

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Instituto de Ciências Biológicas
Programa de Pós-Graduação em Biologia Vegetal

Pablo Burkowski Meyer

**ESTUDOS DO HABITAT E DAS RELAÇÕES ECOLÓGICAS DA ESPÉCIE
MICROENDÊMICA *NICOTIANA GANDARELA* AUGSTEN & STEHMANN
(SOLANACEAE) REVELAM A IMPORTÂNCIA DA CONSERVAÇÃO DA
GEODIVERSIDADE NO QUADRILÁTERO FERRÍFERO**

Belo Horizonte

2024

Pablo Burkowski Meyer

**ESTUDOS DO HABITAT E DAS RELAÇÕES ECOLÓGICAS DA ESPÉCIE
MICROENDÊMICA *NICOTIANA GANDARELA* AUGSTEN & STEHMANN
(SOLANACEAE) REVELAM A IMPORTÂNCIA DA CONSERVAÇÃO DA
GEODIVERSIDADE NO QUADRILÁTERO FERRÍFERO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biologia Vegetal do Departamento de Botânica do Instituto de Ciências Biológicas da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Biologia Vegetal.

Orientador: Prof. Dr. João Renato Stehmann

Coorientador: Prof. Dr. Adriano Valentin da Silva

Belo Horizonte

2024

043

Meyer, Pablo Burkowski.

Estudos do habitat e das relações ecológicas da espécie microendêmica *Nicotiana gandarela* Augsten & Stehmann (Solanaceae) revelam a importância da conservação da geodiversidade no Quadrilátero Ferrífero [manuscrito] / Pablo Burkowski Meyer. – 2024.

125 f. : il. ; 29,5 cm.

Orientador: Prof. Dr. João Renato Stehmann. Coorientador: Prof. Dr. Adriano Valentin da Silva.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Biológicas. Programa de Pós-Graduação em Biologia Vegetal.

1. Desenvolvimento Vegetal. 2. Fenologia vegetal. 3. Solanaceae. I. Stehmann, João Renato. II. Silva, Adriano Valentin da. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Ciências Biológicas. IV. Título.

CDU: 581



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
COLEGIADO DO CURSO DE PÓS GRADUAÇÃO EM BIOLOGIA VEGETAL

PABLO BURKOWSKI MEYER

DATA DA DEFESA: 23/08/2024 NÚMERO DE MATRÍCULA: 2022664994

ENTRADA: 2022/1

CPF: 063.678.556-45

**"ESTUDOS DO HABITAT E DAS RELAÇÕES ECOLÓGICAS DA ESPÉCIE
MICROENDÊMICA *NICOTIANA GANDARELA* AUGSTEN & STEHMANN
(SOLANACEAE) REVELAM A IMPORTÂNCIA DA CONSERVAÇÃO DA
GEODIVERSIDADE NO QUADRILÁTERO FERRÍFERO"**

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada, no dia 23 de agosto de 2024, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós Graduação em Biologia Vegetal da Universidade Federal de Minas Gerais constituída pelos seguintes professores:

Dr. João Renato Stehmann (UFMG)

Dr. Flávio Fonseca do Carmo (Instituto Prístino)

Dra. Yasmine Antonini Itabaiana (Universidade Federal de Ouro Preto)

Belo Horizonte, 23 de agosto de 2024.

Assinatura dos membros da banca examinadora

Assinatura da coordenação



Documento assinado eletronicamente por **João Renato Stehmann, Professor do Magistério Superior**, em 23/08/2024, às 19:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Flávio Fonseca do Carmo, Usuário Externo**, em 24/08/2024, às 11:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Yasmine Antonini Itabaiana, Usuária Externa**, em 26/08/2024, às 13:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3428245** e o código CRC **8DB4133D**.

*À memória de Cláudia Elizabeth Burkowski
Meyer (1952 – 2023), pela imensa sabedoria e
ensinamentos frente aos afloramentos rochosos
da vida...*

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. João Renato Stehmann por todos os ensinamentos, sempre valiosos, pela orientação exemplar do início ao fim deste trabalho, amizade e total apoio durante os momentos mais difíceis que passei nesta trajetória.

Ao Prof. Dr. Adriano Valentin da Silva pela excelente coorientação, pelos ensinamentos em fenologia e várias horas disponibilizadas para me auxiliar em durante o processo, análise e discussão dos resultados.

Ao Dr. Flávio Fonseca do Carmo e Dra. Yasmine Antonini Itabaiana pela leitura cuidadosa e ricas contribuições para o aperfeiçoamento deste trabalho.

Aos Drs. Felipe Della Torre e Tiago Vilas Boas pelas imensas contribuições nos temas de ecofisiologia e valorosos ensinamentos de campo e laboratório. Ao Davi Oliveira (Sharma) pelo imenso apoio em campo.

Aos professores Drs. Theo Rolla Paula Mota, Fernando Augusto de Oliveira e Silveira, Clemens Peter Schlindwein, Marcel Giovanni Costa França, pelos vários ensinamentos e disponibilização de equipamentos e estrutura em laboratórios.

Ao Instituto Prístino pelo empréstimo de equipamentos de campo.

À Dra. Mariana Augsten pelas contribuições e discussões que ajudaram a formatar o delineamento deste projeto.

À CAPES pela concessão da bolsa, fator essencial para o desenvolvimento deste projeto.

À Glorinha do Caburé, guardiã da Serra do Gandarela e da *Nicotiana gandarela*, pela amizade, recepção e prosas durante as mais de trinta campanhas de campo... Sem o seu apoio logístico esse trabalho seria simplesmente inviável...

Aos amigos do grupo Zuvenva que me proporcionaram tantos momentos de gargalhadas, compartilhamentos diários, companhia e leveza durante todo esse trajeto, Pat, Nelson e Ciriaco...

Ao pessoal da Phonocoria, Leandro, Lu, Pezzuti e Chacon, pela companhia e momentos de expressão e criação artística, tão importantes para manter a mente sã...

À Carla, companheira de todos os momentos, por me incentivar e apoiar desde sempre, por todo o carinho e amor, inspirações, motivações, alegrias e gargalhadas...

À minha mãe, guerreira, exemplo maior de força e resistência, minha maior influência botânica... Sempre-viva!

Ao meu pai, por me ensinar desde cedo a andar no mato, desbravar cantos esquecidos, subir e descer montanhas...

À minha avó ÍA, a bisa, sempre interessada nos mínimos detalhes dos campos, por todo o carinho e orações protetoras...

À Nádia e Nando, outros dois guerreiros, me apoiando incondicionalmente e dividindo sufocos incontáveis...

Ao Matuco e Luanzito, fontes de alegria e motivação infinitas!

Muito grato!!!

RESUMO

Espécies microendêmicas e/ou ameaçadas de extinção, com escassos conhecimentos acerca de suas exigências ecológicas, necessitam investimentos urgentes em pesquisas para subsidiar diretrizes de conservação. O objeto de estudo se trata da espécie microendêmica *Nicotiana gandarela* Augsten & Stehmann, família Solanaceae, com ocorrência exclusiva para a localidade de André do Mato Dentro, Serra da Gandarela, Santa Bárbara, MG, Brasil. Como objetivo geral pretendeu-se caracterizar a fenologia, aspectos ecofisiológicos, elementoma e requerimentos ambientais da espécie, de forma a identificar os principais fatores/filtros ambientais envolvidos em seu caráter microendêmico, assim como sua atual distribuição de populações. Os estudos fenológicos contemplaram as fenofases reprodutivas e vegetativas, com frequência quinzenal, durante 17 meses. Concomitantemente foi feito o registro das variáveis microclimáticas de umidade do ar e temperatura, por meio de *datalogger*, para identificar possíveis associações fenológicas com as variáveis microclimáticas. Para os estudos ecofisiológicos, foi realizada a caracterização da intensidade luminosa e o espectro luminoso utilizando um espectrômetro, com três medições durante o dia, 8hs, 12hs e 15hs. As análises de trocas gasosas foram realizadas com um analisador portátil de gases infravermelho (IRGA), com câmara acoplada de abertura de 6 cm² com uma fonte de luz LED. A taxa de transporte de elétrons (ETR) em relação à intensidade luminosa foi obtida a partir de curvas rápidas de luz utilizando um fluorômetro. A área foliar específica (AFE) foi calculada com base na área foliar (AF) e massa seca foliar (MS), pela fórmula $AFE = AF/MS$, sendo área foliar obtida por meio de fotografia e processamento digital das imagens. Os pigmentos fotossintetizantes foram extraídos em DMSO (Dimetilsulfóxido) acondicionado em vidros âmbar armazenados por 48 horas em condições escuras e sob temperatura ambiente (22 ± 2 °C) e quantificados em um leitor espectrofotômetro para os comprimentos de onda: 480, 649 e 665nm. O teor de clorofilas totais (Ca+b), razão entre clorofila a e b (Ca/b), e razão entre clorofilas e carotenoides (clorofila total/carotenoides) também foram calculadas. Para análises comparativas de solo foram obtidas amostras nos microhabitats das populações conhecidas, assim como em ambientes similares na Serra da Gandarela, com presença de lapas de afloramentos dolomíticos, durante a busca por novos registros de populações. Com relação ao perfil fenológico, a espécie apresentou maior proporção de indivíduos anuais, com fenologia reprodutiva concentrada na estação seca, com certa defasagem fenológica entre subpopulações e indivíduos avaliados. Foi identificada associação potencial de grande parte das fenofases com a variável de umidade do ar, sendo as demais variáveis eliminadas, devido a ocorrência de multicolinearidade. A raridade da espécie está atrelada à sua adaptação evolutiva e restritiva aos ambientes intensamente sombreados e formados pelos afloramentos rochosos carbonáticos (dolomíticos), nos quais o solo apresenta altos valores de pH, magnésio e silte. Os resultados das análises de solo e demais características dos microhabitats estudados, juntamente com as evidências obtidas para o elementoma de *N. gandarela*, indicam a existência potencial de uma comunidade florística altamente especializada (dolomitófitas) e singular no complexo de afloramentos dolomíticos e de mármore dolomíticos da formação Gandarela distribuída no Quadrilátero Ferrífero.

Palavras-chave: microendemismo; plantas de sombra; afloramentos dolomíticos; elementoma; dolomitofilia

ABSTRACT

Microendemic and/or endangered species, with little knowledge about their ecological requirements, need urgent investment in research to support conservation guidelines. The subject of this study is the microendemic species *Nicotiana gandarela* Augsten & Stehmann, Solanaceae family, which occurs exclusively in the locality of André do Mato Dentro, Serra da Gandarela, Santa Bárbara, MG, Brazil. The general objective was to characterize the phenology, ecophysiological aspects, elementome, environmental requirements of the species, in order to identify the main environmental factors/filters involved in its microendemic character, as well as its current distribution of occurrences. The phenological studies covered the reproductive and vegetative phenophases, every two weeks for 17 months. At the same time, the microclimatic variables of air humidity and temperature were recorded using a datalogger in order to identify possible phenological associations with the microclimatic variables. For the ecophysiological studies, the light intensity and light spectrum were characterized using a spectrometer, with three measurements during the day, 8am, 12pm and 3pm. Gas exchange analysis was carried out using a portable infrared gas analyzer (IRGA), with a 6 cm² aperture camera coupled with an LED light source. The electron transport rate (ETR) in relation to light intensity was obtained from rapid light curves using a fluorometer. The specific leaf area (SFA) was calculated based on leaf area (LA) and leaf dry mass (DM), using the formula $SFA = LA/DM$, with leaf area obtained through photography and digital image processing. The photosynthesizing pigments were extracted in DMSO (Dimethylsulphoxide) stored in amber glasses for 48 hours in dark conditions and at room temperature (22 ± 2 °C) and quantified in a spectrophotometer reader for the following wavelengths: 480, 649 and 665nm. The content of total chlorophylls (Ca+b), the ratio between chlorophyll a and b (Ca/b), and the ratio between chlorophylls and carotenoids (total chlorophyll/carotenoids) were also calculated. For comparative soil analyses, samples were obtained from the microhabitats of the known populations, as well as from similar environments in the Serra da Gandarela, with the presence of dolomite outcrops, during the search for new population records. With regard to the phenological profile, the species had a higher proportion of annual individuals, with reproductive phenology concentrated in the dry season, with a certain phenological lag between subpopulations and individuals evaluated. A potential association of most of the phenophases was identified with the air humidity variable, and the other variables were eliminated due to the occurrence of multicollinearity. The rarity of the species is linked to its evolutionary and restrictive adaptation to intensely shaded environments formed by carbonate (dolomitic) rock outcrops, in which the soil has high pH, magnesium and silt values. The results of the soil analysis and other characteristics of the microhabitats studied, together with the evidence obtained for the elementome of *N. gandarela*, indicate the potential existence of a highly specialized floristic community (dolomitophytes) and singular in the complex of dolomitic outcrops and dolomitic marbles of the Gandarela formation distributed in the Iron Quadrangle.

Keywords: microendemism; shade plants; dolomitic outcrops; elementome; dolomitophily.

LISTAS

LISTAS DE TABELAS

TABELA 1 – PADRÕES FENOLÓGICOS ENCONTRADOS PARA O NÍVEL DE INDIVÍDUOS DE NICOTIANA GANDARELA NA POPULAÇÃO GERAL (CONJUNTO DAS TRÊS SUBPOPULAÇÕES), EM CADA SUBPOPULAÇÃO (POP1, POP2, POP3) E PROPORÇÃO DE INDIVÍDUOS ATIVOS, INATIVOS E MORTALIDADE. * A PROPORÇÃO DOS PADRÕES ANUAL E SUBANUAL SE REFERE AO TOTAL DE INDIVÍDUOS ATIVOS EM CADA FENOFASES.....	37
TABELA 2 - PROPORÇÃO DE INDIVÍDUOS (PADRÃO ANUAL) NAS CLASSES DE DURAÇÃO DE FENOFASES PARA A POPULAÇÃO GERAL E SUBPOPULAÇÕES DE NICOTIANA GANDARELA.	39
TABELA 3 – MÁXIMO GRAU DE SINCRONIA DAS FENOFASES EM PORCENTAGEM DE INDIVÍDUOS E SUA RESPECTIVA CLASSIFICAÇÃO PARA CADA SUBPOPULAÇÃO E PARA A POPULAÇÃO GERAL DE NICOTIANA GANDARELA, DURANTE O PERÍODO DE SETEMBRO DE 2022 A JANEIRO DE 2024.....	41
TABELA 4 - RESULTADOS DA ANÁLISE CIRCULAR ESTATÍSTICA PARA A SAZONALIDADE DA POPULAÇÃO GERAL E SUBPOPULAÇÕES POP2 E POP3 DE NICOTIANA GANDARELA (SOLANACEAE) COM BASE NOS VALORES QUINZENAIS DE INTENSIDADE (SOMA DE ESTRUTURAS). A SAZONALIDADE SIGNIFICATIVA CORRESPONDE AOS VALORES DE $R > 0.5$ E $P \leq 0,05$	43
TABELA 5 - TESTES DE WATSON-WILLIAMS PARA HOMOGENEIDADE DE MEDIAS, APLICADOS ENTRE AS SUBPOPULAÇÕES POP2 E POP3 CONSIDERANDO AA INTENSIDADE DAS FENOFASES REPRODUTIVAS DE FLORAÇÃO E FRUTIFICAÇÃO. * PARÂMETRO DE CONCENTRAÇÃO GLOBAL < 2 (TESTE PROVAVELMENTE NÃO APLICÁVEL).....	45
TABELA 6 - QUADRO COMPARATIVO DAS INTENSIDADES DAS FENOFASES PARA POPULAÇÃO GERAL (POPGERAL) E CADA SUBPOPULAÇÃO ENTRE AS ESTAÇÕES ÚMIDA E SECA. LEGENDA: *: RELAÇÃO SEM SUPORTE ESTATÍSTICO; P-VALUE: VALOR P DA ESTATÍSTICA UTILIZADA (DETALHAMENTO DOS TESTES NA TABELA 7).46	46
TABELA 7 - ANÁLISE ESTATÍSTICA COMPARATIVA (AMOSTRAS EMPARELHADAS) PARA AS FENOFASES REPRODUTIVAS DE NICOTIANA GANDARELA ENTRE A ESTAÇÕES ÚMIDA E SECA. A ESTAÇÃO ÚMIDA CORRESPONDEU AOS MESES DE FEVEREIRO, MARÇO, OUTUBRO, NOVEMBRO E DEZEMBRO DE 2023 E JANEIRO DE 2024. A ESTAÇÃO SECA CORRESPONDEU AOS MESES DE ABRIL A SETEMBRO DE 2023. AS SUBPOPULAÇÕES SÃO DENOMINADAS POP1, POP2 E POP3 E O CONJUNTO DELAS É APRESENTADO COMO POP GERAL. OS VALORES DE P-VALUE EM NEGRITO CORRESPONDEM ÀS COMPARAÇÕES COM DIFERENÇA SIGNIFICATIVA ($P\text{-VALUE} \leq 0.05$)	48
TABELA 8 – QUADRO COMPARATIVO PARA AS INTENSIDADES DAS FENOFASES REPRODUTIVAS ENTRE AS SUBPOPULAÇÕES NOS PERÍODOS DA ESTAÇÃO SECA E ESTAÇÃO ÚMIDA. POP1 = INTENSIDADE DA FENOFASE NA SUBPOPULAÇÃO 01; POP2 = INTENSIDADE DA FENOFASE NA SUBPOPULAÇÃO 02; POP3 = INTENSIDADE DA FENOFASE NA SUBPOPULAÇÃO 03.....	50
TABELA 9 - ANÁLISE ESTATÍSTICA COMPARATIVA ENTRE AS SUBPOPULAÇÕES DE NICOTIANA GANDARELA PARA AS FENOFASES VEGETATIVAS CONSIDERANDO OS PERÍODOS DE ESTAÇÃO ÚMIDA E SECA. AS SUBPOPULAÇÕES SÃO DENOMINADAS POP1, POP2 E POP3. A ESTAÇÃO ÚMIDA CORRESPONDEU AOS MESES DE FEVEREIRO, MARÇO, OUTUBRO, NOVEMBRO E DEZEMBRO DE 2023 E JANEIRO DE 2024. A ESTAÇÃO SECA CORRESPONDEU	

