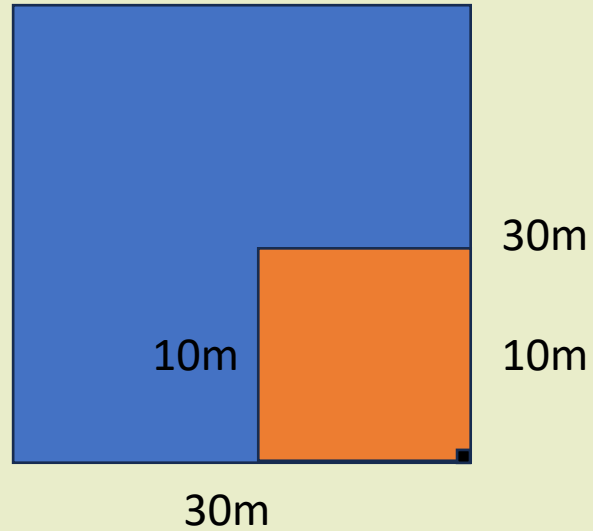


Aplicações na Agricultura

Apesar da resolução espacial moderada (30m), o Landsat é fundamental para a agricultura devido à sua consistência e bandas espectrais bem calibradas:

- **Séries Temporais:** Análise histórica de uso do solo e produtividade ao longo de décadas.
- **Estresse Hídrico:** Uso das bandas termais para estimar evapotranspiração e umidade.

Satélite Landsat: Características Técnicas



Satélite Sentinel-2: Características Técnicas

Especificações (Sentinel-2A/2B)



Resolução Espacial

10, 20 e 60 metros



Resolução Temporal

5 dias



Resolução Espectral

13 bandas



Resolução Radiométrica

12 bits



Programa Copernicus

O Sentinel-2 faz parte do programa Copernicus da ESA, lançado em 2015/2017, fornecendo dados gratuitos e de alta frequência para monitoramento agrícola.



Vantagens para Agricultura de Precisão

Projetado para monitoramento da vegetação:

- **Bandas Red Edge:**
- **Resolução de 10m:**
- **Revisita de 5 dias:**

Satélite MODIS e Drones (UAS)



SENSOR MODIS

RESOLUÇÃO ESPACIAL

250m a 1km

RESOLUÇÃO TEMPORAL

1 a 2 dias

RESOLUÇÃO ESPECTRAL

36 bandas

RESOLUÇÃO RADIOMÉTRICA

12 bits



Aplicações (Escala Macro)

Monitoramento fenológico contínuo de grandes extensões agrícolas.

Previsão de safras em nível regional e nacional.

Monitoramento de secas e anomalias climáticas em tempo quase real.

DRONES (UAS)

RESOLUÇÃO ESPACIAL

Centimétrica

RESOLUÇÃO TEMPORAL

Sob demanda

SENSORES TÍPICOS

RGB, Multispectral

FLEXIBILIDADE

Altíssima



Aplicações (Escala Micro)

Mapeamento detalhado de variabilidade intra-talhão para taxa variável.

Contagem de plantas e identificação de falhas de plantio.

Deteção precoce de pragas, doenças e plantas daninhas (spot spray).

Componentes de um Sensor Remoto



1. COLETOR ÓPTICO

Conjunto de lentes e espelhos responsável por **captar e concentrar** o fluxo de energia eletromagnética proveniente da superfície terrestre em direção aos detectores.



2. FILTRO ESPECTRAL

Componente óptico que **seleciona a faixa espectral** específica da radiação a ser medida (ex: apenas a banda do infravermelho próximo), bloqueando os demais comprimentos de onda.



3. DETECTOR

Elemento sensível que **converte a energia eletromagnética** absorvida em um sinal elétrico proporcional à intensidade da radiação incidente. É o "coração" do sensor.



4. PROCESSADOR

Sistema eletrônico responsável pela **amplificação e digitalização** do sinal elétrico fraco gerado pelo detector, convertendo-o em valores digitais (Números Digitais - ND).



