



Monitoramento da vegetação arbórea nos sistemas de produção de erva-mate apoiado por geotecnologias



*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Florestas
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

DOCUMENTOS 379

Monitoramento da vegetação arbórea nos sistemas de produção de erva-mate apoiado por geotecnologias

*Maria Augusta Doetzer Rosot
Marilice Cordeiro Garrastazu
Denise Jeton Cardoso
Jorge Ribaski
Julio Eduardo Arce*

Embrapa Florestas
Estrada da Ribeira, km 111, Guaraituba,
Caixa Postal 319
83411-000, Colombo, PR, Brasil
Fone: (41) 3675-5600
www.embrapa.br/florestas
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações da
Embrapa Florestas

Presidente
Patrícia Póvoa de Mattos

Vice-Presidente
José Elidney Pinto Júnior

Secretária-Executiva
Neide Makiko Furukawa

Membros
Annete Bonnet
Cristiane Aparecida Fioravante Reis
Elenice Fritzsons
Krisle da Silva
Marcelo Francia Arco Verde
Marilice Cordeiro Garrastazu
Susete do Rocio Chiarello Penteado
Valderês Aparecida de Sousa

Supervisão editorial e revisão de texto
José Elidney Pinto Júnior

Normalização bibliográfica
Francisca Rasche
Valéria de Fátima Cardoso

Projeto gráfico da coleção
Carlos Eduardo Felice Barbeiro

Editoração eletrônica
Luciane Cristine Jaques

Fotos texto e capa
Rodolfo Buhner

1ª edição
Publicação digital (2022): PDF

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,
constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Embrapa Florestas

Monitoramento da vegetação arbórea nos sistemas de produção de erva-mate apoiado
por geotecnologias / Maria Augusta Doetzer Rosot ... [et al.] – Colombo : Embrapa
Florestas, 2022.
35 p. (Documentos / Embrapa Florestas, ISSN 1980-3958 ; n. 379).

1. Mate. 2. *Ilex Paraguariensis*. 3. Erva-mate. 4. Análise. 5. Vegetação. 6. Arboriza-
ção. 7. Sistema de produção. I. Rosot, Maria Augusta Doetzer. II. Garrastazú, Marilice
Cordeiro. III. Cardoso, Denise Jeton. IV. Ribaski, Jorge. V. Arce, Julio Eduardo. VI. Série.

CDD:633.77 (21. ed.)

Autores

Maria Augusta Doetzer Rosot

Engenheira Florestal, doutora em Engenharia Florestal, pesquisadora da Embrapa Florestas, Colombo, PR

Marilice Cordeiro Garrastazu

Engenheira Florestal, mestre em Engenharia Agrícola, pesquisadora da Embrapa Florestas, Colombo, PR

Denise Jeton Cardoso

Engenheira Florestal, doutora em Engenharia Florestal, pesquisadora da Embrapa Florestas, Colombo, PR

Jorge Ribaski

Engenheiro Florestal, doutor em Engenharia Florestal, pesquisador da Embrapa Florestas, Colombo, PR

Julio Eduardo Arce

Engenheiro Florestal, doutor em Engenharia Florestal, professor da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR

Apresentação

Neste trabalho são abordadas as técnicas empregadas para o monitoramento da vegetação arbórea em três distintos sistemas de produção de erva-mate (sob a floresta natural, em caívas e sob pleno sol). Descrevem-se os métodos de obtenção das variáveis dendrométricas e a avaliação da regeneração natural nos levantamentos de campo, bem como seu respectivo processamento, em diferentes ocasiões; a estruturação de Sistemas de Informações Geográficas e a espacialização das variáveis de interesse; os procedimentos no uso de Veículos Aéreos Não-Tripulados (VANTs) para a aquisição de imagens aéreas dos sistemas de produção e a extração de variáveis relativas à cobertura de copas; a metodologia para estimativa de índices como o de área foliar usando fotografias hemisféricas nos sistemas sob cobertura.

Este trabalho apresenta aderência a diferentes metas dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da agenda 2030 proposta pela Organização das Nações Unidas (ONU), especificamente ODS 12 e 15, por tratar de metodologias voltadas à gestão sustentável dos recursos florestais, com ênfase na manutenção da biodiversidade e conservação da floresta por meio de técnicas de monitoramento baseadas em geotecnologias. O trabalho envolve parcerias entre diferentes instituições e a colaboração de comunidades tradicionais comprometidas com a produção agroecológica.”

Marcílio José Thomazini

Chefe-Adjunto de Pesquisa e Desenvolvimento
Embrapa Florestas

Sumário

Introdução.....	9
Materiais e métodos	10
Área de estudo	10
Metodologia de coleta de dados para o inventário florestal	11
Metodologia de processamento de dados do inventário florestal	12
Espacialização dos dados e resultados do inventário.....	13
Aquisição e processamento de imagens com VANTs	13
Aquisição de fotografias com lente <i>fisheye</i>	16
Resultados e discussão.....	19
Resultados dos produtos VANT	19
Resultados do inventário florestal	20
Visualização e consulta aos resultados do inventário florestal	24
Obtenção do valor de cobertura de copas por vetorização sobre ortomosaico	26
Obtenção do valor de cobertura de copas a partir do MDT e MDS	27
Levantamento com fotos obtidas com o medidor de dossel e lente <i>fisheye</i>	28
Produção de folhas de erva-mate versus RFA, IAF e variáveis dendrométricas	30
Correlação entre RFA, IAF e variáveis dendrométricas	30
Conclusões.....	31
Referências	32

Introdução

Os sistemas tradicionais de produção de erva-mate se caracterizam pelo manejo e colheita das folhas dessa espécie (*Ilex paraguariensis*) mantendo as plantas no ambiente onde ocorrem naturalmente, no sub-bosque da Floresta com Araucária ou Floresta Ombrófila Mista (FOM). Pela sua importância ecológica – no sentido de contribuir para a conservação da FOM, característica dos estados do Sul do Brasil – tais sistemas têm sido estudados quanto às melhores técnicas de silvicultura e manejo a aplicar, aliadas aos conhecimentos tradicionais e práticas agroflorestais desenvolvidas por agricultores familiares, povos indígenas, quilombolas e faxinalenses nas regiões centro-sul e sudeste do Paraná e na região norte de Santa Catarina (município de Canoinhas).

Para que se possa recomendar ações silviculturais que otimizem a produção de erva-mate e, ao mesmo tempo, mantenham a qualidade dos serviços ambientais intrínsecos a esse sistema, é necessário estabelecer métodos para o diagnóstico e monitoramento dos remanescentes florestais onde ocorrem. Tradicionalmente, o inventário florestal é a ferramenta mais utilizada para a obtenção de informações qualitativas e quantitativas sobre os elementos arbóreos de uma floresta ou fragmento florestal, estendendo-se também à avaliação de indivíduos regenerantes, oriundos da sucessão vegetal e à quantificação de indivíduos mortos, gerando informações sobre a dinâmica do povoamento. Por outro lado, o uso de geotecnologias - tais como a aquisição e processamento de imagens aéreas de altíssima resolução usando Veículos Aéreos Não-Tripulados (VANTs) e a obtenção de fotografias digitais com câmeras fisheye, sob o dossel - quando integradas aos resultados do inventário florestal em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) -, podem ampliar e melhorar a qualidade das informações utilizadas para o diagnóstico.

Uma variável importante para a definição de alternativas de manejo é a cobertura de copas, usada tanto em abordagens ecológicas quanto silviculturais e definida como a proporção ocupada pela projeção das copas em relação à superfície da floresta (Rosot et al., 2014). O próprio conceito de floresta usa os valores do parâmetro de cobertura de copas como critérios de diferenciação em relação a outros tipos de cobertura arbórea (FAO, 2018). Como existe uma condição lumínica ótima para as plantas de erva-mate abaixo do dossel, a cobertura de copas pode ser um fator determinante na maior ou menor produtividade dos sistemas de produção tradicionais de erva-mate. Entretanto, é uma variável de difícil obtenção por métodos tradicionais de inventário, de forma que o uso de técnicas de sensoriamento remoto pode fornecer estimativas mais rápidas e confiáveis para esse parâmetro.

Nesse sentido, o presente trabalho apresenta as metodologias aplicadas no levantamento do componente florestal de sistemas tradicionais de produção de erva-mate em propriedades da região centro-sul do Paraná, considerando-se diferentes situações de cobertura do dossel e os resultados do diagnóstico são comparados aos de um sistema de produção sob pleno sol, na mesma região. Em seguida, são descritas técnicas que fazem uso de geotecnologias como forma de apoio à obtenção de dados – notadamente de cobertura de copa –, visualização, consulta e análise dos resultados do inventário florestal, tanto para o diagnóstico como para o monitoramento dos sistemas de produção de erva-mate sob cobertura.

Materiais e métodos

Área de estudo

O estudo foi desenvolvido em quatro propriedades de agricultores familiares no município de Bituruna, PR (Figura 1), sendo que, em cada uma delas, os métodos de inventário foram aplicados a uma parcela de 50 m x 50 m, subdividida em 25 subparcelas de 10 m x 10 m. Embora a instalação e medição de parcelas em duas das áreas tenha se dado em 2009, com remeidições em 2013, apenas os dados das medições realizadas nos anos de 2018 e 2019 são utilizados na presente análise, uma vez que nessa mesma ocasião foram obtidas imagens aéreas e terrestres de todas as áreas.

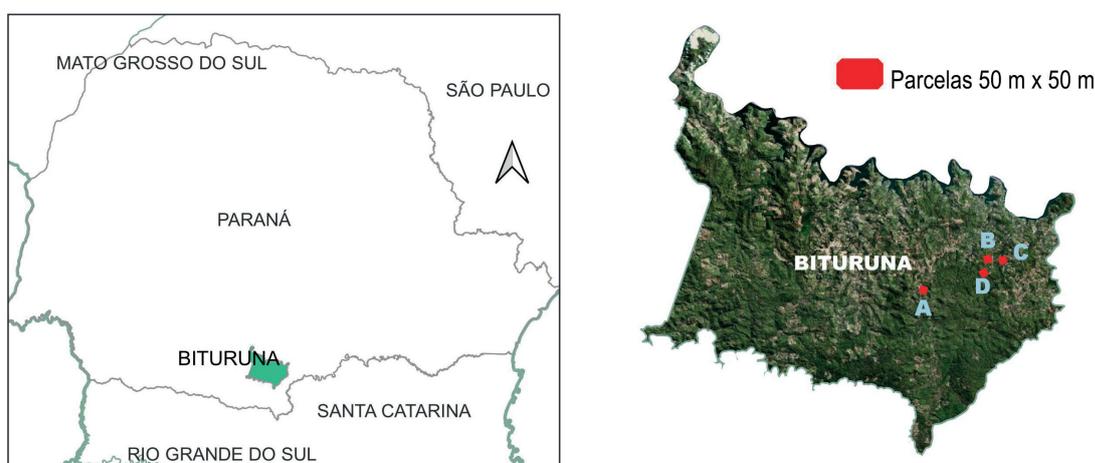


Figura 1. Localização das quatro parcelas em áreas de produção de erva-mate, no município de Bituruna, PR.

A primeira parcela (A) está instalada em um fragmento de Floresta Ombrófila Mista Montana, em terreno de relevo ondulado, com cobertura florestal variando de média a densa e frequência de colheita de erva a cada dois anos. Nesse fragmento foi realizado um enriquecimento com mudas de erva-mate, com densidade de 2.000 mudas por hectare.

A segunda parcela (B) está instalada em um fragmento de Floresta Ombrófila Mista Montana, em terreno de relevo suave ondulado, com densa cobertura florestal e frequência de colheita de erva a cada cinco anos. Os levantamentos foram realizados após um período de, pelo menos, quatro anos sem colheita ou qualquer intervenção na vegetação. Nessa parcela observam-se plantas de erva-mate ocorrendo naturalmente, mas também foram efetuados plantios de adensamento (cerca de 80 mudas ha⁻¹) em 2015.

A terceira parcela (C) se localiza em uma área de caíva – sistema silvipastoril em que os animais (bovinos para produção de leite) pastam sob a cobertura de árvores esparsas (dossel superior) – entremeadas por plantas de erva-mate adultas que tiveram poda drástica e apresentam altura de até três metros, no máximo, ocorrentes naturalmente no local (mais de 45 anos). A colheita é feita a cada dois anos. O local possui terreno ondulado.

