



Proposta metodológica para a estimativa da estrutura do dossel no IFN/BR utilizando fotografias hemisféricas

Daniel Augusto da Silva^{1*}, Alexander Christian Vibrans²

¹Universidade Regional de Blumenau, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Rua São Paulo, CEP 89030-080, Blumenau, SC, Brasil

***Autor correspondente:**

danielaugusto@furb.br

Termos para indexação:

Inventário florestal
Dossel florestal
Fotografia hemisférica

Index terms:

Forest inventories
Forest canopy
Hemispherical photography

Histórico do artigo:

Recebido em 18/04/2024
Aprovação técnica em 23/08/2024
Aprovação final em 18/02/2025
Publicado em 31/03/2025

Resumo - Apesar do papel central em processos ecológicos, ciclos biogeoquímicos e clima, a estrutura do dossel não é incluída nas medições do Inventário Florestal Nacional do Brasil (IFN/BR). Aqui, propomos uma metodologia simples e de baixo custo para incorporar medições de variáveis do dossel utilizando fotografias hemisféricas. Aplicamos a metodologia em 363 unidades amostrais (UA) em Santa Catarina durante o segundo ciclo de medições do Programa FlorestaSC (IFN/SC) e analisamos os dados coletados e o tempo necessário para as operações em 10 UAs. Para demonstrar a potencialidade do método, realizamos uma análise comparativa entre os tipos florestais de SC. Em média, 3% do tempo necessário para levantamento de uma UA foi utilizado para a aquisição das fotografias hemisféricas. Conseguimos estimar a estrutura do dossel em 244 das 363 UAs levantadas. Todas as variáveis da estrutura do dossel diferiram entre as formações florestais do estado, principalmente entre a Floresta Ombrófila Mista e a Floresta Ombrófila Densa. O IFN/BR representa uma grande oportunidade para realizar a estimativa da estrutura do dossel em escala nacional com baixo investimento operacional. Por sua vez, estas estimativas acrescentam uma nova dimensão para compreendermos a ecologia e o funcionamento das florestas brasileiras e sua relação com o clima.

Methodology proposing for estimating the canopy structure in the IFN/BR using hemispherical photographs



Abstract - Despite its central role in ecological processes, biogeochemical cycles and climate, canopy structure estimates are not included in the Brazilian National Forest Inventory (IFN/BR) measurements. Here, we propose a simple and cost-effective methodology to incorporate these estimations using hemispherical photographs. We applied this methodology on 363 sample units (SU) in Santa Catarina State during the second cycle of measurements of the FlorestaSC Program and computed the necessary time for the operations on 10 of those SU. To demonstrate the potential of the method we compared the canopy structure of the forest types occurring in SC. On average, 3% of the time necessary to complete the measurement of a subsample unit is used to take hemispherical photographs. Of all SU, we successfully characterize the canopy of 244 SU. We found that all variables of the canopy structure differ between forest formations, mainly between Araucaria Forest and Evergreen Rain Forest. The IFN/BR represents a great opportunity to implement canopy structure estimation nationwide with little operational investment. In turn, these estimates add a new dimension for our understanding of the Brazilian forest ecology and functioning, and their relationship with climate.

Introdução

A radiação solar é a principal força motriz para atividades biológicas, resultando no fluxo de energia e gases que regulam o clima e a vida na Terra. Em uma floresta, a estrutura do dossel regula a reflexão, transmitância e absorção dos raios solares, influenciando a resposta fotossintética à radiação e à luz disponível no sub-bosque (Schleppi & Paquette, 2017). Assim, além de influenciar o crescimento das próprias árvores do dossel, a estrutura do dossel também influencia a interceptação de água, ciclos de água e carbono, além do microclima e disponibilidade de água do sub-bosque (Hardwick et al., 2015; Ng et al., 2016; Schleppi & Paquette, 2017). Diante disso, se faz necessário conhecer a estrutura do dossel para melhorarmos nosso entendimento da estrutura, funcionamento e ecologia das florestas brasileiras.

Usualmente, a estrutura do dossel é descrita utilizando diferentes variáveis, como o índice de área foliar (IAF), a cobertura do dossel (CD), que também pode ser expressado como abertura do dossel ($AD; 1 - CD$), a fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (*Fraction of absorbed photosynthetically active radiation* – FAPAR) e o índice de aglomeração das folhas (*Cumpling index* – CI) (Schleppi & Paquette, 2017). O IAF é definido como metade da área foliar total por unidade de área no solo ($m^2 m^{-2}$) (Chen & Black, 1992); por sua vez, o CD representa o percentual de cobertura oferecida pelo dossel diretamente acima de um ponto da floresta (%) (Leblanc & Fournier, 2017); como FAPAR entende-se a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa (400 – 700 nm) absorvida pelo dossel (%); e o CI é definido como o índice de aglomeração espacial das folhas e outros elementos do dossel (%) (Chen & Cihlar, 1995).

Os métodos mais comuns para realizar a estimativa dessas variáveis utilizam aparelhos com sensores hemisféricos (que possuem um campo de visão maior que 120°), tal qual o LAI-2000/2200 (LI-COR Inc., USA), câmeras fotográficas com lentes hemisféricas ou scanner a laser terrestre (TLS). As fotografias fornecem um registro permanente da arquitetura e estrutura do dossel de forma rápida e econômica, aumentando o número de propriedades do dossel que podem ser estimadas, quando comparado a outros métodos, tais como mensuração direta da radiação por ceptômetro ou, de forma indireta, com uso do densiômetro de espelho (Chianucci & Cutini, 2012; Baudry et al., 2014; Russavage et al., 2021). Para obter resultados mais confiáveis, as fotografias devem ser tomadas em dias com cobertura de nuvens homogêneas, ou em horários em que o sol não esteja visível no céu (Chianucci,

2019). Integrar o levantamento da estrutura do dossel no Inventário Florestal Nacional (IFN/BR) pode ser uma forma de gerar dados em volume e abrangência espacial suficiente para produzir estimativas confiáveis da estrutura do dossel; estas, por sua vez poderiam ser utilizadas para investigações avançadas sobre as relações com a dinâmica florestal tanto do estrato arbóreo, quanto dos regenerantes.

Inventários florestais nacionais são essenciais para a formulação de políticas florestais nacionais, para o planejamento de manejo florestal em larga escala e para guiar investimentos em serviços ecossistêmicos, entre outros (Tomppo & Schadauer, 2012). Historicamente, inventários em escala regional e nacional tem como objetivos principais o mapeamento da extensão das diferentes formações florestais e a caracterização da estrutura e composição dessas florestas (Brena, 1996), visando principalmente o estoque de madeira. Mais recentemente, IFNs passaram a dar mais ênfase ao ecossistema, incluindo também aspectos ecológicos e socioeconômicos das florestas (Fournier & Hall, 2017a). Dessa forma, IFNs são ferramentas chave em sistemas nacionais de monitoramento florestal, e produzem dados para diversos indicadores usados em acordos e levantamentos internacionais, como o *Global Forest Resources Assessment* da FAO (Ramírez et al., 2022).

