



Teste piloto da avaliação de uso de drone para a identificação, contagem de cajueiros e o seu potencial de produção

Relatório Final

S.N. Lisboa, C. Grinand, C. De Rouvroy, J.B. Roelens
Setembro 2022



ACAMAZ

O projecto ACAMAZ é financiado pela Agência Francesa de Desenvolvimento (AFD), trabalha em parceria com o Instituto de Amêndoas de Moçambique, IP (IAM, IP), e o Ministério da Agricultura e Desenvolvimento Rural (MADER). Tem como objectivo contribuir para o reforço da cadeia de valor do caju e da macadâmia, a fim de aumentar as rendas dos pequenos agricultores, promover o processamento nacional e sua integração no mercado internacional, e melhorar a competitividade e a sustentabilidade econômica, ambiental e social da produção de castanha de caju dentro de um quadro institucional mais forte e transparente liderado pelo IAM, IP.

Nitidae

Nitidae é uma organização não governamental de origem francesa, que tem como objectivo de desenvolver projectos que associam a preservação do meio ambiente e reforça as economias locais. Com uma equipe de 100 colaboradores, a Nitidae desenvolve projectos em Madagascar, Burkina Faso, Moçambique e Costa de Marfim.

Também fornece experiência técnica às empresas agroalimentares e instituições públicas para melhorar a performance das cadeias de valores agrícolas, diminuir o impacto ambiental e estimular o desenvolvimento econômico local juntamente com a organização de produtores e comunidades locais.

Nitidae está em Moçambique desde 2013, desenvolvendo projectos de cadeias de valor como o ACAMAZ (Apoio a Cadeia de Valor do Caju em Moçambique), programas de conservação da biodiversidade com o projecto Legado Namuli para a preservação do Monte Namuli no Gurue, pagamentos para esquemas de serviços ecossistémicos (REDD+), ou projectos como o LUCCIA (Land Use and Climate Change Impact Assessment in Mozambique).

Mais informação pode ser encontrada no website <https://www.nitidae.org/>.

Instituto de Amêndoas de Moçambique, IP (IAM, IP)

O Instituto de Amêndoas de Moçambique, IP (IAM, IP), anteriormente Instituto de Fomento do Caju (INCAJU), é uma instituição de direito público, criada em Dezembro de 1997 e responsável perante o Ministério da Agricultura e Desenvolvimento Rural. Em 2020 as suas atribuições, poderes, organização e funcionamento foram redefinidos e o INCAJU foi mesmo renomeado IAM.

Os seus objectivos institucionais relativamente à promoção do sector do caju foram mantidos com a adição de uma nova missão: o desenvolvimento da cadeia de valor da macadâmia em Moçambique. A missão da instituição é "promover, de forma sustentável, o aumento da produção e qualidade dos frutos secos, a organização da comercialização e a estruturação da indústria transformadora, em coordenação com todas as entidades interessadas, com o objectivo de transformar as vantagens comparativas do País em vantagens competitivas, aumentar o rendimento das famílias rurais, criar empregos e contribuir para a melhoria da balança de pagamentos".

As suas atribuições incluem a definição de políticas e estratégias, a coordenação da cadeia de valor do caju das partes interessadas, bem como as de outras amêndoas sob a sua tutela. As suas competências incluem o apoio à produção de castanha de caju, a promoção interna e externa da indústria da castanha de caju e outras amêndoas. É também responsável pela elaboração e implementação, em coordenação com instituições especializadas nacionais e internacionais, da investigação, da transferência de tecnologias para a produção, comércio e transformação da castanha de caju, incluindo a maçã de caju.

Mais informações podem ser encontradas no website <https://iam.gov.mz/>.

Índice

Lista de Figuras	1
Lista de Tabelas	1
Sumário Executivo	2
1. Contexto	1
1.1. Objectivos específicos	1
2. Análise de Drone	1
2.1. Imagens drone recolhidas no terreno	1
2.2. Processamento dos ortomosaicos e Modelo de Superfície Digital (MSD)	3
2.2.1. Processamento das imagens de drone	3
2.2.2. Mapeamento automático dos cajueiros com imagens de drone	3
2.3. Avaliação da qualidade de detecção automática de cajueiros	6
3. Estimativa do potencial de produção usando imagens drone	7
4. Metodologia de mapeamento de pomares usando imagens satélites	9
5. Conclusão	12
6. Perspectivas	13
7. Plano de transferência	14
7.1. Proposta de formação	14
7.2. Os principais requisitos para participar neste treinamento	15
7.3. Avaliação das necessidades para o uso do drone	15

Lista de Figuras

Figura 1: Locais de realização dos vôos e medição de árvores no distrito de Gilé e de Pebane, Província da Zambézia (agosto e setembro de 2021).	2
Figura 2: Ortomosaico final da imagem de 100m de altura de vôo na comunidade de Namurrua.	3
Figura 3: Etapas e os principais resultados obtidos a cada fase de mapeamento automático de cajueiros, usando imagens drone.	4
Figura 4: Ilustração dos passos para gerar o modelo digital de copa (MDC) e o resultado está ilustrado pelo exemplo do mapa à direita, referente a área de Namipissa (Mamala), no distrito de Gilé.	4
Figura 5: Ilustração dos passos para gerar o topo das árvores (altura total) e a delimitação da copa. O resultado está ilustrado no mapa à direita referente a área de Namipissa (Mamala), Distrito de Gilé (a escala está em metros).	5
Figura 6: Ilustração dos passos para gerar a detecção automática dos cajueiros e o resultado está ilustrado no mapa à direita referente a área de Namipissa (Mamala), Distrito de Gile.	5
Figura 7: Mapa final de detecção de árvores para a validação do mapa.	6
Figura 8: Correlação entre os dados dendrométricos medidos no terreno e os dados medidos com base nas imagens do drone.	7
Figura 9 : Curva de produção em função da idade. Dados de produção do IAM,IP (esquerda) e dados de produção da Nitidae (direita).	7
Figura 10: Imagem Planet de Setembro de 2021 recortada para a área de estudo, nos distritos de Gilé e Pebane na província da Zambézia (esquerda). Fluxograma da metodologia para o mapeamento dos pomares a escala distrital (direita).	9
Figura 11: Mapa de Uso e Cobertura de Terra da província de Zambézia utilizado para extrair as áreas agrícolas sobre o mapa de pomares oriundo da classificação da fusão de imagem Planet e Sentinel 2.	10
Figura 12: Mapa de pomares de cajueiros do distrito de Gilé e Pebane. (B) área central de Gilé vista na imagem satélite de alta resolução e (C) ilustração do pomar de cajueiros (com outras árvores) ocorrendo ao longo da estrada e povoados.	10

Lista de Tabelas

Tabela 1: Parâmetros do vôo em cada local nos distritos de Gilé e Pebane, província da Zambézia.	2
Tabela 2: Resultado das 133 árvores visitadas no terreno para verificar se coincidem ou não com o que foi ou não identificado como cajueiro no mapa.	6
Tabela 3: Estatísticas de avaliação do desempenho do modelo linear testado com base nos dados de produção do IAM,IP e da Nitidae.	8
Tabela 4: Estimativa da produção potencial por árvore, por hectare e total dos locais cobertos pelas imagens de drone, nos distritos de Gilé e Pebane.	8
Tabela 5: Áreas de pomares e potencial de produção dos cajueiros estimado por distrito.	11
Tabela 6: Orçamento geral para a transferência da metodologia ao pessoal técnico do IAM,IP.	15

Sumário Executivo

Um desafio importante do Instituto das Amêndoas de Moçambique (IAM, IP) e dos actores da cadeia de valor em geral é a avaliação precisa da produção de caju no país. O IAM, IP tem colhido dados de comercialização e dados de produção. Contudo, os actuais dados de produção têm sido colhidos no campo definitivo com base em amostras menos representativas a escala local, e o processo é bastante oneroso quando implementado a escala nacional. Com o avanço tecnológico, por exemplo os drones e imagens satélites, pode ser possível estimar a produção em larga escala e, por via disso, reduzir o custo e tempo de colheita de dados. Neste contexto, o projecto de Apoio à Cadeia de Valor do caju em Moçambique (ACAMAZ) realizou, nos distritos de Gilé e Pebane, Província da Zambézia, um teste piloto para avaliar o funcionamento de uma metodologia rápida de identificação e determinação do número de cajueiros usando técnicas de teledetecção (imagens drone e imagens satélites) e que seja capaz de estimar o potencial de produção da castanha de caju.