A quarta parcela (D) se localiza em um plantio de erva-mate sob pleno sol, estabelecido em 2002, no espaçamento de 2 m x 1,5 m, em terreno de relevo ondulado, porém em área onde se regeneraram alguns exemplares arbóreos ou permaneceram alguns indivíduos remanescentes da floresta original ou do sistema agroflorestal (SAF), ali instalado anteriormente, e que foram medidos por ocasião do inventário.

Em todas as áreas os levantamentos foram direcionados a outras espécies arbóreas que não a erva-mate, exceto quando se tratava de indivíduos ocorrentes naturalmente na parcela, não oriundos de plantio ou não submetidos à colheita das folhas.

Metodologia de coleta de dados para o inventário florestal

Em cada uma das quatro parcelas foram colocados piquetes, estabelecendo-se subdivisões de 10 m x 10 m, com o intuito de facilitar a localização das árvores, especialmente por ocasião das remedições (Figura 2). Todas as árvores com CAP > 15 cm (DAP > 5 cm) receberam plaquetas de codificação, identificando-se sua espécie e determinando-se sua circunferência à altura do peito (CAP), altura total (HT), altura de fuste (HF) e a posição relativa da planta na parcela (coordenadas cartesianas X, Y). Nas medições anteriores a 2019, obteve-se também o diâmetro de copa médio, resultante da medição da projeção da copa de cada árvore em dois segmentos perpendiculares entre si. Observações como existência de bifurcação ou danos graves no fuste, bem como a ocorrência de mortalidade foram registradas nas fichas de campo.

Em todas as áreas, a regeneração natural foi avaliada em 10 das 25 subparcelas (Figura 2), estabelecendo-se polígonos de 2 m x 2 m no vértice esquerdo superior de cada subparcela de 10 m x 10 m. Foi realizada a identificação das espécies arbóreas e contagem das plantas em três classes de altura (I - entre 0 e 1 m; II - > 1 m e < 2 m e; III - > 2 m).

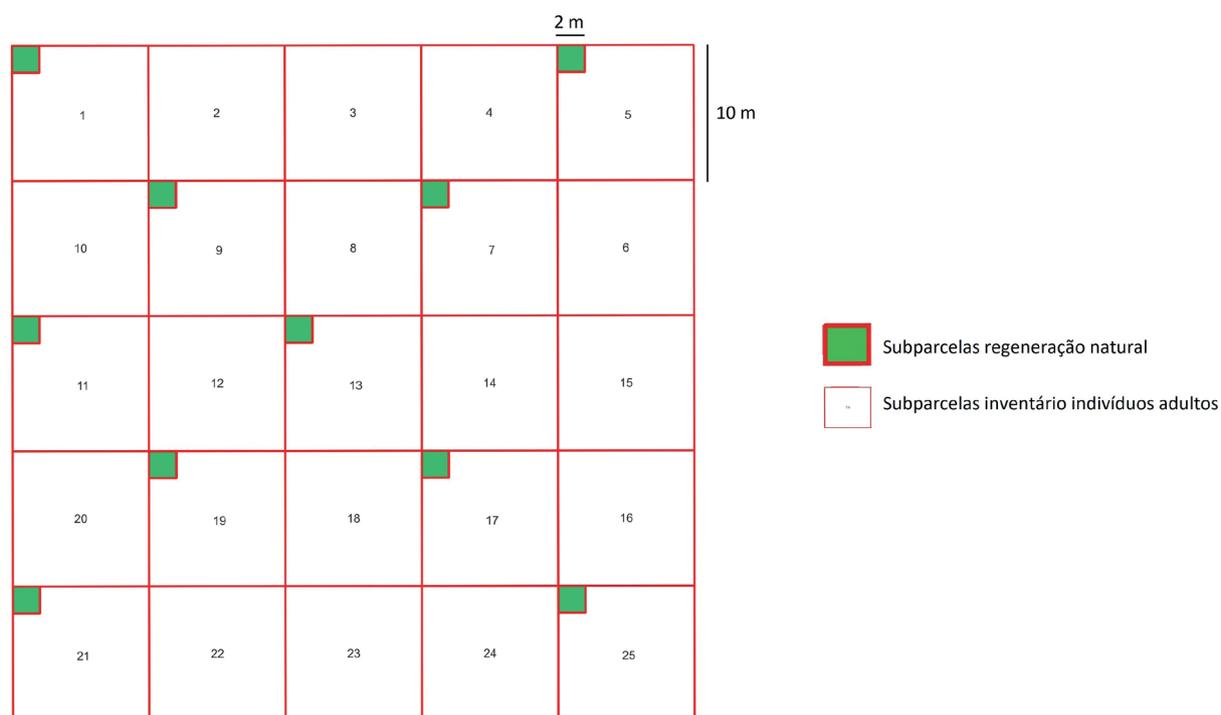


Figura 2. Desenho esquemático da parcela de inventário e subparcelas de levantamento de indivíduos adultos e de regeneração natural.

Para as remedições foram utilizadas fitas de marcação biodegradáveis, instaladas nas linhas e entrelinhas das parcelas. Essas fitas possuem cores vivas de fácil visualização, auxiliando também a sua identificação nas imagens geradas por VANT.

Na parcela A, nas subparcelas onde foram estabelecidas as subamostras de regeneração natural, também foi realizada a colheita e pesagem de folhas de erva-mate em 2018, para análises comparativas com as demais variáveis quantificadas.

Metodologia de processamento de dados do inventário florestal

O processamento dos dados foi realizado com o módulo de Análise Fitossociológica do FlorExel (Florexel, 2022), que funciona como suplemento do Microsoft Excel. A versão utilizada deste módulo possibilitou a emissão de relatórios para avaliações quantitativas e qualitativas, com relatórios por subparcela, por espécie e distribuição de frequência por classe diamétrica, por índices fitossociológicos e por índice de diversidade.

A emissão de resultados considerou que a amostragem é aleatória, assumindo que o ponto inicial da instalação da parcela foi aleatório. A avaliação quantitativa teve, como variáveis analisadas, a média das variáveis dendrométricas (DAP médio e dominante, altura média e dominante, número de árvores e peso seco da biomassa arbórea por hectare) entre as 25 subparcelas de 100 m² de cada parcela de 2.500 m². O erro amostral em porcentagem, calculado conforme Péllico Netto e Brena (1997), atestou o intervalo de confiança para a média da variável biomassa arbórea por hectare, existente em cada subparcela.

A medição da altura realizou-se com o Dendrômetro Criterion RD 1000. Na parcela C, onde não havia nenhuma medição anterior, todas as árvores tiveram a altura medida, enquanto nas parcelas A e B foram medidas somente a altura das árvores de recrutamento. Na parcela D, plantio sob pleno sol, foram medidas as árvores com um ou dois fustes bem definidos. Para as touceiras de rebrota de pequeno porte, com vários fustes de uma das espécies, considerou-se a altura média de 2 m para todas as plantas.

Entre as árvores que não tiveram a altura medida com o equipamento, procedeu-se à estimativa por meio de equação hipsométrica ajustada por espécie (Tabela 1), com os pares de valores de diâmetro e altura medidos. Nos casos em que não foi possível um bom ajuste de equação, optou-se por adotar a altura medida na ocasião anterior ou, ainda, em uma das áreas onde a medição anterior ocorreu mais de cinco anos antes, estimou-se a altura por proporção, a partir da medição anterior.

Tabela 1. Equações hipsométricas ajustadas para algumas espécies.

Área	Espécie	Equação **	R2	Amplitude	Descrição
B	<i>Araucaria angustifolia</i>	$ht = -0,2929 + 4,2141 \times \ln(d)$	0,752	5,2 a 45,5	30
	<i>Jacaranda puberula</i>	$ht = -3,9192 + 4,62 \times \ln(d)$	0,971	6,4 a 29,9	7
	<i>Mimosa scabrella</i>	$ht = 6,0956 \times d0,3069$	0,258	8,3 a 32,5	6
	<i>Myrcia rostrata</i> e <i>Myrcia</i> sp	$ht = 2,258 \times d0,4399$	0,154	6,4 a 11,5	8
	<i>Nectandra lanceolata</i> e <i>N. megapotamica</i>	$ht = -2,967 + 5,3937 \times \ln(d)$	0,788	5,7 a 17,0	12
	<i>Piptocarpha angustifolia</i>	$ht = 0,0608 + 0,6754 \times d$	0,797	10,5 a 35,3	18
	<i>Styrax leprosus</i>	$ht = 0,1136 \times d1,929$	0,613	8,6 a 9,2	4
	<i>Ocotea porosa</i>	$ht = 4,6695 \times d0,2355$	0,139	6,7 a 51,6	9
	<i>Vernonanthura discolor</i>	$ht = 1,7438 \times d0,6047$	0,316	13,0 a 29,9	10
	<i>Zanthoxylum</i> sp	$ht = -2,2692 + 5,0158 \times \ln(d)$	0,999	6,7 a 15,9	3
	Miscelânea *	$ht = 3,208 \times d0,4102$	0,484	5,4 a 19,7	13
	D	<i>Cordyline spectabilis</i>	$ht = 0,1084 + 0,451 \times d$	0,743	4,9 a 18,8

* Miscelânea contém indivíduos das espécies: *Annona* sp, *Cupania vernalis*, *Ilex dumosa*, *Rudgea jasminoides*, *Allophylus edulis*, *Eugenia pyriformis*, *Lamanonia speciosa*.

** ht = altura total (m), d = DAP (cm), ln = logaritmo neperiano

A biomassa arbórea normalmente é quantificada em florestas naturais, para avaliar o seu potencial como fonte de captação de CO₂ da atmosfera, o que se aplica também para as áreas de produção da erva-mate sombreada sob dossel de floresta natural. Nas quatro parcelas analisadas, a equação selecionada para a estimativa do peso seco de biomassa por árvore foi a ajustada por Ratuchne (2010), entre várias existentes na literatura, para Floresta Ombrófila Mista:

$$PS = 0,317 \times d + 0,009 \times (d \times ht),$$

Especificamente para o jerivá (*Syagrus romanzoffiana* (Cham.) Glassman), utilizou-se a equação ajustada por Burger e Delliti (2010):

$$PS = \exp(-0,884 + 2,40 \times \ln(ht)),$$

em que PS = peso seco de biomassa (kg), d = diâmetro à altura do peito (cm) e ht = altura total (m).

O erro amostral foi calculado para a estimativa de peso seco de biomassa por hectare, considerando a divisão em sub-parcelas de 10 m x 10 m, em cada parcela.

A quantidade de carbono foi calculada conforme recomendado por Magnussen e Reed (2015):

$$C = 0,475 \times PS.$$

A quantidade de CO₂ equivalente capturada pela atmosfera foi calculada por:

$$CO_{2eq} = C \times 3,6667, \text{ conforme reportado por Balbinot (2008).}$$

O perfil qualitativo das florestas ou da cobertura arbórea nas quatro áreas analisadas levou em consideração índices fitossociológicos calculados para cada espécie, como densidade, frequência e abundância, absoluta e relativa, bem como o índice de valor de importância; ainda o número de espécies e o índice de diversidade de Shannon-Wiener foram considerados. Todos esses índices foram apresentados em detalhe por Cardoso et al. (2018).

As plantas da regeneração natural observadas nas 10 subparcelas, geraram um valor médio por subparcela, que foi extrapolado para um hectare. As espécies foram ranqueadas em ordem decrescente, com intuito de verificar as que ocorreram em maior quantidade. Este se constitui também em um indicador qualitativo da floresta.

Espacialização dos dados e resultados do inventário

Todos os dados coletados no inventário das parcelas foram registrados em planilha eletrônica e, por meio de operações em Sistemas de Informações Geográficas (SIG), cada árvore passou a ser representada por uma feição do tipo ponto. As parcelas, subparcelas e parcelas de regeneração natural foram representadas por polígonos. O conjunto de parcelas e respectivas árvores, espacializado em escala métrica, porém em coordenadas cartesianas, foi reposicionado geograficamente de modo a coincidir com os vértices das parcelas obtidos com GPS da marca Garmin, modelo GPSPMAP® 76Cx. (Rosot et al., 2014).

Os atributos das árvores e as médias de parâmetros obtidas para a parcela e subparcelas também foram inseridos em planilhas eletrônicas e associados aos respectivos pontos e polígonos no SIG.