<p>AOS MESES DE ABRIL A SETEMBRO DE 2023. OS VALORES DE P-VALUE EM NEGRITO CORRESPONDEM ÀS COMPARAÇÕES COM DIFERENÇA SIGNIFICATIVA ($P\text{-VALUE} \leq 0,05$).</p>	51
<p>TABELA 10 - QUADRO COMPARATIVO DAS INTENSIDADES DAS FENOFASES VEGETATIVAS PARA POPULAÇÃO GERAL (POPGERAL) E CADA SUBPOPULAÇÃO (POP1, POP2 E POP3) ENTRE AS ESTAÇÕES ÚMIDA E SECA. LEGENDA: *: RELAÇÃO SEM SUPORTE ESTATÍSTICO; P-VALUE: VALOR P DA ESTATÍSTICA UTILIZADA (DETALHAMENTO DOS TESTES NA TABELA 11).</p>	54
<p>TABELA 11 – ANÁLISE ESTATÍSTICA COMPARATIVA (AMOSTRAS EMPARELHADAS) PARA AS FENOFASES VEGETATIVAS DE NICOTIANA GANDARELA ENTRE A ESTAÇÕES ÚMIDA E SECA. A ESTAÇÃO ÚMIDA CORRESPONDEU AOS MESES DE FEVEREIRO, MARÇO, OUTUBRO, NOVEMBRO E DEZEMBRO DE 2023 E JANEIRO DE 2024. A ESTAÇÃO SECA CORRESPONDEU AOS MESES DE ABRIL A SETEMBRO DE 2023. AS SUBPOPULAÇÕES SÃO DENOMINADAS POP1, POP2 E POP3 E O CONJUNTO DELAS É APRESENTADO COMO POPGERAL. OS VALORES DE P-VALUE EM NEGRITO CORRESPONDEM ÀS COMPARAÇÕES COM DIFERENÇA SIGNIFICATIVA ($P\text{-VALUE} \leq 0,05$).</p>	56
<p>TABELA 12 - QUADRO COMPARATIVO PARA AS INTENSIDADES DAS FENOFASES REPRODUTIVAS ENTRE AS SUBPOPULAÇÕES NOS PERÍODOS DA ESTAÇÃO SECA E ESTAÇÃO ÚMIDA. POP1 = INTENSIDADE DA FENOFASES NA SUBPOPULAÇÃO 01; POP2 = INTENSIDADE DA FENOFASE NA SUBPOPULAÇÃO 02; POP3 = INTENSIDADE DA FENOFASES NA SUBPOPULAÇÃO 03.</p>	58
<p>TABELA 13 – ANÁLISE ESTATÍSTICA COMPARATIVA ENTRE AS SUBPOPULAÇÕES DE NICOTIANA GANDARELA PARA AS FENOFASES VEGETATIVAS CONSIDERANDO OS PERÍODOS DE ESTAÇÃO ÚMIDA E SECA. AS SUBPOPULAÇÕES SÃO DENOMINADAS POP1, POP2 E POP3. A ESTAÇÃO ÚMIDA CORRESPONDEU AOS MESES DE FEVEREIRO, MARÇO, OUTUBRO, NOVEMBRO E DEZEMBRO DE 2023 E JANEIRO DE 2024. A ESTAÇÃO SECA CORRESPONDEU AOS MESES DE ABRIL A SETEMBRO DE 2023. OS VALORES DE P-VALUE EM NEGRITO CORRESPONDEM ÀS COMPARAÇÕES COM DIFERENÇA SIGNIFICATIVA ($P\text{-VALUE} \leq 0,05$).</p>	60
<p>TABELA 14 - RESULTADOS DOS MODELOS FINAIS UTILIZADOS PARA AVALIAR A ASSOCIAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E AS FENOFASES NA POPULAÇÃO GERAL DE NICOTIANA GANDARELA. O MODELO COMPLETO (INICIAL) CONTAVA COM AS VARIÁVEIS DE UMIDADE (UMID), TEMPERATURA(TEMP) E FOTOPERÍODO (COMP), NA SÉRIE TEMPORAL DE ZERO A TRÊS MESES ANTERIORES, REPRESENTADO PELA SEGUINTE RELAÇÃO: INTENSIDADE DA FENOFASE ~ TEMP0 + TEMP1 + TEMP2 + TEMP3 +UMID0 + UMID1 + UMID2 + UMID3 + COMP0+ COMP1+ COMP2+ COMP3. OS NÚMEROS APÓS CADA VARIÁVEL REFEREM-SE AO INTERVALO DE TEMPO UTILIZADO NAS ANÁLISES. OS VALORES DE P-VALUE EM NEGRITO REPRESENTAM UMA VARIÁVEL EXPLICATIVA SIGNIFICATIVA NO MODELO. OS VALORES DOS COEFICIENTES ESTIMADOS (B) ESTÃO APRESENTADOS NA ESCALA LOGARÍTIMICA.</p>	63
<p>TABELA 15 – COORDENADAS GEOGRÁFICAS DOS AFLORAMENTOS CARBONÁTICOS E NA FORMAÇÃO GANDARELA ONDE FORAM COLETADAS AMOSTRAS DE SOLO PARA AS ANÁLISES COMPARATIVAS, ASSIM COMO PARA UMA ÁREA DE FLORESTA ESTACIONAL SEMIDECIDUAL (FES).</p>	87
<p>TABELA 16 – ANÁLISES QUÍMICA E FÍSICA DAS AMOSTRAS DE SOLOS DAS LAPAS COM OCORRÊNCIA DE NICOTIANA GANDARELA E ÁREAS DE LAPAS COM AUSÊNCIA DE OCORRÊNCIA DA ESPÉCIE. LEGENDA: # = AMOSTRA COMPOSTA DE SOLO PRESENTE NAS SUBPOPULAÇÕES POP1, POP2 E POP3; * AMOSTRAS COMPOSTAS; FES: ÁREA DE FLORESTA ESTACIONAL SEMIDECIDUAL (SOLO NÃO ASSOCIADO COM AFLORAMENTOS/LAPAS) (1)</p>	

SBCS (TRIÂNGULO TEXTURAL); (2) ZARC (IN SPA/MAPA 02/2008); (3) CLASSIFICAÇÃO DA ÁGUA DISPONÍVEL - ZARC (IN SPA/MAPA 01 E 02/2022); (!) VALOR CALCULADO PARA PREDIÇÃO DA ÁGUA DISPONÍVEL NO SOLO EM FUNÇÃO DA GRANULOMETRIA DE ACORDO COM TEIXEIRA ET AL. (2021).....	98
TABELA 17 – ANÁLISE DE SEMELHANÇAS ENTRE OS SOLOS DE OCORRÊNCIA DE NICOTIANA GANDARELA E OS SOLOS AMOSTRADOS PARA AFLORAMENTOS/LAPAS DOLOMÍTICOS CLASSIFICAÇÃO DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DOS SOLOS DE ACORDO COM DADOS PUBLICADOS PELO INSTITUTO DA POTASSA & FOSFATO (1998).	100
TABELA 18 – ANÁLISE DOS TEORES DE MACRO E MICRONUTRIENTES NO TECIDO FOLIAR DE NICOTIANA GANDARELA E VALORES DE REFERÊNCIA ENCONTRADOS NA LITERATURA. LEGENDA: * = BROADLEY ET AL (2012); ! = HAUER-JÁKLI AND TRÄNKNER (2019); † = CAES (2024); FM = 20 FOLHAS MADURAS E SADIAS DE 20 INDIVÍDUOS DE NICOTIANA GANDARELA; FS= 20 FOLHAS AMARELADAS (SENESCENTES) DE 20 INDIVÍDUOS DE NICOTIANA GANDARELA. FAIXAS MÉDIAS DE TEORES FOLIARES CONSIDERADOS ADEQUADOS PARA 62 CULTURAS (PREZOTTI & GUARÇONI 2013).....	102
TABELA 19 - TABELA COMPARATIVA DE ALGUNS DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS ENCONTRADOS NOS SETORES AMOSTRADOS NO PRESENTE ESTUDO E OUTROS ESTUDOS REALIZADOS NA REGIÃO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO. LEGENDA: (1) ESTUDO REALIZADO NA ABA EXTERNA OCIDENTAL DA SINCLINAL DO GANDARELA (REIS, 2014); (2) ESTUDO REALIZADO EM VÁRIAS ÁREAS DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO (CARVALHO FILHO, 2008); (3) ESTUDO REALIZADO EM AFLORAMENTOS ROCHOSOS NO QUADRILÁTERO FERRÍFERO (CARMO, 2014).....	106
TABELA 20 TABELA COMPARATIVA DE ALGUNS DOS ATRIBUTOS FÍSICOS ENCONTRADOS NOS SETORES AMOSTRADOS NO PRESENTE ESTUDO E ESTUDOS REALIZADOS NA REGIÃO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO. LEGENDA: (1) ESTUDO REALIZADO NA ABA EXTERNA OCIDENTAL DA SINCLINAL DO GANDARELA (REIS, 2014); (2) ESTUDO REALIZADO EM VÁRIAS ÁREAS DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO (CARVALHO FILHO, 2008).	109

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO DA POPULAÇÃO CONHECIDA PARA A ESPÉCIE NICOTIANA GANDARELA (SETA AMARELA), NA QUAL FORAM DESENVOLVIDOS OS EXPERIMENTOS. DETALHE PARA A OCORRÊNCIA DA ESPÉCIE FORA DOS LIMITES DA UNIDADE DE CONSERVAÇÃO PARQUE NACIONAL DA SERRA DO GANDARELA (EM VERMELHO). 27	27
FIGURA 2 - VARIÁVEIS ABIÓTICAS NA REGIÃO DO ESTUDO. A: PRECIPITAÇÃO E TEMPERATURA MÉDIA MENSAL PARA O MUNICÍPIO DE SANTA BÁRBARA, MG, DE 1950 A 1990 DE ACORDO COM ALVARES ET AL. (2013). B: IRRADIAÇÃO SOLAR DIÁRIA MÉDIA PARA O MUNICÍPIO DE SANTA BÁRBARA COM BASE EM DADOS DE 1999 A 2015, DE ACORDO COM O INPE (2017).	28
FIGURA 3 – FENOFASES REPRODUTIVAS (A-D) E VEGETATIVAS (E-G) AVALIADAS PARA NICOTIANA GANDARELA. A: BOTÕES FLORAIS; B: FLOR EM ANTESE; C: FRUTO IMATURO; D: FRUTO MADURO EM DISPERSÃO, COM SEMENTE SENDO PREDADA POR BERITIDAE; E: DETALHE PARA AS FOLHAS EM INÍCIO DE EXPANSÃO NO CENTRO DA ROSETA; F: DETALHE PARA FOLHAS EM BROTAMENTO NO CENTRO DA ROSETA COM COLORAÇÃO VERDE MAIS CLARO; G: FOLHAS SENESCENTES, AMARELADAS NA PORÇÃO EXTERNA DA ROSETA E FOLHAS EM BROTAMENTO NA PORÇÃO CENTRAL.	30

FIGURA 4 – SUBPOPULAÇÕES DE <i>Nicotiana glandifera</i> CONTEMPLADAS NO ESTUDOS FENOLÓGICOS E FISIOLÓGICOS. A: COMPLEXO DE AFLORAMENTO DOLOMÍTICO, ONDE OCORREM AS TRÊS SUBPOPULAÇÕES; SETA VERMELHA INDICA O LOCAL DA SUBPOPULAÇÃO POP1. B: EM VERMELHO A SUBPOPULAÇÃO POP1 SE DESENVOLVENDO EM UMA “BANCADA” NO AFLORAMENTO. C: DETALHE PARA O ASPECTO GERAL DOS INDIVÍDUOS DA SUBPOPULAÇÃO POP1. D: SUBPOPULAÇÃO POP2 SE DESENVOLVENDO ABAIXO DA LAPA (PORÇÃO DIREITA DA FOTO. E: DETALHE PARA O ASPECTO GERAL DOS INDIVÍDUOS DA POP2, COM DEMARCAÇÕES (PLAQUINHAS DE IDENTIFICAÇÃO). F: SUBPOPULAÇÃO POP3. G: DETALHE PARA O ASPECTO GERAL DA POP3.	31
FIGURA 5 – DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIAS DOS ÍNDICES DE ATIVIDADE DE EVENTOS FENOLÓGICOS REPRODUTIVOS PARA CADA QUINZENA AVALIADA E CLASSIFICAÇÕES DE SINCRONIA ESTABELECIDAS.....	32
FIGURA 6 - DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIAS DE DURAÇÃO DE FENOFASES REPRODUTIVAS REGISTRADAS PARA <i>Nicotiana glandifera</i> DURANTE O PERÍODO DE FEVEREIRO DE 2023 A JANEIRO DE 2024 PARA INDIVÍDUOS COM PADRÃO ANUAL E CLASSIFICAÇÕES DE DURAÇÃO ADOTADAS	33
FIGURA 7 – MONTAGEM, CONFIGURAÇÃO, ALOCAÇÃO E BACKUP DE DADOS DO EQUIPAMENTO PARA MENSURAÇÃO DE VARIÁVEIS ABIÓTICAS (TEMPERATURA E UMIDADE DO AR). A-B: CONFIGURAÇÃO E TESTE DO APARELHO; C: DETALHE DO POSICIONAMENTO DOS SENSORES NA TAMPA DA CAIXA DE PROTEÇÃO; D-E: ALOCAÇÃO DO APARELHO 1 NA ÁREA DE OCORRÊNCIA DA ESPÉCIE <i>N. glandifera</i> ; F- G: EXTRAÇÃO E BACKUP DE DADOS VIA SOFTWARE ELITECH V.7.2.0; H-I: ALOCAÇÃO DO APARELHO 2 (SETAS VERMELHAS) EM ÁREA COM CARACTERÍSTICAS SEMELHANTES DE SOMBREAMENTO, PORÉM AUSÊNCIA DE OCORRÊNCIA DA ESPÉCIE <i>N. glandifera</i>	35
FIGURA 8 – FENOLOGIA REPRODUTIVA DE <i>Nicotiana glandifera</i> NO PERÍODO DE SETEMBRO DE 2022 A JANEIRO DE 2024. OS GRÁFICOS À ESQUERDA REFEREM-SE AO ÍNDICE DE ATIVIDADE, AO PASSO QUE À DIREITA SE ENCONTRAM AS INTENSIDADES DE CADA FENOFASES REPRODUTIVA, DADA PELA SOMA DAS RESPECTIVAS ESTRUTURAS PRESENTES NOS INDIVÍDUOS ATIVOS EM CADA QUINZENA AVALIADA PARA AS TRÊS SUBPOPULAÇÕES, ASSIM COMO PARA A POPULAÇÃO GERAL.	38
FIGURA 9 – DURAÇÃO DAS ATIVIDADES DE FENOFASES AO LONGO DE 2023 E INÍCIO DE 2024 PARA A POPULAÇÃO GERAL E SUBPOPULAÇÕES. AS BARRAS COLORIDAS CORRESPONDEM À PRESENÇA DE REGISTO DE ATIVIDADE DE CADA FENOFASE. OS TRIÂNGULOS CORRESPONDEM À DATA MÉDIA DE PICO DE INTENSIDADE DA FENOFASE. A: BOTÕES FLORAIS; B: FLORES EM ANTESE; C: FRUTOS IMATUROS; D: FRUTOS MADUROS. A SUBPOPULAÇÃO POP1 NÃO APRESENTOU ATIVIDADES DE FRUTIFICAÇÃO, POR ISSO NÃO ESTÁ REPRESENTADA NOS GRÁFICOS C E D.....	40
FIGURA 10 - FENOLOGIA VEGETATIVA DE <i>Nicotiana glandifera</i> NO PERÍODO DE SETEMBRO DE 2022 A JANEIRO DE 2024. OS GRÁFICOS À ESQUERDA REFEREM-SE AO ÍNDICE DE ATIVIDADE, AO PASSO QUE À DIREITA SE ENCONTRAM AS INTENSIDADES DE CADA FENOFASES VEGETATIVA, DADA PELA SOMA DAS RESPECTIVAS ESTRUTURAS PRESENTES NOS INDIVÍDUOS ATIVOS EM CADA QUINZENA AVALIADA PARA AS TRÊS SUBPOPULAÇÕES, ASSIM COMO PARA A POPULAÇÃO GERAL.....	53
FIGURA 11 - A: VARIÁVEIS MICROCLIMÁTICAS MENSURADAS NO PRESENTE ESTUDO PARA O HÁBITAT NATURAL DE <i>Nicotiana glandifera</i> , DE OUTUBRO DE 2022 A JANEIRO DE 2024. B: FOTOPERÍODO CALCULADO PARA A LOCALIDADE ESPECÍFICA DE <i>N. glandifera</i>	62

FIGURA 12 – COLETA DE DADOS ECOFISIOLÓGICOS. **A-B**: COLETA DE DADOS PARA AVALIAÇÃO DAS TAXAS DE ASSIMILAÇÃO DE CARBONO EM RESPOSTA AOS NÍVEIS DE INTENSIDADE LUMINOSA (CURVAS DE LUZ), EM PLANTAS CULTIVADAS; EXPERIMENTO REALIZADO NO LABORATÓRIO DE FISIOLOGIA VEGETAL DO DEPARTAMENTO DE BOTÂNICA - ICB-UFMG. **C - E**: COLETAS DE DADOS EM CAMPO UTILIZANDO OS EQUIPAMENTOS PAM-2500 (WALZ, EFFELTRICH, ALEMANHA) E ANALISADOR PORTÁTIL DE GASES INFRAVERMELHO (IRGA) MODELO LI 6400XT (LI-COR INC., LINCOLN, NE, EUA). **F**: COLETA DE DISCOS DE TECIDO FOLIAR PARA ANÁLISE DE PIGMENTOS FOTOSINTETIZANTES. **G**: COLETA DE DADOS PARA CARACTERIZAÇÃO DO ESPECTRO LUMINOSO NOS MICROHABITATS DE NICOTIANA GANDARELA. 70

FIGURA 13 - AVALIAÇÃO DAS TROCAS GASOSAS SÃO REPRESENTADAS POR: **A**: TAXA DE ASSIMILAÇÃO LÍQUIDA DE CO₂ (P_N); **B**: TRANSPIRAÇÃO (E); **C**: CONDUTÂNCIA ESTOMÁTICA (G_{SW}), **D**: CARBONO INTERCELULAR (C_i); **E**: EFICIÊNCIA NO USO DA ÁGUA (EUA) EM FOLHAS DE N. GANDARELA EM **POP1** (P1 - BARRAS VERMELHAS), **POP2** (P2 - BARRAS AMARELAS) E **POP3** (P3 - BARRAS VERDES). DIFERENTES LETRAS REPRESENTAM MÉDIAS ESTATISTICAMENTE DIFERENTES PELA ANOVA ONE-WAY SEGUIDA DE TESTE TUKEY (P<0.05) PARA COMPARAÇÃO DAS MÉDIAS. MÉDIAS ESTÃO REPRESENTADAS COM O ERRO PADRÃO, N = 6. 72

FIGURA 14 - AVALIAÇÃO DA FLUORESCÊNCIA DA CLOROFILA A ATRAVÉS DO: **A**: RENDIMENTO QUÂNTICO MÁXIMO (F_v/F_m); **B**: TAXA MÁXIMA DE TRANSPORTE DE ELÉTRONS (ETR_{MAX}); **C** - LUMINOSIDADE SATURANTE DO FOTOSISTEMA II (PAR₉₀) EM FOLHAS DE N. GANDARELA NAS POPULAÇÕES **POP1** (P1 - BARRAS VERMELHAS), **POP2** (P2 - BARRAS AMARELAS) E **POP3** (P3 - BARRAS VERDES). DIFERENTES LETRAS REPRESENTAM MÉDIAS ESTATISTICAMENTE DIFERENTES PELA ANOVA ONE-WAY SEGUIDA DE TESTE TUKEY (P < 0.05) PARA COMPARAÇÃO DAS MÉDIAS. MÉDIAS ESTÃO REPRESENTADAS COM O ERRO PADRÃO, N = 6. 73

FIGURA 15 - TRAÇOS FOLIARES AVALIADOS EM FOLHAS DE N. GANDARELA NAS SUBPOPULAÇÕES **POP1** (P1 - BARRAS VERMELHAS), **POP2** (P2 - BARRAS AMARELAS) E **POP3** (P3 - BARRAS VERDES). **A**: ÁREA FOLIAR (AF); **B**: MASSA SECA FOLIAR (MS); **C** - ÁREA FOLIAR ESPECÍFICA (AFE). DIFERENTES LETRAS REPRESENTAM MÉDIAS ESTATISTICAMENTE DIFERENTES PELA ANOVA ONE-WAY SEGUIDA DE TESTE TUKEY (P < 0.05) PARA COMPARAÇÃO DAS MÉDIAS. MÉDIAS ESTÃO REPRESENTADAS COM O ERRO PADRÃO, N = 6. 74

