

Seleção Ótima de Cobertura Sentinel-2 para APAs: Pré-seleção Gulosa de Grupos e Otimização MILP com Fator de Qualidade

Luryan Delevati Dorneles

April 14, 2025

Objetivos

- ▶ Selecionar imagens Sentinel-2 para cobrir APAs em Alagoas, priorizando dados óticos (no período de 04/12/2024 a 05/04/2025).
- ▶ Aplicar abordagem híbrida: heurística construtiva gulosa para pré-seleção e modelo MILP para escolha final.
- ▶ Penalizar o uso potencial de dados SAR (Sentinel-1) como fallback, representando custo adicional.
- ▶ Balancear cobertura útil e qualidade (cobertura de nuvens, resolução, órbita).

Trabalhos Relacionados

Otimização em Sensoriamento Remoto

- ▶ **Kuck et al. (2024):**
Algoritmo genético para priorização de imagens SAR na Amazônia
- ▶ **Zhao et al. (2019):**
Programação de satélites com restrições operacionais

Gap: Ausência de abordagens híbridas (heurísticas + métodos exatos)

Seleção de Imagens para Mosaicagem

- ▶ **Li et al. (2018):** Heurística construtiva para minimizar costuras visíveis
- ▶ **Wang et al. (2021):**
Algoritmo guloso para otimizar cobertura espacial

Caracterização dos Satélites



Figure: Áreas de Proteção Ambiental em Alagoas

- ▶ **Sentinel-1 (SAR):**
 - ▶ Banda C (4-8 GHz)
 - ▶ Penetra nuvens
 - ▶ 5x20m resolução
- ▶ **Sentinel-2 (Óptico):**
 - ▶ 13 bandas espectrais
 - ▶ 10m resolução
 - ▶ Órbitas regulares (R001-R143)

Metodologia: Abordagem Híbrida

Fase 1: Heurística Gulosa

- ▶ Classificação de imagens (centrais/complementos)
- ▶ Identificação de combinações para mosaicos
- ▶ Avaliação multi-critério

Fase 2: MILP

- ▶ Seleção final de imagens/grupos
- ▶ Consideração de restrições globais
- ▶ Otimização da cobertura total

Heurística reduz espaço de busca → MILP para otimalidade

Restrições do Modelo MILP: Capacidade

Restrições de Capacidade:

$$\sum_{g \in G} y_g \leq N_{\max} \quad (1)$$

$$\sum_{t \in T} g_{j,t} \leq 1, \quad \forall j \in J \quad (2)$$

- ▶ N_{\max} : Máximo de grupos permitidos
- ▶ $g_{j,t}$: Ativação do satélite j no tempo t
- ▶ J : Conjunto de satélites disponíveis
- ▶ T : Janelas temporais consideradas

Restrições do Modelo MILP: Consistência

Restrições de Consistência:

$$y_g \leq \sum_{i \in g} x_{i,t}, \quad \forall g \in G, t \in T(g) \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I_{\text{SAR}}} x_{i,t} \leq M \cdot g_{j,t}, \quad \forall j \in J, t \in T \quad (4)$$

- ▶ y_g : Seleção do grupo g
- ▶ $x_{i,t}$: Seleção da imagem i no tempo t
- ▶ $g_{j,t}$: Ativação do satélite j no tempo t
- ▶ $T(g)$: Período válido para o grupo g
- ▶ I_{SAR} : Conjunto de imagens SAR
- ▶ M : Constante grande (Big-M)

Restrições do Modelo MILP: Domínio

Restrições de Domínio:

$$y_g, x_{i,t}, g_{j,t} \in \{0, 1\} \quad (5)$$

- ▶ y_g : Grupo g é selecionado (1) ou não (0)
- ▶ $x_{i,t}$: Imagem i é adquirida no tempo t (1) ou não (0)
- ▶ $g_{j,t}$: Satélite j é ativado no tempo t (1) ou não (0)

Cobertura Efetiva e Classificação de Imagens

$$C_i = C_g \times P_x \quad (6)$$

- ▶ C_i : Cobertura efetiva da imagem
- ▶ C_g : Cobertura geográfica (área ou %)
- ▶ P_x : Porcentagem de pixels válidos

Classificação:

- ▶ **Imagens Centrais:** $C_i > \theta_{central}$ (30%)
- ▶ **Imagens Complemento:** C_i entre $\theta_{complement}$ e $\theta_{central}$ (7-30%)