Aquisição e processamento de imagens com VANTs

O VANT utilizado neste trabalho foi um quadricóptero, modelo Phantom 4 Advanced DJI, com câmera fotográfica de 20 Mb, autonomia de voo de aproximadamente 30 minutos, com um controle

remoto que permite o uso de um tablet ou celular acoplado. Essa atividade constou de três etapas: planejamento do voo, execução do voo e processamento das imagens.

Para a etapa de planejamento dos voos, utilizou-se os arquivos vetoriais dos limites das parcelas, organizados previamente no SIG. A partir dos limites das parcelas (50 m x 50 m) estendeu-se os polígonos do planejamento de voo para uma área mais abrangente, onde as áreas a serem sobrevoadas ficaram em torno de dois hectares, considerando que há distorções nas bordas, na execução dos mosaicos das fotos. Para cada parcela, foi criado um projeto na plataforma Dronedeploy (www.dronedeploy.com). Essa plataforma permite realizar o planejamento do voo (Figura 3) e compartilhá-lo ao seu aplicativo instalado no celular ou tablet, possibilitando a execução do voo autônomo. As informações principais configuradas foram: recobrimento lateral e longitudinal de 85%, ângulo do gimbal com inclinação em torno de 90°, altura de voo menor que 120 m. Com estes parâmetros definidos, a plataforma calcula o tempo de voo necessário para o recobrimento, área em hectares e número de imagens (fotos) que serão geradas. Para a parcela B, que possui uma cobertura de dossel mais densa, planejou-se o voo com grid cruzado. Como a plataforma de planejamento utilizada não possui disponível esse tipo de planejamento de missão, planejou-se dois voos sobre a área, invertendo a direção do *grid* no parâmetro *Flight Direction*.

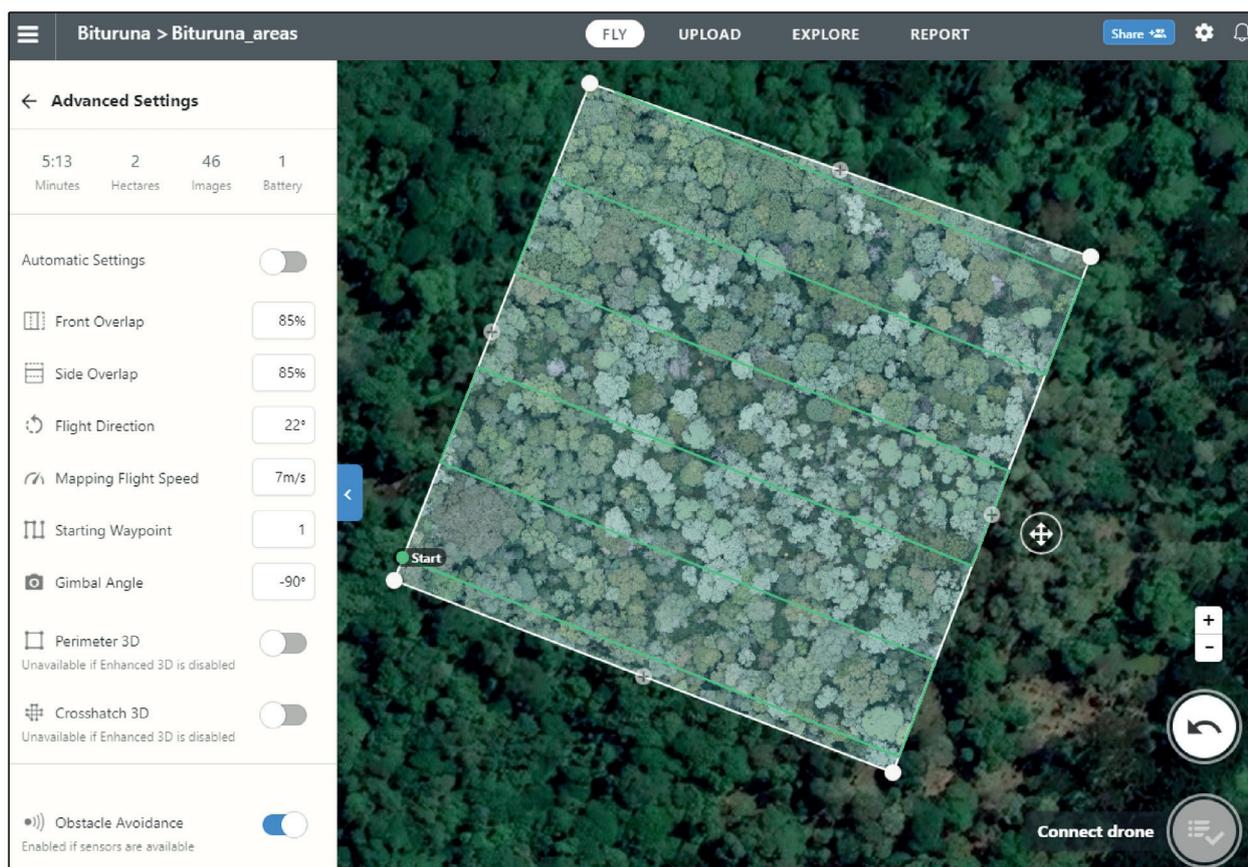


Figura 3. Tela da plataforma do Dronedeploy para uma das parcelas.

Para a etapa de execução do voo, quatro alvos foram distribuídos no terreno, consistindo em um conjunto de quatro placas de EVA (espuma vinílica acetinada) nas cores amarela e vermelha, medindo 50 cm x 50 cm cada uma e totalizando uma área de 1m² (Figura 4). Em cada parcela instalou-se esses quatro alvos, seguindo o critério de ser o mais próximo dos cantos das parcelas e em áreas mais abertas quanto possível, para permitir a visualização nas fotos aéreas. Não foram

utilizados pontos de controle e as coordenadas foram fornecidas pelo GNSS (Sistema Global de Navegação por Satélite) do próprio VANT. Os alvos, neste trabalho, não foram usados como ponto de controle, mas, sim, para auxiliar na verificação dos vértices das parcelas e validar os valores de altura (MDS-MDT); nesses pontos, os valores resultantes devem ficar em torno de zero.

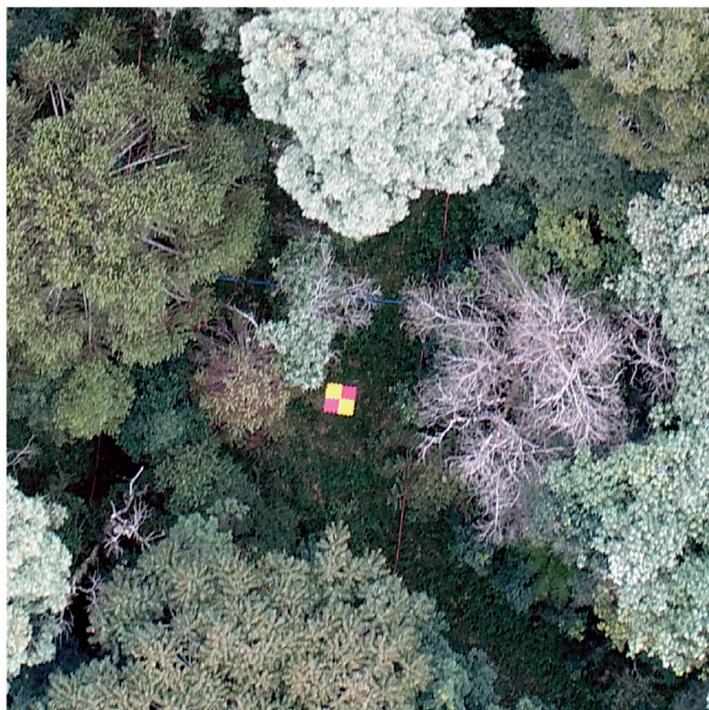


Figura 4. Imagem do voo com visualização de um alvo e fitas de marcação das parcelas

Após o voo, as imagens foram carregadas e processadas na plataforma MAPPA, que é um serviço de software de processamento automatizado em nuvem (<https://mappa.ag/>). Esta plataforma utiliza processamento baseado no software pix4D e os produtos gerados foram: ortomosaico de imagens, modelo digital de superfície (MDS), modelo digital de terreno (MDT) e relatório da qualidade de processamento.

Na plataforma, a partir das fotos aéreas sobrepostas, com técnicas de fotogrametria e o algoritmo SfM (*Structure from Motion*) que extrai pontos 3D, são gerados os produtos raster (ortofotomosaico e MDS). O MDT (modelo digital do terreno) é realizado por um processo de filtragem pela extração de dados planimétricos e altimétricos dos pontos do solo exposto, realizando uma interpolação para obter uma estimativa do terreno.

Adaptando a metodologia apresentada por Boa Morte et al. (2020) que obteve estimativa de altura das copas a partir da diferença de elevação entre o MDS (gerado por VANT) e o MDT (gerado por interpolação de pontos coletados no MDS), buscou-se estimar como resultado um Modelo Digital de Copas (MDC). O MDT utilizado foi aquele oriundo do processamento com parâmetros padrão, obtido na plataforma. Tendo conhecimento prévio das limitações desses modelos (Hung et al., 2018), o objetivo foi testar uma metodologia de rápida execução e processamento e também de baixo custo, visando auxiliar na tarefa de estimar cobertura de copas. Para um comparativo entre métodos foi realizada interpretação visual sobre o ortomosaico.

No SIG, os produtos (ortomosaicos, MDS e MDT) foram recortados pelos limites das parcelas. Os produtos Modelo Digital do Terreno (MDT) e Modelo Digital de Superfície (MDS), foram empregados

em operações de álgebra de mapas para subtrair o MDS do MDT, gerando estimativas de altura do dossel. Essa etapa incluiu a filtragem dos valores negativos (ruídos) e a aplicação de um limiar de 4 m, para separar dossel e sub-bosque. Os valores resultantes caracterizaram cada pixel como pertencendo ao dossel (valor 1) ou ao sub-bosque da parcela (valor zero).

Sobre o ortomosaico correspondente às três parcelas onde se pratica o sistema tradicional de produção de erva-mate (sob cobertura), foi aplicada vetorização em tela para a delimitação das copas no dossel e a subsequente estimativa da cobertura de copas da parcela. O método consistiu em interpretar visualmente a imagem, diferenciar copas (dossel) e clareiras (sub-bosque) e vetorizá-las sobre tela em ambiente de SIG. Em seguida, para ambos os métodos, foi realizado o cálculo em porcentagem de cobertura, para cada parcela.

Aquisição de fotografias com lente *fisheye*

Durante as medições nas quatro parcelas realizou-se, também, a coleta de imagens com o medidor de dossel CID Bio Science, modelo CI-110-24P (Figura 5A). Esse equipamento permite medição ao mesmo tempo, de índice de área foliar (IAF) e radiação fotossinteticamente ativa (RFA). Dispõe de 24 sensores ao longo de uma barra (ceptômetro integrado com 24 fotodiodos), acoplada a um suporte onde se localiza uma câmera fotográfica com lente *fisheye*. Um tablet é acoplado ao equipamento (Figura 5B), para a visualização da imagem sendo focalizada, acionamento para tomada da foto e processamento preliminar da imagem. Permite coleta de dados sob qualquer condição luminosa.

A coleta de dados com esse equipamento teve como objetivo avaliar a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa (RFA) incidente nas mudas de erva-mate plantadas sob dossel. Também foi investigada a existência de correlação linear (Pearson) entre RFA e a biomassa arbórea e a possibilidade de ajustar uma equação para estimativa de biomassa, tendo a RFA como uma das variáveis independentes.



Figura 5. Equipamento utilizado para aquisição de fotografias com lente fisheye, nas áreas de estudo: (A) posicionamento do equipamento acima das copas das plantas de erva-mate; (B) tablet acoplado ao equipamento com o software, que permite acionamento para tomada da foto e também realiza o processamento da imagem.

Inicialmente procedeu-se à tomada de fotos e de dados de RFA nas linhas limítrofes das subparcelas, a cada dois metros (Figura 6A). A primeira tomada de fotos na parcela A e a única tomada de fotos na parcela C foram realizadas dessa maneira. Procurou-se extrair o máximo de informações desse conjunto, porém observou-se que teria sido mais adequado fazer a coleta em linhas que coincidisse com o ponto central das subparcelas, de modo a representar melhor a realidade de cada uma delas.

