

NAYARA DONATTI SOARES

**DISCRIMINAÇÃO DE *IPOMOEA CAVALCANTEI*, *IPOMOEA MARABAENSIS* E
INDIVÍDUOS HÍBRIDOS POR MEIO DE TRAÇOS FOLIARES
MORFOFISIOLÓGICOS E HIPERESPECTRAIS NAS CANGAS DA SERRA DE
CARAJÁS (PA-BRASIL)**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Botânica, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Markus Gastauer
Coorientador: Diniz Carvalho de Arruda

VIÇOSA - MINAS GERAIS

2024

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S676d
2024 Soares, Nayara Donatti, 1998-
Discriminação de *Ipomoea cavalcantei*, *Ipomoea marabaensis* e indivíduos híbridos por meio de traços foliares morfofisiológicos e hiperespectrais nas cangas da Serra de Carajás (PA-Brasil) / Nayara Donatti Soares. – Viçosa, MG, 2024.

1 dissertação eletrônica (45 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Markus Gastauer.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Biologia Vegetal, 2024.

Referências bibliográficas: f. 37-45.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.188>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. *Ipomoea cavalcantei*. 2. *Ipomoea marabaensis*. 3. R eflexância espectral. 4. Cangas - Carajás, Serra dos (PA).
I. Gastauer, Markus, 1976-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Biologia Vegetal. Programa de Pós-Graduação em em Botânica. III. Título.

CDD 22. ed. 583.94

NAYARA DONATTI SOARES


**DISCRIMINAÇÃO DE *IPOMOEA CAVALCANTEI*, *IPOMOEA MARABAENSIS* E
INDIVÍDUOS HÍBRIDOS POR MEIO DE TRAÇOS FOLIARES
MORFOFISIOLÓGICOS E HIPERESPECTRAIS NAS CANGAS DA SERRA DE
CARAJÁS (PA-BRASIL)**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Botânica, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.


Orientador: Markus Gastauer
Coorientador: Diniz Carvalho de Arruda

APROVADA: 05 de março de 2024.

Assentimento:

Documento assinado digitalmente
 **NAYARA DONATTI SOARES**
Data: 12/03/2024 17:06:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Nayara Donatti Soares
Autora

Documento assinado digitalmente
 **MARKUS GASTAUER**
Data: 13/03/2024 18:56:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Markus Gastauer
Orientador

AGRADECIMENTOS

Agradeço especialmente ao meu orientador Markus Gastauer e ao meu coorientador Diniz Carvalho de Arruda pelos direcionamentos, pela confiança, apoio e atenção, os quais foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

À minha família, em especial, minha mãe, por sempre me apoiar em meus objetivos.

A todos colegas e amigos do Instituto Tecnológico Vale (ITV), principalmente, Adriana Becerra, Priscila Sanjuan, Thayná Karina, Daniela Boanares e Raquel Chiavegatto pelas conversas, pelos conselhos, por todo carinho e acolhimento.

A todos colegas e amigos do Laboratório de Ecologia e Evolução de Plantas (LEEP), em especial, Michellen Resende, pelos bons momentos, pela força e ajuda mútua ao longo desse período.

A todos os docentes do Programa de Pós-Graduação em Botânica da Universidade Federal de Viçosa pelos conhecimentos transmitidos.

Ao Instituto Tecnológico Vale (ITV) por ceder toda a estrutura e equipamentos necessários para execução desse projeto.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa concedida no âmbito do Programa de Pós-Graduação.

Aos membros da comissão examinadora pelas contribuições.

A todos que cruzaram meu caminho e, que de diferentes maneiras, contribuíram para o meu crescimento acadêmico e pessoal. Muito obrigada!

DONATTI, N. M.Sc, Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2024. **Discriminação de *Ipomoea cavalcantei*, *Ipomoea marabaensis* e indivíduos híbridos por meio de traços foliares morfofisiológicos e hiperespectrais nas cangas da Serra de Carajás (PA-Brasil).** Orientador: Markus Gastauer. Coorientador: Diniz Carvalho de Arruda.

RESUMO

As cangas da Serra dos Carajás (PA-Brasil) são savanas metalófitas compostas de uma vegetação predominantemente herbácea-arbustivas que crescem sob afloramentos de rochas ferruginosas. Essa vegetação abriga uma flora com alto número de espécies endêmicas e com adaptações a condições extremas. Devido a sua associação ao afloramento de minério de ferro, atividades do setor minerador geram uma grande vulnerabilidade a esses ecossistemas. Considerando a importância da conservação da biodiversidade das cangas, especialmente das espécies raras, ameaçadas e em perigo de extinção, e as limitações dos métodos convencionais de identificação taxonômica em campo, este estudo investiga a utilização de dados de reflectância hiperespectral foliar *in situ* para discriminação de *Ipomoea cavalcantei*, *Ipomoea marabaensis* e híbridos ocorrentes nas cangas de Carajás, Pará, Brasil. O uso de plataformas com sensores hiperespectrais possibilita o monitoramento populacional de espécies vegetais em larga escala, diminuindo o tempo de aquisição de dados, os custos de trabalhos em campo e os riscos operacionais associados ao acesso a áreas de mineração. Dessa forma, este estudo pretende fornecer dados que contribuam com o monitoramento das populações de *I. cavalcantei*, *I. marabaensis* e híbridos por meio do uso de tecnologias de sensoriamento remoto. São objetivos específicos: 1. Avaliar a separabilidade espectral das espécies e dos híbridos estudados; 2. Identificar as melhores bandas espectrais para diferenciação das espécies e híbridos; e 3. Definir características morfofisiológicas que explicam a variabilidade espectral encontrada. Os dados de reflectância foliar dos alvos foram registrados na faixa do espectro eletromagnético óptico entre 350 e 2500 nm através do espectrorradiômetro hiperespectral portátil FieldSpec® 4.0NP acoplado ao acessório Leaf Clip. Após a obtenção dos dados espectrais, das mesmas folhas foram mensuradas características morfológicas e

fisiológicas. O classificador Random Forest (RF) foi utilizado para avaliar a capacidade de separabilidade das classes estudadas. A seleção dos comprimentos de onda mais importantes para a separabilidade das classes foi calculada a partir do índice de Gini. Além disso, uma Análise de Redundância (RDA) das características morfológicas e fisiológicas foliares foi calculada para explicar a variabilidade espectral encontrada. Os resultados evidenciaram uma alta acurácia na separabilidade espectral de *I. cavalcantei* (0.84) e *I. marabaensis* (0.85). No entanto, a acurácia de classificação de híbridos foi inferior (0.47). As bandas espectrais 350 nm, 660 nm, 870 nm, 980 nm e 1240 nm foram mais importantes para a diferenciação espectral das classes analisadas. A variação na reflectância foliar encontrada foi explicada por parâmetros morfofisiológicos (largura, teor de água, nitrogênio, cálcio, ferro e fósforo). Os resultados alcançados neste estudo evidenciam a separabilidade de *I. cavalcantei* e *I. marabaensis* através de dados hiperespectrais de reflectância foliar. Por outro lado, os indivíduos híbridos não apresentaram uma boa discriminação, uma vez que esses indivíduos expressam fenótipos com características intermediárias de *I. cavalcantei* e *I. marabaensis*, a dificuldade na precisão de identificação poderia ser esperada. A abordagem aqui usada demonstra um grande potencial para o monitoramento das populações de *I. cavalcantei* e *I. marabaensis* nas Cangas de Carajás através de plataformas com sensores hiperespectrais.

Palavras-chave: Espectros de reflectância. Cangas. Ipomoeas.

DONATTI, N. M.Sc, Universidade Federal de Viçosa, February, 2024. **Discrimination of *Ipomoea cavalcantei*, *Ipomoea marabaensis* and hybrid individuals from the cangas of Serra de Carajás (PA-BRAZIL) by morphophysiological and hyperspectral leaf traits.** Adviser: Markus Gastauer. Co-advisers: Diniz Carvalho de Arruda.

ABSTRACT

The cangas of Serra dos Carajás (PA-Brazil) are metallophytic savannas composed predominantly of herbaceous-shrub vegetation that grows under outcrops of ferruginous rocks. This vegetation harbors a flora with a high number of endemic species adapted to extreme conditions. Due to their association with iron ore outcrops, mining activities generate significant vulnerability to these ecosystems. Considering the importance of conserving the biodiversity of the cangas, especially rare, threatened, endangered, and vulnerable species, and the limitations of conventional methods of taxonomic identification and species mapping in the field, this study investigates the use of in situ leaf hyperspectral reflectance data to discriminate *Ipomoea cavalcantei*, *Ipomoea marabaensis*, and hybrids occurring in the cangas of Carajás, Pará, Brazil. The use of platforms with hyperspectral sensors enables population monitoring of plant species on a large scale, reducing data acquisition time, fieldwork costs, and operational risks associated with access to mining areas. Thus, this study aims to provide data that contribute to the monitoring of populations of *I. cavalcantei*, *I. marabaensis*, and hybrids through the use of remote sensing technologies. Specific objectives are: 1. To assess the spectral separability of the studied species and hybrids; 2. To identify the best spectral bands for differentiation of species and hybrids; and 3. To define morphophysiological characteristics that explain the spectral variability found. Leaf reflectance data from the targets were recorded in the optical electromagnetic spectrum range between 350 and 2500 nm using the portable hyperspectral spectroradiometer FieldSpec® 4.0NP coupled with the Leaf Clip accessory. After obtaining spectral data, the same leaves were measured for morphological and physiological characteristics. The Random Forest (RF) classifier was used to assess the separability capability of the studied classes. The selection of the most important wavelengths for class

separability was calculated from the Gini index. Additionally, a Redundancy Analysis (RDA) of leaf morphological and physiological characteristics was calculated to explain the spectral variability found. The results showed high accuracy in the spectral separability of *I. cavalcantei* (0.84) and *I. marabaensis* (0.85). However, the classification accuracy of the hybrid class was lower (0.47). The spectral bands 350 nm, 660 nm, 870 nm, 980 nm, and 1240 nm were most important for spectral differentiation of the classes. Leaf reflectance variation was explained by morphophysiological parameters (width, water content, nitrogen, calcium, iron, and phosphorus). The results achieved in this study demonstrate the separability of *I. cavalcantei* and *I. marabaensis* through hyperspectral leaf reflectance data. However, hybrid individuals did not show good discrimination, as these individuals express phenotypes with intermediate characteristics of *I. cavalcantei* and *I. marabaensis*, the difficulty in identification accuracy could be expected. The approach used here demonstrates great potential for monitoring populations of *I. cavalcantei* and *I. marabaensis* in the cangas of Carajás through platforms with hyperspectral sensors.

Keywords: Reflectance spectra. Cangas. Ipomoeas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localização das áreas de estudo na Serra dos Carajás, Belém, Pará, Brasil. Serra Norte (N1, N2, N3, N6), Serra Sul (S11), Serra da Bocaina (SBC) e viveiro do Parque Zoobotânico da Vale (PZV). Fonte: A autora. 16

Figura 2. Fotografia de indivíduos estudados localizados no viveiro do Parque Zoobotânico da Vale. **a.** *I. cavalcantei*. **b-c.** Híbridos. **d.** *I. marabaensis*. Fonte: A autora. 18

Figura 3. Resumo gráfico metodologia: Obtenção dos dados, organização e tratamento dos dados e análises estatísticas. 23

Figura 4. Figura com a reflectância média foliar das espécies e híbridos: *Ipomoea cavalcantei* D.F. Austin & Secco (em azul, sobreposto em maior parte pela reflectância dos híbridos), *Ipomoea marabaensis* D.F. Austin & Secco (em laranja) e indivíduos híbridos (*Ipomoea cavalcantei* x *Ipomoea marabaensis*)(em verde). 25

Figura 5. Correlograma entre a razão dos pares de banda. A escala rosa exhibe valores das bandas espectrais com uma baixa taxa de colinearidade, enquanto verde mais escuro exhibe bandas espectrais com uma alta taxa de colinearidade. 26

Figura 6. Gráfico dos dois primeiros componentes principais, explicando 76,61 % da variância total dos dados espectrais encontrados. Híbridos (triângulo azul), *I. cavalcantei* (círculo vermelho) e *I. marabaensis* (quadrado verde). 27

Figura 7. Matriz de confusão para dos dados de reflectância foliar de *I. cavalcantei* (IC), *I. marabaensis* (IM) e híbridos (H). 28

Figura 8. A importância das bandas espectrais medidos pelo RF usando índice de Gini. As variáveis mais importantes são aquelas com o maior índice médio. 29

Figura 9. Gráfico RDA. **a.** RDA mostrando as relações entre as características morfológicas das folhas e as bandas do espectro de reflectância foliar. As variáveis são representadas por setas. SLA (SLA). Área foliar (AF) e Teor de água (TA). **b.**

RDA mostrando as relações entre as características bioquímicas das folhas e as bandas do espectro de reflectância foliar. As variáveis são representadas por setas. Nitrogênio (N). g: Fósforo (P). h: Potássio (K). i: Cálcio (Ca). j: Magnésio (Mg). k: Enxofre (S). l: Boro (B). m: Cobre (Cu). n: Ferro (Fe). o: Manganês (Mn). p: Zinco (Zn).