Função de Avaliação Multi-Critério

$$E = C_n \times Q \quad (7)$$

$$C_n = C_a + C_e + B_o \quad (8)$$

$$Q = (1 - C_c) \times P_x \quad (9)$$

- ▶ E : Efetividade total da combinação
- ▶ C_n : Cobertura normalizada
- ▶ Q : Fator de qualidade
- ▶ C_a : Cobertura atual
- ▶ C_e : Cobertura extra (contrib. da imagem)
- ▶ B_o : Bônus de órbita
- ▶ C_c : Cobertura de nuvens

Bônus de órbita: $B_o = 0.1$ se mesma órbita, 0 caso contrário

Modelo MILP - Função Objetivo (Implementada)

$$\text{maximizar} \sum_{g \in G} (E_g \times Q_g \times y_g) - \alpha \sum_{g \in G} y_g - \beta \sum_{g \in G} y_g \quad (10)$$

- ▶ y_g : Seleção do grupo de mosaico g .
- ▶ E_g : Efetividade (cobertura estimada total) do grupo g .
- ▶ Q_g : Qualidade média do grupo g .
- ▶ α : Peso para penalizar o **número de grupos** selecionados.
- ▶ β : Peso para penalizar a seleção de **qualquer grupo** (representando o custo/desincentivo de potencialmente precisar do SAR como fallback).

Foco: Maximizar cobertura de qualidade, penalizando o número de grupos (α) e a seleção de cada grupo (β) como peso para o custo de usar SAR.

Resultados Preliminares

Estatísticas de Processamento

- ▶ Total de imagens: 328
- ▶ Imagens aceitas: 94 (29%)
 - ▶ Centrais: 50
 - ▶ Complementos: 44
- ▶ Grupos de mosaicos: 52

Imagens Rejeitadas: 234 (71%)

- ▶ Cobertura geográfica insuficiente: 164
- ▶ Cobertura efetiva insuficiente: 53
- ▶ Excesso de nuvens: 17

Visualização dos Mosaicos

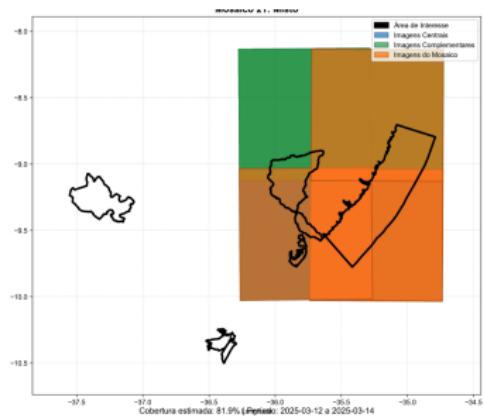


Figure: Exemplo de mosaico

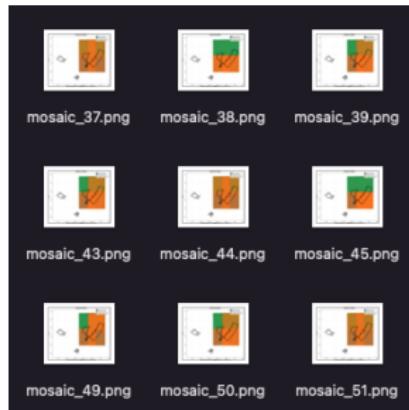


Figure: Distribuição de grupos

Detalhamento dos Resultados

Estrutura do JSON:

- ▶ Arquivo
 - ▶ Cobertura Geográfica
 - ▶ Porcentagem de Pixels Válidos
 - ▶ Cobertura Efetiva
 - ▶ Cobertura de Nuvens
 - ▶ Data
 - ▶ Órbita