Entre 2005 e 2009, o Serviço Florestal Brasileiro (SFB) promoveu reuniões e workshops para implementar um IFN com metodologia unificada (Freitas et al., 2022). O IFN brasileiro (IFN/BR) tem o objetivo de prover informações para políticas nacionais e regionais, assim como atender a demandas de organizações e acordos internacionais acerca de biodiversidade, estoques e dinâmica de carbono, mudanças climáticas e afins (Freitas et al., 2010). Em 2007, Santa Catarina foi o primeiro Estado a dar início às medições com a metodologia proposta para o IFN/BR, finalizando as medições em 2011 (Vibrans et al., 2012). A partir de 2009 o SFB começou a implementar o IFN/BR em todas as regiões do país (Freitas et al., 2022). O IFN/BR usa uma grade de amostragem de 20 km x 20 km com um tempo de retorno estimado de 5 anos e remedição completa das unidades amostrais. Na Mata Atlântica, estas consistem em conglomerados, com quatro subunidades de 1000 m² perpendiculares e alinhadas com o norte magnético, totalizando 4.000 m². Além disso, diversas informações biofísicas relacionadas às árvores, solo e floresta são coletadas em campo (Serviço Florestal Brasileiro, 2015).

Este estudo tem como objetivo propor uma metodologia para a integração de medições da estrutura do dossel ao IFN/BR. Para isso, utilizaremos como prova de conceito a aplicação da metodologia

em 363 unidades amostrais do Programa FlorestaSC (originalmente Inventário Florístico Florestal de Santa Catarina – IFFSC), responsável pelos levantamentos do IFN/BR em Santa Catarina. Aqui, procuramos responder às seguintes perguntas: a) qual é a demanda de tempo e recursos materiais; b) quais dados são possíveis de coletar sob condições operacionais em um IFN; c) quais são as possíveis aplicações destes dados.

Material e métodos

Área de estudo

O estudo foi realizado em Santa Catarina, estado com cerca de 95.000 km² na região Sul do Brasil (Figura 1). O Estado está inteiramente dentro dos domínios da Mata Atlântica, representada por três tipos principais de floresta: Floresta Ombrófila Densa (FOD), Floresta Ombrófila Mista (FOM) e Floresta Estacional Decidual (FED) (IBGE, 2004). Todos os três tipos de floresta encontram-se altamente fragmentados e ameaçados pela pressão de mudança de uso da terra, com as florestas remanescendo principalmente em fragmentos menores que 50 ha (Vibrans et al., 2021). Originalmente, a Floresta Ombrófila Densa cobria 31% do território, a Floresta Ombrófila Mista 45%, a Floresta Estacional Decidual 8% e os campos, manguezais e Restinga somavam 16% (IBGE, 2004). Um levantamento detalhado do uso e cobertura da terra realizado com base em imagens Landsat OLI do ano base de 2017 estima que a cobertura florestal remanescente é de aproximadamente 38,1% (Vibrans et al., 2021). O tipo de floresta mais ameaçado é a Floresta Estacional Decidual, com cerca de 29,1% de sua extensão original permanecendo no estado; seguido por Floresta Ombrófila Mista com cerca de 33,9% e a Floresta Ombrófila Densa com cerca de 47,8% (Vibrans et al., 2021).

Os três principais tipos de floresta se diferenciam naturalmente na estrutura horizontal e na composição de espécies, embora ambos os fatores sejam influenciados pelo histórico de exploração e pressão humana em cada tipo de floresta. A Floresta Estacional Decidual é a menos densa das três, com cerca de 460 árvores ha⁻¹, distribuídas em 210 espécies (Vibrans et al., 2020). As primeiras medições do FlorestaSC (Inventário Florístico e Florestal de Santa Catarina - IFFSC) entre 2007 e 2010 mostram que as principais espécies arbóreas são todas pioneiras ou secundárias iniciais, incluindo *Ocotea puberula*, *Nectandra megapotamica*, *Luehea divaricata* e *Nectandra lanceolata*. Na Floresta Ombrófila Mista, os mesmos autores destacam que

a medição do FlorestaSC mostrou uma densidade maior, de cerca de 576 árvores ha⁻¹ distribuídas em 365 espécies. Duas espécies dominam o estrato arbóreo, *Araucaria angustifolia*, no dossel, e *Dicksonia sellowiana* (samambaia), no sub-bosque, embora *Clethra scabra* e *Matayba eleagnoides* também sejam importantes na estrutura da floresta (Sevegnani et al., 2019). A Floresta Ombrófila Densa é a mais densa e diversa das três, com uma média de 684 árvores ha⁻¹, distribuídas em 580 espécies (Vibrans et al., 2020). As espécies mais importantes no estrato arbóreo são *Alchornea triplinervea*, *Alsophila setosa* (samambaia) e *Hyeronima alchorneoides*, todas espécies secundárias.

Coleta de dados em campo e estrutura do dossel

Utilizamos os dados do segundo ciclo de medições do FlorestaSC, no qual foram medidas, entre 2014 e 2019, 359 unidades amostrais (UA) permanentes com área de 4.000 m² cada, seguindo as diretrizes do IFN/BR. As unidades amostrais estão localizadas na interseção de uma grade de 10 x 10 km que cobre todo o estado de Santa Catarina; na região da Floresta Estacional Decidual esta grade tem uma resolução de 5 x 5 km para compensar os altos níveis de fragmentação presentes. Em cada unidade amostral foram coletados dados de diâmetro a 1,30 m do solo (DAP), altura e espécie de todos os indivíduos com DAP maior ou igual a 10 cm. Em parcelas de 5 x 5 m nas extremidades de cada subunidade, foram coletados a altura e espécie de todos os indivíduos com DAP inferior a 10 cm e altura total superior a 1,3 m. Além disso, foram coletados dados de diversas características da floresta (densidade do sub-bosque, espessura da serapilheira, presença de distúrbios antrópicos etc.) e das árvores presentes na UA (sanidade, tortuosidade, posição sociológica etc.), a fim de caracterizar a floresta (Vibrans et al., 2012).

Para caracterizar a estrutura do dossel registramos 20 fotografias hemisféricas (FH) em cada UA, sendo cinco em cada subunidade, seguindo a linha central da subunidade e com distância de 10 m entre si (Figura 2A). Nós utilizamos uma câmera Nikon D3100 DSLR equipada com uma lente Nikon Fish-eye Nikkor 10,5 mm, montada em um tripé de alumínio (Figura 2B). Em cada ponto de amostra, o operador nivelou a câmera, ajustou sua altura a 1,3 m e alinhou-a com o norte magnético. Tanto o reflexo de luz na vegetação quanto a ofuscação da vegetação pela luz solar direta causam a diminuição artificial da área foliar na imagem. Por conta disso, as equipes de campo foram instruídas a realizar a aquisição das FH sempre que possível no final ou no início do dia, em dias sem nebulosidade ou com o sol obstruído por nuvens em dias com nebulosidade parcial ou total.