FIGURA 16 - PIGMENTOS FOTOSINTETIZANTES AVALIADOS EM FOLHAS DE N. GANDARELA NAS SUBPOPULAÇÕES **POP1** (P1 - BARRAS VERMELHAS), **POP2** (P2 - BARRAS AMARELAS) E **POP3** (P3 - BARRAS VERDES). **A** - CLOROFILA A (CA); **B** - CLOROFILA B (Cb); **C** - CAROTENOIDES (Cx+C); **D** - CLOROFILAS TOTAIS (CA+B); **E** - RAZÃO ENTRE CLOROFILA A E B (CA/B); **F** - RAZÃO ENTRE CLOROFILA TOTAL E CAROTENOIDES. DIFERENTES LETRAS REPRESENTAM MÉDIAS ESTATISTICAMENTE DIFERENTES PELA ANOVA ONE-WAY SEGUIDA DE TESTE TUKEY (P<0.05) PARA COMPARAÇÃO DAS MÉDIAS. MÉDIAS ESTÃO REPRESENTADAS COM O ERRO PADRÃO, N = 6. 75

FIGURA 17 - CARACTERIZAÇÃO DO ESPECTRO LUMINOSO EM TRÊS MICROHABITATS OCUPADOS POR TRÊS SUBPOPULAÇÕES DE N. GANDARELA. OS GRÁFICOS **A**, **C** E **E** REPRESENTAM OS ESPECTROS SOLARES NOS HORÁRIOS 8H, 12H E 15H RESPECTIVAMENTE. GRÁFICOS **B**, **D** E **F** REPRESENTAM A DENSIDADE DE FLUXO DE FÓTONS (PFD) NOS TRÊS HORÁRIOS DO DIA 8H, 12H E 15H RESPECTIVAMENTE. AS BARRAS E LINHAS VERMELHAS REPRESENTAM AS SUBPOPULAÇÕES POP1 (P1), AS AMARELAS POP2 (P2) E AS VERDES, POP3 (P3). AS BARRAS REPRESENTAM AS MÉDIAS ± ERRO PADRÃO, LETRAS MINÚSCULAS DIFERENTES

REPRESENTAM DIFERENÇA SIGNIFICATIVA DE ACORDO COM TESTE TUKEY A NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA DE 5%. (N = 4).....	76
FIGURA 18 - CURVA E VARIÁVEIS OBTIDAS A PARTIR DE CURVAS DE ASSIMILAÇÃO EM RESPOSTA A LUZ EM <i>N. GANDARELA</i> . Rd : RESPIRAÇÃO NO ESCURO [MMOL (CO ₂) M ⁻² S ⁻¹]; ICOMP : PONTO DE COMPENSAÇÃO DE LUZ [MMOL(PHOTON) M ⁻² S ⁻¹]; AMAX : TAXA FOTOSSINTÉTICA MÁXIMA [MMOL M ⁻² S ⁻¹]; IMAX : PONTO DE SATURAÇÃO DE LUZ A PARTIR DO QUAL NÃO OCORRE AUMENTO SIGNIFICATIVO NA ASSIMILAÇÃO LÍQUIDA [MMOL(PHOTON) M ⁻² S ⁻¹]; MÉDIA ± ERRO PADRÃO. (N = 2).....	77
FIGURA 19 – AMOSTRAS DE SOLO ENVIADAS PARA O LABORATÓRIO DE ANÁLISE DE SOLOS DO DEPARTAMENTO DE SOLOS – DPS, DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA - UFV	83
FIGURA 20 – ASPECTO GERAL DAS AMOSTRAS DE TECIDO FOLIAR DE <i>NICOTIANA GANDARELA</i> ENVIADOS PARA O LABORATÓRIO DE ANÁLISES DO LABORATÓRIO DE ANÁLISE DE SOLO, TECIDO VEGETAL E FERTILIZANTE DO DEPARTAMENTO DE SOLOS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA. À ESQUERDA FOLHAS MADURAS SADIAS (FM) E A DIREITA FOLHAS EM ASPECTO DE SENESCÊNCIA (FS).	84
FIGURA 21 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS AFLORAMENTOS ROCHOSO CARBONÁTICOS ENCONTRADOS NA FORMAÇÃO <i>GANDARELA</i> , NOS QUAIS FORAM REALIZADAS AS COLETAS DE AMOSTRAS DE SOLO.	88
FIGURA 22 – POPULAÇÕES DE <i>NICOTIANA GANDARELA</i> E LOCAIS DE COLETA DE AMOSTRA DE SOLO ASSOCIADO. A : LOCAL DA MAIOR POPULAÇÃO REFERIDA COMO POPGERAL NO PRESENTE ESTUDO A QUAL É FORMADA PELAS SUBPOPULAÇÕES POP1, POP2, POP3. B - C : LOCAL DA SUBPOPULAÇÃO POP4. D-E : LOCAL DA SUBPOPULAÇÃO POP5, A QUAL SE ENCONTRA NA LAPA, ATRAS DA QUEDA D'ÁGUA. E : DETALHE PARA UM INDIVÍDUO DE <i>N. GANDARELA</i> EM FENOFASE VEGETATIVA.	89
FIGURA 23 – SETOR CASSIMIRA. A – E : AFLORAMENTO CARBONÁTICO FORMANDO ABRIGO (LAPA). A : DETALHE PARA A CAPACIDADE DE SOMBREAMENTO E PROTEÇÃO CONTRA CHUVAS. D – E : DETALHE PARA A TEXTURA E COLORAÇÕES DO AFLORAMENTO, BASTANTE SIMILAR AOS AFLORAMENTOS DE OCORRÊNCIA DE <i>N. GANDARELA</i>	90
FIGURA 24 – SETOR PAU-OCO (PO). A – C : AFLORAMENTOS DE ITABIRITO FORMANDO ABRIGO (LAPA). A : DETALHE PARA A CAPACIDADE DE SOMBREAMENTO E PROTEÇÃO CONTRA CHUVAS. D : DETALHE PARA A TEXTURA E COLORAÇÕES DO AFLORAMENTO, COM ASPECTO DISTINTO DOS AFLORAMENTOS DE OCORRÊNCIA DE <i>N. GANDARELA</i>	90
FIGURA 25 – LAPA 01 (SETOR CASSIMIRA). A – C : AFLORAMENTO CARBONÁTICO FORMANDO ABRIGO (LAPA). A - B : DETALHE PARA A CAPACIDADE DE SOMBREAMENTO E PROTEÇÃO CONTRA CHUVAS. C - D : DETALHE PARA A TEXTURA E COLORAÇÕES DO AFLORAMENTO PRÓXIMAS ÀQUELAS ENCONTRADAS NOS AFLORAMENTOS DE OCORRÊNCIA DE <i>N. GANDARELA</i> E COM PRESENÇA DE PEQUENOS EPELEOTEMAS.	91
FIGURA 26 – LAPA 02 (SETOR CASSIMIRA). AFLORAMENTO CARBONÁTICO FORMANDO ABRIGO (LAPA). DETALHE PARA A TEXTURA E COLORAÇÕES DO AFLORAMENTO PRÓXIMAS ÀQUELAS ENCONTRADAS NOS AFLORAMENTOS DE OCORRÊNCIA DE <i>N. GANDARELA</i> AFLORAMENTOS DE OCORRÊNCIA DE <i>N. GANDARELA</i>	91
FIGURA 27 – LAPA 01 (SETOR RIO PRETO – RP). A – C : AFLORAMENTO CARBONÁTICO (MÁRMORE DOLOMÍTICO), FORMANDO ABRIGO (LAPA), COM CAPACIDADE DE SOMBREAMENTO E PROTEÇÃO CONTRA CHUVAS. D : DETALHE PARA A TEXTURA E COLORAÇÕES DO AFLORAMENTO, BASTANTE SIMILAR AOS AFLORAMENTOS DE OCORRÊNCIA DE <i>N. GANDARELA</i>	92

<i>FIGURA 28</i> - LAPA 02 (SETOR RIO PRETO – RP). A – B : AFLORAMENTO CARBONÁTICO (MÁRMORE DOLOMÍTICO), FORMANDO ABRIGO (LAPA), COM CAPACIDADE DE SOMBREAMENTO E PROTEÇÃO CONTRA CHUVAS. C - D : DETALHE PARA A TEXTURA E COLORAÇÕES DO AFLORAMENTO, DISTINTAS DOS AFLORAMENTOS DE OCORRÊNCIA DE <i>N. GANDARELA</i>	92
<i>FIGURA 29</i> - LAPA 03 (SETOR RIO PRETO – RP). A – B : AFLORAMENTO CARBONÁTICO (DOLOMÍTICO), FORMANDO ABRIGO (LAPA), COM CAPACIDADE DE SOMBREAMENTO E PROTEÇÃO CONTRA CHUVAS. C - D : DETALHE PARA A TEXTURA E COLORAÇÕES DO AFLORAMENTO, SIMILARES AOS AFLORAMENTOS DE OCORRÊNCIA DE <i>N. GANDARELA</i>	93
<i>FIGURA 30</i> – LAPA 04 (SETOR RIO PRETO – RP). AFLORAMENTO CARBONÁTICO (DOLOMÍTICO), FORMANDO ABRIGO (LAPA), COM POUCA CAPACIDADE DE SOMBREAMENTO E PROTEÇÃO CONTRA CHUVAS (BAIXA INCLINAÇÃO). AS TEXTURA E COLORAÇÕES DO AFLORAMENTO SÃO SIMILARES AOS AFLORAMENTOS DE OCORRÊNCIA DE <i>N. GANDARELA</i>	93
<i>FIGURA 31</i> – AFLORAMENTOS NO SETOR FUNDÃO A – B : LAPA 3; C – E : LAPA 2; F – G : LAPA 5; H : LAPA 7. ESTE SETOR APRESENTOU AFLORAMENTOS DOLOMÍTICOS COM VARIAÇÕES NAS COLORAÇÕES (AVERMELHADAS E AZULADAS/ACINZENTADAS), PORÉM TEXTURAS SEMELHANTES AOS AFLORAMENTOS DE <i>N. GANDARELA</i> . EM GERAL APRESENTAM INCLINAÇÕES FORTES E PROMOVEM EVIDENTES PROTEÇÕES CONTRA CHUVAS E IRRADIAÇÃO SOLAR, COM DESTAQUE PARA A LAPA 7.....	94
<i>FIGURA 32</i> – AFLORAMENTOS NO SETOR FUNIL. A : LAPA 8; B : LAPA 9; LAPA 10. OS AFLORAMENTOS DESTES SETOR FORAM OS MENORES ENCONTRADOS, PORÉM FORMAM PEQUENAS LAPAS, COM PROTEÇÃO À CHUVAS E IRRADIAÇÃO SOLAR. EM GERAL APRESENTAM TEXTURAS SIMILARES AOS AFLORAMENTOS DE <i>N. GANDARELA</i> E COLORAÇÕES TAMBÉM ACIZENTADAS/AZULADAS.....	95
<i>FIGURA 33</i> - SETOR CASSIMIRA – ASPECTO GERAL DA FLORESTA ESTACIONAL SEMIDECIDUAL (FES) QUE SE SITUA LOGO À FRENTE DA ABERTURA DA LAPA ONDE SE DESENVOLVEM AS POPULAÇÕES DE <i>NICOTIANA GANDARELA</i> . A - B : FES VISTA A PARTIR DE DENTRO DA LAPA DE <i>N. GANDARELA</i> ; C : ASPECTO GERAL DO SUB-BOSQUE DA FES; D : ASPECTO GERAL DO SOLO DA FES.....	95
<i>FIGURA 34</i> - ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS SOLOS DE OCORRÊNCIA DE <i>NICOTIANA GANDARELA</i> E DEMAIS SOLOS AMOSTRADOS EM CAMPO NO PRESENTE ESTUDO. LEGENDA (EM REFERÊNCIA À TABELA 16): NG , SOLO DE OCORRÊNCIA DE <i>NICOTIANA GANDARELA</i> ; CAS , CASSIMIRA; PO , PAU-OCO; FUNDÃO , FUNDÃO; RP , RIO PRETO; FUNIL , FUNIL; FES , FES (FLORESTA ESTACIONAL SEMIDECIDUAL); A : ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (PCA) COM BASE EM 25 ATRIBUTOS DO SOLO, 21 QUÍMICOS E 4 FÍSICOS. B : ANÁLISE DE AGRUPAMENTO (WARD; DISTÂNCIA EUCLIDIANA; 10000 PERMUTAÇÕES). C : MAPA DE CALOR RELACIONANDO AGRUPAMENTOS E VARIÁVEIS. ANÁLISES E GRÁFICOS REALIZADOS POR MEIO DO SOFTWARE JAMOVI, VERSÃO 2.5 (THE JAMOVI PROJECT, 2024) E MÓDULO SNOWCLUSTER, VERSÃO 7.3.9 (SEOL, 2024).	103
FIGURA 35 – ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS SOLOS DE OCORRÊNCIA DE <i>NICOTIANA GANDARELA</i> , DEMAIS SOLOS ASSOCIADOS À AFLORAMENTOS CARBONÁTICOS INVESTIGADOS NO PRESENTE ESTUDO E SOLOS ASSOCIADOS A OUTROS TIPOS DE AFLORAMENTOS ROCHOSOS NO QUADRILÁTERO FERRÍFERO. LEGENDA (EM REFERÊNCIA À TABELA 19): NG , SOLO DE OCORRÊNCIA DE <i>NICOTIANA GANDARELA</i> ; CAS , CASSIMIRA; PO , PAU-OCO; FUNDÃO , FUNDÃO; RP , RIO PRETO; FUNIL , FUNIL; FES , FES (FLORESTA ESTACIONAL	

SEMIDECIDUAL); CGANR, CANGAS NA SERRA DO GANDARELA (REIS, 2014); CROMo, CANGAS NA SERRA DO ROLA MOÇA (CARMO, 2014), CGANC CANGAS NA SERRA DO GANDARELA (CARMO, 2014), GRAN, GRANITÓIDES NA SERRA DA MOEDA (CARMO, 2014), QUART, QUARTZITOS NA MOEDA, ROLA MOÇA E ÁGUA LIMPA (CARMO, 2014). **A:** ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (PCA) COM BASE EM 17 ATRIBUTOS DO SOLO, 15 QUÍMICOS E 3 FÍSICOS. **B:** ANÁLISE DE AGRUPAMENTO (WARD; DISTÂNCIA EUCLIDIANA; 10000 PERMUTAÇÕES. **C:** MAPA DE CALOR RELACIONANDO AGRUPAMENTOS E VARIÁVEIS. ANÁLISES E GRÁFICOS REALIZADOS POR MEIO DO SOFTWARE JAMOVI, VERSÃO 2.5 (THE JAMOVI PROJECT, 2024) E MÓDULO SNOWCLUSTER, VERSÃO 7.3.9 (SEOL, 2024)..... 105

FIGURA 36 – SIMPATRIA ENTRE NICOTIANA GANDARELA (AO FUNDO) E PHYLLANTHUS GANDARELENSIS, NO PRIMEIRO PLANO 114

SUMÁRIO

1	Introdução	20
1.1	Contextualização Fitogeográfica e Conservação	20
1.2	Caracterização detalhada da espécie foco do estudo.....	22
1.3	A fenologia como estudo de base para a compreensão da dinâmica da espécie em seu ambiente 22	
1.4	A Ecofisiologia Como uma Ferramenta para a Compreensão dos Limites Fisiológicos.....	24
1.5	Afloramentos Rochosos e solos Associados: um poderoso filtro ambiental	25
1.6	Objetivos.....	26
1.6.1	Objetivo Geral	26
1.6.2	Objetivos específicos	26
2	Fenologia Reprodutiva e Vegetativa de <i>Nicotiana Gandarela</i>	27
2.1	Material e Métodos.....	27
2.1.1	Área de Estudo	27
2.1.2	Coleta e Análise de Dados.....	28
2.1.3	Análise de Sazonalidade de Fenofases e Associação com Variáveis Abióticas.....	34
2.1.4	Estatísticas complementares para comparação entre populações e estações.....	36
2.2	Resultados.....	37
2.2.1	Fenologia Reprodutiva	37
2.2.2	Fenologia Vegetativa	53
2.2.3	Associação Potencial com Variáveis Microclimáticas.....	62
2.3	Discussão	64
3	Ecofisiologia Descritiva e Comparativa entre subpopulações de <i>Nicotiana gandarela</i>	69
3.1	Material e Métodos.....	69
3.1.1	Caracterização do espectro luminoso	69
3.1.2	Trocas gasosas.....	69
3.1.3	Fluorescência da clorofila a: Curvas de luz e rendimento quântico potencial (Fv/Fm). 71	
3.1.4	Traços foliares	71

3.1.5	Pigmentos fotossintetizantes	71
3.1.6	Análises estatísticas.....	72
3.2	Resultados.....	72
3.2.1	Trocas gasosas.....	72
3.2.2	Fluorescência da clorofila a.....	73
3.2.3	Traços Foliare.....	74
3.2.4	Quantificação dos pigmentos fotossintetizantes	75
3.2.5	Caracterização do espectro luminoso.....	76
3.3	Discussão	78
4	Análise de Solo, Elementoma e Busca por novas populações de <i>Nicotiana glandarela</i> e habitats potenciais de ocorrência na serra da Gandarela.....	81
4.1	Materiais e métodos.....	81
4.1.1	Coleta e Análise de Solos	81
4.1.2	Coleta e Análise de Tecido Foliar.....	83
4.1.3	Busca por Novas Populações e Habitats Potenciais de Ocorrência na Serra da Gandarela 84	
4.1.4	Análise comparativa entre solos do Quadrilátero Ferrífero	85
4.2	Resultados.....	86
4.2.1	Busca por Novas Populações e Habitats Potenciais de Ocorrência na Serra da Gandarela 86	
4.2.2	Caracterização do solo preferencial de <i>Nicotiana glandarela</i>	96
4.2.3	Caracterização da composição elementar (elementoma) nos tecidos foliares de <i>Nicotiana glandarela</i>	101
4.2.4	Análise Comparativa entre o solo de <i>Nicotiana glandarela</i> , demais solos amostrados em afloramentos rochosos e solos no Contexto do Quadrilátero Ferrífero.....	102
4.3	Discussão	110
5	Conclusões e Considerações Finais	113
6	Referências Bibliográficas	116

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO FITOGEOGRÁFICA E CONSERVAÇÃO

O Quadrilátero Ferrífero (doravante denominado QF), situado na região centro-sul do estado de Minas Gerais, caracteriza-se pela elevada geodiversidade e por uma complexa evolução geocológica da paisagem (Ruchkys 2007; Carmo 2010). Tais fatores, somados ao fato de que a região também se encontra no ecótono que incorpora parte de dois *hotspots* brasileiros, os biomas da Mata Atlântica e do Cerrado, resultaram no desenvolvimento e manutenção de uma rica biodiversidade, a qual conta com altas taxas de endemismos (Giulietti *et al.* 1997).

A serra do Gandarela situa-se aproximadamente a 60 km de Belo Horizonte, na porção nordeste do QF, com orientação NE-SW, cobrindo cerca 467 km² de área (Lamounier 2011). Estudos aprofundados acerca de sua geologia e relevo são incipientes (Silva & Salgado 2009), no entanto sua diversidade de substratos geológicos é reconhecida há tempos e caracterizada por variados litotipos como quartzitos, itabiritos, xistos, filitos, itabiritos dolomíticos, dolomitos, mármores dolomíticos, granitos-gnaisses e cangas, entre outros, os quais são típicos do Super Grupo Minas e Super Grupo Rio das Velhas (Lamounier *et al.* 2010).

Neste complexo relevo verifica-se que a diversidade geológica desempenha um papel relevante no que tange a distribuição de fitofisionomias, visto que nas altitudes mais elevadas e correspondentes ao Grupo Itabira, são encontrados, principalmente os Campos Rupestres Ferruginosos e Quartzíticos (Lamounier *et al.* 2010).