Neste âmbito, uma primeira missão foi realizada em Maio de 2021, no distrito de Gilé, para a formação teórica e prática, teste de aquisição de imagens com drone. Uma segunda missão de terreno foi realizada no fim do mês de agosto do mesmo ano, nos distritos de Gilé e Pebane, para a colheita de dados utilizando a metodologia afinada com base na primeira missão, durante a época de floração. O presente relatório apresenta os resultados finais compilando os resultados da primeira e segunda missão e inclusão da terceira fase do estudo referente ao mapeamento de pomares e estimativa do potencial de produção usando imagens satélites. Foram realizados voos de drone a 100 m de altura a uma área entre 20 e 40 hectares em 10 povoados dos distritos de Gilé e Pebane. Nos mesmos locais, foram medidas variáveis dendrométricas¹ ao nível do cajueiro tais como diâmetro da copa, diâmetro do tronco, altura total e outros dados como a idade e produção média declarada pelo produtor. Os mesmos dados dendrométricos medidos no terreno foram igualmente extraídos nas imagens drone obedecendo três etapas a designar: (i) desenvolvimento do modelo digital de copa; (ii) extração automática da altura e área da copa; e (iii) detecção automática de cajueiros. Estes dados foram usados para analisar a correlação com os determinados no terreno para posteriormente concluir se pudesse estimar as mesmas variáveis, mas de outros cajueiros dentro da imagem drone. Com os dados de drone, foi possível ajustar um modelo linear de produção usando o perímetro da copa, área da copa e altura do cajueiro como variáveis independentes. O mesmo modelo foi aplicado para estimar a produção média por hectare e o potencial de produção total a escala distrital. Para além das imagens drone, foram utilizadas também imagens satélites com objectivo de mapear e estimar as áreas de pomares de cajueiros.

Podemos salientar os principais resultados, **a correlação entre os dados dendrométricos medidos no terreno e medidos com imagens drone foi forte ($r > 0.78$) o que permitiu concluir que pudesse usar os dados extraídos nas imagens drone para identificar outros cajueiros na área de estudo. Por outro lado, o mapa de detecção dos cajueiros teve um nível de precisão muito satisfatório de mais de 80%**, avaliado com base em verificação aleatória no terreno de 133 árvores.

Com base nesses resultados, pode-se utilizar os dados de drone para estimar os parâmetros dos cajueiros bem como o potencial de produção de um pomar em função das hipóteses (por exemplo, 12 kg/árvore em média conforme os dados do IAM,IP) ou medição de produção no terreno.

O mapeamento dos pomares usando imagens satélites revelou que em Gilé tem mais pomares que Pebane e, conseqüentemente, maior potencial de produção. Em geral, a metodologia apresentou um desempenho satisfatório tendo sido possível aplicar com sucesso as três fases metodológicas desde utilização de dados de campo, dados de drone e dados de imagens satélites.

O estudo sendo piloto, apresentamos as nossas recomendações para que sejam consideradas no futuro: (1) Melhorar o modelo de estimativa de produção com medições de campo adicionais (por exemplo: curva de produção versus perímetro da copa), (2) Transferência de metodologia através de uma formação do pessoal do IAM, IP, e da Unidade de Monitoria, Relatório e Verificação (UMRV) do Fundo Nacional de Desenvolvimento Sustentável (FNDS) do MADER, (3) Continuar a testar a metodologia baseada em satélites usando diferentes sensores (ópticos, radar, etc.), (4) Estimativa do impacto da cadeia de valor na questão do sequestro de carbono.

¹ Variáveis dendrométricas são valores numéricos referentes às dimensões das árvores, como o diâmetro do tronco, altura, diâmetro da copa, volume.

1. Contexto

Um desafio importante do Instituto das Amêndoas de Moçambique (IAM, IP) e dos actores da cadeia de valor em geral é a avaliação precisa da produção no país. Constatam-se a cada ano, disparidades crescentes entre a produção nacional estimada e a produção confirmada pelas estatísticas do subsector do caju (quantidades processadas, exportadas etc.), sendo claro que o consumo nacional informal ou a exportação ilegal da castanha de caju pode constituir uma parte importante desta produção que, de facto, é difícil estimar.

A produção nacional depende de vários factores que incluem a ocorrência de doenças, condições climáticas ou impactos de eventos climáticos extremos e, com certeza, do número de cajueiros produtivos no país e do manejo (poda, tratamento, etc) realizado. Neste sentido, o IAM, IP, já iniciou através do registo dos produtores e de seus pomares na base de dados ConnectCaju, na primeira fase abrangendo as províncias de Cabo Delgado, Nampula e Zambézia, um esforço importante para entender melhor a localização das áreas de produção de caju em cada zona do país. Contudo, considerando as vastas zonas do país e as vias de difícil acesso, existe o interesse de desenvolver metodologias complementares para estimar a produção de caju à escala nacional.

Neste contexto, o projecto de Apoio à Cadeia de Valor do caju em Moçambique (ACAMAZ) realizou, no distrito de Gilé e de Pebane, Província da Zambézia, um teste piloto para avaliar o funcionamento de uma metodologia rápida de identificação e determinação do número de cajueiros usando técnicas de teledeteção (imagens drone e imagens satélites) e que seja capaz de estimar o potencial de produção da castanha de caju numa determinada zona do país.

Neste âmbito, uma primeira missão foi realizada no mês de maio de 2021 (ver **Relatório Preliminar 1**), onde foram determinados os critérios de voos e os locais para a recolha de imagens durante o período da floração para permitir melhor distinção visual entre cajueiros e outras árvores. Uma segunda missão de terreno foi realizada em agosto do mesmo ano, nos distritos de Gilé e Pebane, para a colheita de dados utilizando a metodologia afinada com base na primeira missão que culminou com o **Relatório Preliminar 2**.

O presente relatório apresenta os resultados finais compilando os resultados da primeira e segunda missão e com mais ênfase da terceira fase do estudo referente ao teste da metodologia de identificação e contagem automática de cajueiros utilizando imagens drone e imagens satélites.

1.1. Objectivos específicos

Os objectivos específicos deste teste piloto são os seguintes:

- Estabelecer uma metodologia de identificação/mapeamento de cajueiros com o uso do drone;
- Avaliar a correlação entre as variáveis dendrométricas de cajueiro medidas no terreno e determinadas com imagens drone;
- Avaliar o potencial de produção de castanha de caju na zona piloto do projecto ACAMAZ usando imagens drone e imagens satélites;
- Elaborar um plano de transferência da metodologia aplicada neste estudo ao pessoal técnico do IAM, IP.

2. Análise de Drone

2.1. Imagens drone recolhidas no terreno

As imagens do drone utilizadas para o estudo foram recolhidas na segunda missão no terreno em Agosto de 2021, nos distritos de Gilé e Pebane (ver Relatório 2). Os locais foram seleccionados em

conjunto com o IAM, IP depois da primeira missão em Maio de 2021. A **Figura 1** abaixo apresenta os locais onde foram realizados os vôos.

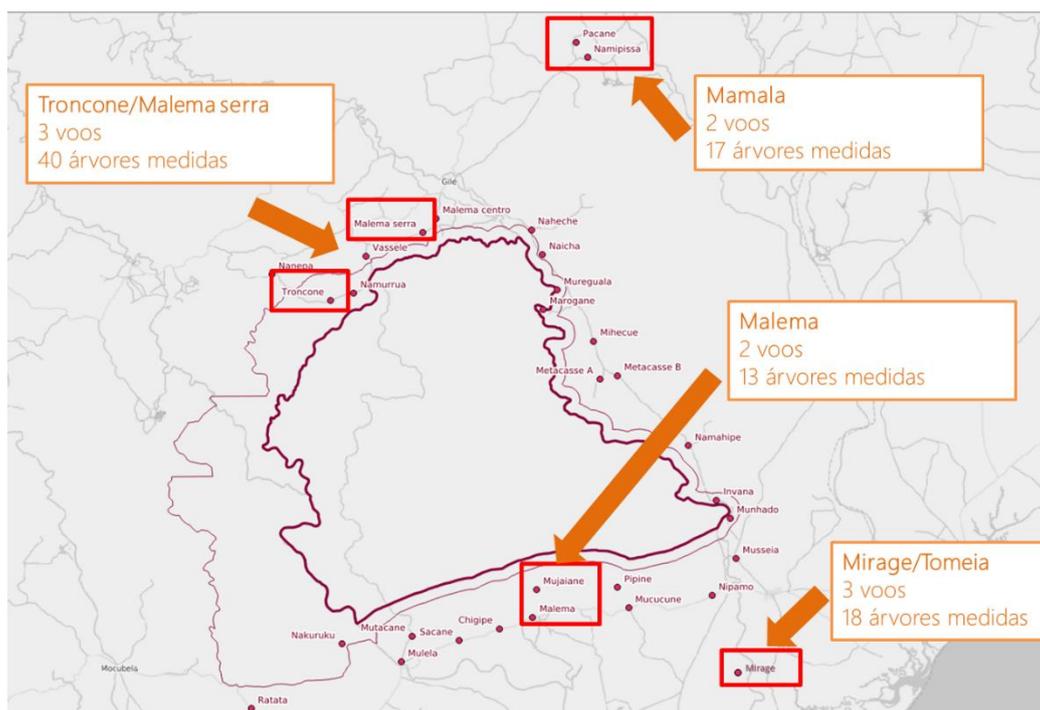


Figura 1: Locais de realização dos vôos e medição de árvores no distrito de Gilé e de Pebane, Província da Zâmbia (agosto e setembro de 2021).

Os parâmetros dos vôos, apresentados abaixo (**Tabela 1**), foram definidos com base nas recomendações da experiência da primeira missão:

- As áreas de vôo devem ser entre **20 e 40 hectares**, com vista a captar maior variabilidade dos cajueiros quanto a idade e tamanho (arquitetura da árvore e nível de detalhe das folhas);
- Os vôos devem ser realizados em dias **de muita radiação solar de modo a limitar as sombras, de preferência, das 8:00 às 15:00**.
- A altitude de vôo deve ser **de 100 m**, uma altura que permite abranger maior área e sem perder a nitidez necessária para diferenciar os cajueiros das mangueiras.