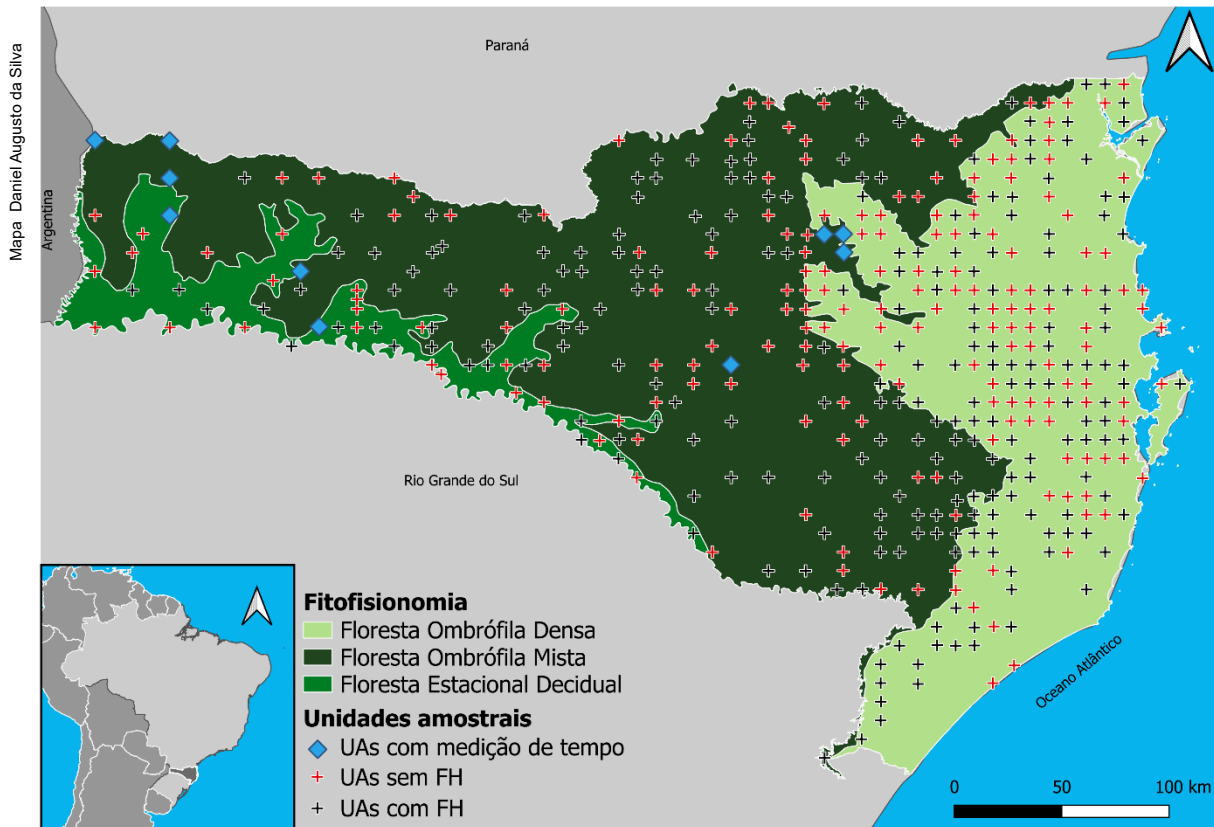


Figura 1. Mapa de localização das unidades amostrais do segundo ciclo de medições do Programa FlorestaSC no estado de Santa Catarina, com a divisão oficial das principais fitofisionomias com ocorrência no Estado.

Figure 1. Location of the sample units from the second cycle of measurements of the FlorestaSC Program in Santa Catarina, with the official forest types occurring in the State.

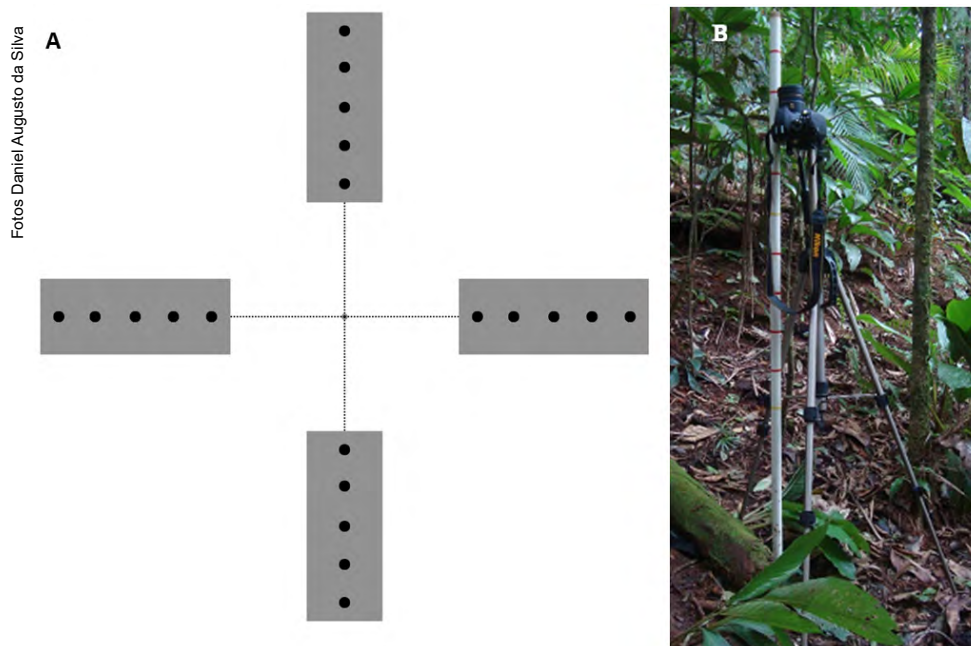
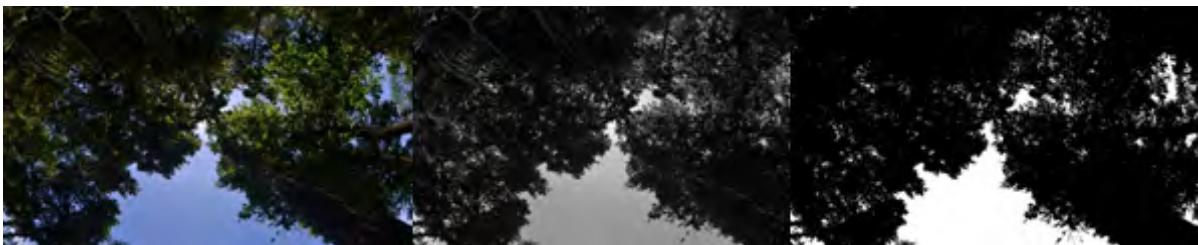


Figura 2. Croqui de localização das fotografias hemisféricas (círculos) dentro das subunidades amostrais do Programa FlorestaSC (A) e locação dos equipamentos em campo (B).

Figure 2. Location of the hemispherical photographs (circles) in the FlorestaSC Program's plot (A), and location of the equipment in the field (B).

