



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE SANTA CRUZ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA E CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE

IGOR PIRES REIS

**TÉCNICAS E PROCEDIMENTOS PARA AVALIAÇÃO DE ATRIBUTOS
ESTRUTURAIS DO DOSSEL POR MEIO DE IMAGENS DIGITAIS E SUAS
APLICAÇÕES NA CONSERVAÇÃO DE FLORESTAS TROPICAIS**

ILHÉUS - BAHIA

2023

IGOR PIRES REIS

**TÉCNICAS E PROCEDIMENTOS PARA AVALIAÇÃO DE ATRIBUTOS
ESTRUTURAIS DO DOSSEL POR MEIO DE IMAGENS DIGITAIS E SUAS
APLICAÇÕES NA CONSERVAÇÃO DE FLORESTAS TROPICAIS**

Tese apresentada à Universidade Estadual de Santa Cruz,
como parte das exigências para obtenção do título de Doutor
em Ecologia e Conservação da Biodiversidade.

Área de concentração: Ecologia e conservação de
comunidades, ecossistemas e paisagens.

Discente: Igor Pires Reis

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Schramm Mielke

Co-orientadora: Prof^a. Dr^a Larissa Rocha Santos

ILHÉUS – BAHIA

2023

R375

Reis, Igor Pires.

Técnicas e procedimentos para avaliação de atributos estruturais do dossel por meio de imagens digitais e suas aplicações na conservação de florestas tropicais / Igor Pires Reis. – Ilhéus, BA: UESC, 2023.

[111] f. : il.

Orientador: Marcelo Schramm Mielke.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Santa Cruz. Programa de Pós-graduação em Ecologia e Conservação da Biodiversidade.

Inclui referências.

1. Ecologia das florestas tropicais. 2. Dossel (Botânica) (Estrutura). 3. Fotografias como recursos de informação. 4. Palmito. I. Título.

CDD 577.34

IGOR PIRES REIS

**TÉCNICAS E PROCEDIMENTOS PARA AVALIAÇÃO DE ATRIBUTOS
ESTRUTURAIS DO DOSSEL POR MEIO DE IMAGENS DIGITAIS E SUAS
APLICAÇÕES NA CONSERVAÇÃO DE FLORESTAS TROPICAIS**

Tese apresentada à Universidade Estadual de Santa Cruz, como parte das exigências para obtenção do título de Doutor em Ecologia e Conservação da Biodiversidade.

Ilhéus, 24 de maio de 2023.

Ilhéus, 24 de maio de 2023.

Prof^a. Dr^a. Daniela Custódio Talora
Universidade Estadual de Santa Cruz

Dr^a. Leiza A. Souza Serafim Soares
Universidade Estadual de Santa Cruz

Prof. Dr. Rogério Ferreira Ribas
Universidade Federal do Recôncavo da
Bahia

Prof^a. Dr^a. Ândra Carla Dalmolin
Universidade Federal do Sul da Bahia

Prof. Dr. Marcelo Schramm Mielke
Universidade Estadual de Santa Cruz
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que contribuíram para este projeto. Em especial, gostaria de agradecer a meus pais por todo o apoio e ensinamentos ao longo da minha vida. Sua dedicação e incentivo foram fundamentais para o meu crescimento e sucesso.

Meu especial agradecimento ao meu orientador Marcelo Schramm Mielke pelos bons momentos de discussão, incentivo e aprendizagem durante o doutorado. Sua expertise e orientação foram inestimáveis e fizeram uma diferença significativa nos resultados alcançados.

Também gostaria de agradecer à minha co-orientadora Larissa Rocha Santos. Agradeço pelo apoio, confiança e dedicação ao longo deste trabalho.

À minha amiga Amanda Freitas Cerqueira, por sua valiosa ajuda e apoio durante todo o processo. Agradeço também a Carolina Reis de Brito e Carolina Barreto Teles pela contribuição.

Também gostaria de estender meus agradecimentos a Janaine Isabela da Silva Rocha, Priscila Santos Silva e Roberto Fiorini Torrico pela amizade e suporte ao longo deste trabalho.

À Universidade Estadual de Santa Cruz e ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Conservação da Biodiversidade, expresso minha gratidão pela excelente formação proporcionada durante o doutorado. Agradeço também a todo o corpo docente pela dedicação e orientação ao longo do curso.

Expresso minha gratidão a todos os meus colegas do Grupo de Estudos de Ecofisiologia Vegetal e ao Laboratório de Ecologia Aplicada à Conservação (LEAC/UESC) por compartilharem conhecimentos, ideias e experiências ao longo desta jornada acadêmica.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia - FAPESB e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pelo fomento concedido, que possibilitou a realização deste projeto.

Por fim, gostaria de agradecer mais uma vez aos meus amigos Luan e Karine por seu apoio constante e por estarem presentes em todos os momentos.

Mais uma vez, meu sincero agradecimento a todos aqueles que contribuíram de alguma forma. Sou extremamente grato pela oportunidade de trabalhar com uma equipe tão dedicada e talentosa.

Neste momento, olho para trás e vejo todo o caminho percorrido, repleto de desafios, aprendizados e conquistas...

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	12
INTRODUÇÃO GERAL.....	13
REFERÊNCIAS	18
CAPÍTULO 1.....	22
Digital hemispheric photography in ecological studies of tropical and subtropical forests: a systematic review	
Abstract	23
Introduction	24
Material and methods	26
Results	29
Discussion	36
Final considerations.....	44
Acknowledgements	45
CAPÍTULO 2.....	54
Pre-processing procedures for analyzing digital hemispherical photographs in different successional stages of tropical rainforests	
Resumo.....	55
Introdução.....	56
Materiais e métodos	60
Resultados	65
Discussão.....	74
Referências	80
CAPÍTULO 3.....	86
Dynamics Light exposure and establishment of an endangered palm tree in the understory of forest fragments in the Atlantic Forest	
Resumo.....	87
Introdução.....	88
Metodologia	91
Resultados	95
Discussão.....	98

Conclusão	102
Referências	103
CONCLUSÃO GERAL	109

LISTA DE TABELAS

INTRODUÇÃO GERAL

Tabela 1. Variáveis descritoras de atributos de dossel trabalhadas na tese.

CAPÍTULO 1: Digital hemispheric photography in ecological studies of tropical and subtropical forests: a systematic review

Table 1. Levels at which errors can be introduced in digital hemispherical canopy photography.

Table 2. Presence and absence of information regarding cameras models used in the 53 articles in the obtaining the photos in the field stage.

Table 3. Presence and absence of information regarding cameras and Fisheye lens models used in the 53 articles in the obtaining the photos in the field stage.

Table 4. General information of the image analysis software.

Table 5. General information of image analysis: step of extracting canopy attributes and solar radiation estimate.

CAPÍTULO 2: Pre-processing procedures for analyzing digital hemispherical photographs in different successional stages of tropical rainforests

Tabela 1. Descrição dos sítios estudados dentro do Parque Estadual da Serra do Condurú (PESC).

Tabela 2. Níveis de significância de Aligned Rank Transform (ART) ANOVA de duas vias para os efeitos de sítios em diferentes estágios sucessionais (ES), para o pré-processamento de imagens (PP) obtidas por meio de fotografias hemisféricas e interações entre ES x PP para abertura de dossel (CO), transmissão de luz (T), e número de sunflecks (Sf), sunpatches (Sp), sungaps (Sg) e clearings (Cg). (N = 288).

CAPÍTULO 3: Dynamics Light exposure and establishment of an endangered palm tree in the understory of forest fragments in the Atlantic Forest

Tabela 1. Sumário da ANOVA para a presença de *sunflecks* (Sf), *sunpatches* (Sp), *sungaps* (Sg) e *clearings* (Cg), e para a razão Sf/Sp para os locais onde se encontravam os indivíduos jovens de *E. edulis* e para as parcelas localizadas no interior dos mesmos fragmentos, independentemente da presença dos indivíduos jovens de *E. edulis*. (N=15)

LISTA DE FIGURAS

INTRODUÇÃO GERAL

Figura 1. A) Representação do método das Fotografias Hemisféricas Digitais (FHds) utilizado nessa tese. B) Câmera Nikon Coolpix 4300 com a lente olho de peixe (180°) modelo Nikon FC-E8. (Foto: Josafá Amaral de Oliveira Filho)

CAPÍTULO 1: Digital hemispheric photography in ecological studies of tropical and subtropical forests: a systematic review

Figure 1. Flowchart of the study selection procedure.

Figure 2. Number of publications (according to the scope of this literature review) per country.

Figure 3. Number of studies per year (A) and missing information in study methods (expressed as the percentage of total studies published in each year) precluding replication across tree crucial steps in methodology for studies in included that used digital hemispherical photography (DHP): Obtaining photos in the field (B), pre-processing (C) and image analysis (D).

Figure 4. Presence and absence of repeatability in the 53 articles regarding the stage of obtaining the photos in the field.

CAPÍTULO 2: Pre-processing procedures for analyzing digital hemispherical photographs in different successional stages of tropical rainforests

Fig. 1. Mapa do local de estudo onde foram obtidas as Fotografias Hemisféricas Digitais (FHds). À direita consta um mapa com os limites do Parque Estadual da Serra do Conduru (PESC) localizado no Sul do Estado da Bahia, Brasil.

Fig. 2. Os Box-and-whisker mostram os percentis 0, 25, 50, 75 e 100 da distribuição com os valores médios da abertura de dossel (CO), transmissão de luz (T), número de *sunflecks* (Sf), *sunpatches* (Sp), *sungaps* (Sg) e *clearings* (Cg) em sítios com diferentes estágios sucessionais numa floresta tropical úmida localizada na Mata Atlântica do sul da Bahia, Brasil: pastagem em regeneração (S1), capoeira em sucessão avançada (S2) e floresta madura (S3). Os Box-and-whisker seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0.05$). (N = 96).

Fig. 3. Os Box-and-whisker mostram os percentis 0, 25, 50, 75 e 100 da distribuição com os valores médios da abertura de dossel (CO), transmissão de luz (T), e número de sunflecks (Sf) numa floresta tropical úmida localizada na Mata Atlântica do sul da Bahia, Brasil, em função da combinação de pré-processamentos de imagens obtidas por meio de fotografias hemisféricas: com filtro sharpen e com canal azul (+S+FA), com filtro sharpen e sem canal azul (+S-FA), sem filtro sharpen e com canal azul (-S+FA), e sem filtro sharpen e sem canal azul (-S-FA). Os Box-and-whisker seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0.05$). (N = 72).

Fig. 4. Os Box-and-whisker mostram os percentis 0, 25, 50, 75 e 100 da distribuição com os valores médios da abertura de dossel (CO) para três sítios numa floresta tropical úmida

localizada na Mata Atlântica do sul da Bahia, Brasil (pastagem em regeneração – S1, capoeira em sucessão avançada - S2, e floresta madura – S3), em função da combinação de pré-processamentos de imagens obtidas por meio de fotografias hemisféricas: com filtro *sharpen* e com canal azul (+S+FA), com filtro *sharpen* e sem canal azul (+S-FA), sem filtro *sharpen* e com canal azul (-S+FA), e sem filtro *sharpen* e sem canal azul (-S-FA). Médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0.05$). Os Box-and-whisker seguidas com letras maiúsculas representam comparações de sítios dentro de pré-processamentos e letras minúsculas representam comparações de pré-processamentos dentro de sítios. (N = 72).

Fig. 5. Os Box-and-whisker mostram os percentis 0, 25, 50, 75 e 100 da distribuição com os valores médios da transmissão de luz (T) para três sítios localizados numa floresta tropical úmida localizada na Mata Atlântica do sul da Bahia, Brasil (pastagem em regeneração - S1, capoeira em sucessão avançada - S2, e floresta madura – S3), em função da combinação de pré-processamentos de imagens obtidas por meio de fotografias hemisféricas: com filtro *sharpen* e com canal azul (+S+FA), com filtro *sharpen* e sem canal azul (+S-FA), sem filtro *sharpen* e com canal azul (-S+FA), e sem filtro *sharpen* e sem canal azul (-S-FA) Médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0.05$). Os Box-and-whisker seguidas com letras maiúsculas representam comparações de sítios dentro de pré-processamentos e letras minúsculas representam comparações de pré-processamentos dentro de sítios. (N = 72).

Fig. 6. Os Box-and-whisker mostram os percentis 0, 25, 50, 75 e 100 da distribuição com os valores médios \pm SE número de sunflecks (Sf) para três sítios localizados numa floresta tropical úmida localizada na Mata Atlântica do sul da Bahia, Brasil (pastagem em regeneração – S1, capoeira em sucessão avançada - S2, e floresta madura – S3), em função da combinação de pré-processamentos de imagens obtidas por meio de fotografias hemisféricas: com filtro *sharpen* e com canal azul (+S+FA), com filtro *sharpen* e sem canal azul (+S-FA), sem filtro *sharpen* e com canal azul (-S+FA), e sem filtro *sharpen* e sem canal azul (-S-FA). Os Box-and-whisker seguidas com letras maiúsculas representam comparações de sítios dentro de pré-processamentos e letras minúsculas representam comparações de pré-processamentos dentro de sítios. (N = 72).

CAPÍTULO 3: Dynamics Light exposure and establishment of an endangered palm tree in the understory of forest fragments in the Atlantic Forest

Fig. 1. A figura representa a distribuição de frequência com a média de *sunflecks*, *sunpatches*, *sun gaps* e *clearings* extraídos para indivíduos (T1) (n = 222) e para fragmentos (T2) (n=150). A média de T1 E T2 é a frequência absoluta, que é o número de vezes que um dado apareceu, que posteriormente foi dividido pelo total de dados obtidos, ou seja, a soma das quatro categorias das variáveis dinâmicas.

Fig. 2. Os Box-and-whisker mostram os percentis 0, 25, 50, 75 e 100 da distribuição com os valores médios de sunpatches (Sp) e para a razão de sunflecks (Sf) e sunpatches (Sf/Sp) extraídos de 15 Fragmentos com diferentes percentuais de cobertura florestal em escala de paisagem. Os tratamentos foram considerados a partir da obtenção de FHDs logo acima dos indivíduos jovens de *E. edulis* (n = 222) e a média dos fragmentos (n = 150). Os Box-and-whisker seguidos por letras diferentes diferem entre si pelo teste F da ANOVA.

RESUMO

O dossel das florestas é uma camada superior de vegetação que abriga uma grande variedade de organismos e afeta a qualidade e disponibilidade de recursos para as espécies no sub-bosque da floresta. Para garantir a proteção e a manutenção da estrutura do dossel é necessário monitorá-lo para avaliar se exerce sua função adequadamente. A Fotografia Hemisférica Digital (FHd) é um método indireto de baixo custo e com múltiplas possibilidades de medidas de atributos de dossel, como a radiação solar transmitida no sub-bosque e a sua influência nas comunidades vegetativas. Por isso, o objetivo geral dessa tese foi analisar o atual estado da arte do uso de imagens hemisféricas obtidas por equipamentos digitais para a avaliação dos atributos estruturais do dossel, o uso de novas técnicas para o pré-processamento das imagens e suas aplicações na conservação de uma espécie-chave para a conservação de florestas tropicais. Para aumentar a compreensão sobre o conhecimento científico do método utilizado nessa tese, no primeiro capítulo foi realizado uma revisão sistemática, ou melhor, um estudo ciencionométrico. Nosso objetivo específico para esse capítulo foi investigar o estado da arte e a presença de informações que permitam a repetibilidade de pesquisas envolvendo o uso de fotografias hemisféricas digitais em estudos sobre a ecologia de florestas tropicais. Observamos uma média de 44% de perda de informação do total de estudos publicados no período de 2000 a 2020. A perda de informação ocorre principalmente nas etapas de pré-processamento, com 65%, seguida da obtenção das fotos em campo e processamento das imagens, com 41% e 13%, respectivamente. Por meio de nossos resultados, foi possível encontrar tendências e lacunas na metodologia, e a partir disso elaboramos o segundo capítulo. No segundo capítulo investigamos o uso de técnicas de pré-processamento de imagens digitais em FHds obtidas numa floresta tropical úmida em diferentes estágios sucessionais. O uso do pré-processamento promoveu um ganho de precisão no processamento das imagens em estágios sucessionais avançados e intermediários, porém o pré-processamento em estágios iniciais não se fez necessário. No terceiro capítulo foi possível trabalhar com as novas técnicas para aprimoramento do método e aplicá-lo a conservação da *E. edulis*. Assim, nosso objetivo específico para esse capítulo foi investigar a contribuição da duração do tempo de exposição à radiação solar (*sunflecks*, *sunpatches*, *sungaps* e *clearings*), calculados a partir de imagens digitais hemisféricas, para o estabelecimento de indivíduos de *E. edulis* no sub-bosque de fragmentos florestais imersos em um gradiente de cobertura florestal na paisagem. Foi possível observar que as variáveis dinâmicas de *sunflecks* e *sunpatches* foram predominantes, tanto nos locais onde se encontravam os indivíduos jovens de *E. edulis*, como para a média de cada fragmento. Além disso, não foram encontrados *clearings* e *sungaps* nos locais onde se estabeleceram a *E. edulis*. Em resumo, as conclusões gerais deste trabalho destacam o avanço significativo da metodologia das Fotografias Hemisféricas Digitais (FHd) devido ao desenvolvimento tecnológico, tornando-a amplamente utilizada na caracterização do dossel das florestas e na extração de atributos. Foram adicionadas técnicas de pré-processamento, como o filtro *sharpen* e o uso do canal azul, que aumentaram a nitidez e o reconhecimento das classes de pixels, principalmente em estágios sucessionais intermediários e avançados. A utilização de algoritmos modernos automatizados otimizou o processo de extração de atributos do dossel. A aplicabilidade das FHd foi demonstrada na caracterização do habitat para a regeneração natural da espécie *E. edulis* Mart, permitindo a seleção de locais adequados para o seu plantio. Portanto, a metodologia das FHd mostrou-se não invasiva e eficiente na avaliação das condições de luz do sub-bosque, contribuindo para a conservação de espécies que dependem de níveis específicos de luz.

Palavras-chave: Estrutura do dossel; Fotografias Hemisféricas digitais (FHds); atributos de dossel; microclima; *Euterpe Edulis* Mart.

ABSTRACT

The forest canopy is an upper layer of vegetation that harbors a wide variety of organisms and affects the quality and availability of resources for species in the forest understory. Monitoring the canopy is necessary to ensure its protection and maintenance of its structure and functions. Digital Hemispherical Photography (DHP) is a low-cost indirect method with multiple possibilities for measuring canopy attributes, such as solar radiation transmitted to the understory and its influence on vegetation communities. Thus, the general objective of this thesis was to analyze the current state of the art of using digital hemispherical images for evaluating canopy structural attributes, applying new image pre-processing techniques, and their applications in the conservation of a key species for tropical forest conservation. In order to increase understanding of the scientific knowledge related to the method used in this thesis, a systematic review, or scientometric study, was conducted in the first chapter. The specific objective of this chapter was to investigate the state of the art and the presence of information that allows for research replicability involving the use of digital hemispherical photographs in studies of tropical forest ecology. We observed an average information loss of 44% among the total number of studies published from 2000 to 2020. Information loss mainly occurred during the pre-processing stage (65%), followed by field photo acquisition and image processing at 41% and 13%, respectively. Based on our results, trends and gaps in the methodology were identified, leading to the development of the second chapter. In the second chapter, we investigated the use of digital image pre-processing techniques on DHPs obtained in a humid tropical forest at different successional stages. The use of pre-processing techniques improved the precision of image processing in advanced and intermediate successional stages, but pre-processing was not necessary for early successional stages. In the third chapter, new techniques were applied to improve the method and its application to the conservation of *E. edulis*. The specific objective of this chapter was to investigate the contribution of sunflecks, sunpatches, sungaps, and clearings, calculated from hemispherical digital images, to the establishment of *E. edulis* individuals in the understory of forest fragments immersed in a gradient of forest cover in the landscape. It was observed that dynamic variables such as sunflecks and sunpatches were predominant, both in the locations where young *E. edulis* individuals were found and in the average values for each fragment. Moreover, no clearings or sungaps were found in the locations where *E. edulis* established itself. In summary, the overall conclusions of this work highlight the significant advances in Digital Hemispherical Photography (DHP) methodology due to technological development, making it widely used for characterizing forest canopies and extracting canopy attributes. Pre-processing techniques, such as the sharpen filter and the use of the blue channel, were added, enhancing sharpness and the recognition of pixel classes, particularly in intermediate and advanced successional stages. The application of modern automated algorithms optimized the process of extracting canopy attributes. The applicability of DHP was demonstrated in characterizing the habitat for natural regeneration of the species *E. edulis* Mart, enabling the selection of suitable planting locations. Therefore, DHP methodology proved to be non-invasive and efficient in evaluating understory light conditions, contributing to the conservation of species that depend on specific light levels.

Keywords: Canopy structure; Digital Hemispherical Photographs (FHds); Canopy attributes; microclimate; *Euterpe Edulis* Mart.

INTRODUÇÃO GERAL

O dossel é composto por árvores emergentes e topo de dossel que formam uma camada superior de vegetação, e pode fornecer habitat e recursos para uma grande variedade de organismos, principalmente se tratando da floresta de Mata Atlântica no sul da Bahia, considerada um *hot spot* (PAN *et al.* 2013; GATTI *et al.* 2014; SOARES *et al.* 2015; BENCHIMOL *et al.* 2016; MORANTE-FILHO *et al.* 2018;). Para não afetar a biodiversidade local é necessário manter a estrutura do dossel bem preservada, pois essa camada superior da floresta exerce um efeito regulador do microclima local afetando a qualidade e a disponibilidade de recursos para as espécies localizadas no sub-bosque da floresta (LAURANCE *et al.* 2012; GALVANI; LIMA, 2014; CUDNEY-VALENZUELA *et al.* 2023). O dossel da floresta atua como um filtro ambiental natural da radiação solar e reduz a quantidade de luz que atinge as camadas inferiores da floresta, proporcionando um ambiente de sombra que pode ser favorável para algumas espécies que se adaptam a essas condições (CERQUEIRA *et al.* 2021; REIS *et al.* 2021).

Para garantir proteção e a manutenção da estrutura do dossel, e da biodiversidade, surgiram métodos diretos e indiretos que visam monitorar e avaliar a estrutura do dossel da floresta (WELLES & NORMAN *et al.* 1991; JONCKHEERE *et al.* 2004; OLIVAS *et al.* 2013). Estimativas do Índice de Área Foliar (IAF) definido como a metade da área foliar total por uma unidade de área de superfície do solo (CHEN & BLACK 1992), pode ser medido diretamente por meio da amostragem destrutiva. O IAF indica a produção ecossistêmica entre as plantas e a atmosfera, sendo medidas por meio da absorção de carbono, transpiração, respiração e interceptação de luz pelo dossel que estão ligados diretamente à área foliar (GROTTI *et al.* 2020). Outro método direto, é o uso de radiômetros solares, que por meio de sensores mede a radiação solar no sub-bosque (CHEN *et al.* 1997; CHIANUCCI & CUTINI, 2013). Porém, atualmente devido ao custo, exigência de uma coleta de dados mais longa, corte de árvores, a variabilidade temporal e/ou espacial da radiação solar no momento da medida e a não possibilidade em fazê-las em escalas maiores, os métodos indiretos costumam ter mais vantagens do que os diretos (PROMIS *et al.* 2011; BIANCHI *et al.* 2017; CHIANUCCI, 2020). A Fotografia Hemisférica Digital (FHd) é um método indireto de baixo custo e com múltiplas possibilidades de medidas de atributos de dossel, sendo uma ferramenta completa para medição e monitoramento do estado das paisagens florestais para fins de conservação e desenvolvimento sustentável (ROCHA-SANTOS *et al.* 2016; SÁNCHEZ-AZOFEIFA *et al.* 2017; REIS *et al.*

2021).

O método se baseia em fotografar numa perspectiva de baixo para cima a copa das árvores utilizando uma lente olho de peixe de 180°. As fotografias são geralmente obtidas em diferentes horários do dia e em diferentes épocas do ano, porém é importante que sejam realizadas em condições ideais de luz e que a câmera seja calibrada corretamente (FOURNIER & HALL 2017). Além disso, é importante que os locais fotografados sejam georreferenciados para permitir análises espaciais mais precisas (CHIANUCCI 2020). Posteriormente após a obtenção, há a possibilidade das imagens digitais serem pré-processadas, ou seja, essa etapa adicional do fluxo digital pode acentuar o contraste para uma melhor discriminação visual entre os elementos da vegetação e do céu, facilitando a etapa de processamento das imagens (GLATTHORN & BECKSCHÄFER; BRUSA & BUNKER, 2014; CHIANUCCI, 2020). Após essa etapa, as imagens finalmente são processadas por meio de softwares específicos, que permitem extrair informações de atributos do dossel, como o regime de luz que chega ao sub-bosque florestal (BEAUDET & MESSIER 2002). Por meio dessas informações, é possível avaliar quais seriam os possíveis efeitos da radiação solar não filtrada pelo dossel, ou seja, a radiação solar transmitida sobre as plantas do sub-bosque, como seu crescimento, sobrevivência, distribuição espacial e questões ecofisiológicas (CERQUEIRA *et al.* 2021). Por isso, o método é valioso para desenvolver estratégias de manejo e a restauração florestal.

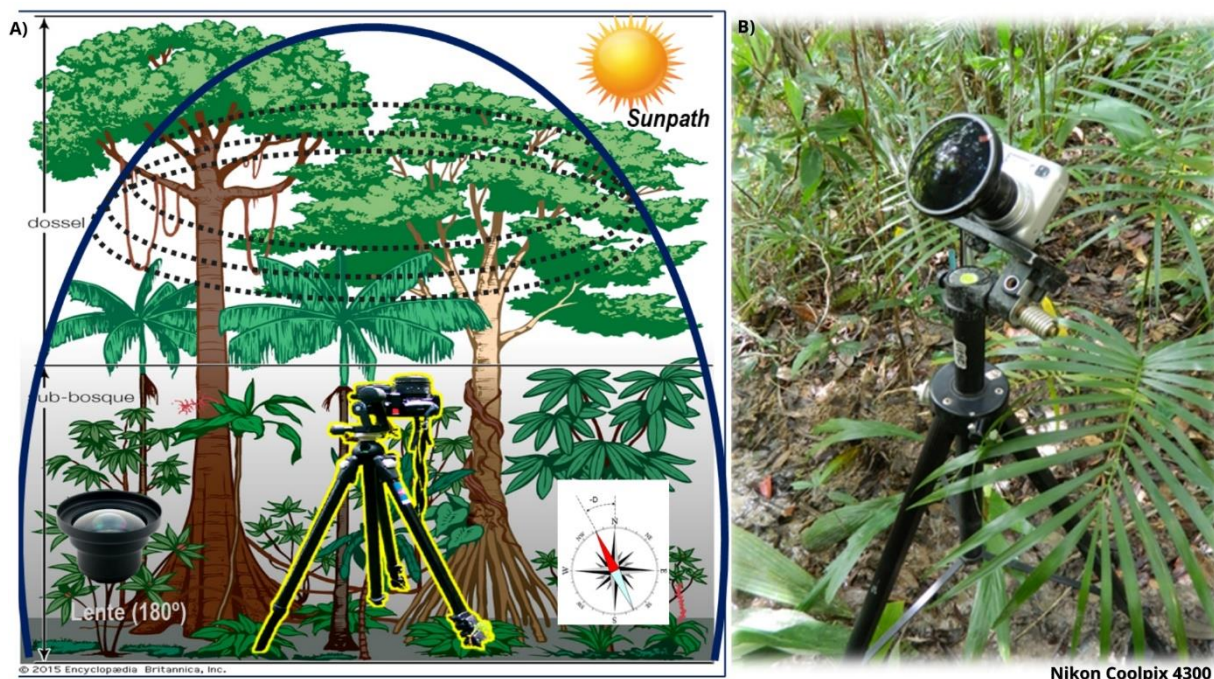


Figura 1. A) Representação do método das Fotografias Hemisféricas Digitais (FHds). B) Câmera Nikon Coolpix 4300 com a lente olho de peixe (180°) modelo Nikon FC-E8. (Foto: Josafá Amaral de Oliveira Filho)

Existem vários atributos de dosséis que podem ser extraídos, sendo possível categorizá-los em dois tipos: estáticos e dinâmicos. As medidas estáticas ou pontuais são métricas que não consideram o percurso diurno do sol, ou seja, ignora a variação temporal, e não fornecem informações suficientes do regime de luz do sub-bosque (YAMADA *et al.* 2014). Portanto, houve a necessidade de criar métricas dinâmicas que se dá pela flutuação da radiação solar direta em estrato inferior do sub-bosque, principalmente devido a variação temporal dos níveis de luz, pelas condições meteorológicas e pelo percurso solar que incide de forma heterogênea em estratos inferiores da vegetação (MORGAN *et al.* 1985; WAY & PEARCY, 2012a; YAMADA *et al.* 2014; REIS *et al.* 2021). Assim, podemos separar o tempo de transmissão da luz em diferentes categorias temporais, do mais longo - *clearings* (> 120 min) ao mais curto - *sunflecks* (< 8 min) (SMITH & BERRY, 2013; YAMADA *et al.* 2014; PLATEROS-GASTÉLUM *et al.* 2018; SUKHOVA *et al.* 2020; Reis *et al.* 2021).