Na segunda ocasião de trabalho de campo, tendo já sido constatada a superamostragem, optou-se por realizar a coleta de dados somente nas mesmas subparcelas onde foi avaliada a regeneração natural (Figura 6B). Foram realizadas cinco medições e fotos, uma no ponto central de cada subparcela e outras quatro próximas aos vértices.

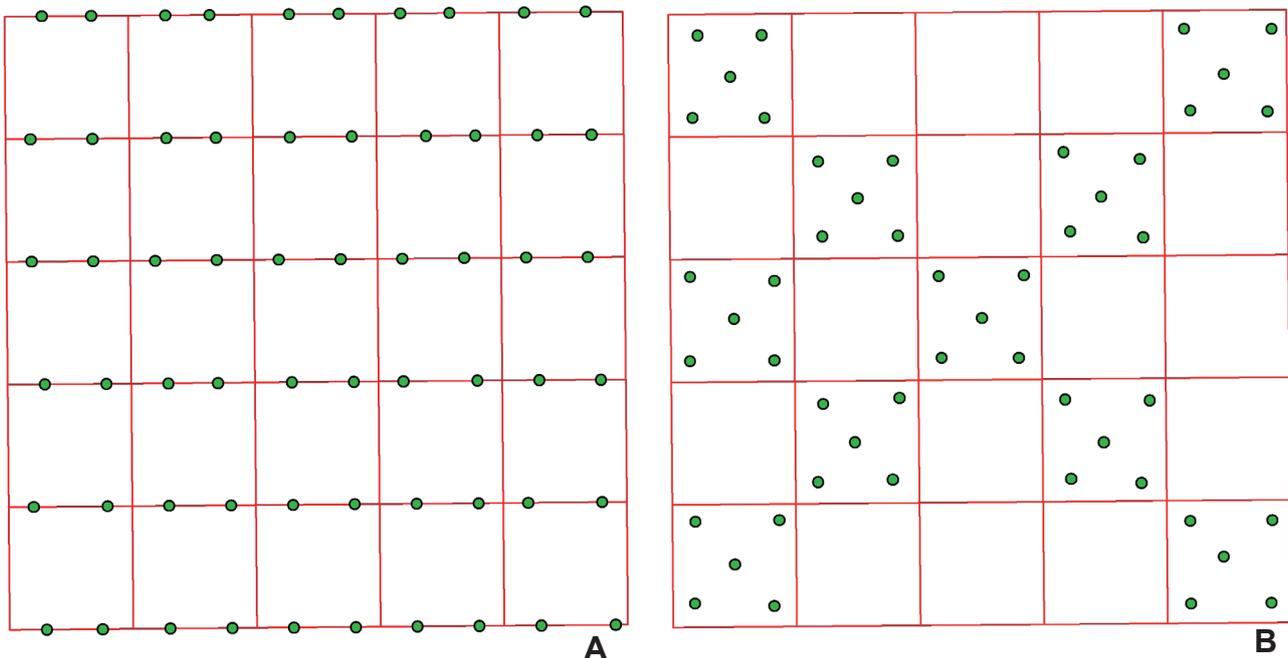


Figura 6. Desenho esquemático da parcela de inventário e subparcelas de levantamento de índice de área foliar (IAF) e radiação fotossinteticamente ativa (RFA): (A) tomada de dados a cada 2 m nas linhas limítrofes das subparcelas; (B) tomada de dados nas dez subparcelas em que foram realizadas outras coletas.

O processamento das imagens ocorreu preliminarmente com as configurações automáticas do software, no tablet, no momento da medição no campo. No entanto, foi necessária uma avaliação minuciosa das fotos, no escritório, com o mesmo software instalado no computador. Nesse momento foi possível, por exemplo, refinar o filtro de tonalidades da foto, para corrigir a classificação entre vegetação e céu, quando necessário (Figura 7A) ou eliminar o efeito do sol forte que se sobrepõe às copas das árvores (Figura 7B) ou, ainda, eventualmente, excluir a captura de objetos indesejados como, por exemplo, as mãos do usuário ao acionar o botão do equipamento (Figura 7C). Ao todo 289 fotos e coletas simultâneas com o sensor fizeram parte da análise, conforme detalhado na Tabela 2. Após o processo de refinamento, foram geradas as tabelas com os resultados para as variáveis índice de área foliar (IAF) e radiação fotossinteticamente ativa.

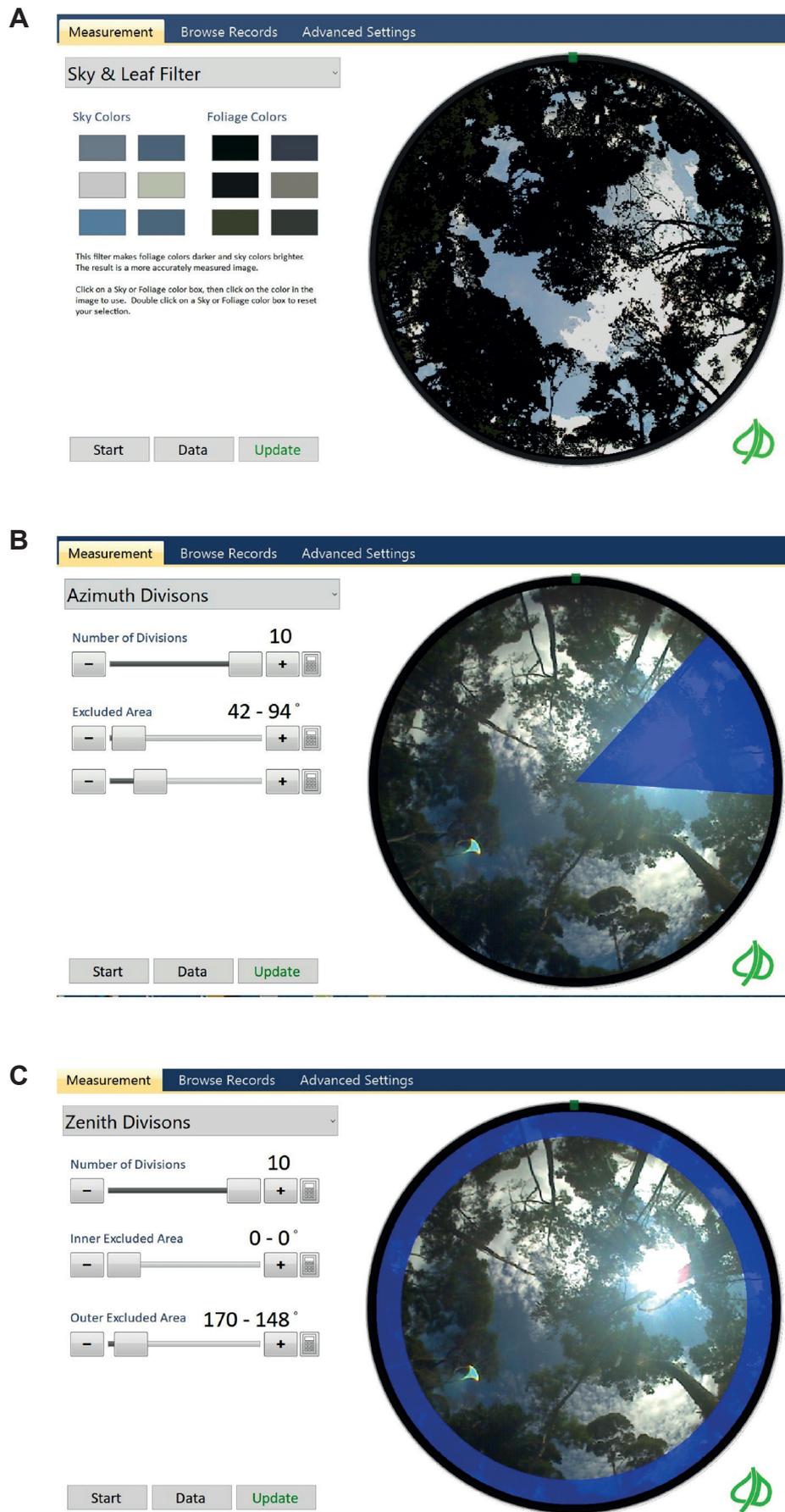


Figura 7. Exemplos de tratamentos para as fotos fisheye: (A) imagem em que foi necessário refinar a classificação por tonalidades, entre céu e vegetação; (B) eliminação do efeito do sol forte; (C) eliminação de imagem indesejável nas bordas da foto.

Tabela 2. Data, horário e quantidade de fotos com lente fisheye e medições do sensor nas áreas de estudo.

Área	Data	h	Número de fotos e medições do sensor
A	07/nov/2018	15:18 às 17:14	97
	04/abr/2019	13:18 às 17:38	46
B	03/abr/2019	11:30 às 12:53	49
C	08/nov/2018	16:18 às 17:27	97

O Índice de Área Foliar (IAF) é a área foliar integrada do dossel por unidade de superfície projetada no solo (m^2 / m^2). Os valores desse índice variam de 0 a 10, com 0 representando “sem dossel ou solo nu” e 10 representando um “dossel de floresta densa”. O software CI-110 calcula os coeficientes de transmissão do feixe solar, ou a fração do céu visível por baixo do dossel da planta usando o Procedimento de Inversão de Frações de Gap (CI-110 Plant Canopy Imager, 2017).

Nos plantios de erva-mate sob sombreamento, os dados de RFA coletados ao longo de uma determinada área podem ser importantes para identificar se há heterogeneidade na oferta de luminosidade para as plantas e eventualmente corrigir o sombreamento com desramas das árvores da floresta ou com o plantio de árvores para propiciar o sombreamento em clareiras. Vieira et al. (2003) avaliaram a influência do microclima de um sistema agroflorestal na cultura de erva-mate e observaram que a radiação solar foi o parâmetro de maior influência na área foliar e na produção de fitomassa dessa espécie, comprovado por ajuste de equação linear, para as colheitas de inverno e de verão. O valor máximo de área foliar foi obtido com 62% de luz e todas as demais intensidades de luz testadas (22%, 39%, 78% e 91%) apresentaram valores de área foliar maiores que o tratamento sob pleno sol. No que se refere à fitomassa úmida, os maiores valores foram obtidos no cultivo sob pleno sol e com 91% de luz. Os autores atribuem o resultado de os maiores valores de área foliar e de fitomassa não terem sido obtidos no mesmo tratamento por haver diferença na oferta de água no solo, conforme a distribuição das árvores de araucária na floresta.

O percentual de luz foi calculado nesse estudo, embora não tenha sido obtido o valor da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) sob pleno sol, próximo de cada parcela no mesmo dia, para aplicar à fórmula, conforme Vieira et al. (2003):

$$\text{Luz \%} = \frac{\text{RFA sob sombreamento}}{\text{RFA pleno sol}}$$

A obtenção do dado sob pleno sol não foi possível durante a coleta de campo devido à dificuldade de se percorrer uma distância longa em curto espaço de tempo, do interior da floresta até uma área sob pleno sol. No entanto, buscou-se fazer uma inferência, atribuindo o maior valor de RFA obtido nos dias de coleta, em condição de clareira em uma das parcelas, como o valor padrão para a RFA sob pleno sol.

Resultados e discussão

Resultados dos produtos VANT

Os voos foram realizados em diferentes horários do dia, dependendo das condições de vento, incluindo a ocorrência de rajadas de vento e outros fatores climáticos. Os horários de execução dos voos foram: parcela A às 9h30, parcela B às 13h30 e parcela C às 15h20.

Os produtos referentes à parcela B, gerados pelo processamento na plataforma constam na Figura 8, o Ortomosaico (A), o Modelo Digital de Superfície (B) e o Modelo Digital do Terreno (C), respectivamente. No ortomosaico (Fig.8a), foram inseridos os limites da parcela, na cor vermelha, para a visualização da área de abrangência da área mapeada, permitindo a observação do entorno.