5. UNIDADE DE SAÍDA

Componente que **registra, armazena e transmite** os dados digitais para as estações receptoras na Terra, permitindo a posterior

Resolução Espacial

Definição

A **resolução espacial** é a capacidade do sensor de distinguir objetos na superfície terrestre. Ela representa o tamanho do menor elemento individualizado (pixel) que o sistema consegue registrar.

Fatores Determinantes

O tamanho do pixel no terreno (GSD - Ground Sample Distance) depende de:

-  **Características do detector:** tamanho físico dos elementos fotossensíveis.
-  **Altura orbital / Altitude de voo:** distância entre o sensor e o alvo.
-  **Sistema óptico:** distância focal da lente do sensor.

Exemplos Práticos na Agricultura

Landsat 8

30m

Mapeamento de talhões grandes. Um pixel cobre 900 m². Permite identificar a cultura plantada e variações macro.

Sentinel-2

10m

Variabilidade intra-talhão. Um pixel cobre 100 m². Ideal para criação de zonas de manejo e prescrição de insumos.

Drones (UAS)

1 a 5cm

Nível de planta individual. Permite contagem de plantas, detecção de falhas de plantio e identificação de plantas daninhas.

Resolução Espectral

Definição

A resolução espectral refere-se à **largura espectral** em que opera o sensor e ao **número de bandas** espectrais que ele é capaz de registrar. Define a capacidade do sensor em discriminar detalhes finos da assinatura espectral dos alvos.

Capacidade de Discriminação

Quanto mais estreita for a banda espectral (menor intervalo de comprimento de onda) e maior o número de bandas, **melhor será a resolução espectral**.

Alta resolução espectral permite distinguir alvos com assinaturas muito semelhantes, como diferentes espécies de plantas, estágios fenológicos ou deficiências nutricionais específicas.

Sensores Pancromáticos

1 Banda Larga (Visível)



Registram a energia em uma única banda ampla, geralmente cobrindo todo o espectro visível. Produzem imagens em tons de cinza com alta resolução espacial, mas baixa capacidade de discriminação espectral.

Sensores Multiespectrais

3 a 15 Bandas (Visível, NIR, SWIR)



Registram a energia em algumas bandas espectrais discretas e relativamente largas. São os mais comuns na agricultura (ex: Landsat, Sentinel-2, câmeras de drones).

Sensores Hiperespectrais

Dezenas a Centenas de Bandas Estreitas



Registram a energia em bandas muito estreitas e contíguas, permitindo a reconstrução quase contínua da curva de reflectância. Ideais para análises químicas e detecção de estresses sutis.

Resolução Radiométrica e Temporal

RADIOMÉTRICA

Capacidade do sensor de detectar e discriminar pequenas diferenças na **intensidade da radiação** refletida ou emitida.

Medida em **bits**, que determinam o número de níveis de cinza possíveis.

Quanto maior o número de bits, maior a sensibilidade do sensor.

8 bits (Landsat 5)	256 níveis
--------------------	------------

Importância na AP

Essencial para detectar **estresses iniciais** na vegetação; alta resolução radiométrica permite diferenciar variações sutis antes que sejam visíveis.

TEMPORAL

Frequência com que o sensor obtém imagens de uma **mesma área** da superfície terrestre (tempo de revisita).

Depende das características orbitais do satélite e da largura da faixa de imageamento.

Pode ser melhorada usando constelações de satélites ou visada lateral.