Tabela 1. Variáveis descritoras de atributos de dossel trabalhadas na tese

Tipo	Atributo de dossel	Definição	Referências
Estática	Canopy openness (CO) (<i>Abertura de dossel</i>)	É a proporção do céu que não é bloqueado pela copa em um determinado ponto do observador no sub-bosque. A abertura do dossel pode determinar a biodiversidade da floresta, o regime de radiação e o microclima do sub-bosque	SPRUGEL <i>et al.</i> 1996; JENNINGS <i>et al.</i> 1999; FRAZER, 1999; PALETTO <i>et al.</i> 2009; HEDEROVÁ, 2023
Estática	Total Transmitted Light Radiation (T) (<i>Transmissividade de luz</i>)	É a medida do potencial ou da capacidade de transmissão da radiação solar acima e abaixo do dossel. É um indicador proximal de crescimento e sobrevivência das plântulas no sub-bosque florestal.	FRAZER <i>et al.</i> 1999; MONTGOMERY & CHAZDON 2001; KITAJIMA <i>et al.</i> 2005; CERQUEIRA <i>et al.</i> 2021
Dinâmico	<i>Sunflecks</i> (<i>Sf</i>) < 8min	É o tamanho das manchas do céu expostas no sub-bosque que permite separar o tempo de exposição da radiação solar direta num ponto do sub-bosque em diferentes tempos: mais longos (<i>sungaps</i> e <i>clearings</i>); intermediários (<i>sunpathes</i>) e curtos (<i>sunflecks</i>). Tempos mais curtos de radiação direta estão relacionados com a maximização da fotossíntese de plantas jovens tolerantes à sombra.	CHAZDON 1988; LEAKEY <i>et al.</i> 2005; WAY & PEARCY 2012; SMITH & BERRY, 2013; YAMADA <i>et al.</i> 2014; REIS <i>et al.</i> 2021
Dinâmico	<i>Sunpatches</i> (<i>Sp</i>) > 8min		
Dinâmico	<i>Sun gaps</i> (<i>Sg</i>) > 60min		
Dinâmico	<i>Clearings</i> (<i>Cl</i>) > 120min		

Em termos da radiação disponível, clareiras maiores são similares ao topo do dossel, no qual 100% da radiação atingirá o solo da floresta. Essas clareiras são mais comuns em ambientes desmatados; onde há extração de madeira de forma acentuada (*logging*), áreas de pasto ou áreas agrícolas abandonadas (ROCHA-SANTOS *et al.* 2016). Nesses locais a radiação solar atinge o sub-bosque em intervalos de tempo mais longos (*sun gap* e *clearings*). Portanto, são ambientes que prevalecem árvores mais esparsas com grandes valores de abertura de dossel (CO) e altos níveis de transmissão de luz (T), com temperaturas elevadas e alta demanda evaporativa. Por outro lado, florestas tropicais em estágios sucessionais iniciais, como capoeiras, são estruturalmente caracterizadas por um dossel denso e homogêneo, com árvores de idades semelhantes e com um grande número de pequenas clareiras uniformemente distribuídas (MONTGOMERY & CHAZDON, 2001; NICOTRA *et al.* 1999). Nesses locais a radiação solar atinge o sub-bosque em intervalos curtos (*sunflecks*) e intermitentes durante o dia (REIS *et al.* 2021). Já em estágios de sucessão intermediários e avançados ocorrem árvores com diferentes idades e tamanhos, ocasionando uma maior dinâmica de abertura e fechamento de clareiras, o que aumenta o número de clareiras médias e completas que se estendem da copa da floresta até o solo, principalmente devido à queda de árvores e galhos em seu interior (BROKAW, 1982; CHAZDON & PEARCY, 1986; MONTGOMERY & CHAZDON, 2001; MUSCOLO *et al.* 2014). Nesses casos, a radiação solar atinge o sub-bosque em intervalos de tempos intermediários, e em alguns casos mais longos (*sunpatches* e *sun gaps*). Dessa forma, o microclima do sub-bosque se contrasta de acordo com o tamanho da clareira, sendo que clareiras maiores podem limitar o estabelecimento de espécies tolerantes à sombra, principalmente em fases ontogenéticas iniciais que são mais vulneráveis a fotoinibição (CHAZDON, 1988; DENSLOW, 1980; WHITMORE, 1989, ELIÁŠ, 2014). É o caso da *Euterpe edulis Mart*, também conhecida como palmito-juçara, uma espécie arbórea ameaçada de extinção que estabelece preferencialmente em locais de dossel fechados da floresta, tendendo a estar ausente em grandes clareiras (CERQUEIRA *et al.* 2021).

Diante do cenário mundial atual, é importante analisar a influência da estrutura do dossel sobre o microclima local, principalmente em biomas vulneráveis como a Mata Atlântica onde o desmatamento e a fragmentação são iminentes ameaças para a floresta, com consequências diretas para as espécies endêmicas e correm risco de entrar em extinção, como a espécie de *E. edulis Mart*. (MORANTE-FILHO *et al.* 2015; ROCHA-SANTOS *et al.* 2016; LEAL *et al.* 2021). Portanto, o objetivo geral desta tese foi analisar o atual estado da arte do uso de imagens hemisféricas obtidas por equipamentos digitais para a avaliação dos atributos estruturais do

dossel, o uso de novas técnicas para o pré-processamento das imagens e suas aplicações na conservação de uma espécie-chave para a conservação de florestas tropicais. Para aumentar a compreensão sobre o conhecimento científico do método utilizado nessa tese, no **capítulo 1** foi realizada uma revisão sistemática ciencionométrica. O objetivo específico do capítulo 1 foi investigar o estado da arte e a presença de informações que permitam a repetibilidade de pesquisas envolvendo o uso de fotografias hemisféricas digitais em estudos sobre a ecologia de florestas tropicais. No **capítulo 2** abordamos técnicas de pré-processamento, ainda muito pouco explorada pelos pesquisadores e cientistas florestais, buscando verificar se há formas de otimizar e melhorar a etapa de processamento e extração de variáveis de atributo de dossel. O objetivo do capítulo 2 foi investigar o uso de técnicas de pré-processamento de imagens digitais em FHds obtidas numa floresta tropical úmida em diferentes estágios sucessionais. A partir desse capítulo foi possível apresentar diferentes estratégias que podem auxiliar os pesquisadores durante o uso do método em diferentes contextos ambientais, e adotar técnicas de pré-processamento para ganho de precisão dos resultados.

No **3º capítulo** foi possível trabalhar com as novas técnicas para aprimoramento do método e aplica-lo a conservação da *E. edulis*. O objetivo específico para esse capítulo foi investigar a contribuição da duração do tempo de exposição à radiação solar (*sunflecks*, *sunpatches*, *sungaps* e *clearings*), calculados a partir de imagens digitais hemisféricas, para o estabelecimento de indivíduos de *E. edulis* no sub-bosque de fragmentos florestais imersos em um gradiente de cobertura florestal na paisagem. Nesse capítulo foi possível entender melhor o contexto microclimático do habitat que é encontrado os indivíduos jovens de *E. edulis*, e possíveis hipóteses para seu estabelecimento e distribuição ao longo da paisagem.

REFERÊNCIAS

- BEAUDET, Marilou; MESSIER, Christian. Variation in canopy openness and light transmission following selection cutting in northern hardwood stands: an assessment based on hemispherical photographs. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 110, n. 3, p. 217-228, 2002.
- BENCHIMOL, Maira et al. Losing our palms: The influence of landscape-scale deforestation on Arecaceae diversity in the Atlantic Forest. **Forest Ecology and Management**, v. 384, p. 314-322, 2016.
- BIANCHI, Simone et al. Rapid assessment of forest canopy and light regime using smartphone hemispherical photography. **Ecology and evolution**, v. 7, n. 24, p. 10556-10566, 2017.
- BROKAW, Nicholas VL. The definition of treefall gap and its effect on measures of forest dynamics. **Biotropica**, p. 158-160, 1982.
- BRUSA, Anthony; BUNKER, Daniel E. Increasing the precision of canopy closure estimates from hemispherical photography: Blue channel analysis and under-exposure. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 195, p. 102-107, 2014.
- CERQUEIRA, Amanda F. et al. Habitat loss and canopy openness mediate leaf trait plasticity of an endangered palm in the Brazilian Atlantic Forest. **Oecologia**, v. 196, n. 3, p. 619-631, 2021.
- CHAZDON, Robin L. Sunflecks and their importance to forest understorey plants. In: **Advances in ecological research**. Academic Press, 1988. p. 1-63.
- CHAZDON, Robin L.; PEARCY, Robert W. Photosynthetic responses to light variation in rainforest species. I. Induction under constant and fluctuating light conditions. **Oecologia**, p. 517-523, 1986.
- CHEN, M.; BLACK, T. A. Defining leaf area index for non-flat leaves. **Plant, Cell & Environment**, v. 15, n. 4, p. 421-429, 1992.
- CHEN, J. M. et al. Radiation regime and canopy architecture in a boreal aspen forest. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 86, n. 1-2, p. 107-125, 1997.
- CHIANUCCI, Francesco. An overview of in situ digital canopy photography in forestry. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 50, n. 3, p. 227-242, 2020.
- CHIANUCCI, Francesco; CUTINI, Andrea. Estimation of canopy properties in deciduous forests with digital hemispherical and cover photography. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 168, p. 130-139, 2013.
- CUDNEY-VALENZUELA, Sabine J. et al. Tropical Forest loss impoverishes arboreal mammal assemblages by increasing tree canopy openness. **Ecological Applications**, v. 33, n.

1, p. e2744, 2023.

DENSLOW, Julie Sloan. Patterns of plant species diversity during succession under different disturbance regimes. **Oecologia**, v. 46, p. 18-21, 1980.

ELIÁŠ, Pavol. Sunflecks in forest communities and their importance for plant life in a forest understorey. **Mendel Bioclimatology**, v. 3, n. 5, p. 62-70, 2014.

FRAZER, Gordon W.; CANHAM, Charles D.; LERTZMAN, Kenneth P. Gap Light Analyzer (GLA), Version 2.0: Imaging software to extract canopy structure and gap light transmission indices from true-colour fisheye photographs, user's manual and program documentation. **Simon Fraser University, Burnaby, British Columbia, and the Institute of Ecosystem Studies, Millbrook, New York**, v. 36, 1999.

FOURNIER, Richard A.; HALL, Ronald J. (Ed.). **Hemispherical photography in forest science: Theory, methods, applications**. Springer Netherlands, 2017.

GALVANI, Emerson; DE LIMA, Nádia Gilma Beserra. Fotografias hemisféricas em estudos microclimáticos: Referencial teórico-conceitual e aplicações. **Ciência e Natura**, v. 36, p. 215-221, 2014.

GATTI, M. Genoveva et al. Hydraulic architecture and photoinhibition influence spatial distribution of the arborescent palm *Euterpe edulis* in subtropical forests. **Tree Physiology**, v. 34, n. 6, p. 630-639, 2014.

GLATTHORN, Jonas; BECKSCHÄFER, Philip. Standardizing the protocol for hemispherical photographs: accuracy assessment of binarization algorithms. **PloS one**, v. 9, n. 11, p. e111924, 2014.

GROTTI, Mirko et al. An intensity, image-based method to estimate gap fraction, canopy openness and effective leaf area index from phase-shift terrestrial laser scanning. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 280, p. 107766, 2020.

HEDEROVÁ, Lucia et al. Ecologically relevant canopy openness from hemispherical photographs. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 330, p. 109308, 2023.

JENNINGS, Simon; GREENSTREET, Simon PR; REYNOLDS, John D. Structural change in an exploited fish community: a consequence of differential fishing effects on species with contrasting life histories. **Journal of animal ecology**, v. 68, n. 3, p. 617-627, 1999.

JONCKHEERE, Inge 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, n. 1-2, p. 19-35, 2004.

KITAJIMA, Kaoru; MULKEY, Stephen S.; WRIGHT, S. Joseph. Variation in crown light utilization characteristics among tropical canopy trees. **Annals of Botany**, v. 95, n. 3, p. 535-547, 2005.

LAURANCE, William F. et al. Averting biodiversity collapse in tropical forest protected areas. **Nature**, v. 489, n. 7415, p. 290-294, 2012.

LEAKEY, A. D. B.; SCHOLE, J. D.; PRESS, M. C. Physiological and ecological significance of sunflecks for dipterocarp seedlings. **Journal of Experimental Botany**, v. 56, n. 411, p. 469-482, 2005.

LEAL, Adrielle et al. Landscape-scale Forest loss shapes demographic structure of the threatened tropical palm *Euterpe edulis* Mart. (Arecaceae). **Forest Ecology and Management**, v. 502, p. 119716, 2021.

MONTGOMERY, Rebecca A.; CHAZDON, Robin L. Forest structure, canopy architecture, and light transmittance in tropical wet forests. **Ecology**, v. 82, n. 10, p. 2707-2718, 2001.

MORANTE-FILHO, Jose Carlos et al. Birds in anthropogenic landscapes: the responses of ecological groups to forest loss in the Brazilian Atlantic Forest. **PLoS One**, v. 10, n. 6, p. e0128923, 2015.

MORGAN, D. C.; WARRINGTON, I. J.; ROOK, D. A. Some observations on the spectral distribution characteristics of short-wave radiation within *Pinus radiata* D. Don canopies. **Plant, Cell & Environment**, v. 8, n. 3, p. 201-206, 1985.

MUSCOLO, Adele et al. A review of the roles of forest canopy gaps. **Journal of Forestry Research**, v. 25, p. 725-736, 2014.

NICOTRA, Adrienne B.; CHAZDON, Robin L.; IRIARTE, Silvia VB. Spatial heterogeneity of light and woody seedling regeneration in tropical wet forests. **Ecology**, v. 80, n. 6, p. 1908-1926, 1999.

OLIVAS, Paulo 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.

PALETTO, Alessandro; TOSI, Vittorio. Forest canopy cover and canopy closure: comparison of assessment techniques. **European Journal of Forest Research**, v. 128, p. 265-272, 2009.

PAN, Yude et al. The structure, distribution, and biomass of the world's forests. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 44, p. 593-622, 2013.

PLATEROS-GASTÉLUM, Pedro Antonio et al. Disponibilidad de luz bajo dosel en rodales de *Abies religiosa*. **Madera y bosques**, v. 24, n. 3, 2018.

PROMIS, Alvaro et al. Comparison of four different programs for the analysis of hemispherical photographs using parameters of canopy structure and solar radiation transmittance. **Sierra**, v. 519, p. 36, 2011.

REIS, Igor Pires et al. Landscape Forest loss changes sunfleck dynamics in forest fragments of

southern Bahia, Brazil. **Journal of Tropical Ecology**, v. 37, n. 2, p. 64-71, 2021.

ROCHA-SANTOS, Larissa et al. The shrinkage of a forest: Landscape-scale deforestation leading to overall changes in local forest structure. **Biological Conservation**, v. 196, p. 1-9, 2016.

SMITH, William K.; BERRY, Z. Carter. Sunflecks?. **Tree physiology**, v. 33, n. 3, p. 233-237, 2013.

SOARES, Leiza Aparecida SS et al. Implications of habitat loss on seed predation and early recruitment of a keystone palm in anthropogenic landscapes in the Brazilian Atlantic rainforest. **PLoS One**, v. 10, n. 7, p. e0133540, 2015.

SPRUGEL, D. G.; BROOKS, J. R.; HINCKLEY, T. M. Effects of light on shoot geometry and needle morphology in *Abies amabilis*. **Tree physiology**, v. 16, n. 1-2, p. 91-98, 1996.

SUKHOVA, Ekaterina et al. Simulation of a nonphotochemical quenching in plant leaf under different light intensities. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics**, v. 1861, n. 2, p. 148138, 2020.

WAY, Danielle A.; PEARCY, Robert W. Sunflecks in trees and forests: from photosynthetic physiology to global change biology. **Tree Physiology**, v. 32, n. 9, p. 1066-1081, 2012.

WELLES, Jon M.; NORMAN, J. M. Instrument for indirect measurement of canopy architecture. **Agronomy journal**, v. 83, n. 5, p. 818-825, 1991.

WHITMORE, TC[†]. Canopy gaps and the two major groups of forest trees. **Ecology**, v. 70, n. 3, p. 536-538, 1989.

YAMADA, Toshihiro et al. Spatial and temporal variations in the light environment in a primary and selectively logged forest long after logging in Peninsular Malaysia. **Trees**, v. 28, p. 1355-1365, 2014.

CAPÍTULO 1

Digital hemispheric photography in ecological studies of tropical and subtropical forests: a systematic review

Article prepared for submission to Journal of Tropical Ecology (A4, IF 1.80).

DIGITAL HEMISPHERIC PHOTOGRAPHY IN ECOLOGICAL STUDIES OF TROPICAL AND SUBTROPICAL FORESTS: A SYSTEMATIC REVIEW



PPG Ecologia & Conservação



Universidade Estadual de Santa Cruz



PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA E
CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE - PPGEGB/UESC

Digital hemispheric photography in ecological studies of tropical and subtropical forests: a systematic review

Igor Pires Reis^a, Larissa Rocha-Santos^a, Julianna Nascimento Torezani^b, Marcelo Schramm Mielke^{a*}

^a Laboratório de Ecologia Aplicada, Universidade Estadual de Santa Cruz, Rodovia Jorge Amado, km 16, Ilhéus, BA, Brazil

^b Departamento de Letras e Artes, Universidade Estadual de Santa Cruz, Rodovia Jorge Amado, km 16, Ilhéus, BA, Brazil

* Corresponding author (msmielke@uesc.br)

ABSTRACT

Solar radiation is a key resource for the forest ecosystem dynamics and must pass through the forest canopies to reach the understory. Among the different tools used to analyze the canopy structure and estimate the solar radiation in forest understory, digital hemispheric photographs (DHPs) stand out for being a fast, cheap and accessible method. However, DHPs can present some problems in obtaining the photos in the field, pre-processing and processing images, which can cause loss of precision and method reproducibility. We sought to review the studies carried out with DHPs in the last twenty years to identify the accuracy of the measures taken. In addition, we tried to verify what were the purposes of using DHPs and whether they had obtaining, pre-processing and photograph analysis replicability. We compiled all the articles on the subject DHPs carried out in tropical and subtropical forests, available on the Google Scholar platform, totaling 53 after applying the exclusion criteria. We observed 44% an average of information loss by the total of published studies into 2000 to 2020. The loss of information occurs mainly in the stages of pre-processing, with 65%, followed by obtaining the photos in the field and processing images, with 41% and 13%, respectively. Studies lacking mandatory methodological details are not replicable since the lack of descriptive data in methodology can threaten its robustness. At the end of this review, we propose a simple universal protocol for the use and description of the DHPs methodology in forest ecology and conservation studies.

Keywords: *canopy structure; forest ecology; forest understory; methodological protocols; reproducibility*

1. INTRODUCTION

The structure of forest canopies is an important aspect for studies of physical and physiological phenomena that occur in the forest understories (Brusa & Bunker 2014). Forest canopy is susceptible to disturbances and changes rapidly than other tree structural components both at biotic and abiotic levels and, it is, therefore, widely used to establish forest research in monitoring programs (Macfarlane 2011, Chianucci & Cutini 2013). Since canopy structure determines the amount of solar radiation that reaches the forest understory, its evaluation allows estimating relatively precisely the solar radiation available to the plants that regenerate inside the forest. The analysis of light transmission through the canopy has been the basis of several ecophysiological studies, especially on the dynamics of vegetation regenerating in the forest understory (Canham et al. 1990, Beaudet & Messier 2002, Reis et al. 2021).

Canopy structure and solar radiation estimates inside a forest ecosystem can be made directly, involving destructive sampling, or indirectly, with optical remote sensing instruments (Rich 1990, Chen & Klinka 1997). The direct methods are often time-consuming and even impractical, so indirect methods have been a solution to evaluate the canopy structural properties in many situations (Monsi & Saeki 1953, Jennings 1999, Hirose 2005). As an indirect method to estimate the canopy attributes and the light regime in the forest understory, hemispherical photographs (HPs) emerged in the late 50 as a remote sensing technique (Evans & Coombe 1959, Estes-Martínez et al. 2010, Chianucci 2020). In the last decades there have been many technological advances such as digital photography combined with low prices of cameras and lenses (Reis et al. 2021), improvements in digital image optimization in RAW format (Macfarlane et al. 2014, Hwang et al. 2016), image preprocessing procedures to enhance the image and increasing the precision of processing step (Brusa & Bunker 2014, Zou et al. 2020), development of software and hemispheric images processing apps (Macfarlane 2011),

and the popularization of smartphones with magnetic fisheye lens attachment (Bianchi et al. 2017, Smith & Ramsay 2018).

Digital HPs, hereafter DHPs, are based on differences in spectral reflectance between vegetation and other components of the Earth's surface (Carreiras et al. 2006, Gonsamo et al. 2010, 2013). Most of the variables extracted by DHPs are derived from the measurements of clearing fractions, and calculations are made using algorithms (Leblanc et al. 2005, Wagner & Hagemeyer 2006, Gonsamo et al. 2011), extracting variables as canopy openness, among others (Jennings 1999, Gonsamo et al. 2011). Those variables permit the analysis of light interception, clearings geometry, solar radiation passage in seasonal periods, and various estimations related to the availability of solar radiation reaching the forest understory (Roxburgh & Kelly 1995, Macfarlane et al. 2014). Therefore, DHP has become the fastest and most accessible method to indirectly quantify forest canopy properties (Promis et al. 2011, Chianucci & Cutini 2012, 2013, Bianchi et al. 2017). However, the precision, accuracy, and repeatability of DHPs are limited compared to other direct instruments that are specifically designed to measure the light availability in the forest understory (Fournier & Hall 2017). The DHP is a methodological process subject to errors due to random variation in the execution of steps to obtain photos in the field, pre-processing, and photos analysis (Rich 1990, Jonckheere et al. 2004, Zhang et al. 2005, Chianucci 2020). Furthermore, there are difficulties in determining the canopy coverage, opening, and closing by researchers due to the lack of reproducibility of information and consequently in transparency commonly accepted definitions, being frequently described as synonyms, even having different concepts and measures (Jennings 1999, Korhonen et al. 2006, Gonsamo et al. 2013).

With the expansion and use of the digital DHP method, the methodological information in the articles texts need to have a reproducible description to ensure the reliability of the present study and to conduct future research on the precision and maximization of the method

(Haddaway & Verhoeven 2015). Studies lacking critical methodological details are not testable, however, the absence of descriptive data in the methodology can threaten its robustness, impact and legacy (Baker 2016). In this systematic review we established methodological protocols and standards so that future publications have reproducibility on the technical criteria of DHPs. We quantify the number of published scientific articles during the last decades, verify the purpose of the studies and whether they have reproducibility as to how to obtain photos in the field, pre-processing, and photographs analysis. Finally, we establish possible solutions, methodological corrections, and future perspectives for the applications of digital photography in the ecological studies of tropical and sub-tropical forests.

2. MATERIAL AND METHODS

We quantified the number of published scientific articles since 2000, because in that year we had a larger implementation, accessibility, and popularization of the digital camera (Jonckheere et al. 2004, Chianucci & Cutini 2012). We established protocols based on the literature as a synthesis guide for systematic review: planning, conducting and documentation (Pullin & Stewart 2006). Thus, this scientometric study seeks to discuss some topics using a methodological guide based on articles with relevant DHPs use (Rich 1990, Jennings 1999, Bréda & Nathalie 2003, Weiss et al. 2004, Chianucci & Cutini 2012, Beckschäfer et al. 2013, Gonsamo et al. 2013, Macfarlane et al. 2014, Chianucci 2020). Three main topics were extracted from the articles: **Obtaining photos in the field**: Where the studies were carried out and when (continent, country and geographic coordinates); what is the forest succession stage in the study area; sample design and number of photos; characteristics of the canopy structure at the sample site; the type of camera and wide-angle lens, geographic orientation, height of the tripod, methods of obtaining photograph technique (ISO - International Standards Organization or ASA - American Standards Association; shutter speed; camera diaphragm aperture); photo

acquisition settings; if attention was paid to the photographic exposure when obtaining photos.

Pre-processing: If digital images were edited, enhancing and which software was used for optimization to correct the digital images; whether the file had been converted, and what type of contrast threshold. **Processing and analysis:** What was the image processing software for extracting the radiation attributes and estimates, which canopy attribute and which measure of radiation it extracted (Table 1), and, finally, what was the purpose of using the methodology in the study.

Table 1. Levels at which errors can be introduced in digital hemispherical canopy photography.

Obtaining the photos in the field
Sampling strategy (Number of photos/sample design), Study location (Coordinates), photographic equipment (Camera/model), photo acquisition angle (Wide angle lens), geographical orientation, horizontality of the digital plane (Photo height/Tripod), photographic techniques (ISO/ Lens Aperture/ V.Shutter), photographic exhibition (Underexposure/Overexposure)
Pre-processing
Image editing and enhancement, image classification
Processing and analysis
Data extraction of canopy attributes and radiation estimates

Based on these topics, we used the Google Scholar platform between the years 2000 to 2020, because before 2000 we had no publications dealing with DHPs: Solar radiation OR Light regime AND Rainforest OR Tropical Forest AND Tree Seedling AND hemispherical photography AND Digital hemispherical photography software OR software AND Canopy structure. The string resulted in 1440 which was considered excessive (Figure. 1). Subsequently, we used the string by adding quotation marks to the words: “hemispherical photography ” and “Tropical Forest”. Quoted words were necessary to filter our searches. After that, we established a new string with new words: Solar radiation OR Light regime AND Rainforest OR “Tropical Forest” AND Tree Seedling AND" hemispherical photography "AND Digital hemispherical photography software OR software AND Canopy structure. Our search

period was from June 25 to August 22, 2020. There were 338 scientific articles with the potential to data extract. The studies were contemplated in Portuguese, English and Spanish.

For data extraction, we made inclusion and exclusion protocols for the scientific articles. The inclusion criteria were in forest regeneration research. The articles must obligatorily attend only the tropical and subtropical forests. Limits close to 23.5 ° to the North and 23.5 ° to the South. Articles not included in these coordinates, however showed explicitly in the methodological text that it is a tropical and, or subtropical forest met the inclusion criteria. For data inclusion, the study must bring variables of canopy attributes or technical characteristics of the digital camera used (model, brand, among others) or the software for processing the photos. The included scientific articles must be an original research, short reports, or letters and methodological article. The exclusion criteria were research in which plants were not the object of study. Finally, book chapters, dissertations and theses were excluded because of scientific relevance.

After the inclusion and exclusion criteria, 53 studies were considered within the study scope (Figure. 1). Therefore, all the articles interested data were extracted and computed in Excel spreadsheets conducted by the pre-established planning, conduction, and documentation protocols. Finally, we categorized some commonly accepted variables based on the literature and created simple formulas of presence and absence to check information reproducibility (Câmara 2013).

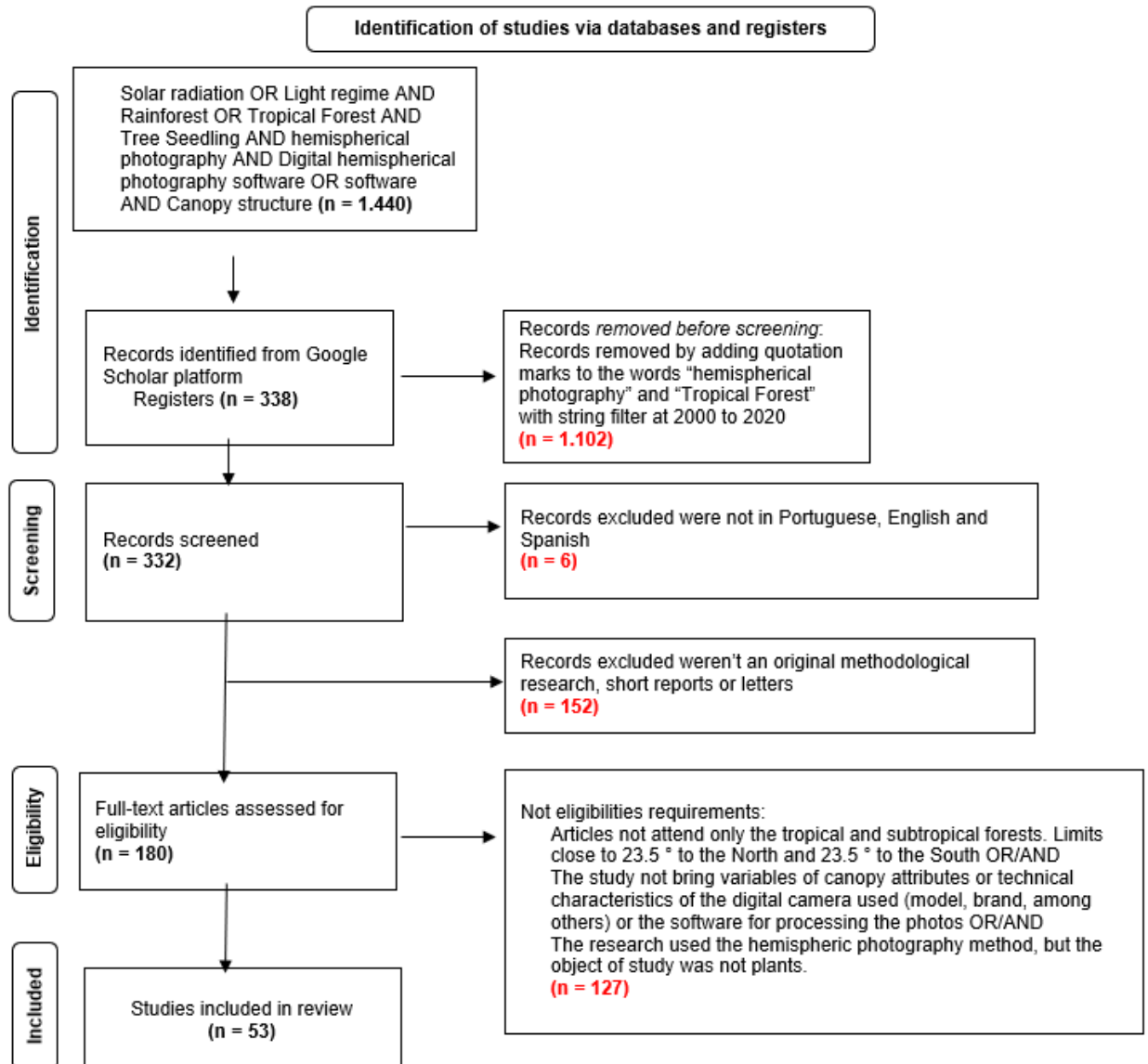


Figure 1. Flowchart of the study selection procedure.