Definimos manualmente a exposição da câmera, adaptando a metodologia de (Macfarlane et al., 2014). Com os valores ISO (200) e abertura ($F = 5,6$) fixos, usamos o fotômetro da câmera para determinar a velocidade ideal do obturador. Então, para obter o tempo de abertura ideal, diminuimos o tempo de abertura do obturador para $\frac{1}{2}$ a $\frac{1}{16}$ do tempo de abertura definido pelo fotômetro (dois a quatro 'cliques' na câmera), dependendo das condições de luz. Todas as FH foram inspecionadas visualmente em campo quanto ao foco, nitidez, contraste, presença de luz solar direta ou objetos não vegetais, antes de continuar a coleta. Adaptamos o algoritmo usado por (Pfeifer et al., 2014) para pré-processar as FH em ambiente Python. Para cada imagem, seguimos quatro etapas. Primeiramente, extraímos os valores de brilho do pixel do canal azul e, em seguida, aplicamos o algoritmo de limiar isodata, retornando um arquivo binário que separa os pixels de vegetação dos pixels do céu (Figura 3). Em segundo lugar, cada arquivo binário foi inspecionado visualmente

para identificar erros de classificação devido à luz solar excessiva e reflexos da luz solar em folhas, galhos e troncos. Especialistas sugerem que entre 6 e 12 FH são necessárias para uma estimativa confiável da estrutura do dossel de 1 ha de floresta (Fournier & Hall, 2017b). Aqui, optamos por manter todas as unidades amostrais com pelo menos 8 FHs, buscando equilibrar o número de unidades aproveitadas (aproximadamente $\frac{2}{3}$) e amostragem dentro das subunidades. Terceiro, com base nas imagens classificadas, extraímos os valores do índice de agregação foliar (CI), cobertura do dossel média (CD), índice de área foliar (IAF) e fração absorvida da radiação fotossinteticamente ativa (FAPAR) utilizando o software livre CAN_EYE V6.492 (Weiss & Baret, 2017). Para todas as variáveis, o programa retorna valores médios para a unidade amostral, exceto para o CD, que é dado para cada imagem processada. Posteriormente, na quarta etapa calculamos os valores de CD médio (CD^m) e seu desvio padrão (CD^{dp}) para cada unidade amostral.



Autor: Daniel Augusto da Silva

Figura 3. Fotografia hemisférica tomada em campo pela equipe do FlorestaSC (A); canal azul da imagem (B) e; resultado da classificação (binária) final da imagem com uso do algoritmo *isodata* (C).

Figure 3. Hemispherical photographs taken in the field by the FlorestaSC team (A); blue channel of the image (B); result of the binary classification using the *isodata* algorithm (C).

Equipe de campo

A equipe de campo nessa fase do projeto foi composta por quatro pessoas, um engenheiro florestal, um biólogo e dois auxiliares de campo. Em campo, o engenheiro florestal era responsável pela anotação em planilha dos dados coletados na unidade amostral e coordenação da equipe; o biólogo era responsável pela identificação e mensuração das árvores e os dois auxiliares de campo dividiam as tarefas de abertura de trilhas, locação das subunidades, coleta de amostras, coordenadas GPS e fotografias hemisféricas.

Análise de dados

Definimos a proporção de unidades amostrais com medição da estrutura do dossel bem-sucedida dividindo o número de unidades amostrais com pelo menos oito fotografias hemisféricas com qualidade satisfatória (sem artefatos e sem erros de classificação) pelo total de unidades amostrais levantadas. Para estimar o tempo necessário

para a obtenção das fotos em campo, realizamos uma análise de tempos e movimentos, na qual levantamos todos os tempos utilizados para obtenção das fotografias e para a mensuração completa de cada subunidade amostral em 10 unidades amostrais. O tempo total dispensado para a mensuração completa da subunidade incluiu o tempo do engenheiro florestal e biólogo responsáveis pela medição do estrato arbóreo e regenerante, acrescentado o tempo utilizado pelos auxiliares de campo para a abertura das trilhas, demarcação da subunidade, coleta de amostras de indivíduos não identificados e obtenção das fotografias hemisféricas. Não foi incluído na análise o tempo de deslocamento desde o veículo até a unidade amostral.

Para analisar a variação da estrutura do dossel entre as fitofisionomias florestais, comparamos os valores das variáveis IAF, FAPAR, CD^m , CD^{dp} e CI. Primeiro, nós testamos a existência de autocorrelação espacial entre as unidades amostrais seguindo o método de Eisenlohr (2014). Não observamos autocorrelação espacial entre as unidades amostrais levantadas. Em seguida,

testamos a normalidade por meio de histogramas e a homoscedasticidade das variâncias com o teste de Bartlett. Não observamos normalidade nos dados e, conseqüentemente, aplicamos o teste de Kruskal-Wallis para testar a existência de diferença entre os grupos e o teste de Mann-Whitney para identificar as diferenças individuais entre pares. Todas as análises foram realizadas no R 4.2.1 (R Core Team, 2022).

Resultados

Das 363 unidades amostrais levantadas, 244 apresentaram pelo menos oito fotografias hemisféricas (FH) e, portanto, foram incluídas nas análises deste estudo. Essas representam 67% do total das unidades amostrais (UA) levantadas. Das 38 UAs levantadas na Floresta Estacional Decidual (FED), 19 foram incluídas nas análises (50%); na Floresta Ombrófila Mista (FOM) 106 das 161 UAs levantadas foram incluídas nas análises (66%); na Floresta Ombrófila Densa (FOD) 118 das 161 UAs levantadas foram incluídas nas análises (73%). Três UAs localizadas em área de restinga atenderam os pré-requisitos, porém não foram incluídas nas análises (Figura 1). A maior parte dos descartes de FH ocorreu devido ao excesso de luminosidade nas imagens,

causando reflexo na superfície das folhas, galhos e troncos e ofuscação de parte da vegetação quando o sol estava visível na imagem. Alguns descartes foram feitos por falha de operação, como ausência de foco ou presença de pessoas ou equipamentos nas imagens.

Em média, foram necessárias 00:18:30 (\pm 00:04:11) h⁻¹ pessoa para fazer o registro das fotografias hemisféricas em uma subunidade amostral, o que representa 3,8% (\pm 1,7%) do tempo total médio necessário para completar a mensuração das subunidades, que foi de 08:21:00 (\pm 02:50:00) h⁻¹ pessoa (Figura 4). A estrutura do dossel apresentou diferenças entre as fitofisionomias em nossas análises. Todas as variáveis analisadas diferiram entre a FOD e a FOM (α = 0,05), enquanto a FED apresentou valores indiferentes a ambos em todos os casos (Tabela 1). De forma geral, a FOM apresentou menor índice de área foliar (IAF), fração de absorção de radiação fotossinteticamente ativa (FAPAR), cobertura do dossel média (CDm) e índice de agregação foliar (CI), e apresentou maior desvio padrão da cobertura do dossel (CDdp). Esse resultado sugere que essa fitofisionomia apresenta, em média, um dossel menos denso, menos fechado e com maior heterogeneidade, o que também pode ser inferido pela distribuição menos concentrada dos dados observados na Figura 5.