Vegetações típicas do Bioma Cerrado, localmente representadas por Campos Limpo e Campos Sujos, são encontradas na porção oeste, sobre o anticlinal Rio das Velhas (Silva & Salgado 2009). Por outro lado, a vegetação de Mata Atlântica se pronuncia nas porções interiores da Sinclinal Gandarela (Lamounier *et al.* 2010), a qual é majoritariamente representada pelas Florestas Estacionais Semidecíduais, típicas das regiões de vale do QF, com características de elevada heterogeneidade florística (Spósito & Stehmann 2006). No caso específico da Sinclinal Gandarela, as Florestas Estacionais estão comumente associadas às porções de ocorrência de rochas carbonáticas da Formação Gandarela (Grupo Itabira) e sobre os filitos do Grupo Piracicaba (Lamounier *et al.* 2010).

Como abordado por Carmo (2010), o geossistema presente na serra da Gandarela apresenta elementos de valor inestimável, visto os altos índices de endemismo, espécies ameaçadas e/ou raras e uma geodiversidade ímpar, considerando ainda as várias categorias de patrimônio associado. Carmo (2013) ainda aponta a existência de uma alta diversidade alfa e beta para as cangas do quadrilátero ferrífero o

que intensifica a necessidade de planejamentos de conservação de uma maior proporção desses ambientes em função de suas particularidades ecológicas.

Levantamentos científicos de longa duração, para investigação das comunidades florísticas em suas diversas fitofisionomias da serra da Gandarela são quase nulos, sendo esta, ainda, uma enorme lacuna de conhecimento, tendo como exceção o trabalho realizado em ambientes de Canga por Carmo (2014), o qual já ressalta a importância de investimentos sobre o tema.

Em regiões com alta biodiversidade, como o QF, ainda são frequentemente encontradas espécies de plantas novas para a ciência (Carmo & Jacobi 2013, Jacobi & Carmo 2008), as quais pouco se sabe a respeito de suas características ecológicas, como fenologia, ecofisiologia, tamanho populacional, distribuição de ocorrência, variabilidade genética, entre vários outros aspectos biológicos, assim como questões relacionadas à intensidade de pressão antrópica sobre estes táxons, sendo estas informações essenciais para o conhecimento acerca do estado de conservação destes táxons (Martinelli *et al.* 2013).

Esta lacuna de conhecimento, somada ao fato de que o QF se configura como uma das principais províncias minerais do mundo, sofrendo fortemente com a pressão ambiental (Carmo & Kamino 2023), faz com que investimentos em pesquisas que envolvam estudos ecológicos de espécies endêmicas sejam considerados de extrema relevância para uma melhor compreensão do nível de impacto e prejuízo que estas ações antrópicas proporcionam às populações remanescentes.

Um dos exemplos de espécies recém-descobertas no QF é a *Nicotiana gandarela* Augsten & Stehmann, da família Solanaceae, encontrada na serra do Gandarela, no Município de Santa Bárbara, descrita em março de 2022 (Augsten *et al.* 2022). Trata-se de uma erva rupícola/saxícola, da qual é conhecida por apenas uma população subdividida em cinco subpopulações que se desenvolvem em um ambiente sombreado e extremamente específico: caverna/lapa na beira de córrego em interior de floresta (Augsten *et al.* 2022).

Espécies com populações concentradas em localidades restritas podem apresentar baixa diversidade genética e altas taxas de endogamia, assim como o aumento de alelos deletérios, resultando em declínio da capacidade de sobrevivência frente às alterações ambientais, com consequente aumento do risco de extinção (Gilpin & Soule 1986; Brook *et al.* 2006; Shaffer 1981, Pérez-Pereira *et al.* 2022).

Considerando o fato das populações serem, até o momento, conhecidas apenas para esta localidade (Augsten *et al.* 2022), estima-se um alto risco para a sobrevivência deste táxon, o qual apresenta atualmente uma área de ocupação bastante reduzida (menor que 10km²). Ressalta-se, ainda, o fato desta área não se encontrar dentro de limites de Unidades de Conservação de proteção integral, estando apenas na zona de amortecimento (provisória) do Parque Nacional da Serra da Gandarela (PARNA da Serra do Gandarela).

Neste sentido faz-se necessário o avanço de estudos, de forma que se possa identificar, quantificar, analisar e descrever as condições ambientais específicas associadas ao micro-habitat de ocorrência de *Nicotiana gandarela*, assim como os aspectos relacionados à sua biologia reprodutiva, fenologia e ecofisiologia. Ressalta-se a importância da busca por novos registros de populações com base em preditores ambientais devidamente mensurados para o micro-habitat da espécie em questão, proporcionando um melhor entendimento das principais condições ambientais necessárias para a sua conservação *in situ* e/ou *ex situ*.

1.2 CARACTERIZAÇÃO DETALHADA DA ESPÉCIE FOCO DO ESTUDO

Nicotiana gandarela Augsten & Stehmann, Solanaceae, foi descrita em 2022 (Augsten et al. 2022), está circunscrita na seção *Alatae*, sendo considerada um grupo irmão das demais espécies desta seção (Augsten et al. 2022). O táxon apresenta localidade Tipo na serra da Gandarela, mais especificamente na comunidade de André do Mato Dentro, Município de Santa Bárbara, Minas Gerais. Esta localidade resguarda a única população da espécie, a qual pode ser considerada micro-endêmica, até que novos estudos de distribuição de ocorrência sejam realizados.

De acordo com Augsten *et al.* (2022), trata-se de uma herbácea não ramificada e de pequeno porte, com folhas espatuladas, as quais podem atingir aproximadamente 20 cm ou pouco mais. As folhas são rosuladas e apresentam tricomas glandulares. A inflorescência é escaposa atingindo até 50 cm, aproximadamente. As flores são tubulares, sendo a porção interior arroxeadada, ao passo os lobos da corola (5) apresentam coloração avermelhada, com tonalidade arroxeadada nas margens e nervura central, sugerindo guias florais (obs. pessoal). Os estames são cinco e insertos. O fruto é do tipo cápsula, oval, com duas válvulas. As sementes são diminutas (0,7-0,8mm), subglobosas e com paredes anticlinais sinuosas.

Até o presente momento acredita-se que a espécie apresenta restrições para estabelecimento e desenvolvimento, estando restrita apenas a locais com sombreamento relevante, proteção contra precipitações, assim como possíveis exigências por umidades relativas altas ao longo do ano e temperaturas amenas, as quais, até o momento, são características descritas apenas qualitativamente para o contexto ambiental das populações conhecidas (obs. pessoal).

1.3 A FENOLOGIA COMO ESTUDO DE BASE PARA A COMPREENSÃO DA DINÂMICA DA ESPÉCIE EM SEU AMBIENTE

O acompanhamento dos fenômenos inerentes ao ciclo de vida de uma planta, comumente denominado fenologia, proporciona uma maior compreensão acerca da influência dos fatores bióticos e/ou abióticos em uma população, ou até mesmo em uma comunidade vegetal. Tal compreensão pode ainda ser ampliada para avaliações preditivas à luz das mudanças climáticas futuras e correlações de interação

entre plantas e animais, trazendo informações importantes sobre os fenômenos que estruturam as redes ecológicas, como polinização, predação, dispersão de sementes, entre outros (Bawa, 1983; Frankie et al. 1974; Morellato, 2003).

A flutuação de variáveis climáticas assim como a interação com a fauna (polinizadores ou dispersores) durante as estações do ano podem exercer influências relevantes, no que tange a duração do período de reprodução e desenvolvimento vegetal, podendo definir os padrões fenológicos de determinada espécie (Bawa 1983; Morellato 2003).

Autores apontam que em locais onde a sazonalidade é bem definida, a precipitação é o principal fator limitante da fenologia das espécies (Morellato 2003), ao passo que sob baixa sazonalidade climática, o fator principal que define os padrões de reprodução e crescimento é a irradiação e duração do dia (Borchert *et al.*, 2005; Rivera & Borchert, 2001; Wright & Van Schaik, 1994).

As interações bióticas construídas ao longo de um processo evolutivo dentro de uma comunidade podem estar estruturadas de forma que os eventos de competição por polinizadores culminaram em um padrão escalonado de floração, a partir do qual se consolidou o compartilhamento do mesmo grupo de polinizadores, porém em períodos sucessivos (Bawa, 1983; Wright e Calderon, 1995).

No entanto, outra estratégia evolutiva é o padrão agregado de floração dentro de uma comunidade, denominado facilitação. Neste caso as espécies compartilham polinizadores no mesmo período, mas o benefício da facilitação deve superar o prejuízo causado pela competição por polinizadores (Moeller, 2004), aumentando a atratividade das flores para os polinizadores (Moeller, 2004; Staggemeier et al., 2010).

Para o gênero *Nicotiana* são incipientes os trabalhos com este tema, podendo citar o estudo de Lyons & Mully (1992), no qual estudaram a fenologia de *Nicotiana alata*, porém em ambiente de casa de vegetação/estufa, tendo como objetivo a avaliação de mudanças na floração causadas por adensamento de indivíduos e o trabalho de Kumar et al. (2022), no qual foi estudado a fenologia e aspectos de biologia reprodutiva de *Nicotiana pumbaginifolia* no norte da Índia. No entanto neste estudo os dados foram coletados e processados de forma qualitativa/descritiva, de forma que os padrões das fenofase não foram analisados com base em estatística.

Para a espécie *Nicotiana gandarela* ainda não foram realizados estudos específicos de fenologia e, considerando a atual situação de fragilidade das populações encontradas, se reveste de importância o conhecimento acerca de sua fenologia reprodutiva para trazer à tona informações importantes para sua conservação *in situ* e *ex situ*.

1.4 A ECOFISIOLOGIA COMO UMA FERRAMENTA PARA A COMPREENSÃO DOS LIMITES FISIOLÓGICOS

A fotossíntese e as trocas gasosas são fatores chave para a regulação do crescimento das plantas, sendo as folhas as principais unidades fotossintéticas funcionais e produtivas, nas quais, em função de condições e variações de umidade, temperatura e irradiância, são moduladas as respostas fotossintéticas (Walters 2005; Mathur *et al.* 2018; Boardman 1977; Osmond & Förster 2006). Desta forma as taxas de fotossíntese e de trocas gasosas são limitadas pelas condições ambientais inerentes ao habitat específico de determinada espécie (Boardman 1977).

A definição de plantas de sol e de sombra tem sido utilizada para plantas que evoluíram de acordo com condições, respectivamente, de alta irradiância/luz e sombreamento intenso para crescer e completar seu ciclo de vida (Cuzzuol e Milanez 2012).

Plantas de sombra se diferem das plantas estritamente de sol, quando colocadas em ambientes de baixa irradiância, por apresentarem maior fotossíntese líquida e menor ponto de compensação de luz, sendo esta, a principal razão pela qual plantas sombreadas podem sobreviver e crescer sob estas condições (Boardman 1977, Wellburn, & Pearcy 2012). O baixo valor do ponto de compensação de luz nas plantas de sombra também se deve à maior eficiência na absorção de luz disponível e menor desperdício de fótons e consequente maximização da fotossíntese bruta, para um nível baixo de irradiância. Por outro lado, comparando com plantas de sol, as plantas de sombra quando expostas a altos níveis de irradiância apresentam uma performance mais reduzida e foto-inibição muito mais rápida, em função do baixo investimento em proteínas fotossintéticas, o que acarreta danos que geralmente ocorrem no aparato fotossintético (Boardman 1977, Way & Pearcy 2012). Estes danos podem ser reparados em determinadas situações, porém as plantas de sombra também apresentam menor capacidade de reparação do sistema fotossintético (Takahashi & Murata 2008).

Com grande frequência os danos podem ser irreversíveis em função da foto-oxidação dos pigmentos do cloroplasto, causando a senescência precoce de folhas (Takahashi & Murata 2008). Visto isso, algumas espécies que ocorrem obrigatoriamente em locais sombreados e nunca são encontradas em locais ensolarados, não apresentam capacidade de adaptar-se às condições de altas irradiâncias, ou seja, não possuem capacidade de aclimação (Boardman 1977, Way & Pearcy 2012) e, portanto, não se desenvolvem normalmente e/ou não realizam por completo o ciclo reprodutivo (Valladares & Niinemets, 2008).

As diferenças entre plantas de sombra e de sol também são observadas nas características anatômicas das folhas, sendo que as folhas de plantas de sol, em geral, apresentam uma camada mais grossa de mesófilo paliádico do que as folhas de plantas de sombra, o que as protege, porém apresentam um custo energético mais alto para a manutenção do sistema fotossintético e, sob baixas irradiâncias, apresenta

uma alta taxa respiratória sendo, portanto, uma desvantagem nestas condições (Boardman 1977; Cuzzuol e Milanez 2012).

As folhas de plantas de sombra apresentam uma área foliar específica elevada, são mais membranáceas, além de apresentarem menores quantidades de ATPase e componentes do ciclo de Calvin, especialmente a Rubisco, em comparação plantas de sol (Walters 2005, Boardman 1977).

Considerando que as únicas populações de *Nicotiana glandarela* se encontram em locais fortemente sombreados por afloramentos rochosos e vegetação arbórea circundante, estudos com este foco são de elevada importância para a compreensão de parte dos mecanismos chave que regulam as preferências de hábitat da espécie, podendo lançar esclarecimentos acerca de sua distribuição de ocorrência.

1.5 AFLORAMENTOS ROCHOSOS E SOLOS ASSOCIADOS: UM PODEROSO FILTRO AMBIENTAL

Nas últimas décadas tem crescido o número de os estudos sobre as relações entre plantas e substrato/solos especiais (Pérez-García et al., 2017). No entanto, poucos trabalhos abordam relações das espécies com a composição química das rochas (Cantero et al., 2011; Gandullo & Faggi, 2006; Martínez Carretero, 2000).

Os afloramentos rochosos geralmente se destacam da matriz circundante e costumam abrigar espécies casmofíticas (rupícolas) e endêmicas (Carvalho *et al.*, 2019; Fitzsimons & Michael, 2017). A estrutura da rocha, assim como a composição química do leito rochoso, juntamente com uma variedade de micro habitats, como cavidades, fendas, fissuras, propicia uma alta diversidade de nichos para espécies de plantas especializadas (Burke, 2002; Clarke, 2002; Grace *et al.*, 2007; Harrison *et al.*, 2006; Nowak *et al.*, 2014; Porembski *et al.*, 1996; Parmentier, 2003).

Desta forma, afloramentos rochosos podem funcionar como ilhas climáticas, hidrológicas e edáficas, fornecendo condições exclusivas e peculiares para o estabelecimento e desenvolvimento de espécies vegetais extremamente adaptadas (Corlett & Tomlinson, 2020; Nie *et al.*, 2019). Visto isso, em comparação com a vegetação matricial, as comunidades casmofíticas apresentam maior taxa de endemismo (Kypriotakis e Tzanoudakis, 2001; Deil et al., 2008; Kontapanou & Panitsa, 2020), podendo resultar em comunidades de plantas floristicamente bem definidas (Didukh e Vasheniak, 2018).

Vários trabalhos relacionados a vegetações em solos de Serpentina, ou ultramáficos mostraram que a proporção de Ca/Mg poderia ser um fator-chave para explicar comunidades florísticas específicas, associados as rochas ultramáficas (Alexander *et al.*, 2007; Brady *et al.*, 2005; Brooks, 1987; Mota *et al.*, 2008; Proctor & Woodell, 1975; Roberts & Proctor, 1992).

Posteriormente, estudos destacaram que as rochas carbonáticas como calcário e dolomita, podem também apresentar floras diferenciadas e restritas ao substrato associado (Mota *et al.*; 2008; Medina-Cazorla *et al.* 2010).

Considerando essas premissas, os afloramentos de itabirito dolomítico, dolomitos e mármore dolomíticos presentes da serra da Gandarela, apresentam grandes chances de serem considerados fortes filtros ambientais, com restrições químicas em seus solos associados. Por serem, a princípio, habitats ricos em cálcio e magnésio, podem restringir o crescimento e a reprodução de plantas de várias espécies da matriz florestal circundante, assim como representarem importantes ilhas de endemismo em uma matriz florestal.

Visto isso, estudos focados na composição físico-química dos solos onde se desenvolvem populações de *Nicotiana gandarela*, assim como de outros afloramentos carbonáticos na Formação Gandarela, podem trazer à tona informações valiosas para uma melhor compreensão dos fatores que impulsionam a raridade desta espécie, assim como proporcionarão um embasamento para futuros estudos focados em afloramentos carbonáticos no Quadrilátero Ferrífero.

1.6 OBJETIVOS

1.6.1 Objetivo Geral

Pretendeu-se com este estudo caracterizar a fenologia e alguns dos requerimentos ambientais da espécie *Nicotiana gandarela*, de forma a identificar os filtros ambientais que controlam sua distribuição de ocorrência, assim como levantar dados úteis para embasar futuras avaliações mais detalhadas de seu estado de conservação e produzir conhecimento para subsidiar ações de conservação deste táxon.

A partir dos dados levantados também se espera contribuir para uma melhor identificação de áreas prioritárias para a conservação no Parque Nacional da Serra da Gandarela e seu entorno, dando suporte para a formulação de estratégias e diretrizes em seu Plano de Manejo, o qual se encontra atualmente em desenvolvimento.

1.6.2 Objetivos específicos

Tem-se como objetivos específicos neste projeto:

- 1- Descrever e analisar a fenologia reprodutiva e vegetativa de *N. gandarela* à luz dos fatores abióticos;
- 2- Descrever aspectos ecofisiológicos de *N. gandarela* e realizar análises comparativas entre as subpopulações conhecidas, de acordo com variações abióticas;
- 3- Prospectar e mapear de novos registros de populações da espécie para subsidiar futuras reavaliações do *status* de conservação deste táxon;

- 4- Descrever e analisar as características edáficas específicas na área de ocorrência de *N. Gandarela*, assim como de outros afloramentos carbonáticos presentes na formação geológica Gandarela (Dorr, 1958) no âmbito do sinclinal Gandarela;
- 5- Realizar análises comparativas entre os solos de ocorrência de *N. gandarela* e solos presentes em outros tipos de afloramentos rochosos do Quadrilátero Ferrífero.

2 FENOLOGIA REPRODUTIVA E VEGETATIVA DE *NICOTIANA GANDARELA*

2.1 MATERIAL E MÉTODOS

2.1.1 Área de Estudo

O estudo fenológico foi realizado com base na única população conhecida atualmente para a espécie *Nicotiana gandarela*. Esta população, pode ser dividida em 5 subpopulações, as quais se encontram nas imediações das coordenadas de longitude 641919.55 m (E) e latitude 7788464.21 m (S), WGS 84/UTM zona 23 k, na localidade denominada André do Mato Dentro, Município de Santa Bárbara, Minas Gerais, como ilustrado na Figura 1.

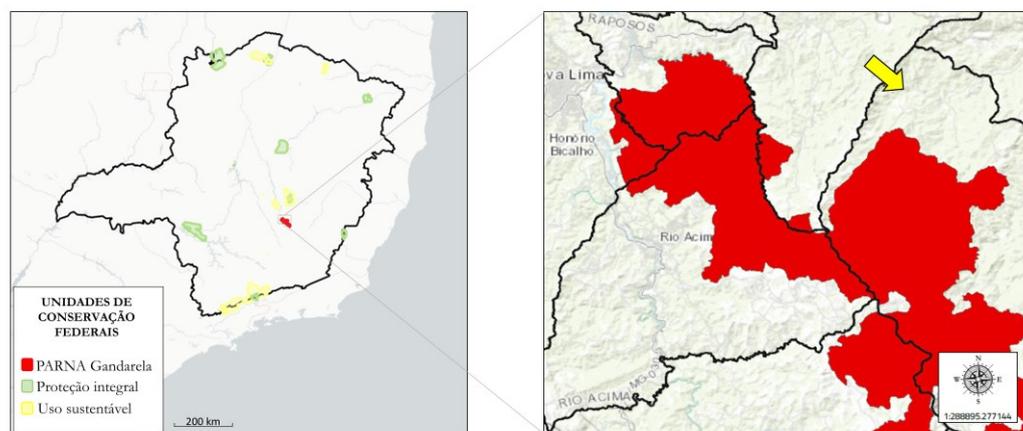


Figura 1 - Localização da população conhecida para a espécie *Nicotiana gandarela* (seta amarela), na qual foram desenvolvidos os experimentos. Detalhe para a ocorrência da espécie fora dos limites da Unidade de Conservação Parque Nacional da Serra do Gandarela (em vermelho).