3. RESULTS

3.1. General results and objectives of the studies

Research articles from 22 countries were selected. The largest number of publications was in Brazil, with 54% studies, followed by China and Costa Rica, with 18% studies, and many countries (46%) had only one study (Figure. 2).

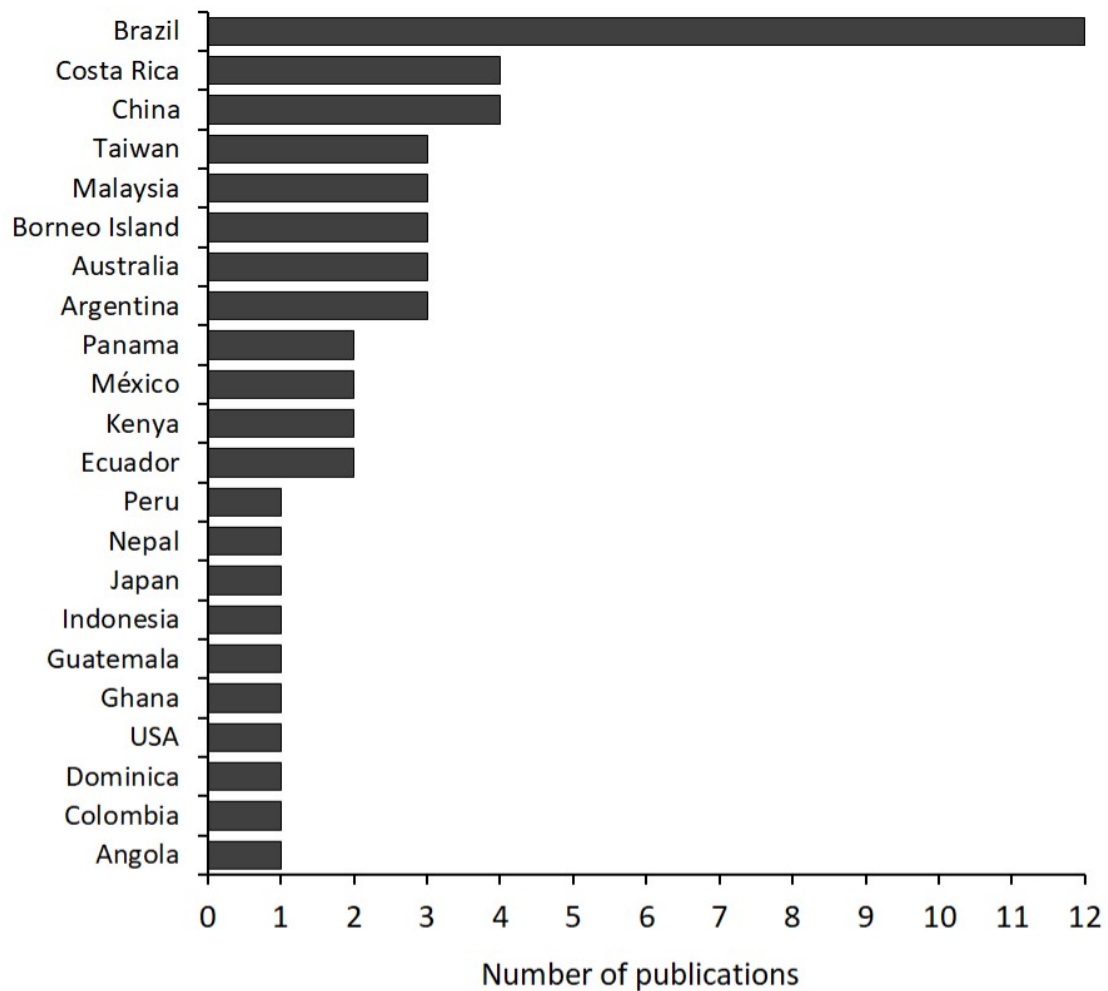


Figure 2. Number of publications (according to the scope of this literature review) per country.

From 2009 onwards, publications with the theme became more frequent, increasing the annual average from less than one article (2000-2008) to four articles per year between 2009-2019, having 2011 with the largest number of publications represented with six articles (Figure. 3). Over 2000 to 2020, an average of relatively high percentages of lost information was observed expressed by the total of studies published for each year, mainly in relation to the pre-processing stage, followed by obtaining photos in the field and by the image analysis (Figure. 3).

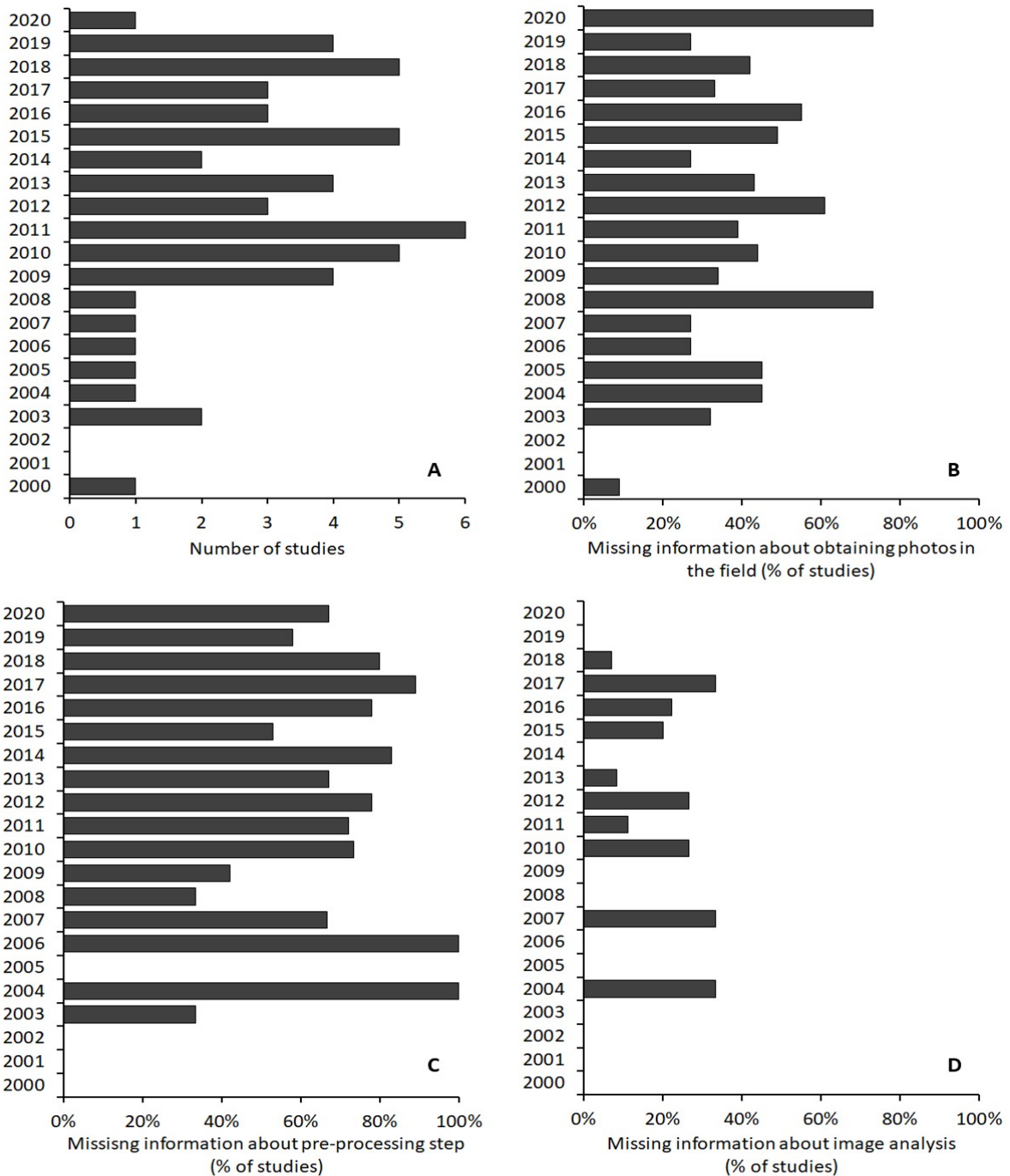


Figure 3. Number of studies per year (A) and missing information in study methods (expressed as the percentage of total studies published in each year) precluding replication across tree crucial steps in methodology for studies in included that used digital hemispherical photography (DHP): Obtaining photos in the field (B), pre-processing (C) and image analysis (D).

3.2 Obtaining the photos in the field

This topic had 65% of information loss. In general, 19% of the articles did not show repeatability in terms of photographic techniques for finer adjustments in terms of exposure, since a lot of information were partially explained (Figure. 4). For example, some articles presented the ISO and shutter speed, but did not show the diaphragm aperture. Only one article showed all the information regarding the photographic technique. Forest succession stage was reported by approximately 25% of the total number of studies. Only 32% articles presented the number of photos, the type of sample design, and 51% made explicit in the text characteristics of the forest canopy structure. There were also difficulties in transparency regarding the geographic orientation in 30% articles, and 32% presented the number of pixels in which the photos were set up on the camera when taking the photos in the field (Figure. 4).

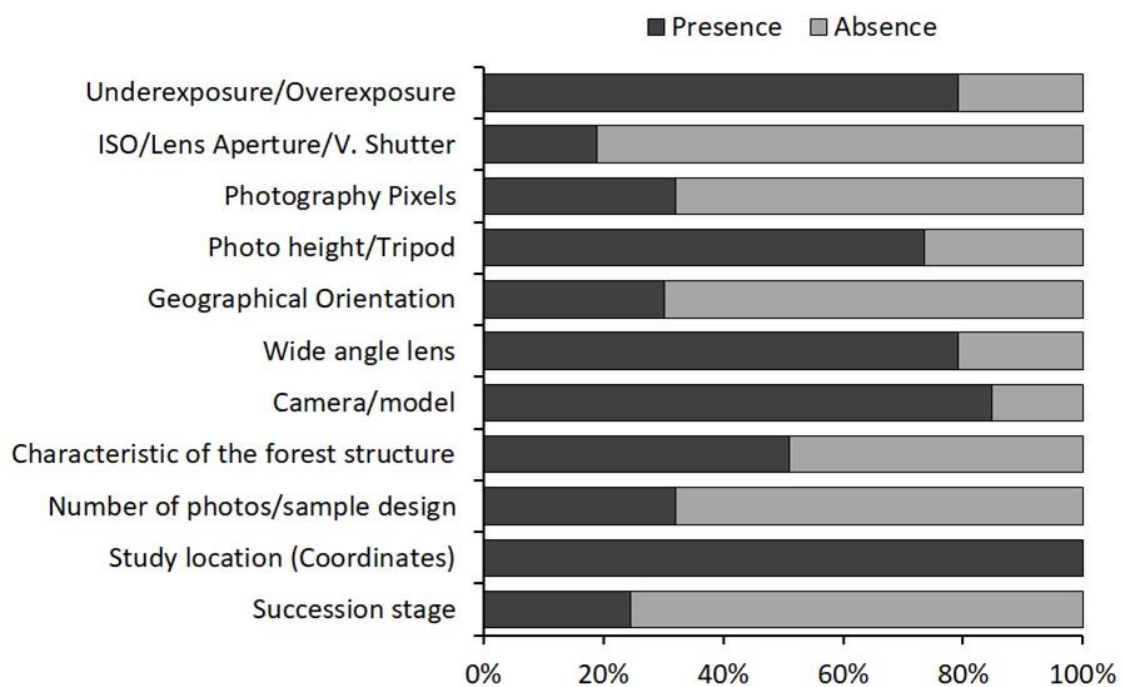


Figure 4. Presence and absence of repeatability in the 53 articles regarding the stage of obtaining the photos in the field.

Most articles, about 85%, presented the camera brand information and its version, 80% of articles presented the wide-angle lens attached to the camera, 73% presented the height at which the photo was taken in the field with a tripod and 79% of articles presented information about care with exposure conditions when taking the photos (Figure. 4). The most used cameras and models were the Nikon Coolpix, with 64% of articles, followed by Canon's EOS, with 11% of articles (Table 2).

Table 2. Presence and absence of information regarding cameras models used in the 53 articles in the obtaining the photos in the field stage.

Camera Models	N° of studies
Digital Camera Nikon Coolpix 950	10
Digital Camera Nikon Coolpix 8400	4
Digital Camera Nikon Coolpix 4500	8
Digital Camera Nikon Coolpix 4300	1
Digital Camera Nikon Coolpix 990	3
Digital Camera Nikon Coolpix 5400	2
Digital Camera Nikon Coolpix 8800VR	2
Digital Camera Nikon Coolpix 1200	1
Digital Camera Nikon Coolpix 5000	2
Digital Camera Nikon Coolpix 995	1
Digital Camera Nikon D5000	1
Digital Camera Nikon D700	1
Digital Camera Nikon D60	
Digital Camera Canon EOS 300D	2
Digital Camera Canon EOS 50D	1
Digital Camera Canon EOS 5D Mark II	1
Digital Camera Canon EOS 40D	1
Digital Camera Canon EOS Rebel SL1	1
Digital Camera Panasonic DMC Lumix - LX5	1
Digital Celular Camera Nokia N86	1
Total	45
Missing information	8

In addition, one study used a cell phone Nokia N86 to estimate canopy openness. The most widely used fisheye lenses was the Nikon FC-E8, with a total of 43% studies, followed by Nikon FC-E9, with 13% of the studies. However, the focal distance was not described in these two cases. 20% of the studies used different types of fisheye lenses and also omitted this information (Table 3).

Table 3. Presence and absence of information regarding cameras and Fisheye lens models used in the 53 articles in the obtaining the photos in the field stage.

Lens Models	Nº of studies
Fisheye Lens FC-E8	23
Fisheye Lens FC-E9	8
Fisheye Lens Nikkor 8-mm	4
Fisheye Converter Lens Raynox DCR-CF 187	1
Fisheye Lens Sigma Fisheye	1
Fisheye Lens Rokinon 7.5 mm	1
Fisheye Lens Rokinon 8 mm	1
Fisheye Lens Sigma 8 mm	1
Lens Nikon AF-S Nikkor 500mm	1
AF DX Fisheye-Nikkor	1
Total	42
Missing information	11

3.3 Pre-processing

The most used program to pre-processing information was Sidelook 1.1 with three studies (Nobis & Hunziker 2005). A greater information loss regarding the repeatability of image pre-processing was found, with around 65% of information lost, with approximately 19 of the 53 studies used pre-processing image programs and with only nine studies explained the method of image pre-processing were used. Other pre-processing programs used were Adobe Photoshop, Image tool and Grabber 2.1, each one with two studies. Only nine studies presented

the optimized final file type. The largest number of files converted and used in the final processing were RAW to JPEG format, with five articles, followed by TIFF format, with two. We also found two articles that converted Bitmap to JPEG. Regarding the threshold procedure, only 27 of the 53 studies provided this information, in which the vast majority (67%) the photo binarization was done manually, and only 33% was done automatically.

3.4 Processing and analysis

This topic had 87% average replicability and 13% of information loss. As for image processing software, only one article did not present this information (Table 4).

Table 4. General information of the image analysis software.

Software	Articles	Company/Authors
Gap Light Analyzer	22	Cary Institute of Ecosystems studies, Millbrook, New York, US
HemiView 2.1	14	Delta-T Device Ltd. Cambridge, UK
WinSCANOPY	8	Regent Instruments Inc., Quebec, Canada
CIMES-FISHEYE	3	Hemispherical Photography of Forest Canopies, Strasbourg, France
Winphot- Hemiphot software 4.0	2	Steege (1994)
CAN-EYE image software	1	INRA (French National Institute of Agronomical research)
CANOPY	1	Rich (1989)
Solarcalc software	1	Chazdon and Field (1987)
Total	52	
Missing Information	1	

Eight different softwares were used, being the Gap Light Analyzer the most used, with 22 articles, followed by HemiView, with 14 articles, and Winscanopy, with 8 articles. For

extracting canopy attribute data, 31 articles extracted information from canopy openness, another 15 used canopy openness variables and LAI. In addition, five articles extracted information from canopy element opening, cover parameters and LAI, and two articles extracted only the LAI (Table 5). Estimation of solar radiation below and above the canopy with a total of 34 studies that reproduced this step, 19 of which omit this information. Twenty-three articles estimated understory solar radiation (diffuse and direct), and five articles estimated sunflecks and solar radiation (diffuse and direct). Only six studies estimated photosynthetic photon flux density (PPFD) (Table 5).

Table 5. General information of image analysis: step of extracting canopy attributes and solar radiation estimate.

Canopy attributes	Articles
Canopy openness	31
Canopy openness and Leaf Area Index	15
Estimations of fractional canopy element covers and Leaf Area Index	5
Leaf Area Index	2
Total	53
Missing Information	0
Solar radiation estimation under and above canopy	Articles
Diffuse and direct	23
Sunflecks and diffuse and direct	5
Photosynthetic photon flux density	6
Total	34
Missing Information	19

4. DISCUSSION

From the beginning of the 21st century, the ascendancy of digital cameras made possible for the scientific community access the DHPs methods. In our study, we can see the widespread use of the method on the four continents of the planet. This is due to the technological advances of digital cameras and the extensive software production with various options for photographs optimization and analysis. Despite the popularization of this methodology (for example, Chen et al. 1997, Frazer et al. 2001, Bréda & Nathalie 2003, Promis et al. 2011), our study showed that there is still no methodological standardization, which makes it difficult to replicate all the steps of DHPs.

4.1 Obtaining the photos in the field

In the stage of obtaining the photos in the field, we accounted for an average loss of 41% of the information, with the sampling design to obtain the photos being the least reproducible methodological procedure. In addition, other important information, such as the number of pixels established at the time of capturing the photos, were also not found in most of the articles analyzed in this study. According to Chason et al. (1991), the number of photos, and the spatial location where they were taken, define the sampling strategy. In addition, the type of canopy, vegetation succession stage, geographic coordinates, angle of view of the sensor, and the distance to the edge of the forest fragment can influence the accuracy of the sample design (Chianucci & Cutini 2012, Fournier & Hall 2017).

The successional stages of a forest can be defined based on the total biomass, age structure or size of tree populations, and species composition (Chazdon 2012). Only a quarter of the studies partially presented this information. The characteristics of forest canopies are important to be documented, especially the height (Chianucci & Cutini 2012, Chianucci et al. 2014). Heterogeneous and open canopies, like a more initial successional stages, are more

difficult to sample because the size of the gaps. Therefore, heterogeneous canopies require more photos than homogeneous canopies to obtain good spatial sampling. Leblanc & Fournier (2014), suggested that eight digital HPs may be sufficient for relatively homogeneous sites, but this number should increase for heterogeneous sites with 16 DHPs being sufficient in most cases, except for very heterogeneous canopies. In our review, approximately half of the articles presented the structural characteristics of the forest canopies. In this regard, a grid of points is recommended as a more suitable strategy for uniformly closed treetop distributed at random (Ryu et al. 2010). In cases of regular tree distributions, such as tree plantations in evenly spaced lines, a cross-matrix scheme is recommended to ensure sampling the trees, thus avoiding bias in the sampling of clearings between the lines (Chen et al. 1991, Weiss et al. 2004).

A DHP system consists of a wide-angle lens with a field of view of up to 180°, a digital camera, and a tripod with a bubble leveler or self-leveling mount. In addition, other equipment such as a compass and GPS to identify geographic orientation and georeferenced the photos could enrich the database of DHPs obtained in the field (Fournier & Hall 2017). The average height used to take DHPs from all studies was 1.30 meters, normally this is recommended height, as it is the same established for measuring the diameter of trees (Nascimento et al. 2007, Fournier & Hall 2017). Geographical orientation is used when photos are being processed in software for the passage of the sun and calculations of solar radiation that reaches the forest understory (Chazdon & Field 1987, Rich 1989, Canham et al. 1990, Beaudet & Messier 2002, Estes-Martínez et al. 2010).

After the successful massive transition to digital photography, the studies of the last few decades have become very dependent on the first digital cameras produced by Nikon, models such as the Coolpix 950 or 4500 (Ishida 2004, Jonckheere et al. 2004, Zhang et al. 2005, Chapman 2007, Lang et al. 2010). Other cameras and equipment have also been used in an alternative way, but the Coolpix line equipped with the FC-E8 wide-angle lens is still the most

frequent choice in research to date (Kirby et al. 2018). In a way, digital technology has advanced considerably in a short time, making models like the Coolpix 4500 obsolete due to its relatively large, bulky, short-lived battery and low image quality with resolutions limited to 3.14 megapixels (Kirby et al. 2018).

The importance of pixels is due to the various characteristics that the image affects its quality, however, it is much more important to consider the number of effective pixels in the context of the sensor size, which gives a real idea of the size of the pixels (Xiao et al. 2009). A larger number of pixels offers opportunities to improve the quality and contrast of the image, which in turn can improve the quality of the final data (Inoue et al. 2004). However, there are still very few studies that explored this item in DHPs (Englund et al. 2000, Inoue et al. 2004, Pekin & Macfarlane 2009). We draw attention to the special high resolution (the ability of an imaging system to distinguish between two adjacent points in an image) that helps of increasing the contrast of pixels when transforming the HPs into a binary image (Blennow 1995, Walter et al. 2003, Pueschel et al. 2012).

About 80% of the articles in our review were careful to avoid overexposing the photos and underexposing them to the conditions of the environment where the photos were taken. In order to have an ideal exposure setting, it is necessary to configure the speed and opening the camera's diaphragm to maximize the tonal range (8 bits per color channel) of the image output (Macfarlane et al. 2014, Hwang et al. 2016). In our review, only nine studies partially showed information on diaphragm aperture, and shutter speed. In addition, DHPs must be under uniform cloudy skies or, alternatively, close to sunrise or sunset (Leblanc et al. 2005); both sky conditions allow a perfect diffuse sky, thus avoiding the interference of direct sunlight, which can cause errors up to 50% due to the sensitivity to the sensor (Welles & Norman 1991). Many authors have used the histogram will help to make the necessary adjustments for a perfect exposure, as it shows if there is any flattening in the shadows or in the highlights which can

also assess the contrast of the scene (Ishida 2004, Leblanc et al. 2005, Macfarlane 2011, Beckschäfer et al. 2013). Thus, the standardization of photographic exposure is challenging, as exposure settings need to consider the differences in brightness between the subject captured in adverse scenes due to climatic differences, degrees of cloudiness, and solar position (Beckschäfer et al. 2013).

4.2 Pre-processing

The pre-processing step was divided into three phases. First, during the digital workflow, programs can be used to convert images file formats to small sizes and optimize their loading and file read. Second, the pre-processing programs image editing are capable of making a range of adjustments to photos such as color corrections, exposure and white balance, sharpness, noise reduction to performance the processing step. Third, the image classification based on the threshold values for the DHP images to be classified into canopy element and sky. That is based on the meeting of limits of an optimal brightness value for the image point (pixel), which allows distinguishing vegetation and the sky. In this way, images can be manually or automatically binarized between black (vegetation) and white (sky) pixels.

Image pre-processing can improve classification on vegetation or background elements, which also influences the creation of more accurate values for different canopy attribute variables. For example, utility tools can be used to mask parts of the images that are undesirable, or the brighten or darken the images that might provide better visual discrimination between the vegetation elements and the background (Fournier & Hall 2017). Generally, during the process, digital images are saved with or without conversion, their colors are rendered, and the files are compressed, which usually involves loss of information in their output, or saving intact images, which require more processing before they can be viewed and are ready for

classification (Macfarlane et al. 2014, Fournier & Hall 2017). The resulting product is a digital image file that can be archived for processing and extracting radiation attributes and estimates (Fournier & Hall 2017). At this stage, unfortunately, we obtained little reproducibility of this information, being the stage with the worst repeatability compared to the others. One way out would be pre-processing in RAW processing programs or image post-production in other external programs, like Adobe Photoshop, for example, which are used to mask undesirable parts or to lighten and/or darken the image for better visual discernment between the elements of the canopy and the sky (Fournier & Hall 2017). Observed by Frazer et al. (2001) claim that a way to increase the accuracy of the classification step would be to use the blue channel, considered the best channel for the separation of pixels between classes of the sky and the presence of vegetation (Brusa & Bunker 2014).

In our review, only five articles photographed in RAW format and preferred to optimize them via RAW processing programs and later saved it in JPEG (Joint Photographic Experts Group) format. Therefore, when shooting in RAW, it is a great option, as the user specifies the entire tonal range of the scene that is customized for the 0 to 256 range (8 bits per color channel that are available in a standard camera JPEG file) which would be an ideal exposure setting (Beckschäfer et al. 2013, Macfarlane et al. 2014). When converting to other file types, the external programs automated solutions for the threshold, as an example, the Sidelook (<http://www.appleco.ch/>) (Nobis & Hunziker, 2005). It is always recommended to use an output conversion file format that does not generate losses in image quality and that supports color layers so as not to influence the extraction of data in the image classification stage (Verhoeven 2010). Among the file formats that include lossless compression as an option are: TIFF, PNG (Portable Network Graphics) and a lossless version of JPEG 2000 (Guarneri et al. 2014).

In the processing stage or image classification involves segmentation, selecting an ideal threshold brightness contrast that discriminates the foliage of the canopy openings that represent

the sky (Jonckheere et al. 2004). For this stage of binarization, the vast majority preferred to do it manually, which is considered a subjective process and can be an inconsistent source of errors (Englund et al. 2000). Currently, there is the possibility of performing the binarization of images automatically through software. These software have automated add-ons to the thresholding process that are based on algorithms (eg Win-SCANOPY, Régent Instruments, Canada) or third-party programs such as ImageJ (Nobis & Hunziker 2005). The use of automatic algorithm has provided satisfactory results, being recommended by different authors for the classification of DHPs (Glatthorn & Beckschäfer 2014, Beckschäfer 2015, Arietta 2022).

4.3 Processing and analysis

In our systematic review, eight different image analysis software were reported for data extraction, with only one study omitting this information. Choosing the best specific software for processing and extracting the DHPs variables is by far an easy task, as there are several factors related to interoperability, software functionality, availability, and accessibility of the software, such as the Gap Light Analyzer and the CIMES-FISHEYE that have free licenses which may have boosted their use in our compiled studies (Frazer et al. 1997, Gonsamo et al. 2011, Fournier & Hall 2017).

The canopy openness is the area fraction of the sky hemisphere (180°) that is unobstructed by canopy elements when viewed from a single point offered by all software and is one of the most used variables in our review and of which the other parameters are also derived from gap fraction, many depending on the field of vision and projection, such as the coverage and opening indices of the fractional element of the treetop (Jennings 1999, Gonsamo et al. 2013, Fournier & Hall 2017, Smith & Ramsay 2018). Regarding solar radiation estimations in the forest understory, all those softwares offer diffuse and direct radiation indices

in strata above and below the canopy, being the most commonly used estimations in our studies. The HemiView, CIMES-FISHEYE, and WinSCANOPY can estimate indirect, direct, and total site factors, which correspond to the proportion of diffuse, direct, and total solar radiation that hits a particular place (Anderson 1964). CIMES-FISHEYE can estimate the radiation absorbed in the visible band and the PPFD intercepted and transmitted by the canopies under a clear and cloudless sky model, being an exclusive feature of this software (Gonsamo & Pellikka 2009). Promis et al. (2011) made several comparisons using canopy attribute variables and estimates of solar radiation in the understory, calculated based on different programs, revealed a significant response and a high level of acceptance between the variables. Because of this, practically all software has well-designed algorithms, but the selection depends on the intended application, and the programs are distinguished in some functions. Thus, the users must study the program and the variable they intend to use to avoid potential errors during image acquisition and processing, as all the steps are interconnected.

Finally, in the stage of objectives of the studies, the great majority of the articles aimed estimate the solar radiation transmitted and not absorbed by the upper strata of the canopy, mainly with ecological or silviculture studies. In fact, HPs were initially developed to estimate light transmission from clearings distributed in the fisheye projection (Evans & Coombe 1959). In addition, because it offers a permanent record of the canopy or sward and allows comparisons of various stages of plant growth development (Fournier & Hall 2017).