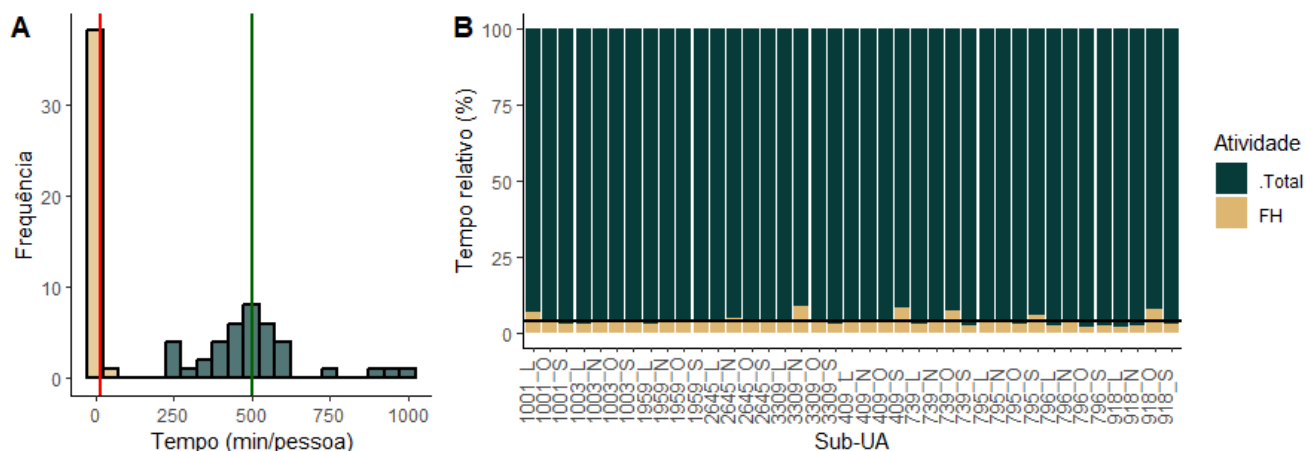


Figura 4. Distribuição dos tempos totais (A) e relativos (B) necessários para a obtenção das fotografias hemisféricas (FH) e levantamento de toda a subunidade amostral no segundo ciclo de medições do Programa FlorestaSC em Santa Catarina, Brasil. Linhas verticais em **A** indicam a média dos tempos totais (vermelha – FH; verde – total) e a linha horizontal em **B** indica a média do tempo relativo para a obtenção das fotografias hemisféricas.

Figure 4. Distribution of total (A) and relative (B) times needed to complete the acquisition of hemispherical photographs (HP) and the entire measurement of the sample unit in the second cycle of measurements of the FlorestaSC Program in Santa Catarina, Brazil. Vertical lines in **A** indicate the average total times (red – HP; green – total) and horizontal line in **B** indicates the average relative time needed for the acquisition of hemispherical photographs.

Tabela 1. Média e desvio padrão das variáveis da estrutura do dossel estimadas no segundo ciclo de medições (entre 2014 e 2019) do Programa FlorestaSC em Santa Catarina, Brasil.

Table 1. mean and standard deviation values of canopy structure variables estimated for the second cycle of measurements (from 2014 to 2019) of the FlorestaSC Program in Santa Catarina, Brazil.

Variável	Fitofisionomia						
	FOD		FOM		FED		
IAF	4,90	(0,90)	a 4,23	(1,08)	b 4,72	(1,11)	ab
FAPAR (%)	87,86	(8,66)	a 78,23	(14,93)	b 85,26	(8,63)	ab
CDm (%)	80,58	(13,40)	a 70,37	(16,97)	b 77,69	(16,81)	ab
CDdp (%)	18,45	(10,66)	b 25,32	(10,51)	a 21,34	(9,90)	ab
Cl (%)	53,35	(5,62)	a 49,64	(7,36)	b 51,96	(7,83)	ab

Letras diferentes na linha denotam médias diferentes de acordo com o teste de Mann-Whitney ($\alpha=0,05$).

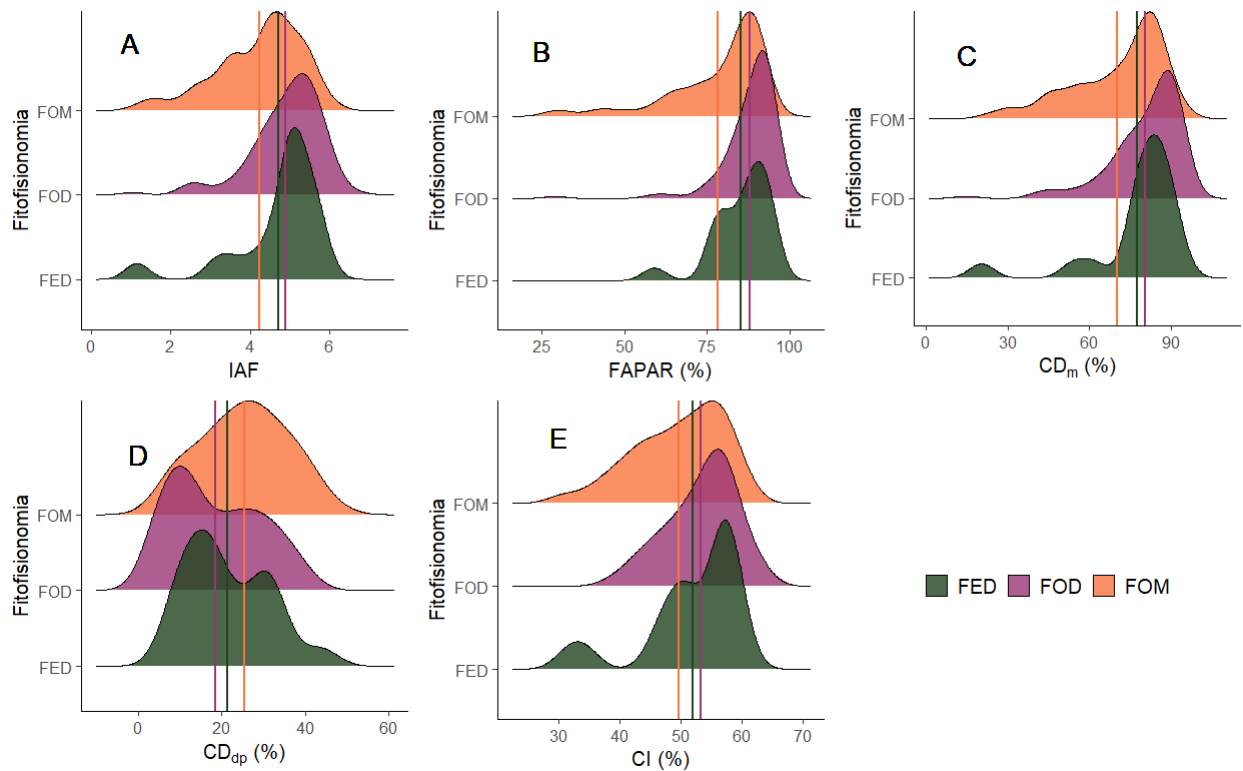


Figura 5. Distribuição dos valores observados (curvas) e médias (linhas verticais) do índice de área foliar (A), fração de absorção de radiação fotossinteticamente ativa (B), cobertura do dossel média (C), desvio padrão da cobertura do dossel (D), e índice de agregação foliar (E), estimados em 244 unidades amostrais do segundo ciclo de medições do Programa FlorestaSC em Santa Catarina, Brasil.