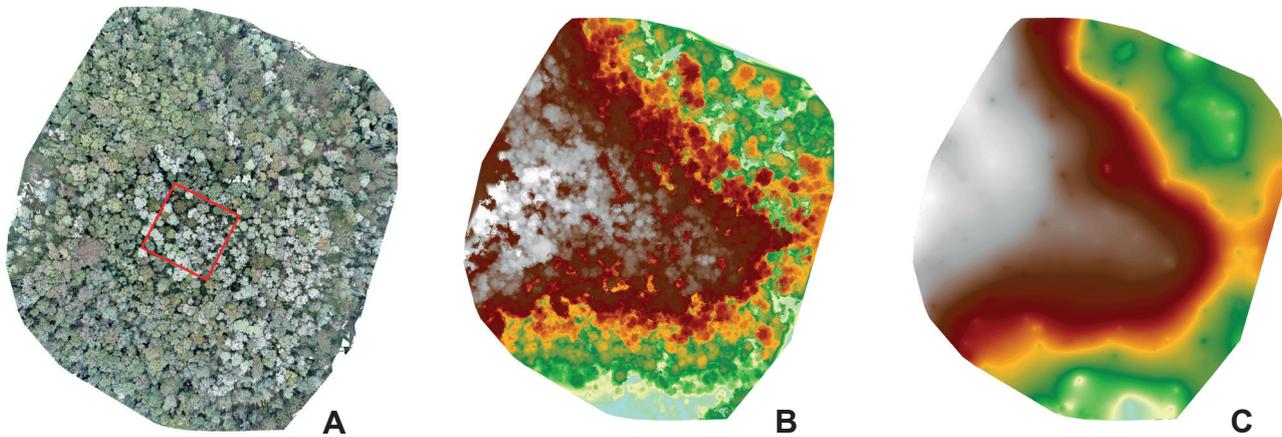


Figura 8. Produtos gerados na plataforma:(A) ortomosaico, (B) MDS, (C) MDT.

Os ortomosaicos das parcelas (Figura 9A) foram utilizados para o método de interpretação visual. A diferença obtida pela subtração dos modelos (MDS - MDT) gerou um raster de altura estimada da vegetação (Figura 9B). Na imagem resultante, foi aplicado o limiar de quatro metros, separando e quantificando o que foi considerado dossel (valor 1, cor preta) e clareira (valor 0, cor branca), gerando o MDC (modelo digital de copas).

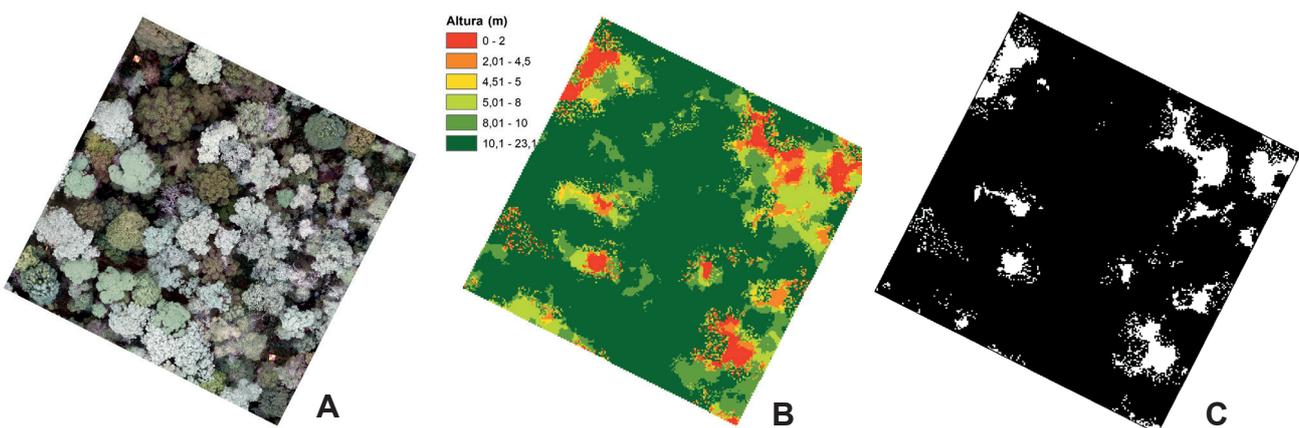


Figura 9. Ortomosaico recortado pelos limites da parcela (A), altura da vegetação (B), modelo digital de copas (C).

Resultados do inventário florestal

A Tabela 3 mostra os resultados médios por parcela das variáveis estimadas pelo processamento dos dados coletados no inventário florestal. As parcelas A e B são representativas de florestas secundárias em regeneração e contêm maior quantidade de indivíduos arbóreos por hectare (388 e 940, respectivamente). A parcela C representa uma situação em que se priorizou o conforto térmico do gado leiteiro, portanto há um menor número de árvores, que são de maior porte. Ao se analisar

os números, constata-se que a parcela B, por não ter sofrido nenhum trato silvicultural há, pelo menos, quatro anos, apresentou o maior número de indivíduos por hectare (940); sua área basal ($19,0 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$) é muito semelhante àquela da parcela C ($19,2 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$). No entanto, são cenários completamente diferentes: enquanto na parcela B o diâmetro médio das árvores é 14,1 cm, na parcela C é 30,7 cm, onde foram quantificadas 236 árvores por hectare. O dossel das parcelas A e B conta com indivíduos de altura pouco superior a 14 m, enquanto a parcela C apresenta dossel com indivíduos cuja altura média dominante é 18,9 m.

Embora a parcela D (plântio recente de erva-mate sob pleno sol) tenha sido submetida à mesma metodologia de medição de uma floresta natural, não pode ser considerada como tal, assemelhando-se mais a uma floresta plantada (de erva-mate) em formação, com remanescentes florestais da cobertura vegetal anterior. Os poucos indivíduos observados são de pequeno porte, com diâmetro médio de 11,1 cm e altura média de 4,9 m.

Tabela 3. Médias das variáveis estimadas para cada uma das quatro parcelas do estudo.

Parc.	DAP	DAP _{dom}	ht	h _{dom}	N ha ⁻¹	G	Biomassa seca	Erro amostral	Carbono	CO ₂ eq
A	20,5	32,6	11,0	14,5	388	16,0	90,2	32,3	42,8	157,1
B	14,1	30,0	9,5	14,8	940	19,0	104,8	21,8	49,8	182,5
C	30,7	39,7	15,8	18,9	236	19,2	117,7	30,7	55,9	205,0
D	11,1	15,9	4,9	6,5	200	3,2	11,2	77,4	5,3	19,5

DAP = diâmetro à altura do peito em cm, DAP_{dom} = DAP das 25 árvores mais grossas da parcela em cm, ht = altura total em m, h_{dom} = altura total média das 25 árvores de maior DAP na parcela em m, N = número de árvores por hectare, G = área basal em $\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$, biomassa seca = peso da biomassa das árvores da parcela estimado por equação alométrica em Mg ha^{-1} , erro amostral % = erro amostral calculado para a biomassa seca. Carbono e CO₂ eq em Mg ha^{-1} .

Nas parcelas A, B e C a quantidade de biomassa seca proveniente das árvores variou entre $90,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ e $117,7 \text{ Mg ha}^{-1}$. Na área D, que não é floresta natural, foi quantificado um estoque de $11,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ de cobertura arbórea, o que representa 9,5% da biomassa obtida na parcela C.

Para efeitos de comparativo do peso seco de biomassa arbórea com resultados encontrados na literatura, é necessário considerar somente o número de indivíduos com diâmetro maior ou igual a 10 cm e o correspondente peso de biomassa seca (Tabela 4). Os valores de biomassa seca quantificados nas parcelas A, B e C com diâmetro superior a 10 cm – respectivamente, $88,9 \text{ Mg ha}^{-1}$, $95,4 \text{ Mg ha}^{-1}$ e $117,4 \text{ Mg ha}^{-1}$ – são semelhantes ou um pouco inferiores aos relatados por Cardoso et al. (2018) - $118,1 \text{ Mg ha}^{-1}$ a $209,6 \text{ Mg ha}^{-1}$ - na região de Rio Negrinho - SC, Mognon et al. (2013) - $186,7 \text{ Mg ha}^{-1}$ em General Carneiro - PR e Watzlawick et al. (2002) - $168,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ em General Carneiro - PR, todos característicos de estágio médio ou avançado de regeneração natural.

O erro amostral, cujo valor normalmente esperado em inventários de florestas naturais seria 15%, no máximo, oscilou entre 21,8% e 77,4% nas quatro parcelas. Isso ocorreu porque as parcelas foram desenhadas inicialmente para gerar um resultado para os 2.500 m^2 , sem considerar análises estatísticas. No decorrer do trabalho, como houve a divisão em subparcelas de $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ e, para facilitar as coletas de dados, decidiu-se por fazer inferência sobre a precisão da estimativa de biomassa e procedeu-se ao cálculo dos estimadores estatísticos para obtenção do erro amostral. No entanto, de forma recorrente, parcelas de 100 m^2 mostraram-se pequenas demais para representar a quantidade de indivíduos de maior diâmetro e a heterogeneidade de sua distribuição.

Quanto ao estoque de carbono, as parcelas A, B e C resultaram em valores entre $42,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ e $55,9 \text{ Mg ha}^{-1}$, e, na parcela D, $5,3 \text{ Mg ha}^{-1}$. Esses valores indicam que nas parcelas A, B e C foram

capturados da atmosfera 157,1 Mg ha⁻¹ a 205 Mg ha⁻¹ de CO₂eq. (Tabela 3), o que as qualifica como importantes sumidouros de carbono a serem monitorados periodicamente, para quantificar o aporte ocorrido a cada ano.

Tabela 4. Número de árvores e peso de biomassa seca em duas classes de diâmetro.

Parc.	Número de indivíduos h ^{a-1}			Biomassa seca (Mg ha ⁻¹)		
	DAP < 10 cm	DAP ≥ 10 cm	Total	d < 10 cm	d ≥ 10 cm	Total
A	60	328	388	1,3	88,9	90,2
B	508	432	940	9,4	95,4	104,8
C	16	220	236	0,3	117,4	117,7
D	136	64	200	2,5	8,7	11,2

DAP (diâmetro à altura do peito)

Além da quantidade de biomassa existente em uma floresta natural, outras características listadas na Resolução do Conama n. 2, de 18 de março de 1994 (Conama, 2012) devem ser consideradas. Essa resolução trata da classificação do estágio sucessional dos remanescentes florestais e apresenta, como algumas variáveis classificatórias, o número de espécies lenhosas, área basal, número de estratos de dossel, altura das espécies lenhosas do dossel, amplitude de DAP e distribuição diamétrica. Na Tabela 5 constam os resultados para essas variáveis, obtidos nas quatro parcelas. Esses resultados e também os resultados de biomassa seca, já mencionados, sugerem que as parcelas A e B representam florestas secundárias em estágio médio de regeneração. A parcela C apresenta árvores de grande porte, predominantemente de *Araucaria angustifolia*, mas com menor número de espécies em relação às parcelas A e B, e ausência de sub-bosque devido ao seu uso para a criação de gado leiteiro. Por definição é também uma floresta secundária, no entanto com menor número de árvores, 236 indivíduos ha⁻¹, mas não há como classificar o seu estágio de regeneração.

Tabela 5. Indicadores qualitativos das quatro parcelas.

Área	Número de espécies	Amplitude DAP (cm)	Distribuição diamétrica (cm)	Altura do dossel (m)	Número de estratos do dossel
A	21	80	5 a 80	14,5	2
B	33	60	5 a 60	14,8	2
C	11	60	5 a 60	18,9	1
D	6	40	5 a 40	6,5	-

DAP (diâmetro à altura do peito)

Entre as cinco espécies de maior índice de valor de importância (IVI) - que é uma representação da densidade, dominância e frequência (Tabela 6) - figuram duas espécies que constam na lista de espécies nativas ameaçadas (Brasil, 2021): *Araucaria angustifolia*, na categoria “em perigo”, presente nas parcelas A, B e C e *Cedrela fissilis*, na categoria “vulnerável”, na parcela C. Outras espécies com características de pioneiras como *Mimosa scabrella* e *Vernonanthura discolor* estão entre as cinco de maior IVI e apresentam potencial para a recomposição de áreas, propiciando sombreamento de espécies ombrófilas.

Tabela 6. Índices fitossociológicos das cinco espécies de maior IVI em cada parcela, valores absolutos e percentuais (entre parênteses).