5. FINAL CONSIDERATIONS

Canopy structure characterization is an important way to obtain parameters of forest ecosystems process, contributing to agroecology, silviculture, forest planning and management, and for the conservation of biodiversity and ecosystem services (Beaudet & Messier 2002, Fournier & Hall 2017, Grotti et al. 2020, Guerra et al. 2020). The methodology of DHPs has broad functions for metrics of canopy attributes and solar radiation estimates in the forest understories, and can be carried out with practicality, efficiency, and low cost, evidencing its use in a wide way around the world. This methodology must primarily attend the steps of pre-processing and capture photos in the field, as shown as the lower reproducibility of the information. Also, this methodology proves to be effective and easy to apply if used correctly. However, studies lacking mandatory methodological details are not replicable since the lack of descriptive data in methodology can threaten its robustness.

It is necessary to establish universal protocols for the execution of the DHPs methodology which needs careful preparation, including purpose and budget, planning, equipment, sampling, scheme, weather and light conditions and image exposure. During obtaining the hemispherical photos in the field five photographs are usually sufficient for deriving clumping factors and others canopy attributes. The most commonly equipment used tripod (or monopod) with a bubble leveler around 1.30 meters, GPS, compass, digital camera and fisheye lens. Although required, good equipment is not sufficient condition to acquire high quality HP, it should be taken under overcast sky or, alternatively, under clear sky at sunrise or sunset. it is recommended to users to apply photographic techniques like ISO, shutter speed and diaphragm aperture to avoid super exposure and underexposure in digital images. Digital hemispherical photography allows for choosing beforehand image resolution, format (JPEG, TIFF, raw), dynamic range, and automatic centering in some graphical HP software. It is always

recommended to use an output conversion file format that does not generate losses in image quality so as not to influence the extraction of data in the image processing stage. We recommend use Gap Light Analyzer and the CIMES-FISHEYE that have free licenses to extract canopy attributes. Pre-processing is an optional step depending on the context in which the DHPs were obtained and mainly applied to recognize the pixel class (eg sky and vegetation). If you choose to run it, we recommend external general-purpose graphical software may be preferred to specialized HP software to image treatment sharpening, or edge enhancement. Pre-processed images make it easier batch processing of sets of HP.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001. Igor P. Reis acknowledges FAPESB for the doctoral fellowship. Marcelo S Mielke (308860/2021-7) gratefully acknowledges CNPq for the fellowship award for scientific productivity.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Anderson MC** (1964) Studies of the Woodland Light Climate: I. The Photographic Computation of Light Conditions. *Journal of Ecology* **52**, 27–41.
- Arietta AZA** (2022) Estimation of forest canopy structure and understory light using spherical

- panorama images from smartphone photography. *Forestry* **95**, 38–48.
- Baker M** (2016) Is there a reproducibility crisis? *Nature* **533**, 452–454.
- Beaudet M and Messier C** (2002) Variation in canopy openness and light transmission following selection cutting in northern hardwood stands: an assessment based on hemispherical photographs. *Agricultural and Forest Meteorology* **110**, 217–228.
- Beckschäfer P** (2015) Hemispherical_2.0 - Batch processing hemispherical and canopy photographs with ImageJ – User Manual. Pp. 0–6 *Chair of Forest Inventory and Remote Sensing*. Georg-August-Universität Göttingen, Germany.
- Beckschäfer P, Seidel D, Kleinn C and Xu J** (2013) On the exposure of hemispherical photographs in forests. *IForest* **6**, 228–237.
- Bianchi S, Cahalan C, Hale S and Gibbons JM** (2017) Rapid assessment of forest canopy and light regime using smartphone hemispherical photography. *Ecology and Evolution* **7**, 10556–10566.
- Blennow K** (1995) Sky View Factor from High-Resolution Scanned Fish-eye Lens Photographic Negatives. *American Meteorological Society* **12**, 1357–1362.
- Bréda J and Nathalie J** (2003) Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany* **54**, 2403–2417.
- Brusa A and Bunker DE** (2014) Increasing the precision of canopy closure estimates from hemispherical photography: Blue channel analysis and under-exposure. *Agricultural and Forest Meteorology* **195–196**, 102–107. Elsevier B.V.
- Câmara RH** (2013) Análise de conteúdo: da teoria à prática em pesquisas sociais aplicadas às organizações. *Revista Interinstitucional de Psicologia* **6**, 179–191.
- Canham CD, Denslow JS, Platt WJ, Runkle J, Spies TA and White PS** (1990) Light regimes beneath closed canopies and tree-fall gaps in temperate and tropical forests. *Canadian*

Journal of Forest Research **5**, 1–12.

Carreiras JMB, Pereira JMC, and Pereira, JS (2006) Estimation of tree canopy cover in evergreen oak woodlands using remote sensing. *Forest Ecology and Management* **223**, 45–53.

Chapman L (2007) Potential applications of near infra-red hemispherical imagery in forest environments. *Agricultural and Forest Meteorology* **143**, 151–156.

Chason JW, Baldocchi DD and Huston MA (1991) A comparison of direct and indirect methods for estimating forest canopy leaf area. *Agricultural and Forest Meteorology* **57**, 107–128.

Chazdon R (2012) Tropical forest regeneration. *Boletim Museu Paraense Emílio Goeldi de Ciências Naturais* **7**, 195–218.

Chazdon RL and Field CB (1987) Photographic estimation of photosynthetically active radiation: evaluation of a computerized technique. *Oecologia* **73**, 525–532.

Chen HYH and Klinka K (1997) Light availability and photosynthesis of *Pseudotsuga menziesii* seedlings grown in the open and in the forest understory. *Tree Physiology* **17**, 23–29.

Chen JM, Black TA and Adams RS (1991) Evaluation of hemispherical photography for determining plant area index and geometry of a forest stand. *Agricultural and Forest Meteorology* **56**, 129–143.

Chen JM, Rich PM, Gower ST, Norman JM and Plummer S (1997) Leaf area index of boreal forests: Theory, techniques, and measurements. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* **102**, 29429–29443.

Chianucci F (2020) An overview of in situ digital canopy photography in forestry. *Canadian Journal of Forest Research* **50**, 227–242.

Chianucci F, Chiavetta U and Cutini A (2014) The estimation of canopy attributes from

digital cover photography by two different image analysis methods. *IForest* **7**, 255–259.

Chianucci F and Cutini A (2012) Digital hemispherical photography for estimating forest canopy properties: Current controversies and opportunities. *IForest-biogeosciences and Forestry*, **5**, 290.

Chianucci F and Cutini A (2013) Estimation of canopy properties in deciduous forests with digital hemispherical and cover photography. *Agricultural and Forest Meteorology* **168**, 130–139.

Englund SR, O'Brien JJ and Clark DB (2000) Evaluation of digital and film hemispherical photography and spherical densiometry for measuring forest light environments. *Canadian Journal of Forest Research* **30**, 1999–2005.

Esteso-Martínez J, Peguero-Pina JJ, Valladares F, Morales F and Gil-Pelegrín E (2010) Self-shading in cork oak seedlings: Functional implications in heterogeneous light environments. *Acta Oecologica* **36**, 423–430.

Evans GC and Coombe DE (1959) Hemispherical and Woodland Canopy Photography and the Light Climate. *Journal of Ecology* **47**, 103–113.

Fournier RA and Hall RJ (2017) Hemispherical Photography in Forest Science: Theory, Methods, Applications. Springer Netherlands.

Frazer G, Trofynow J and Lertzman KP (1997) A method for estimating canopy openness, effective leaf area index, and photosynthetically active photon flux density using hemispherical photography and computerized image analysis techniques (Vol. 373). Victoria^ eB. CBC, Pacific Forestry Centre.

Frazer GW, Fournier RA, Trofymow JA and Hall RJ (2001) A comparison of digital and film fisheye photography for analysis of forest canopy structure and gap light transmission. *Agricultural and Forest Meteorology* **109**, 249–263.

Glatthorn J and Beckschäfer P (2014) Standardizing the protocol for hemispherical

- photographs: Accuracy assessment of binarization algorithms. *PLoS ONE* **9**, 1–19.
- Gonsamo A and Pellikka P** (2009) The computation of foliage clumping index using hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* **149**, 1781–1787.
- Gonsamo A, Petra D and Pellikka P** (2013) Measuring fractional forest canopy element cover and openness – definitions and methodologies revisited. *Oikos* **122**, 1–9.
- Gonsamo A, Walter JMN and Pellikka P** (2011) CIMES: A package of programs for determining canopy geometry and solar radiation regimes through hemispherical photographs. *Computers and Electronics in Agriculture* **79**, 207–215.
- Gonsamo A, Walter JN, and Pellikka P** (2010) Sampling gap fraction and size for estimating leaf area and clumping indices from hemispherical photographs. *Canadian Journal of Forest Research* **40**, 1588–1603.
- Grotti M, Calders K, Origo N, Puletti N, Alivernini A, Ferrara C and Chianucci F** (2020) An intensity, image-based method to estimate gap fraction, canopy openness and effective leaf area index from phase-shift terrestrial laser scanning. *Agricultural and Forest Meteorology* **280**, 107766.
- Guarneri F, Vaccaro M, Guarneri C and Cannavò SP** (2014) JPEG vs. JPEG2000: Benchmarking with dermatological images. *Skin Research and Technology* **20**, 67–73.
- Guerra A, Reis LK, Borges FLG, Ojeda PTA, Pineda DAM, Miranda CO ... and Garcia LC** (2020) Ecological restoration in Brazilian biomes: Identifying advances and gaps. *Forest ecology and Management*, **458**, 117802.
- Haddaway NR and Verhoeven JTA** (2015) Poor methodological detail precludes experimental repeatability and hampers synthesis in ecology. *Ecology and Evolution* **5**, 4451–4454.
- Hirose T** (2005) Development of the Monsi-Saeki theory on canopy structure and function. *Annals of Botany* **95**, 483–494.

- Hwang Y, Ryu Y, Kimm H, Jiang C, Lang M, Macfarlane C and Sonnentag O** (2016) Correction for light scattering combined with sub-pixel classification improves estimation of gap fraction from digital cover photography. *Agricultural and Forest Meteorology* **222**, 32–44.
- Inoue A, Yamamoto K, Mizoue N and Kawahara, Y** (2004) Effects of image quality, size and camera type on forest light environment estimates using digital hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* **126**, 89–97.
- Ishida M** (2004) Automatic thresholding for digital hemispherical photography. *Canadian Journal of Forest Research* **34**, 2208–2216.
- Jennings S** (1999) Assessing forest canopies and understorey illumination: canopy closure, canopy cover and other measures. *Forestry* **72**, 59–74.
- Jonckheere I, Fleck S, Nackaerts K, Muys b, Coppin P, Weiss M and Baret F** (2004) Review of methods for in situ leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* **121**, 19–35.
- Kirby J, Chapman L and Chapman V** (2018) Assessing the Raspberry Pi as a low-cost alternative for acquisition of near infrared hemispherical digital imagery. *Agricultural and Forest Meteorology* **259**, 232–239.
- Korhonen L, Korhonen KT, Rautiainen M and Stenberg P** (2006) Estimation of forest canopy cover: A comparison of field measurement techniques. *Silva Fennica* **40**, 577–588.
- Lang M, Kuusk A, Mõttus M, Rautiainen M and Nilson T** (2010) Canopy gap fraction estimation from digital hemispherical images using sky radiance models and a linear conversion method. *Agricultural and Forest Meteorology* **150**, 20–29.
- Leblanc SG, Chen JM, Fernandes R, Deering DW and Conley A** (2005) Methodology comparison for canopy structure parameters extraction from digital hemispherical photography in boreal forests. *Agricultural and Forest Meteorology* **129**, 187–207.

- Leblanc SG and Fournier RA** (2014) Hemispherical photography simulations with an architectural model to assess retrieval of leaf area index. *Agricultural and Forest Meteorology* **194**, 64–76.
- Macfarlane C** (2011) Classification method of mixed pixels does not affect canopy metrics from digital images of forest overstorey. *Agricultural and Forest Meteorology* **151**, 833–840.
- Macfarlane C, Ryu Y, Ogden, GN and Sonnentag O** (2014) Digital canopy photography: Exposed and in the raw. *Agricultural and Forest Meteorology* **197**, 244–253.
- Monsi M and Saeki, T** (1953) The light factor in plant communities and its significance for dry matter production. *Japanese Journal of Botany* **14**, 22–52.
- Nascimento ART, Fagg JMF and Fagg CW** (2007) Canopy openness and lai estimates in two seasonally deciduous forests on limestone outcrops in Central Brazil using hemispherical photographs. *Revista Arvore* **31**, 167–176.
- Nobis M and Hunziker U** (2005) Automatic thresholding for hemispherical canopy-photographs based on edge detection. *Agricultural and Forest Meteorology* **128**, 243–250.
- Pekin B and Macfarlane C** (2009) Measurement of crown cover and leaf area index using digital cover photography and its application to remote sensing. *Remote Sensing* **1**, 1298–1320.
- Promis A, Gärtner S, Butler-Manning D, Durán-Rangel C, Reif A, Cruz G and Hernández L** (2011) Comparison of four different programs for the analysis of hemispherical photographs using parameters of canopy structure and solar radiation transmittance. *Waldökologie Online* **11**, 19–33.
- Pueschel P, Buddenbaum H and Hill J** (2012) An efficient approach to standardizing the processing of hemispherical images for the estimation of forest structural attributes. *Agricultural and Forest Meteorology* **160**, 1–13.

- Pullin AS and Stewart GB** (2006) Guidelines for systematic review in conservation and environmental management. *Conservation Biology* **20**, 1647–1656.
- Reis IP, Rocha-Santos L, Leal A, Faria D and Mielke MS** (2021) Landscape forest loss changes sunfleck dynamics in forest fragments of southern Bahia, Brazil. *Journal of Tropical Ecology* **37**, 64–71.
- Rich PM** (1989) A manual for analysis of hemispherical canopy photography. Los Alamos National Lab., NM (USA), United States, Stanford Univ, CA (USA). Dept. of Biological Sciences.
- Rich PM** (1990) Characterizing Plant Canopies with Hemispherical Photographs. *Remote Sensing Reviews* **5**, 37–41.
- Roxburgh J and Kelly D** (1995) Uses and limitations of hemispherical photography for estimating forest light environments. *New Zealand Journal of Ecology* **19**, 213–217.
- Ryu Y, Nilson T, Kobayashi H, Sonnentag O, Law BE and Baldocchi DD** (2010) On the correct estimation of effective leaf area index: Does it reveal information on clumping effects? *Agricultural and Forest Meteorology* **150**, 463–472.
- Smith AM and Ramsay PM** (2018) A comparison of ground-based methods for estimating canopy closure for use in phenology research. *Agricultural and Forest Meteorology* **252**, 18–26.
- Verhoeven GJJ** (2010) It's all about the format - unleashing the power of RAW aerial photography. *International Journal of Remote Sensing* **31**, 2009–2042.
- Wagner S and Hagemeyer M** (2006) Method of segmentation affects leaf inclination angle estimation in hemispherical photography. *Handbook of Environmental Chemistry, Volume 5: Water Pollution* **139**, 12–24.
- Walter JMN, Fournier RA, Soudani K and Meyer E** (2003) Integrating clumping effects in forest canopy structure: An assessment through hemispherical photographs. *Canadian*

Journal of Remote Sensing 29:388–410.

Weiss M, Baret F, Smith GJ, Jonckheere I and Coppin P (2004) Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination Part II. Estimation of LAI, errors and sampling.

Agricultural and Forest Meteorology **121**, 37–53.

Welles JM and Norman JM (1991) Instrument for Indirect Measurement of Canopy Architecture. *Agronomy Journal* **83**, 818-825.

Xiao F, Farrell J, Catrysse P and Wandell B (2009) Mobile Imaging: The Big Challenge of the Small Pixel. *Digital Photography* **7250**, 1–9.

Zhang Y, Chen JM and Miller JR (2005) Determining digital hemispherical photograph exposure for leaf area index estimation. *Agricultural and Forest Meteorology* **133**, 166–181.

Zou J , Hou W, Chen L, Wang Q, Zhong P, Zuo Y, Luo S and Leng P (2020) Evaluating the impact of sampling schemes on leaf area index measurements from digital hemispherical photography in *Larix principis-rupprechtii* forest plots. *Forest Ecosystems* **7**, 1-18.

CAPITULO 2

Pre-processing procedures for analyzing digital hemispherical photographs in different successional stages of tropical rainforests

Article prepared for submission to Acta Oecologica (A3, IF 1.93).

PRE-PROCESSING PROCEDURES FOR ANALYZING DIGITAL HEMISPHERICAL PHOTOGRAPHS IN DIFFERENT SUCCESSIONAL STAGES OF TROPICAL RAINFORESTS

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA E CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE - PPGEBC/UESC

ImageJ
Image Processing & Analysis in Java

**PRÉ-PROCESSAMENTO
TODO PROCESSO FOI
AUTOMATIZADO**

**MINIMUM
THRESHOLD**

Imagem **SEM** sharpen

Imagem **COM** sharpen

(Fiji Is Just) ImageJ
File Edit Image Process Analyze **Plugins**
Color picker (255, 0, 0/0, 0, 0)

- Macros
 - Install...
- Shortcuts
- Utilities
- New
 - Compile and Run...
 - Install... **Ctrl+Shift+M**
 - Install PlugIn...
- 3D Viewer
- Analyze
 - Install...
 - Run...
 - Edit...
 - Startup Macros...
 - Record...**
 - Pencil Tool Options...
 - Paintbrush Tool Options...
 - Flood Fill Tool Options...
 - Set Drawing Color...

Pre-processing procedures for analyzing digital hemispherical photographs in different successional stages of tropical rainforests

Igor Pires Reis^{a*}, Josafá Amaral de Oliveira Filho^b, Larissa Rocha-Santos^a, Amanda Freitas Cerqueira^a, Marcelo Schramm Mielke^a

^a Laboratório de Ecologia Aplicada, Universidade Estadual de Santa Cruz, Rodovia Jorge Amado, km 16, Ilhéus, BA, Brasil

^b Programa de Pós Graduação em Produção Vegetal, Universidade Estadual de Santa Cruz, Rodovia Jorge Amado, km 16, Ilhéus, BA, Brasil

* Corresponding author (ipreis@uesc.br)

Resumo

As fotografias hemisféricas digitais (FHds) fazem o registro do dossel florestal, sendo possível extrair variáveis de atributos de dossel com o processamento das imagens por meio de softwares. O processamento das imagens consiste em encontrar um limiar de classificação em pixels brancos (céu) e pretos (vegetação). Esse processo, conhecido como binarização, pode ser melhorado por meio do pré-processamento das imagens. Dependendo do estágio sucessional em que a floresta se encontra e das condições de exposição em que as FHds foram obtidas o pré-processamento pode ser necessário para aumentar a precisão das análises na obtenção de variáveis descritoras de atributos de dossel. Dessa forma, o objetivo desse estudo foi investigar o uso de técnicas de pré-processamento de imagens digitais em FHds obtidas numa floresta tropical úmida em diferentes estágios sucessionais. Utilizamos 72 FHds obtidas em três ambientes de Floresta Atlântica no sul da Bahia: (i) pastagem em regeneração com o plantio de árvores, (ii) capoeira em sucessão avançada e (iii) floresta madura. As imagens digitais foram pré-processadas com técnicas distintas e/ou combinadas. Para a extração dos atributos de dossel foi utilizado o software Gap Light Analyzer. Os resultados das diferentes técnicas e ambientes foram comparados por uma ANOVA robusta. O uso do pré-processamento promoveu um ganho de precisão no processamento das imagens em estágios sucessionais avançados e intermediários, porém o pré-processamento em estágios iniciais não se fez necessário.

Palavras-chave: *Fotografias hemisféricas digitais; pré-processamento; processamento; estágios sucessionais; atributos de dossel*

Introdução

As fotografias hemisféricas digitais (FHds) fazem o registro do dossel florestal, sendo possível extrair variáveis de atributos de dossel e estimativas de radiação solar presente no sub-bosque (Chianucci, 2020; Fournier and Hall, 2017). As FHds são obtidas, em sua grande maioria, por meio de uma câmera digital acoplada a uma lente grande angular, com ângulo de visão de 180° (Rich, 1990). A vegetação do dossel florestal apresenta valores de reflectância da radiação solar relativamente baixos, por causa da ação dos pigmentos fotossintetizantes que absorvem a radiação incidente para realização da fotossíntese (Lariguët and Dunand, 2005). Isso ocasiona um contraste na imagem digital que tende a ser escura na vegetação e clara no céu, ou seja, os pixels do céu estarão próximos dos valores mais altos da banda espectral (Fournier and Hall, 2017; Macfarlane et al., 2014). O processamento das imagens pode ser realizado por meio de softwares, no qual o primeiro passo é a binarização dos pixels, que consiste em encontrar um limiar de classificação entre pixels brancos (céu) e pretos (vegetação). A proporção desses pixels binários é usada para derivar os valores das variáveis de atributos de dossel e estimativas de radiação solar no sub-bosque (Brusa and Bunker, 2014; Fournier and Hall, 2017; Gonsamo et al., 2013; Rich, 1989). Portanto, quanto maior o contraste entre os pixels da imagem, maior será a precisão dos resultados extraídos (Brusa and Bunker, 2014).

Diversos fatores podem diminuir a qualidade das imagens e conseqüentemente o contraste entre os pixels, como os procedimentos para a obtenção das FHds no campo. Entre esses fatores estão as condições de luz, as configurações de exposição (velocidade do obturador, abertura e ISO), resolução da imagem, as aberrações cromáticas advindas naturalmente da lente hemisférica, as condições meteorológicas, a complexidade da estrutura do dossel e a gama dinâmica (espectro tonal das altas luzes e das sombras que são possíveis de serem fotografadas)

(Andis, 2018; Beckschäfer et al., 2013; Chianucci, 2020; Chianucci and Cutini, 2012). Apesar disso, muitos desses equívocos na a obtenção das FHds podem ser corrigidos no pré-processamento das imagens, que consiste na edição e aprimoramento da qualidade por meio de softwares específicos (Abràmoff et al., 2004; Fournier and Hall, 2017; Gonsamo et al., 2011). Por exemplo, no pré-processamento é possível acentuar o contraste para uma melhor discriminação visual entre os elementos da vegetação e do céu, portanto, pode melhorar e facilitar a etapa de processamento (Brusa and Bunker, 2014; Chianucci, 2020; Fournier and Hall, 2017; Glatthorn and Beckschäfer, 2014).

Um dos principais desafios da etapa de processamento das imagens digitais é como categorizar ou separar os pixels mistos, aqueles que contêm componentes do céu e da vegetação simultaneamente e geralmente ocorrem nas bordas das clareiras (Glatthorn and Beckschäfer, 2014; Macfarlane, 2011; Schwalbe and Maasa, 2005; Song et al., 2018). A limiarização dos pixels mistos pode ser de difícil classificação e separação, e sua qualidade e quantidade variam com a complexidade da estrutura do dossel e de seus elementos (miscelâneas, folhas, galhos e etc) que contrastam com o céu. Glatthorn and Beckschäfer, 2014, encontraram maior quantidade de pixels mistos em imagens superexpostas a luz e com uma grande densidade de árvores de estruturas finas, ou seja, pequenos ramos e galhos desfolhados podem ser considerados como céu durante a etapa de processamento da imagem (Andis, 2018; Leblanc et al., 2005). Em contrapartida, a subexposição ocasionada pela falta de luz faz com que os pixels das clareiras no horizonte da fotografia sejam classificados erroneamente como dossel da floresta (Beckschäfer et al., 2013; Leblanc et al., 2005; Macfarlane, 2011). De acordo com Fournier and Hall, 2017, isso pode acontecer em estruturas de vegetação de dossel mais densa, uma vez que a vegetação densa contém muitas pequenas clareiras no horizonte, as quais podem ser escurecidas e classificadas erroneamente como dossel (Leblanc et al., 2005).

Para amenizar o problema dos pixels mistos, o uso de filtros para aumentar a nitidez

durante a etapa de pré-processamento das imagens pode ser uma alternativa (Chianucci and Cutini, 2012; Clearwater et al., 1999; Gonzalez and Woods, 2008; Macfarlane, 2011). Filtros para a nitidez são usados para aprimorar os limites entre os pixels que têm características espectrais diferentes, mas são mal focalizados. Assim, o filtro *sharpen*, do software livre ImageJ, aumenta o contraste e acentua os detalhes na imagem (Abràmoff et al., 2004; Ferreira and Rasband, 2012). Outro procedimento para o pré-processamento das FHds é o uso de canais de cores, que podem acentuar as diferenças entre a pigmentação do céu e da vegetação. O canal azul do espectro eletromagnético pode oferecer um alto grau de contraste durante o processamento das FHds. Isso ocorre devido ao baixo espalhamento da luz azul nas folhas do dossel e à absorção seletiva do espectro azul pelas clorofilas presentes nas folhas, que tendem a escurecer a sua folhagem nas fotografias hemisféricas (Hardy et al., 2004; Jonckheere et al., 2006; Leblanc et al., 2005; Rich, 1989). Pelos mesmos motivos, também pode ser utilizado o canal vermelho e verde, os quais, muitas vezes, pode apresentar maior contraste que o canal azul (Chen et al., 2006; Jonckheere et al., 2006; Lariguet and Dunand, 2005; Leblanc et al., 2005).

Em locais severamente degradados ou em áreas agrícolas abandonadas prevalecem árvores mais esparsas com grandes valores de abertura de dossel (CO) e altos níveis de transmissão de luz (T), com temperaturas elevadas e alta demanda evaporativa. Tanto CO quanto T são estimados com base na soma da radiação solar direta e a difusa que chega ao sub-bosque, sendo consideradas estimativas estáticas, ou seja, sem levar em conta o percurso diurno do sol (Frazer et al., 1997). Florestas tropicais desmatadas ou em estágios sucessionais iniciais, como capoeiras, são estruturalmente caracterizadas por um dossel denso e homogêneo, com árvores de idades semelhantes e com um grande número de pequenas clareiras uniformemente distribuídas (Montgomery and Chazdon, 2001; Nicotra et al., 1999). Nesses locais a radiação solar atinge o sub-bosque em intervalos curtos e intermitentes durante o dia (Reis et al., 2021).

Por outro lado, nas florestas de estágios mais avançados ou maduros ocorrem árvores com diferentes idades e tamanhos, ocasionando numa maior dinâmica de abertura e fechamento de clareiras, o que aumenta o número de clareiras médias e completas que se estendem da copa da floresta até o solo, principalmente devido à queda de árvores e galhos em seu interior (Brokaw, 1982; Chazdon and Pearcy, 1986; Montgomery and Chazdon, 2001; Muscolo et al., 2014). Nesses casos, a radiação solar atinge o sub-bosque em intervalos de tempo mais longos. Assim, o tamanho das manchas do céu expostas no sub-bosque permite separar o tempo de exposição da radiação solar direta num ponto do sub-bosque em diferentes tempos: mais longos (*sun gap* e *clearings*); intermediários (*sunpaths*) e curtos (*sunflecks*) (Smith et al., 1989; Smith and Berry, 2013). Essas estimativas de radiação direta altamente dinâmica possuem uma forte influência na qualidade e quantidade de luz disponível para plantas regenerantes situados no sub-bosque, que são influenciadas pelo percurso solar, tamanho e a localização da clareira no dossel, e pelo local onde as fotografias digitais foram tiradas (Reis et al., 2021; Way and Pearcy, 2012).

Dependendo do tipo de vegetação, do estágio sucessional e das condições meteorológicas do dia em que as FHds foram obtidas, o pré-processamento pode ser uma ferramenta fundamental para aumentar a precisão dos resultados. Diferentes técnicas de pré-processamento podem otimizar a extração de variáveis de atributos do dossel em diferentes contextos de sucessão ecológica e prever com maior exatidão o regime de luz que se dá no sub-bosque florestal. No entanto, na literatura recente de FHds ainda são escassas as pesquisas que utilizaram as técnicas de pré-processamento, como o filtro *sharpen* e o canal azul (Brusa and Bunker, 2014; Jonckheere et al., 2005; Landini et al., 2017; Macfarlane, 2011). Dessa forma, é importante testar, comparar e estabelecer protocolos para a etapa de pré-processamento das FHds em florestas diferentes estágios sucessionais. Diante do contexto, o presente trabalho tem como objetivo investigar o uso de técnicas de pré-processamento de imagens digitais em

FHds obtidas em florestas com diferentes estágios sucessionais, visando o aumento da precisão das análises para obtenção das variáveis descritoras de atributos de dossel. Esperamos que o pré-processamento resulte em um maior aprimoramento das variáveis descritoras de atributos do dossel em área de estágios sucessionais avançados e intermediários por aumentar o contraste e revelar pequenas clareiras sem afetar significativamente as grandes em dosséis obstruídos pela folhagem. Em contrapartida, o pré-processamento é opcional em estágios sucessionais iniciais, pois as FHds nesses locais apresentam uma grande área homogênea de céu no hemisfério zenital, sendo que apenas nas periferias da imagem há vegetação contínua, ou seja, teremos pouco ou nenhum efeito do pré-processamento (Fournier and Hall, 2017).

Materiais e métodos

Local de estudo

As FHds utilizadas para esse estudo foram obtidas no Parque Estadual da Serra do Conduru (PESC) (14°20'–14°30' S; 39°02'–39°08' W) (Fig. 1).