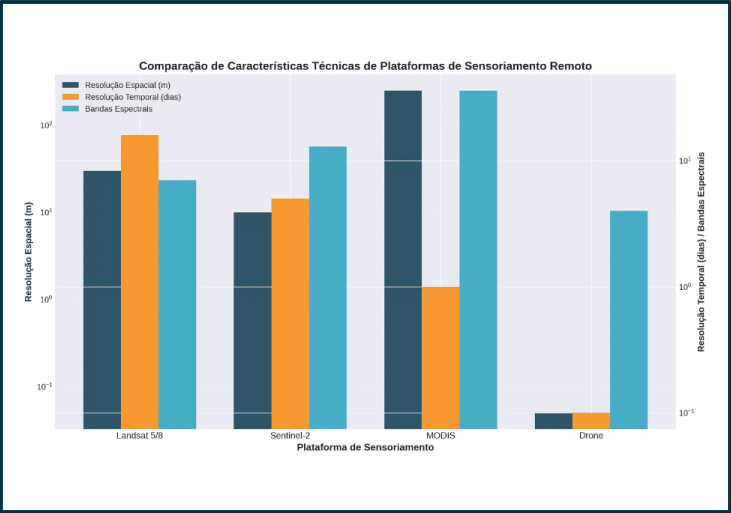
MODIS	1–2 dias
-------	----------

Sentinel-2 (A+B)	5 dias
------------------	--------

Importância na AP

Crucial para o **monitoramento fenológico**. Alta resolução temporal ajuda a capturar estádios críticos de desenvolvimento mesmo com cobertura de nuvens.

Comparação: Landsat vs Sentinel vs MODIS



Visualização em escala logarítmica das resoluções.

Quadro Comparativo de Resoluções

Característica	Landsat 8	Sentinel-2	MODIS
Espacial	30 m	10 m, 60 m	250 m, 500 m, 1 km
Temporal	16 dias	5 dias	1 a 2 dias
Espectral	11 bandas	13 bandas	36 bandas
Radiométrica	12 bits	12 bits	12 bits

Trade-off Fundamental: Existe um compromisso técnico entre as resoluções. O MODIS possui excelente resolução temporal e espectral, mas baixa resolução espacial. O Sentinel-2 oferece o melhor equilíbrio atual para a agricultura de precisão (10m / 5 dias).

Índices de Vegetação: Conceitos Fundamentais

Definição

Índices de Vegetação (IVs) são **transformações matemáticas** aplicadas a duas ou mais bandas espectrais de uma imagem. O objetivo principal é realçar o sinal da vegetação e minimizar as influências do fundo (solo) e da atmosfera.

Princípio Físico

Os IVs baseiam-se no contraste natural da assinatura espectral da vegetação sadia:

- 1. Alta absorção no Vermelho (Red):** Devido à atividade dos pigmentos fotossintéticos (clorofila).
- 2. Alta reflectância no Infravermelho Próximo (NIR):** Devido ao espalhamento da radiação pela estrutura celular interna das folhas (mesófilo esponjoso).

Lógica Matemática

As fórmulas geralmente utilizam razões (ratios), diferenças normalizadas ou combinações lineares das reflectâncias para isolar a resposta da vegetação.

$$IV = f(\rho_{\text{NIR}}, \rho_{\text{RED}}, \rho_{\text{GREEN}}, \dots)$$

Aplicações no Monitoramento

-  Estimativa de biomassa, vigor vegetativo e Índice de Área Foliar (IAF).
-  Detecção precoce de estresse hídrico, nutricional ou fitossanitário.
-  Mapeamento de variabilidade espacial para criação de zonas de manejo.
-  Modelagem e previsão de rendimento de safras.

NDVI - Normalized Difference Vegetation Index

FÓRMULA MATEMÁTICA

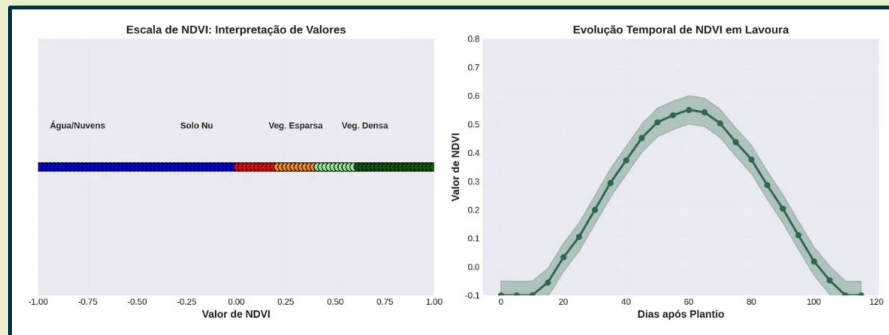
$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED})$$