Figure: Estrutura de dados do JSON

Cobertura e Máscara de Nuvens

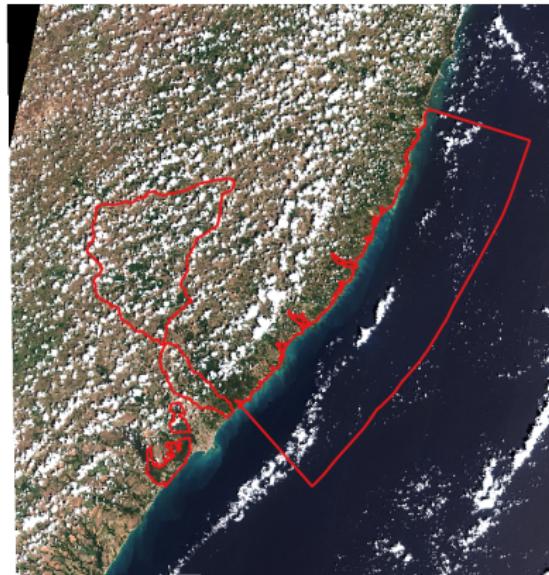


Figure: Imagem RGB de cobertura

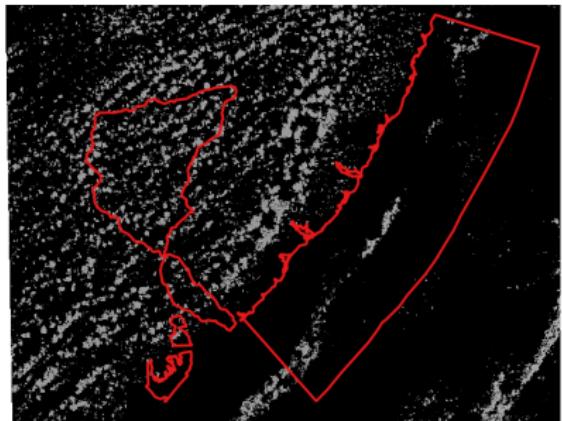
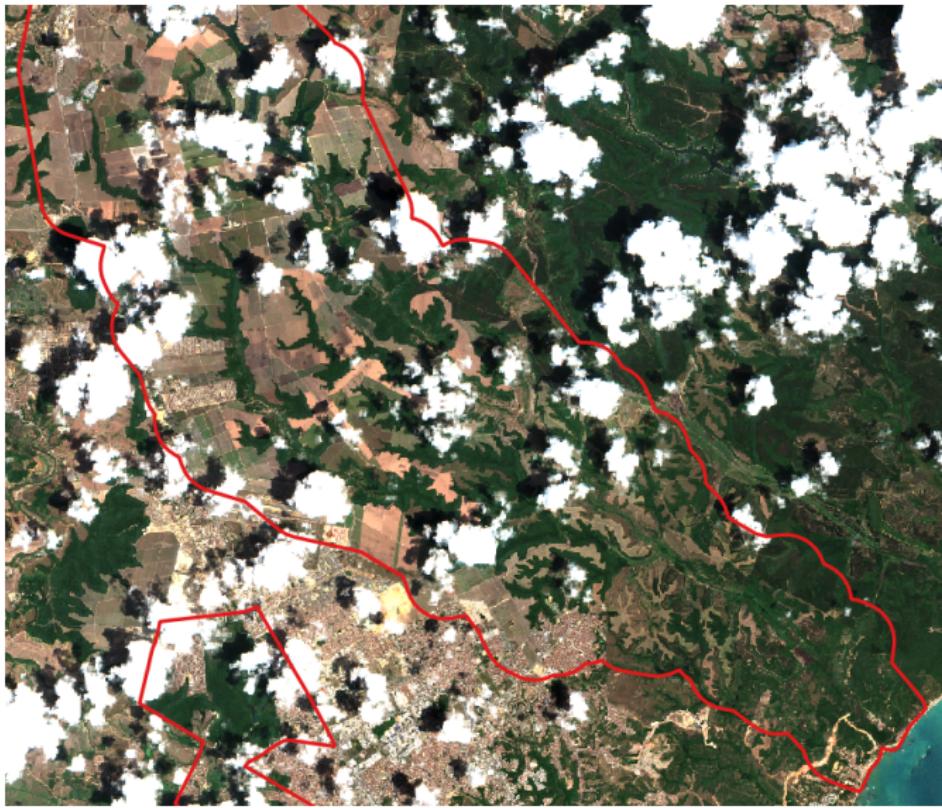