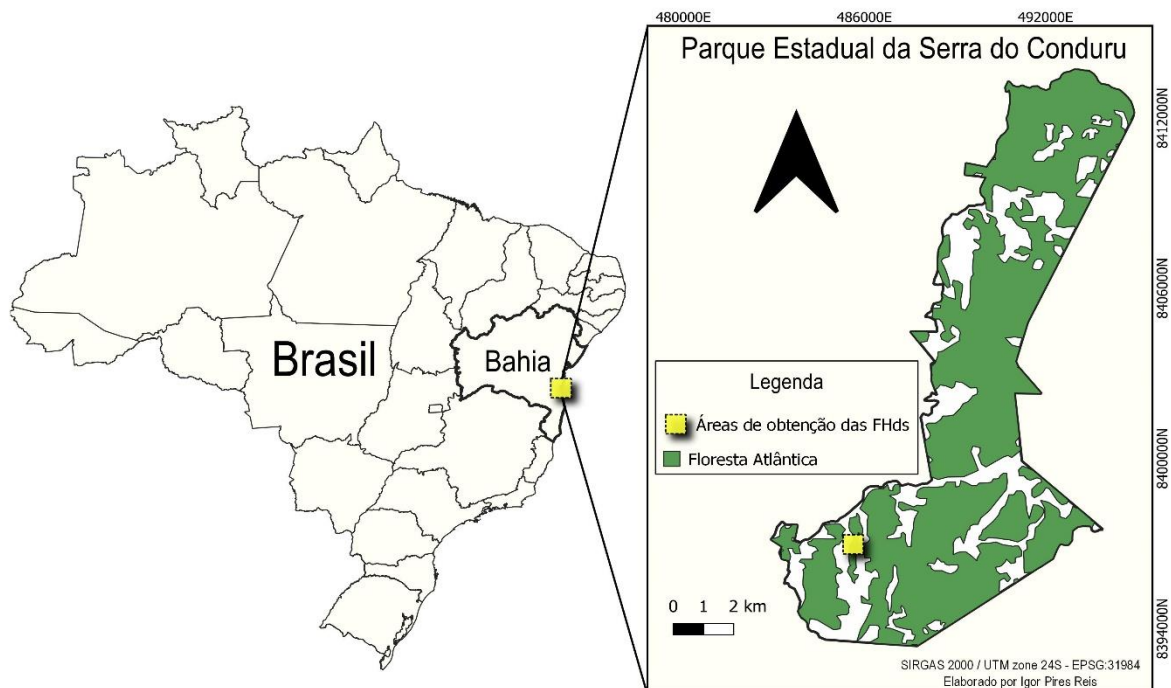


Fig. 1. Mapa do local de estudo onde foram obtidas as Fotografias Hemisféricas Digitais (FHds). À direita consta um mapa com os limites do Parque Estadual da Serra do Conduru (PESC) localizado no Sul do Estado da Bahia, Brasil.

O PESC possui fragmentos bem preservados de Floresta Atlântica e está inserido dentro do centro de endemismos do sul da Bahia (Thomas, 2003), além de possuir uma das mais altas biodiversidades de espécies arbóreas do planeta (Martini et al., 2007). O clima na região é quente e úmido, definido segundo Köppen, 1976, como tropical úmido, sem uma estação seca definida. A vegetação dominante na região é a Ombrófila Densa sub-montana, ou Floresta Úmida Sul Baiana, que se caracteriza pela presença de árvores altas, dossel denso e com altura maior que 25 m, com grande quantidade de lianas e epífitas (Piotto et al., 2009). Na área do PESC foram delimitados três locais de amostragem, correspondendo a três áreas em diferentes estágios de sucessão ecológica. Para tal, foi selecionada um sítio em regeneração em estágio inicial (S1) que passou por um processo de manejo e reflorestamento há aproximadamente 9 anos, um outro sítio em estágio intermediário onde houve corte seletivo e encontra-se em

regeneração a mais de 25 anos (S2), e por último, uma floresta madura em estágio avançado foi selecionada onde não há intervenção humana há mais de 40 anos (S3) (Tabela 1).

Obtenção das fotografias em campo

As FHds foram obtidas no mês de março de 2011 e em cada sítio foram demarcados de forma aleatória cinco transectos, sendo quatro transectos de 200m de comprimento e um com 150m, com pontos estabelecidos a cada 50m, contendo cinco e quatro pontos, respectivamente. Ao total foram marcados 24 pontos amostrais em cada um dos três sítios (Tabela 1).

Tabela 1

Descrição dos sítios estudados dentro do Parque Estadual da Serra do Condurú (PESC)

Sítio	Estágio Sucessional	Manejo Prévio	Tempo de Regeneração	Intervenção	Altura do dossel
S1	Pastagem em regeneração com plantio de árvores	Pastagem	9 anos	Plantio de mudas e roçagem	Até 10 m
S2	Capoeira em sucessão avançada	Corte seletivo	25 anos	Nenhuma	Entre 16 e 20 m
S3	Floresta madura	Nenhum	> 40 anos	Nenhuma	Entre 18 e 22 m

Em cada ponto uma FHd foi obtida, no total foram 72 FHds. Foi utilizado uma câmera fotográfica digital Nikon Coolpix E4300 equipada com uma lente olho-de-peixe FC-E8 com distância focal de 8mm, montada sobre um tripé a 1,20 m de altura, o qual foi nivelado em relação ao solo por um nível de bolha comum. Além disso, uma marca no perímetro da lente hemisférica foi adicionada para que houvesse uma orientação do norte magnético e o alinhamento da imagem durante a etapa de registro, posteriormente georreferenciado (Reis et al., 2021). Parcialmente as fotografias hemisféricas foram obtidas pouco antes do nascer do sol, um pouco antes do pôr do sol ou sob céu nublado, para obter o melhor contraste e evitar a superexposição (Leblanc et al., 2005). Todas as fotografias foram tiradas usando configurações

de exposição automática (auto exposição) como realizados em outros trabalhos (Finzi and Canham, 2000; Macfarlane et al., 2007). As configurações obtidas das imagens digitais fotográficas foram: Resolução de 2272 x 1704 pixels em formato JPEG; f.stop/2.8; tempo de exposição 1/34s e ISO 100. A Nikon Coolpix E4300 trata-se de uma câmera *point and shot* com muitas limitações comparadas as câmeras atuais, principalmente devido à baixa resolução (3.14 megapixels), porém ainda é uma das câmeras mais utilizadas pelos cientistas florestais para obter as FHds (Kirby et al., 2018). É importante ressaltar que existe uma correlação grande encontrada de pixels mistos com a resolução da imagem digital, por isso foram padronizadas em 2272 x 1704 pixels (Fournier and Hall, 2017).

Pré-processamento e processamento das imagens digitais

As imagens digitais foram pré-processadas por meio de técnica distinta e/ou combinadas. Dessa forma, foi utilizado o filtro *shapen* presente no freeware ImageJ (Abràmoff et al., 2004). Posteriormente, ainda por meio do mesmo software, uma imagem foi dividida nos canais vermelho, verde e azul, usando o comando do menu Image > Color > Split Channels. O canal azul foi selecionado. Finalmente, foi utilizado o plug-in Auto Threshold v1.15, usando o comando Image > Adjust > Auto Threshold > Method > Minimum Algorithm para o processamento (*Threshold*) e binarização, que significa a separação dos pixels pretos (vegetação) e brancos (céu). Posteriormente, as imagens foram convertidas para 16 bits por canal e salvas como arquivo JPG para análises futuras (Jonckheere et al., 2005).

Atributos do dossel

Os dados de abertura de dossel (CO) que é a proporção do céu que não é bloqueado pela

copa em um determinado ponto do observador no sub-bosque (Brusa and Bunker, 2014), da transmissão de luz (T), que é a fração de radiação no pleno sol que chega ao sub-bosque (Frazer et al., 2001; Montgomery and Chazdon, 2001), e o números de *sunflecks* (Sf), *sunpaths* (Sp), *sungaps* (Sg) e *clearings* (Cg) foram obtidas por meio do software Gap Light Analyzer – GLA (Frazer, 1999), de acordo com os procedimentos descritos em Estesio-Martínez et al., 2010, Reis et al, 2021; Smith & Berry, 2013; e Smith et al., 1989. O software extrai dados da estrutura do dossel com base em um dia de interesse específico pelo usuário. Portanto, os cálculos foram feitos para um total de 183 dias ao longo do ano, entre 21 de junho a 21 de dezembro, englobando os solstícios de inverno (menor duração do dia) e verão (maior duração do dia) também feito por Reis et al., 2021. O modelo de radiação simplificado dentro do GLA assume que quando a posição do sol é obstruída pelo dossel, a radiação direta é zero, e quando desobstruída, a radiação direta é igual ao valor acima do dossel. Logo, o feixe de radiação espalhada e refletido não são considerados (Canham et al., 1990; Frazer, 1999; Hardy et al., 2004; Reis et al., 2021). Primeiramente, foram registradas as imagens das FHds, já processadas na etapa anterior, e foi identificada a orientação geográfica. Foi utilizado o norte magnético como referência e estabelecidas coordenadas de declinação magnética para o local do estudo e a extensão circular da imagem hemisférica. Como todas as imagens digitais já se encontram binarizadas, foram calculados o CO e T pelo comando ‘Calculate’, no menu de utilitários do software GLA, e para os cálculos de Sf, Sp, Sg e Cg foi utilizada a função ‘Plot Sunfleck Distribution’. A duração mínima dos Sf foi fixada em 1 min, sendo considerados Sf $1 < 8$ min, Sp $8 < 60$ min, Sg $60 < 120$ min e Cg > 120 min (Smith and Berry, 2013).

Análise dos dados

Utilizamos o delineamento em blocos casualizados em esquema fatorial 3 x 4, sendo

três sítios em estágios sucessionais diferentes e quatro combinações de técnicas de pré-processamento das imagens. Para análise estatística, todos os dados foram submetidos a ANOVA robusta por não apresentarem homoscedasticidade e normalidade. A homoscedasticidade das variâncias foi testada pelo método de Levene, seguida da normalidade via Shapiro-Wilk a 5% de probabilidade. Dentre as possibilidades, utilizamos a ANOVA com Transformação de Classificação Ranqueada (ART) para análises fatoriais não paramétricas que consiste em uma etapa de pré-processamento que “ranqueia” os dados nominais para cada efeito (principal e interação) em numéricos antes de aplicar as classificações médias (Conover, 2012). Após o procedimento de ranqueamento, pode-se adotar a ANOVA comum com o teste F. Como os pressupostos de normalidade e homoscedasticidade foram violados, o ART é muito mais parcimonioso que a ANOVA fatorial comum (Leys and Schumann, 2010). Outras técnicas não estão amplamente disponíveis e costumam ser muito complexas, como por exemplo de Friedman, que são inadequados, pois são incapazes de examinar os efeitos da interação (Wobbrock et al., 2011). Posteriormente, foi analisada a interação, bem como os efeitos principais via comparações a pares (*Post-hoc*), aplicando o teste Tukey ajustado a 5% de significância. Todas as análises foram feitas utilizando o pacote ARTool para [R] que é uma versão disponível no programa estatístico R (Elkin et al., 2021; R Core Team, 2015).

Resultados

Foram observadas diferenças significativas para todas as variáveis calculadas entre os diferentes estágios sucessionais (ES). Em relação as diferentes técnicas de pré-processamento (PP), apenas as variáveis CO, T e Sf apresentaram diferenças significativas, com interações entre ES e PP (Tabela 2).

Tabela 2

Níveis de significância de Aligned Rank Transform (ART) ANOVA de duas vias para os efeitos de sítios em diferentes estágios sucessionais (ES), para o pré-processamento de imagens (PP) obtidas por meio de fotografias hemisféricas e interações entre ES x PP para abertura de dossel (CO), transmissão de luz (T), e número de *sunflecks* (Sf), *sunpatches* (Sp), *sungaps* (Sg) e *clearings* (Cg). (N = 288)

	Estágio sucessional (ES)	Pré-processamento (PP)	ES x PP
CO	***	***	**
Tr	***	***	***
Sf	***	***	***
Sp	***	ns	ns
Sg	***	ns	ns
Cg	***	ns	ns

ns ($P > 0.05$); ** ($P \leq 0.01$); *** ($P \leq 0.001$)

Os valores médios de todas as variáveis foram sempre maiores em S1 (estágio inicial) do que em outros sítios, com exceção de Sf que apresentou os maiores valores médios em S2 (Figura 2).

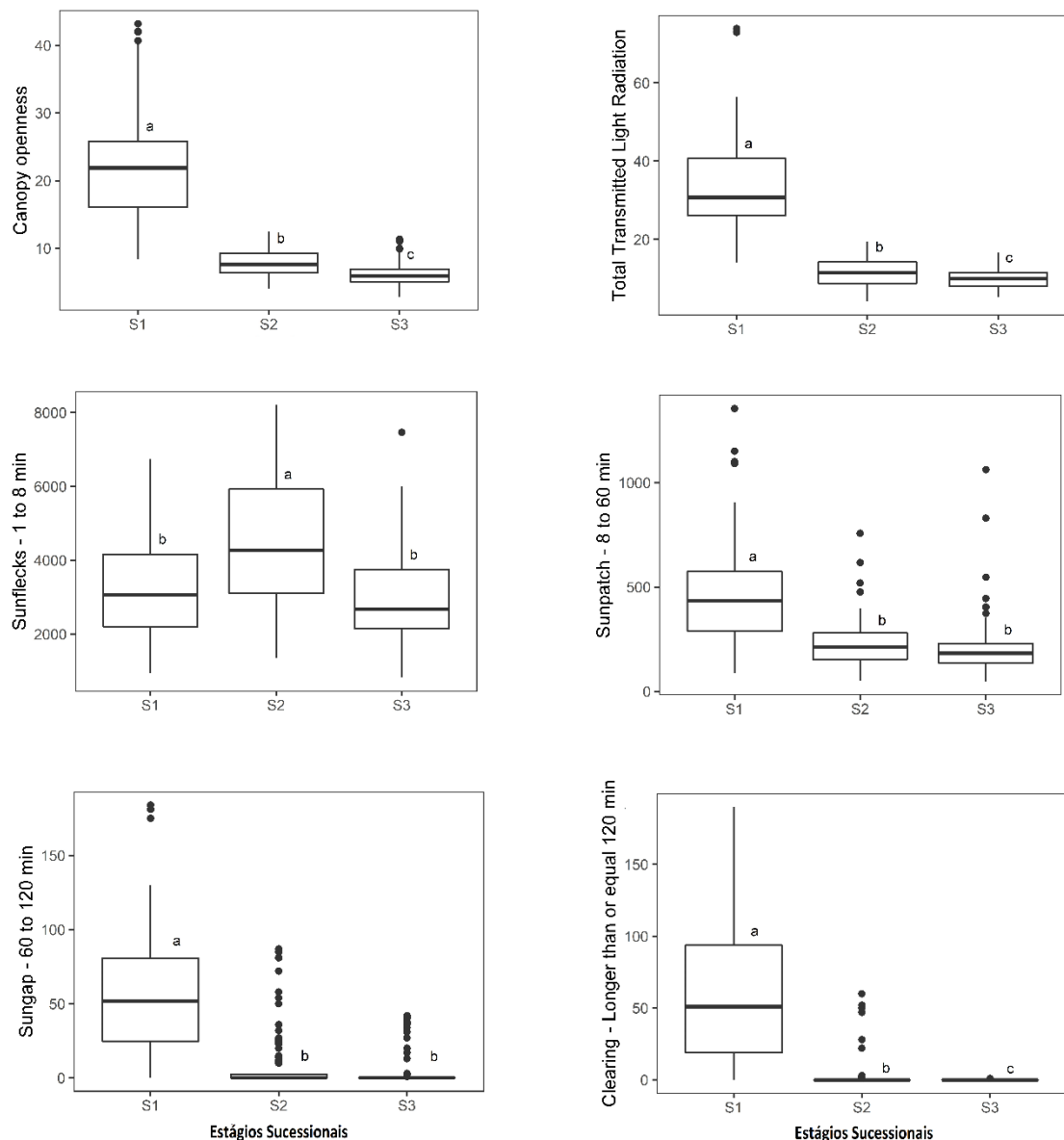


Fig. 2. Os Box-and-whisker mostram os percentis 0, 25, 50, 75 e 100 da distribuição com os valores médios da abertura de dossel (CO), transmissão de luz (T), número de *sunflecks* (Sf), *sunpatches* (Sp), *sungaps* (Sg) e *clearings* (Cg) em sítios com diferentes estágios sucessionais numa floresta tropical úmida localizada na Mata Atlântica do sul da Bahia, Brasil: pastagem em regeneração (S1), capoeira em sucessão avançada (S2) e floresta madura (S3). Os Box-and-whisker seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0.05$). (N = 96).

Os valores médios de CO e T, apresentaram o mesmo padrão (uma vez que tiveram alta correlação, $r=0.94$), foram aproximadamente 3,5 vezes maiores em S1 em relação a S3. Independentemente dos sítios analisados, as lacunas do dossel de menor tamanho (Sf) foram as mais frequentes, seguidas pelos tamanhos intermediários (Sp e Sg) e grande (Cg),

respectivamente. Observa-se também um padrão de valores médios de Sp, Sg e Cg serem menores no sítio em estágio sucessional mais avançado, ou seja, S3. A maior categoria de tamanho de lacuna no dossel (Cg), obteve o menor valor foi no S3, e o valor de S2 foi cerca de 23 vezes menor que em S1. Desse modo, áreas em estado inicial de regeneração tem mais aberturas de dossel intermediárias e grandes do que áreas em estágio intermediário e avançado.

Quando analisadas as técnicas de pré-processamento (Figura 3), observa-se que tanto para CO como para T os maiores e menores valores médios foram obtidos com o filtro *sharpen* sem o canal azul (+S- FA), seguido da combinação do filtro *sharpen* com o canal azul (+S+ FA) (Figura 2).

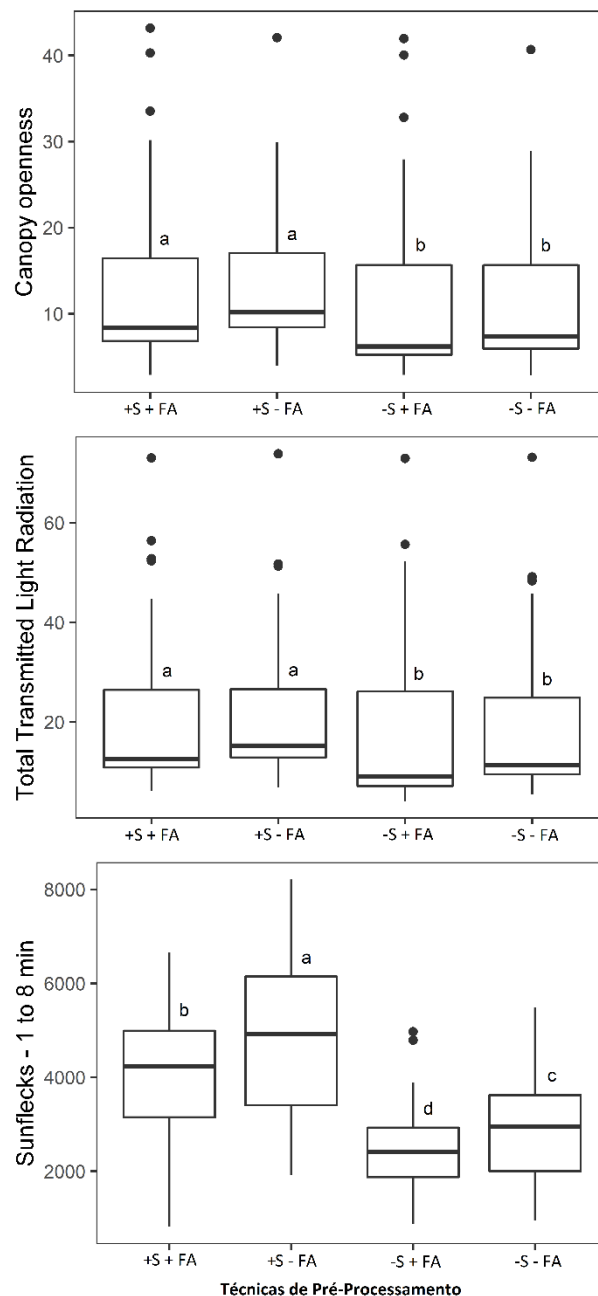


Fig. 3. Os Box-and-whisker mostram os percentis 0, 25, 50, 75 e 100 da distribuição com os valores médios da abertura de dossel (CO), transmissão de luz (T), e número de *sunflecks* (Sf) numa floresta tropical úmida localizada na Mata Atlântica do sul da Bahia, Brasil, em função da combinação de pré-processamentos de imagens obtidas por meio de fotografias hemisféricas: com filtro *sharpen* e com canal azul (+S+FA), com filtro *sharpen* e sem canal azul (+S-FA), sem filtro *sharpen* e com canal azul (-S+FA), e sem filtro *sharpen* e sem canal azul (-S-FA). Os Box-and-whisker seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0.05$). (N = 72)

Por outro lado, os menores valores médios de T foram obtidos para a combinação sem filtro

sharpen e com canal azul (-S+FA), seguido do tratamento controle (sem sharpen e canal azul, -S-FA), os quais não diferiram significativamente entre si. Para o sunfleck, todas as técnicas de pré-processamento foram significativamente diferentes entre si, sendo que o valor médio de Sf foi cerca de duas vezes superior para a combinação +S-FA em comparação com -S+FA.

Assim como foi observado na comparação entre sítios (Figura 3), os maiores valores médios de CO, considerando as interações entre sítios e técnicas de pré-processamento (Figura 4), foram obtidos para S1, seguido de S2 e S3.

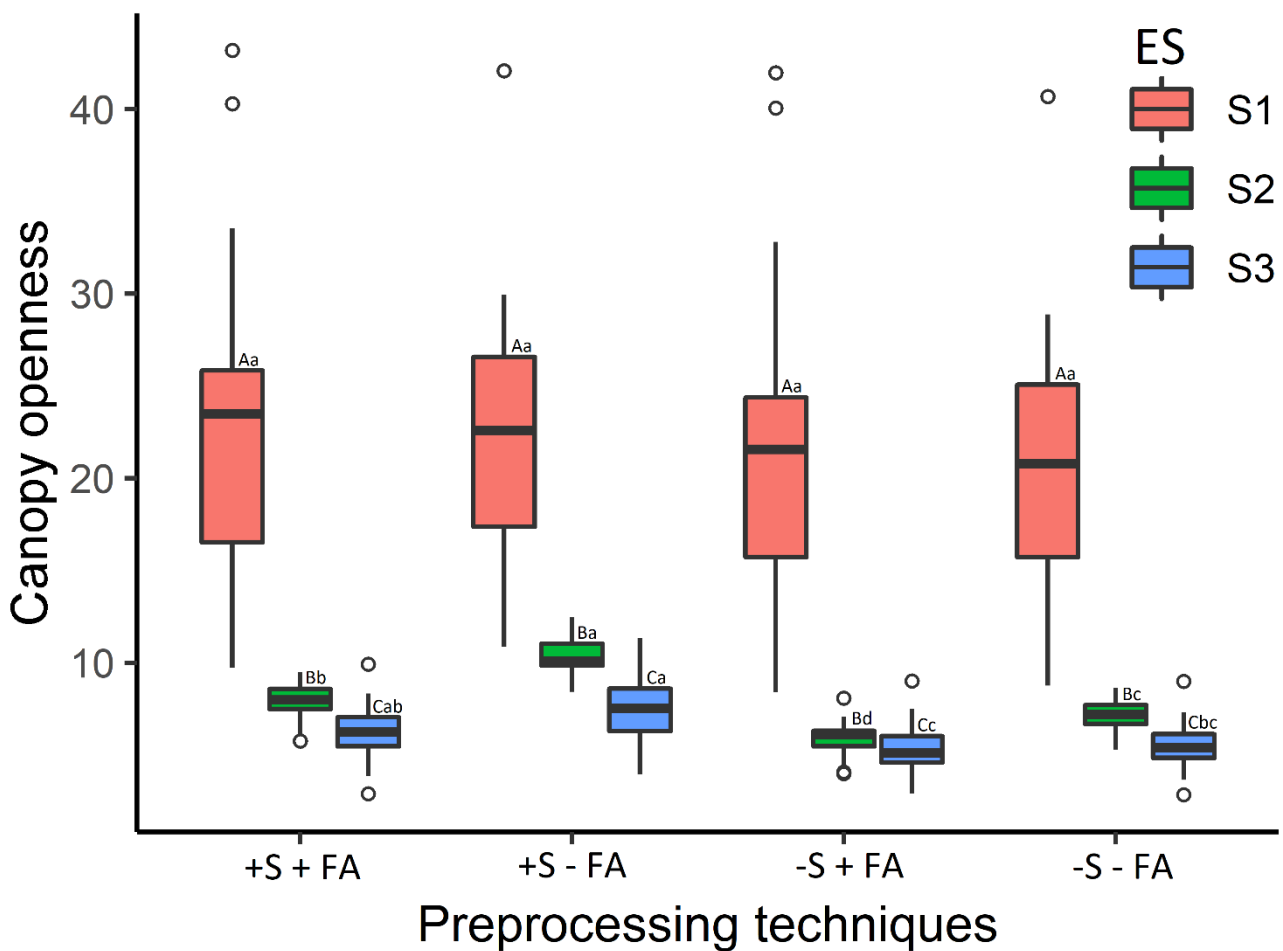


Fig. 4. Os Box-and-whisker mostram os percentis 0, 25, 50, 75 e 100 da distribuição com os valores médios da abertura de dossel (CO) para três sítios numa floresta tropical úmida localizada na Mata Atlântica do sul da Bahia, Brasil (pastagem em regeneração – S1, capoeira em sucessão avançada - S2, e floresta madura – S3), em função da combinação de pré-processamentos de imagens obtidas por meio de fotografias hemisféricas: com filtro *sharpen* e com canal azul (+S+FA), com filtro *sharpen* e sem canal azul (+S-FA), sem filtro *sharpen* e com canal azul (-S+FA), e sem filtro *sharpen* e sem canal azul

(-S-FA). Médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0.05$). Os Box-and-whisker seguidas com letras maiúsculas representam comparações de sítios dentro de pré-processamentos e letras minúsculas representam comparações de pré-processamentos dentro de sítios. (N = 72)

No entanto, não foram observadas diferenças significativas entre as técnicas de pré-processamento para S1. Para os sítios S3 e S2, por outro lado, os maiores valores médios de CO foram obtidos para as combinações com o filtro *sharpen* e sem (+S-FA) ou com (+S+FA) o filtro azul. Para o sítio em estágio intermediário de sucessão (S2) todos os tratamentos de pré-processamento diferiram significativamente entre si, sendo os maiores valores médios obtidos para (+S-FA), seguido de (+S+FA), (-S-FA) e (-S+FA).

Uma tendência muito semelhante ao que foi encontrado para CO (Figura 4) também foi encontrada para T (Figura 5).

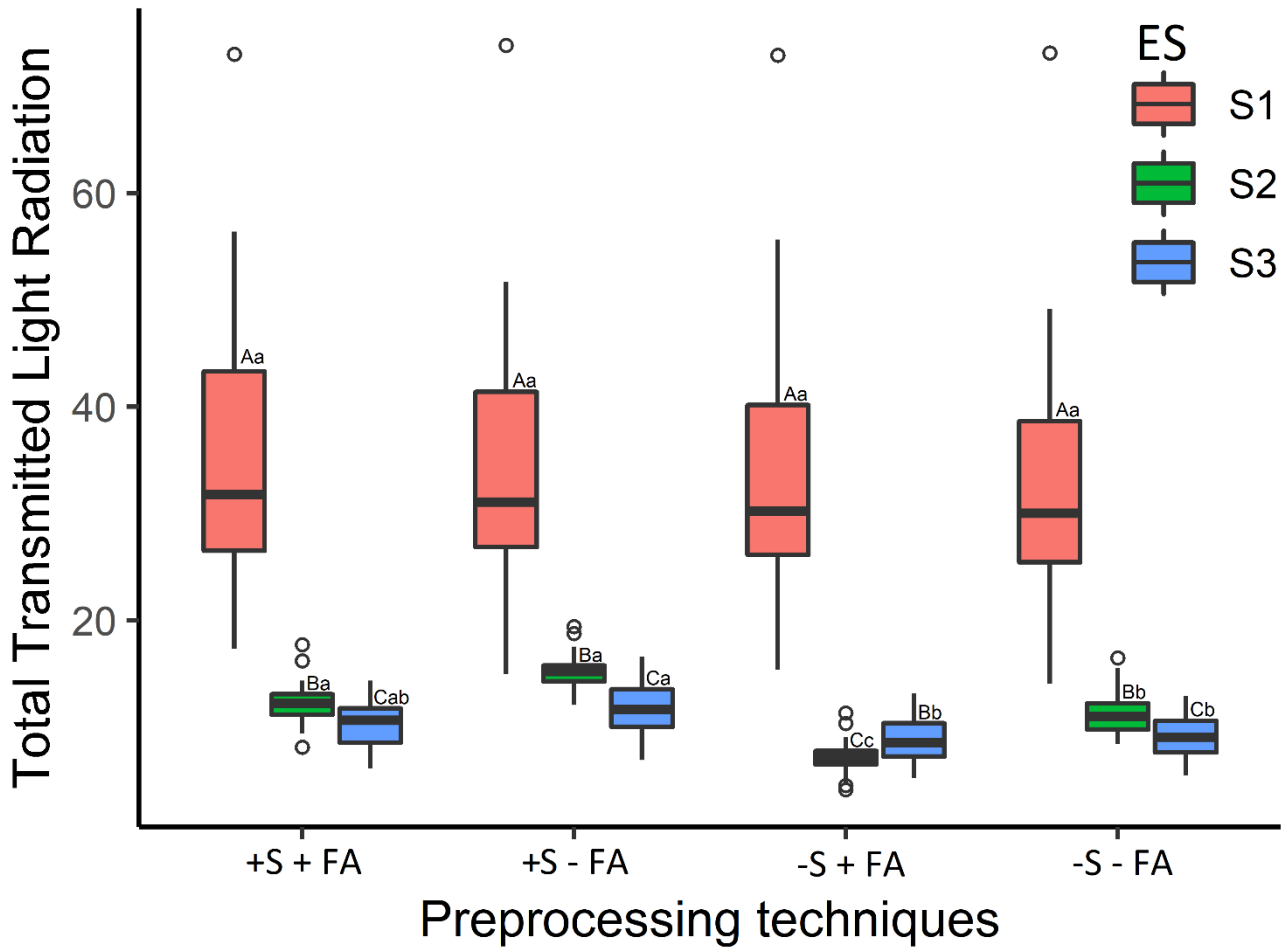


Fig. 5. Os Box-and-whisker mostram os percentis 0, 25, 50, 75 e 100 da distribuição com os valores médios da transmissão de luz (T) para três sítios localizados numa floresta tropical úmida localizada na Mata Atlântica do sul da Bahia, Brasil (pastagem em regeneração - S1, capoeira em sucessão avançada - S2, e floresta madura - S3), em função da combinação de pré-processamentos de imagens obtidas por meio de fotografias hemisféricas: com filtro *sharpen* e com canal azul (+S+FA), com filtro *sharpen* e sem canal azul (+S-FA), sem filtro *sharpen* e com canal azul (-S+FA), e sem filtro *sharpen* e sem canal azul (-S-FA) Médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0.05$). Os Box-and-whisker seguidas com letras maiúsculas representam comparações de sítios dentro de pré-processamentos e letras minúsculas representam comparações de pré-processamentos dentro de sítios. (N = 72)

Além de os maiores valores médios de T, considerando as interações entre sítios e técnicas de pré-processamento (Figura 5), terem sido obtidos para S1, seguido de S2 e S3, não foram observadas diferenças significativas entre as técnicas de pré-processamento para S1. Para os sítios S1 e S2 os maiores valores médios de T também foram obtidos para as combinações com

o filtro *sharpen* e sem (+S-FA) ou com (+S+FA) o filtro azul. Para o sítio S3, os maiores valores médios de T foram obtidos para (+S-FA), seguido de (+S+FA), (-S-FA) e (-S+FA).