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Informações do número de espectros foliares coletados de *I. cavalcantei*, *I. marabaensis*, híbridos e o local de ocorrências dos indivíduos usados para as análises. 18

Tabela 2. Caracterização de parâmetros morfológicos e fisiológicos foliares de híbridos (HB), *I. cavalcantei* (IC) e *I. marabaensis* (IM): Comprimento foliar (cm), Largura foliar (cm), Área foliar, Peso fresco foliar (g), Peso seco foliar (g), Área específica foliar (SLA (cm/g) e Conteúdo de água foliar (%). Letras diferentes representam diferenças estatisticamente significativas ($P \leq 0,05$). 30

Tabela 3. Caracterização de parâmetros nutricionais foliares (macronutrientes) de híbridos (HB), *I. cavalcantei* (IC) e *I. marabaensis* (IM): Nitrogênio (N), Fósforo (P), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Enxofre (S). Letras diferentes representam diferenças estatisticamente significativas ($P \leq 0,05$). 30

Tabela 4. Caracterização de parâmetros nutricionais foliares (micronutrientes) de híbridos (HB), *I. cavalcantei* (IC) e *I. marabaensis* (IM): Boro (B), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Manganês (Mn), Zinco (Zn). Letras diferentes representam diferenças estatisticamente significativas ($P \leq 0,05$). 30

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS	15
2.1 Objetivo geral	15
2.2 Objetivos específico	15
3.2 Espécies e híbridos coletados	16
3.3 Obtenção de dados	19
3.3.1 Leituras espectrorradiométricas	19
3.4 Organização e tratamento da base de dados	21
3.5 Análises estatísticas	21
4 RESULTADOS	23
4.1 Separabilidade espectral das espécies e indivíduos híbridos	23
4.2 Importância dos comprimentos de ondas	28
4.3 Relação entre espectro e características foliares das espécies e híbridos	28
5. DISCUSSÃO	32
6. CONCLUSÃO	36
7. REFERÊNCIAS	37

1. INTRODUÇÃO

A Serra dos Carajás, localizada no Estado do Pará, Brasil, abriga uma das maiores províncias minerais do mundo, inserida na Floresta Amazônica (Freitas 1986, Viana et al. 2016). Nessa região existe um ambiente de savana composto por espécies herbáceas e arbustivas que crescem associada a afloramentos de rochas ferruginosas, alternada com pequenas áreas de bosques de floresta semidecídua e lagos sazonais nos topos de algumas serras (Mota et al. 2015, STCP 2016, Mota et al. 2018). Essa vegetação, denominada canga, abriga uma flora com alto número de espécies endêmicas e com adaptações a condições extremas, por exemplo, altas concentrações de metais pesados, temperaturas elevadas, estação seca bem definida e solo pobre em nutrientes (Mota et al. 2015, Nunes et al. 2015, Schettini et al. 2018). Devido a sua associação ao afloramento de minério de ferro, atividades do setor minerador geram uma grande vulnerabilidade a esses ecossistemas (Skiryicz et al. 2014).

Atualmente, as cangas de Carajás abrigam 24 espécies consideradas raras e 7 com endemismo altamente restrito (Giulietti et al. 2019). Dentre essas espécies, destaca-se a planta símbolo da região, *Ipomoea cavalcantei* D.F. Austin, popularmente conhecida como Flor de Carajás. A flor de Carajás é uma espécie de Angiosperma pertencente à família Convolvulaceae que se destaca das demais espécies do gênero *Ipomoea* da flora de Carajás devido a sua corola hipocrateriforme vermelha. A espécie possui uma distribuição altamente restrita a Serra Norte da Serra dos Carajás, é registrada como rara para o Brasil (Giulietti et al. 2009) e considerada em perigo de extinção (MMA 2022). No presente momento, grande parte de sua população está diretamente ameaçada pela supressão vegetal da sua área de ocorrência devido à atividade de mineração (Rodrigues et al. 2020). Considerando o status de conservação da espécie e o cenário de fragmentação e perda de habitats nos ecossistemas de canga, é imprescindível realizar o monitoramento das populações de *I. cavalcantei*.

Ipomoea cavalcantei pode coexistir com *Ipomoea marabaensis* D.F. Austin & Secco, Bol. Mus.(L) na região das cangas amazônicas, espécie considerada vulnerável conforme os critérios da IUCN (Martinelli & Moraes 2013). A distinção entre *I. cavalcantei* e *I. marabaensis* torna-se mais evidente em características florais, visto a alta semelhança em suas características morfológicas das partes vegetativas (Austin & Secco 1988). Isso implica na necessidade de várias expedições de campo para coletar a maioria dos exemplares em fase fértil, aumentando o tempo e esforço necessário para amostragem das espécies (Deiner et al. 2017). Além disso, *I. cavalcantei* e *I. marabaensis* produzem indivíduos com características intermediárias, tratados como híbridos (Simão-Bianchini et al. 2016). O processo de hibridização é um tópico importante na conservação, pois pode resultar na extinção de espécies endêmicas ou de populações de plantas raras por meio da inundação genética (Levin & Francisco-Ortega 1996, Todesco et al. 2016).

É importante destacar também a dificuldade logística de acessar esses ecossistemas devido à sua localização em topos de serras e aos riscos atrelados às atividades mineradoras nessas regiões. Diante das dificuldades pontuadas, o emprego de tecnologias modernas e avançadas que forneçam embasamento para a identificação dessas espécies a partir de caracteres vegetativos torna-se necessário. Considerando a importância dos esforços para avançar na conservação de *I. cavalcantei*, e também a limitação da utilização de métodos tradicionais de identificação em campo, este estudo pretende fornecer dados que contribuam com o monitoramento das populações da espécie por meio do uso de tecnologias de sensoriamento remoto. O emprego de plataformas aéreas com sensores hiperespectrais reduz a dependência de especialistas para identificação das espécies em campo, diminuindo o tempo necessário para obtenção de dados (Deiner et al. 2017), diminui os custos de trabalhos em campo e os riscos operacionais. Além disso, permite o monitoramento detalhado e não invasivo das populações de *I. cavalcantei* em larga escala a longo prazo.

A assinatura espectral é determinada pelos valores sequenciais da energia refletida pelo objeto em todo o espectro eletromagnético (Moraes 2002, Jensen 2009). Embora as assinaturas espectrais das espécies vegetais apresentem

semelhanças, visto a correlação da composição química entre as espécies (Portugal et al. 1997), existem variações tênues na amplitude dos espectros que podem ser informativas para distinção de espécies (Kumar et al. 2007). Por esse motivo, investigar a variação espectral em espécies de um mesmo gênero e de híbridos interespecíficos submetidos a condições ambientais extremas, como àquelas encontradas nas cangas, é uma forma de testar o quão informativo são os padrões da assinatura espectral como fonte de identificação a nível de espécie.

No sensoriamento remoto, várias bandas espectrais são frequentemente utilizadas para discriminar vários materiais e alvos nas faixas espectrais do visível (400-700 nm, VIS), infravermelho próximo (700-1300 nm, NIR) e infravermelho de ondas curtas (1300-2500 nm, SWIR) (Ustin et al. 2004). Nas plantas, a folha é o principal órgão de interação com as ondas eletromagnéticas oriundas do sol (Gates et al. 1965, Del'Arcosanches et al. 2003, Murakami 2016). Na região do visível, a maior parte da radiação que incide sobre as folhas é absorvida pelos pigmentos fotossintetizantes (Gates et al. 1965). Na região do infravermelho próximo, o comportamento da radiação eletromagnética quanto à reflexão, transmissão e absorção é dominado pelas propriedades ópticas das folhas que dependem das estruturas celulares internas (Moreira 2003). E, na região do infravermelho de ondas curtas, a absorção é em consequência das ligações presentes na água e compostos bioquímicos estruturais como lignina e celulose (Asner 1998, Gausman 1977, Homolová et al. 2013). Assim, de forma geral, o comportamento espectral em cada uma destas regiões dependerá dos constituintes da folha e diferenças morfológicas (Ponzoni et al. 2012).

Diferentes estudos evidenciaram o uso de assinaturas espectrais para a discriminação de espécies vegetais (eg., Schmidt & Skidmore 2003, Prospere et al. 2014, Grobe-Stoltenberg et al. 2016, Erudel et al. 2017). No entanto, a vasta quantidade de literatura disponível concentra-se em estudos com espécies filogeneticamente distantes. Poucos são os estudos que focaram em entender a discriminação espectral entre espécies filogeneticamente aparentadas. Um complicador importante nessa busca é que os espectros capturam a variedade nas características das folhas acumuladas ao longo da evolução (Reich et al. 2003,

Kattge et al. 2011, Cornwell et al. 2014). Ou seja, espécies próximas retêm uma maior similaridade espectral entre si, em comparação a espécies mais distantes evolutivamente (Asner & Martin 2010, Cavender-Bares et al. 2016, MCManus et al. 2016). Além disso, fatores ambientais, como clima e disponibilidade de nutrientes, influencia significativamente a composição bioquímica e a estrutura das folhas (Jacquemoud & Ustin 2001, Asner 2014), o que pode resultar em variações nas propriedades espectrais entre folhas de diferentes espécies e, até mesmo, dentro da mesma espécie (Westman & Price 1987, Cochrane et al. 2000). Dessa forma, a separabilidade espectral entre espécies intimamente relacionadas (*I. cavalcantei* e *I. marabaensis*) e indivíduos híbridos interespecies ocorrentes em ambientes que possuem condições extremas, como encontrado no ecossistema de canga torna-se um desafio.

Estudos recentes indicam que a aplicação do algoritmo Random Forest (RF) tem sido eficaz quando aplicado à classificação de dados hiperespectrais (Crawford et al. 2003, Chan & Paelinckx 2008, Ham et al. 2005, Lawrence et al. 2006). O RF é um método de classificação por conjunto baseado em árvores de decisão (Breiman 2001). A aplicação desse classificador tem demonstrado elevada precisão na classificação de diferentes espécies de plantas em estudos já realizados (Naidoo et al 2012, Ferreira et al. 2016, Grabska et al. 2020, Aviña-Hernández et al. 2023) e eficaz na previsão de diferenças sutis entre espécies do mesmo gênero (Shang & Chisholm 2014, Mudereri 2020). Portanto, neste estudo, foi utilizado o modelo Random Forest para avaliar a separabilidade da reflectância foliar nas espécies e indivíduos híbridos estudados.

Adicionalmente, considerando que aspectos morfofisiológicos das plantas desempenham um papel crucial na interceptação e absorção da radiação fotossinteticamente ativa (Moreira 2001), pretende-se também, investigar as características morfológicas e fisiológicas que explicam a maior parte da variabilidade espectral encontrada. Os atributos morfofisiológicos foliares avaliados incluem o comprimento, largura, peso seco, peso fresco, área foliar, área foliar específica, teor de água, conteúdo de macronutrientes e micronutrientes, como

nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn).