NIR: Reflectância no Infravermelho Próximo

RED: Reflectância no Vermelho Visível

Interpretação de Valores (-1 a +1)

< 0	Água, nuvens, neve
0 a 0.2	Solo nu, rochas, áreas urbanas
0.2 a 0.4	Vegetação esparsa ou em senescência
0.4 a 0.6	Vegetação moderada (desenvolvimento)
> 0.6	Vegetação densa e sadia (alto vigor)



Aplicações em Agricultura de Precisão

Monitoramento de Vigor: Avaliação contínua da saúde da cultura ao longo do ciclo fenológico.

Zonas de Manejo: Identificação de áreas com diferentes potenciais produtivos dentro do mesmo talhão.

Detecção de Anomalias: Identificação precoce de estresses hídricos, nutricionais ou ataques de pragas/doenças.

Estimativa de Biomassa: Forte correlação com o Índice de Área Foliar (IAF) e produtividade final.

EVI - Enhanced Vegetation Index

FÓRMULA DO EVI

$$\text{EVI} = 2.5 \times (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + 6 \times \text{RED} - 7.5 \times \text{BLUE} + 1)$$

✓ Vantagens sobre o NDVI

- **Correção Atmosférica:** Usa a banda Azul para reduzir influência de aerossóis.
- **Ajuste de Solo:** Fator L=1 minimiza brilho do solo em áreas esparsas.
- **Não Saturação:** Mantém sensibilidade em alta biomassa onde NDVI satura.

🌱 Aplicações em AP

- **Estimativa de Biomassa:** Correlacionado com IAF e biomassa total.
- **Culturas Densas:** Ideal para fases avançadas de desenvolvimento.
- **Regiões Tropicais:** Útil no Brasil por aerossóis e alta umidade.

Nota Técnica: O EVI requer sensores com banda Azul (ex: Landsat, Sentinel-2). Sensores sem Blue não permitem cálculo.

SAVI - Soil-Adjusted Vegetation Index

FÓRMULA DO SAVI

$$\text{SAVI} = \frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED} + \text{L}} \times (1 + \text{L})$$

≡ Variáveis

NIR Reflectância no Infravermelho Próximo

RED Reflectância no Vermelho

L Fator de correção do solo (0 a 1)

⚠ O Problema do Solo Nu

Em áreas com baixa cobertura vegetal, o solo nu reflete fortemente a radiação, interferindo no sinal da vegetação e alterando valores de índices como o NDVI.

✓ A Solução SAVI

O SAVI introduz o fator **L** para minimizar a influência do solo, deslocando a origem no espaço de reflectância (Vermelho vs NIR).

🌱 Aplicações em AP

O SAVI é recomendado para:

- **Estágios iniciais:** quando a cultura ainda não fechou as entrelinhas.
- **Espaçados:** pomares, vinhedos e silvicultura.

NDRE e NDWI - Índices Especializados

NDRE (Red Edge)

$$(NIR - RedEdge) / (NIR + RedEdge)$$

Sensibilidade ao Nitrogênio

O NDRE substitui a banda do Vermelho pela banda **Red Edge** (borda do vermelho). Esta região espectral é altamente sensível a variações no conteúdo de clorofila e, conseqüentemente, ao status de nitrogênio da planta.

- ✓ **Evita Saturação:** Excelente para monitorar culturas em estádios avançados com dossel muito denso, onde o NDVI perde sensibilidade.
- ✓ **Manejo de Nitrogênio:** Utilizado para gerar mapas de prescrição de adubação nitrogenada em taxa variável (ex: milho, trigo).

NDWI (Water Index)

$$(NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$$

Conteúdo de Água

O NDWI utiliza a banda **SWIR** (Infravermelho Médio), que possui forte absorção pela água líquida. Ele mede diretamente o conteúdo hídrico do dossel vegetativo, complementando os índices baseados em clorofila.