Para o número de *sunflecks* (Sf), independentemente da técnica de pré-processamento testada, os maiores valores médios foram sempre obtidos para S2 (Figura 6).

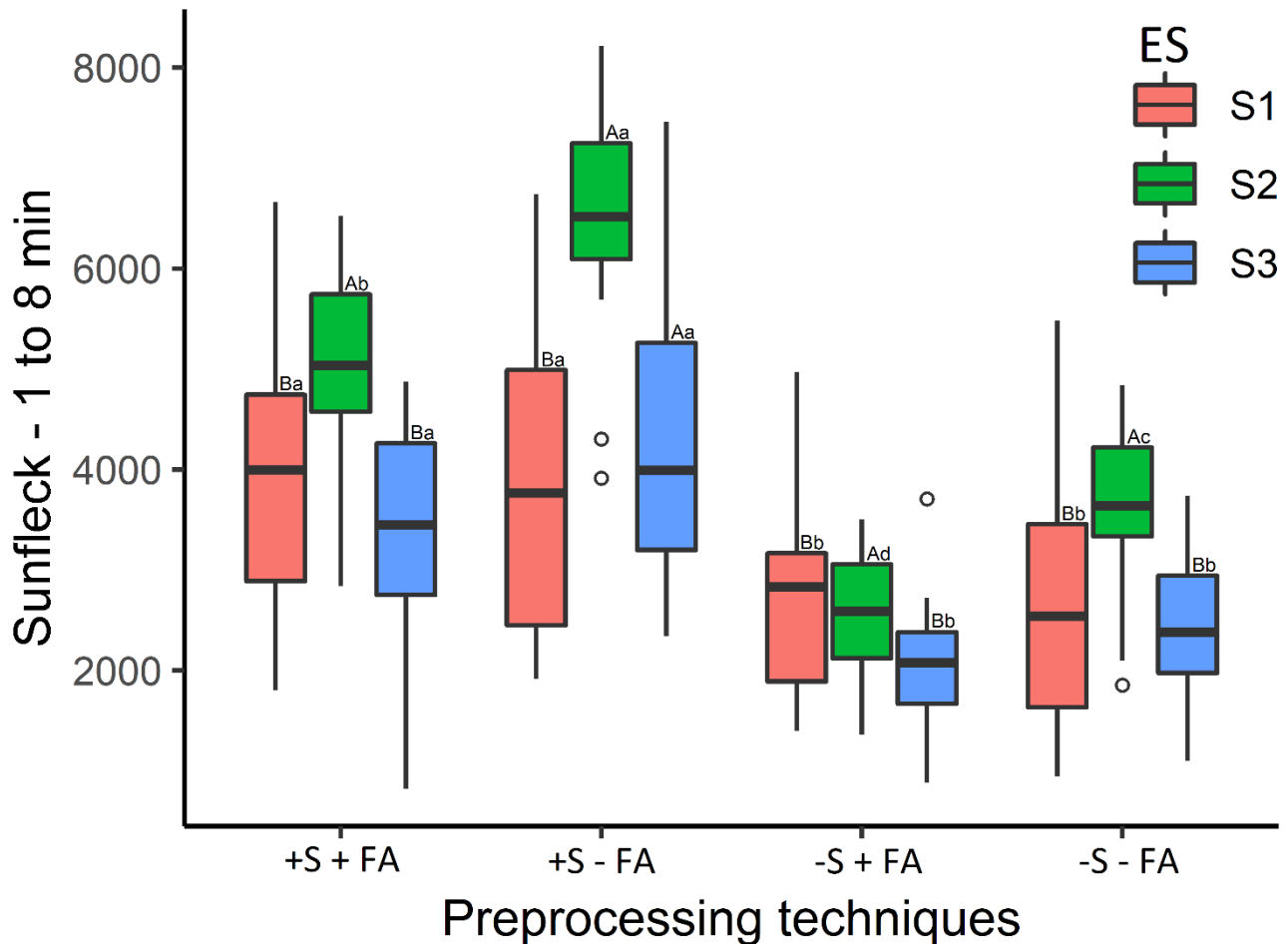


Fig. 6. Os Box-and-whisker mostram os percentis 0, 25, 50, 75 e 100 da distribuição com os valores médios \pm SE número de *sunflecks* (Sf) para três sítios localizados numa floresta tropical úmida localizada na Mata Atlântica do sul da Bahia, Brasil (pastagem em regeneração – S1, capoeira em sucessão avançada - S2, e floresta madura – S3), em função da combinação de pré-processamentos de imagens obtidas por meio de fotografias hemisféricas: com filtro *sharpen* e com canal azul (+S+FA), com filtro *sharpen* e sem canal azul (+S-FA), sem filtro *sharpen* e com canal azul (-S+FA), e sem filtro *sharpen* e sem canal azul (-S-FA). Os Box-and-whisker seguidas com letras maiúsculas representam comparações de sítios dentro de pré-processamentos e letras minúsculas representam comparações de pré-processamentos dentro de sítios. (N = 72)

Ainda para S2 nota-se que todas as técnicas de pré-processamento diferiram significativamente

entre si, sendo os maiores valores médios obtidos para (+S-FA), seguido de (+S+FA), (-S-FA) e (-S+FA), respectivamente. Nesse caso, o valor médio de Sf obtido a partir da combinação +S-FA foi cerca de 2,5 vezes maior do que da -S+FA.

Discussão

O nosso estudo demonstrou que o pré-processamento aumentou a precisão e a exatidão do processamento das FHds, a depender do estágio sucessional em que as fotografias foram obtidas. A superestimativa de variáveis de atributos de dossel em copas de vegetação densa é comum nas análises das FHds (Zhang et al., 2005), principalmente se essas fotografias hemisféricas digitais foram obtidas em estágios de florestas maduras e intermediários. Nesses casos o filtro *sharpen* e o canal azul podem influenciar positivamente na classificação da imagem digital, visto que os valores de cinza do céu e dos pixels da vegetação tornam-se distintos e melhores para serem separados (Beckschäfer et al., 2013). Contudo, recomendamos sempre que as fotografias hemisféricas digitais sejam obtidas em contextos meteorológicos adequados para que o canal azul tenha um efeito mais preciso sobre as FHds (Brusa and Bunker, 2014). Já para estágios sucessionais iniciais, não se faz necessário a aplicação de técnicas de pré-processamento, uma vez que não encontramos diferenças.

Efeito do Estágios sucessionais nas variáveis de atributos de dossel

A luz que é transmitida através do dossel florestal depende da densidade de árvores de dossel e emergentes (Angelini et al., 2015; Lieffers et al., 1999; Monsi and Saeki, 1953). A metodologia das FHds tem sido usada frequentemente para auxiliar no desenvolvimento de modelos de regime de luz em diferentes florestas, pois a radiação solar incidente que chega ao

sub-bosque tem um alto grau de variabilidade temporal e espacial (Bertin et al., 2011; Lieffers et al., 1999; Reis et al., 2021; Rocha-Santos et al., 2016). Especificamente a complexidade da estrutura do dossel de diferentes idades influencia na radiação solar transmitida que chega no sub-bosque florestal (Angelini et al., 2015). Como esperado, em S1 encontramos valores maiores de CO em comparação com S2 e S3. Em consequência dos elevados valores de CO, vários estudos têm demonstrado que o sub-bosque de sítios de estágios sucessionais iniciais, como sítios agrícolas abandonados e locais desmatados, apresentam altos níveis de radiação solar, temperatura do ar mais alta e alta demanda evaporativa (Chazdon and Fetcher, 1984; Kabakoff and Chazdon, 1996). No entanto, à medida que se avança na sucessão ecológica os valores de CO e T tornaram-se mais parecidos para S2 e S3. Com o passar dos anos existe a tendência de a transmitância da luz diminuir, pois há um crescimento rápido de espécies pioneiras e a formação de um dossel homogêneo e fechado, que é similar a florestas maduras e antigas (Ellsworth and Reich, 1996; Lebrija-Trejos et al., 2011).

A alta correlação entre os valores de CO e T ($r = 0.94$) também foi reportada por Cerqueira et al., 2022. A T é uma medida altamente dependente do CO, pois trata-se exatamente da radiação solar direta em um determinado ponto abaixo do dossel que não é obstruída (Frazer, 1999; Hardy et al., 2004). Porém, CO e T não possuem a mesma precisão que *sunflecks*, *sunpatches*, *sungaps* e *clearings* para explicar os gradientes de luz no sub-bosque durante a sucessão florestal. Os *sunflecks*, *sunpatches*, *sungaps* e *clearings* permitem avaliar com maior exatidão o tempo de exposição da radiação solar que passa pelo dossel e chega no sub-bosque florestal, determinando a duração e a frequência das manchas de sol sobre plantas de acordo com o percurso do sol, o tamanho e a distribuição das clareiras no dossel (Reis et al., 2021; Smith et al., 1989). Dessa forma, as distinções quantitativas entre *sunflecks*, *sunpatches*, *sungaps* e *clearings* em regimes de irradiação solar podem ter aplicações mais amplas em termos ecofisiológicos, pois existe uma relação com as escalas de tempo e os ajustes do metabolismo

para ganho líquido de carbono em muitas espécies de plantas situadas no sub-bosque florestal (Durand et al., 2022; Smith et al., 1989; Smith and Berry, 2013; Way and Pearcy, 2012). A radiação solar pode ser bastante relevante em processos de regeneração, recrutamento e estágios ontogenéticos iniciais de plantas (Eliáš, 2014; Reis et al., 2021; Smith and Berry, 2013; Way and Pearcy, 2012). Descrito e classificado por Smith et al., 1989, pela primeira vez, esse estudo aplicou parâmetros quantitativos de níveis específicos de irradiação solar e duração da exposição por meio de FHds para fornecer estimativas mais precisas dos regimes de irradiância do sub-bosque.

A maior frequência de Sf em áreas intermediárias (S2), quando comparado aos outros sítios corrobora com os resultados reportados por Nicotra et al., 1999 e por Montgomery and Chazdon, 2001. Segundo esses autores nas florestas em regeneração, como em S2, a cobertura florestal é mais homogênea e composta de árvores de idade semelhante, ocasionando uma variação espacial na disponibilidade de luz mais baixa em comparação com florestas em estágios sucessionais mais avançados. Nos sítios em estágios intermediários de sucessão florestal, como em S2, as clareiras grandes e de médio porte no dossel são ausentes e a vegetação é uniformemente densa, contribuindo para a ocorrência de inúmeras pequenas clareiras. Em contraste, florestas de sucessão mais avançada tendem a ter um ciclo otimizado e dinâmico de abertura e fechamento de clareiras (Muscolo et al., 2014). Nesses casos, as quedas de árvores emergentes e de dossel ocasionam a formação de clareiras completas, de tamanhos médios a grandes (Brokaw, 1982), as quais podem ter até duas vezes maiores quando comparados a florestas secundárias ou capoeiras em regeneração. Isso pode explicar também o fato de ter sido encontrada uma menor frequência de Sf em S3.

O efeito do pré-processamento nas diferentes variáveis de atributos do dossel

O uso de técnicas de pré-processamento, como as combinações S+FA ou S-FA, acentuaram a detecção de pequenas clareiras no dossel da floresta, aumentando assim, a proporção das lacunas antes obscurecidas pela vegetação. Isso acontece porque esse método é baseado na detecção dos limites entre céu e vegetação, aprimorando as bordas das clareiras. Basicamente, o filtro *sharpen* resalta as mudanças bruscas do alcance dinâmico resultante da vegetação escura e do céu claro que aparecem simultaneamente na cena fotografada (Beckschäfer et al., 2013; DiCarlo and Wandell, 2000). Portanto, o filtro *sharpen* para CO e T ocasionou aumentos do contraste nas bordas das clareiras e melhorou a etapa de classificação. Mais especificamente quando utilizada a combinação +S-FA foi possível observar um pequeno aumento nos valores médios de CO quando comparado com as combinações -S+FA e -S-FA. Por outro lado, o Sf oferece uma descrição mais quantitativa da duração da exposição solar, sendo um melhor *proxy* para a radiação direta incidente no sub-bosque da floresta quando comparados com CO e T que representa a soma de todos os valores da razão de pixels brancos de um segmento da fotografia hemisférica classificada em preto e branco (Frazer et al., 1997; Reis et al., 2021; Smith et al., 1989). Assim, o cálculo de Sf após o pré-processamento com o uso do filtro *sharpen* permite identificar e computar clareiras muito pequenas. É importante salientar que essas pequenas clareiras são importantes de serem amostradas, pois estão relacionadas ao uso eficiente de radiação solar direta de curta duração por plantas em locais sombreados do sub-bosque. Nesses casos, ajustes finos de mecanismos fisiológicos e morfológicos específicos são necessários para maximizar a absorção de luz por plantas tolerantes a sombra (Mathur et al., 2018). Assim, o pré-processamento por meio do filtro *sharpen* está relacionado com o aumento da precisão na obtenção de dados de Sf, amplificando a presença de pequenas clareiras com manchas de sol de curta duração e aumentando sua frequência nos dosséis da floresta.

De acordo com vários autores o canal azul é o melhor canal RGB individual para a

discriminação entre céu e vegetação (Brusa and Bunker, 2014; Frazer et al., 2001; Macfarlane et al., 2014; Sonnentag et al., 2012; Weiss et al., 2004). No entanto, no presente estudo, os menores elementos da estrutura do dossel podem ter ficado invisíveis no canal azul, especialmente em condições meteorológicas de céu completamente azul. Isso pode ter aumentado a aberração cromática proveniente da lente Nikon FC-E8, usada no nosso estudo. Uma desvantagem de usar o canal azul em condições de céu não difuso, por exemplo, é que as bordas das fotos podem estar sujeitas a aberração cromática da lente, desfocando a resolução espacial efetiva da fotografia digital (Frazer et al., 2001). O desfoque de cor se torna mais proeminente quando existe a transmissão da luz que é dispersada pelo fundo azul do céu e pelas nuvens. Isso ocorre longe do centro da imagem, em ângulos de zênites maiores, sendo detectada em fotografias obtidas com lentes do tipo grande angular (Frazer et al., 2001), como a lente FC-E8. Quando foi usado o canal azul em conjunto ao filtro *sharpen* (+S+FA) obteve-se uma diminuição brusca da quantidade de clareiras de tamanhos menores (Sf) quando comparado com a combinação +S-FA. Fournier and Hall, 2017 e Leblanc, 2008 recomendam que as FHds devem ser obtidas em condições de céu difuso, ou seja, próximo ao amanhecer ou anoitecer, ou com o céu nublado. Portanto, o uso do filtro azul deve ser avaliado em função das condições nas quais as FHDs foram obtidas, pois pode variar de acordo com os estágios de regeneração florestal, as condições meteorológicas e os equipamentos usados.

Os efeitos das interações entre Estágio sucessional e pré-processamento

O regime de luz no sub-bosque florestal muda conforme a composição de espécies dos diferentes estratos, a densidade e estrutura das árvores da floresta, como também conforme as condições meteorológicas e o ângulo solar (Lima and Gandolfi, 2009; Reis et al., 2021; Rocha-Santos et al., 2016; Ross et al., 1986). Nossos resultados revelam que diferentes estratégias de

pré-processamento que podem ser usadas a depender do estágio de sucessão florestal e aumentar a exatidão durante a etapa de processamento das imagens e a extração das variáveis de atributos de dossel. O pré-processamento se mostrou eficiente para solucionar o ponto mais crítico do uso das FHds que seria a separação adequada dos pixels de vegetação e céu (Nobis and Hunziker, 2005), mas não se mostrou necessária para estágios iniciais de sucessão. Uma vez que, devido ao contexto de exposição em que as FHds são obtidas e a complexidade da estrutura de dossel, a extração de variáveis de atributos de dossel derivadas das FHds podem diferir substancialmente (Pueschel et al., 2012; Zhang et al., 2005). Em S1 não houve diferença em usar as técnicas de pré-processamento para extrair variáveis de CO e T. Isso ocorreu, pois, nesses locais as FHds apresentaram uma grande área homogênea de céu no hemisfério zenital, sendo que apenas nas periferias da imagem houve vegetação contínua. Nesse caso, somente a binarização da imagem foi suficiente para classificar os pixels com precisão (Glatthorn and Beckschäfer, 2014; Nobis and Hunziker, 2005).

Considerações finais

Os sensores das câmeras são sensíveis a exposição à luz e há muitas etapas que podem se tornar fontes de erros até a extração das variáveis descritoras de atributos de dossel. Assim, esse estudo mostrou que o pré-processamento pode corrigir parcialmente possíveis erros, principalmente aqueles originados a partir da aquisição das fotografias digitais no campo. Devido às diferenças na estrutura do dossel encontradas em florestas com diferentes estágios sucessionais os procedimentos de pré-processamento constataram diferenças para os cálculos das variáveis descritoras de atributos do dossel. O filtro *sharpen* está associado ao melhoramento da nitidez da imagem e na notificação de pequenas clareiras, as quais, antes do pré-processamento, haviam sido classificadas erroneamente como vegetação. Portanto,

recomenda-se que o filtro *sharpen* seja usado em estágios sucessionais avançados e intermediários, onde há uma maior complexidade estrutural do dossel, e, conseqüentemente uma maior quantidade de pixels mistos que devem ser reclassificados. Já no caso do canal azul, não ficou claro o seu efeito isolado diante dos estágios sucessionais mais avançados e intermediários de sucessão. Porém, o uso do canal azul, quando usado em conjunto ao filtro *sharpen*, pode resultar na otimização e no aumento da precisão do processamento das imagens em determinados contextos de sucessão ecológica. Logo, nossa segunda hipótese foi parcialmente aceita, pois não necessariamente houve um ganho de precisão nos cálculos das variáveis descritoras de atributos do dossel a partir do uso do canal azul isolado, mas sim em conjunto ao filtro *sharpen*. Percebemos que existe a necessidade de mais estudos para comparar os canais de cores, como também o vermelho e o verde, sobretudo para entendermos melhor os efeitos desses canais de cores em aspectos meteorológicos diferentes. Portanto, recomendamos utilizar o canal azul em locais onde as condições meteorológicas foram apropriadas para o seu uso, ou seja, quando as fotografias foram obtidas pouco antes do nascer ou do pôr do sol, ou sob céu nublado, para obter o melhor contraste e evitar vieses de exposição. Em contrapartida, o pré-processamento não é necessário em estágios sucessionais iniciais, como no caso de pastagens em regeneração, e o usuário pode pular essa etapa durante o fluxo de trabalho digital e otimizar todo o processo de obtenção das variáveis de atributos de dossel.

Referências

- Abràmoff, M.D., Magalhães, P.J., Ram, S.J., 2004. Image processing with imageJ. *Biophotonics Int.* 11, 36–41. <https://doi.org/10.1201/9781420005615.ax4>
- Andis, A.Z., 2018. Taking hemispherical canopy photos [online] [WWW Document]. <https://www.azandisresearch.com>.
- Angelini, A., Corona, P., Chianucci, F., Portoghesi, L., 2015. Structural attributes of stand overstory and light under the canopy. *Ann. Silv. Res.* 39, 23–31.

<https://doi.org/10.12899/ASR-993>

- Beckschäfer, P., Seidel, D., Kleinn, C., Xu, J., 2013. On the exposure of hemispherical photographs in forests. *IForest* 6, 228–237. <https://doi.org/10.3832/ifor0957-006>
- Bertin, S., Palmroth, S., Kim, H.S., Perks, M.P., Mencuccini, M., Oren, R., 2011. Modelling understorey light for seedling regeneration in continuous cover forestry canopies. *Forestry* 84, 397–409. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpr026>
- Brokaw, N.V., 1982. The Definition of Treefall Gap and Its Effect on Measures of Forest Dynamics. *Source: Biotropica* 14, 158–160. <https://doi.org/10.2307/2387750>
- Brusa, A., Bunker, D.E., 2014. Increasing the precision of canopy closure estimates from hemispherical photography: Blue channel analysis and under-exposure. *Agric. For. Meteorol.* 195–196, 102–107. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.05.001>
- Canham, C.D., Denslow, J.S., Platt, W.J., Runkle, J., Spies, T.A., White, P.S., 1990. Light regimes beneath closed canopies and tree-fall gaps in temperate and tropical forests. *Can. J. For. Res.* 5, 1–12. <https://doi.org/https://doi.org/10.1139/x90-084>
- Cerqueira, A.F., Souza, A., Oliveira, C. De, Santos, G., Oliveira, D., Sousa, C., Schilling, A.C., Santos, M.S., Dalmolin Carla, A., Gaiotto, F.A., Mielke, M.S., 2022. Landscape conservation and maternal environment affect genetic diversity and the physiological responses of *Euterpe edulis* (Arecaceae) progenies to light availability. *Environ. Exp. Bot.* 194.
- Chazdon, R.L., Fetcher, N., 1984. Photosynthetic Light Environments in a Lowland Tropical Rain Forest in Costa Rica. *J. Ecol.* 72, 553–564.
- Chazdon, R.L., Pearcy, R.W., 1986. Photosynthetic responses to light variation in rainforest species. *Oecologia* 69, 524–531. <https://doi.org/10.1007/BF00410358>
- Chen, J.M., Govind, A., Sonnentag, O., Zhang, Y., Barr, A., Amiro, B., 2006. Leaf area index measurements at Fluxnet-Canada forest sites. *Agric. For. Meteorol.* 140, 257–268. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.08.005>
- Chianucci, F., 2020. An overview of in situ digital canopy photography in forestry. *Can. J. For. Res.* 50, 227–242. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0055>
- Chianucci, F., Cutini, A., 2012. Digital hemispherical photography for estimating forest canopy properties: Current controversies and opportunities. *IForest.* <https://doi.org/10.3832/ifor0775-005>
- Clearwater, M.J., Nifinluri, T., Van Gardingen, P.R., 1999. Forest fire smoke and a test of hemispherical photography for predicting understorey light in Bornean tropical rain forest. *Agric. For. Meteorol.* 97, 129–139. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00058-1](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00058-1)

- Conover, W.J., 2012. The rank transformation-an easy and intuitive way to connect many nonparametric methods to their parametric counterparts for seamless teaching introductory statistics courses. *Wiley Interdiscip. Rev. Comput. Stat.* 4, 432–438. <https://doi.org/10.1002/wics.1216>
- DiCarlo, J.M., Wandell, B.A., 2000. Rendering high dynamic range images. *Sensors Camera Syst. Sci. Ind. Digit. Photogr. Appl.* 3965, 392. <https://doi.org/10.1117/12.385456>
- Durand, M., Stangl, Z.R., Salmon, Y., Burgess, A.J., Murchie, E.H., Robson, T.M., 2022. Sunflecks in the upper canopy: dynamics of light-use efficiency in sun and shade leaves of *Fagus sylvatica*. *New Phytol.* <https://doi.org/10.1111/nph.18222>
- Eliáš, P., 2014. Sunflecks in forest communities and their importance for plant life in a forest understorey, in: *Mendel and Bioclimatology*. Nitra, pp. 62–70.
- Elkin, L.A., Kay, M., Higgins, J.J., Wobbrock, J.O., 2021. An Aligned Rank Transform Procedure for Multifactor Contrast Tests. *UIST 2021 - Proc. 34th Annu. ACM Symp. User Interface Softw. Technol.* 754–768. <https://doi.org/10.1145/3472749.3474784>
- Ellsworth, D.S., Reich, P.B., 1996. Photosynthesis and leaf nitrogen in five Amazonian tree species during early secondary succession. *Ecology* 77, 581–594.
- Esteso-Martínez, J., Peguero-Pina, J.J., Valladares, F., Morales, F., Gil-Pelegrín, E., 2010. Self-shading in cork oak seedlings: Functional implications in heterogeneous light environments. *Acta Oecologica* 36, 423–430. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2010.04.003>
- Ferreira, T., Rasband, W., 2012. *ImageJ User Guide* User Guide ImageJ. *Image J user Guid.* 1.46r. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2019>
- Finzi, A.C., Canham, C.D., 2000. Sapling growth in response to light and nitrogen availability in a southern New England forest. *For. Ecol. Manage.* 131, 153–165. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00206-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00206-6)
- Fournier, R.A., Hall, R.J., 2017. *Hemispherical Photography in Forest Science: Theory, Methods, Applications*, Centre d'. ed. Springer Science, Canada. <https://doi.org/10.1007/978-94-024-1098-3> ISSN
- Frazer, G., Trofynow, J., Lertzman, K., 1997. A method for estimating canopy openness, effective leaf area index, and photosynthetically active photon flux density using hemispherical photography and computerized image analysis techniques.
- Frazer, G.W., 1999. *Gap Light Analyzer (GLA)*.
- Frazer, G.W., Fournier, R.A., Trofymow, J.A., Hall, R.J., 2001. A comparison of digital and film fisheye photography for analysis of forest canopy structure and gap light transmission. *Agric. For. Meteorol.* 1923. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(01\)00274-X](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(01)00274-X)
- Glatthorn, J., Beckschäfer, P., 2014. Standardizing the protocol for hemispherical photographs: Accuracy assessment of binarization algorithms. *PLoS One* 9, 1–19.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111924>

- Gonsamo, A., Petra, D., Pellikka, P., 2013. Measuring fractional forest canopy element cover and openness – definitions and methodologies revisited. *Oikos* 122 (9), 1–9. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2013.00369.x>
- Gonsamo, A., Walter, J.M.N., Pellikka, P., 2011. CIMES: A package of programs for determining canopy geometry and solar radiation regimes through hemispherical photographs. *Comput. Electron. Agric.* 79, 207–215. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.10.001>
- Gonzalez, R., Woods, R.E., 2008. *Digital image processing*, 3rd ed. Upper Saddle River, NJ.
- Hardy, J.P., Melloh, R., Koenig, G., Marks, D., Winstal, A., Pomeroy, J., Link, T., 2004. Solar radiation transmission through conifer canopies. *Agric. For. Meteorol.* 126, 257–270. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2004.06.012>
- Jonckheere, I., Nackaerts, K., Muys, B., Coppin, P., 2005. Assessment of automatic gap fraction estimation of forests from digital hemispherical photography. *Agric. For. Meteorol.* 132, 96–114. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.06.003>
- Jonckheere, I., Nackaerts, K., Muys, B., van Aardt, J., Coppin, P., 2006. A fractal dimension-based modelling approach for studying the effect of leaf distribution on LAI retrieval in forest canopies. *Ecol. Modell.* 197, 179–195. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.02.036>
- Kabakoff, R.P., Chazdon, R.L., 1996. Effects of canopy species dominance on understory light availability in tropical secondary rain forest. *J. Trop. Ecol.* 12, 779–788.
- Kirby, J., Chapman, L., Chapman, V., 2018. Assessing the Raspberry Pi as a low-cost alternative for acquisition of near infrared hemispherical digital imagery. *Agric. For. Meteorol.* 259, 232–239. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.05.004>
- Landini, G., Randell, D.A., Fouad, S., Galton, A., 2017. Automatic thresholding from the gradients of region boundaries. *J. Microsc.* 265, 185–195. <https://doi.org/10.1111/jmi.12474>
- Lariguet, P., Dunand, C., 2005. Plant photoreceptors: Phylogenetic overview. *J. Mol. Evol.* 61, 559–569. <https://doi.org/10.1007/s00239-004-0294-2>
- Leblanc, S.G., 2008. *DHP-TRACWin Manual*, Version 1.0. 3.
- Leblanc, S.G., Chen, J.M., Fernandes, R., Deering, D.W., Conley, A., 2005. Methodology comparison for canopy structure parameters extraction from digital hemispherical photography in boreal forests. *Agric. For. Meteorol.* 129, 187–207. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2004.09.006>
- Leys, C., Schumann, S., 2010. A nonparametric method to analyze interactions: The adjusted rank transform test. *J. Exp. Soc. Psychol.* 46, 684–688.