Espera-se que as assinaturas espectrais variem de forma significativa entre as espécies e os indivíduos híbridos investigados, sendo essa variação influenciada por parâmetros morfofisiológicos. O alcance de resultados positivos neste estudo fornecerá dados que contribuirão para o avanço do monitoramento de forma automatizada das populações de *I. cavalcantei* por meio do uso de tecnologias de sensoriamento remoto.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Testar a separabilidade de *Ipomoea cavalcantei*, *Ipomoea marabaensis* e híbridos ocorrentes na Serra de Carajás através da espectroscopia de reflectância nas faixas espectrais do visível, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas.

2.2 Objetivos específico

- Avaliar a separabilidade espectral de *I. cavalcantei*, *I. marabaensis* e híbridos em nível foliar;
- Identificar as melhores bandas espectrais para discriminação de *I. cavalcantei*, *I. marabaensis* e híbridos.
- Definir características morfofisiológicas foliares que explicam a maior parte da variabilidade encontrada nos espectros.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo e amostragem

O estudo foi realizado em indivíduos ocorrentes dos municípios de Parauapebas e Canaã dos Carajás na região da Floresta Amazônica na Serra dos Carajás, Amazônia Oriental (Pará-Brasil) (Fig. 1). Seguindo a classificação climática de Köppen (1948), o local adere ao padrão Aw, apresentando temperaturas médias superiores a 25°C (Alvares *et al.* 2013). A amostragem incluiu folhas pertencentes às espécies ocorrentes na Serra Norte (blocos N1, N2, N3, N6), Serra Sul (bloco S11), Serra da Bocaina e viveiro do Parque Zoobotânico da Vale.

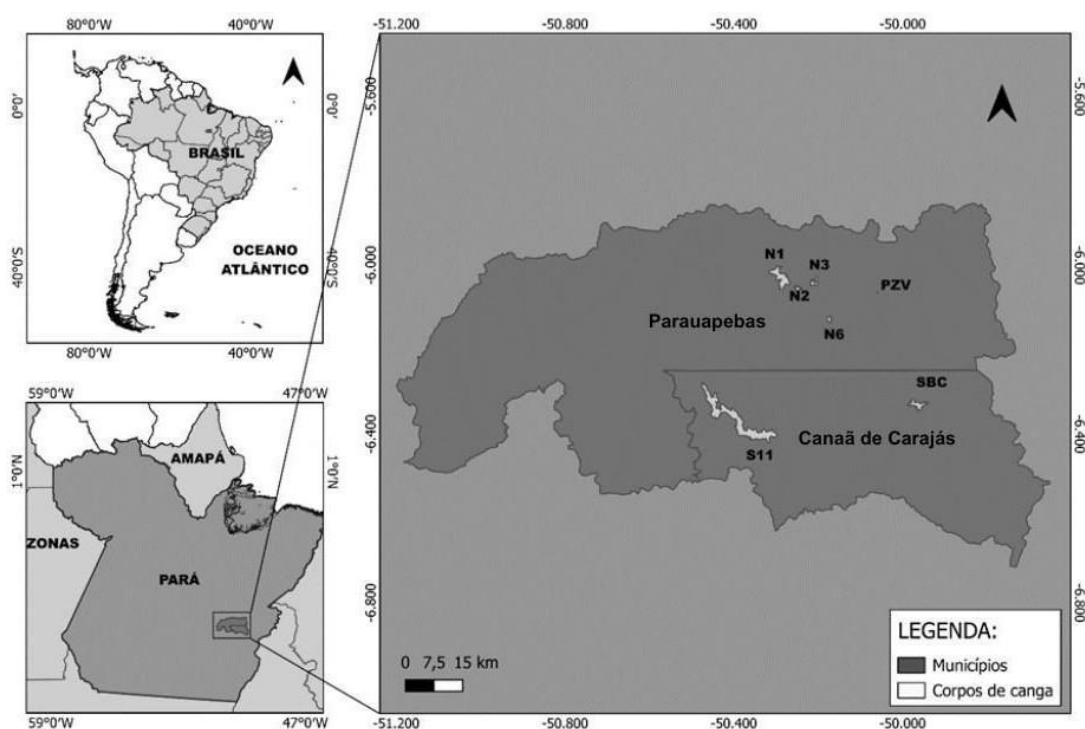


Figura 1. Mapa de localização das áreas de estudo na Serra dos Carajás, Belém, Pará, Brasil. Serra Norte (N1, N2, N3, N6), Serra Sul (S11), Serra da Bocaina (SBC) e viveiro do Parque Zoobotânico da Vale (PZV). Fonte: A autora.

3.2 Espécies e híbridos coletados

Ipomoea cavalcantei pertence à família Convolvulaceae (Babiychuk *et al.* 2017) possui distribuição restrita à Serra Norte da Serra dos Carajás, sendo

comumente encontrada em áreas de canga couraçada, canga nodular, vegetação arbustiva, bordas de floresta e canga alterada nos blocos N1, N2, N3, N4 e N5. (Simão-Bianchini et al. 2016)

Arbusto escandente; ramos pilosos com pelos adpressos. Folhas principalmente elípticas, às vezes, oblongas, obovadas a lanceoladas 4-8 cm de comprimento, 1-2,5 cm de largura, base cuneata à obtusa, ápice obtuso, arredondado, raramente acuminado, com pubescência adpressa em cima e em baixo. Flores 1-3, solitárias ou em cimas axilares, sépalas 10-12 mm de comprimento, quase iguais, obtusas e mucronadas, pubescentes, corolas vermelhas, hipocrateriformes; 5-5,5 cm de comprimento, com pubescência branca ou amarelada entre as zonas dobradas (AUSTIN, 1981, p. 292).

I. cavalcantei pode coexistir com *Ipomoea marabaensis* D.F. Austin & Secco, Bol. Mus.(L) nos corpos de cangas N4 e N5 na serra norte das cangas amazônicas (Babiychuk 2019). *Ipomoea marabaensis* ocorre exclusivamente nos afloramentos rochosos nos estados do Pará e Tocantins (BFG 2015). Na Serra dos Carajás é encontrada em cangas couraçadas, nodular, de mata baixa, de campos brejosos e bordas de floresta da Serra Norte em N4, N5, N6, N7 e N8, Serra da Bocaina, Serra do Tarzan e da Serra Sul em S11A, S11B, S11C e S11D.

Liana escandente, ramos pilosos com tricomas adpressos. Folhas geralmente oblongas, podendo ser elípticas, obovadas ou lanceoladas a lineares, 5-12 cm de comprimento por 0,3-2 cm de largura, as bases obtusas e cuneadas com um par de nectários presentes ou ausentes, os ápices obtusos, arredondados, raramente acuminados, com pubescência adpressa nas páginas superior e inferior. Flores 1-13, solitárias ou em cimos terminais ou axilares ou próximas das terminações dos ramos; sépalas 14-15 mm de comprimento, mais ou menos ovadas, os ápices agudos e obtusos e mucronados, as 2 mais externas glabras e esparsamente seríceas, as internas seríceas pelo menos na porção coberta com indumento adpresso amarelo ou esbranquiçado; corolas lilases,

infundibuliformes, 7-9 cm de comprimento, com pubescência branca ou amarelada entre as zonas dobradas (AUSTIN, 1988, p. 187).

Além dessas duas espécies, indivíduos com características intermediárias de *I. cavalcantei* e *I. marabaensis*, tratados como híbridos interespecíes ocorrentes no bloco N4 (Simão-Bianchini *et al.* 2016) e no viveiro do Parque Zoobotânico Vale (PZV) também foram coletados (**Fig. 2**).

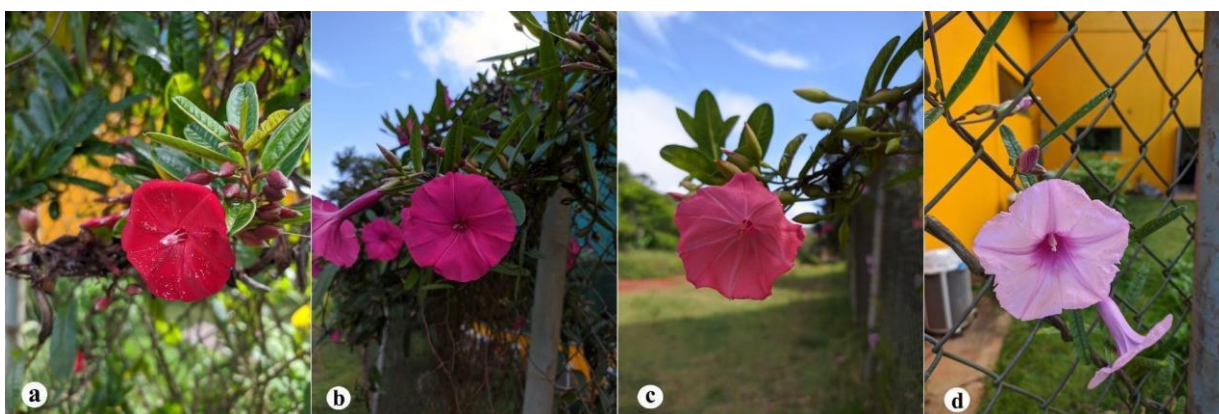


Figura 2. Fotografia de indivíduos estudados localizados no viveiro do Parque Zoobotânico da Vale. a. *I. cavalcantei*. b-c. Híbridos. d. *I. marabaensis*. Fonte: A autora.

Tabela 1. Informações do número de espectros coletados de *I. cavalcantei*, *I. marabaensis*, híbridos e o local de ocorrências dos indivíduos usados para as análises.

Espécie	Código	Nº espectros	Local
<i>Ipomoea cavalcantei</i> D.F. Austin	IC	450	Serra norte (N1, N2 e N3)
<i>Ipomoea marabaensis</i> D.F. Austin & Secco, Bol. Mus.(L)	IM	555	Serra norte (N6), Serra sul (S11) e Serra da Bocaina (SBC)

Híbridos	H	90	Parque Zoobotânico da Vale
Total		1095	

3.3 Obtenção de dados

3.3.1 Leituras espectrorradiométricas

A coleta do material foi realizada em maio de 2024, no final do período chuvoso (Souza et al. 2014), durante o período de floração das espécies. Foram selecionadas de cinco a nove folhas com base em sua aparência geral (sem sinais de herbivoria e presença de patógenos), maduras e totalmente expostas ao sol. Os dados espectrais relacionados à reflectância das folhas foram obtidos através do espectrorradiômetro hiperespectral portátil: Malvern Panalytical Spectral Devices (ASD, Westborough, MA, EUA) FieldSpec® 4.0NP, acoplado ao acessório Leaf Clip. Dado o sistema de travamento e a manutenção da mesma intensidade de luz do acessório (ASD, 2010), a obtenção de dados espectrais deu-se com interferência reduzida (Lehmann et al. 2015).

A reflectância dos alvos foi registrada na faixa do espectro eletromagnético óptico entre 350 e 2500 nm, ou seja, desde a região do visível até a do infravermelho de ondas curtas, coletando ao todo 2151 bandas (Danner et al. 2015).

Antes da obtenção das medidas de reflectância, o espectrorradiômetro foi otimizado e calibrado na placa de referência branca da sonda Leaf Clip. A calibração foi realizada regularmente para manter as leituras espectrais homogêneas. A análise foi realizada utilizando a face adaxial das folhas, evitando a nervura sempre que possível. As medidas de reflectância coletadas em campo foram obtidas com o auxílio do software RS3 e registradas no formato original ASD - Analytical Spectral Devices®. Posteriormente, esses dados foram convertidos para o formato de arquivo de texto (.txt) usando o programa ViewSpec Pro™, possibilitando, dessa forma, a manipulação, organização e análise desses dados.