Parc.	Espécie	Densidade	Dominância	Frequência	IVI
A	<i>Ocotea puberula</i> (Rich.) Nees	88,00 (22,68)	3,79 (23,74)	60,00 (19,74)	66,16
	<i>Piptocarpha angustifolia</i> (Malme) Dusén	60,00 (15,46)	2,75 (17,20)	40,00 (13,16)	45,83
	<i>Araucaria angustifolia</i> (Bertol.) Kuntze	52,00 (13,40)	0,55 (3,44)	48,00 (15,79)	32,63
	<i>Vernonanthura discolor</i> (Spreng.) H.Rob.	32,00 (8,25)	1,34 (8,41)	24,00 (7,89)	24,55
	NI	36,00 (9,28)	0,30 (1,86)	28,00 (9,21)	20,35
B	<i>Araucaria angustifolia</i> (Bertol.) Kuntze	136,00 (14,47)	4,07 (21,46)	64,00 (10,46)	46,38
	<i>Piptocarpha angustifolia</i> (Malme) Dusén	108,00 (11,49)	3,52 (18,60)	68,00 (11,11)	41,20
	<i>Vernonanthura discolor</i> (Spreng.) H.Rob.	68,00 (7,23)	2,48 (13,09)	60,00 (9,80)	30,13
	<i>Ocotea porosa</i> (Nees & Mart.) Barroso	60,00 (6,38)	2,05 (10,82)	44,00 (7,19)	24,39
	<i>Nectandra lanceolata</i> Nees	72,00 (7,66)	0,71 (3,73)	36,00 (5,88)	17,27
C	<i>Araucaria angustifolia</i> (Bertol.) Kuntze	180,0 (76,27)	14,0 (73,05)	80 (62,5)	211,82
	<i>Prunus myrtifolia</i> (L.) Urb.	8,0 (3,39)	2,0 (10,41)	4 (3,125)	16,93
	<i>Cryptocaria aschersoniana</i> Mez.	8,0 (3,39)	1,4 (7,24)	4 (3,125)	13,76
	<i>Strychnos brasiliensis</i> (Spreng.) Mart.	8,0 (3,39)	0,3 (1,49)	4 (3,125)	8,01
	<i>Cedrela fissilis</i> Vell.	4,0 (1,69)	0,5 (2,64)	4 (3,125)	7,46
D	<i>Cordyline spectabilis</i> Kunth & Bouché	116 (58,00)	0,7 (20,71)	48 (57,14)	135,85
	<i>Syagrus romanzoffiana</i> (Cham.) Glassman	16 (8,00)	1,2 (37,39)	8 (9,52)	54,91
	<i>Mimosa scabrella</i> Benth.	16 (8,00)	0,7 (22,45)	12 (14,29)	44,74
	<i>Eugenia pyriformis</i> Cambess.	28 (14,00)	0,2 (5,76)	4 (4,76)	24,53
	<i>Eugenia involucrata</i> DC.	20 (10,00)	0,1 (2,52)	8 (9,52)	22,04

IVI = Índice de Valor de Importância

Embora as árvores remanescentes de erva-mate nativa não figurem entre as espécies com maior IVI, na parcela B sua ocorrência representou 8,4% da biomassa da parcela e 1,3% do número de árvores. São árvores com DAP entre 30 cm e 50 cm.

Quanto ao levantamento da regeneração natural, os resultados resumidos na Tabela 7 indicam uma ocorrência abundante de indivíduos nas parcelas A e B, 17.500 e 8.000 plantas por hectare, respectivamente. Observou-se distribuição homogênea de plantas nessas parcelas, sendo encontradas mudas de espécies arbóreas em todas ou quase todas as subparcelas; nessas, os tratamentos culturais e silviculturais foram pouco frequentes e, quando ocorreram, foram efetuados com o cuidado de manter os regenerantes. Na parcela C, a ocorrência de pequenas mudas foi pouco frequente e esparsa, se comparada às parcelas A e B, embora represente 1.500 plantas por hectare. Foram observadas poucas espécies, porém, entre elas, *Araucaria angustifolia*. Certamente a ocupação pelo gado leiteiro gera essa configuração, mas os efeitos da baixa densidade de mudas podem ser mitigados por meio da adoção de medidas de manejo do gado.

Tabela 7. Número médio de indivíduos regenerantes de espécies arbóreas por tamanho, para as quatro parcelas do estudo.

Parc.	N ha ⁻¹ por classe de altura			Total	Cinco espécies mais frequentes	Número de espécies	Número de subparcelas com regenerantes (de 10)
	Altura das plantas (m)						
	< 1	1 a 2	≥ 2				
A	17.500	0	0	17.500	<i>Vernonanthura discolor</i> <i>Zanthoxylum</i> sp <i>Ocotea porosa</i> <i>Sapium gladulatum</i> <i>Matayba eleagnoides</i> (68,5%)	13	10
B	6.500	1.250	250	8.000	<i>Zanthoxylum</i> sp, Rabo-de-bugio(NI) <i>Mimosa scabrella</i> <i>Ocotea puberula</i> <i>Sebastiania commersoniana</i> <i>Miconia</i> sp (78,1%)	11	9
C*	1.500	0	0	1.500	<i>Zanthoxylum</i> sp <i>Myrsine umbellata</i> <i>Sebastiania commersoniana</i> <i>Araucaria angustifolia</i> (100%)	4	2
D	5.000	250	0	5.250	<i>Syagrus romanzoffianum</i> <i>Cordyline spectabilis</i>	2	5

* Na parcela C, três espécies apresentaram o mesmo número de plantas, na quinta posição, e por isso foram listadas seis espécies.

Visualização e consulta aos resultados do inventário florestal

O SIG constitui uma ferramenta bastante útil não somente à visualização de dados e resultados do inventário florestal, mas, também, à análise e à geração de informações derivadas. Além do posicionamento geográfico das parcelas e das árvores, a associação das feições a seus respectivos atributos permite comparações visuais entre parcelas sob diferentes condições – como acontece nesse estudo – e a espacialização do resultado de consultas com base em atributos.

A partir da simples seleção da simbologia a ser adotada, podem ser feitas classificações com base em variáveis qualitativas ou quantitativas do inventário. A Figura 10 mostra as quatro parcelas do estudo e a representação, proporcional ao tamanho, do DAP de cada árvore. A partir da inspeção visual do mapa, constata-se que a parcela b é a que apresenta maior densidade entre elas, seguida pela A, C e D. Em termos de diâmetro, a parcela d foi a que apresentou as árvores de maiores dimensões para essa variável.

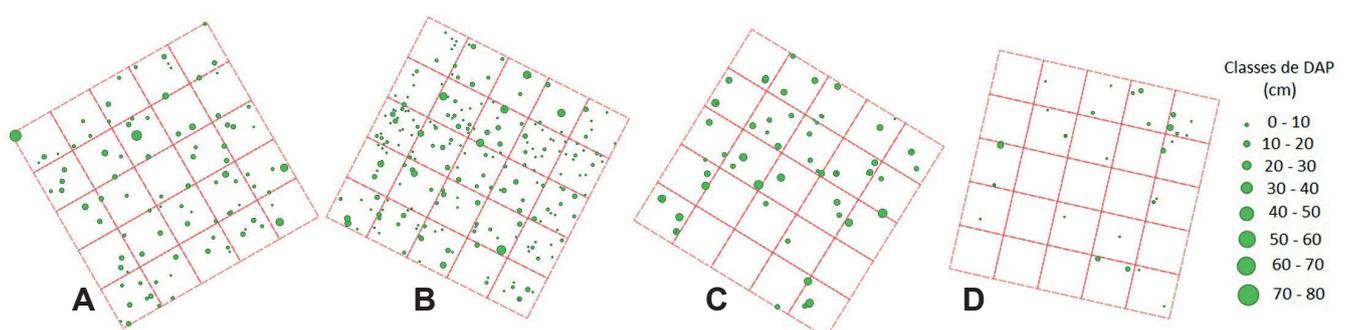


Figura 10. Representação proporcional à dimensão do diâmetro à altura do peito (DAP) dos indivíduos arbóreos medidos nas parcelas A, B, C e D.

Tratando-se de variáveis do povoamento, pode-se representá-las em classes de cores graduadas estabelecidas em função dos valores da variável em questão. Na Figura 11 estão os resultados da quantidade de biomassa seca para cada subparcela da parcela B, com classes de amplitude de 100 Mg ha⁻¹, variando de 20 Mg ha⁻¹ a 320 Mg ha⁻¹. Outra possibilidade é empregar diferentes símbolos ou cores para representar as diferentes espécies encontradas, tal como mostra a Figura 12 para a parcela D que, apesar de ser um plantio a pleno sol, mantém alguns indivíduos arbóreos, que podem se tornar fontes de captação de CO₂.

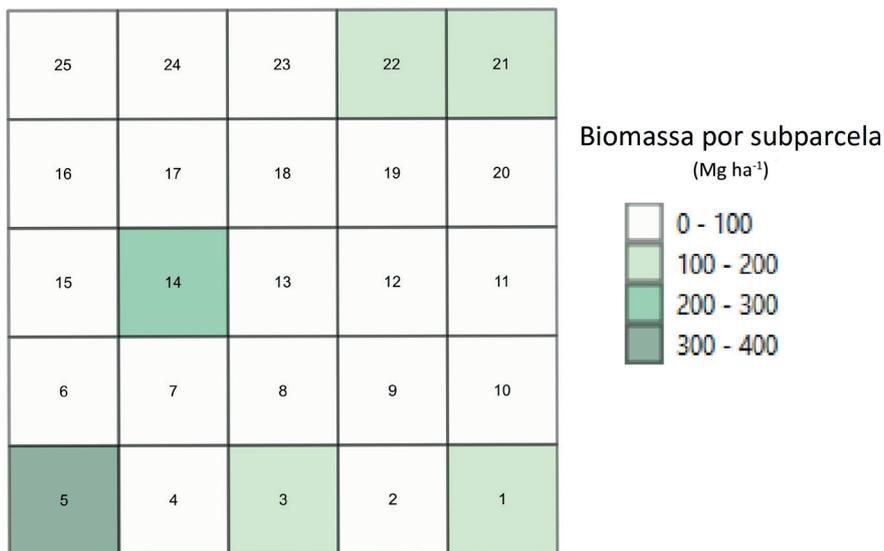


Figura 11. Representação da quantidade de biomassa seca estimada com base nos dados do inventário para cada uma das 25 subparcelas da parcela B (sob cobertura densa).

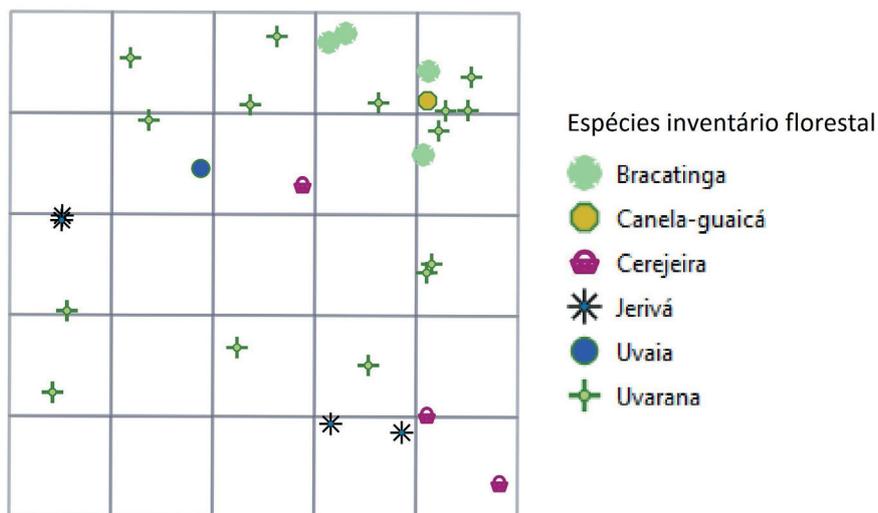


Figura 12. Representação das espécies encontradas na parcela D (pleno sol).

Além da representação com diferentes simbologias, o SIG também permite a realização de consultas com base nos atributos de interesse. Assim, por exemplo, foi possível consultar qual subparcela da parcela C apresentou altura de dossel (altura média dos indivíduos adultos) superior a 15 m (Figura 13). Também há ferramentas de consulta instantâneas, bastando-se clicar com o mouse sobre determinada feição (árvore, subparcela) para que sejam mostrados todos os atributos constantes na tabela associada.



Figura 13. Resultado de consulta por atributos na parcela C, selecionando-se as subparcelas em que a altura média dos indivíduos é igual ou superior a 15 m.