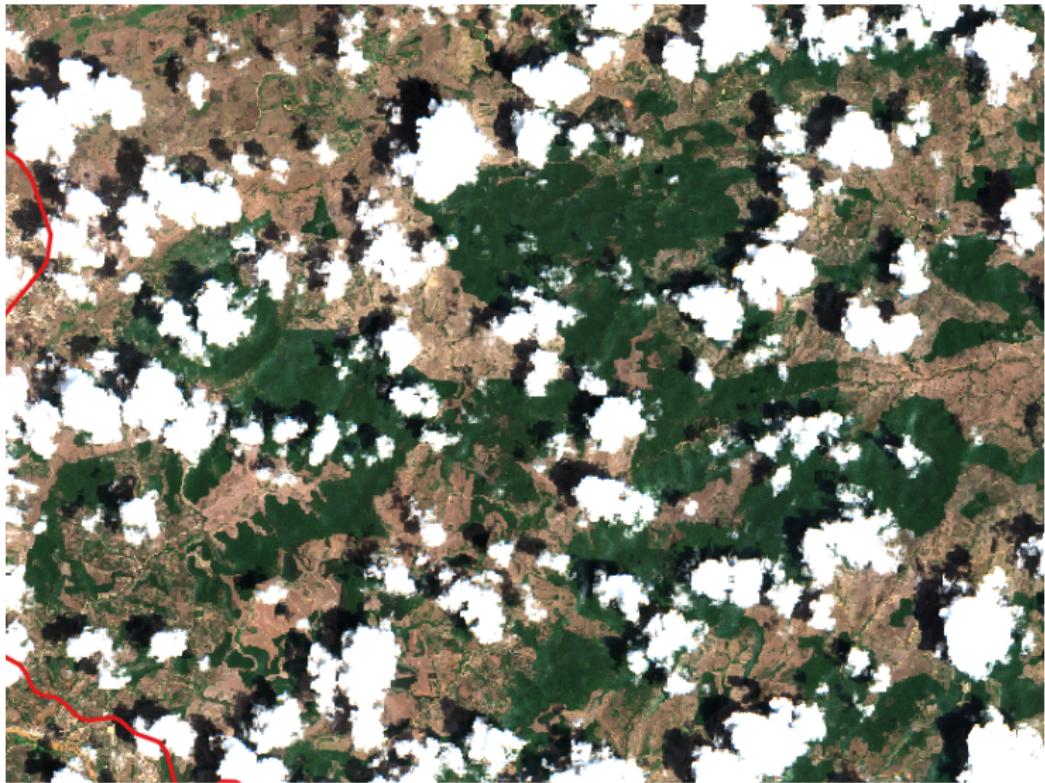
Figure: Máscara de nuvens

Comparação entre imagem real e detecção de nuvens para cálculo de cobertura efetiva

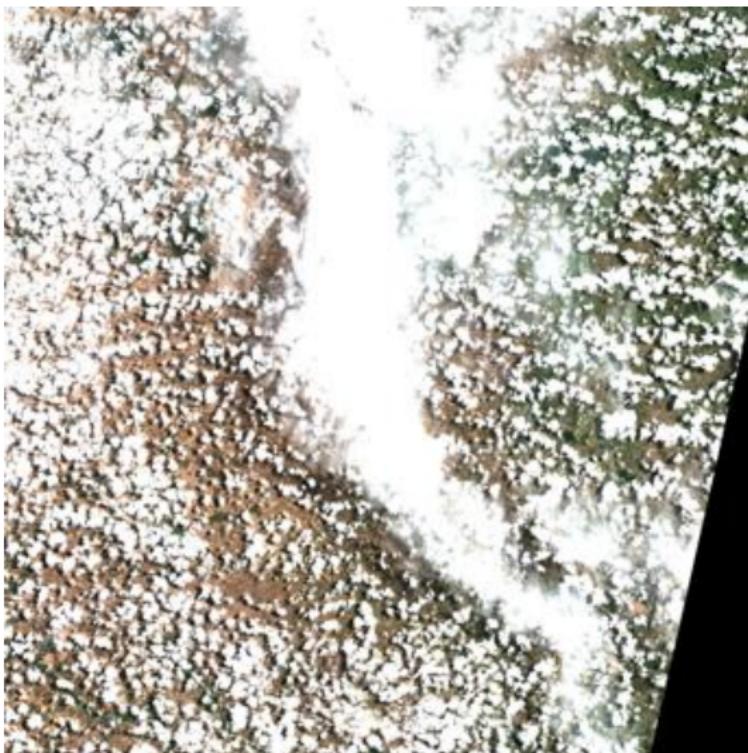
Detalhe da Cobertura - Região 1



Detalhe da Cobertura - Região 2



Desafio: Alta Cobertura de Nuvens



Exemplo de imagem com alta cobertura de nuvens: descartada pela
heurística (baixa cobertura efetiva)

Conclusão

- ▶ A abordagem híbrida (heurística + MILP) equilibra eficiência computacional e solução de alta qualidade.
- ▶ Testada com 328 imagens reais (dez/2024 - abr/2025), cobrindo APAs sob diferentes níveis de nuvem.
- ▶ Heurística filtra e agrupa candidatos (foco em Sentinel-2); MILP refina solução com penalização para SAR.
- ▶ Solução final maximiza cobertura válida, respeitando restrições e custos.

Abordagem híbrida → Maximiza cobertura útil com recursos limitados

Referências

-  Kuck et al. (2024). Otimização da aquisição de dados SAR para monitoramento de áreas com alto risco de desmatamento no bioma Amazônia com uso de algoritmos genéticos.
-  Zhao et al. (2019). Programação de satélites de observação da Terra com restrições.
-  Li et al. (2018). Heurística construtiva para minimizar costuras visíveis entre imagens adjacentes.
-  Wang et al. (2021). Algoritmo guloso para otimizar a cobertura espacial.