3.3.2 Obtenção de dados morfofisiológicos

Após a obtenção das leituras espectrorradiométricas, das mesmas folhas foram mensuradas características morfológicas e fisiológicas. Ainda no campo, realizou-se a pesagem individual de cada folha, obtendo-se assim o valor correspondente ao seu peso fresco (PF). Cada folha foi submetida à digitalização através de um scanner HP®, após a digitalização determinou-se o comprimento (C), largura (L) e a área foliar (AF) com auxílio do software ImageJ na versão 1.53c. Posteriormente, as folhas foram acondicionadas em sacolas de papel e levadas para a estufa, onde o material permaneceu em uma temperatura de 70 °C até alcançar o peso constante. Após a secagem, o peso seco (PS) foi calculado. A obtenção do PS e PF foram realizadas com auxílio de uma balança de precisão digital.

Com esses dados, calculou-se a área específica foliar (SLA: $\text{Área foliar (cm}^2\text{)}/\text{Peso seco (g)}$) e o teor de água ($TA: \text{Peso fresco(g)} - \text{Peso seco (g)}/\text{Peso fresco(g)} \times 100$). Por fim, as amostras foram enviadas para o Laboratório Brasileiro de Análises Ambientais e Agrícolas (LABRAS), onde foram determinados o conteúdo de macronutrientes e micronutrientes, como, nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn). Para isso, os materiais foram então moídos em moinho Wiley (Retsch, Düsseldorf, Alemanha). Para determinação dos nutrientes, amostras de 250 mg de tecido vegetal foram misturadas com 2 mL de HNO₃ 65% (MERCK®, Darmstadt, Alemanha), 2 mL de H₂O₂ e 5 mL de água Milli-Q (Master System MS 2000, Gehaka, São Paulo) e depois digeridos em forno de micro-ondas (Mars Xpress, CEM Corporation, Matthews, NC, EUA) a 80 °C por 3 min, 150 °C por 5 min e 180 °C por 10 min. Os extratos digeridos foram filtrados em papel de filtro de banda azul de filtragem lenta. O extrato filtrado foi transferido para tubos Falcon de 50 mL e o volume final foi ajustado com água Milli-Q. Os níveis de macronutrientes e micronutrientes foram determinados por espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES).

3.4 Organização e tratamento da base de dados

Uma matriz de dados na qual as linhas correspondem às amostras e as colunas correspondem às variáveis foi construída com os valores de reflectância espectral, comprimento, largura, área foliar, peso fresco, peso seco, área foliar específica, teor de água, nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, ferro, manganês e zinco.

Os espectros de reflectância hiperespectral foram tratados e filtrados utilizando o filtro Savitzky-Golay (Savitzky & Golay 1964), do pacote signal (Ligges et al. 2015), a fim de remover o ruído aleatório e distorções nos dados espectrais preservando a forma do espectro. Basicamente, esse método utiliza o cálculo de uma regressão polinomial local para encontrar o valor suavizado de cada ponto. Os dados morfofisiológicos foram corrigidos com o método *Min-max*. Neste método, os dados foram ajustados para um intervalo constante de 0 a 1, visando garantir que os dados estejam em uma escala comparável.

3.5 Análises estatísticas

O espectro médio de reflectância das espécies foi calculado para avaliar o comportamento espectral, inicialmente, de forma visual. Dados hiperespectrais possuem uma alta multicolinearidade (Curran et al. 1989). Sabendo que, a inclusão de variáveis redundantes pode acarretar efeitos prejudiciais em análises (Hair et al. 2005), o modelo *variance inflation factor* (VIF) foi calculado. Valores de VIF elevado indicam uma alta correlação entre as variáveis. Dessa forma, foi realizada a exclusão dos comprimentos de onda altamente correlacionados.

A partir da redução da multicolinearidade a variabilidade espectral intra e interespecífica foi testada via PERMANOVA (Anderson 2001), com a função adonis. Uma análise de componentes principais (PCA) foi realizada para verificar a explicação da variância e o agrupamento das espécies com os valores de reflectância.

Posteriormente, também a partir da redução da multicolinearidade, o algoritmo Random Forest foi treinado e otimizado. Para avaliar o quão bem um algoritmo faz previsões, é recomendável usar um conjunto de dados de teste que não tenha sido usado durante o treinamento (Congalton & Green 1999). Diante disso, para realizar o treinamento e teste dos modelos, foi realizada a divisão aleatória do conjunto de dados em uma porção de treinamento, compreendendo 70% dos dados, e uma porção de teste, com os 30% restantes dos dados. Foi realizada uma Matriz de Confusão utilizando o modelo de classificação *Random forest* (RF) (Breiman 2001) baseado em *Decision Trees* (DT) para avaliar a classificação de *Ipomoea cavalcantei*, *Ipomoea marabaensis* e dos indivíduos híbridos. A matriz de confusão ilustra as correlações significativas entre as observações de campo reais e as previsões do classificador, ou seja, a matriz de confusão é uma tabela que permite a visualização do desempenho do algoritmo de uma forma mais detalhada. Em seguida, foi calculada a Acurácia Global e valores de f1-score para avaliar a qualidade do procedimento de classificação.

A seleção dos comprimentos de onda com maior impacto na separabilidade espectral das espécies no modelo foi calculada a partir do índice de Gini (Breiman & Cutler 2003, Granitto 2006, Menze 2009, Nembrini *et al.* 2018). Através desse índice, é possível identificar os comprimentos de onda que maior contribuiram para a diferenciação espectral das espécies analisadas.

Uma análise de variância (ANOVA) com o teste posthoc foi utilizada para avaliar a variação das características morfológicas e fisiológicas. Em seguida, foi realizada uma análise de redundância (RDA) para determinar se os espectros de refletância (variáveis de resposta) poderiam ser explicados pelas características morfofisiológicas (variáveis explicativas). Para evitar possível colinearidade entre variáveis explicativas, valores de VIF de cada variável foi acessado e variáveis com valores de variance inflation factor ($VIF > 3$) foram excluídas (Zuur *et al.* 2010) nas análises posteriores.

As análises foram realizadas no Python com auxílio das bibliotecas “Pandas”, “Numpy” e “Matplotlib” e no ambiente R (R Core Team 2022) usando o pacote

DescTools (Signorell et al. 2021), vegan (Oksanen *et al.* 2017), ggplot2 (Wickham 2016) e cowplot2 (Wilke 2020).

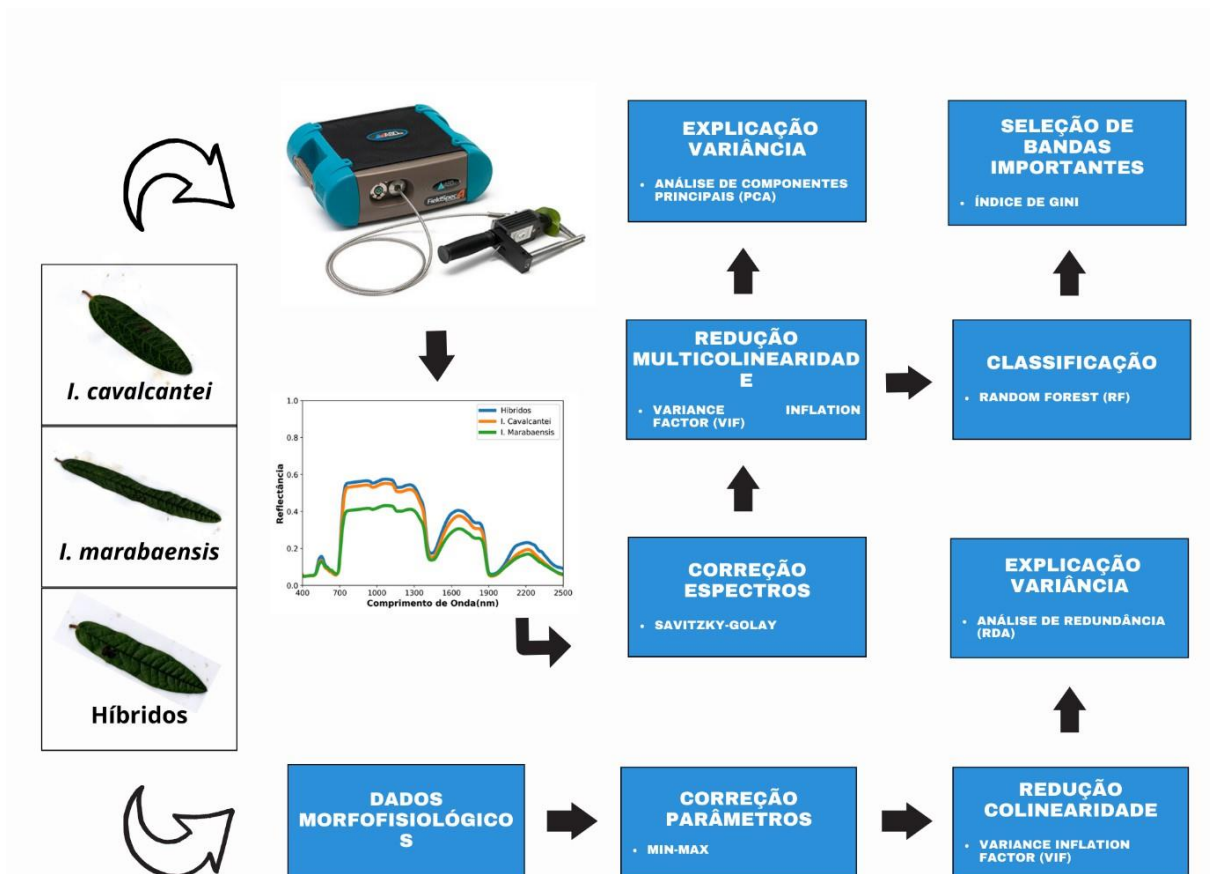


Figura 3. Resumo gráfico metodologia: Obtenção dos dados, organização e tratamento dos dados e análises estatísticas.

4 RESULTADOS

4.1 Separabilidade espectral das espécies e indivíduos híbridos

As curvas médias de refletância espectral das duas espécies e dos indivíduos híbridos são apresentadas na **Fig. 4**. De forma geral, o comportamento espectral de

I. cavalcantei, *I. marabaensis* e indivíduos híbridos apresentou um padrão característico de uma planta saudável, caracterizado pela baixa reflectância na região do visível (VIS), alta reflectância na região do infravermelho próximo (NIR) e reflectância moderada na região do infravermelho de ondas curtas (SWIR). É notável que a espécie *I. marabaensis* apresentou comportamento espectral com intensidade de reflectância inferior a *I. cavalcantei* e híbridos, com exceção das bandas entre 600 nm e 700 nm, onde *I. cavalcantei* apresentou menores valores de reflectância. Os indivíduos híbridos e *I. cavalcantei* apresentaram comportamentos espectrais semelhantes, apresentando sobreposição na reflectância espectral. No entanto, a análise visual das curvas considerou exclusivamente os dados médios de reflectância.