Figure 5. Distribution of observed value (curves) and mean (vertical lines) of leaf area index (A), fraction of absorbed photosynthetic active radiation (B), mean canopy closure (C), canopy closure standard deviation (D), foliage clumping index (E), estimated in 244 sample units of the second cycle of measurements of the FlorestaSC Program in Santa Catarina, Brazil.

Discussão

Nossos resultados mostram que há um bom aproveitamento dos dados coletados em campo; em 67% das unidades amostrais (UAs) levantadas foram obtidos dados de qualidade satisfatória, com baixo custo operacional, usando cerca de 3,8% do tempo total do levantamento de campo da UA, sem a necessidade de contratação de pessoal. O equipamento equivalente ao utilizado nesse estudo teria um custo atual (2024) de aproximadamente R\$ 7.000,00 (Câmera Nikon R100: R\$ 3.299,00 e; Lente Nikon Nikkor 10.5mm F/2.8: R\$ 3.700,00), havendo ainda alternativas mais baratas no mercado. Equipamentos especializados, como o LAI-2000/2200, são alternativas que produzem estimativas de qualidade semelhante às fotografias hemisféricas (FH), como mencionado por Chianucci et al. (2015). Porém, estes equipamentos são de maior custo e possuem limitações operacionais, como a necessidade de coleta simultânea da incidência solar dentro e fora da floresta (Li-cor, 2023), que dificultam sua aplicação no IFN/BR. Equipamentos de menor custo, como densiômetro e aplicativos de smartphone, podem ser alternativas, porém também apresentam suas limitações. Densiômetros requerem interpretação visual do operador, e por isso suas estimativas estão sujeitas à variação de acordo com a experiência do operador (Baudry et al., 2014). Aplicativos de smartphone apresentam limitações de uso que variam com as características de hardware e operação do equipamento, o que pode produzir estimativas pouco correlacionadas com estimativas obtidas através de técnicas mais precisas, como utilizando o LAI-2000 (Lusk, 2022). Apesar disso, esses equipamentos podem produzir estimativas adequadas de cobertura do dossel, como demonstrado por (Pinho et al., 2023), porém seu potencial ainda não foi testado em situações de campo do IFN/BR, onde as condições de iluminação dificilmente são as ideais. Os dados da estrutura do dossel levantados evidenciam diferenças estruturais significativas entre as fitofisionomias – Floresta Ombrófila Densa (FOD), Floresta Ombrófila Mista (FOM) e Floresta Estacional Decidual (FED) – da Floresta Atlântica em Santa Catarina.

Recomenda-se que FH tomadas com o intuito de estimar a estrutura do dossel de florestas sejam obtidas em dias de nebulosidade homogênea, no início da manhã ou final da tarde, quando o sol se encontra com menor ângulo de elevação (Chianucci, 2019). No entanto, no presente estudo obtivemos sucesso na maior parte das unidades amostrais levantadas, principalmente em dias com cobertura de nuvens parcial e em florestas com dossel mais denso. Utilizando apenas o canal azul das

imagens, consegue-se obter contrastes adequados entre vegetação e céu, mesmo com a maior luminosidade em dias com nebulosidade parcial. Adicionalmente, pode-se aumentar a subexposição das FH em locais com dossel mais aberto, assim compensando a alta luminosidade sem incorrer em erros de classificação causadas pelo menor contraste nas margens das imagens. Juntando-se a isto ainda a experiência do operador em tirar proveito da nebulosidade intermitente, da presença de indivíduos arbóreos de grande porte e da orientação da encosta (E-W; N-S) para obter imagens sem a incidência direta de luz solar, consegue-se aumentar o percentual de aproveitamento das fotografias hemisféricas coletadas.

Pela distribuição dos tempos totais, podemos notar que o tempo dedicado à medição completa de uma subunidade tem grande variação, enquanto o tempo para aquisição das FH é relativamente constante. Diversos fatores podem estender o tempo necessário para a medição completa da subunidade, como a composição de espécies que pode dificultar a sua identificação, gerando a necessidade de coleta de material botânico, o tamanho dos indivíduos e relevo que podem dificultar o acesso às árvores e a medição e a movimentação da equipe dentro da subunidade. Por outro lado, a aquisição das FH é apenas afetada pelo relevo do terreno e condições climáticas. Assim, o percentual do tempo total necessário para remedição de uma subunidade utilizado para a aquisição das FH nos moldes do FlorestaSC é principalmente uma função do tempo utilizado na medição do estrato arbóreo e regenerante. Em nossa experiência, salvo unidades amostrais que demandam muitas coletas botânicas, ou nas quais a densidade de taquaras dificulta a demarcação da UA e diminui o número de plantas lenhosas, a medição dos estratos arbóreo e regenerante são as atividades que demandam mais tempo no trabalho de campo. Sendo assim, a aquisição de FH causa um impacto muito reduzido no tempo total necessário para as remediações.

Dados do dossel nos ajudam a entender melhor o funcionamento e a biodiversidade das florestas e, inclusive, a sua relação com a paisagem adjacente, como explorado em Silva et al. (2020, 2022, 2024), utilizando a mesma base de dados. Diversos fatores podem afetar a estrutura do dossel. Na nossa área de estudo, mostramos que o efeito de borda tem um impacto negativo no índice de área foliar (Silva et al., 2020). Outros estudos demonstraram que o IAF – que é o aspecto mais estudado da estrutura do dossel – pode ser influenciado pela composição de espécies, clima, distúrbios antrópicos e intervenções de manejo (Jonckheere et al., 2004; Matricardi et al., 2010; Pfeifer et al., 2014, 2018; Silva & Vibrans, 2019).

A diferença na estrutura do dossel entre a FOM e a FOD possivelmente está ligada à diferença na composição de espécies, principalmente com a dominância de *Araucária angustifolia*, que possui uma arquitetura diferente de todas as outras espécies da Mata Atlântica. Por outro lado, a FED – fitofisionomia com maior fragmentação e mais degradada em Santa Catarina (Vibrans et al., 2020, 2021) – não apresentou diferenças estatísticas com a FOM ou a FOD em nenhum dos parâmetros analisados. Este resultado sugere que as possíveis diferenças no nível de degradação entre os tipos florestais não se refletem na estrutura do dossel dessas florestas na escala de análise.

A cobertura do dossel apresentou maior variabilidade dentro da unidade amostral (CDdp) do que entre as unidades amostrais (valor entre parênteses do CDm na Tabela 1). Tendo em vista que a abertura do dossel é fator essencial no microclima do sub-bosque (Hardwick et al., 2015), esse resultado mostra como a heterogeneidade de microclimas é elevada dentro de 4.000 m², e como a escala de análise pode trazer resultados diferentes sobre a estrutura do dossel. Por serem correlacionados, podemos presumir que LAI e FAPAR devam variar também no interior das unidades amostrais. Apesar de ter o dossel, de forma geral, dominado por *A. angustifolia*, a FOM apresentou os valores mais elevados de variabilidade de CD dentro e entre parcelas. Isso pode ser resultado da combinação de heterogeneidade na estrutura, histórico de exploração e degradação atual, tendo em vista que é a fitofisionomia com maior amplitude espacial no estado. Por outro lado, a FOM apresentou o dossel com menor grau de aglomeração das folhas (CI), ou seja, o dossel mais homogêneo na escala dos ramos e folhas. Esse resultado contrasta diretamente com o resultado anterior (maior CD e desvio padrão do CD), mas é possivelmente explicado pela dominância de *A. angustifolia* (com folhas aciculares e copa em formato de taça) no dossel.