O clima de Santa Bárbara é classificado como Cwb, com verões temperados (amenos) e invernos secos, segundo a classificação de Köppen (Alvares et al. 2013, Figura 2 - A). O clima Cwb ocorre em apenas 2,1% do território brasileiro, estando presente no centro-sul de Minas Gerais (26%), ocupando toda a

região da Mantiqueira (22°S, > 850 m), Canastra (20°150S, > 900 m) e Serra do Espinhaço (18°500S, > 950 m) (Alvares et al. 2013).

De acordo com dados disponíveis em Alvares *et. al* (2013) o mês mais frio do município é julho com média de 14.8° C, ao passo que fevereiro é o mês mais quente com média de 20.8° C. O mês de julho também é o mais seco (13 mm), ao passo que dezembro é o mais chuvoso, com 342 mm de precipitação.

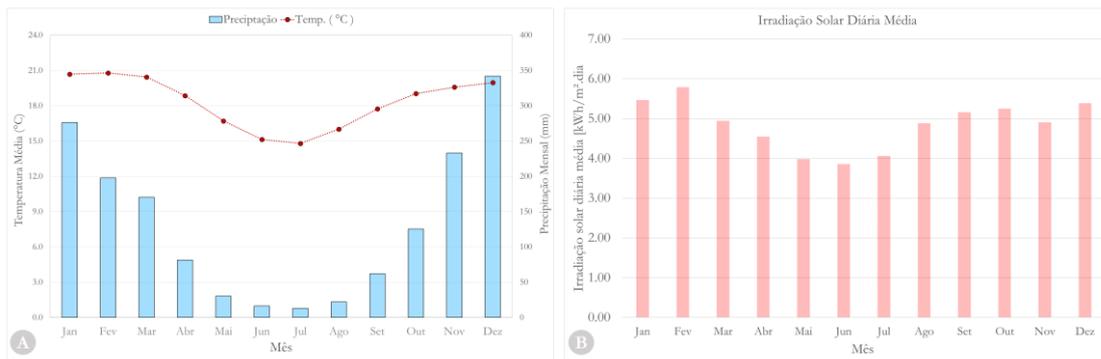


Figura 2 - Variáveis abióticas na região do estudo. **A:** Precipitação e Temperatura média mensal para o município de Santa Bárbara, MG, de 1950 a 1990 de acordo com Alvares *et al.* (2013). **B:** Irradiação solar diária média para o município de Santa Bárbara com base em dados de 1999 a 2015, de acordo com o INPE (2017).

De acordo com INPE (2017), para o município de Santa Bárbara, MG, o mês de fevereiro apresenta a maior irradiação média (5,78 kWh/m².dia), ao passo que o mês de junho apresenta o menor valor para esta variável (3,86 kWh/m².dia), sendo a média anual de 4,86 kWh/m².dia (Figura 2 – B).

2.1.2 Coleta e Análise de Dados

2.1.2.1 Critérios de Classificação e Padronização de Fenofases e Amostras

O estudo de fenologia reprodutiva e vegetativa foi realizado com base em três subpopulações conhecidas de *Nicotiana glandarela* e denominadas *POP1*, *POP2* e *POP3* no presente estudo. Estas subpopulações encontram-se muito próximas umas das outras (10 a 20 metros), estando separadas apenas por afloramentos rochosos. A estratégia de estudar especificamente cada subpopulação se deveu ao fato de observarmos potenciais diferenças fisiológicas entre os agrupamentos de indivíduos, em função da exposição à luz solar ao longo do dia, sendo maior na *POP1* e menor na *POP3*, com a *POP2* apresentando valores intermediários. O restante das subpopulações, *POP4* e *POP5* não foram contempladas no estudo fenológico em função do reduzido número de indivíduos que as compõem, além da dificuldade de acesso (*POP5* se encontra atrás de uma queda de cachoeira com pouquíssimos indivíduos), assim como para evitar mais impactos sobre a espécie.

Para cada subpopulação foram sorteados 30 indivíduos adultos (total de 90) para compor a amostragem fenológica. Como critério para seleção de adultos, considerou-se o valor mínimo de diâmetro da roseta

com 10 cm, visto que nas campanhas de reconhecimento foram observados indivíduos com esse porte em floração.

A fenologia reprodutiva foi avaliada pela contagem de botões florais (Figura 3 - A), considerando qualquer estágio de desenvolvimento, até o momento anterior à exposição das estruturas reprodutivas no tubo floral; flores em antese (flores completamente abertas, com exposição das estruturas reprodutivas; Figura 3 - B); frutos imaturos (Figura 3 - C); frutos maduros e/ou em dispersão (Figura 3 - D). Como critério para definição de Fruto Imaturo, consideramos a coloração esverdeada e ausência de exposição das sementes, ao passo que os frutos maduros apresentam aspecto seco, amarelado, paleáceo ou castanho e rapidamente expõem as sementes por meio de abertura longitudinal da cápsula. Os dados de frutos maduros e em dispersão foram agrupados, visto a rapidez da passagem de uma fenofase para a outra, sendo que a detecção da fase madura, antes da abertura da cápsula foi rara durante o estudo.

A fenologia vegetativa foi avaliada a partir dos registros (contagem) de folhas totais, folhas em brotamento (folhas recém-expandidas), maduras e folhas em senescência. Como critério para definição de folhas em brotamento, considerou-se as folhas em início de expansão, na porção apical, com tamanho 3 vezes menor que a maior folha madura (do indivíduo) e coloração verde mais clara que as maduras e/ou levemente arroxeadas (Figura 3 – E e F). Nas situações em que o indivíduo não apresentava folhas maduras, a comparação era realizada em relação às folhas senescentes, as quais são nitidamente amareladas ou paleáceas (Figura 3 - G).

As observações fenológicas foram realizadas quinzenalmente, de setembro de 2022 a janeiro de 2024, totalizando 34 observações.

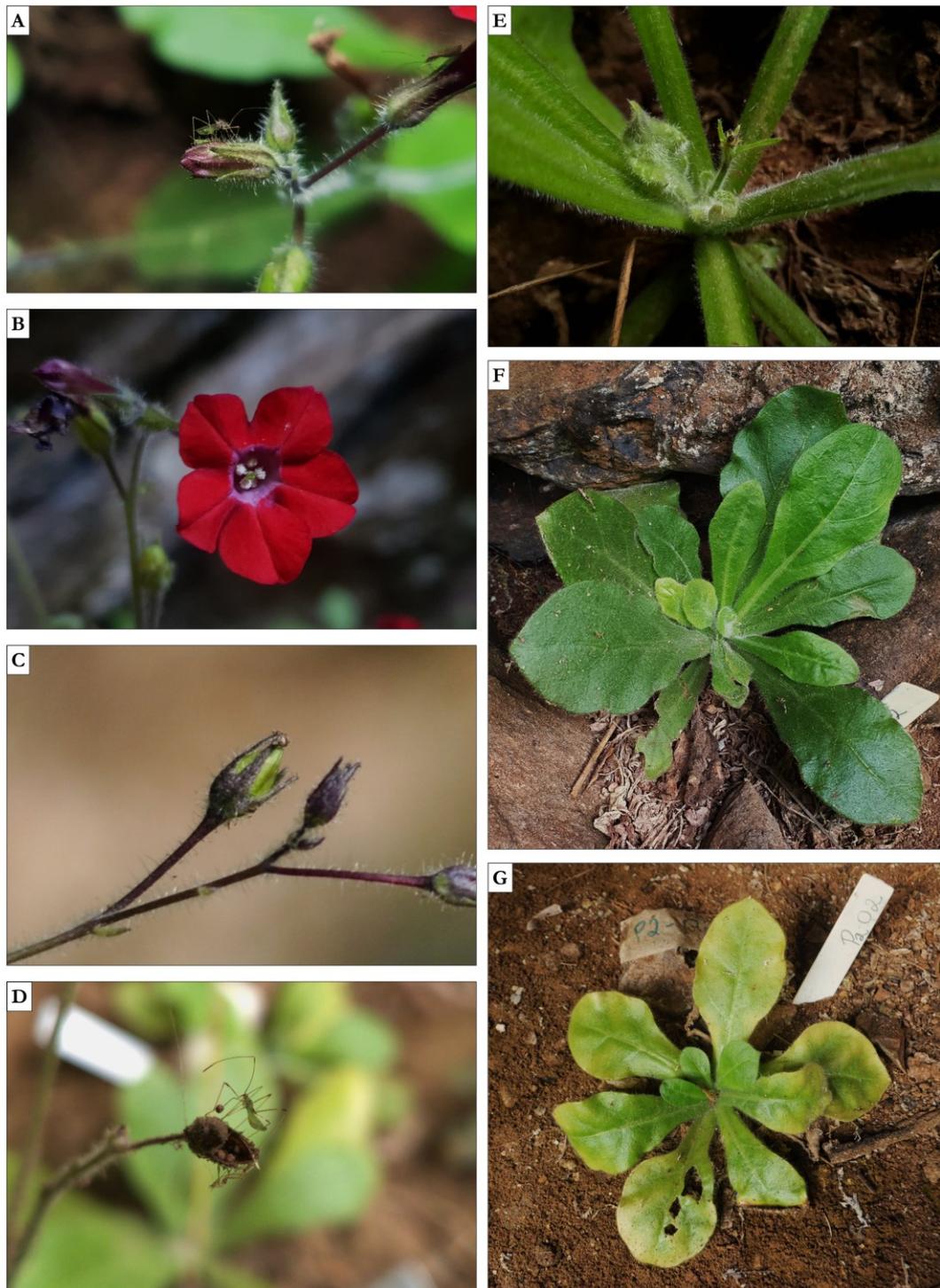


Figura 3 – Fenofases reprodutivas (A-D) e vegetativas (E-G) avaliadas para *Nicotiana glandarela*. **A:** Botões florais; **B:** Flor em Antese; **C:** Fruto Imaturo; **D:** Fruto maduro em dispersão, com semente sendo predada por Beritidae; **E:** Detalhe para as folhas em início de expansão no centro da roseta; **F:** Detalhe para folhas em brotamento no centro da roseta com coloração verde mais claro; **G:** Folhas Senescentes, amareladas na porção externa da roseta e folhas em brotamento na porção central.

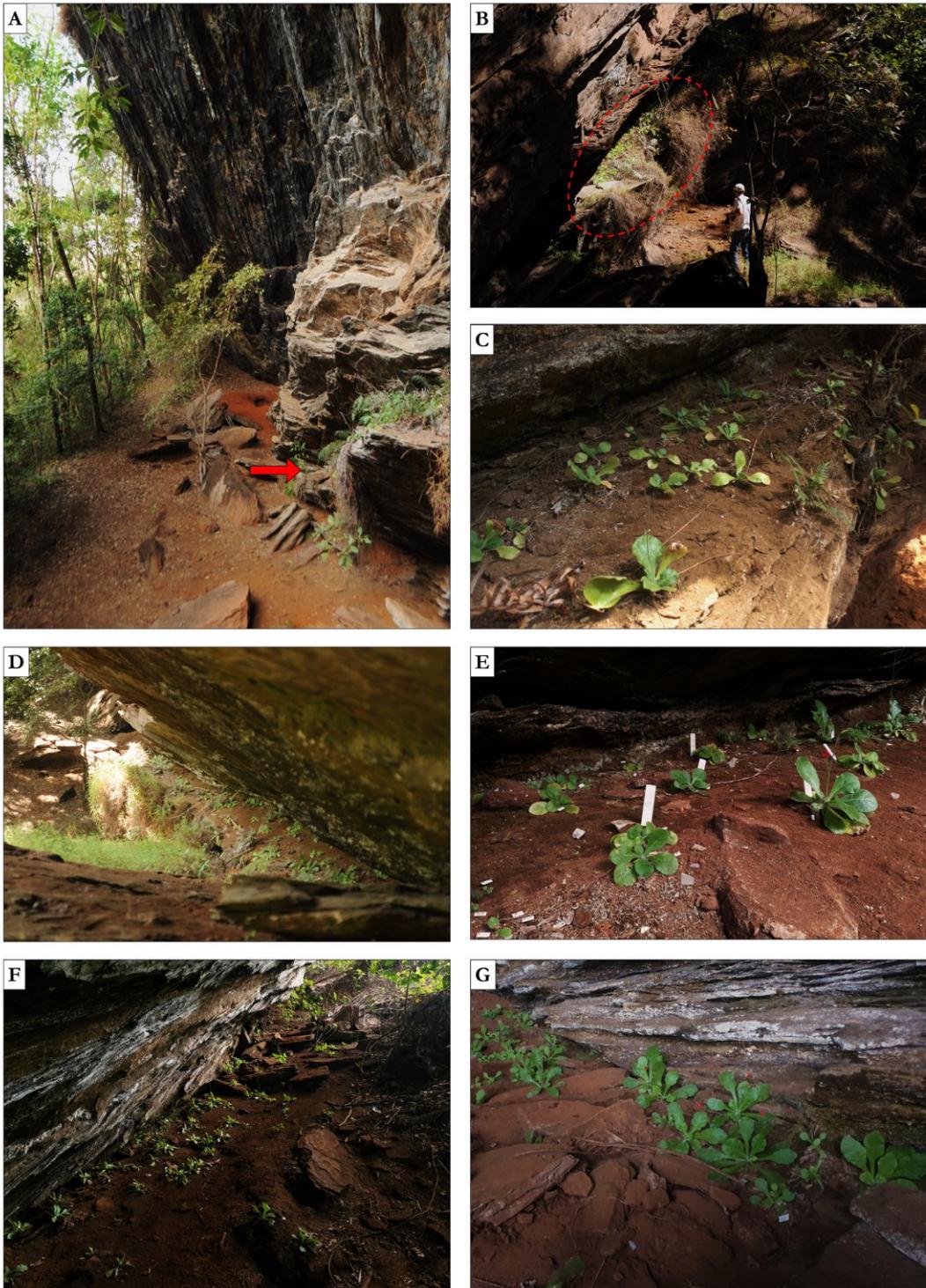


Figura 4 – Subpopulações de *Nicotiana glandarela* contempladas nos estudos fenológicos e fisiológicos. **A:** Complexo de afloramento dolomítico, onde ocorrem as três subpopulações; seta vermelha indica o local da subpopulação *POP1*. **B:** Em vermelho a subpopulação *POP1* se desenvolvendo em uma “bancada” no afloramento. **C:** Detalhe para o aspecto geral dos indivíduos da subpopulação *POP1*. **D:** Subpopulação *POP2* se desenvolvendo abaixo da lapa (porção direita da foto). **E:** Detalhe para o aspecto geral dos indivíduos da *POP2*, com demarcações (plaquinhas de identificação). **F:** Subpopulação *POP3*. **G:** Detalhe para o aspecto geral da *POP3*.

Os dados fenológicos foram coletados de forma quantitativa (contagem) para a avaliação do índice de intensidade das fenofases, dada pela soma acumulativa dos valores contados para cada fenofase, por indivíduo e para cada quinzena. Os valores de intensidade foram posteriormente utilizados para determinar a presença (valores maiores que zero) e ausência da atividade (valores iguais a 0), a partir da qual foi calculado o índice de atividade (IA%), que representa a porcentagem de indivíduos para cada fenofase observada.

Para a classificação de sincronia dos eventos fenológicos foram realizadas análises gráficas das distribuições de frequência (histograma) para os índices de atividade registrados a cada quinzena avaliada, considerando todas as observações com atividade de fenofases reprodutiva. A escolha do número de classes foi realizada com base no critério de Sturges (1926) ($k=9$; $h=9$). A partir da interpretação gráfica foram consideradas 5 classes de grau de sincronia para as fenofases reprodutivas (Figura 5).

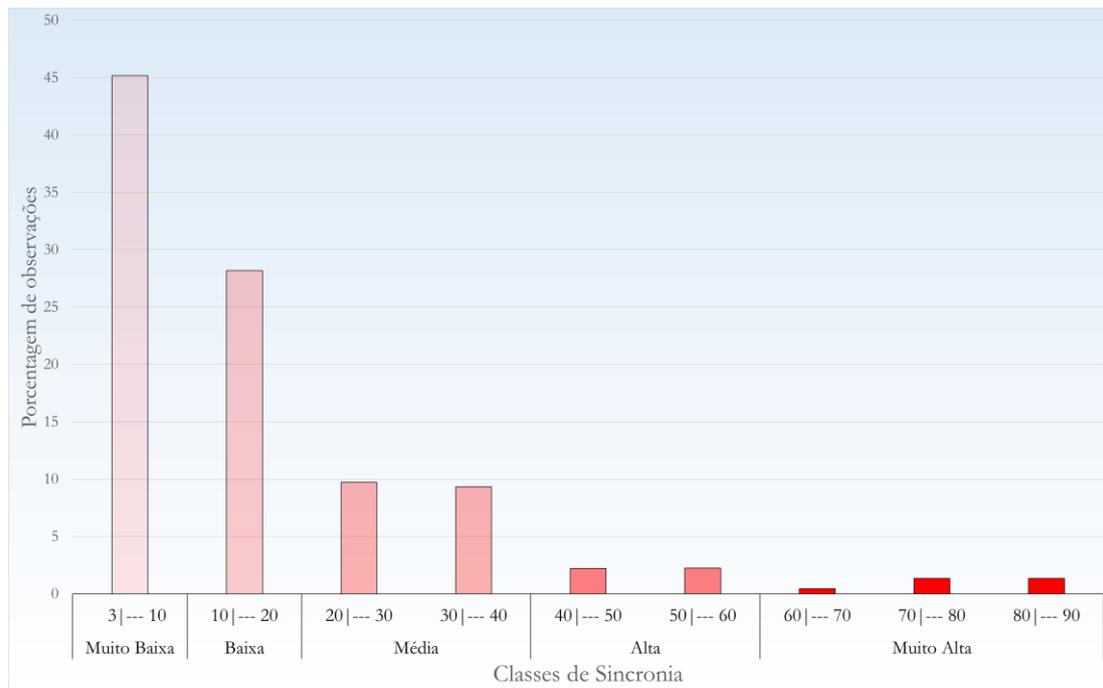


Figura 5 – Distribuição de frequências dos índices de atividade de eventos fenológicos reprodutivos para cada quinzena avaliada e classificações de sincronia estabelecidas.

Desta forma foram consideradas as seguintes classificações para o grau de sincronia:

- Sincronia Muito Baixa: < 10 % de indivíduos na fenofase;
- Sincronia Baixa: 10-20% de indivíduos na fenofases;
- Sincronia Média: 20-40% de indivíduos na fenofases;
- Sincronia Alta: 40-60% de indivíduos na fenofases;
- Sincronia Muito Alta: > 60% de indivíduos na fenofases.

As fenofases foram também classificadas de acordo com os padrões e duração estabelecidos por Newstrom et al. (1994), ao nível da população (conjunto de subpopulações), de cada subpopulação, assim como para o nível individual. Com base em Newstrom et al. (1994), consideramos os seguintes comportamentos:

- Anual (apenas um ciclo principal por ano, 1 a 9 meses de atividade da fenofase, podendo apresentar breves interrupções, com máximo de 1 mês dentro do ciclo principal e um evento pontual de baixa intensidade);
- Subanual (mais de um ciclo por ano, separados por intervalos de 2 meses ou mais entre os episódios reprodutivos);
- Contínuo (nenhuma ou raras e breves pausas, até 2 meses entre muitos episódios reprodutivos).