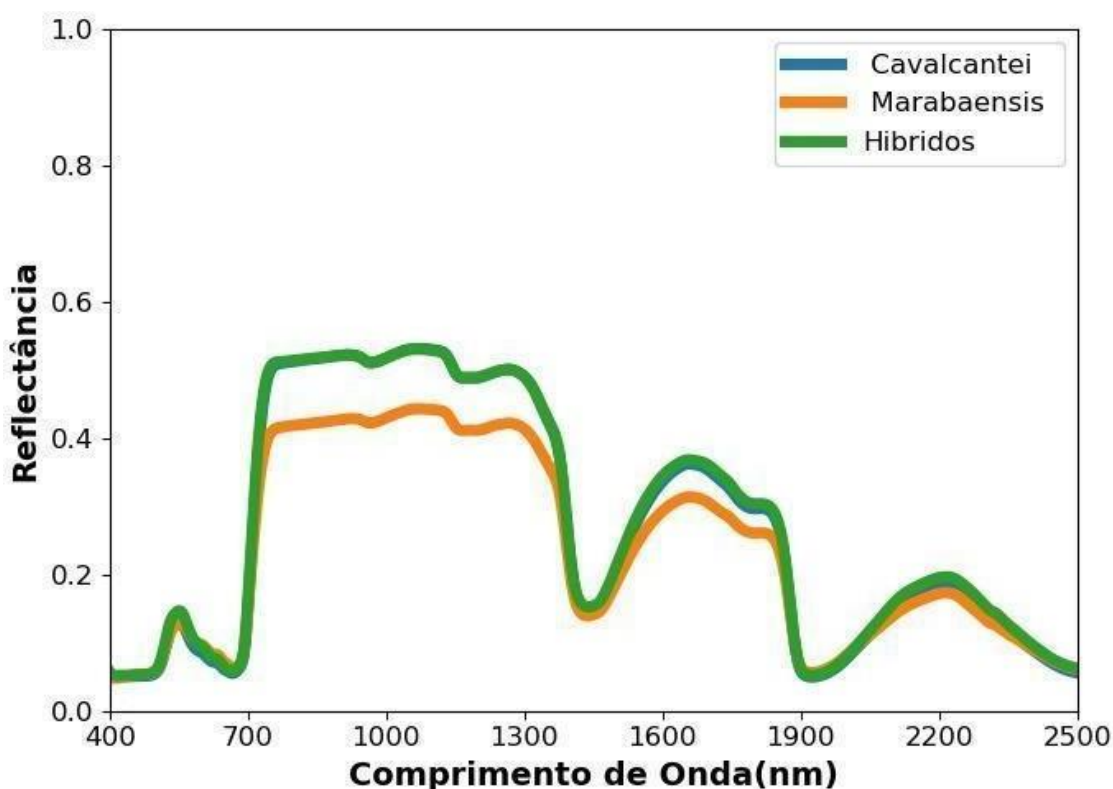


Figura 4. Figura com a reflectância média foliar das espécies e híbridos. *Ipomoea cavalcantei* D.F. Austin & Secco (em azul, sobreposto em maior parte pela

reflectância dos híbridos), *Ipomoea marabaensis* D.F. Austin & Secco (em laranja) e indivíduos híbridos (*Ipomoea cavalcantei* x *Ipomoea marabaensis*)(em verde).

O cálculo do *variance inflation factor* (VIF) permitiu a identificação de bandas espectrais altamente correlacionáveis (**Fig. 5**). A escala rosa exhibe valores das bandas espectrais com uma baixa taxa de colinearidade, enquanto verde mais escuro exhibe regiões espectrais com uma alta taxa de colinearidade. As bandas espectrais do 350 nm, 410 nm, 660 nm, 870 nm, 990 nm, 1240 nm, 1340 nm, 2103 nm, 2270 nm e 2490 nm foram identificadas como aquelas com menor taxa de correlação.

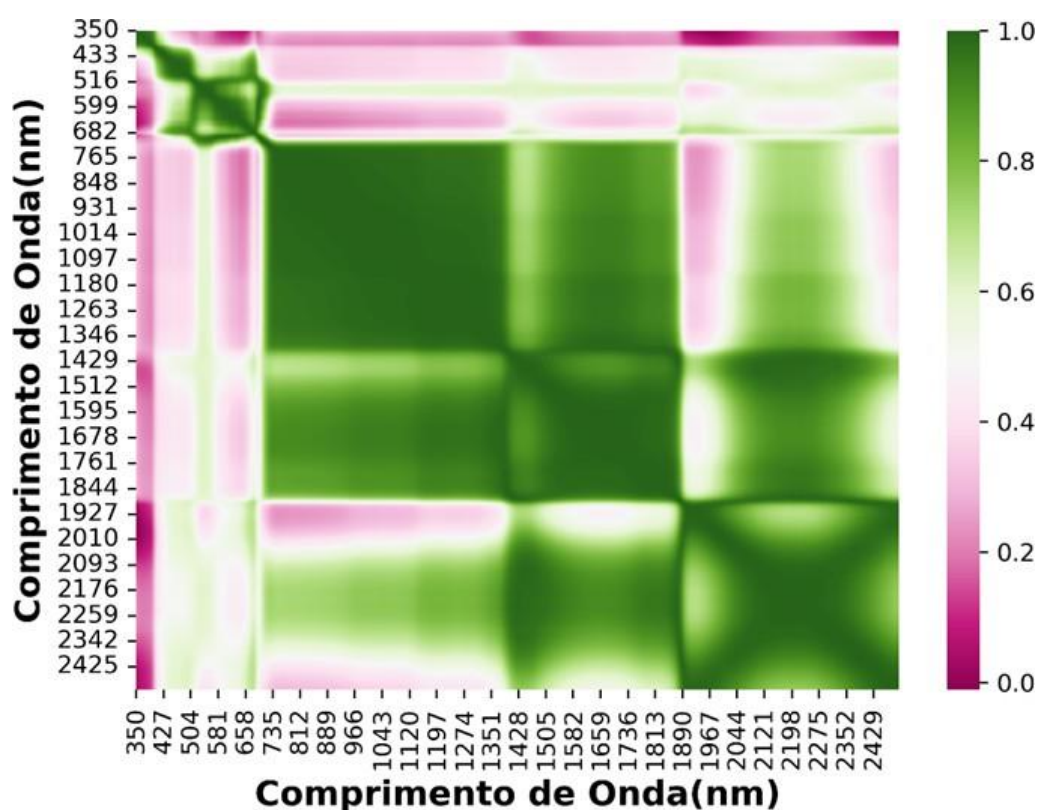


Figura 5. Correlograma entre a razão dos pares de banda. A escala rosa exhibe valores das bandas espectrais com uma baixa taxa de colinearidade, enquanto verde mais escuro exhibe bandas espectrais com uma alta taxa de colinearidade.

A análise de variância multivariada permutacional (PERMANOVA) evidenciou diferença significativa na região do VIS, NIR e SWIR de *I. cavalcantei*, *I. marabaensis* e híbridos (*P* Fig 9). As duas primeiras componentes principais (PCs) explicaram 76,61 % da variância total dos dados espectrais. A PC1 explicou 60,96 % da variação encontrada, enquanto a PC2 explicou 15,65%. É possível observar a separabilidade de *I. cavalcantei* e *I. marabaensis*. No entanto, é notável a sobreposição dos indivíduos híbridos com as duas espécies, sendo sua maior parte de sobreposição com *I. cavalcantei*.

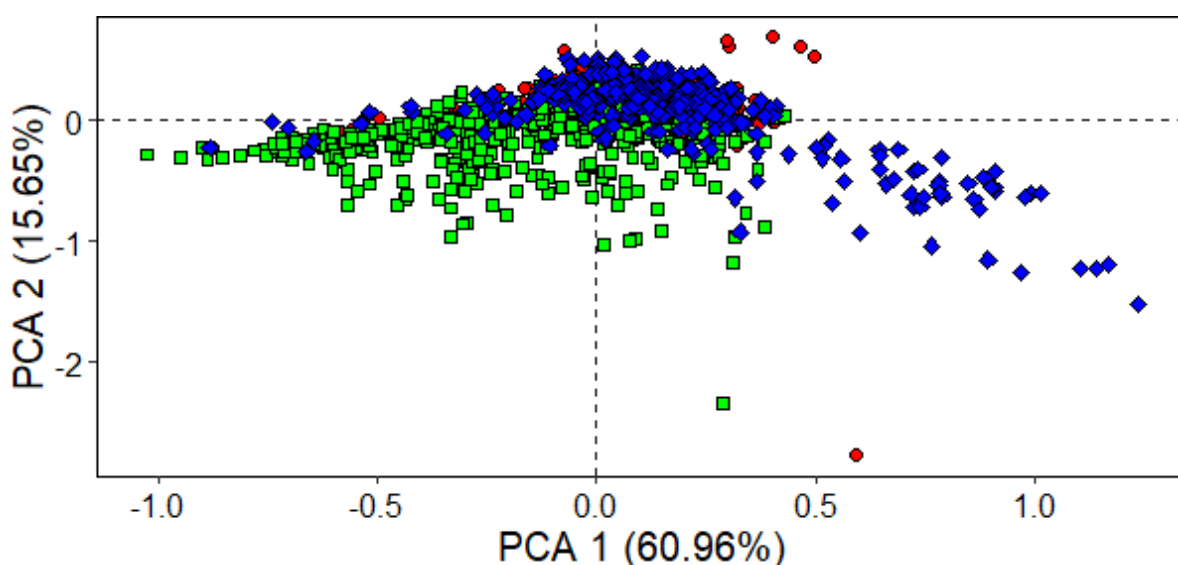


Figura 6. Gráfico dos dois primeiros componentes principais, explicando 76,61 % da variância total dos dados espectrais encontrados. Híbridos (triângulo azul), *I. cavalcantei* (círculo vermelho) e *I. marabaensis* (quadrado verde).

A matriz de confusão ilustra a acurácia da classificação, representado pela diagonal principal da matriz (Figura 6). A classificação obtida com o algoritmo Random Forest apresentou resultados satisfatórios na separação de *I. cavalcantei* e *I. marabaensis*, uma acurácia geral de 0,85 do modelo foi alcançada. Para discriminação individual, a matriz de confusão mostra que a classe *Ipomoea marabaensis* apresenta a menor taxa de erro (0.85), seguida de *Ipomoea cavalcantei* (0.84). No entanto, a precisão de classificação da classe dos híbridos foi inferior, apresentando a maior taxa de erro (0.47), onde 32% das amostras da classe foram classificadas como *I. cavalcantei* e 21% foram classificadas como *I. marabaensis*.

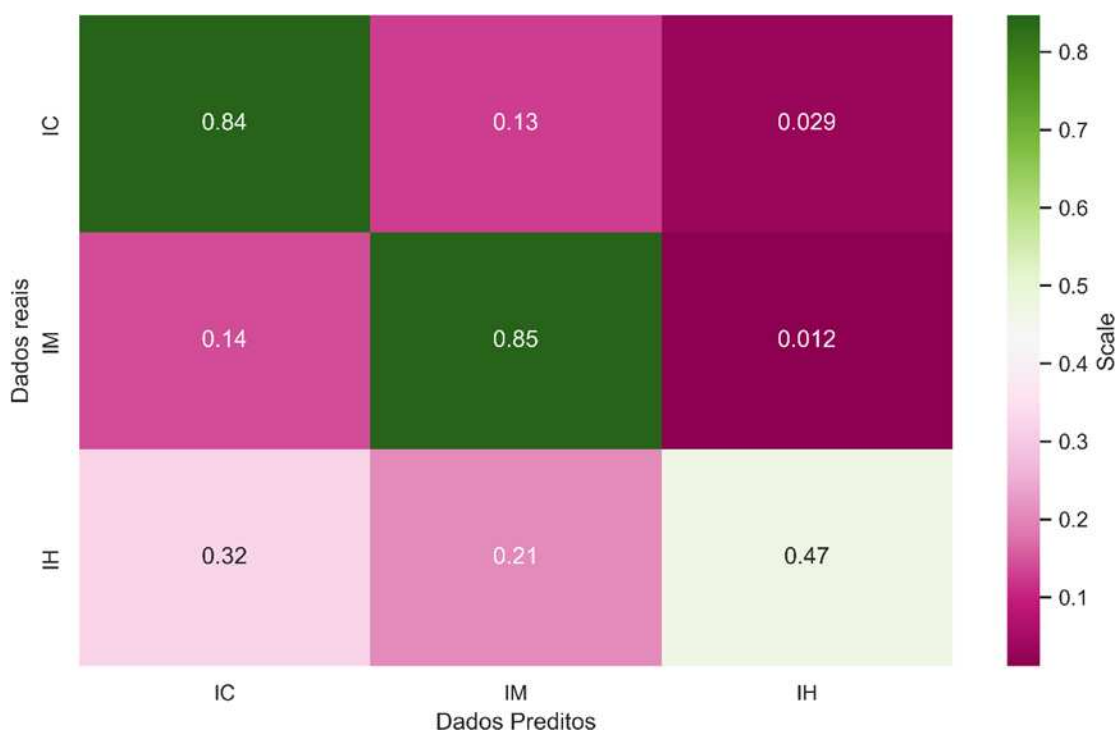


Figura 7. Matriz de confusão para dos dados de reflectância foliar de *I. cavalcantei* (IC), *I. marabaensis* (IM) e híbridos (H).