- ✓ **Estresse Hídrico:** Permite a detecção precoce da falta de água nas plantas antes que os sintomas visuais (murcha) apareçam.
- ✓ **Manejo de Irrigação:** Auxilia na tomada de decisão sobre quando e onde irrigar, otimizando o uso dos recursos hídricos.

Evolução Temporal de Índices de Vegetação

A Curva Fenológica

O monitoramento contínuo (série temporal) do NDVI permite traçar a curva de desenvolvimento da cultura, refletindo seu ciclo biológico natural.

Fase Inicial (Emergência)

Valores baixos de NDVI (0.1 a 0.3), dominados pela refletância do solo exposto.

Pico Vegetativo

Valores máximos (> 0.7) indicando o fechamento do dossel e máxima atividade fotossintética.

Senescência e Maturação

Queda gradual dos valores devido à degradação da clorofila e secagem das folhas.

Aplicações do Monitoramento

A análise de desvios na curva fenológica padrão fornece informações críticas para a tomada de decisão agrônômica.

Detecção de Estresse

Quedas abruptas ou valores consistentemente abaixo da média histórica indicam estresse hídrico, nutricional ou ataque de pragas.

Previsão de Rendimento

A integral da curva de NDVI (área sob a curva) possui forte correlação com a biomassa acumulada e a produtividade final da lavoura.

Planejamento de Colheita

A análise da taxa de senescência auxilia na determinação do momento ideal para a dessecação ou

Comparação de Índices de Vegetação

Cenário / Alvo	NDVI	EVI	SAVI
 Água / Nuvens	Valores Negativos (< 0)	Valores Negativos (< 0)	Valores Negativos (< 0)
 Solo Nu	~ 0.1 a 0.2 (Sofre influência do brilho)	~ 0.1 (Corrigido atmosféricamente)	~ 0.1 (Minimiza efeito do background)
 Vegetação Esparsa	~ 0.3 a 0.5 (Pode superestimar vigor)	~ 0.2 a 0.4 (Mais preciso)	~ 0.3 a 0.5 (Ajuste ideal com $L=0.5$)
 Vegetação Moderada	~ 0.6 a 0.8	~ 0.5 a 0.7	~ 0.6 a 0.7
 Vegetação Densa	> 0.8 (Saturação)	> 0.7 (Mantém sensibilidade)	> 0.7 (Equivale ao NDVI, $L=0$)



Guia de Decisão Prática

NDVI: Padrão global, excelente para monitoramento geral, mas falha em dosséis muito densos (saturação) e solos muito expostos.

SAVI: A melhor escolha para **estágios iniciais** de plantio ou culturas perenes com grande espaçamento (solo visível).

EVI: Ideal para **estágios avançados** (alta biomassa) e regiões com alta interferência atmosférica (aerossóis/queimadas).

Processamento de Imagens: Calibração Radiométrica

CONVERSÃO DE NÚMERO DIGITAL (ND) PARA RADIÂNCIA

$$L_{\lambda} = M_L \times Q_{cal} + A_L$$

☰ Variáveis da Equação

- L_{λ} Radiância espectral no topo da atmosfera (TOA)
- M_L Fator multiplicativo de reescalonamento (Ganho)
- Q_{cal} Número Digital (ND) do pixel original da imagem
- A_L Fator aditivo de reescalonamento (Offset)

! Necessidade da Calibração

A conversão de valores arbitrários (ND) para unidades físicas reais (Radiância) é o primeiro passo obrigatório no pré-processamento, sendo essencial para:

- 📅 **Comparação Multi-temporal:** Permite analisar a evolução de uma mesma área em datas diferentes de forma precisa.
- ✖ **Integração Multi-sensor:** Possibilita o uso conjunto de dados de satélites distintos (ex: Landsat e Sentinel).
- 📊 **Cálculo de Índices:** Garante a validade física e matemática dos Índices de Vegetação.

Correção Atmosférica



O Problema Atmosférico

A radiação eletromagnética interage com gases e aerossóis na atmosfera através de processos de **espalhamento** (Rayleigh e Mie) e **absorção**. A correção atmosférica é o processo de converter a reflectância no Topo da Atmosfera (**TOA** - Top of Atmosphere) em reflectância real na superfície (**BOA** - Bottom of Atmosphere), removendo esses ruídos.