Tabela 1: Parâmetros do vôo em cada local nos distritos de Gilé e Pebane, província da Zâmbia.

Vôo	Localidade	Data	Altura de vôo (m)	Área prog (ha)	Duração (min', sec'')	Nr de imagens	Tamanho (MB)	Bateria usada	Completo?	Sobreposição (long/lateral)	Imagens alinhadas	Orthorectificação
1	Troncone1	24 agosto	100	50	25'00"	526	2.49	2	sim	65% / 75 %	concluído	concluído
2	Troncone2	24 agosto	100	40	20'00"	334	1.59	2	sim	65% / 75 %	concluído	concluído
3	Não Recua 1	25 agosto	100	73.7	22'26"	446	2.08	2	sim	65% / 75 %	concluído	concluído
4	Não Recua 2	25 agosto	100		11'25"	203	978	1	sim	65% / 75 %	concluído	concluído
5	Tomeia	25 agosto	100	53	23'12"	450	2.11	2	sim	65% / 75 %	concluído	concluído
6	Namagulane	26 agosto	100	51	27'04"	817	3.87	2	sim	65% / 75 %	concluído	concluído
7	Mujaiane	26 agosto	100	35	15'02"	282	1.32	1	sim	65% / 75 %	concluído	concluído
8	Pacane	24 setembro	100	63	23'01"	477	2.23	2	sim	65% / 75 %	concluído	concluído
9	Namipissa	24 setembro	100	23	14'00"	243	1.14	1	sim	65% / 75 %	concluído	concluído
10	Malema serra	13 setembro	100	28.6	15'00"	319	1.49	1	sim	65% / 75 %	concluído	concluído

2.2. Processamento dos ortomosaicos e Modelo de Superfície Digital (MSD)

2.2.1. Processamento das imagens de drone

Depois de realizar os vôos, fez-se o processamento das imagens (**Figura 2**). Os detalhes da metodologia de processamento de imagens do drone constam no segundo relatório da missão. A Figura 2 ilustra a imagem finalizada do processamento (ortomosaico). O ortomosaico tem uma resolução final de 3 cm, permitindo observar muitos detalhes, incluindo: tipos de folhagem, rugosidade do solo, etc. Observa-se claramente as árvores de cajueiros de diferentes tamanhos maioritariamente próximas às casas, mas também pode-se observar árvores diferentes de cajueiros como mangueiras ou árvores nativas. Durante o mesmo processo, para além do ortomosaico, é também produzido um Modelo de Superfície Digital (MSD). O MSD é uma representação da elevação da parte superior da superfície, incluindo o solo ou a vegetação.

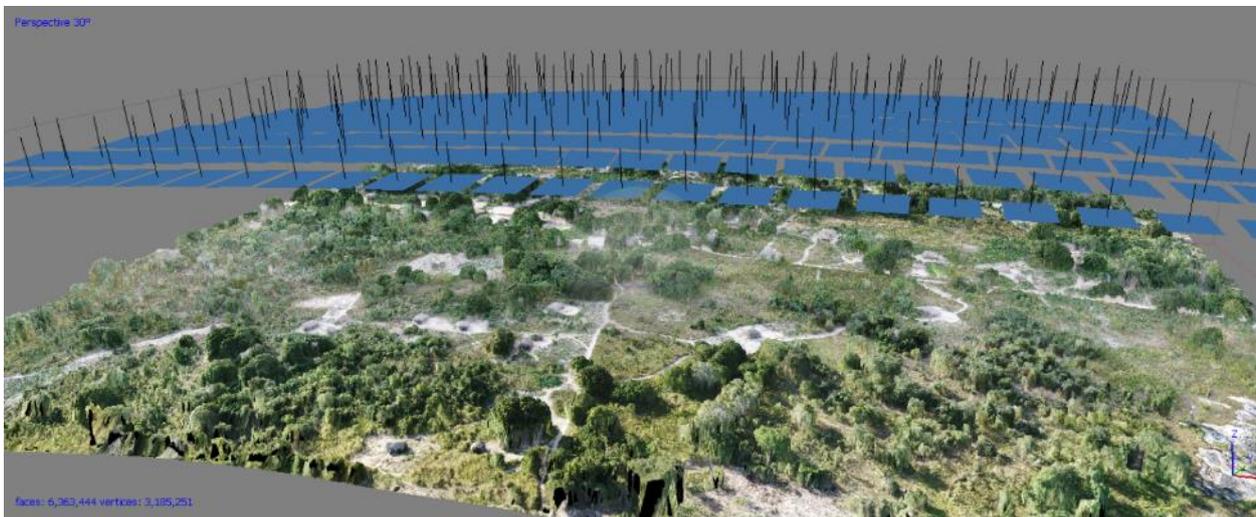


Figura 2: Ortomosaico final da imagem de 100m de altura de vôo na comunidade de Namurrua.

Após obter os ortomosaicos, *QGIS* e *Google Earth* foram usados para visualizar e manipular as imagens. Com a imagem pronta, prosseguiu-se com as estimativas da altura e a área da copa de forma manual no *QGIS*. Não existia um algoritmo que permitia a contagem de cajueiros, portanto, a contagem foi efectuada manualmente por cada imagem processada.

No fim deste processo, foi criada uma base de dados espacial de copas dos cajueiros delimitados, para cada um dos 10 sítios, representando 2.400 cajueiros.

2.2.2. Mapeamento automático dos cajueiros com imagens de drone

A abordagem metodológica aqui sugerida, visa apresentar os principais passos para o mapeamento dos cajueiros via imagens de drone:

- **Etapa 1:** Produção do modelo digital de copa a partir do MSD;
- **Etapa 2:** Extração automática do topo da árvore e delimitação da copa;
- **Etapa 3:** Detecção automática de cajueiros.

A **Figura 3** resume as três (3) etapas implementadas com *QGIS* e *R*. A figura apresenta também os resultados de cada etapa até a obtenção do resultado final do mapeamento com imagens de drone.

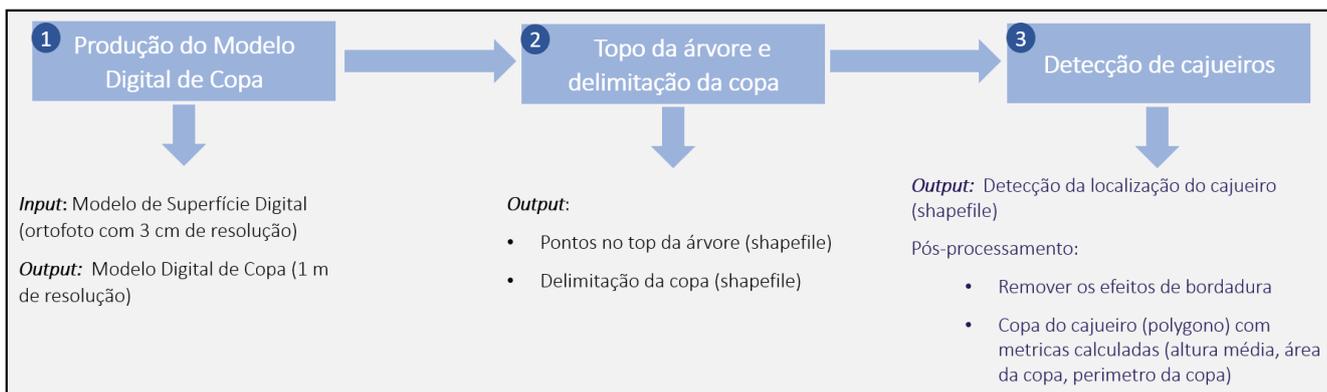


Figura 3: Etapas e os principais resultados obtidos a cada fase de mapeamento automático de cajueiros, usando imagens drone

• **Etapa 1: Produção do Modelo Digital de Copa**

Os passos detalhados para obter o Modelo Digital de Copa (MDC) constam na **Figura 4**.