<https://doi.org/10.1016/j.jesp.2010.02.007>

Lieffers, V.J., Messier, C., Stadt, K.J., Gendron, F., Comeau, P.G., 1999. Predicting and managing light in the understory of boreal forests. *Can. J. For. Res.* 29, 796–811. <https://doi.org/10.1139/x98-165>

Macfarlane, C., 2011. Classification method of mixed pixels does not affect canopy metrics from digital images of forest overstorey. *Agric. For. Meteorol.* 151, 833–840. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.01.019>

Macfarlane, C., Arndt, S.K., Livesley, S.J., Edgar, A.C., White, D.A., Adams, M.A., Eamus, D., 2007. Estimation of leaf area index in eucalypt forest with vertical foliage, using cover and fullframe fisheye photography. *For. Ecol. Manage.* 242, 756–763. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.02.021>

Macfarlane, C., Ryu, Y., Ogden, G.N., Sonnentag, O., 2014. Digital canopy photography: Exposed and in the raw. *Agric. For. Meteorol.* 197, 244–253. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.05.014>

Mathur, S., Jain, L., Jajoo, A., 2018. Photosynthetic efficiency in sun and shade plants. *Photosynthetica* 56, 354–365. <https://doi.org/10.1007/s11099-018-0767-y>

Monsi, M., Saeki, T., 1953. The light factor in plant communities and its significance for dry matter production. *Japanese J. Bot.* 14, 22–52.

Montgomery, R.A., Chazdon, R.L., 2001. Forest structure, canopy architecture, and light transmittance in tropical wet forests. *Ecology* 82, 2707–2718. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2001\)082\[2707:FSCAAL\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2001)082[2707:FSCAAL]2.0.CO;2)

Muscolo, A., Bagnato, S., Sidari, M., Mercurio, R., 2014. A review of the roles of forest canopy gaps. *J. For. Res.* 25, 725–736. <https://doi.org/10.1007/s11676-014-0521-7>

Nicotra, A.B., Chazdon, R.L., Iriarte, S.V.B., 1999. Spatial heterogeneity of light and woody seedling regeneration in tropical wet forests. *Ecology* 80, 1908–1926. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(1999\)080\[1908:SHOLAW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(1999)080[1908:SHOLAW]2.0.CO;2)

Piotto, D., Montagni, F., Thomas, W., Ashton, M., Oliver, C., 2009. Forest recovery after swidden cultivation across a 40-year chronosequence in the Atlantic forest of southern Bahia, Brazil. *Plant Ecol.* 205, 261–272. <https://doi.org/10.1007/s11258-009-9615-2>

R Core Team, 2015. R: a Language and Environment for Statistical Computing.

Reis, I.P., Rocha-Santos, L., Leal, A., Faria, D., Mielke, M.S., 2021. Landscape forest loss changes sunfleck dynamics in forest fragments of southern Bahia, Brazil. *J. Trop. Ecol.* 37, 64–71. <https://doi.org/10.1017/S0266467421000110>

Rich, P.M., 1990. Characterizing Plant Canopies with Hemispherical Photographs. *Remote*

Sens. Rev. 5, 37–41.

Rich, P.M., 1989. A manual for analysis of hemispherical canopy photography.

Rocha-Santos, L., Pessoa, M.S., Cassano, C.R., Talora, D.C., Orihuela, R.L.L., Mariano-Neto, E., Morante-Filho, J.C., Faria, D., Cazetta, E., 2016. The shrinkage of a forest: Landscape-scale deforestation leading to overall changes in local forest structure. *Biol. Conserv.* 196, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.01.028>

Schwalbe, E., Maasa, H., 2005. Profile based sub-pixel-classification of hemispherical images for solar radiation analysis in forest ecosystems. *Comm. VII* 1–6.

Smith, W.K., Berry, Z.C., 2013. Sunflecks? *Tree Physiol.* 33, 233–237. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpt005> Commentary

Smith, W.K., Knapp, A.K., Reiners, W.A., 1989. Penumbral effects on sunlight penetration in plant communities. *Ecology* 70, 1603–1609. <https://doi.org/10.2307/1938093>

Song, G.Z.M., Chao, K.J., Doley, D., Yates, D., 2018. Sky-canopy border length, exposure and thresholding influence accuracy of hemispherical photography for complex plant canopies. *Bot. Stud.* 59. <https://doi.org/10.1186/s40529-018-0235-9>

Sonnentag, O., Hufkens, K., Teshera-Sterne, C., Young, A.M., Friedl, M., Braswell, B.H., Milliman, T., O’Keefe, J., Richardson, A.D., 2012. Digital repeat photography for phenological research in forest ecosystems. *Agric. For. Meteorol.* 152, 159–177. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.09.009>

Thomas, W.W.W.W., 2003. Natural vegetation types in Southern Bahia. *New York Bot. Gard.* 111 1–4. <https://doi.org/10.3900/fpj.4.2.97.p>

Way, D.A., Pearcy, R.W., 2012. Sunflecks in trees and forests: From photosynthetic physiology to global change biology. *Tree Physiol.* 32, 1066–1081. <https://doi.org/10.1093/treephys/tps064>

Weiss, M., Baret, F., Smith, G.J., Jonckheere, I., Coppin, P., 2004. Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agric. For. Meteorol.* 121, 37–53. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.08.001>

Wobbrock, J.O., Findlater, L., Gergle, D., Higgins, J.J., 2011. The aligned rank transform for nonparametric factorial analyses using only ANOVA procedures, in: *Proceedings of the ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '11)*. New York: ACM Press, Vancouver, British Columbia, pp. 143–146.

Zhang, Y., Chen, J.M., Miller, J.R., 2005. Determining digital hemispherical photograph exposure for leaf area index estimation. *Agric. For. Meteorol.* 133, 166–181. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.09.009>

CAPÍTULO 3

Dynamics Light exposure and establishment of an endangered palm tree in the understory of forest fragments in the Atlantic Forest

Article prepared for submission to Journal for Nature Conservation (A2, IF 2.575).



Dynamics Light exposure and establishment of an endangered palm tree in the understory of forest fragments in the Atlantic Forest

Igor Pires Reis^{a*}, Larissa Rocha-Santos^a, Elisa Sodré Oliveira^a, Amanda Freitas Cerqueira^a, Marcelo Schramm Mielke^a

^a Laboratório de Ecologia Aplicada, Universidade Estadual de Santa Cruz, Rodovia Jorge Amado, km 16, Ilhéus, BA, Brasil

* Corresponding author (ipreis@uesc.br)

RESUMO

Métodos indiretos, como as Fotografias Hemisféricas Digitais (FHds), têm sido utilizados para quantificar os atributos de dossel e a disponibilidade de luz que chega ao sub-bosque florestal, principalmente em paisagens desmatadas. Estimativas pontuais da radia o solar disponível no sub-bosque, ignorando sua varia o temporal, não fornecem informaçoes suficientes do regime de luz do sub-bosque. A partir disso, houve a necessidade de criar métricas dinâmicas de radia o solar direta em diferentes categorias temporais, do mais longo - clearings (> 120 min) ao mais curto - sunflecks (< 8 min). Em locais desmatados, há grandes clareiras que possibilitam a radia o solar direta de tempos predominantemente maiores no sub-bosque florestal que podem influenciar o estabelecimento e a distribui o *Eutepe edulis* Mart. em estágios ontogenéticos iniciais. Portanto, buscamos entender, qual   a dura o do tempo de exposi o   radia o solar que teve maior contribui o para o estabelecimento de indivíduos jovens de *E. edulis* no sub-bosque em fragmentos florestais da Mata Atlântica. O estudo foi realizado num bioma de Mata Atlântica no extremo sul da Bahia, Brasil. Para o estudo, selecionamos 15 fragmentos florestais ao longo de um gradiente de cobertura florestal em escala de paisagem (entre 16-97%). No topo de 10-20 indivíduos de *E. edulis* em cada fragmento, foram feitas FHds usando uma câmera equipada com uma lente olho de peixe hemisférica. Também foram feitas 10 FHds no centro de cada fragmento, independentemente da presença de indivíduos jovens de *E. edulis*. Para análise estatística, foi feita uma ANOVA de Blocos Casualizados. Assim, foi possível observar que as variáveis dinâmicas de *sunflecks* e *sunpatches* foram predominantes, tanto nos locais onde se encontravam os indivíduos jovens de *E. edulis*, como para a média de cada fragmento. Além disso, não foram encontrados *clearings* e *sungaps*. Em compara o com as m dias dos fragmentos existe uma maior ocorrência de *sunflecks* em rela o aos *sunpatches* nos locais onde os indivíduos jovens de *E. edulis* encontram-se regenerando naturalmente. Esses resultados demonstram a utilidade da separa o dos passos de tempo de exposi o da radia o solar no sub-bosque para estudos de autoecologia de espécies que regeneram naturalmente nos ambientes mais sombreados em ecossistemas florestais.

Palavras-chave: *Fotografias hemisféricas digitais; radiação solar dinâmica; atributos de dossel; Euterpe edulis Mart.; estabelecimento; distribuição*

Introdução

A Floresta Atlântica apresenta a vegetação original reduzida a pequenos fragmentos florestais circundados por uma matriz antropizada (Cardoso-Leite et al., 2022). Isso é consequência da rápida expansão das atividades humanas que diminuíram a cobertura vegetal em pequenas manchas remanescentes e às incorporaram em paisagens compostas predominantemente por pastagens, áreas agrícolas e urbanas (Oliveira et al., 2004). O desmatamento e a perda de habitat podem desencadear modificações locais e estruturais nos fragmentos remanescentes. Normalmente, a estrutura do dossel em fragmentos imersos em paisagens altamente degradada é constituída por árvores esparsadas, curtas e finas com um dossel aberto (Rocha-Santos et al., 2016). Isso tem influência direta na densidade da vegetação em estratos superiores, que exercem um filtro ambiental natural da radiação solar que chega no sub-bosque da floresta (Reis et al., 2021). Em fragmentos de Floresta Atlântica inseridos em paisagens desmatadas foi observada maior incidência de radiação solar com intervalos de tempos maiores em estratos inferiores da floresta (Reis et al., 2021). Isso ocorre, pois, grandes clareiras possibilitam a frequência de transmissão direta de luz de tempos predominantemente maiores no sub-bosque florestal (Barton et al., 1989; Chazdon & Fetcher, 1984; Reis et al., 2021).

Métodos diretos e indiretos, com diferentes níveis de complexidade, custo, tempo e mão de obra têm sido utilizados para quantificar os atributos de dossel e a disponibilidade de luz que chega ao sub-bosque florestal (Arietta, 2021; Beeles et al., 2022; Comeau et al., 1998; Gonsamo et al., 2013). Entre os métodos indiretos está a Fotografia Hemisférica Digital (FHds), no qual uma câmera digital com a uma lente grande angular, proporcionando uma visão completa de

todas as direções do céu (Fournier & Hall, 2017; Rich, 1990; Weiss et al., 2004). Diferentes variáveis relacionadas com a estrutura do dossel florestal podem ser obtidas por meio de FHDs, como o índice de área foliar (IAF), a abertura do dossel (CO) e a radiação solar indireta e direta que chega no sub-bosque florestal em diferentes passos de tempo (Chianucci, 2020; Hederová et al., 2023; Reis et al., 2021; Smith & Berry, 2013). Desse modo, a FHDs é um método prático, barato e acessível que permite obter informações sobre a dinâmica da disponibilidade de luz disponível no sub-bosque florestal.

A CO é uma variável quantitativa indicada para descrever a biodiversidade da floresta, o regime da radiação solar e o microclima do sub-bosque (Hederová et al., 2023). Essa variável representa a proporção de todo o hemisfério do céu que não é obstruída pela vegetação quando vista de um único ponto abaixo do dossel da floresta (Frazer et al., 1997; Jennings, 1999). Além disso, outros estudos mediram a transmissão de luz (T) que é a soma da radiação solar direta e difusa transmitida pelo dossel (Cerqueira et al., 2021). Contextualizando, locais severamente degradados prevalecem árvores mais esparsas, ou seja, possuem grandes valores de CO, e altos níveis de T (Benchimol et al., 2016; Leal et al., 2021; Pinheiro et al., 2013; Rocha-Santos et al., 2016). Ambas as variáveis são estimadas com base na soma da radiação solar direta e difusa que é transmitida e chega ao sub-bosque, sendo considerada estimativas estáticas que não levam em consideração o percurso do sol e as condições meteorológicas, e por conta disso apresentam alta correlação (Cerqueira et al., 2021). No entanto, estimativas pontuais (estáticas) da radiação solar disponível no sub-bosque, ignorando sua variação temporal, não fornecem informações suficientes do regime de luz do sub-bosque (Yamada et al., 2014). Com isso, houve a necessidade de criar métricas dinâmicas de radiação solar direta, principalmente devido a estrutura irregular da vegetação do dossel, pelas condições meteorológicas e pelo percurso solar que incide de forma heterogênea em estratos inferiores da vegetação (Reis et al., 2021; Way & Percy, 2012a; Yamada et al., 2014). Assim, podemos separar o tempo de transmissão da luz

em diferentes categorias temporais, do mais longo - *clearings* (> 120 min) ao mais curto - *sunflecks* (< 8 min) (Plateros-Gastélum et al., 2018; Reis et al., 2021; Smith et al., 1989; Smith & Berry, 2013; Sukhova et al., 2020; Yamada et al., 2014). Essas estimativas de radiação direta predizem a intensidade com base na duração das manchas solares intermitentes e subsequentes que chegam ao sub-bosque e influenciam a fotossíntese de plantas regenerantes nesses locais (Reis et al., 2021; Way & Pearcy, 2012a).

Euterpe edulis Mart. (Arecaceae) é uma palmeira ameaçada de extinção que se estabelece preferencialmente sob o dossel da floresta fechada, tendendo a estar ausente em grandes clareiras (Benchimol et al., 2016; Cerqueira et al., 2021; Fauset et al., 2017; Gatti et al., 2011). É uma espécie de palmeira chave na estrutura dos ecossistemas florestais da Mata Atlântica, pois oferece uma grande abundância de frutos carnosos, sementes para diversas aves e mamíferos frugívoros (Castro et al., 2007; Leal et al., 2022). Ao longo de seu desenvolvimento, possui vários estágios ontogenéticos, sendo os iniciais os mais sensíveis ao regime de luz (Jordano, 2004; Leal et al., 2022). Por mais que os juvenis de *E. edulis* aclimatem a diferentes intensidades de luz, ainda preferem germinar no interior da floresta, ou seja, locais mais sombreados, pois há indícios que não conseguem lidar com altas intensidades de luz por muito tempo (Cerqueira et al., 2021; Freitas Cerqueira et al., 2022; Lavinsky et al., 2014). Dessa forma, considerando que as métricas definidas por Smith et al. (1989) e Smith & Berry (2013) são medidas confiáveis para estimar a dinâmica do regime de luz no sub-bosque, buscamos investigar a contribuição da duração do tempo de exposição à radiação solar (*sunflecks*, *sunpatches*, *sungaps* e *clearings*), calculados a partir de imagens digitais hemisféricas, para o estabelecimento de indivíduos de *E. edulis* no sub-bosque de fragmentos florestais imersos em um gradiente de cobertura florestal na paisagem. Especificamente, buscamos responder à pergunta: Qual a duração do tempo de exposição à radiação solar com maior contribuição para o estabelecimento de indivíduos jovens de *E. edulis* no sub-bosque de fragmentos florestais da

Mata Atlântica?

Metodologia

Área de estudo

O estudo foi realizado em fragmentos de Mata Atlântica localizados nos municípios de Una, Belmonte e Mascote no sul da Bahia, Brasil (15° 28'S e 39° 30'W). Os locais foram selecionados conforme o mapeamento das imagens de satélite de alta resolução (RapidEye de 2009 a 2010, QuickBird e World View de 2009 a 2011). O mapeamento foi realizado por meio da digitalização manual das características de cobertura do solo que foram interpretadas visualmente em uma escala de 1:10.000, que é adequada para identificar manchas com base em diferenças de cor, textura e forma. Juntamente com um processo de verificação das áreas em campo, essas imagens permitiram a elaboração de um mapa de uso do solo da região, e consequentemente, a identificação de 58 potenciais fragmentos florestais que tem uma distância de pelo menos 1 km entre si e aptos para acesso de campo. Esses fragmentos foram selecionados com base na quantidade de cobertura floresta nativa em escala de paisagem, em um raio de 1 km de buffer ou aproximadamente 13km² de áreas (Morante-filho et al., 2015; Reis et al., 2021). Esses fragmentos florestais foram circundados por diferentes tipos de matrizes, compostas principalmente por seringueira e *Eucalyptus sp.*, agroflorestas de cacau e/ou pastagens. Para este estudo, selecionamos 15 fragmentos florestais ao longo de um gradiente de cobertura florestal em escala de paisagem (isto é, 16-97% considerando raios de 1 km do centro de cada fragmento amostrado).

Amostras de plantas jovens

Em cada fragmento florestal, foi realizado uma busca ativa de 4 horas e amostrado todos os indivíduos jovens de *E. edulis* encontrados, mantendo uma distância mínima de 30 metros entre cada indivíduo amostrado. Dessa forma, foram amostrados 10-20 indivíduos por local, totalizando em 222 indivíduos considerando todos os fragmentos florestais levantados (média \pm desvio padrão = $14,8 \pm 5,9$ indivíduos por fragmento florestal). Só foram selecionados os indivíduos que não apresentaram sinais aparentes de ataque de patógenos (Cerqueira et al., 2021).

Durante o desenvolvimento da planta de *E. edulis* existem seis estágios ontogenéticos bem delimitados: Plântula, Juvenil I, Juvenil II, Imaturo I, Imaturo II e Adulto (Silva et al., 2009). Portanto, foi usado o ‘Juvenil I’, que compreende indivíduos com menos de 0,15 metros de altura e que possuem a inserção de duas a quatro folhas. Essa fase foi escolhida porque fase anterior de plântula, ainda apresenta reservas endospermicas, e isso influencia diretamente em sua capacidade de aclimação as variações ambientais. Ademais, indivíduos adultos da espécie podem resistir por mais tempo na paisagem, o que não condiz os ajustes finos temporais das variações ambientais, como por exemplo, o regime de luz e as suas consequências repentinas no microclima local onde o indivíduo se insere. Logo, espera-se que as plantas jovens sejam mais sensíveis ao estresse proveniente do microclima local quando comparadas com os adultos e isso reflita diretamente em seu estabelecimento (Reis et al., 2021; Rigueira et al., 2013).

Fotografias Hemisféricas Digitais (FHds)

No topo de cada indivíduo, foram feitas Fotografias Hemisféricas digitais usando uma câmera Nikon Coolpix 4300 equipada com uma lente olho de peixe hemisférica (180°) – FC-E8 com distância focal de 8mm. Para obter as imagens, foi utilizado um tripé de 1,5 metros e a lente foi nivelada com um nível de bolha comum. Além disso, foi marcado um ponto ao longo

do perímetro da lente para servir de referência ao norte magnético, que foi georreferenciado. Todas as fotografias foram tiradas usando configurações de exposição automática (auto exposição) como realizados em outros trabalhos (Finzi & Canham, 2000; Macfarlane et al., 2007). As configurações obtidas das imagens digitais fotográficas foram: Resolução de 2272 x 1704 pixels em formato JPEG; f.stop/2.8; tempo de exposição 1/34s e ISO 100. As fotografias hemisféricas foram tiradas em condições meteorológicas apropriadas, ou seja, pouco antes do nascer do sol, pouco antes do pôr do sol ou sob céu nublado, para obter o melhor contraste e evitar a superexposição (Brusa & Bunker, 2014). A fim de representar a média das condições de luz no sub-bosque dos fragmentos, no centro de cada fragmento foram demarcadas dez parcelas com 10 x 4 m para a obtenção de mais 10 FHds, independentemente da presença de indivíduos jovens de *E. edulis*.

As imagens digitais foram pré-processadas utilizando o freeware ImageJ (Abràmoff et al., 2004), e todo o processo foi automatizado para que haja repetibilidade. Para isso, foi utilizado a função “Macro Recorder” do ImageJ que fornece um gravador que pode registrar quaisquer ações executadas pelo usuário. Essas ações podem ser salvas como macros e executadas novamente em outras imagens. O gravador macro é uma ferramenta que pode ser usada para automatizar o pré-processamento em um grande número de imagens. Portanto foram usados os seguintes comandos: Plugins > Macros > Record. As técnicas de pré-processamento adotadas e gravadas foram: o filtro *sharpen* para aprimorar os limites entre os pixels que têm características espectrais diferentes, mas são mal focalizados. E além disso, utilizado o plug-in Auto Threshold v1.15, usando o comando Image > Adjust > Auto Threshold > Method > Minimum Algorithm para o processamento (Threshold) e binarização, que significa a separação dos pixels pretos (vegetação) e brancos (céu). As imagens foram então convertidas para 16 bits por canal e salvas como arquivo JPG, sendo que os comandos gravados geraram um script (Macro) e foi executada para um diretório de banco de imagens contendo todas as FHds feitas

em campo.

Estimativas da dinâmica de luz no sub-bosque

Os números de *sunflecks* (Sf), *sunpathes* (Sp), *sungaps* (Sg) e *clearings* (Cg) foram obtidos por meio do software Gap Light Analyzer – GLA (Frazer, 1999), de acordo com os procedimentos descritos em Estesó-Martínez et al. (2010) e Reis et al. (2021). O software extrai dados da estrutura do dossel com base em um dia de interesse específico pelo usuário. Portanto, os cálculos foram feitos para um total de 183 dias ao longo do ano, entre 21 de junho a 21 de dezembro, englobando os solstícios de inverno (menor duração do dia) e verão (maior duração do dia). O modelo de radiação simplificado dentro do GLA assume que quando a posição do sol é obstruída pelo dossel, a radiação direta é zero, e quando desobstruída, a radiação direta é igual ao valor acima do dossel. Logo, o feixe de radiação espalhada e refletido não são considerados (Canham et al., 1990; Frazer, 1999; Hardy et al., 2004; Reis et al., 2021). Primeiramente, foram registradas as imagens das FHds, já processadas na etapa anterior, e foi identificada a orientação geográfica. Foi utilizado o norte magnético como referência e estabelecidas coordenadas de declinação magnética para o local do estudo e a extensão circular da imagem hemisférica. Como todas as imagens digitais já se encontram binarizadas, foram calculados Sf, Sp, Sg e Cg utilizando a função ‘Plot Sunfleck Distribution’. A duração mínima dos Sf foi fixada em 1 min, sendo considerados Sf $1 < 8$ min, Sp $8 < 60$ min, Sg $60 < 120$ min e Cg > 120 min de acordo com a classificação de Smith & Berry (2013).

Análise de dados

Inicialmente foi analisada a distribuição de frequências de *sunflecks*, *sunpatches*,

sungaps e *clearings* considerando as FHDs obtidas logo acima dos indivíduos jovens de *E. edulis* (n = 222) e nas parcelas estabelecidas aleatoriamente nos fragmentos (n = 150). Após isso, foi utilizado o delineamento em blocos casualizados com dois tratamentos, ou seja, a média por fragmento das variáveis dinâmicas para as fotografias obtidas logo acima dos indivíduos de *E.edulis* (T1) e obtidas nas parcelas (T2). Os blocos foram considerados os fragmentos (n = 15). Para análise estatística, todas as variáveis foram submetidas aos pressupostos da ANOVA, e com isso apresentarem homoscedasticidade e normalidade. A homoscedasticidade das variâncias foi testada pelo método de Levene, seguida da normalidade via Shapiro-Wilk a 5% de probabilidade. Posteriormente, foram geradas tabelas de ANOVA para comparações, levando em conta o teste F, uma vez que foram considerados apenas dois tratamentos. Todas as análises foram feitas utilizando o programa estatístico R (R Core Team, 2015). Além disso, foi calculado a razão S_f/S_p para obter o efeito de *sunflecks* na fotossíntese das juvenis de *E. edulis*.

Resultados

Pela distribuição de frequências (Fig. 1) foi possível observar que as variáveis dinâmicas de *sunflecks* e *sunpatches* foram predominantes, tanto nos locais onde se encontravam os indivíduos jovens de *E. edulis* (T1), como para a média de cada fragmento (T2).

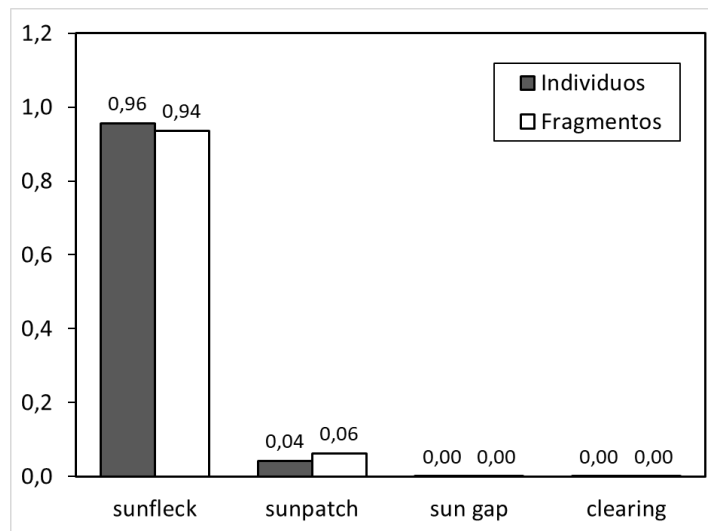


Fig. 1. A figura representa a distribuição de frequência com a média de *sunflecks*, *sunpatches*, *sun gaps* e *clearings* extraídos para indivíduos (T1) (n = 222) e para fragmentos (T2) (n=150). A média de T1 E T2 é a frequência absoluta, que é o número de vezes que um dado apareceu, que posteriormente foi dividido pelo total de dados obtidos, ou seja, a soma das quatro categorias das variáveis dinâmicas.

Além disso, a frequência de *sunflecks* foi muito superior à frequência de *sunpatches*, tanto onde se encontravam os indivíduos jovens de *E. edulis*, como para a média de cada fragmento. Assim, fica claro que nos fragmentos e nos locais onde se encontram os indivíduos jovens de *E. edulis* não foram encontrados *clearings* e *sungaps*.

Foram encontradas diferenças significativas entre os locais onde se encontravam os indivíduos jovens de *E. edulis* e a média das parcelas localizadas no interior dos mesmos fragmentos, apenas para *sunpatches* e para a razão Sf/Sp (Tabela 1).

Tabela 1

Sumário da ANOVA para a presença de *sunflecks* (Sf), *sunpatches* (Sp), *sungaps* (Sg) e *clearings* (Cg), e para a razão Sf/Sp para os locais onde se encontravam os indivíduos jovens de *E. edulis* e para as parcelas localizadas no interior dos mesmos fragmentos, independentemente da presença dos indivíduos jovens de *E. edulis*. (N=15)

Atributos de dossel	df	MS	F	P
a) <i>Sunflecks</i> (Sf)				
Blocks	14	186.1921	16.789	0.000
Treatments	1	32.756	0.295	0.595
Residuals	14	11.0898		
b) <i>Sunpatches</i> (Sp)				
Block	14	1.307	4.527	0.003
Treatments	1	14.419	4.527	0.000
Residuals	14	11.0898		
c) <i>Sungaps</i> (Sg)				
Block	14	30.406	8.147	0.000
Treatments	1	0.000	0.000	1.000
Residuals	14	3.732		
d) <i>Clearing</i>				
Block	14	0.3192	0.950	0.537
Treatments	1	0.3630	1.081	0.316
Residuals	14	0.3359		
e) <i>Sf/Sp</i>				
Block	14	65.09	7.772	0.000
Treatments	1	269.40	32.166	0.000
Residuals	14	8.38		

Os efeitos de blocos foram significativos para *sunflecks*, *sungaps*, *clearings* e para a razão Sf/Sp (Fig. 2).