Os valores de **F1-Score** para a *I. cavalcantei* foi de 0.77, para *I. marabaensis* 0.84 e 0.58 para híbridos. O resultado da análise indica que há alta separabilidade entre os indivíduos de *I. cavalcantei* e *I. marabaensis*, no entanto, para indivíduos híbridos houve uma separação moderada.

4.2 Importância dos comprimentos de ondas

O cálculo do índice de Gini evidenciou que os comprimentos de ondas mais importantes para separabilidade das duas espécies e dos híbridos compreenderam ao 350 nm e 660 nm da região espectral visível e, 870 nm, 990 nm e 1240 do infravermelho próximo (Fig. 8).

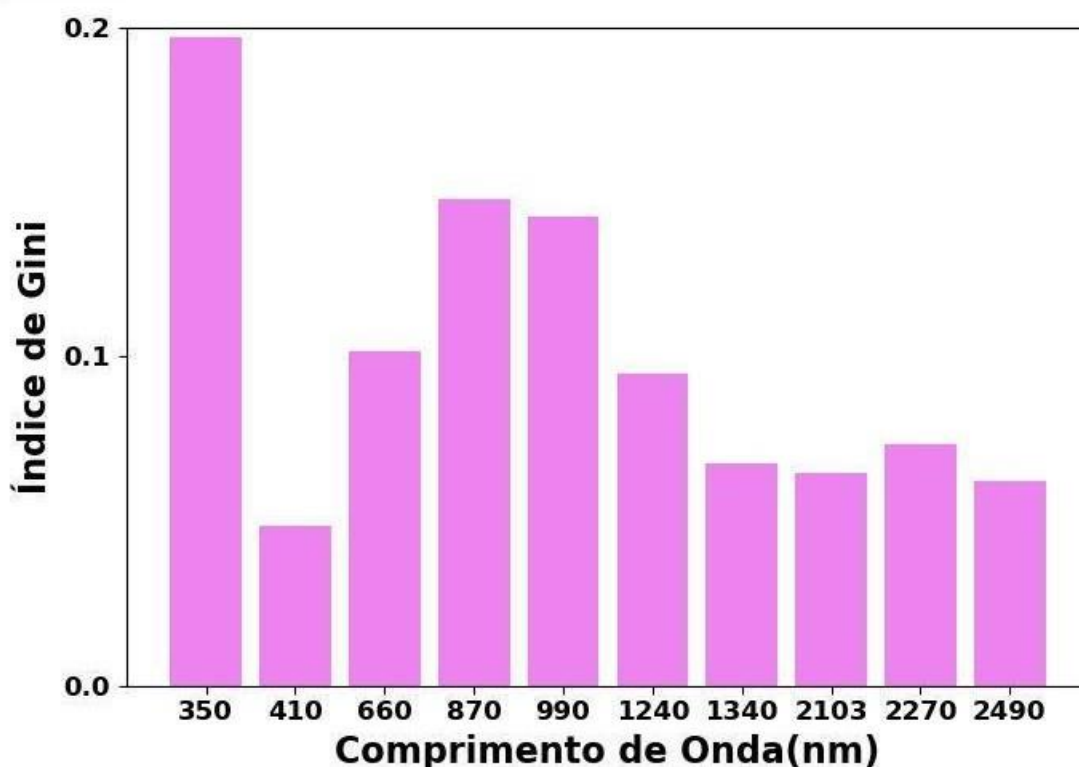


Figura 8. A importância das bandas espectrais medidos pelo RF usando índice de Gini. As variáveis mais importantes são aquelas com o maior índice médio.

4.3 Relação entre espectro e características foliares das espécies e híbridos

Os resultados da análise de variância (ANOVA) evidenciou diferença significativa entre as características morfofisiológicas (comprimento, largura, área foliar, peso seco, peso fresco, área foliar específica e teor de água) entre *I. cavalcantei*, *I. marabaensis* e híbridos (*P*). As características bioquímicas (nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn)) também diferiram entre as espécies e híbridos (*P*).

Tabela 2. Caracterização de parâmetros morfológicos e fisiológicos foliares de híbridos (HB), *I. cavalcantei* (IC) e *I. marabaensis* (IM).

Valores médios atributos morfofisiológicos							
	Comp.(cm)	Larg.(cm)	AF (cm ²)	PF (g)	PS (g)	SLA (cm ² /g)	TA(%)
HB	8.72a	2.02a	14.72a	0.38a	0.07a	216.48a	79.97a
IC	6.95bc	1.68b	9.88bd	0.22bd	0.06bc	165.11bd	70.25bd
IM	8.84ac	0.85c	7.05cd	0.196cd	0.05ac	135.84cd	69.78cd

Tabela 3. Caracterização de parâmetros nutricionais foliares (macronutrientes) de híbridos (HB), *I. cavalcantei* (IC) e *I. marabaensis* (IM).

Valores médios conteúdo nutricional						
Macronutrientes						
	N	P	K	Ca	Mg	S
HB	22.37a	2.07a	20.13a	13.00a	2.63a	4.57a
IC	19.71ac	0.95b	6.19b	11.53ab	5.63b	1.98b

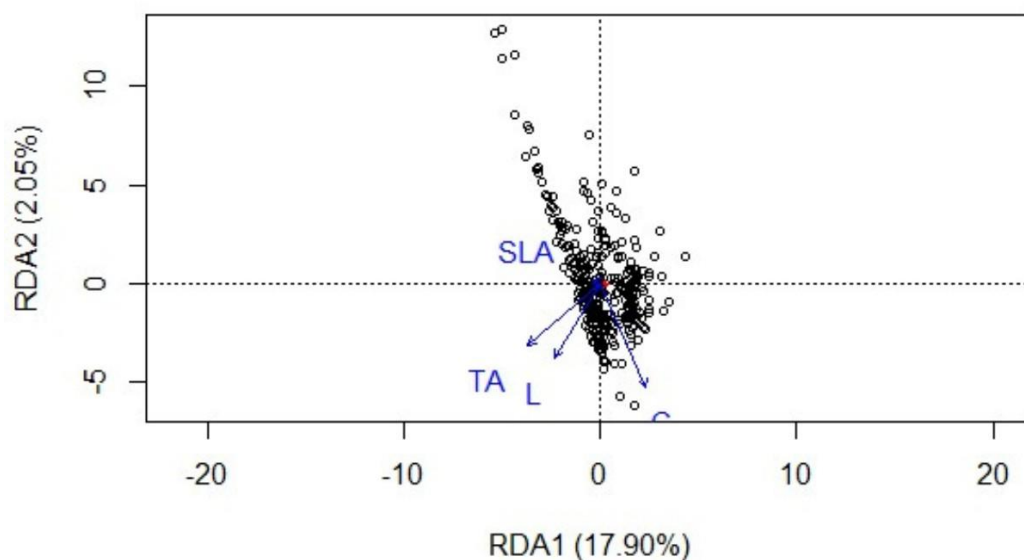
IM	23.90ab	1.32c	7.88c	16.32ac	4.62c	2.70c
-----------	---------	-------	-------	---------	-------	-------

Tabela 4. Caracterização de parâmetros nutricionais foliares (micronutrientes) de híbridos (HB), *I. cavalcantei* (IC) e *I. marabaensis* (IM).

Valores médios conteúdo nutricional					
Micronutrientes					
	B	Cu	Fe	Mn	Zn
HB	66.71a	7.00a	249.42a	34.56a	43.94a
IC	95.59bd	9.24b	1.803bc	370.94ab	26.73bd
IM	110.29cd	12.82c	1.837bc	1.226bc	32.06cd

A RDA demonstrou a importância dos parâmetros morfofisiológicos e bioquímicos em explicar a variação espectral encontrada (Fig. 9.a, 9.b). A maior parte da variabilidade dos espectros de reflectância foliar foi explicada pelo comprimento foliar (8.23%), seguido do teor de água (8.10%) e largura (4.17%), consecutivamente. Considerando o conteúdo bioquímico, a variação espectral foi explicada em maior parte pelo fósforo (6.80%), cálcio (7.34%), enxofre (3.13%) e nitrogênio (2.72%)

a)



b)

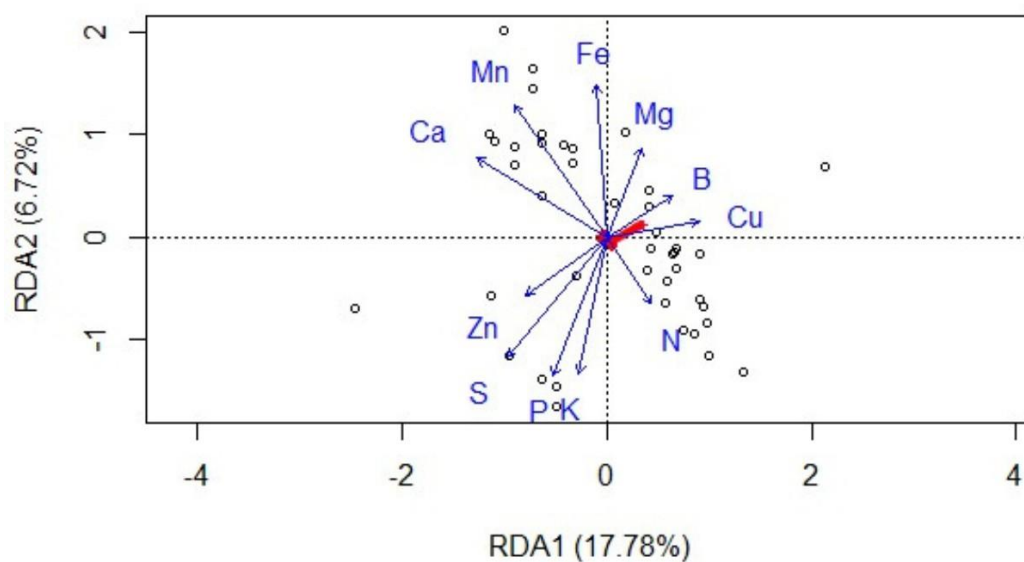


Figura 9. Gráfico RDA. a. RDA mostrando as relações entre as características morfológicas das folhas e as bandas do espectro de reflectância foliar. As variáveis são representadas por setas. a: SLA (SLA), Área foliar (AF) e Teor de água (TA). b. RDA mostrando as relações entre as características bioquímicas das folhas e as

bandas do espectro de reflectância foliar. As variáveis são representadas por setas. **b**: nitrogênio (N). **g**: Fósforo (P). **h**: Potássio (K). **i**: Cálcio (Ca). **j**: Magnésio (Mg). **k**: Enxofre (S). **l**: Boro (B). **m**: Cobre (Cu). **n**: Ferro (Fe). **o**: Manganês (Mn). **p**: Zinco (Zn).

5. DISCUSSÃO

O espectro de reflectância foliar de *Ipomoea cavalcantei*, *Ipomoea marabaensis* e dos indivíduos híbridos apresentaram diferenças significativas na região do visível, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas. Os espectros de reflectância das folhas, em geral, foram caracterizados por picos menos acentuados em indivíduos de *I. marabaensis* em comparação a folhas de *I. cavalcantei* e híbridos. A análise aplicada nesse estudo evidenciou que as bandas mais informativas para diferenciação das espécies estão localizadas na região do visível e do infravermelho próximo. A variação da reflectância foliar encontrada entre as espécies e os híbridos é explicada por variações morfológicas e fisiológicas.

A classificação obtida com o algoritmo Random Forest apresentou uma acurácia global de 85%, evidenciando uma boa performance do modelo. Os resultados da classificação individual das classes apresentaram resultados satisfatórios na separação de *I. cavalcantei* e *I. marabaensis*. No entanto, foi observada uma separabilidade moderada para os indivíduos híbridos (0,47). Os valores de *F1-Scores* encontrados de 0,77, 0,85, 0,58 para *I. cavalcantei*, *I. marabaensis* e híbridos, respectivamente, reforçam a eficiência do modelo utilizado para a classificação dessas duas espécies de forma individual e a baixa precisão de classificação dos híbridos. Considerando o desbalanceamento na quantidade de amostras de indivíduos híbridos em comparação às outras duas espécies, aumentar dados para essa classe pode ser uma estratégia para garantir uma representação mais justa e eficaz, melhorando a qualidade do treinamento do modelo, como mencionado por Castro e Braga (2011). Isso pode ajudar a melhorar a capacidade do modelo *Random Forest* em realizar previsões mais robustas da classe

sub-representada. Por outro lado, a complexidade inerente à diferenciação entre as espécies parentais e seus híbridos pode estar, também, atribuída às características herdadas de ambas as espécies parentais, uma vez que os híbridos apresentam uma combinação de características genéticas, resultando em fenótipos com características intermediárias (por exemplo, Barbour *et al.* 2003, Meddings *et al.* 2003).