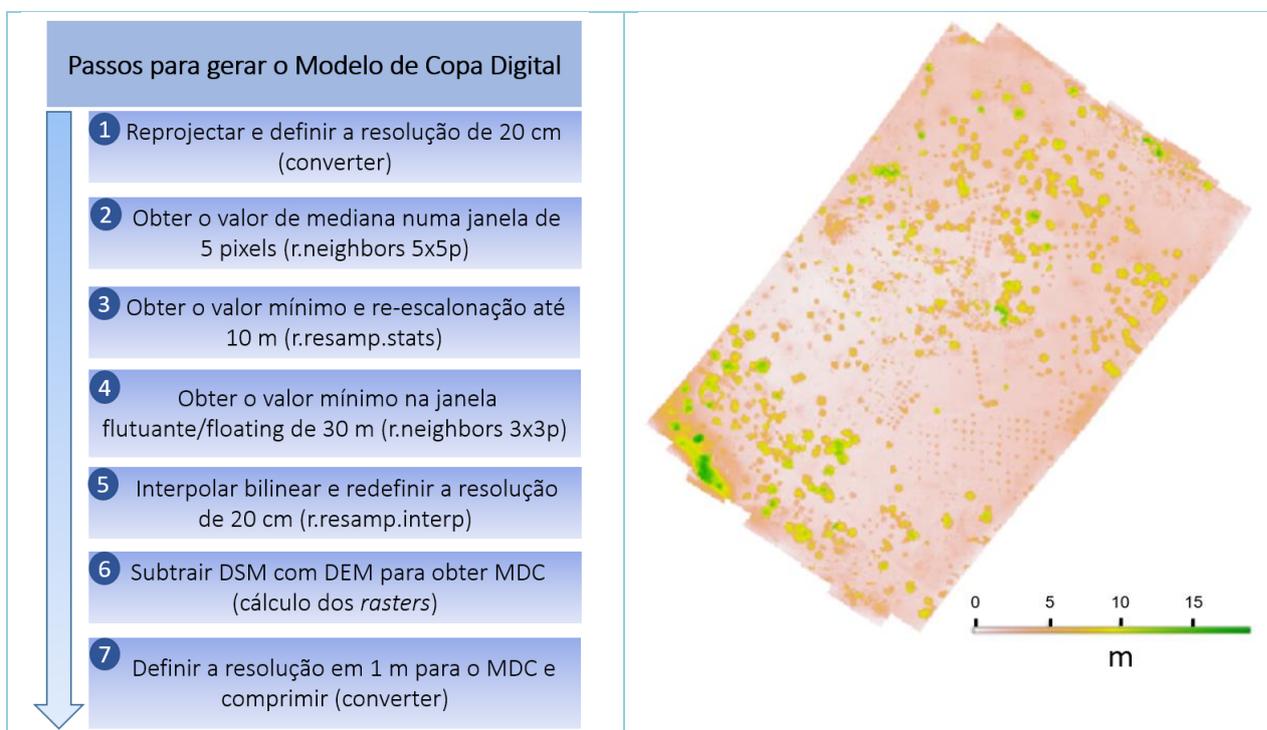


Figura 4: Ilustração dos passos para gerar o modelo digital de copa (MDC) e o resultado está ilustrado pelo exemplo do mapa à direita, referente a área de Namipissa (Mamala), no distrito de Gilé.

Para obter o MDC precisa do Modelo de Elevação Digital (DEM) e o Modelo de Superfície Digital (MSD). Os passos resumem-se, essencialmente, em garantir primeiro a consistência da projeção e da resolução espacial (passo 1), e depois do pré-processamento estatístico do DEM (passo 2 – 5) que resultará na criação do MSD. No fim deste procedimento é gerado o MDC com uma resolução espacial de 1 m.

• **Etapa 2: Extração automática do topo da árvore e delimitação da copa**

Após a primeira etapa, como ilustrado na **Figura 5**, consiste em utilizar o MDC (passo 1), extrair a altura e a copa de todas as árvores sem nenhuma distinção (passo 2 - 4), converter para *shapefile* o mapa de copa (passo 5) e exportar (passo 6).

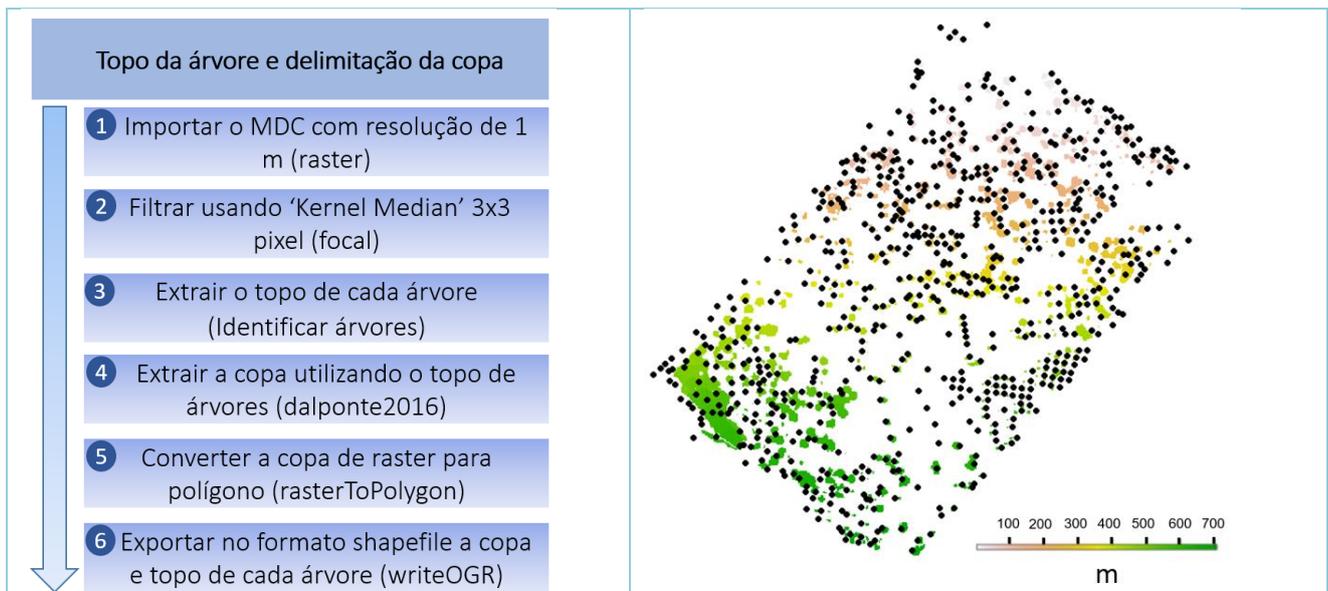


Figura 5: Ilustração dos passos para gerar o topo das árvores (altura total) e a delimitação da copa. O resultado está ilustrado no mapa à direita referente a área de Namipissa (Mamala), Distrito de Gilé (a escala está em metros).

• **Etapa 3: Detecção automática de cajueiros**

A detecção automática dos cajueiros é a etapa final do mapeamento de cajueiros usando imagens de drone. Nesta etapa aplicou-se algoritmos de modelação espacial no software R. Salientar que esta etapa não foi implementada no QGIS devido a limitação do programa para estes efeitos. Contudo, o QGIS foi necessário para preparar os dados e elaborar layouts.

Os procedimentos consistem em utilizar os resultados da etapa 2 e combinar com os polígonos de copas de digitalização manual conforme foi descrito no relatório 2. O resultado final da detecção automática de cajueiros está ilustrado na **Figura 6**. De acordo com este mapa, na escala de 0 a 1 indica a probabilidade de detecção de cajueiro, quanto mais próximo a 1 maior é a probabilidade de indicar a detecção de cajueiro. Neste sentido, observa-se que quase todos os cajueiros foram detectados representados na cor verde.

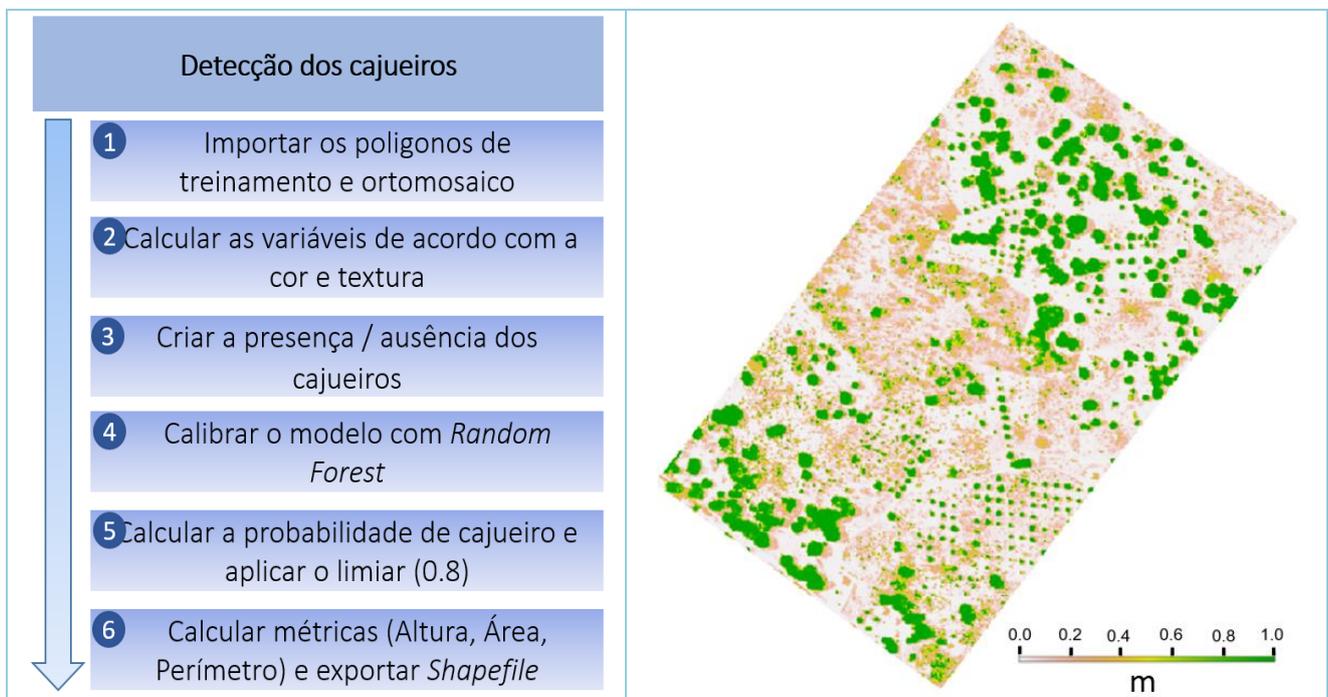


Figura 6: Ilustração dos passos para gerar a detecção automática dos cajueiros e o resultado está ilustrado no mapa à direita referente a área de Namipissa (Mamala), Distrito de Gilé.