Obtenção do valor de cobertura de copas por vetorização sobre ortomosaico

De posse do ortomosaico gerado pelo processamento das imagens adquiridas por VANT, efetuou-se a digitalização em tela, definindo-se as clareiras ou sub-bosque nas parcelas de produção sob cobertura (A, B e C). Na Figura 14 é mostrado o resultado obtido para a parcela A, contendo as duas classes resultantes da vetorização: sub-bosque (ou clareiras) e dossel. A classe sub-bosque incluiu áreas ocupadas por indivíduos de erva-mate oriundos de plantio, visíveis na imagem (Figura 15), e que se encontravam no sub-bosque das parcelas. Em função do próprio manejo da erva-mate - que inclui colheitas periódicas a cada dois ou três anos, com a poda parcial da copa - optou-se por não considerar a contribuição eventual e de pequenas dimensões (inferior a 0,05%) desses indivíduos na composição do valor da cobertura de copas.



Figura 14. Polígonos representando o dossel e as clareiras (sub-bosque) sobrepostos ao ortomosaico da parcela A.



Figura 15. Imagem da parcela A, obtida por VANT, mostrando clareiras com plantio de erva-mate (área indicada pelas setas).

Para a obtenção do valor de cobertura de copa, efetuou-se uma subtração entre as superfícies ocupadas por clareiras e as ocupadas por dossel, ambas calculadas no SIG. Valores de cobertura de copa de 69,7%, 88,8% e 60,9 % foram obtidos, respectivamente, para as parcelas A (cobertura média), B (cobertura densa) e C (caíva). Os valores refletem as condições de cada área de estudo, descritas anteriormente.

Obtenção do valor de cobertura de copas a partir do MDT e MDS

Dos modelos digitais de copas (Figura 16), foram obtidos valores de cobertura de 75% (parcela A), 89% (parcela B) e 49,9% (parcela C).

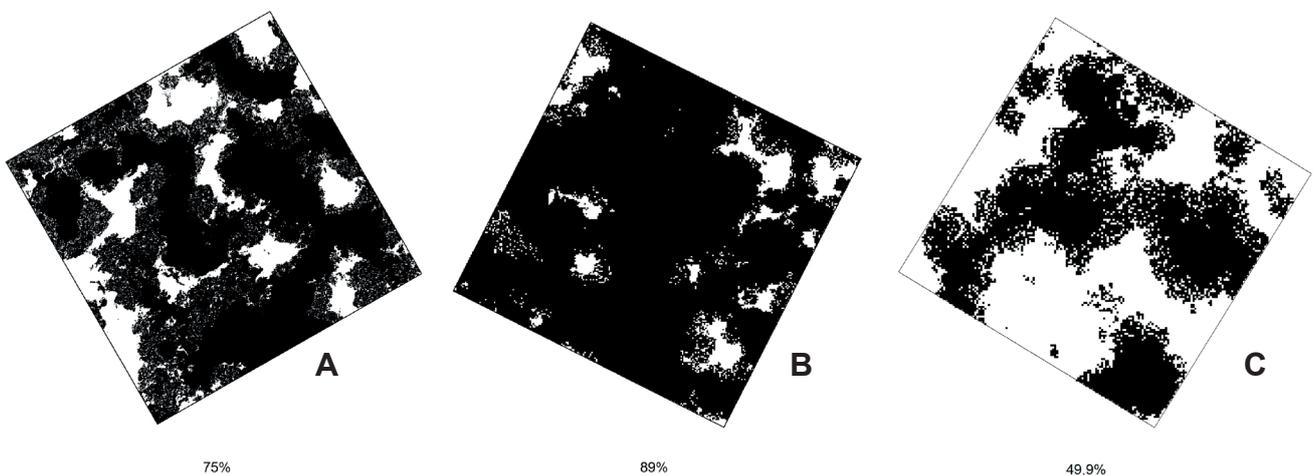


Figura 16. Imagens resultantes da cobertura de copas e quantificação em porcentagem, para as parcelas A, B, C.

Ao comparar os resultados gerados pela diferença entre MDT e MDS com o método visual, a parcela B foi a que apresentou resultado mais próximo entre os dois métodos, 89% e 88,9%. Nessa parcela utilizou-se o voo de grid cruzado permitindo uma melhor cobertura e geração de pontos homólogos entre as fotos no processamento. Além disso, o horário do voo, próximo ao meio-dia, diminuiu o efeito da projeção de sombras no terreno.

Os horários dos voos nas parcelas a, pela manhã e c, à tarde, seriam uma das possíveis explicações também para as diferenças nos resultados, verificadas entre os dois métodos. Para a parcela c, onde a diferença foi maior, 60,9% e 49,9%, observou-se maior projeção de sombra das árvores, considerando que a área possui número menor de árvores, porém com alturas maiores. Outro fator que pode ser somado a isso, foi a execução do voo de grid simples nas parcelas a e c, indicando que o planejamento de voo com cobertura de 85% de recobrimento, tanto lateral quanto longitudinal, não foi suficiente para áreas com cobertura florestal. Hung et al. (2020) obtiveram bons resultados com metodologia semelhante em cobertura florestal esparsa, assim como Boa Morte et al. (2018) em região de mangue.

Os resultados obtidos foram considerados promissores, com o objetivo de estimar modelo digital de copas, porém, ressalta-se a necessidade de ajustes tanto em horários de voos como a adoção de planejamento de grid cruzado, para recobrimento das parcelas de estudo.

Outras abordagens metodológicas utilizando nuvem de pontos e processamento em software desktop estão previstas na sequência deste trabalho, com o intuito de testar e comparar soluções de processamento disponíveis. Uma opção para a separação entre dossel e clareiras, por exemplo, seria a utilização de índices de vegetação, em procedimentos de análise multivariada.

Levantamento com fotos obtidas com o medidor de dossel e lente *fisheye*

Embora os valores de IAF e RFA não possam ser comparados, porque foram coletados em ocasiões diferentes, em dias diferentes e com metodologia diferente, os valores médio, mínimo e máximo de IAF indicam condições semelhantes de cobertura arbórea (Tabela 8). As diferenças devem ocorrer em função da densidade e configuração da folhagem, do porte, da quantidade e da distribuição espacial das árvores ao longo de cada parcela.

Os resultados de RFA apresentaram maior heterogeneidade dentro de cada parcela, representados por coeficientes de variação entre 36,47% e 73,52%. Os valores médios dessa variável, bem como o percentual de luz calculado - tendo como referencial sob pleno sol o maior valor de RFA obtido na ocasião de medição (novembro 2018 e abril 2019) - representam bem as condições observadas nas parcelas. A parcela b sofreu influência da condição climática no dia, que era nublado e com garoas esparsas sem abertura de sol. Ainda assim, denota a situação de menor luminosidade por ser a floresta mais densa, com número de indivíduos por hectare (940) substancialmente maior que o das outras parcelas. A parcela c apresentou o menor percentual de luz, embora tenha também o menor número de árvores por hectare (236); no entanto, são praticamente todas de grande porte, com copas frondosas. A parcela A, mesmo com metodologias distintas nas diferentes ocasiões de coleta de imagens, ilustra a ocorrência de poda e a presença de árvores caducifólias que propiciaram maior percentual de luz na medição de abril, início de outono.

Tabela 8. Valores médio, mínimo e máximo, coeficiente de variação de IAF e RFA nas três parcelas com cobertura florestal.

Parcela	IAF					RFA			% luz *
	CV (%)	Mínimo	Máximo	Médio	CV (%)	Mínimo	Máximo	Médio	
A (nov 2018)	19,33	0,80	1,95	1,23	73,52	132,82	1406,88	392,40	27,9
A (abr 2019)	9,44	1,54	2,05	1,66	36,47	284,63	929,18	558,62	60,1
B (abr 2019)	8,26	1,33	1,65	1,49	36,57	37,47	138,06	85,44	9,2
C (nov 2018)	15,47	1,02	1,84	1,28	69,20	94,91	910,15	338,81	24,8

Para o cálculo do percentual de luz, foram considerados como valores de RFA sob pleno sol, os maiores valores de RFA obtidos em nov/2018: 1406,88 e em abr/2019: 929,18

Os valores médios de RFA observados nas parcelas A e C ($558,62 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e $338,81 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) estão compatíveis com os relatados por Varella et al. (2012) em sistemas silvipastoris com *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*, aos cinco anos de idade, em arranjos de plantio no espaçamento 3,0 m x 1,5 m x 14 m. Na porção central do espaço de 14 m, onde havia maior incidência de sol, foram observados valores médios de RFA entre $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e $800 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, enquanto em locais mais próximos aos renques de árvores ocorreram valores entre $150 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Em outro experimento com arranjo de plantio de 3,0 m x 1,5 m x 34 m, portanto com maior possibilidade de incidência de sol, os mesmos autores relataram valores de RFA entre $800 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e $1.000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ na porção central e de $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ a $600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ na porção mais próxima às linhas de árvores, para as mesmas espécies do outro experimento. Ribaski e Menezes (2002) relataram RFA médio de $274 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ debaixo da copa de árvores de *Prosopis juliflora* em um sistema silvipastoril, no estado de Pernambuco; sob pleno sol, distante 20 m das árvores, o valor obtido foi $1.805 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, valores também condizentes com os obtidos nesse estudo.

Em média, o levantamento de RFA indicou que as parcelas A e C apresentam um percentual entre 24,8% e 60,1% de luz sob o dossel das árvores. A parcela B, com maior quantidade de árvores, apresenta 9,2% de luz sob o dossel.

O uso de ferramentas de SIG, por disponibilizar os dados espacialmente, pode auxiliar na avaliação das condições de cobertura do dossel para a condução das plantas de erva-mate, por exemplo, visando à homogeneidade da distribuição de radiação fotossinteticamente ativa. Ao observar a representação gráfica da radiação fotossinteticamente ativa nas parcelas A, B e C (Figura 17), pode-se inferir que a parcela B apresenta a condição mais homogênea de sombreamento entre as três, visto que não sofreu tratos silviculturais nos anos anteriores. A parcela A apresenta menor incidência de luz na parte central, enquanto na parcela C, onde foram coletados dados em todas as subparcelas, a condição é inversa, com maior percentual de luz no centro da parcela.

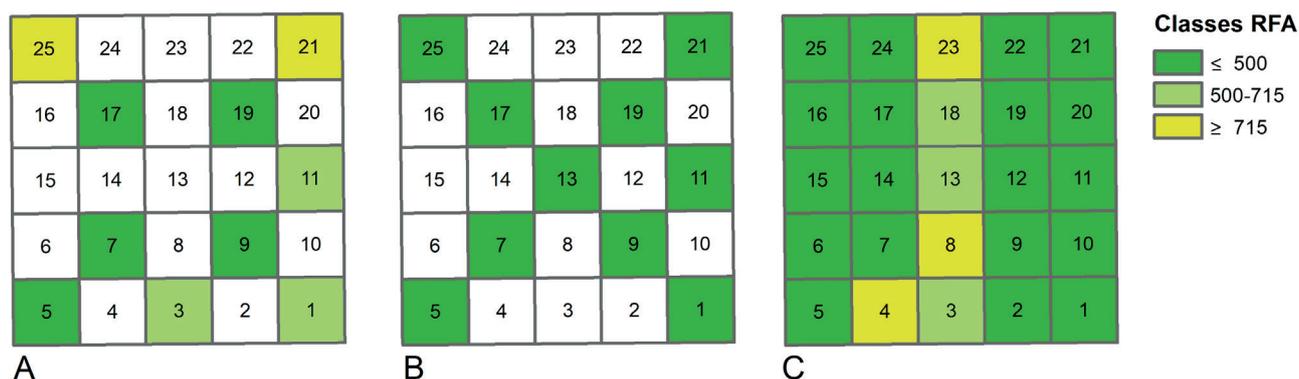


Figura 17. Valor médio de radiação fotossinteticamente ativa observado nas dez subparcelas avaliadas das parcelas A, B e C

Produção de folhas de erva-mate versus RFA, IAF e variáveis dendrométricas

A colheita de folhas de erva-mate realizada na parcela A, em nove subparcelas, na mesma época da coleta de dados, resultou em 2,78 t ha⁻¹. A correlação entre a quantidade colhida por subparcela e as condições de sombreamento, representadas pelos valores de radiação fotossinteticamente ativa e índice de área foliar (Tabela 9) indicou que a maior quantidade colhida ocorreu nas subparcelas com menor IAF (correlação de -0,4111) e com maiores médias de diâmetro (0,4208) e altura (0,4348) das árvores do dossel. Embora os p valores indicaram que não há correlação significativa entre a quantidade de folhas colhida e as variáveis analisadas, esses resultados sugerem que florestas menos densas quanto à cobertura foliar e com a predominância de árvores de maiores diâmetros médios devem propiciar maior produção de folhas de erva-mate.