Métodos Principais

■ DOS (Dark Object Subtraction)

Método empírico baseado na própria imagem. Assume que os pixels mais escuros (ex: água profunda) deveriam ter reflectância zero; qualquer valor registrado é atribuído ao espalhamento atmosférico e subtraído de toda a cena.

■ FLAASH / QUAC

Modelos físicos baseados em transferência radiativa. Utilizam parâmetros atmosféricos reais (aerossóis, vapor d'água) no momento da passagem do satélite para modelar e remover os efeitos.



Importância Prática



Análises Multi-temporais

Permite comparar a mesma área em datas diferentes. Sem a correção, uma mudança no NDVI poderia ser causada por uma atmosfera mais úmida, e não por uma mudança real na cultura.



Análises Multi-sensores

Essencial para integrar dados de diferentes satélites (ex: Landsat 8 e Sentinel-2) em uma única série temporal coerente, padronizando as medições para reflectância de superfície.

Georreferenciamento e Validação



O que é Georreferenciamento?

Atribuição de coordenadas (Latitude/Longitude ou UTM) a cada pixel, alinhando a imagem a um sistema de referência (ex: SIRGAS 2000, WGS84).



Precisão Típica

Varia conforme a plataforma e sistema de navegação:



Satélites: Precisão nativa $\pm 15\text{--}30$ m (sem GCPs).

Drones (RTK/PPK): Precisão centimétrica (1–5 cm).



Validação e Pontos de Controle

Validação em campo (Ground Truth) para garantir precisão geométrica.



GCPs: Pontos no terreno com coordenadas conhecidas, coletados com GNSS/RTK.



Correção: Uso dos GCPs para ancorar e corrigir distorções (ortorretificação).



Integração com SIG

Georreferenciamento preciso permite a sobreposição exata de imagens com outros dados SIG: mapas de colheita, análises de solo e mapas de prescrição.

Fluxo de Processamento de Imagens

1 AQUISIÇÃO

Obtenção dos dados brutos pelo sensor. A imagem é registrada como uma matriz de **Números Digitais (ND)**, sem significado físico direto, dependendo da resolução radiométrica do sensor.

2 CALIBRAÇÃO

Conversão dos Números Digitais (ND) em **Radiância** no Topo da Atmosfera (TOA). Utiliza coeficientes de ganho e offset específicos fornecidos nos metadados da imagem.

3 CORREÇÃO ATMOSFÉRICA

Remoção dos efeitos de espalhamento e absorção dos gases e aerossóis. Converte a radiância TOA em **Reflectância de Superfície (BOA)**, essencial para análises temporais.

4 GEORREFERENCIAMENTO

Alinhamento geométrico da imagem a um sistema de coordenadas conhecido (ex: UTM/WGS84). Pode envolver **ortorretificação** usando Modelos Digitais de Elevação (MDE) e GCPs.

5 CÁLCULO DE ÍNDICES

Aplicação de álgebra de mapas sobre as bandas de reflectância corrigidas para gerar **Índices de Vegetação** (NDVI, EVI, SAVI, NDWI), realçando características biofísicas específicas.

6 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO

Fase final onde os dados processados são integrados em um SIG. Envolve a geração de **zonas de manejo**, detecção de anomalias e tomada de decisão agrônômica.

Aplicação 1: Monitoramento de Saúde de Plantas

Detecção Precoce e Variabilidade Espacial

A geração de mapas de variabilidade espacial a partir de índices como **NDVI** e **EVI** permite a identificação de anomalias fisiológicas antes da manifestação visual dos sintomas. Isso otimiza o direcionamento de amostragens a campo (scouting) e a tomada de decisão.



ESTRESSE HÍDRICO

A perda de turgescência celular e o fechamento estomático alteram a estrutura do mesófilo foliar, reduzindo a reflectância no **Infravermelho Próximo (NIR)** e diminuindo os valores dos índices de vegetação.