Na região visível do espectro eletromagnético, que abrange de 400 a 700 nm, a reflectância das folhas vegetais é relativamente baixa, conforme observado por Novo (1989). A absorção da radiação incidente nesses comprimentos de onda é devida a duas bandas de absorção da clorofila (azul e vermelha), e o pico de reflectância nesta região ocorre na área do verde (Coura *et al.* 2005). De acordo com Goel (1988), concentrações mais elevadas de pigmentos fotossintéticos resultam em maior absorção e, conseqüentemente, em menor reflectância na faixa visível. Nesse intervalo, a análise visual do comportamento espectral revela diferenças sutis entre *I. cavalcantei*, *I. marabaensis* e híbridos. No entanto, as bandas espectrais de 350 nm (ultravioleta), com a maior importância de Gini calculada e, o 660 nm, na área do vermelho, foram identificadas como importantes na diferenciação das classes nesse intervalo.

Por outro lado, na região do infravermelho próximo (700-1300 nm) observa-se uma alta taxa de reflectância (Hoffer 1978, Curran 1989). De acordo com Jensen (2009), a região do infravermelho próximo é a região em que apresenta a maior reflectância foliar, a interação com a estrutura interna das folhas, caracterizada pela presença do mesófilo esponjoso, do número de interfaces ar-água, bem como o tamanho das células e organelas direcionarem uma alta porcentagem da radiação eletromagnética para a superfície foliar, ou seja, a influência predominante é da estrutura interna da folha e do teor de água (Asner 1998, Artigas & Yang 2005). Quanto mais lacunosa a estrutura interna das folhas, maior será o espalhamento interno e, conseqüentemente, maior será a reflectância (Ponzoni *et al.* 2012, Strabeli *et al.* 2020). Nessa região, *I. marabaensis* destaca-se com menor valor de reflectância, *I. cavalcantei* e indivíduos híbridos apresentam comportamento

espectral sobreposto. Essa região contém três dos cinco comprimentos de onda mais importantes para diferenciação das espécies, o 870 nm, 990 nm e 1240 nm.

Por fim, na faixa do infravermelho de ondas curtas, que compreende de 1300-2500 nm, observa-se uma significativa redução na reflectância. Esse intervalo, possui fortes bandas de absorção devido à presença do conteúdo de água, resultando em uma significativa redução na reflectância das folhas (Moreira 2005, Novo 2008, Jensen 2009). De acordo com Ponzoni et al. (2012), quanto maior o conteúdo de água nas folhas, maior será a absorção, conseqüentemente, menor será a reflectância. Nessa região, *I. cavalcantei* e híbridos apresentaram picos de reflectância sobrepostos e mais pronunciados que *I. marabaensis*. Para esse intervalo, não foi evidenciado relevância significativa de bandas espectrais na diferenciação das espécies e híbridos. De acordo com Shang & Chisholm (2014), a seleção de bandas dentro ou perto de características de absorção de água pode não ser apropriada para classificação espectral, devido aos altos níveis de ruído.

É amplamente relatado que a assinatura espectral foliar reflete um conjunto diversificado de propriedades foliares, como morfologia, composição bioquímica e estrutural, que influenciam na absorção e dispersão das ondas que a atingem (Gamon et al. 1992, Penuelas & Filella 1998, Asner et al. 1998, Ponzoni et al. 2012). O presente estudo confirma a importância de parâmetros morfofisiológicos em explicar a variação espectral intra e interespecífica das espécies e indivíduos híbridos estudados. Especificamente, os resultados desse estudo demonstraram uma maior importância do comprimento e largura foliar, teor de água, cálcio, nitrogênio, fósforo e enxofre em explicar a variabilidade espectral encontrada.

Considerando que as características de reflectância das folhas são influenciadas pelos pigmentos fotossintetizantes (Gates, 1965), pelas propriedades ópticas das folhas que dependem das estruturas celulares internas (Moreira, 2003), e conseqüentemente das ligações presentes na água e compostos bioquímicos estruturais (Gausman, 1977; Asner, 1998; Homolová et al., 2013). A importância do comprimento da folha em explicar a variação espectral observada pode ser atribuída ao comprimento poder influenciar a distribuição dos pigmentos ao longo da estrutura foliar, resultando em diferenças na absorção e reflectância da luz. A influência da

largura da folha pode ser justificada pela diferença da área de superfície foliar exposta à luz do sensor, afetando, assim, a quantidade de luz absorvida e, conseqüentemente, os valores de reflectância. Além desses fatores morfológicos, é importante ressaltar o papel da água como absorvedor significativo de luz em determinadas bandas espectrais, ou seja, a diferença no teor de água resulta na mudança de absorção de água, conseqüentemente, na reflectância. Por fim, a importância de macronutrientes no processo fotossintético, composição bioquímica, assim como, na composição estrutural das paredes celulares, pode explicar a variação espectral explicada pelo teor de nitrogênio, fósforo, cálcio e enxofre encontrada (Malavolta, 1985; Harper, 1994; Briat et al., 1995; Mengel & Kirkby, 2000; Leghari et al., 2016). Essa relação entre a assinatura espectral e os parâmetros morfofisiológicos aqui estudados fortalece a compreensão dos processos subjacentes à resposta espectral das plantas já elucidados.

A análise da reflectância espectral a nível de folha representa o primeiro passo para criar identificadores e analisar diferentes espécies em maior escala (Ross 1989), por exemplo, através de imagens de satélite e veículos aéreos não tripulados (drones) com câmeras hiperespectrais. No contexto do monitoramento da vegetação, destaca-se as vantagens da espectrometria de reflectância em relação a métodos tradicionais de identificação de plantas em campo e laboratórios, por ser um método não invasivo e nem destrutivo (Sun et al. 2018). A sua aplicação reduz a dependência de especialistas em cada categoria taxonômica para identificação de espécies em campo, diminuindo o tempo necessário para obtenção de dados (Deiner et al. 2017). Além disso, visto eliminar a necessidade de acesso físico à área de estudo, conseqüentemente, reduz os riscos operacionais associados ao acesso das áreas com atividades de mineração e os custos com trabalho de campo. Considerando esses aspectos, juntamente com os resultados obtidos neste estudo, a aplicação da técnica aqui apresentada deve ser levada em consideração para realizar o monitoramento de *I. cavalcantei* em áreas ameaçadas por atividades mineradoras nas cangas da Serra de Carajás.

6. CONCLUSÃO

A classificação de *I. cavalcantei* e *I. marabaensis* apresentaram uma alta separabilidade com base em dados hiperespectrais de reflexão foliar, enquanto os indivíduos híbridos apresentaram uma separabilidade moderada. Os resultados indicam que as bandas espectrais da região do visível (350 nm e 660 nm) e do infravermelho próximo (870 nm, 990 nm, 1240 nm) foram mais informativas para a separabilidade das classes estudadas. Os parâmetros morfofisiológicos aqui estudados fortaleceram o entendimento dos processos subjacentes à variação na resposta espectral das plantas já elucidados.

A abordagem aqui utilizada apresenta potencial promissor para ser implementada em grande escala por meio da utilização de sensoriamento remoto, permitindo, com precisão, a identificação de *Ipomoea cavalcantei* e *Ipomoea marabaensis* com base em um método rápido e não invasivo. O conhecimento da assinatura espectral é crucial para identificar locais de ocorrência e conservar habitats críticos de *I. cavalcantei*, a fim de assegurar sua conservação a longo prazo. Adicionalmente, sugere-se, que estudos futuros avaliem a variação espectral considerando aspectos fenológicos das espécies incluindo amostras que contemplem toda a sua distribuição geográfica, assim como, estudos visando a automatização da detecção remota com sensores hiperespectrais para o monitoramento das populações.

7. REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, J. M. G. Carajás: desafio político, ecologia e desenvolvimento. Brasília: CNPq, 361 p, 1986.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, p. 711-728, 2013.
- ANDERSON, M. J. A new method for non-parametric multivariate analysis of variance. *Austral Ecology*, v. 26, p. 32-46, 2001.
- ARTIGAS, F. J. & YANG, J. S. Hyperspectral remote sensing of marsh species and plant vigour gradient in the New Jersey Meadowlands. *International Journal of Remote Sensing*, v. 26, n. 23, p. 5209–5220, 2005.
- ASD – Analytical Spectral Devices. *FieldSpec® 3 User Manual*. Boulder CO, 110 p, 2010.
- ASNER, G. P. Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*, v. 64, n. 3, p. 234–253, 1998.
- ASNER, G. P. et al. Functional and Biological Diversity of Foliar Spectra in Tree Canopies throughout the Andes to Amazon Region. *New Phytologist*, v. 204, n. 1, p. 127–39, 2014.
- ASNER, G. P.; MARTIN, R. E. Spectral and Chemical Analysis of Tropical Forests: Scaling from Leaf to Canopy Levels. *Remote Sensing of Environment*, v. 112, n. 10, p. 3958–70, 2008.
- AUSTIN, D. F.; SECCO, R. de S. *Ipomoea marabaensis*, nova Convolvulaceae da Serra dos Carajás (PA). *Bol. Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Botânica*, v. 4, n. 2, 1988.
- AVIÑA-HERNÁNDEZ, J. et al. Predictive performance of random forest on the identification of mangrove species in arid environments. *Ecological Informatics*, v. 75, p. 102040, 2023.

BABIYCHUK, E. et al. Natural history of the narrow endemics *Ipomoea cavalcantei* and *I. marabaensis* from Amazon Canga savannahs. *Scientific Reports*, v. 7, p. 7493, 2017.

BREIMAN, L. Random forests. *Machine Learning*, v. 45, n. 1, p. 5-32, 2001.

BREIMAN, L.; CUTLER, A. Setting up, using, and understanding random forests 4. University of California, Department of Statistics, 2003.

CAVENDER-BARES, J. et al. Ecological Monographs MULTIPLE TRAIT ASSOCIATIONS IN RELATION TO HABITAT DIFFERENTIATION AMONG 17 FLORIDIAN OAK SPECIES. *Ecological Monographs*, v. 74, 2004.

CAVENDER-BARES, J. et al. Associations of Leaf Spectra with Genetic and Phylogenetic Variation in Oaks: Prospects for Remote Detection of Biodiversity. *Remote Sensing*, v. 8, n. 3, p. 221, 2016.

CONGALTON, R. G. & GREEN, K. Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data Principles and Practices. Lewis Publishers, Boca Raton, 1999.

CORNWELL, W. et al. Functional distinctiveness of major plant lineages (A Austin, Ed.). *Journal of Ecology*, 102, 345–356, 2014.

CRAWFORD, M. M. et al. Random forests of binary hierarchical classifiers for analysis of hyperspectral data. *IEEE Workshop on Advances in Techniques for Analysis of Remotely Sensed Data*, 2003.

CURRAN, P. J. Remote sensing of foliar chemistry. *Remote Sensing of Environment*, v. 30, n. 3, p. 271-278, 1989.

DANNER, M. et al. Spectral Sampling with the ASD FIELDSPEC 4. 2015.

DEL'ARCOSANCHES et al. Influência do tempo após a coleta de folhas na reflectância e transmitância. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., p. 2605-2612, 2003.

DEINER, K. et al. Environmental DNA metabarcoding: Transforming how we survey animal and plant communities. *Molecular Ecology*, v. 26, n. 21, p. 5872-5895, 2017.

ERUDEL, T. et al. Criteria Comparison for Classifying Peatland Vegetation Types Using In Situ Hyperspectral Measurements. *Remote Sensing*, v. 9, n. 7, p. 748, 2017.