Tabela 9. Correlação entre a quantidade de folhas de erva-mate colhida e IAF, RFA e variáveis do inventário florestal na parcela A.

Variáveis da parcela A	Erva-mate colhida (kg subparcela ⁻¹)
IAF	-0,4111
RFA	0,2400
DAP_médio (cm)	0,4208
DAP_dominante (cm)	-0,0755
altura_média (m)	0,4348
altura_dominante (m)	-0,1526
N ha ⁻¹	-0,1640
Área basal (m ² ha ⁻¹)	0,0457
Biomassa	0,0463

IAF = Índice de Área foliar; RFA = Radiação Fotossinteticamente Ativa; N ha⁻¹ = número de árvores por hectare

Correlação entre RFA, IAF e variáveis dendrométricas

A análise das matrizes de correlação entre as variáveis do inventário florestal e as variáveis coletadas com o sensor e câmera com lente fisheye, para cada parcela e para as parcelas agrupadas, indica correlação inversa entre RFA e biomassa, não significativa ao nível probabilidade de 0,05, com valores entre -0,1299, para o agrupamento AB e -0,5432, para a parcela B (Tabela 10). As demais variáveis não apresentaram correlação alta com RFA, a ponto de possibilitar ajuste de equação para a estimativa de biomassa.

A correlação entre IAF e RFA foi significativa para as parcelas B e C e agrupamento AB, ora direta ora inversa, com valores superiores a 0,5048, com exceção ao agrupamento ABC, que foi 0,0576. Seria de se esperar que maiores valores de IAF indicassem menores valores de RFA em qualquer condição, sob cobertura florestal. Entretanto, isso não ocorreu na parcela A e nem com a junção dos dados das parcelas A e B. Considera-se que esse resultado foi inconclusivo, necessitando de um conjunto de dados maior para inferências adicionais.

Um resultado que chama a atenção é a correlação alta entre a biomassa (em Mg ha⁻¹) e o diâmetro dominante (em cm), variando de 0,7720 a 0,9452. Valores menores, porém significativos ao nível de probabilidade de 0,05, foram obtidos para a correlação entre biomassa e altura dominante, 0,4893, parcela C e 0,4866, agrupamento ABC. Outro resultado interessante foi obtido com a área basal, que representa a densidade da floresta e inclui a combinação entre número de árvores e diâmetro médio quadrático; essa variável apresentou correlação muito alta com a biomassa, apresentando

valores muito próximos a 1. Tais achados mereceriam outras análises mais detalhadas, objeto de outro estudo, sobre metodologia para estimar biomassa arbórea a partir de variáveis do povoamento e não das árvores individuais.

Tabela 10. Correlação de Pearson entre variáveis do inventário florestal e das coletas com o sensor / fotos *fisheye*. A análise dos p valores a 0,05 indicou as correlações significativas, marcadas em vermelho.

Variável 1	Variável 2	Parcelas				
		A	B	C	AB	ABC
IAF	RFA	0,5498	-0,6439	-0,5048	0,6305	0,0576
	DAP médio	-0,0492	-0,0068	-0,0174	0,4145	-0,3743
	DAP domin.	0,0784	-0,0880	0,1262	0,1203	-0,0834
	altura média	0,0748	-0,0008	-0,1913	0,3449	-0,5404
	altura domin.	0,1823	-0,2723	0,2254	-0,0345	-0,2415
	N ha ⁻¹	-0,2466	-0,2175	0,1485	-0,5191	0,2460
	área basal	-0,2130	-0,0989	0,1679	-0,0908	-0,0482
	biomassa	-0,1877	-0,1115	0,1555	-0,0788	-0,0865
RFA	DAP médio	-0,1811	-0,4975	-0,3708	0,6076	0,0762
	DAP dominante	-0,4267	-0,4432	-0,2812	-0,0182	-0,1102
	altura média	0,2160	-0,4730	-0,3419	0,5219	-0,0067
	altura dominante	-0,2199	-0,4566	-0,2301	-0,0672	-0,1167
	N ha ⁻¹	-0,2026	-0,2408	-0,0597	-0,6459	-0,3759
	área basal	-0,4721	-0,5353	-0,3351	-0,1358	-0,2275
	biomassa	-0,4640	-0,5432	-0,3316	-0,1299	-0,2216
	Biomassa	DAP médio	0,4306	0,7767	0,4406	0,4136
DAP dominante		0,8586	0,9452	0,7720	0,8860	0,8126
altura média		0,0606	0,5384	0,3514	0,2909	0,3480
altura dominante		0,3961	0,5483	0,4893	0,4465	0,4866
N ha ⁻¹		0,2910	0,3595	0,6320	0,1660	0,1045
área basal		0,9969	0,9968	0,9969	0,9965	0,9951

IAF = Índice de Área foliar; RFA = Radiação Fotossinteticamente Ativa; N ha⁻¹ = número de árvores por hectare

Conclusões

A análise dos resultados obtidos a partir dos dados coletados diretamente no inventário florestal e daqueles obtidos por sensoriamento remoto, ambos apoiados por SIG, permite concluir que:

- A metodologia de espacialização das variáveis de inventário pode ser facilmente reproduzida em escala, englobando novas parcelas localizadas em diferentes propriedades e sob condições distintas;
- A espacialização das variáveis de inventário florestal, da maneira como foi apresentada, pode vir a ser uma ferramenta importante para os produtores realizarem o manejo florestal, no sentido de identificar e mapear árvores de interesse para a coleta de sementes, para a preservação de espécies ameaçadas, bem como para planejar tratos silviculturais de maneira localizada, como podas de árvores de copa muito densa ou retirada de taquara em regiões de clareiras;

- A metodologia para determinação do percentual de luz disponível abaixo do dossel, para as plantas de erva-mate, ao longo de grandes extensões da propriedade, tem potencial para aplicação, no entanto requer uma coleta de dados mais intensa, abrangendo diferentes horários do dia, diferentes estações do ano e coleta de dados sob céu aberto na mesma data da coleta sob cobertura. Outros equipamentos com lente fisheye, mais ergonômicos, além de outros aplicativos para processamento das imagens, também devem ser avaliados;
- Em relação à determinação da cobertura de copas, trabalhos futuros podem envolver a ampliação da área de cobertura de sobrevoos de VANT, possibilitando um aumento da intensidade amostral e upscaling da variável cobertura de copas para outras áreas de produção de erva-mate sombreada.

Referências

BALBINOT, R.; VALÉRIO, A. F.; SANQUETTA, C. R.; CALDEIRA, M. V. W.; SILVESTRE, R. Estoque de carbono em plantações de *Pinus* spp em diferentes idades no sul do estado do Paraná. **Floresta**, v. 38, n. 2, p. 317-324, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/ufv.v38i2.11626>.

BOA MORTE, C. L.; CARVALHO, L. F. S. G.; BARROS, R. S. Uso de VANT como ferramenta para estimativa de altura de dossel em manguezal: um estudo investigativo em Guaratiba, Rio de Janeiro, Brasil. **Revista Tamoios**, v. 16, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.12957/tamoios.2020.55745>.

BURGER, D. M.; DELITTI, W. B. C. Modelos preditores da fitomassa aérea da Floresta Baixa de Restinga. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 33, n. 1, p. 143-153, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-84042010000100013>.

BRASIL. Lista de espécies nativas ameaçadas de extinção, como incentivo ao uso em métodos de recomposição de vegetação nativa em áreas degradadas ou alteradas. Portaria MMA Nº 561, de 15 de dezembro de 2021. **Diário Oficial da União**, edição 236, seção 1, p. 202. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-mma-n-561-de-15-de-dezembro-de-2021-367747322>. Acesso em: 27 maio 2022.

CARDOSO, D. J.; GARRASTAZU, M. C.; LACERDA, A. E. B. de; FIORUCCI, L. H.; ZANATTA, J. A.; HIGA, R. C. V.; RACHWAL, M. F. G. **Estoque de biomassa arbórea em remanescentes de Floresta Ombrófila Mista e área de transição: inferências sobre estágio sucessional**. Colombo: Embrapa Florestas, 2018. 37 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 319).

CI-110 Plant Canopy imager. **Operations Manual**. CID Bio-Science. 113 fl. 2017. Disponível em: <https://cid-felix.gitbooks.io/ci-110-operation-manual/content/>. Acesso em: 30 maio 2022.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente (Brasil). **Resoluções do Conama**: resoluções vigentes publicadas entre setembro de 1984 e janeiro de 2012. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2012. 1126 p.

FAO. **Global Forests Resources Assessment 2020**: terms and definitions. Rome, 2018. 32 p. Disponível em: <https://www.fao.org/3/I8661EN/i8661en.pdf>. Acesso em: 30 maio 2022.

FLOREXEL. Ferramentas florestais para MS Excel. **Módulo de análise fitossociológica**: processamento de dados de inventário de florestas nativas. Disponível em: <http://www.florexel.com.br/>. Acesso em: 30 maio 2022.

HUNG, M. N. W. B.; SAMPAIO, T. V. M.; SCHULTZ, G. B.; SIEFERT, C. A. C.; LANGE, D. R.; MARANGON, F. H. S.; SANTOS, I. dos. Levantamento com veículo aéreo não tripulado para geração de modelo digital do terreno em bacia experimental com vegetação florestal esparsa. **Raega: O Espaço Geográfico em Análise**, v. 43, p. 215-231, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v43i0.56621>.

MAGNUSSEN, S.; REED, D. Modelling for estimation and monitoring. In: KNOWLEDGE reference for national forest assessments. Rome: FAO, 2015. p. 111- 36. Disponível em: <https://www.fao.org/publications/card/en/c/8fd3b298-e843-4d3f-9ee0-cdb0e41739fd>. Acesso em: 25 maio 2022.

MOGNON, F.; DALLAGNOL, F. S.; SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTE, A. P.; BARRETO, T. G. Uma década de dinâmica da fixação de carbono na biomassa arbórea em Floresta Ombrófila Mista no sul do Paraná. **Floresta**, v. 43, n. 1, p. 153-164, 2013. DOI: <https://doi.org/10.5380/ufv.v43i1.29024>.

PÉLLICO NETTO, S.; BRENA, D. **Inventário florestal**. Curitiba, 1997. 316 p.

RATUCHNE, L. C. **Equações alométricas para estimativa de biomassa, carbono e nutrientes em uma Floresta Ombrófila Mista**. 2010. 111 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava.

RIBASKI, J.; MENEZES, E. de A. Disponibilidad y calidad del pasto buffel (*Cenchrus ciliaris*) en um sistema silvopastoril con algarrobo (*Prosopis juliflora*) en la región semi-árida Brasileña. **Agroforestería en las Americas**, v. 9, n. 33-34, p. 8-13, 2002.

ROSOT, M. A. D.; RADOMSKI, M. I.; MACHADO, N. C.; GARRASTAZU, M. C.; FRANCISCON, L. **Cadernos de geoprocessamento (6)**: roteiro prático para a representação da projeção de copas de árvores em SIGs. Colombo: Embrapa Florestas, 2014. 7 p. (Embrapa Florestas. Comunicado técnico, 332).

VARELLA, A. C.; PORFIRIO-DA-SILVA, V.; RIBASKI, J.; SOARES, A. B.; MORAES, A. de; MORAIS, H.; SAIBRO, J. C. de; BARRO, R. S. Estabelecimento de plantas forrageiras em sistemas de integração floresta-pecuária no Sul do Brasil. 2. ed. In: FONTANELI, R. S.; SANTOS, H. P. dos; FONTANELI, R. S. (ed.). **Forrageiras para integração lavoura-pecuária-floresta na região sul-brasileira**. Brasília, DF: Embrapa, 2012. p. 435-460.

VIEIRA, A. R.; SUERTEGARAY, C. E. de O.; HELDWEIN, A. B.; MARASCHIN, M.; SILVA, A. L. da. Influência do microclima de um sistema agroflorestal na cultura de erva-mate (*Ilex paraguariensis* ST. Hil). **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 11, n. 1, p. 91-97, 2003.

WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F.; SANQUETTA, C. R.; SCHUMACHER, M. V. Fixação de carbono em Floresta Ombrófila Mista em diferentes estágios de regeneração. In: SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R.; ZILLOTTO, M. A. B.; GOMES, F. dos S. (ed.). **As florestas e o carbono**. Curitiba, 2002. p. 153-173.

Embrapa

Florestas