Para a classificação de duração das fenofases com padrão anual foram realizadas análises gráficas das distribuições de frequência (histograma) relativas à duração dos eventos fenológicos registrados ao longo de quinzenas contíguas, no período de fevereiro de 2023 a janeiro de 2024, considerando todas as observações com atividade de fenofases reprodutiva com padrão anual. A escolha do número de classes foi realizada com base no critério de Sturges (1926) ($k = 8, h=17$).

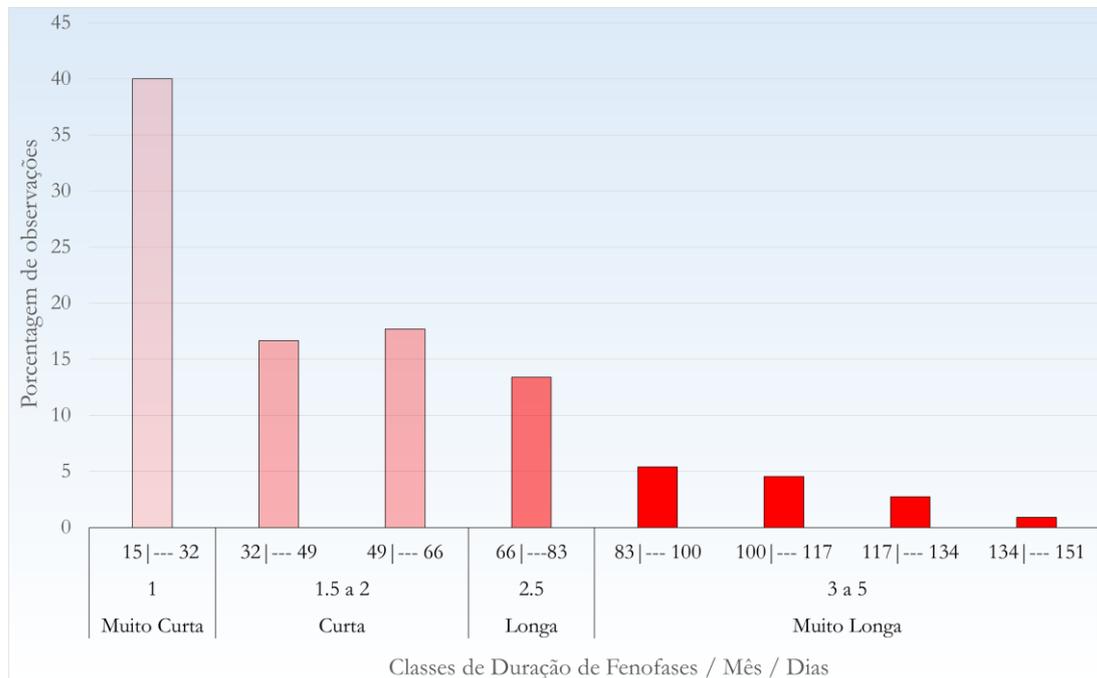


Figura 6 - Distribuição de frequências de duração de fenofases reprodutivas registradas para *Nicotiana glandarela* durante o período de fevereiro de 2023 a janeiro de 2024 para indivíduos com padrão anual e classificações de duração adotadas

A partir da interpretação do histograma e separação dos grupos distintos, foram consideradas 4 classes de duração para as fenofases, sendo elas: curta (1 mês); média (1.5 a 2 meses); longa 2.5 meses e Muito Longa (3 a 5 meses).

2.1.3 Análise de Sazonalidade de Fenofases e Associação com Variáveis Abióticas

Visto que, ao iniciarmos as observações em setembro de 2022, deparamos com várias fenofases já em atividade, as análises estatísticas do comportamento fenológico em associação com as variáveis abióticas se limitaram ao período de fevereiro de 2023 a janeiro de 2024, o qual delimitamos com mais confiabilidade o ciclo completo.

Considerando a natureza dos dados, foram realizadas análises estatísticas circulares no intuito de verificar o potencial de sazonalidade das fenofases, conforme descrito em Morellato et al. (2010), tendo como suporte o teste de significância de Rayleigh (Zar, 2010). Para tanto, utilizamos apenas os dados do segundo ano de observação, no qual conseguimos detectar o início e fim das fenofases reprodutivas. Desta forma as datas referentes às coletas de dados entre fevereiro de 2023 e janeiro de 2024 foram convertidas em ângulos, a partir dos quais calculamos o ângulo médio (a), correspondente à data média do ano, ao redor do qual se concentra o evento fenológico, assim como o comprimento deste vetor (r), o qual corresponde a uma medida de concentração de frequências em torno do ângulo médio estimado (Morellato *et al.* 2010).

Para a detecção de um padrão sazonal, o valor do ângulo médio deve ser significativo, ou seja, quando a hipótese nula do teste de Rayleigh é rejeitada ($p < 0,05$), e o valor de r se encontra superior a 0,5, tendo como valor máximo igual a 1 (Morellato *et al.* 2010). As análises circulares foram realizadas utilizando o software RStudio versão 2024.4.0.735 (Posit team 2024). Para a coleta de dados abióticos de temperatura e umidade do ar foram instalados *data loggers* com capacidade de registro dos valores de umidade e temperatura específicas do local de ocorrência da espécie. Os *data loggers* utilizados são da marca Elitech modelo RC-61 e foram configurados para obtenção de registros a cada 15 minutos, de forma a se obter com precisão elevada as amplitudes e médias diárias e mensais.

Os dados foram extraídos a cada campanha fenológica a título de resguardar o backup de dados com utilização do *software* Elitech V.7.2.0. A título de comparação, foram instalados 2 *data loggers*, um deles entremeado à subpopulação *POP3* de *N. gandarela* para obtenção de dados relativos ao microhabitat da espécie e o outro em ambiente com características similares de luminosidade (Figura 7), porém com ausência total da espécie. A escolha da alocação do *data logger* junto à *POP3* se deveu ao fato de julgarmos ser esta a subpopulação em melhores condições fisiológicas aparentes, visto que nas campanhas de reconhecimento percebemos que os indivíduos apresentavam visualmente maior biomassa, folhas mais vistosas e maiores, maior número de indivíduos e com maior proporção de indivíduos em fenofase reprodutiva. De fato, posteriormente, os experimentos fisiológicos corroboraram esta hipótese. Os dados de temperatura e umidade registrados foram utilizados para compor a caracterização do micro-habitat de ocorrência da espécie, assim como para avaliar a associação entre as variáveis abióticas e o comportamento fenológico registrado.

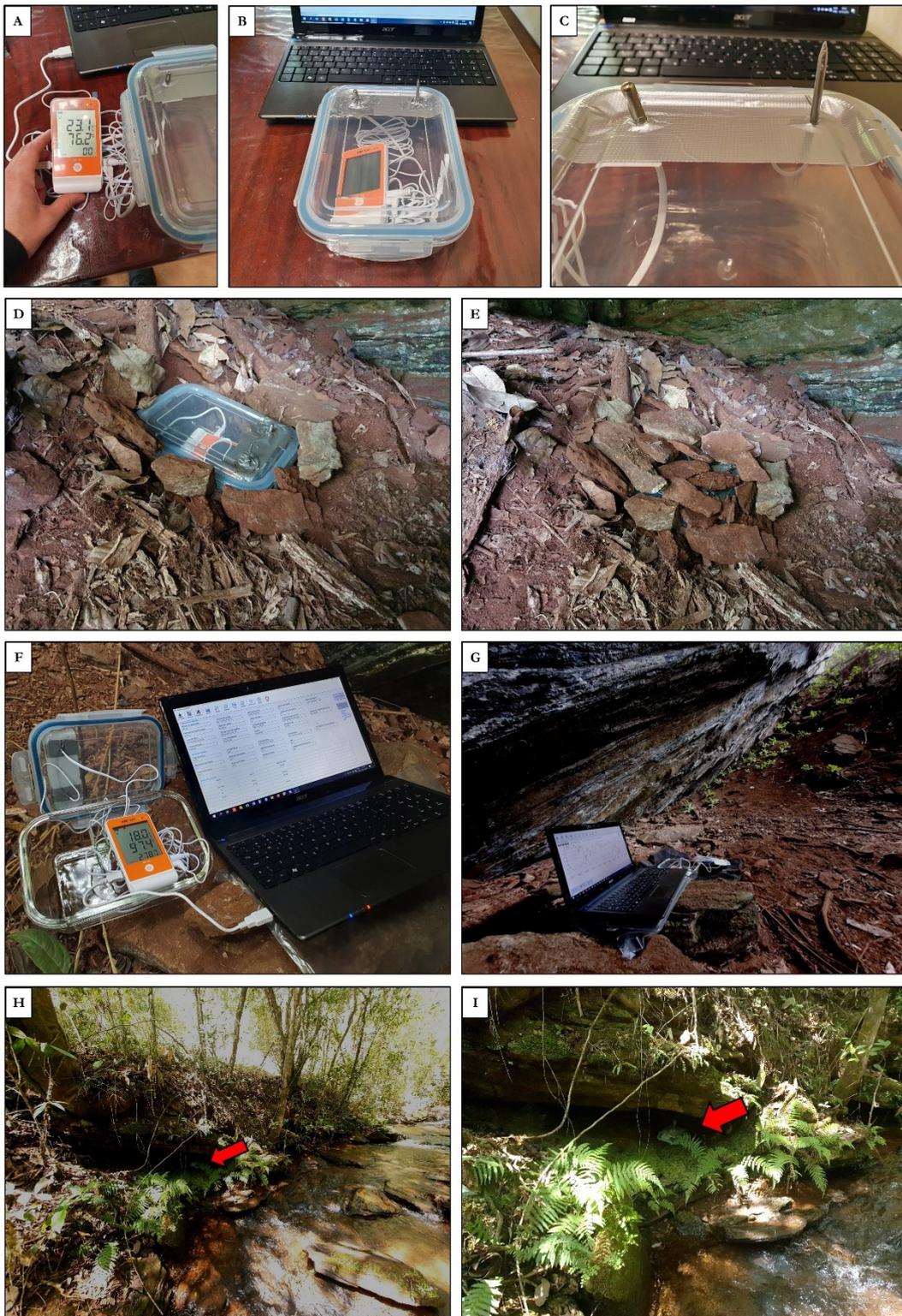


Figura 7 – Montagem, configuração, alocação e backup de dados do equipamento para mensuração de variáveis abióticas (temperatura e umidade do ar). **A-B**: configuração e teste do aparelho; **C**: Detalhe do posicionamento dos sensores na tampa da caixa de proteção; **D-E**: alocação do aparelho 1 na área de ocorrência da espécie *N. gandarela*; **F- G**: extração e backup de dados via *software* Elitech V.7.2.0; **H-I**: alocação do aparelho 2 (setas vermelhas) em área com características semelhantes de sombreamento, porém ausência de ocorrência da espécie *N. gandarela*.

Para a avaliação de associação entre variáveis abióticas (temperatura média, umidade do ar e comprimento do dia) e fenofases, foram considerados os valores relativos ao período de registro (Tempo 0), assim como os valores retroativos, ou seja, dos períodos de 1 a 3 meses (Tempo 1, Tempo 2 e Tempo 3) anteriores à ocorrência das fenofases. Os valores das variáveis abióticas (preditoras) foram sempre considerados pela média quinzenal em relação aos valores de intensidade das fenofases (variáveis resposta). Para tanto, recorreremos aos modelos lineares generalizados (GLM) com distribuição de Poisson e função de ligação logarítmica, sendo que o modelo inicial foi considerado com base em todas as variáveis abióticas, incluindo seus valores retroativos.

A ocorrência de colinearidade entre as variáveis explicativas foi verificada por meio do fator de variação inflação (VIF) via pacote “CAR” (Fox e Weisberg 2019) no software RStudio versão 2024.4.0.735 (Posit team 2024). Após a verificação, selecionamos para os modelos finais as variáveis não colineares (Jou et al. 2014), tendo como valor de corte aquelas que apresentaram VIF's menores que 10. Os resíduos foram verificados utilizando o pacote “hnp” (Moral et al. 2017), enquanto a ocorrência de sub/sobredispersão foi avaliada pela razão entre o desvio residual e graus de liberdade. Para realizar as análises estatísticas e gráficos, também foram utilizados os pacotes do R, “dplyr” (Wickham et al. 2023), “ggplot2” (Wickham 2016), “MASS” (Venables e Ripley 2002) e “rsq” (Zhang 2023).

2.1.4 Estatísticas complementares para comparação entre populações e estações

No intuito de comparar as intensidades de cada fenofase entre as subpopulações (amostras independentes, foram primeiramente realizados testes de normalidade (Shapiro-Wilk). Nos casos de violação do pressuposto de normalidade, foi realizado o Teste U de Mann-Whitney. Para os casos de distribuição normal (Shapiro-wilk > 0.05) e n-amostral igual foi realizado o teste t de student, enquanto para amostras desiguais usamos o teste de Welch.

Para a análise comparativa das fenofases entre as estações seca e úmida (amostras emparelhadas) também foi realizado o teste de normalidade (Shapiro-Wilk). Nos casos de violação do pressuposto de normalidade, seguiu-se com o teste W de Wilcoxon, ao passo que para distribuições normais utilizamos o teste t de student.

O nível de significância pré-estabelecido para a rejeição de hipóteses nulas e verificação de diferença observada foi de $p \leq 0,05$. As estatísticas descritivas foram representadas em tabelas ao longo das descrições dos resultados.

2.2 RESULTADOS

2.2.1 Fenologia Reprodutiva

A maior parte dos indivíduos ativos da *POP Geral* apresentaram um comportamento anual, com as fenofases reprodutivas concentradas na estação seca, em geral entre abril e setembro, com picos de intensidade entre julho e a primeira quinzena de outubro. Com este padrão foram registrados 78,5% dos indivíduos para a fenofases de Botões Florais, 77,1% (fenofase Flores em Antese), 78,1% (Frutos Imaturos) e 91,9% (Frutos Maduros), sendo que o restante dos indivíduos ativos, ou seja, uma quantidade bem menor, apresentaram características de padrão subanual (Tabela 1).

Na *POP Geral* os indivíduos inativos corresponderam a 38,9% para a fenofases Botões Florais, 46,7% (Flores em Antese), 50% (Frutos Imaturos) e 55,6% (Frutos Maduros) e a taxa de mortalidade foi de 13,3% (Tabela 1).

Tabela 1 – Padrões Fenológicos encontrados para o nível de indivíduos de *Nicotiana glandarela* na População Geral (conjunto das três subpopulações), em cada subpopulação (*POP1*, *POP2*, *POP3*) e proporção de indivíduos Ativos, Inativos e mortalidade. * A proporção dos padrões anual e subanual se refere ao total de indivíduos Ativos em cada fenofases.

Fenofase	Padrão Fenológico (%)			Inativos	Mortalidade (%)
	Ativos				
	Total	Anual *	Subanual *		
POP Geral					13,3
Botões Florais	48,1	78,5	20,8	38,9	
Flor em Antese	40,3	77,1	22,0	46,7	
Fruto Imaturo	37,0	78,1	21,0	50,0	
Fruto Maduro	31,4	91,9	7,1	55,6	
POP 1					23,3
Botões Florais	10,3	100	0	66,7	
Flor em Antese	3,7	100	0	73,3	
Fruto Imaturo	0	0	0	76,7	
Fruto Maduro	0	0	0	76,7	
POP 2					10,0
Botões Florais	53,3	62,5	37,5	36,7	
Flor em Antese	50,0	66,7	33,3	40,0	
Fruto Imaturo	46,7	64,3	35,7	43,3	
Fruto Maduro	46,7	64,3	35,7	43,3	
POP 3					6,7
Botões Florais	79,7	87,9	12,6	13,3	
Flor em Antese	66,3	85,4	15,1	26,7	
Fruto Imaturo	63,0	89,9	10,6	30,0	
Fruto Maduro	63,0	89,9	10,6	30,0	

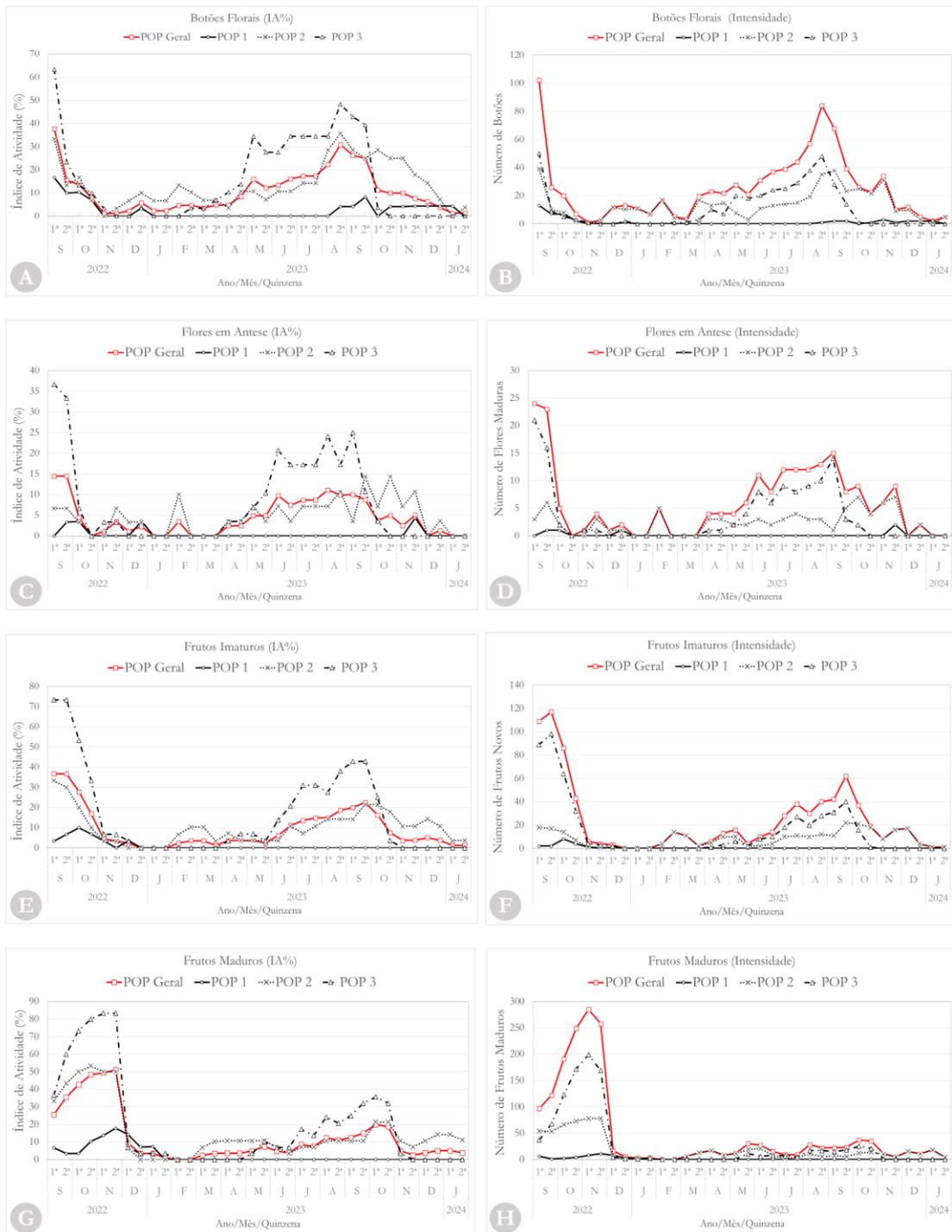


Figura 8 – Fenologia reprodutiva de *Nicotiana glandarela* no período de setembro de 2022 a janeiro de 2024. Os gráficos à esquerda referem-se ao índice de atividade, ao passo que à direita se encontram as intensidades de cada fenofases reprodutiva, dada pela soma das respectivas estruturas presentes nos indivíduos ativos em cada quinzena avaliada para as três subpopulações, assim como para a população geral.