FERREIRA, M. P. et al. Mapping tree species in tropical seasonal semi-deciduous forests with hyperspectral and multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, v. 179, p. 66–78, 2016.

FREITAS, M. L. D. Algumas considerações sobre a região-programa. In: ALMEIDA, J. M. G. (org.). *Carajás: desafio político, ecologia e desenvolvimento*. Brasília: CNPq, Pp 22-29, 1986.

GAMON, J. A. et al. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of Environment*, v. 41, p. 35-44, 1992.

GAUSMAN, H. W. Reflectance of leaf components. *Remote Sensing of Environment*, v. 6, n. 1, p. 1–9, 1977.

GATES, D. M. et al. Spectral Properties of Plants. *Applied Optics*, v. 4, n. 1, p. 11-20, 1965.

GIULIETTI, A. M. et al. Edaphic Endemism in the Amazon: Vascular Plants of the Canga of Carajás, Brazil. *Botanical Review*, v. 85, n. 4, p. 357–83, 2019.

GIULIETTI, A. M. et al. *Plantas raras do Brasil*. Belo Horizonte: Conservação Internacional, 2009.

GRABSKA, E. et al. Evaluation of machine learning algorithms for forest stand species mapping using Sentinel-2 imagery and environmental data in the Polish Carpathians. *Remote Sensing of Environment*, v. 251, p. 112103, 2020.

GRANITTO, P. et al. Recursive Feature Elimination with Random Forest for PTR-MS analysis of agroindustrial products. *Chem Intell Lab Sys*, v. 83, p. 83–90, 2006.

GROBE-STOLTENBERG, A. et al. Evaluation of Continuous VNIR-SWIR Spectra versus Narrowband Hyperspectral Indices to Discriminate the Invasive *Acacia longifolia* within a Mediterranean Dune Ecosystem. *Remote Sensing*, v. 8, n. 4, p. 334, 2016.

GRUPO BRASIL FLORA [BFG]. Crescendo o conhecimento: um panorama da diversidade de plantas com sementes no Brasil. *Rodriguésia*, v. 66, p. 1085–1113, 2015.

HAIR, J. F. et al. *Análise Multivariada de Dados*. 5ª ed. Bookman, Porto Alegre, 2005.

HAM, J. et al. Investigation of the random forest framework for classification of hyperspectral data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 43, 492–501, 2005.

HOFFER, R. M. Biological and physical considerations in applying computer-aided analysis techniques to remote sensor data. In: SWAIN, P. H.; DAVIS, S. M. *Remote Sensing: the Quantitative Approach*. McGraw-Hill, p. 228-289, 1978.

JACQUEMOUD, S. & USTIN, S. Leaf optical properties: A state of the art. In: *Proceedings of the 8th International Symposium Physical Measurements & Signatures in Remote Sensing (CNES)*, 2001.

JENSEN, J. R. *Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos naturais*. São José dos Campos, SP: Parêntese, 2009.

KATTGE, J. et al. TRY - a global database of plant traits. *Global Change Biology*, v. 17, p. 2905–2935, 2011.

KUMAR, L. A comparison of reflectance characteristics of some Australian eucalyptus species based on high spectral resolution data — discriminating using the visible and NIR regions. *Journal of Spatial Science*, v. 52, n. 2, p. 51–64, 2007.

LAWRENCE, R. L. et al. Mapping invasive plants using hyperspectral imagery and Breiman Cutler classifications (randomForest). *Remote Sensing of Environment*, v. 100, n. 3, p. 356-362, 2006.

- LEGHARI, S. J. et al. Role of nitrogen for plant growth and development: a review. *Advances in Environmental Biology*, v. 10, n. 9, p. 209+, Sept. 2016.
- LEHMANN, J. R. K. et al. Field Spectroscopy in the VNIR-SWIR Region to Discriminate between Mediterranean Native Plants and Exotic-Invasive Shrubs Based on Leaf Tannin Content. *Remote Sens.*, v. 7, p. 1225-1241, 2015.
- LEVIN, D. A. et al. Hybridization and the extinction of rare plant species. *Conservation Biology*, v. 10, p. 10–16, 1996.
- LIGGES, U. et al. Package 'signal'. p.1–68, 2015.
- MALAVOLTA, E. Nutrição mineral. In: FERRI, M. G. (Ed.). *Fisiologia vegetal 1*. São Paulo: EPU, p. 97-116, 1985.
- MARTINELLI, G. & MORAES, M. A. (orgs). *Livro vermelho da Flora do Brasil*. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 1100p, 2013.
- MCMANUS, K. et al. Phylogenetic Structure of Foliar Spectral Traits in Tropical Forest Canopies. *Remote Sensing*, v. 8, p. 196, 2016.
- MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. *Principios de nutrición vegetal*. Basel, Switzerland: International Potash Institute, 692p, 2000.
- MEDDINGS, R. A. et al. *Eucalyptus camaldulensis globulus hybrids*. *Australian Journal of Botany*, v. 51, p. 319–331, 2003.
- MENZE, B. H. et al. A comparison of random forest and its Gini importance with standard chemometric methods for the feature selection and classification of spectral data. *BMC bioinformatics*, v. 10, n. 1, p. 213, 2009.
- MOREIRA, M. A. *Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação*. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 208p, 2001.
- MOREIRA, M. A. *Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação*. UFV, Viçosa, MG, 2003.

MORAES, E. C. Fundamentos de Sensoriamento Remoto. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2002.

MOTA, N. F. O. et al. Vegetação sobre Sistemas Ferruginosos da Serra dos Carajás. In: CARMO, F. F. & KAMINO, L. H. Y. Geossistemas Ferruginosos no Brasil. Belo Horizonte: Instituto Prístino, Pp. 289-315, 2015.

MOTA, N. F. O. et al. Cangas da Amazônia: a vegetação única de Carajás evidenciada pela lista de fanerógamas. Rodriguésia, v. 69, n. 3, p. 1435–1488, 2018.

MURAKAMI, K. & MATSUDA, R. Optical and Physiological Properties of a Leaf. In: Home LED Lighting for Urban Agriculture. Springer, p. 1-9, 2016.

NAIDOO et al. Classification of savanna tree species, in the Greater Kruger National Park region, by integrating hyperspectral and LiDAR data in a Random Forest data mining environment. , v. 69, n. none, p. 167–179, 2012.

NEMBRINI, S. et al. The revival of the Gini importance? Bioinformatics, v. 34, n. 21, p. 3711-3718, 2018.

NOVO, E. M. L. de M. Sensoriamento remoto: princípios e aplicações. São Paulo: Blucher, 387p, 2008.

NUNES, J. A. et al. Soil-vegetation relationships on a banded ironstone ‘island’, Carajás Plateau, Brazilian Eastern Amazonia. Anais da Academia Brasileira de Ciências, n. 87, v. 4, p. 2097–2110, 2015.

OKSANEN, J. et al. vegan: Community Ecology Package. R package, version 2.2-1.

PENUELAS, J. et al. Visible and Near-Infrared Reflectance Techniques for Diagnosing Plant Physiological Status. Trends in Plant Science, v. 3, n. 4, p. 151-156, 1998.

PONZONI, F. J. et al. Sensoriamento Remoto da Vegetação. São José dos Campos, SP: Oficina de Textos, 2ª edição. 176 p, 2012.

PROSPERE, K. et al. Plant Species Discrimination in a Tropical Wetland Using In Situ Hyperspectral Data. *Remote Sensing*, v. 6, n. 9, p. 8494-8523, 2014.

PORTIGAL, F. et al. Vegetation classification using red edge first derivative and green peak statistical moment indices with the advanced airborne hyperspectral imaging system (AAHIS). In: 3rd Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, 2, p. 789-797, 1997.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2022.

REICH, P. B. et al. The evolution of plant functional variation: traits, spectra, and strategies. *International Journal of Plant Sciences*, v. 164, 2003.

RODRIGUES, M. et al. Geostatistical Modeling and Conservation Implications for an Endemic Ipomoea Species in the Eastern Brazilian Amazon. *Journal for Nature Conservation*, v. 57, 2020.

SAVITZKY, A. & GOLAY, M. J. E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry*, v. 36, p. 1627, 1964.

SCHETTINI, A. T. et al. Exploring Al, Mn and Fe phytoextraction in 27 ferruginous rocky outcrops plant species. *Flora*, v. 238, p. 175-182, 2018.

SCHMIDT, K. S. & SKIDMORE, A. K. Spectral discrimination of vegetation types in a coastal wetland. *Remote Sensing of Environment*, v. 85, p. 92–108, 2003.

SHANG, X. & CHISHOLM, L. A. Classification of Australian Native Forest Species Using Hyperspectral Remote Sensing and Machine-Learning Classification Algorithms. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, v. 7, n. 6, p. 2481–2489, 2014.

SIGNORELL, A. et al. DescTools: Tools for Descriptive Statistics. R package version 0.99.47, 2022.

SKIRYCZ, A. et al. Canga biodiversity, a matter of mining. *Frontiers in Plant Science*, v. 5(), p. , 2014.

SIMÃO-BIANCHINI, R. et al. Flora Das Cangas Da Serra Dos Carajás, Pará, Brasil: Convolvulaceae. *Rodriguesia*, v. 67, n. 5, p. 1301–18, 2016.

SOUZA, E. B. de et al. Dynamical Downscaling for Railroad Areas in Eastern Amazon and Southeastern Brazil: Current Climate and Near-Future Projections. *Atmospheric and Climate Sciences*, v. 4, n. 2, p. 155-163, abr. 2014.

STAGGS, J. Savitzky–golay smoothing and numerical differentiation of cone calorimeter mass data, *Fire Safety Journal*, v. 40, n. 6, p. 493–505, 2005.

SUN, J. et al. Analyzing the performance of PROSPECT model inversion based on different spectral information for leaf biochemical properties retrieval. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 135, p. 74-83, 2018.

TODESCO, M. et al. Hybridization and extinction. *Evolutionary Applications*, v. 9, n. 7, p. 892–908, 2016.

USTIN et al. Using Imaging Spectroscopy to Study Ecosystem Processes and Properties. *BioScience*, v. 54, n. 6, p. 523–534, 2004.

VAIPHASA, C. et al. A hyperspectral band selector for plant species discrimination. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, v. 62, n. 3, p. 225-235, 2007.

VASCONCELOS, L. V. et al. Diversity and distribution of Convolvulaceae Juss. in the Canga of Carajás, Eastern Amazon. *Rodriguésia*, v. 70, n. 4, p. 1913-1927, 2019.

VIANA, P. L. & ALMEIDA, S. S. Biodiversidade de Briófitas em Floresta de Campinarana em Carajás, Pará, Brasil. *Revista Brasileira de Botânica*, v. 34, n. 1, p. 1-10, 2011.

VIANA, P. L. et al. Flora das cangas da Serra dos Carajás, Pará, Brasil: história, área de estudo e metodologia. *Rodriguésia*, v. 67, p. 1107–1124, 2016.

WAGNER, F. et al. High Resolution Satellite Data Improve the Estimation of Biomass and Biodiversity in a Northern Brazilian Amazon Forest. *Remote Sensing*, v. 11, n. 3, p. 293, 2019.

WEINSTEIN, B. G. et al. Defaunation and habitat disturbance interact synergistically to alter seedling recruitment. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 281, n. 1778, p. 20133099, 2014.

WESTMAN, W. E. & PRICE, C. V. Remote detection of air pollution stress to vegetation: laboratory level studies. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (Ann Arbor: University of Michigan)*, p. 451–456, 1987.

WICKHAM, H. *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York, 2016.

WILKE, C. O. *cowplot: Streamlined Plot Theme and Plot Annotations for 'ggplot2'*. R package version 1.1.1, 2020.

ZHANG, Y. et al. Species-level differences in hyperspectral metrics among tropical rainforest trees as determined by a tree-based method. *Remote Sensing of Environment*, v. 215, p. 65-79, 2018.

ZUUR, A. F. et al. A protocol for data exploration to avoid common statistical problems. *Methods in Ecology and Evolution*, v. 1, p. 3-14, 2010.