De uma forma geral, os resultados de nossa prova-conceito permitem afirmar que a coleta de fotos hemisféricas permite aumentar a disponibilidade de dados quantitativos obtidos em campo com equipamento de fácil operação (a configuração da câmera segue poucos passos simples) e com estimativas consistentes (as estimativas das métricas são feitas através de algoritmos), independente de interpretação ou de estimativas dos técnicos em campo, como é o caso de densímetros com estimativas visuais. Assim, dados extraídos de FH permitem estimar, de forma objetiva, variáveis importantes, do ponto de vista ecológico e do desenvolvimento das florestas, como IAF, FAPAR, CD, CI. Estas variáveis são significantes, uma vez que

controlam ou direcionam processos responsáveis pela dinâmica de clareiras, considerado o principal motor da manutenção da produtividade, biodiversidade e da regeneração nas florestas tropicais (Muscolo et al., 2014). Nesta dinâmica destacam-se dois processos (Chazdon et al., 2010): por um lado, a abertura de clareiras pela senescência de árvores adultas e o consequente aumento da radiação solar no solo e sub-bosque das florestas, que resulta na regeneração de espécies arbóreas adaptadas a tais níveis de iluminação. Por outro lado, o processo inverso, que é o gradativo fechamento do dossel, que direciona a redução do número de indivíduos pertencentes a um conjunto de espécies arbóreas (secundárias tardias ou climácicas) adaptadas a níveis cada vez menores de radiação. Importantes mudanças nos padrões taxonômicos, de estratégias de vida e funcionais, portanto, são resultado indiretos das mudanças ocorridas no dossel (Muscolo et al., 2014). Reconhecer estas mudanças e classificar o estado da vegetação utilizando as variáveis estruturais do dossel, talvez seja a maior contribuição da coleta de FH para a compreensão de padrões e caminhos do desenvolvimento das florestas, numa escala regional ou continental no âmbito de IFNs.

O conhecimento resultante pode pavimentar o caminho para conservação e proteção, por meio do manejo adaptado – do tipo “*close to nature*” (O’Hara, 2016) – deste importante reservatório terrestre de biodiversidade, biomassa e carbono (Pan et al., 2011; Pillay et al., 2022). Além disso, o dossel da floresta representa a interface da vegetação com a atmosfera, é onde a maior parte da fotossíntese, evapotranspiração e troca de energia ocorrem (Malhado et al., 2009; Olivas et al., 2013) sendo relacionado, por consequência, com diversos processos climáticos, tais como o ciclo de carbono e da água. A obtenção de estimativas de variáveis estruturais por outros meios (Spectrômetros (LICOR), LiDAR, imagens multiespectrais de resolução espacial submétrica, de sensores orbitais ou aerotransportados) é possível, mas demanda, necessariamente, dados de calibração espacialmente abrangentes, preferencialmente coletados de forma sistemática e independente, como são os dados de um IFN.

Conclusões

Aqui apresentamos um panorama da estrutura do dossel das florestas de Santa Catarina, utilizando dados levantados pelo FlorestaSC e discutimos brevemente as implicações e potencialidades que esses dados podem trazer para a conservação e manejo das nossas florestas. Assim, demonstramos o potencial e a

importância de integrar o levantamento da estrutura do dossel nas atividades de campo do Inventário Florestal Nacional (IFN). O levantamento em campo ocupou apenas uma pequena fração do tempo necessário para o levantamento completo da unidade amostral (UA) nos moldes do IFN/BR. Mesmo havendo perda de dados por condições climáticas não ideais, obtivemos, no nosso levantamento, um aproveitamento das fotografias coletadas em dois terços das UAs amostradas, em todo o estado de Santa Catarina. A inclusão da coleta de dados da estrutura do dossel em nível nacional indica uma oportunidade ímpar de aumentarmos o conjunto de dados essenciais para o entendimento do funcionamento das florestas brasileiras, sua interação com o clima local e regional, e microclima do sub-bosque.

Agradecimentos e fonte de financiamento

Esse manuscrito foi produzido junto ao Programa FlorestaSC. Os autores agradecem à equipe de campo e de escritório do Programa, pela coleta e organização dos dados, e aos proprietários por garantir o acesso as unidades amostrais. O primeiro autor recebeu bolsa de pós-doutorado da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e o segundo autor recebeu bolsa de produtividade do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (305199/2022-6). O Programa FlorestaSC foi financiado pela Secretaria de Estado do Meio Ambiente e da Economia Verde (SEMAE), Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado Santa Catarina (FAPESC) e teve apoio da Universidade Regional de Blumenau (FURB).

Conflito de interesses

Os autores não têm conflito de interesse a declarar.

Contribuição de Autoria

Daniel Augusto da Silva: Metodologia, investigação, análise formal, escrita – primeira redação. **Alexander Christian Vibrans:** Supervisão, metodologia, investigação, escrita – revisão e edição.

Referências

Baudry, O. et al. Estimating light climate in forest with the convex densiometer: operator effect, geometry and relation to diffuse light. **European Journal of Forest Research**, v. 133, p. 101-110, 2014. <https://doi.org/10.1007/s10342-013-0746-6>.

Brena, D. A. Proposição de um sistema de inventário florestal nacional para o Brasil. **Ciência Florestal**, v. 6, p. 109-127, 1996. <https://doi.org/10.5902/19805098330>.

Chazdon, R. L. et al. Composition and dynamics of functional groups of trees during tropical forest succession in Northeastern Costa Rica: functional groups of trees. **Biotropica**, v. 42, p. 31-40, 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2009.00566.x>.

Chen, J. M. & Black, T. A. Foliage area and architecture of plant canopies from sunfleck size distributions. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 60, p. 249-266, 1992.

Chen, J. M. & Cihlar, J. Quantifying the effect of canopy architecture on optical measurements of leaf area index using two gap size analysis methods. **Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 33, p. 777-787, 1995. <https://doi.org/10.1109/36.387593>.

Chianucci, F. An overview of in situ digital canopy photography in forestry. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 50, p. 227-242, 2019. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0055>.

Chianucci, F. & Cutini, A. Digital hemispherical photography for estimating forest canopy properties: current controversies and opportunities. **IForest**, v. 5, p. 290-295, 2012. <https://doi.org/10.3832/ifer0775-005>.

Chianucci, F. et al. Estimation of foliage clumping from the LAI-2000 Plant Canopy Analyzer: effect of view caps. **Trees**, v. 29, p. 355-366, 2015. <https://doi.org/10.1007/s00468-014-1115-x>.

Eisenlohr, P. V. Persisting challenges in multiple models: a note on commonly unnoticed issues regarding collinearity and spatial structure of ecological data. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 37, p. 365-371, 2014. <https://doi.org/10.1007/s40415-014-0064-3>.