2.3. Avaliação da qualidade de detecção automática de cajueiros

A detecção automática representada no mapa de probabilidades está sujeita a incertezas, daí que é necessário avaliar a sua qualidade. Neste sentido, foi feita a avaliação da precisão do mapeamento utilizando medições adicionais no terreno nos meses de Dezembro de 2021 e Fevereiro de 2022. O trabalho de verificação no terreno consistiu em coletar dados aleatoriamente em dois locais dos voos (Troncone e Tomeia). Neste caso, 133 árvores foram medidos e são compostas por cajueiros e outras árvores (como mangueiras e espécies nativas). Em cada uma destas medições, foi recolhido um ponto GPS da árvore, a descrição da árvore e uma imagem (ver Figura 7).

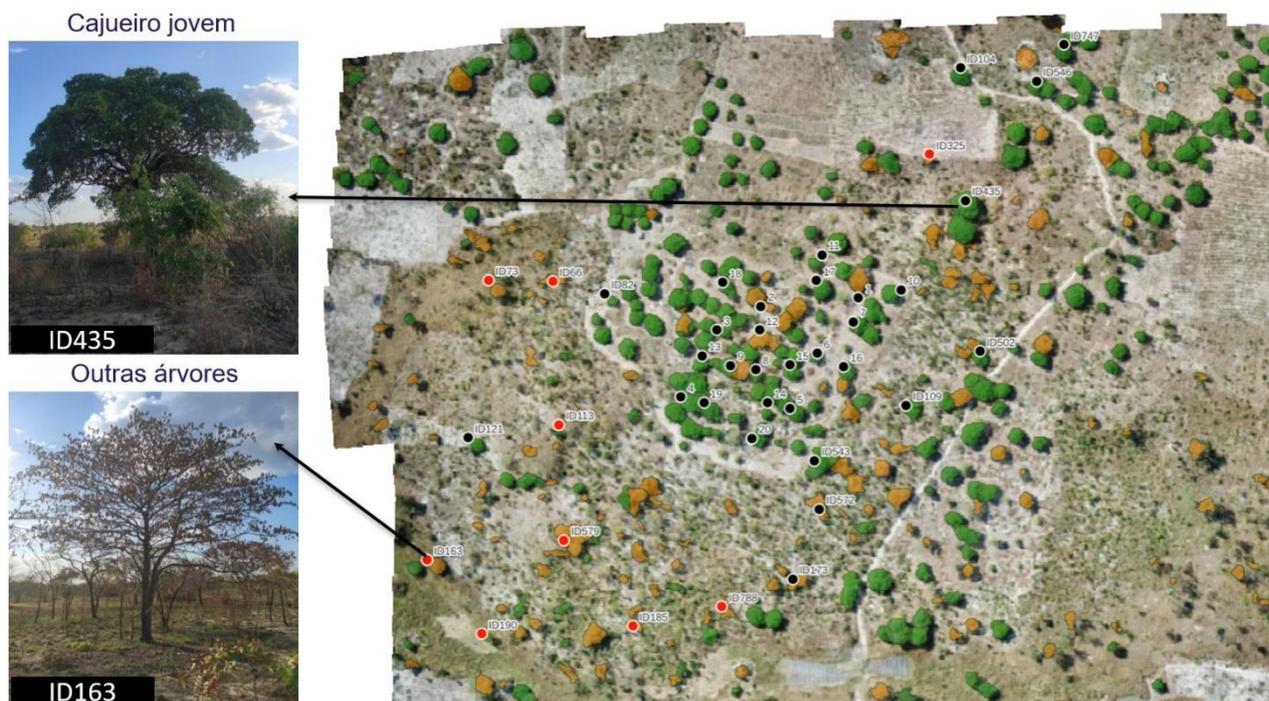


Figura 7: Mapa final de detecção de árvores para a validação do mapa.

Tabela 2: Resultado das 133 árvores visitadas no terreno para verificar se coincidem ou não com o que foi ou não identificado como cajueiro no mapa.

Identificação de árvores no terreno	Mapeamento com Drone		
	Outras árvores (mangueira ou espécie nativa)	Cajueiros	Total
Outras árvores	32	10	42
Cajueiros	25	66	91
Total			133

De acordo com as análises (Tabela 2), os resultados indicam que a precisão de detecção de cajueiros usando drone é de 87%, ou seja, **87% dos cajueiros detectados através do mapeamento correspondem realmente a cajueiros no terreno**. Além disso, houve casos em que teve falsos negativos, ou seja, detecção de outra árvore no mapa, mas que no terreno é cajueiro. Isto indica que a metodologia tem uma taxa muito boa de detecção de cajueiro, mas tende a subestimar o número real de cajueiros.

3. Estimativa do potencial de produção usando imagens drone

Para estimar a produção usando imagens drone foi necessário primeiro encontrar a correlação entre as três variáveis dendrométricas (diâmetro da copa, perímetro da copa e altura total do cajueiro) medidas no terreno e as mesmas com base na imagem drone. A **Figura 8** ilustra os resultados dessas correlações tendo revelado que todas as correlações feitas foram fortes com o *coeficiente de determinação linear de Pearson (R²)* acima de 0.7.

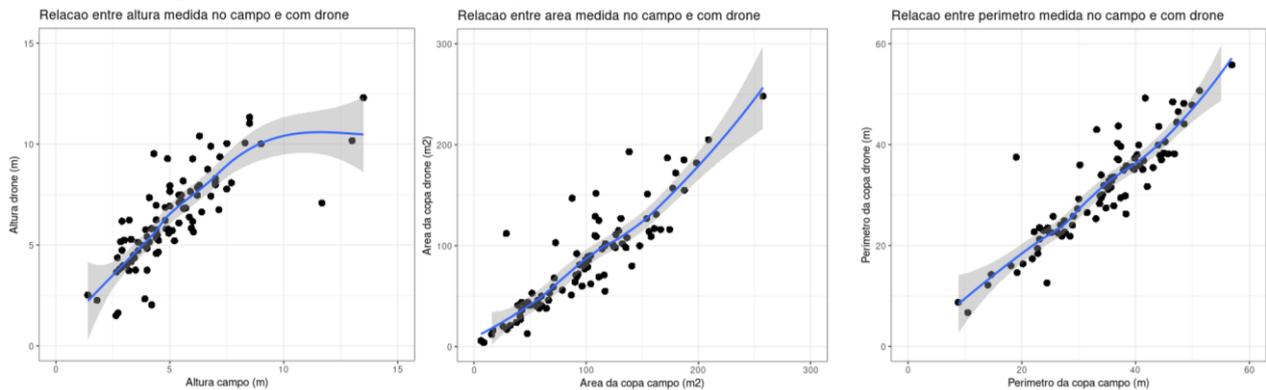


Figura 8: Correlação entre os dados dendrométricos medidos no terreno e os dados medidos com base nas imagens do drone.

Com base nesses resultados, conclui-se que das próximas vezes não vai precisar medir dados no terreno para avaliar a precisão dos mesmos dados obtidos com base na imagem do drone. Neste sentido, pode-se utilizar os dados de drone para estimar os parâmetros dos cajueiros (p.e. testar a correlação com o rendimento de cada cajueiro,). Por essa razão, utilizou-se os dados de drone para desenvolver o modelo de produção.

Para desenvolver o modelo de produção foram considerados duas fontes de dados de produção a designar:

- (i) dados de produção gerados pelo IAM,IP mediante um ensaio que consistiu em registrar a produção no terreno nas idades entre 5 e 10 anos e acima desta idade os valores foram estimados (**Figura 9, esquerda**);
- (ii) dados de produção gerada pela Nitidae durante o trabalho de campo. Os dados representam a produção média que o produtor declarou mediante uma consulta no terreno (**Figura 9, direita**).

As duas fontes foram utilizadas para testar a qualidade do modelo de produção ajustado com variáveis de imagens drone.

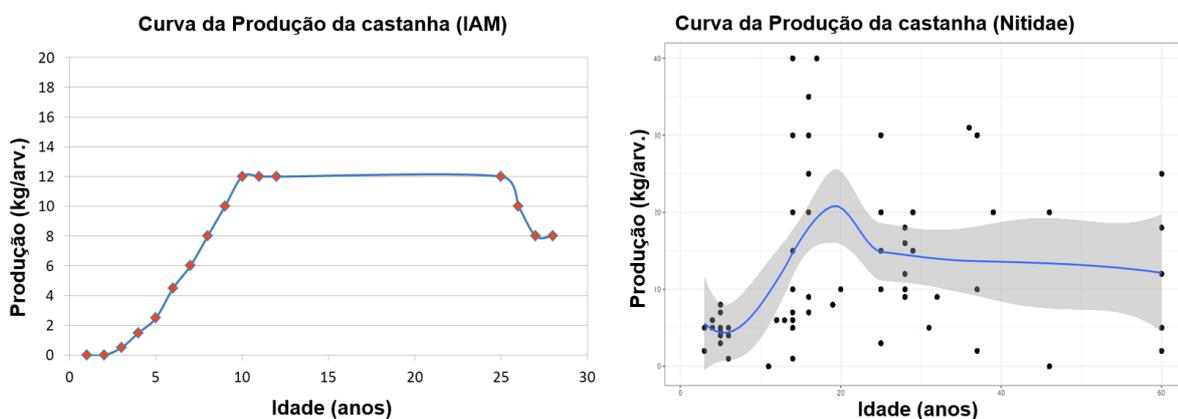


Figura 9 : Curva de produção em função da idade. Dados de produção do IAM,IP (esquerda) e dados de produção da Nitidae (direita).