ESTRESSE NUTRICIONAL

Deficiências de macronutrientes (ex: Nitrogênio) reduzem a biossíntese de clorofila. Isso causa um aumento significativo na reflectância da banda do **Vermelho (Red)**, derrubando os valores de NDVI.



ESTRESSE FITOSSANITÁRIO

O ataque de pragas ou patógenos causa danos diretos à estrutura celular e necrose dos tecidos. Isso gera quedas abruptas e localizadas (formação de **reboleiras**) nos mapas de variabilidade espacial.

Aplicação 2: Mapeamento de Zonas de Manejo

O Conceito de Zonas de Manejo

Consiste na subdivisão de um talhão agrícola em sub-regiões menores que apresentam características de solo, topografia e potencial produtivo relativamente homogêneas. O objetivo é abandonar o tratamento médio da área e adotar um manejo sítio-específico.

O Papel do Sensoriamento Remoto

 **Séries Temporais:** A análise de imagens de múltiplas safras (NDVI/EVI) revela padrões consistentes de alto, médio e baixo vigor vegetativo.

 **Agrupamento (Clustering):** Algoritmos classificam os pixels com comportamento espectral semelhante, delineando as zonas automaticamente.

 **Direcionamento:** Orienta a amostragem de solo inteligente, reduzindo custos com análises laboratoriais.

Aplicação em Taxa Variável (VRT)

 **Mapas de Prescrição:** As zonas delimitadas são convertidas em mapas digitais (shapefiles) lidos pelos computadores de bordo dos tratores.

 **Sementes e Fertilizantes:** Zonas de alto potencial recebem maior densidade de sementes e adubo; zonas restritivas recebem doses ajustadas.

 **Otimização:** Maximiza o retorno econômico (ROI) e minimiza o impacto ambiental por excesso de insumos.

Aplicação 3: Detecção de Pragas e Doenças

Mecanismo Espectral

Pragas e patógenos causam danos diretos à estrutura celular das folhas (destruição do mesófilo esponjoso) e degradam os pigmentos fotossintéticos.

Assinatura Alterada

Essa degradação provoca uma **queda drástica na reflectância do Infravermelho Próximo (NIR)** e um aumento na reflectância do Vermelho (Red), alterando os índices de vegetação antes mesmo do surgimento de sintomas visuais severos.



DETECÇÃO PRECOCE

A identificação de anomalias fisiológicas em estágios iniciais permite intervenções rápidas, evitando que a doença atinja o nível de dano econômico em toda a lavoura.



MAPEAMENTO DE FOCOS

Pragas como nematoides e fungos de solo costumam atacar em manchas ou "**reboleiras**". O sensoriamento remoto mapeia a exata extensão, geometria e evolução temporal dessas áreas afetadas.



PULVERIZAÇÃO LOCALIZADA

Integração dos mapas de focos com drones de pulverização ou tratores com corte de seção para aplicação de defensivos apenas nas áreas doentes (**Spot Spraying**), reduzindo custos e impacto ambiental.

Aplicação 4: Estimativa de Biomassa e Rendimento

Estimativa de Biomassa

A reflectância do dossel possui forte correlação com a quantidade de biomassa verde acumulada.

- **Relação com IAF:** Índices como NDVI e EVI são proxies diretos para o Índice de Área Foliar (IAF).
- **Vantagem do EVI:** Em culturas de alta densidade (ex: soja no fechamento), o EVI é preferível por não saturar tão rapidamente quanto o NDVI.

Previsão de Rendimento

A integração dos dados espectrais ao longo do tempo permite antecipar a produtividade da lavoura.

- **Integral da Curva:** A área sob a curva fenológica do NDVI representa o acúmulo total de energia fotossintética na safra.
- **Modelos Agrometeorológicos:** A combinação de índices de vegetação com dados climáticos aumenta a precisão das estimativas de colheita.

Validação com Dados de Campo (Ground Truth)

- **Mapas de Colheita:** Os modelos espectrais devem ser calibrados e validados cruzando as estimativas do satélite com os dados reais de produtividade gerados pelos monitores das colheitadeiras.