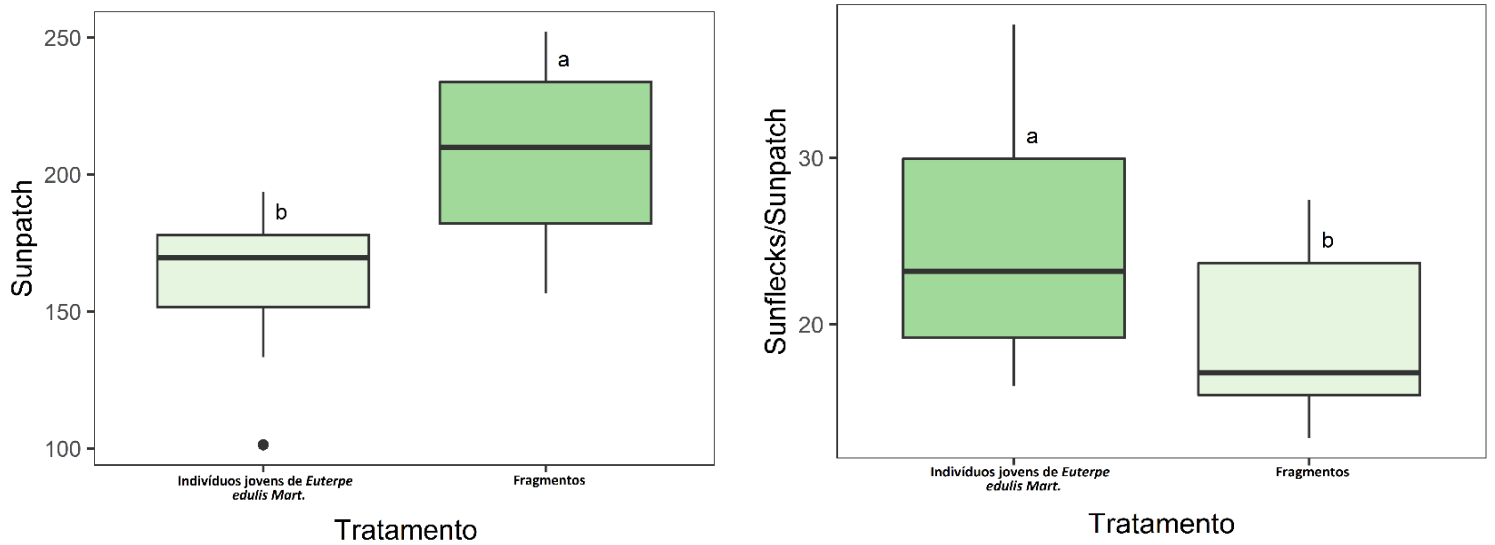


Fig. 2. Os Box-and-whisker mostram os percentis 0, 25, 50, 75 e 100 da distribuição com os valores médios de *sunpatches* (Sp) e para a razão de *sunflecks* (Sf) e *sunpatches* (Sf/Sp) extraídos de 15 Fragmentos com diferentes percentuais de cobertura florestal em escala de paisagem. Os tratamentos foram considerados a partir da obtenção de FHDs logo acima dos indivíduos jovens de *E. edulis* ($n = 222$) e a média dos fragmentos ($n = 150$). Os Box-and-whisker seguidos por letras diferentes diferem entre si pelo teste F da ANOVA.

Por outro lado, o fato de a média do número de *sunpatches* nas parcelas localizadas nos fragmentos ter sido significativamente superior em relação aos locais onde se encontravam os indivíduos jovens de *E. edulis*, são fortes indicativos de que essa espécie regenera, ou atinge o estágio Jovem I, preferencialmente nos locais mais sombreados dentro dos fragmentos.

Discussão

Nossos resultados permitiram contextualizar parâmetros relacionados à dinâmica de luz local para desvendar possíveis efeitos da perda de floresta na distribuição e abundância de plantas jovens de *E. Edulis* em locais severamente degradados. A metodologia usada para extrair estimativas de radiação solar dinâmica foi aplicada com praticidade, evidenciando quais

são os atributos do dossel da floresta mais proximais para influência da sobrevivência e estabelecimento de jovens de *E. Edulis*. Diferente do resultado de Leal et al. (2021), obtivemos respostas mais finas e precisas sobre o regime de luz no sub-bosque florestal, considerando como mecanismo proximal as condições do regime de luz em escala local, principalmente quando se trata da regeneração de uma espécie de palmeira tolerante à sombra. Reforçamos que a radiação solar dinâmica é um *proxy* melhor do regime de luz do sub-bosque do que outros atributos de dossel, como a transmissividade de luz (T) e a abertura de dossel (CO) (Reis et al. 2021). A abertura de dossel (CO) e a transmissividade de Luz (T) consistem em somar a quantidade de radiação solar que penetra em diferentes tamanhos de aberturas de dossel da floresta não levando em consideração que o regime de luz é essencialmente diferente em cada circunstância, pois a estrutura da vegetação do dossel é irregular, as condições meteorológicas são diferentes e o percurso solar incide de forma heterogênea em estratos inferiores da vegetação (Reis et al., 2021).

Nesse estudo encontramos resultados similares aos de Reis et al. (2021), onde a partir de 8 minutos houve uma relação de nível de significância cada vez maior das manchas solares dinâmicas conforme aumenta a perda de cobertura florestal em escala de paisagem, com ênfase tempos maiores que 60 minutos, o que já são considerados *sungaps* e *clearings*. Esses locais possuem grandes clareiras, ou seja, maiores aberturas de dossel conforme notificado por Cerqueira et al., (2021), e que estão relacionadas a durações de manchas solares mais longas e intensas (*sun gaps* e *clearings*) podendo limitar o recrutamento de espécies que se regeneram preferencialmente em ambientes sombreados. O aumento súbito da radiação solar disponível no sub-bosque, como consequência da formação de clareiras devido ao desmatamento, pode resultar em estresse nas plantas expostas ao ambiente recém-formado por serem espécies altamente tolerantes à sombra em estágios ontogenéticos iniciais, como o Jovem I (Cerqueira et al., 2022; Gatti et al., 2014; Leal et al., 2021).

Em locais com intensa radiação solar pode ocorrer a elevação da temperatura nas folhas, que tem efeitos indiretos do estresse hídrico em grupos sucessionais dependentes de sombra (Eliáš, 2014; Smith & Berry, 2013; Way & Pearcy, 2012b). Por exemplo, a alta radiação solar advinda de manchas solares de tempos maiores (*sunpatches*, *sun gaps* e *clearings*) reduz a disponibilidade de água no solo, contribuindo para o estresse hídrico na planta, eventualmente levando a sua morte (Valladares & Niinemets, 2008). De acordo com Gatti et al., (2014), as taxas de crescimento e sobrevivência das *E. edulis* em campo tende a diminuir sob alta radiação solar devido à baixa plasticidade fenotípica em relação às suas características hidráulicas, sugerindo que existe uma limitação e incapacidade do sistema hidráulico da folha quando a disponibilidade de radiação solar aumenta gerando, o déficit hídrico. Em outras espécies de palmeiras arborescentes, o caule atua como um reservatório de armazenamento de água, subsidiando as necessidades de recursos hídricos (Gomes & Prado, 2007; Holbrook & Sinclair, 1992). O caule de indivíduos jovens de *E. edulis* costuma ser incipiente, ou seja, não é volumoso e as plantas não possuem sistema radicular extenso, o que não permite o armazenamento de água, tornando-a suscetível ao estresse hídrico (Gatti et al., 2014). Geralmente, à medida que aumenta o CO₂, os indivíduos jovens de *E. edulis* possuem menor área foliar, o que é inversamente proporcional a massa foliar por área (Cerqueira et al. 2021). Logo, folhas mais grossas contêm maior quantidade de água por unidade de área foliar, evitando assim o superaquecimento da folha, e evita a fotoinibição da fotossíntese (Takenaka et al., 2001). Assim, a extensão da fotoinibição depende, em parte, do grau de aclimação das folhas a diferentes níveis de luz, dado que a *E. edulis* está ausente em locais com alto CO₂ (Cerqueira et al. 2021), sugerimos que os jovens de *E. Edulis* tem uma certa suscetibilidade à fotoinibição em locais severamente desmatados o que é determinante em sua distribuição local (Fournier et al., 2021; Lavinsky et al., 2014; Leal et al., 2021).

Pequenas clareiras estão relacionadas com a ocorrência de *sunflecks* que ajudam no

processo de indução fotossintética e a fotossíntese pós-iluminação que desempenham papel importante na fixação de carbono, estabelecimento e sobrevivência das plantas (Way & Pearcy, 2012a). O *sunfleck* inicial, ou seja, o primeiro que incide nas folhas corresponde ao seu estado de indução fotossintética, de modo que, uma vez “preparada” por um *sunfleck* inicial, as folhas são capazes de responder mais rapidamente aos outros que virão (Zipperlen & Press, 1997). Assim, numerosos episódios de *sunflecks* intermitentes e subsequentes maximizam a captação de luz pelas folhas, aumentando a performance do ganho líquido de carbono em plantas com maquinário fotossintético limitado a baixas taxas fotossintéticas, ou seja, as que vivem na sombra do sub-bosque (Krause et al., 2001; Way & Pearcy, 2012a). No nosso estudo, encontramos diferenças entre a razão *sunflecks/sunpatches* para indivíduos jovens de *E. Edulis* quando comparado aos fragmentos indicando que houve uma preferência da espécie por uma maior proporção de *sunflecks* do que *sunpatches*. Isso sugere que alguns tempos de *sunpatches* podem ser limitantes para a espécie. Conforme encontrado no trabalho de Reis et al. 2021, à medida que o CO aumenta em escala de paisagem, foi observado uma representação crescente de manchas solares dinâmicas de longa duração, maiores do que ≥ 32 min, o que já são considerados *sunpatches* ($8 > 60$ minutos). Com isso, houve uma mudança abrupta nas condições locais para o estabelecimento e sobrevivência das espécies mais tolerantes à sombra, como as jovens de *E. edulis*. Portanto, isso suporta, mais uma vez, como um mecanismo chave que prejudica o estabelecimento dessa espécie em locais severamente degradados (Benchimol et al., 2016). Assim, a capacidade de uma planta em responder à abertura de clareiras repentinas tem uma repercussão na sua capacidade de permanecer no sub-bosque florestal, pois o excesso de luz pode inviabilizar os processos fisiológicos nas células vegetais, incluindo danos ao seu aparato fotossintético, como também pode limitar a sobrevivência, o crescimento e o recrutamento de jovens de *E. edulis* vulneráveis e, portanto, alterar processos funcionais desempenhados pela espécie no ecossistema (Reis et al., 2021; Sukhova et al., 2020; Wen &

Cai, 2014).

Conclusão

Nos fragmentos e nos locais onde se encontram os indivíduos jovens de *E. edulis* não foram encontrados *clearings* e *sungaps*. Em comparação com as médias dos fragmentos existe uma maior ocorrência de *sunflecks* em relação aos *sunpatches* nos locais onde os indivíduos jovens de *E. edulis* encontram-se regenerando naturalmente. Esses resultados demonstram a utilidade da separação dos passos de tempo de exposição da radiação solar no sub-bosque para estudos de autoecologia de espécies que regeneram naturalmente nos ambientes mais sombreados em ecossistemas florestais.

Funding sources

Ms. Igor Pires Reis received support from FAPESB (Brazilian National Research Council)

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Data availability

Data will be made available on request.

Appendix A. Supplementary data

Referências

- Abràmoff, M. D., Magalhães, P. J., & Ram, S. J. (2004). Image processing with imageJ. *Biophotonics International*, 11(7), 36–41. <https://doi.org/10.1201/9781420005615.ax4>
- Arietta, A. Z. A. (2021). Estimation of forest canopy structure and understory light using spherical panorama images from smartphone photography. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 1–11. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpab034>
- Barton, A. M., Fetcher, N. E. D., & Redhead, S. (1989). The relationship between treefall gap size and light flux in a Neotropical rain forest in Costa Rica. *Journal of Tropical Ecology*, 5, 437–439. <https://doi.org/https://doi.org/10.1017/S0266467400003898>
- Beeles, K. L., Tourville, J. C., & Dovciak, M. (2022). Characterizing Canopy Openness Across Large Forested Landscapes Using Spherical Densimeter and Smartphone Hemispherical Photography. *Journal of Forestry*, 120(1), 37–50. <https://doi.org/https://doi.org/10.1093/jofore/fvab046>
- Benchimol, M., Talora, D. C., Mariano-neto, E., Oliveira, T. L. S., Leal, A., Mielke, M. S., & Faria, D. (2016). Forest Ecology and Management Losing our palms: The influence of landscape-scale deforestation on Arecaceae diversity in the Atlantic forest. *Forest Ecology and Management*, 384, 314–322. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2016.11.014>
- Brusa, A., & Bunker, D. E. (2014). Increasing the precision of canopy closure estimates from hemispherical photography: Blue channel analysis and under-exposure. *Agricultural and Forest Meteorology*, 195–196, 102–107. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.05.001>
- Canham, C. D., Denslow, J. S., Platt, W. J., Runkle, J., Spies, T. A., & White, P. S. (1990). Light regimes beneath closed canopies and tree-fall gaps in temperate and tropical forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 5(20), 1–12. <https://doi.org/https://doi.org/10.1139/x90-084>
- Cardoso-Leite, E., Arruda, E. M., Galvani, F. M., & Valente, R. A. (2022). Relationship between forest integrity, drainage headboards and patch-level metrics as subsidy for planning and conservation in fragmented Atlantic Forest areas. *Research, Society and Development*, 11(9), 1–13. <https://doi.org/https://doi.org/10.33448/rsd-v11i9.31744>
- Castro, E. R., Galetti, M., & Morellato, L. P. C. (2007). Reproductive phenology of *Euterpe edulis* (Arecaceae) along a gradient in the Atlantic rainforest of Brazil. *Australian Journal of Botany*, 55(7), 725–735. <https://doi.org/10.1071/BT07029>
- Cerqueira, Amanda F., Rocha-Santos, L., Benchimol, M., & Mielke, M. S. (2021). Habitat loss and canopy openness mediate leaf trait plasticity of an endangered palm in the Brazilian Atlantic Forest. *Oecologia*. <https://doi.org/10.1007/s00442-021-04879-x>
- Cerqueira, Amanda Freitas, Souza, A., Oliveira, C. De, Santos, G., Oliveira, D., Sousa, C., Schilling, A. C., Santos, M. S., Dalmolin Carla, A., Gaiotto, F. A., & Mielke, M. S. (2022). Landscape

conservation and maternal environment affect genetic diversity and the physiological responses of *Euterpe edulis* (Arecaceae) progenies to light availability. *Environmental and Experimental Botany*, 194, 104722.

Chazdon, R. L., & Fetcher, N. (1984). Photosynthetic Light Environments in a Lowland Tropical Rain Forest in Costa Rica. *Journal of Ecology*, 72(2), 553–564.

Chianucci, F. (2020). An overview of in situ digital canopy photography in forestry. *Canadian Journal of Forest Research*, 50(3), 227–242. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0055>

Comeau, P. G., Gendron, F., & Letchford, T. (1998). A comparison of several methods for estimating light under a paper birch mixedwood stand. *Canadian Journal of Forest Research*, 28(12), 1843–1850. <https://doi.org/10.1139/x98-159>

Eliáš, P. (2014). Sunflecks in forest communities and their importance for plant life in a forest understorey. *Mendel and Bioclimatology*, 62–70.

Esteso-Martínez, J., Peguero-Pina, J. J., Valladares, F., Morales, F., & Gil-Pelegrín, E. (2010). Self-shading in cork oak seedlings: Functional implications in heterogeneous light environments. *Acta Oecologica*, 36(4), 423–430. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2010.04.003>

Fauset, S., Gloor, M. U., Aidar, M. P. M., Freitas, H. C., Fyllas, N. M., Marabesi, M. A., Rochelle, A. L. C., Shenkin, A., Vieira, S. A., & Joly, C. A. (2017). Tropical forest light regimes in a human-modified landscape. *Ecosphere*, 8(11). <https://doi.org/10.1002/ecs2.2002>

Finzi, A. C., & Canham, C. D. (2000). Sapling growth in response to light and nitrogen availability in a southern New England forest. *Forest Ecology and Management*, 131(1–3), 153–165. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00206-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00206-6)

Fournier, A. R., Gosselin, A., Proctor, J. T. A., Gauthier, L., Khanizadeh, S., Dorais, M., Leal, A., Benchimol, M., Faria, D., Dodonov, P., Cazetta, E., Cerqueira, A. F., Rocha-Santos, L., Benchimol, M., Mielke, M. S., Leal, A., Benchimol, M., Costa, H. C. M., Faria, D., ... Herbert, A. (2021). Habitat loss and canopy openness mediate leaf trait plasticity of an endangered palm in the Brazilian Atlantic Forest. *Oecologia*, 502(December), 425–432. <https://doi.org/10.1007/s00442-021-04879-x>

Fournier, R. A., & Hall, R. J. (2017). *Hemispherical Photography in Forest Science: Theory, Methods, Applications* (R. J. Hall (ed.); Centre d'). Springer Science. <https://doi.org/10.1007/978-94-024-1098-3> ISSN

Frazer, G., Trofynow, J., & Lertzman, K. (1997). A method for estimating canopy openness, effective leaf area index, and photosynthetically active photon flux density using hemispherical photography and computerized image analysis techniques. 373, Victoria^eB. CBC: Pacific Forestry Centre.

Frazer, G. W. (1999). *Gap Light Analyzer (GLA). Users Manual and Program Documentation*, Version 2.0, 36.

- Gatti, M. Genoveva, Campanello, P. I., Villagra, M., Montti, L., & Goldstein, G. (2014). Hydraulic architecture and photoinhibition influence spatial distribution of the arborescent palm *Euterpe edulis* in subtropical forests. *Tree Physiology*, 34(6), 630–639. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpu039>
- Gatti, Maria Genoveva, Campanello, P. I., & Goldstein, G. (2011). Growth and leaf production in the tropical palm *Euterpe edulis*: Light conditions versus developmental constraints. *Flora: Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 206(8), 742–748. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2011.04.004>
- Gomes, F. P., & Prado, C. H. B. A. (2007). Ecophysiology of coconut palm under water stress. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 19(4), 377–391. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202007000400008>
- Gonsamo, A., Petra, D., & Pellikka, P. (2013). Measuring fractional forest canopy element cover and openness – definitions and methodologies revisited. *Oikos*, 122 (9)(April), 1–9. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2013.00369.x>
- Hardy, J. P., Melloh, R., Koenig, G., Marks, D., Winstral, A., Pomeroy, J. ., & Link, T. (2004). Solar radiation transmission through conifer canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 126, 257–270. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2004.06.012>
- Hederová, L., Macek, M., Wild, J., Br, J., Ka, V., Hederov, L., & Kopecký, M. (2023). Ecologically relevant canopy openness from hemispherical photographs. *Agricultural and Forest Meteorology*, 330(109308), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109308>
- Holbrook, N. M., & Sinclair, T. R. (1992). Water balance in the arborescent palm, *Sabal palmetto*. II. Transpiration and stem water storage. *Plant, Cell & Environment*, 15(4), 401–409. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1992.tb00990.x>
- Jennings, S. (1999). Assessing forest canopies and understorey illumination: canopy closure, canopy cover and other measures. *Forestry*, 72(1), 59–74. <https://doi.org/10.1093/forestry/72.1.59>
- Jordano, P. et al. (2004). Procesos de limitación demográfica. In F. Valladares (Ed.), *Ecología del Bosque Mediterráneo en un mundo cambiante* (pp. 229–248). Ministerio de Medio Ambiente de España.
- Krause, G. H., Koroleva, O. Y., Dalling, J. W., & Winter, K. (2001). Acclimation of tropical tree seedlings to excessive light in simulated tree-fall gaps. *Plant, Cell and Environment*, 24(12), 1345–1352. <https://doi.org/10.1046/j.0016-8025.2001.00786.x>
- Lavinsky, A. O., Gomes, F. P., Mielke, M. S., & França, S. (2014). Photosynthetic acclimation in shade-developed leaves of *Euterpe edulis* Mart (Arecaceae) after long-term exposure to high light. *Photosynthetica*, 52(3), 351–357. <https://doi.org/10.1007/s11099-014-0038-5>
- Leal, A., Benchimol, M., Costa, H. C. M., Faria, D., & Cazetta, E. (2022). Impacts of landscape-

scale forest loss and a dry event on the demographic structure of the endangered palm *Euterpe edulis* Mart. in the Atlantic Forest. *Frontiers in Forests and Global Change*, September, 1–11. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.909901>

Leal, A., Benchimol, M., Faria, D., Dodonov, P., & Cazetta, E. (2021). Landscape-scale forest loss shapes demographic structure of the threatened tropical palm *Euterpe edulis* mart. (Arecaceae). *Forest Ecology and Management*, 502(November 2020), 119716. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119716>

Macfarlane, C., Grigg, A., & Evangelista, C. (2007). Estimating forest leaf area using cover and fullframe fisheye photography: Thinking inside the circle. *Agricultural and Forest Meteorology*, 146(1–2), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.05.001>

Morante-filho, J. C., Faria, D., & Mariano-neto, E. (2015). Birds in Anthropogenic Landscapes: The Responses of Ecological Groups to Forest Loss in the Brazilian Atlantic Forest. *PLoS ONE*, 10(6), 1–18. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0128923>

Oliveira, M. A., Grillo, A. S., & Tabarelli, M. (2004). Forest edge in the Brazilian Atlantic forest: Drastic changes in tree species assemblages. *Oryx*, 38(4), 389–394. <https://doi.org/10.1017/S0030605304000754>

Pinheiro, M. P., Filho, J. A. de O., França, S., Amorim, A. M., & Mielke, M. S. (2013). Annual variation in canopy openness, air temperature and humidity in the understory of three forestEd sites in southern Bahia STATE, Brazil. *Ciência Florestal*, 23(1), 107–116.

Plateros-Gastélum, P. A., Reyes-Hernández, V. J., Velázquez-Martínez, A., Hernández-De La Rosa, P., & Campos-Ángeles, G. V. (2018). Understory light availability in stands of *Abies Religiosa*. *Madera Bosques*, 24(3), 1–21. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2431711>

R Core Team. (2015). *R: a Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>.

Reis, I. P., Rocha-Santos, L., Leal, A., Faria, D., & Mielke, M. S. (2021). Landscape forest loss changes sunfleck dynamics in forest fragments of southern Bahia, Brazil. *Journal of Tropical Ecology*, 37(2), 64–71. <https://doi.org/10.1017/S0266467421000110>

Rich, P. M. (1990). Characterizing Plant Canopies with Hemispherical Photographs. *Remote Sensing Reviews*, 5(November 2012), 37–41.

Rigueira, D. M. G., da Rocha, P. L. B., & Mariano-Neto, E. (2013). Forest cover, extinction thresholds and time lags in woody plants (Myrtaceae) in the Brazilian Atlantic Forest: Resources for conservation. *Biodiversity and Conservation*, 22(13–14), 3141–3163. <https://doi.org/10.1007/s10531-013-0575-4>

Rocha-Santos, L., Pessoa, M. S., Cassano, C. R., Talora, D. C., Orihuela, R. L. L., Mariano-Neto, E., Morante-Filho, J. C., Faria, D., & Cazetta, E. (2016). The shrinkage of a forest: Landscape-scale deforestation leading to overall changes in local forest structure. *Biological Conservation*,

196, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.01.028>

- Silva, M. das G. C. P. C., Martini, A. M. Z., & de Araújo, Q. R. (2009). Estrutura populacional de *Euterpe edulis* Mart. no Sul da Bahia, Brasil. *Revista Brasileira de Botânica*, 32(2), 393–403. <https://doi.org/10.1590/s0100-84042009000200017>
- Smith, W. K., Knapp, A. K., & Reiners, W. A. (1989). Penumbra effects on sunlight penetration in plant communities. *Ecology*, 70(6), 1603–1609. <https://doi.org/10.2307/1938093>
- Smith, William K., & Berry, Z. C. (2013). Sunflecks? *Tree Physiology*, 33(2012), 233–237. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpt005> Commentary
- Sukhova, E., Khlopkov, A., Vodeneev, V., & Sukhov, V. (2020). BBA - Bioenergetics Simulation of a nonphotochemical quenching in plant leaf under different light intensities. *BBA - Bioenergetics*, 1861(2), 148138. <https://doi.org/10.1016/j.bbabi.2019.148138>
- Takenaka, A., Takahashi, K., & Kohyama, T. (2001). Optimal Leaf Display and Biomass Partitioning for Efficient Light Capture in an Understorey Palm, *Licuala arbuscula*. *British Ecological Society*, 15(5), 660–668. <http://www.jstor.org/stable/826693>
- Valladares, Fernando, & Niinemets, Ü. (2008). Shade Tolerance, a Key Plant Feature of Complex Nature and Consequences. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 39(1), 237–257. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.39.110707.173506>
- Way, D. A., & Pearcy, R. W. (2012a). Sunflecks in trees and forests: From photosynthetic physiology to global change biology. *Tree Physiology*, 32(9), 1066–1081. <https://doi.org/10.1093/treephys/tps064>
- Way, D. A., & Pearcy, R. W. (2012b). Tree Physiology review Sunflecks in trees and forests: from photosynthetic physiology to global change biology. *Tree Physiology Review*, 1066–1081. <https://doi.org/10.1093/treephys/tps064>
- Weiss, M., Baret, F., Smith, G. J., Jonckheere, I., & Coppin, P. (2004). Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121(1–2), 37–53. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.08.001>
- Wen, B., & Cai, Y. (2014). Seed viability as a function of moisture and temperature in the recalcitrant rainforest species *Baccaurea ramiflora* (Euphorbiaceae). *Annals of Forest Science*, 71(8), 853–861. <https://doi.org/10.1007/s13595-014-0388-y>
- Yamada, T., Yoshioka, A., Hashim, M., Liang, N., & Okuda, T. (2014). Spatial and temporal variations in the light environment in a primary and selectively logged forest long after logging in Peninsular Malaysia. *Trees - Structure and Function*, 28(5), 1355–1365. <https://doi.org/10.1007/s00468-014-1040-z>
- Zipperlen, S. W., & Press, M. C. (1997). Photosynthetic induction and stomatal oscillations in

relation to the light environment of two dipterocarp rain forest tree species. *Journal of Ecology*, 85(4), 491–503. <https://doi.org/10.2307/2960572>

CONCLUSÃO GERAL

A metodologia da Fotografia Hemisférica digital (FHD) desenvolveram-se significativamente depois da descoberta da lente olho de peixe em conjunto as câmeras digitais possibilitando uma maior acessibilidade da comunidade científica. Dessa forma, ao longo dos últimos anos, foi o método mais usado para caracterizar o dossel da floresta e extrair seus atributos, principalmente devido a difusão tecnológica. Avanços recentes de softwares dedicados a diferentes etapas do método, em conjunto a sua automatização, facilitaram as etapas de processamento e análise das imagens digitais tornando a ferramenta adequada para medições e monitoramento das copas das árvores. Contudo, com a amplificação do método, é comum haver problemas associados, principalmente devido a falta de padronização nos protocolos de campo por não haver repetibilidade metodológica, como a falta de informação das condições meteorológicas e da exposição da câmera, aumentando sua imprecisão. Ressaltamos a necessidade de haver mais detalhes metodológicos para que o método seja replicado em futuras publicações.

Além disso, por meio dessa tese, adicionamos técnicas de pré-processamento em diferentes contextos de exposição fotográfica que visam uma maior precisão do processamento da imagem digital, ou seja, aumentamos por meio da nitidez da imagem (filtro *sharpen*) e o canal azul o reconhecimento das diferentes classes de pixels (céu e a vegetação). O filtro *sharpen* esta associado no melhoramento da nitidez da imagem e na notificação de pequenas clareiras. Logo, o filtro *sharpen* se mostrou útil principalmente em locais com maiores complexidades e densidades de pixels, ou seja, estágios sucessionais intermediários e avançados. Já no caso do canal azul, não ficou claro o seu efeito isolado diante dos estágios sucessionais mais avançados e intermediários de sucessão. Por isso, recomendamos usa-lo em condições metereológicas nublado ou difuso, pois os níveis de cinza dos pixels da folhagem são

mais homogêneos e mais escuros no canal azul. Métodos existentes de processamento de imagem é baseada em limiares de cor e é considerada de baixa precisão em situações complexas, assim por meio de algoritmos modernos automatizados e criados para este fim, extraímos com maior exatidão os diferentes atributos de dossel em diferentes estágios sucessionais e otimizamos todo o processo. Também vimos que em estágios sucessionais iniciais não há necessidade de utilizar técnicas de pré-processamento.

Ademais, foi possível caracterizar o habitat em que se encontram as jovens de *E. edulis Mart* por meio da separação dos passos de tempo de exposição da radiação solar no sub-bosque para estudos de autoecologia de espécies que regeneram naturalmente nos ambientes mais sombreados em ecossistemas florestais. Por meio dessa avaliação é possível escolher locais mais adequados para o plantio de *E. edulis*, que garantam a quantidade de luz necessário para a sua sobrevivência e estabelecimento. Também podemos implicar que o microclima do ambiente são fatores importantes para o desenvolvimento de *E. edulis*, pois essa espécie prefere locais com temperaturas amenas e umidade elevada. A exposição direta à radiação solar intensa, ou seja, de tempos maiores pode aumentar a temperatura e diminuir a umidade do ar, o que pode prejudicar e estressar o crescimento da planta.

Portanto, a metodologia das fotografias hemisféricas digitais se mostra uma técnica não invasiva e eficiente que avalia quantitativamente as condições de luz do sub-bosque e, assim, pode ajudar na conservação de plantas que dependem de níveis específicos de luz para sobreviver. Ao avaliar as condições de luz no sub-bosque por meio de FHds os pesquisadores podem identificar áreas onde a luz pode estar limitando o crescimento das plantas. Isso pode ajudar na seleção de áreas para restauração florestal, na definição de estratégias de manejo do sub-bosque e na identificação de áreas onde as espécies nativas e endêmicas podem estar em risco devido ao excesso de luz. Além disso, essa técnica também pode ser usada para avaliar os efeitos da fragmentação florestal, do efeito do *logging* e de outras pressões ambientais que

podem influenciar no regime de luz do sub-bosque e, portanto, na sobrevivência das plantas em estratos inferiores da floresta.