Esta tendência para o comportamento majoritariamente anual foi verificada com maior intensidade na POP3, na qual uma média de 88,3% dos indivíduos ativos apresentou esse padrão, entre as 4 fenofases reprodutivas, contra aproximadamente 12 % em média de indivíduos subanuais (Tabela 1). Os indivíduos inativos corresponderam a 13,3% para Botões Florais, 26,7% (Flores em Antese), 30,0%

(Frutos Imaturos) e 30,0% (Frutos Maduros), o que correspondem as menores taxas de inatividade entre as subpopulações. A mortalidade também foi a menor entre as subpopulações, atingindo 6,7%.

A *POP2* também se caracteriza pela maior proporção de indivíduos anuais, no entanto com menor intensidade, quando comparada a *POP3*, apresentando 62,5% dos indivíduos ativos com padrão anual para Botões Florais, 66,7% (Flores em Antese), 64,3% (Frutos Imaturos) e 64,3% (Frutos Maduros). Os indivíduos inativos somaram 36,7% (Botões Florais), 40% (Flores em Antese), 43,3% (Frutos Imaturos) e 43,3% (Frutos Maduros) e a mortalidade foi de 10%.

A *POP1* apresentou a maior taxa de mortalidade (23,3%), assim como as maiores taxas de indivíduos inativos para as fenofases reprodutivas, sendo 66,7% para Botões Florais, 73,3% (Flores em Antese) e 76,7% para Frutos Imaturos e Fruto Maduro (Tabela 1).

Considerando os indivíduos com padrão anual, a duração das fenofases para a *POP Geral* apresentou maior proporção para as classes Curta e Intermediária, ou seja, até 2 meses (Tabela 2). Os indivíduos que contribuíram para o aumento das proporções de fenofases com duração mais longa são majoritariamente da *POP3*, com exceção da fenofases de Botões Florais, a qual a *POP2* apresentou 36% dos indivíduos com duração muito longa contra 14,3% na *POP3*.

No entanto, considerando todas as fenofases reprodutivas a *POP3* apresentou valores mais equilibrados entre as proporções de indivíduos para as classes de duração, destacando principalmente na ocorrência de um maior número de indivíduos nas classes de duração Longa e Muito Longa (Tabela 2).

Tabela 2 - Proporção de indivíduos (padrão anual) nas classes de duração de fenofases para a população Geral e subpopulações de *Nicotiana glandarela*.

Fenofase	Classes de Duração das Fenofases			
	Curta	Intermediária	Longa	Muito Longa
População Geral				
Botões Florais	28,6	31,4	20,0	20,0
Flores em Antese	57,1	35,7	3,6	3,6
Frutos Imaturos	34,6	26,9	19,2	19,2
Frutos Maduros	42,3	42,3	7,7	7,7
POP 1				
Botões Florais	33,3	0	66,7	0
Flores em Antese	100	0	0	0
Frutos Imaturos	0	0	0	0
Frutos Maduros	0	0	0	0
POP 2				
Botões Florais	27,3	36,4	0	36,4
Flores em Antese	60,0	40,0	0	0
Frutos Imaturos	44,4	33,3	22,2	0

Fenofase	Classes de Duração das Fenofases			
	Curta	Intermediária	Longa	Muito Longa
Frutos Maduros	33,3	66,7	0	0
POP3				
Botões Florais	28,6	33,3	23,8	14,3
Flores em Antese	52,9	35,3	5,9	5,9
Frutos Imaturos	29,4	23,5	17,6	29,4
Frutos Maduros	47,1	29,4	11,8	11,8

A *POP Geral* apresentou pelo menos 1 indivíduo ativo registrado nas campanhas quinzenais (Figura 8; Figura 9) e apesar da ausência de registros de atividade de floração (Flores em Antese) para a segunda quinzena de outubro de 2022, assim como para os meses de janeiro e março de 2023, neste mesmo período foram registradas atividades de produção de botões florais e frutos, comprovando a ocorrência de floração, a qual seria detectada, caso fossem realizadas campanhas de frequência semanal.



Figura 9 – Duração das atividades de fenofases ao longo de 2023 e início de 2024 para a população Geral e subpopulações. As barras coloridas correspondem à presença de registro de atividade de cada fenofase. Os triângulos correspondem à data média de pico de intensidade da fenofase. **A:** Botões Florais; **B:** Flores em Antese; **C:** Frutos Imaturos; **D:** Frutos Maduros. A subpopulação *POP1* não apresentou atividades de frutificação, por isso não está representada nos gráficos C e D.

Portanto, apesar do comportamento majoritariamente anual (em termos de indivíduos) registrado para cada subpopulação, a ocorrência de defasagem fenológica entre indivíduos e entre as subpopulações, resulta em uma atividade reprodutiva contínua ao longo do ciclo anual, de forma escalonada, ao nível

da *POP Geral*, mesmo que em baixa intensidade em certas épocas, como pode ser visualizado na Figura 9.

As variações temporais nos eventos fenológicos (defasagem) entre os indivíduos, assim como entre as subpopulações ficam também evidentes por meio da análise do grau máximo de sincronia (Tabela 3). Para *POP Geral* a sincronia foi considerada Média para Botões Florais e Frutos Imaturos; sincronia baixa para Flores em Antese e sincronia alta apenas para Frutos Maduros.

A *POP3* apresentou um grau de sincronia superior em relação à média geral (*POP Geral*), atingindo a classe Alta para Botões florais, Muito Alta para Frutos Imaturos e Frutos Maduros e classificação Média para Flores em Antese

Tabela 3 – Máximo grau de sincronia das fenofases em porcentagem de indivíduos e sua respectiva classificação para cada subpopulação e para a população geral de *Nicotiana glandarela*, durante o período de setembro de 2022 a janeiro de 2024.

População	Botões Florais	Flores em Antese	Frutos Imaturos	Frutos Maduros
<i>POP1</i>	7 (MB)	4 (MB)	10 (B)	18 (B)
<i>POP2</i>	33 (M)	14 (B)	33 (M)	53 (A)
<i>POP3</i>	47 (A)	37 (M)	73 (MA)	83 (MA)
<i>POPGERAL</i>	28 (M)	14 (B)	37 (M)	51 (A)

Legenda: MA: Muito Alta; A: Alta; M: Média; B: Baixa; MB: Muito Baixa.

2.2.1.1 Sazonalidade com Base na Estatística Circular

A *POP1* apresentou atividades extremamente baixas para as fenofases reprodutivas no período de fevereiro de 2023 a janeiro de 2024. Neste período, o índice de atividade (IA%) para a produção de botões florais nesta subpopulação não ultrapassou 6,67% (Figura 8 – A e B), correspondendo ao máximo de 2 indivíduos, em setembro de 2023. Em consequência, a produção de flores foi ainda menos evidente, sendo registrada apenas para a segunda quinzena de novembro de 2023, as quais não evoluíram para a frutificação. Assim, a última ocorrência de produção de frutos maduros, nesta subpopulação, foi registrada para janeiro de 2023. No entanto, observamos valores consideravelmente maiores (IA = 16,67%) em setembro de 2022, ou seja, no ciclo anterior, além de apresentar uma produção de flores e frutos maduros superior (IA = 17,85).

Visto isso, a escassez de dados de atividade de fenofases reprodutivas em *POP1* impediu a realização das análises de estatística circular específicas para esta subpopulação, assim como a modelagem para avaliação de associação com as variáveis climáticas.

Considerando o ciclo anual selecionado para as estatísticas circulares (fevereiro/2023 a janeiro/2024), verifica-se que o período com maiores investimentos em botões florais se encontra entre abril e setembro (Figura 8 – A e B).

Os resultados da estatística circular mostraram que tanto as datas médias de início, quanto as de pico, das fenofases reprodutivas, foram sazonais e concentradas na estação seca (julho a setembro), tanto para a *POP Geral*, quanto para as subpopulações *POP2* e *POP3*, com significância considerável dada pelo teste de Rayleigh e valores de r sempre acima de 0,58 (Tabela 4).

Desta forma, apesar de registrarmos 1 ou mais indivíduos em atividade reprodutiva ao longo de todas as quinzenas na escala temporal avaliada, a análise baseada na estatística circular aponta o padrão sazonal e anual para a população Geral contemplada, assim como para *POP2* e *POP3*. Com relação à *POP1* a estatística circular ficou inviável em função da escassez de atividade relativa ao período.

Como pode ser observado na Tabela 4, para a população geral, o início da fenofase de Botões florais está concentrado na data média de 28 de julho ($r = 0,5981$; $p < 0,001$) e seu pico em 13 de agosto ($r = 0,6920$; $p < 0,001$), juntamente com o pico de Flores em Antese ($r = 0,7004$; $p < 0,001$), as quais apresentaram início médio em 2 de agosto ($r = 0,6000$; $p < 0,001$).

A data média para início dos Frutos Imaturos foi de 2 de agosto ($r = 0,7080$; $p < 0,001$), com pico no dia 27 do mesmo mês ($r = 0,7828$; $p < 0,001$), enquanto os frutos maduros tiveram início em 5 de setembro ($r = 0,7247$; $p < 0,001$) e pico em 21 deste mês ($r = 0,7585$; $p < 0,001$).

Tabela 4 - Resultados da Análise Circular Estatística para a Sazonalidade da População Geral e subpopulações *POP2* e *POP3* de *Nicotiana glandarela* (Solanaceae) com base nos valores quinzenais de intensidade (soma de estruturas). A sazonalidade significativa corresponde aos valores de $r > 0.5$ e $p \leq 0,05$.

	Variáveis Fenológicas							
	Início de Botão Floral	Pico de Botão Floral	Início de Floração (Flor em Antese)	Pico de Floração (Flor em Antese)	Início de Frutos Imaturos	Pico de Frutos Imaturos	Início de Frutos Maduros	Pico de Frutos Maduros
<i>POP Geral</i>								
Obs (<i>N</i>)	34	34	28	28	26	26	26	26
Ângulo Médio ($\bar{\alpha}$)	205,62	221,05	210,14	221,16	210,90	234,86	244,09	259,56
Data média	28 jul,	13 ago,	2 ago,	13 ago,	2 ago,	27 ago,	5 set,	21 set,
Desvio padrão circular	58,09	49,16	57,91	48,35	47,61	40,09	45,97	42,59
Comprimento do vetor médio (<i>r</i>)	0,60	0,69	0,60	0,70	0,71	0,78	0,72	0,76
Ângulo modal		229,32		244,11		258,90		273,70
Teste Rayleigh (<i>Z</i>)	12,16	16,28	10,08	13,74	13,03	15,93	13,66	14,96
Teste Rayleigh (<i>P</i>)	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
<i>POP 2</i>								
Obs (<i>N</i>)	10	10	10	10	9	9	9	9
Ângulo Médio ($\bar{\alpha}$)	230,65	244,54	236,80	243,98	243,76	262,81	265,31	282,06
Data média	22 ago,	5 set,	29 ago,	5 set,	5 set,	24 set,	26 set,	13 out,
Desvio padrão circular	48,42	46,21	59,52	48,81	50,73	42,90	49,32	46,85
Comprimento do vetor médio (<i>r</i>)	0,70	0,72	0,58	0,70	0,68	0,76	0,69	0,72

Considerando a análise específica para a *POP2* o início da fenofase de Botões florais está concentrado na data média de 22 de agosto ($r = 0,6997$; $p = 0,0046$) e seu pico em 5 de setembro ($r = 0,7223$; $p = 0,003$), juntamente com o pico de Flores em Antese ($r = 0,6956$; $p = 0,005$), as quais apresentaram início médio em 29 de agosto ($r = 0,5829$; $p = 0,0291$).

Para Frutos Imaturos a *POP2* teve data média de início em 5 de setembro ($r = 0,6756$; $p = 0,0121$), com pico no dia 24 do mesmo mês ($r = 0,7555$; $p = 0,0031$), ao passo que os frutos maduros tiveram início em 26 de setembro ($r = 0,6903$; $p = 0,0096$) e pico em 13 de outubro ($r = 0,71585$; $p = 0,0063$).

A subpopulação *POP3* apresentou valores adiantados de início e pico para as fenofases reprodutivas em relação às datas médias da população Geral e *POP2*. A data média de início de Botões Florais na *POP3* foi de 5 de julho ($r = 0,6497$; $p < 0,001$), com pico em 25 do mesmo mês ($r = 0,7546$; $p < 0,001$).

Ainda para a *POP3*, a média de início de Flores em Antese foi em 16 de julho ($r = 0,7331$; $p < 0,001$), com pico em 28 de julho ($r = 0,8159$; $p < 0,001$). Os Frutos Imaturos tiveram início concentrado em 19 de julho ($r = 0,8061$; $p < 0,001$) e pico em 14 de agosto ($r = 0,8644$; $p < 0,001$). Os frutos Maduros apresentaram início médio em 26 de agosto ($r = 0,7791$; $p < 0,001$) e pico em 10 de setembro ($r = 0,8229$; $p < 0,001$).

Com base nos dados da estatística circular verificamos um atraso (defasagem) geral entre as datas médias das fenofases reprodutivas da *POP2* para a *POP3*, de no mínimo 31 dias (início de Frutos Maduros) a máximo de 50 dias (início de Frutos Imaturos).

Esta diferença apresentou suporte estatístico pelo teste de Watson-Williams (Tabela 5), pelo qual podemos confirmar diferenças significativas entre a *POP2* e *POP3* para: pico de Botões Florais ($F = 5.53$; $p = 0.02566$), pico de Flores em Antese ($F = 4.8146$; $p = 0.03773$), início de Frutos Imaturos ($F = 6.2861$; $p = 0.01934$), e pico de Frutos Imaturos ($F = 6.946$; $p = 0.01449$).

A diferença entre as médias de início de Flores em Antese, entre *POP2* e *POP3* não foi significativa ($p = 0,05926$), no entanto, o teste indicou um parâmetro de concentração global com valor menor que 2, o que invalida o teste para esta variável. O baixo valor do parâmetro de concentração global também foi encontrado para início de Botões Florais, impossibilitando o uso do teste para esta variável (Tabela 5 - valores marcados com “*”).

Tabela 5 - Testes de Watson-Williams para homogeneidade de médias, aplicados entre as subpopulações *POP2* e *POP3* considerando a intensidade das fenofases reprodutivas de floração e frutificação. * Parâmetro de concentração global < 2 (teste provavelmente não aplicável).

Fenofase	Momento	Data Média <i>POP2</i>	Data Média <i>POP3</i>	F	df1	df2	p-value
Botão Floral	Início	230,6452	183,4284	5,3412	1	29	0,02813 *
	Pico	244,5422	203,1191	5,5334	1	29	0,02566

Fenofase	Momento	Data Média POP2	Data Média POP3	F	df1	df2	p-value
Flores em Antese	Início	236,8002	193,5956	3,9054	1	25	0,05926 *
	Pico	243,9791	205,761	4,8146	1	25	0,03773
Frutos Imaturos	Início	243,7646	196,9622	6,2861	1	24	0,01934
	Pico	262,8123	222,3393	6,946	1	24	0,01449
Frutos Maduros	Início	265,3109	234,315	2,6402	1	24	0,1172
	Pico	282,0632	249,4114	3,5294	1	24	0,07249

2.2.1.2 Análises Comparativas com Base em Estatísticas Lineares

2.2.1.2.1 Análise entre Estações Climáticas

O conjunto de registros das fenofases reprodutivas durante o período da análise elucidou diferenças significativas, tanto na *POP Geral*, quanto nas subpopulações ao longo dos meses e principalmente entre as estações seca e úmida.

Verificou-se que para a *POP Geral* houve diferenças significativas na resposta fenológica entre as estações úmida e seca, para a intensidade de Botões Florais ($p < 0,001$), Flores em Antese ($p = 0,002$) e Frutos Imaturos ($p = 0,007$), com intervalos entre quartis (IQR) maiores na seca (Tabela 7). Para Frutos Maduros a média foi superior, porém o valor de IQR foi igual e, portanto, não apresentou suporte estatístico (Tabela 7).

Tabela 6 - Quadro comparativo das intensidades das fenofases para População Geral (*POP Geral*) e cada subpopulação entre as estações úmida e seca. Legenda: *: relação sem suporte estatístico; *p-value*: valor *p* da estatística utilizada (detalhamento dos testes na Tabela 7).

Fenofases	Estações		p-value
	Úmida	Seca	
POP Geral			
Botões Florais	Menor	Maior	< 0,001
Flores em Antese	Menor	Maior	0,002
Frutos Imaturos	Menor	Maior	0,007
Frutos Maduros	<i>Menor *</i>	<i>Maior *</i>	0,296
POP1			
Botões Florais	<i>Maior *</i>	<i>Menor *</i>	1
Flores em Antese	<i>Maior *</i>	<i>Menor *</i>	1
Frutos Imaturos	–	–	–
Frutos Maduros	–	–	–
POP2			
Botões Florais	<i>Menor *</i>	<i>Maior *</i>	0,266

Fenofases	Estações		<i>p</i> -value
	Úmida	Seca	
Flores em Antese	<i>Menor</i> *	<i>Maior</i> *	0,823
Frutos Imaturos	<i>Maior</i> *	<i>Menor</i> *	0,861
Frutos Maduros	<i>Menor</i> *	<i>Maior</i> *	0,753
POP3			
Botões Florais	Menor	Maior	< 0,001
Flores em Antese	Menor	Maior	< 0,001
Frutos Imaturos	Menor	Maior	< 0,001
Frutos Maduros	<i>Menor</i> *	<i>Maior</i> *	0,071

A análise específica para a *POP3* mostrou um padrão similar ao encontrado na *POP Geral*, com diferenças significativas entre as mesmas fenofases, apresentando medianas e IQR maiores na estação seca (Tabela 6 e Tabela 7). As demais subpopulações não apresentaram suporte estatístico para inferirmos diferenças significativas entre as estações, apesar de que, para a *POP2* verifica-se uma tendência a apresentar médias maiores na estação seca para as fenofases de Botões Florais, Flores em Antese e Frutos Maduros (Tabela 6 e Tabela 7).