Fournier, R. A. & Hall, R. J. **Hemispherical photography in forest science: theory, methods, applications**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2017a. 306 p.

Fournier, R. A. & Hall, R. J. Hemispherical photography in forest science: conclusions, applications, limitations, and implementation perspectives. In: Fournier, R. A. & Hall, R. J. **Hemispherical photography in forest science: theory, methods, applications**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2017b. p. 287-302.

Freitas, J. V. de et al. Brazil. In: Tomppo, E. et al. **National forest inventories**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2010. p. 89-96.

Freitas, J. V. et al. National Forest Inventory of Brazil. In: Ramírez, C. et al. **National Forest Inventories of Latin America and the Caribbean Towards the harmonization of forest information**. Roma: FAO, 2022. p. 102-119.

Hardwick, S. R. et al. The relationship between leaf area index and microclimate in tropical forest and oil palm plantation: forest disturbance drives changes in microclimate. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 201, p. 187-195, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.11.010>.

IBGE. **Mapa de vegetação do Brasil**. Rio de Janeiro, 2004.

- Jonckheere, I. et al. Review of methods for in situ leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 121, p. 19-35, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.08.027>.
- Leblanc, S. G. & Fournier, R. A. Measurement of forest structure with hemispherical photography. In: Fournier, R. A. & Hall, R. J. **Hemispherical photography in forest science: theory, methods, applications**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2017. p. 53-84.
- LI-COR. **LAI-2200C Plant Canopy Analyzer Instruction Manual**. Li-Cor, 2023. Disponível em: <https://licor.app.boxenterprise.net/s/fqjn5mlu8c1a7zir5qel>.
- Lusk, C. H. A field test of forest canopy structure measurements with the CanopyCapture smartphone application. **PeerJ**, v. 10, e13450, 2022. DOI: 10.7717/peerj.13450.
- Macfarlane, C. et al. Digital canopy photography: exposed and in the raw. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 197, p. 244-253, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.05.014>.
- Malhado, A. C. M. et al. Seasonal leaf dynamics in an Amazonian tropical forest. **Forest Ecology and Management**, v. 258, p. 1161-1165, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.06.002>.
- Matricardi, E. A. T. et al. Assessment of tropical forest degradation by selective logging and fire using Landsat imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, p. 1117-1129, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.01.001>.
- Musco, A. et al. A review of the roles of forest canopy gaps. **Journal of Forestry Research**, v. 25, p. 725-736, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11676-014-0521-7>.
- NG, C. W. W. et al. Relationships between leaf and root area indices and soil suction induced during drying-wetting cycles. **Ecological Engineering**, v. 91, p. 113-118, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.02.005>.
- O'hara, K. L. What is close-to-nature silviculture in a changing world? **Forestry**, v. 89, p. 1-6, 2016. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpv043>.
- Olivas, P. C. et al. Comparison of direct and indirect methods for assessing leaf area index across a tropical rain forest landscape. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 177, p. 110-116, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.04.010>.
- Pan, Y. et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests. **Science**, v. 333, p. 988-993, 2011. <https://doi.org/10.1126/science.1201609>.
- Pfeifer, M. et al. Tropical forest canopies and their relationships with climate and disturbance: results from a global dataset of consistent field-based measurements. **Forest Ecosystems**, v. 5, p. 7, 2018. <https://doi.org/10.1186/s40663-017-0118-7>.
- Pfeifer, M. et al. Validating and Linking the GIMMS Leaf Area Index (LAI3g) with environmental controls in Tropical Africa. **Remote Sensing**, v. 6, p. 1973-1990, 2014. <https://doi.org/10.3390/rs6031973>.
- Pillay, R. et al. Tropical forests are home to over half of the world's vertebrate species. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 20, p. 10-15, 2022. <https://doi.org/10.1002/fee.2420>.
- Pinho, L. C. et al. Avaliação de aplicativos tecnológicos na mensuração de abertura de dossel na Floresta Ombrófila Mista. **Ciência Florestal**, v. 33, e67685, 2023. <https://doi.org/10.5902/1980509867685>.
- R Core Team. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2021.
- Ramírez, C. et al. **National Forest Inventories of Latin America and the Caribbean: towards the harmonization of forest information**. Rome: FAO, 2022. <https://doi.org/10.4060/cb7791en>.
- Russavage, E. et al. Characterizing canopy openness in open forests: spherical densiometer and canopy photography are equivalent but less sensitive than direct measurements of solar radiation. **Journal of Forestry**, v. 119, p. 130-140, 2021. <https://doi.org/10.1093/jofore/fvaa052>.
- Schleppi, P. & Paquette, A. Solar radiation in forests: theory for hemispherical photography. In: Fournier, R. A. & Hall, R. J. **Hemispherical photography in forest science: theory, methods, applications**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2017. p.15-54. .
- Serviço Florestal Brasileiro. **Manual de campo: procedimentos para coleta de dados biofísicos e socioambientais**. Brasília, DF, 2015. 67 p.
- Sevegnani, L. et al. Structure and diversity of the *Araucaria* forest in southern Brazil: biotic homogenisation hinders the recognition of floristic assemblages related to altitude. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, v. 81, p. 297-305, 2019. <https://doi.org/10.2989/20702620.2019.1636193>.
- Silva, D. A. da et al. Drivers of leaf area index variation in Brazilian Subtropical Atlantic Forests. **Forest Ecology and Management**, v. 476, p. 118477, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118477>.
- Silva, D. A. da et al. Conspecific density plays a pivotal role in shaping sapling community in highly fragmented subtropical forests. **Austral Ecology**, v. 47, p. 1609-1621, 2022. <https://doi.org/10.1111/aec.13249>.
- Silva, D. A. da & Vibrans, A. C. Canopy architecture after selective logging in a Secondary Atlantic Rainforest in Brazil. **Floresta e Ambiente**, v. 26, e20180374, 2019. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.037418>.
- Silva, D. D. et al. **Biomass stock and growth are modulated by anthropogenic pressures, canopy structure and tree biodiversity in fragmented Atlantic Rainforest**. 2024. <https://doi.org/10.22541/au.170664872.21589210/v1>.
- Tomppo, E. O. & Schadauer, K. Harmonization of National Forest Inventories in Europe: advances under COST Action E43. **Forest Science**, v. 58, p. 191-200, 2012. <https://doi.org/10.5849/forsci.10-091>.

Vibrans, A. C. et al. Insights from a large-scale inventory in the southern Brazilian Atlantic Forest. **Scientia Agricola**, v. 77, e20180036, 2020. <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2018-0036>.

Vibrans, A. C. et al. MonitoraSC: um novo mapa de cobertura florestal e uso da terra de Santa Catarina. **Agropecuária Catarinense**, v. 34, p. 42-48, 2021. <https://doi.org/10.52945/rac.v34i2.1086>.

Vibrans, A. C. et al. (ed.). **Inventário florístico florestal de Santa Catarina**: diversidade e conservação dos remanescentes florestais. Blumenau: Edifurb, 2012. v. 1, 344 p.

Weiss, M. & Baret, F. **Can-eye version 6.4.91 user manual**. Paris: Institut National de la Recherche Agronomique, 2017.