A **Tabela 3** apresenta os resultados do ajuste do modelo de produção usando dados do IAM,IP (modelo 1) e da Nitidae (modelo 2). Os resultados indicam que o modelo 1 foi o que teve melhor desempenho, sobretudo para a área da copa e o perímetro da copa. Por outro lado, o modelo 2 não teve nenhuma variável com efeito significativo sobre a produção. Apesar da significância do modelo 1, importa realçar que o mesmo apresentou um coeficiente de determinação bastante baixo ($R^2 = 0.23$), contudo aceitável. O valor de R^2 indica que cerca de 23% da variabilidade da produção na área de estudo é explicada pela variabilidade do perímetro e a área da copa, as restantes variações são explicadas por outros factores não incluídos no modelo como, por exemplo, tipos de solo, doenças, clima e manejo (p.e. tratamento químico, poda, injúrias mecânicas etc).

Tabela 3: Estatísticas de avaliação do desempenho do modelo linear testado com base nos dados de produção do IAM,IP e da Nitidae.

Variáveis	Modelo 1 (Baseado em dados do IAM,IP)		Modelo 2 (Baseado em dados da Nitidae)	
	Coeficiente	p-value	Coeficiente	p-value
(Intercept)	-3.18148	0.229975	-1.21729	0.884
Área da copa	-0.10458	0.003396 **	0.02114	0.833
Perímetro da copa	0.63177	0.000566 ***	0.39983	0.439
Altura	0.22723	0.429650	-0.31207	0.628
Coeficiente de determinação: R^2	0,23		0.18	

O modelo 1, na base da equação a seguir ($Produção\ (kg/arvor) = -3.18148 - 0.10458 \times Area_Copa + 0.63177 \times Perímetro_Copa + 0.22723 \times Altura_Copa$) foi aplicado para estimar a produção nas áreas de cobertura de drone nos distritos de Gilé e Pebane (ver **Tabela 4**).

Tabela 4: Estimativa da produção potencial por árvore, por hectare e total dos locais cobertos pelas imagens de drone, nos distritos de Gilé e Pebane.

Locais de imagem Drone	Distrito	Superfície do pomar identificado (ha)	Densidade de cajueiros (arv./ha)	Produção média potencial (kg/arv.)	Total de produção potencial (kg)	Produção Média potencial (kg/ha)
NAMIPISSA (Mamala)	Gilé	15,1	16,7	15,2	3850,9	254
PACANE (Mamala)	Gilé	5,3	23,9	11,5	1238,9	232
TRONCONE 1 (Nanhope)	Gilé	1,9	24,2	16,4	769	396
TRONCONE 2 (Nanhope)	Gilé	14,1	14,9	17,8	3925,1	278
MUJAIANE (Malema)	Pebane	7,7	23,8	12	2191,7	285
NÃO RECUA (Mirage)	Pebane	33,5	5,5	7,1	1301,8	39
TOMEIA (Tomeia)	Pebane	15,4	14,6	13,8	4143,8	269
Total		93	18	13	17421	251
Coeficiente de Variação (%)		11	38	28	8	43
Intervalo de Confiança a 95%		83.4 – 103.6	11.6 – 24.4	9.7 – 16.3	16076.8 – 18765.2	152.1 – 349.9

Nota-se que,

- Não Recua apresenta uma densidade baixa por causa da presença de muitos cajueiros jovens de menos de 5 anos na área identificada, que não foram detectados. Assim, o resultado neste local é discutível.
- A partir da área da copa, perímetro da copa e altura da copa, o modelo pode determinar uma produção média potencial por hectare, nos locais de imagem de drone.

4. Metodologia de mapeamento de pomares usando imagens satélites

Para o mapeamento dos pomares de cajueiro, foi utilizada imagem Planet e Sentinel 2, ambas de sensor óptico, recordadas para os distritos de Gilé e Pebane, área de influência do projecto ACAMOZ conforme ilustra na **Figura 10**. A direita da mesma figura apresenta o fluxograma da metodologia de processamento de imagem Planet (resolução espacial = 5 m) e Sentinel 2 (resolução espacial = 10 m) para mapear os pomares. Salientar que as imagens foram baixadas no mesmo mês e ano de levantamento de dados no terreno (Setembro de 2021).

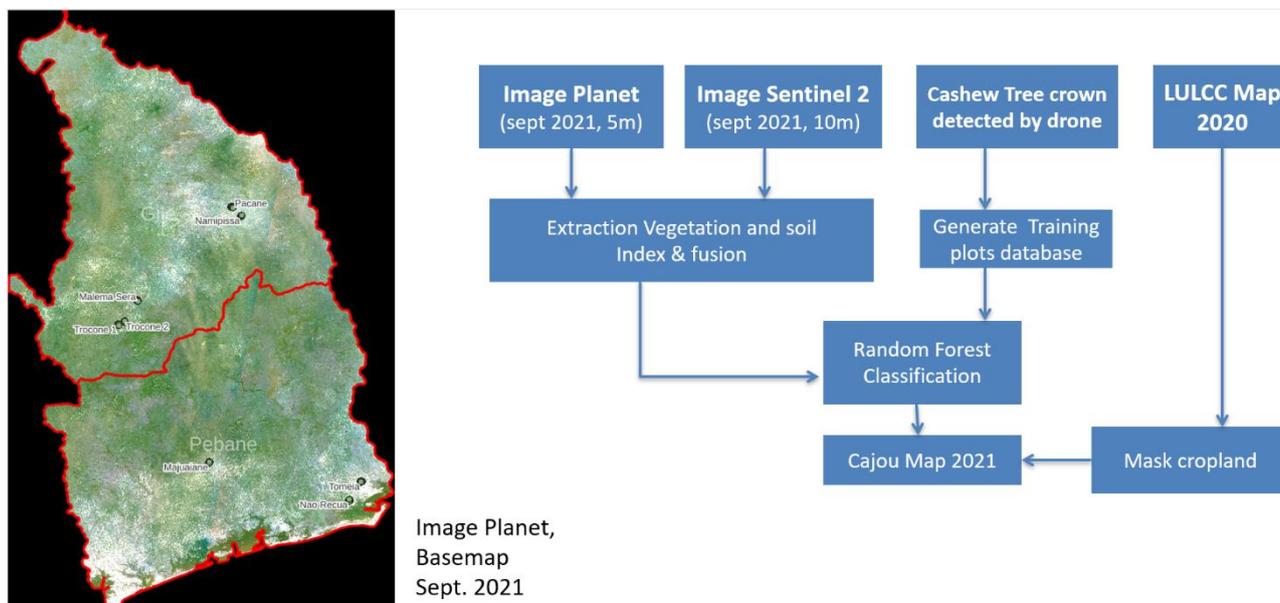


Figura 10: Imagem Planet de Setembro de 2021 recortada para a área de estudo, nos distritos de Gilé e Pebane na província da Zambézia (esquerda). Fluxograma da metodologia para o mapeamento dos pomares a escala distrital (direita).

O processamento consistiu em gerar, separadamente, os índices de vegetação e de solos e a posterior fez-se a fusão para obter uma única imagem de índices calculados. Uma vez obtida a imagem de índices, foi combinada com os polígonos das copas de cajueiros gerados pela imagem drone que serviu como dados de treinamento para a classificação da imagem satélite composta por índices. O resultado desta classificação é o mapa de pomares de cajueiros que a princípio pode incluir outras árvores e também pode mapear áreas pouco prováveis de ocorrência de cajueiros. Assim, para contornar esse problema, combinou-se o mapa de uso e cobertura de terra (**Figura 11**) com o mapa de pomares gerado com vista a extrair as áreas agrícolas. Este procedimento foi implementado com a suposição de que os pomares geralmente ocorrem concomitantemente nas áreas agrícolas e próximas da estrada e povoados.