- **Amostragem Destrutiva:** Para estimativas precisas de biomassa, é necessário realizar cortes e pesagens em campo para estabelecer a regressão matemática (R^2) com os valores dos índices.

Aplicação 5: Monitoramento de Irrigação

Irrigação de Precisão

A irrigação de precisão utiliza dados de sensoriamento remoto para determinar o momento exato e a quantidade ideal de água necessária em cada setor do talhão. O objetivo é substituir o manejo baseado em médias por um manejo sítio-específico, otimizando o uso dos recursos hídricos.

Indicadores de Estresse Hídrico

 **Índice NDWI:** Utiliza a banda SWIR para medir diretamente o conteúdo de água líquida no mesófilo foliar. Quedas no NDWI indicam desidratação celular antes da murcha visual.

 **Termografia (Banda Termal):** O déficit hídrico induz o fechamento estomático, reduzindo a transpiração e o resfriamento evaporativo, o que eleva a temperatura do dossel.

Benefícios Agronômicos

 **Economia de Água:** Aplicação de lâminas de irrigação em taxa variável (VRI) apenas nas zonas que realmente necessitam, preservando mananciais.

 **Eficiência Energética:** Redução significativa do tempo de bombeamento e dos custos com energia elétrica ou diesel.

 **Produtividade:** Evita tanto o déficit hídrico (que reduz a fotossíntese) quanto o excesso de água (que causa hipóxia radicular e lixiviação de nutrientes).

Síntese: Sensoriamento Remoto na AP

Fundamentos

- ✓ Interação da radiação eletromagnética com os alvos.
- ✓ Assinatura espectral única para vegetação, solo e água.
- ✓ Contraste vital entre as bandas do Vermelho e Infravermelho Próximo.

Sensores

- ✓ Trade-off entre resoluções: Espacial, Temporal, Espectral e Radiométrica.
- ✓ Satélites (Landsat, Sentinel) para escala macro e séries temporais.
- ✓ Drones para altíssima resolução e flexibilidade sob demanda.

Aplicações

- ✓ Índices de Vegetação (NDVI, EVI, SAVI) para realçar o sinal biológico.
- ✓ Mapeamento de variabilidade e criação de Zonas de Manejo.
- ✓ Detecção precoce de estresses e aplicação de insumos em taxa variável.

IMPACTO NA TOMADA DE DECISÃO

O Sensoriamento Remoto transforma dados brutos em **inteligência agrônômica**. Ele permite abandonar o manejo pela média, otimizando o uso de recursos, reduzindo custos e maximizando a produtividade de forma sustentável.

Tendências e Oportunidades de Pesquisa

O Futuro do Sensoriamento Remoto em AP

IA & Deep Learning

Substituição de índices simples por algoritmos de visão computacional e redes neurais para classificação complexa de estresses e estimativa de produtividade.

Constelações & 5G

Nanossatélites (ex: Planet) fornecendo revisita diária com alta resolução. O 5G no campo permitirá o processamento de imagens de drones em tempo real (Edge Computing).

Digital Twins

Criação de "Gêmeos Digitais" das lavouras, integrando dados de satélite, clima e sensores de solo (IoT) para simulação contínua de cenários agrônômicos.

Temas para Pós-Graduação (I)

 **Fusão de Dados (Data Fusion):** Integração de imagens ópticas (Sentinel-2) com dados de radar (Sentinel-1) para monitoramento contínuo sob cobertura de nuvens.

 **Sensores Hiperespectrais:** Desenvolvimento de novos índices espectrais específicos (narrow-band) para detecção precoce de patógenos tropicais.

Temas para Pós-Graduação (II)

 **Modelagem de Culturas:** Assimilação de dados de sensoriamento remoto em modelos de crescimento de plantas (ex: DSSAT, APSIM) para a realidade brasileira.

 **Imagens Termais de Drones:** Aprimoramento de algoritmos para cálculo do CWSI (Crop Water Stress Index) visando o manejo de precisão da irrigação.