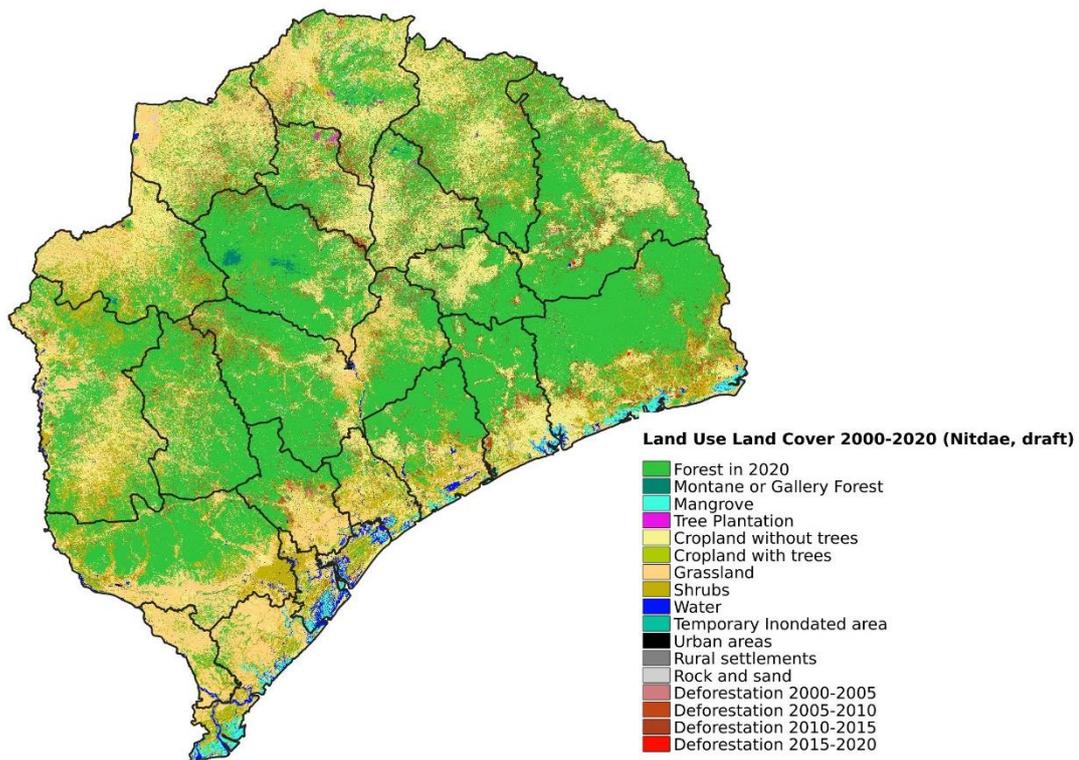


Figura 11: Mapa de Uso e Cobertura de Terra da província de Zambézia utilizado para extrair as áreas agrícolas sobre o mapa de pomares oriundo da classificação da fusão de imagem Planet e Sentinel 2.

O resultado do mapeamento dos pomares de cajueiros é apresentado na **Figura 12**. O mapa indica que os dois distritos detêm áreas de pomares consideravelmente extensas.

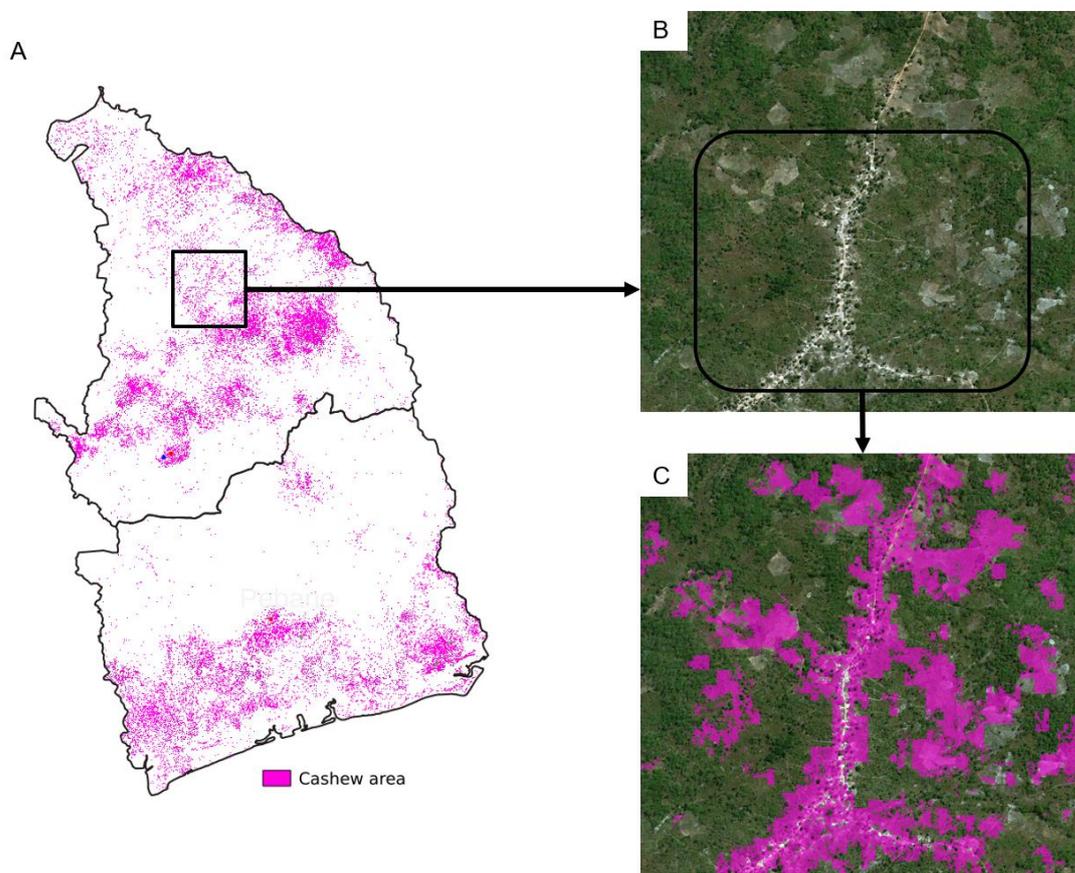


Figura 12: Mapa de pomares de cajueiros do distrito de Gilé e Pebane. (B) área central de Gilé vista na imagem satélite de alta resolução e (C) ilustração do pomar de cajueiros (com outras árvores) ocorrendo ao longo da estrada e povoados.

No distrito de Pebane, o mapa ilustra que os pomares ocorrem mais na zona costeira e tendem a reduzir na medida que se avança para o interior do distrito, isso pelo facto de ter o Parque Nacional de Gilé (PNAG) nesta área (**Figura 12A**). Enquanto no distrito Gilé, os pomares ocorrem de forma dispersa e em quase todo o distrito, com mais presença na parte norte do PNAG (**Figura 12A**). Este padrão de distribuição reflete a realidade no terreno.

A **Figura 12B** é a imagem de alta resolução ampliada na região central do distrito de Gilé, enquanto a **Figura 12C** ilustra o pomar de cajueiros por cima da imagem de alta resolução. Esta área demonstra que, de facto, os pomares ocorrem ao longo das estradas e áreas de assentamentos humanos, todavia os pomares não representam exclusivamente aos cajueiros, mas sim mistura com mangueiras e outras árvores típicas da região.

Os padrões de distribuição de pomares nos dois distritos representam uma área de cerca de 107.500 ha para Gilé e 80.900 ha para Pebane e quando aplicado a proporção de cajueiros em relação as mangueiras e outras árvores, a área de pomares de cajueiros passou para 91.060 e 66.103 ha para Gilé e Pebane, respectivamente. Utilizando a produção média por cajueiro, obteve-se uma estimativa da produção potencial de 7.484 e 5.433 toneladas para o distrito de Gilé e Pebane, respectivamente (**Tabela 5**). A produção foi sobrestimada tendo como referência a reportada pelo IAM, IP. Contudo, a mesma pode ser realística se esta for comparada com produção total que muitas vezes não é captada nas estatísticas do sector.

Tabela 5: Áreas de pomares e potencial de produção dos cajueiros estimado por distrito.

Distrito	Área dos pomares (ha)	Proporção de cajueiros em relação a mangueiras	Produção média potencial ponderada (kg/ha)	Área dos Pomares	Potencial de produção dos cajueiros 2021 (tons)**
Gilé	107 509	0.847	104.2*	91 060	7 484
Pebane	80 909	0.817	82.2	66 103	5 433
Total	188,418.0			157 163	14 967

(*) este valor não foi aplicado para estimar o potencial de produção por ser muito aquém do esperado devido a amostragem.

(**) produção estimada com base na produção média potencial ponderada de 82.2 kg/ha para Gilé e Pebane.

Os valores de produção são uma mera estimativa e muitas vezes afectada pela qualidade de dados, erro do modelo utilizado e outros factores inerentes à própria região que não foram captados neste estudo. **No entanto, a metodologia aqui apresentada é consistente e capaz de gerar resultados válidos se utilizados dados de produção do terreno mais realísticos, precisos e representativos.**

5. Conclusão

A partir dos resultados e experiência apresentados acima e realizados durante este estudo, podemos tirar várias conclusões chave:

1. A correlação entre as variáveis dendrométricas do cajueiro medidas no terreno e determinadas com base na análise de imagens drone foram significativas e fortes. Esta conclusão é importante porque revela que nos próximos estudos não vai precisar fazer levantamentos no terreno para Gile e Pebane, bastando utilizar as métricas da imagem drone para determinar as variáveis dendrométricas dos cajueiros.
2. A metodologia de mapeamento automático de cajueiros usando imagens de drone revelou-se funcional e replicável, pois teve um bom nível de detecção dos cajueiros (precisão superior a 85%).
3. A metodologia aplicada neste estudo é completa na medida em que inclui três níveis de exploração: análises de dados de terreno, imagens de drone e imagens satélites. Os procedimentos foram desenvolvidos e integrados num Script R/Grass/QGIS e podem ser transferidos às partes interessadas.
4. O perímetro da copa dos cajueiros demonstrou ser a variável mais importante para a estimativa do rendimento ao nível do cajueiro.
5. A estimativa de produção reportada neste estudo deve ser encarada com a devida cautela, pois carece de dados mais precisos, consistentes e de grande representatividade.
6. A metodologia para mapear a área de cajueiro utilizando satélites é consistente, mas necessita de mais desenvolvimento.

6. Perspectivas

O presente trabalho visava testar metodologias de identificação e contagem automática de cajueiros utilizando imagens de drone e imagens satélites para posteriormente avaliar o seu potencial de produção. Contudo, o exercício revelou-nos que têm limitações.

Neste contexto, apresentamos as nossas recomendações:

1. **Melhorar o modelo de estimativa de produção com medições de campo adicionais** (por exemplo, curva de produção versus perímetro). O actual modelo de produção desenvolvido neste estudo tem limitações de aplicação porque foi gerado com poucos cajueiros e não completamente representativos à situação local. Além disso, a produção é afectada por factores naturais (solos, clima, doenças) e antropogénicos (maneio) que não foram considerados no modelo actual.
2. **Transferência de metodologia com formação do pessoal do IAM,IP.** Potenciais aplicações operacionais:
 - (i) **Monitoria anual das parcelas experimentais.** A metodologia de mapeamento de cajueiros usando drone mostrou-se bastante promissora para monitoria em pomares experimentais do IAM,IP ou pomares dos produtores. Neste contexto, é nossa perspectiva capacitar o pessoal técnico do IAM,IP e do MRV FNDS no MADER na aplicação da metodologia aqui aplicada desde a recolha de dados dendrométricos no campo à mapeamento de cajueiros com drone.
 - (ii) **Estimativa de dados de produção potencial em diferentes locais e distritos.** Para melhorar a precisão do modelo de produção é necessário colher dados de produção no terreno a escala espacial mais representativa e maior número de amostras. A Nitidae desenvolveu um protocolo de medição da produção ao nível do produtor no terreno que pode ser transferida ao pessoal técnico do IAM,IP para replicar à escala nacional.
3. **Continuar a testar a metodologia baseada em satélites, com diferentes sensores (ópticos, radar, etc.) e dados terrestres complementares.** O uso de imagens satélites visa mapear os pomares de cajueiros a uma escala espacial mais ampla (distrito, província etc.) Neste estudo foram utilizadas imagens Planet do sensor óptico e foi testada em áreas com muita mistura de cajueiros e outras árvores. Testar esta metodologia, outra vez, captando as diferentes expressões de pomares (idade e densidade de cajueiros) é necessário para gerar resultados mais confiáveis. Na mesma senda, recomendamos a combinação com imagens radares para melhorar a precisão do mapeamento dos pomares.
4. **Estimativa do impacto da cadeia de valor ao nível da plantação (sequestro de carbono).** No âmbito das mudanças climáticas, os países são compensados economicamente pelo seu esforço de redução das suas emissões oriundas do desmatamento e degradação florestal. O objectivo desta perspectiva é de acrescentar mais algum valor na cadeia de caju. O valor seria através do pagamento por serviços ambientais, pois os cajueiros exercem a redução de gases de efeito estufa e desta forma contribuem para a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas. Contudo, este esquema tem suas complexibilidades, custos e desafios, que podem afectar o êxito da sua implementação. A nossa perspectiva com isso é de promover um levantamento de stocks de carbono dos cajueiros usando equações alométricas com vista a avaliar o seu potencial de sequestro de carbono.

7. Plano de transferência

A transferência da metodologia do estudo poderia ser feita mediante uma formação ao pessoal do IAM,IP e da unidade de MRV do FNDS no MADER. O grupo-alvo do treinamento (entre 10 até 15 participantes) é o corpo técnico da instituição e pode ser alargado a outros técnicos do sector.

Segundo as necessidades, a formação poderia ser entre duas e três semanas. Uma proposta de programa é apresentada na parte 5.1. a seguir.

7.1. Proposta de formação

O treinamento é dividido em três módulos:

- **Módulo 1** – Metodologia de recolha e análise de dados dendrométricos;
- **Módulo 2** – Recolha de imagens drone, processamento e mapeamento dos cajueiros;
- **Módulo 3** – Mapeamento de pomares de cajueiros usando imagens satélites.

Por cada módulo, existem aulas teóricas (20%) e aulas práticas (80%). Os detalhes de cada módulo são apresentados a seguir.

Módulo 1: Metodologia de recolha e análise de dados dendrométricos (1 dia). Aqui, o participante aprenderá técnicas de inventário arbóreo e medição e cálculo de variáveis dendrométricas. A medição de variáveis dendrométricas das culturas perenes, como o cajueiro ou macadâmia, é importante para monitorar o seu crescimento e desenvolvimento. Portanto, a metodologia a ser transmitida pode ser útil para outras actividades de monitoria de ensaios de pomares bem manejados do IAM,IP & MADER.

Após o Módulo 1, o técnico é capaz de:

- Estar familiarizado com as terminologias florestais utilizadas na área agronômica.
- Saber como planificar e conduzir o inventário arbóreo;
- Calcular parâmetros arbóreos, com base nas variáveis dendrométricas;
- Compreender a importância de medir variáveis dendrométricas no terreno.

Módulo 2: Recolha de imagens de drone, processamento e mapeamento dos cajueiros (4 - 9 dias). Neste módulo, os participantes vão ter uma aula teórica sobre o funcionamento dos veículos aéreos não manipulados (drone) e sobre a recolha de imagens no terreno. Especificamente, os participantes vão colher imagens de drone (de forma prática, num pomar de cajueiros), processar e mapear os cajueiros, usando imagens reais colhidas nos distritos de Gilé e Pebane em 2021.

Após o Módulo 2, o técnico é capaz de:

- Saber operar o drone e efectuar voos planificados, bem como descarregar as imagens no computador;
- Saber processar as imagens de drone com o programa adequado (ortophoto e modelo da copa da superfície);
- Dominar o processo de mapeamento dos cajueiros usando QGIS e R (**se for incluir esta actividade, o treinamento pode levar 9 dias**).

Módulo 3: Mapeamento de pomares de cajueiros usando imagens satélites (4 dias). Neste treinamento, os participantes aprenderam como usar as imagens satélites de sensores ópticos, como Planet e Sentinel 2.

Após o Módulo 3, o técnico é capaz de:

- Saber como baixar as imagens Planet e Sentinel 2;
- Compreender e implementar o fluxograma de processamento de imagens satélite;
- Dominar os tipos de índices de vegetação e de solos usados para o mapeamento de pomares;
- Produzir um mapa de pomares a uma escala espacial ampla (distrito ou província).

7.2. Os principais requisitos para participar neste treinamento

Para tornar o treinamento mais eficaz, recomendamos que os potenciais participantes do IAM,IP e do MRV FNDS no MADER satisfaçam parcial ou totalmente os seguintes requisitos:

- Habilidades quantitativas (habilidades de análise de dados e experiência em Microsoft Excel);
- Conhecimento básico de GIS e teledetecção;
- Capacidade de trabalhar em grupo e interesse para ferramentas inovadoras;
- Noções básicas de estatística descritiva, regressão linear e interpretação de resultados estatísticos;
- Possui um laptop com sistema operativo Windows de 64 bits.

7.3. Avaliação das necessidades para o uso do drone

Este estudo piloto usou equipamentos específicos para medição no campo, adquiriu um drone e usou um computador adequado para o processamento de dados.

A fim de poder dimensionar a implementação operacional da utilização do drone ao nível do pessoal do IAM,IP (ver ponto 2 das perspectivas), apresenta-se a seguir um orçamento das várias aquisições necessárias.

De salientar que o plano de transferência foi concebido contando que o treinamento será administrado ao pessoal técnico do IAM,IP ao nível central. As quantidades dos materiais contabilizados no orçamento (**Tabela 6**) não contemplam a escala regional ou nacional. Por essa razão, o orçamento deve ser encarado como uma base indicativa dos preços unitários e material necessário para se fazer a réplica à escala mais abrangente dos técnicos do IAM,IP.

Tabela 6: Orçamento geral para a transferência da metodologia ao pessoal técnico do IAM,IP.

Equipamentos	Finalidade	Preço Unitário (Mt)	Qty	Custo (Mt)	Observações
Levantamento de dados do campo					
- Suta	Medição de diâmetro dos cajueiros	15,000.00	2	30,000.00	
- Tablet mini	Registo de dados no terreno e georreferenciamento dos cajueiros usando ODK	15,000.00	2	30,000.00	
- Fita-métrica	Medição do diâmetro da copa dos cajueiros	1,500.00	2	3,000.00	
- Hipsómetro (Nikon Forestry Pro)	Medição de altura total dos cajueiros	31,000.00	2	62,000.00	existe 2 unidades
Subtotal 1				125,000.00	
Colheita de imagens drone					
- Drone Phantom 4 Pro	Levantamento de imagens dos pomares	94,500.00	2	189,000.00	existe uma unidade
- Laptop Lenovo	Processamento dos dados	75,600.00	2	151,200.00	existe uma unidade
- Smartphone (iPhone ou Android)	Programação e manipulação dos voos	45,000.00	2	90,000.00	
Subtotal 2				430,200.00	
Processamento de dados					
- Agisoft PhotoScan (Stand. Editions)	Processamento de imagens (ortophoto)	12,600.00	2	25,200.00	
- QGIS	Mapeamento dos cajueiros com imagem drone e satélite	-	-	-	Acesso livre
- R Studio	Mapeamento dos cajueiros com imagem drone e satélite	-	-	-	Acesso livre
Subtotal 3				25,200.00	
TOTAL				580,400.00	