Tabela 7 - Análise estatística comparativa (amostras emparelhadas) para as fenofases reprodutivas de *Nicotiana glandarela* entre a estações úmida e seca. A estação úmida correspondeu aos meses de fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro de 2023 e janeiro de 2024. A estação seca correspondeu aos meses de abril a setembro de 2023. As subpopulações são denominadas *POP1*, *POP2* e *POP3* e o conjunto delas é apresentado como POP Geral. Os valores de p-value em negrito correspondem às comparações com diferença significativa ($p\text{-value} \leq 0.05$)

Fenofase	Estação	Estatística Descritiva							Testes Estatísticos			
		N	Média	Erro-Padrão	Desvio-Padrão	Mediana	Q1	Q3	p (Shapiro-Wilk)	Teste	valor	<i>p-value</i>
<i>POP Geral</i>												
Botões Florais	Úmida	79	2,050	0,677	6,020	0,000	0,000	0,000	< 0,001	w (Wilcoxon)	w = 143	< 0,001
	Seca	79	6,230	0,987	8,770	1,000	0,000	11,000				
Flores em Antese	Úmida	79	0,443	0,144	1,280	0,000	0,000	0,000	< 0,001	w (Wilcoxon)	w = 95,5	0,002
	Seca	79	1,380	0,279	2,480	0,000	0,000	2,000				
Frutos Imaturos	Úmida	79	1,700	0,552	4,910	0,000	0,000	0,000	< 0,001	w (Wilcoxon)	w = 121	0,007
	Seca	79	3,840	0,749	6,660	0,000	0,000	4,500				
Frutos Maduros	Úmida	79	1,960	0,471	4,190	0,000	0,000	1,500	< 0,001	w (Wilcoxon)	w = 222	0,296
	Seca	79	2,810	0,742	6,600	0,000	0,000	1,500				
<i>POP1</i>												
Botões Florais	Úmida	23	0,647	0,587	2,422	0,000	0,000	0,000	< 0,001	w (Wilcoxon)	w = 3	1
	Seca	23	0,294	0,239	0,985	0,000	0,000	0,000				
Flores em Antese	Úmida	23	0,087	0,087	0,417	0,000	0,000	0,000	< 0,001	w (Wilcoxon)	w = 1	1
	Seca	23	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000				
Frutos Imaturos	Úmida	23	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	Seca	23	–	–	–	–	–	–				
Frutos Maduros	Úmida	23	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	Seca	23	–	–	–	–	–	–				
<i>POP2</i>												
Botões Florais	Úmida	28	5,180	1,740	9,230	0,000	0,000	7,250	0,013	w (Wilcoxon)	w = 46	0,266
	Seca	28	7,360	1,820	9,640	1,500	0,000	13,500				
Flores em Antese	Úmida	28	1,110	0,365	1,930	0,000	0,000	2,000	< 0,001	w (Wilcoxon)	w = 30	0,823
	Seca	28	1,210	0,406	2,150	0,000	0,000	1,250				

Fenofase	Estação	Estatística Descritiva							Testes Estatísticos			
		N	Média	Erro-Padrão	Desvio-Padrão	Mediana	Q1	Q3	p (Shapiro-Wilk)	Teste	valor	<i>p-value</i>
Frutos Imaturos	Úmida	28	4,180	1,430	7,590	0,000	0,000	3,250	< 0,001	w (Wilcoxon)	w = 48,5	0,861
	Seca	28	3,890	1,400	7,400	0,000	0,000	2,750				
Frutos Maduros	Úmida	28	3,860	1,130	5,990	0,000	0,000	6,500	< 0,001	w (Wilcoxon)	w = 58	0,753
	Seca	28	4,180	1,740	9,210	0,000	0,000	2,750				
POP3												
Botões Florais	Úmida	28	0,21	0,11	0,57	0,00	0,00	0,00	0,006	w (Wilcoxon)	w = 0	< 0,001
	Seca	28	10,04	1,71	9,03	9,50	2,75	13,30				
Flores em Antese	Úmida	28	0,07	0,07	0,38	0,00	0,00	0,00	< 0,001	w (Wilcoxon)	w = 3,5	< 0,001
	Seca	28	2,68	0,59	3,13	1,50	0,00	4,00				
Frutos Imaturos	Úmida	28	0,61	0,27	1,42	0,00	0,00	0,25	0,008	w (Wilcoxon)	w = 1,5	< 0,001
	Seca	28	6,93	1,35	7,14	4,00	0,00	11,00				
Frutos Maduros	Úmida	28	1,7	0,5	2,8	0,0	0,0	2,3	0,075	t (Student)	t = -1,88	0,071
	Seca	28	3,8	1,1	5,6	0,5	0,0	6,3				

2.2.1.2.2 Análise entre Subpopulações

As análises comparativas entre as subpopulações, mostraram diferenças significativas em ambas as estações, como será detalhado abaixo.

Período da Estação Úmida

A intensidade de Botões Florais e Flores em Antese foi significativamente mais alta na *POP2*, quando está foi comparada à *POP1* ($p = 0.006$; $p = 0.004$), assim como à *POP3* ($p = 0.005$; $p = 0.001$). Entre a *POP1* e *POP3* não houve diferença significativa para estas fenofases (Tabela 8 e Tabela 9).

Para Frutos Imaturos e Frutos Maduros, a *POP1* se diferenciou, com valores menores de intensidade, em relação à *POP2* ($p < 0.001$; $p < 0.001$) e *POP3* ($p = 0.011$; $p < 0.001$), ao passo que na comparação entre os valores de *POP2* e *POP3* não encontramos com suporte estatístico para afirmar diferenças em relação à essas intensidades de fenofases (Tabela 8 e Tabela 9).

Período da Estação Seca

No período da seca a *POP1* apresentou valores mais baixos para intensidade de Botões Florais em relação à *POP2* ($p < 0.001$) e *POP3* ($p < 0.001$). A *POP3* apresentou valores maiores que a *POP2*, no entanto sem suporte estatístico (Tabela 8 e Tabela 9).

A intensidade de Flores em Antese e de Frutos Imaturos foi significativamente diferente entre as três subpopulações com a *POP3* apresentando maior intensidade, seguida pela *POP2* e *POP1*, a qual apresentou valores nulos (Tabela 8 e Tabela 9).

Para Frutos Maduros a *POP1* apresentou valores nulos, diferenciando-se da *POP2* ($p = 0,003$) e *POP3* ($p < 0,001$), ao passo que entre *POP2* e *POP3* os valores não se diferenciaram com suporte estatístico.

Tabela 8 – Quadro comparativo para as intensidades das fenofases reprodutivas entre as subpopulações nos períodos da estação seca e estação úmida. POP1 = intensidade da fenofase na subpopulação 01; POP2 = intensidade da fenofase na subpopulação 02; POP3 = intensidade da fenofase na subpopulação 03.

Fenofases	Estações	
	Úmida	Seca
Botões Florais	POP1 = POP3 < POP2	POP1 < POP2 = POP3
Flores em Antese	POP1 = POP3 < POP2	POP1 < POP2 < POP3
Frutos Imaturos	POP1 < POP2 = POP3	POP1 < POP2 < POP3
Frutos Maduros	POP1 < POP2 = POP3	POP1 < POP2 = POP3

Tabela 9 - Análise estatística comparativa entre as subpopulações de *Nicotiana glauca* para as fenofases vegetativas considerando os períodos de estação úmida e seca. As subpopulações são denominadas *POP1*, *POP2* e *POP3*. A estação úmida correspondeu aos meses de fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro de 2023 e janeiro de 2024. A estação seca correspondeu aos meses de abril a setembro de 2023. Os valores de *p-value* em negrito correspondem às comparações com diferença significativa ($p\text{-value} \leq 0,05$).

Fenofase	Subpopulação	Estatística Descritiva							Testes de Comparação			
		N	Média	Erro-Padrão	Desvio-Padrão	Mediana	Q1	Q3	p (Shapiro-Wilk)	Teste	Valor do teste	<i>p-value</i>
Estação Úmida												
Botões Florais	POP 1	23	0,478	0,435	2,086	0,000	0,000	0,000	< 0,001	U (Mann-Whitney)	u = 207	0,006
	POP 2	28	5,179	1,744	9,226	0,000	0,000	7,250				
	POP 1	23	0,478	0,435	2,086	0,000	0,000	0,000	< 0,001	U (Mann-Whitney)	u = 305	0,577
	POP 3	28	0,214	0,107	0,568	0,000	0,000	0,000				
	POP 2	28	5,179	1,744	9,226	0,000	0,000	7,250	< 0,001	U (Mann-Whitney)	u = 256	0,005
	POP 3	28	0,214	0,107	0,568	0,000	0,000	0,000				
Flores em Antese	POP 1	23	0,087	0,087	0,417	0,000	0,000	0,000	< 0,001	U (Mann-Whitney)	u = 209	0,004
	POP 2	28	1,107	0,365	1,931	0,000	0,000	2,000				
	POP 1	23	0,087	0,087	0,417	0,000	0,000	0,000	< 0,001	U (Mann-Whitney)	u = 319,5	0,91
	POP 3	28	0,071	0,071	0,378	0,000	0,000	0,000				
	POP 2	28	1,107	0,365	1,931	0,000	0,000	2,000	< 0,001	U (Mann-Whitney)	u = 252	0,001
	POP 3	28	0,071	0,071	0,378	0,000	0,000	0,000				
Frutos Imaturos	POP 1	23	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	< 0,001	U (Mann-Whitney)	u = 196	< 0,001
	POP 2	28	4,180	1,430	7,590	0,000	0,000	3,250				
	POP 1	23	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	< 0,001	U (Mann-Whitney)	u = 242	0,011
	POP 3	28	0,607	0,269	1,420	0,000	0,000	0,250				
	POP 2	28	4,179	1,434	7,590	0,000	0,000	3,250	< 0,001	U (Mann-Whitney)	u = 313	0,118
	POP 3	28	0,607	0,269	1,420	0,000	0,000	0,250				
Frutos Maduros	POP 1	23	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	< 0,001	U (Mann-Whitney)	u = 196	< 0,001
	POP 2	28	3,860	1,130	5,990	0,000	0,000	6,500				
	POP 1	23	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	< 0,001	U (Mann-Whitney)	u = 184	< 0,001
	POP 3	28	1,680	0,525	2,780	0,000	0,000	2,250				
	POP 2	28	3,860	1,132	5,990	0,000	0,000	6,500	< 0,001	U (Mann-Whitney)	u = 362	0,581
	POP 3	28	1,680	0,525	2,780	0,000	0,000	2,250				

Fenofase	Subpopulação	Estatística Descritiva							Testes de Comparação			
		N	Média	Erro-Padrão	Desvio-Padrão	Mediana	Q1	Q3	p (Shapiro-Wilk)	Teste	Valor do teste	p-value
Estação Seca												
Botões Florais	POP 1	23	0,217	0,177	0,850	0,000	0,000	0,000	< 0,001	U (Mann-Whitney)	u = 177	< 0,001
	POP 2	28	7,357	1,822	9,643	1,500	0,000	13,500				
	POP 1	23	0,217	0,177	0,850	0,000	0,000	0,000	< 0,001	U (Mann-Whitney)	u = 56,5	< 0,001
	POP 3	28	10,036	1,705	9,025	9,500	2,750	13,300				
	POP 2	28	7,357	1,822	9,643	1,500	0,000	13,500	< 0,001	U (Mann-Whitney)	u = 290	0,091
Flores em Antese	POP 1	23	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	< 0,001	U (Mann-Whitney)	u = 196	< 0,001
	POP 2	28	1,214	0,406	2,149	0,000	0,000	1,250				
	POP 1	23	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	< 0,001	U (Mann-Whitney)	u = 92	< 0,001
	POP 3	28	2,679	0,591	3,128	1,500	0,000	4,000				
	POP 2	28	1,214	0,406	2,149	0,000	0,000	1,250	< 0,001	U (Mann-Whitney)	u = 254	0,017
Frutos Imaturos	POP 1	23	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	< 0,001	U (Mann-Whitney)	u = 196	< 0,001
	POP 2	28	3,890	1,400	7,400	0,000	0,000	2,750				
	POP 1	23	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	< 0,001	U (Mann-Whitney)	u = 104	< 0,001
	POP 3	28	6,929	1,350	7,140	4,000	0,000	11,000				
	POP 2	28	3,893	1,398	7,400	0,000	0,000	2,750	< 0,001	U (Mann-Whitney)	u = 268	0,033
Frutos Maduros	POP 1	23	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	< 0,001	U (Mann-Whitney)	u = 219	0,003
	POP 2	28	4,180	1,740	9,210	0,000	0,000	2,750				
	POP 1	23	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	< 0,001	U (Mann-Whitney)	u = 161	< 0,001
	POP 3	28	3,750	1,057	5,600	0,500	0,000	6,250				
	POP 2	28	4,180	1,740	9,210	0,000	0,000	2,750	< 0,001	U (Mann-Whitney)	u = 339	0,33
POP 3	28	3,750	1,057	5,600	0,500	0,000	6,250					

dada pela soma das respectivas estruturas presentes nos indivíduos ativos em cada quinzena avaliada para as três subpopulações, assim como para a população geral

Por meio dos gráficos apresentados na Figura 10, é possível observar a dinâmica de atividade e intensidade para cada fenofases, no entanto a apuração dos resultados e suas diferenças significativas, isto é, com suporte estatístico fica mais evidente nas tabelas apresentadas (Tabela 11 e Tabela 13), assim como na descrição das análises estatísticas abaixo.

2.2.2.1 Análises Comparativas com Base em Estatísticas Lineares

2.2.2.1.1 Análise entre Estações Climáticas

Para a análise da *POP Geral*, comparando os valores obtidos para cada estação (úmida e seca), houve apenas diferenças significativas para a intensidade de Brotamento Foliar ($p = 0.05$) e Folhas Maduras ($p = 0.023$). A intensidade de Brotamento Foliar foi maior na estação seca ao contrário da intensidade de Folhas Maduras (Figura 10 – B e D; Tabela 11). Por outro lado, para a intensidade de Folhas Senescentes e Folhas Totais não foram registradas mudanças significativas (Figura 10 - F e G; Tabela 11).

Nas análises específicas feitas para as subpopulações (Tabela 10 e Tabela 11), a *POP2* seguiu o mesmo perfil da *POP Geral*, com valores significativos para aumento de Brotamento Foliar ($p = 0,033$) e diminuição de Folhas Maduras ($p = 0,013$) na estação seca. Para a *POP3* foi registrado, com suporte estatístico, um comportamento contrário ao apresentado pela *POP2*. A *POP1* apresentou comportamento congruente com a *POP Geral* e *POP2*, por outro lado também foi registrado uma diminuição significativa no Total de Folhas ($p < 0,001$) na estação seca para esta subpopulação (Tabela 10 e Tabela 11).

Tabela 10 - Quadro comparativo das intensidades das fenofases vegetativas para População Geral (*POP Geral*) e cada subpopulação (*POP1*, *POP2* e *POP3*) entre as estações úmida e seca. Legenda: *: relação sem suporte estatístico; *p-value*: valor p da estatística utilizada (detalhamento dos testes na Tabela 11).

Fenofases	Estações		<i>p-value</i>
	Úmida	Seca	
<i>POP Geral</i>			
Brotamento Foliar	Menor	Maior	0,05
Folhas Maduras	Maior	Menor	0,023
Folhas Senescentes	<i>Menor *</i>	<i>Maior *</i>	0,147
Folhas Totais	<i>Maior *</i>	<i>Menor *</i>	0,538
<i>POP1</i>			
Brotamento Foliar	Menor	Maior	< 0,001
Folhas Maduras	Maior	Menor	< 0,001
Folhas Senescentes	<i>Maior *</i>	<i>Menor *</i>	0,97
Folhas Totais	Maior	Menor	< 0,001
<i>POP2</i>			
Brotamento Foliar	Menor	Maior	0,033

Fenofases	Estações		<i>p-value</i>
	Úmida	Seca	
Folhas Maduras	Maior	Menor	0,013
Folhas Senescentes	<i>Menor *</i>	<i>Maior *</i>	0,118
Folhas Totais	<i>Maior *</i>	<i>Menor *</i>	0,966
<i>POP3</i>			
Brotamento Foliar	Maior	Menor	0,007
Folhas Maduras	Menor	Maior	0,008
Folhas Senescentes	<i>Menor *</i>	<i>Maior *</i>	0,524
Folhas Totais	<i>Menor *</i>	<i>Maior *</i>	0,146

Tabela 11 – Análise estatística comparativa (amostras emparelhadas) para as fenofases vegetativas de *Nicotiana glandarela* entre a estações úmida e seca. A estação úmida correspondeu aos meses de fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro de 2023 e janeiro de 2024. A estação seca correspondeu aos meses de abril a setembro de 2023. As subpopulações são denominadas *POP1*, *POP2* e *POP3* e o conjunto delas é apresentado como *POP Geral*. Os valores de *p-value* em negrito correspondem às comparações com diferença significativa (*p-value* ≤ 0,05)

Fenofase	Estação	Estatística Descritiva							Testes Estatísticos			
		N	Média	Erro-Padrão	Desvio-Padrão	Mediana	Q1	Q3	p (Shapiro-Wilk)	Teste	valor	<i>p-value</i>
<i>POP Geral</i>												
Brotamento Foliar	Úmida	79	1,840	0,086	0,763	1,750	1,250	2,250	0,453	t (Student)	t = -2,00	0,05
	Seca	79	2,030	0,075	0,669	1,920	1,580	2,330				
Folhas Maduras	Úmida	79	7,130	0,273	2,430	7,000	5,480	8,880	0,504	t (Student)	t = 2,31	0,023
	Seca	79	6,720	0,363	3,220	6,170	4,290	9,290				
Folhas Senescentes	Úmida	79	1,410	0,138	1,230	1,170	0,375	2,130	< 0,001	w (Wilcoxon)	w = 1118	0,147
	Seca	79	1,510	0,144	1,280	1,250	0,542	1,920				
Folhas Totais	Úmida	79	10,400	0,276	2,450	10,200	8,790	11,900	0,469	t (Student)	t = 0,603	0,548
	Seca	79	10,300	0,314	2,790	10,300	8,210	11,800				
<i>POP1</i>												
Brotamento Foliar	Úmida	23	1,490	0,194	0,928	1,170	1,080	1,630	0,047	w (Wilcoxon)	w = 25,5	< 0,001
	Seca	23	2,150	0,125	0,598	2,080	1,670	2,380				
Folhas Maduras	Úmida	23	5,390	0,356	1,710	5,670	4,250	6,250	0,231	t (Student)	t = 5,59	< 0,001
	Seca	23	3,930	0,467	2,240	3,330	2,460	4,790				
Folhas Senescentes	Úmida	23	2,120	0,206	0,988	1,830	1,580	2,880	0,047	w (Wilcoxon)	w = 104	0,970
	Seca	23	2,050	0,203	0,975	1,750	1,250	2,830				
Folhas Totais	Úmida	23	8,940	0,510	2,450	8,830	7,420	10,040	0,014	w (Wilcoxon)	W = 230	< 0,001
	Seca	23	8,130	0,528	2,530	7,420	6,500	9,710				
<i>POP2</i>												
Brotamento Foliar	Úmida	28	1,900	0,122	0,647	1,960	1,250	2,420	0,114	t (Student)	t = -2,25	0,033
	Seca	28	2,270	0,143	0,758	2,170	1,810	2,940				
Folhas Maduras	Úmida	28	7,000	0,417	2,210	7,250	5,420	8,540	0,694	t (Student)	t = 2,66	0,013
	Seca	28	6,330	0,429	2,270	5,880	4,900	7,480				
Folhas Senescentes	Úmida	28	1,860	0,251	1,330	1,460	0,729	2,920	0,935	t (Student)	t = -1,62	0,118
	Seca	28	2,140	0,262	1,380	1,670	1,229	2,630				

Fenofase	Estação	Estatística Descritiva							Testes Estatísticos			
		N	Média	Erro-Padrão	Desvio-Padrão	Mediana	Q1	Q3	p (Shapiro-Wilk)	Teste	valor	p-value
Folhas Totais	Úmida	28	10,800	0,366	1,940	10,500	9,440	12,200	0,792	t (Student)	t = 0,0428	0,966
	Seca	28	10,700	0,399	2,110	10,500	9,580	11,800				
POP3												
Brotamento Foliar	Úmida	28	2,07	0,12	0,64	2,00	1,48	2,44	0,344	t (Student)	t = 2,9	0,007
	Seca	28	1,71	0,09	0,50	1,63	1,25	2,10				
Folhas Maduras	Úmida	28	8,70	0,41	2,17	8,63	7,31	9,96	0,959	t (Student)	t = -2,84	0,008
	Seca	28	9,41	0,48	2,55	9,46	8,13	10,83				
Folhas Senescentes	Úmida	28	0,38	0,05	0,26	0,33	0,25	0,50	0,985	t (Student)	t = -0,645	0,524
	Seca	28	0,43	0,07	0,38	0,29	0,15	0,58				
Folhas Totais	Úmida	28	11,1	0,5	2,5	11,3	9,3	12,4	0,874	t (Student)	t = -1,5	0,146
	Seca	28	11,5	0,5	2,6	11,2	10,3	13,3				

2.2.2.1.2 Análise entre Subpopulações

As análises comparativas entre as subpopulações mostraram algumas diferenças significativas entre elas em ambas as estações, como discriminado abaixo e nas tabelas a seguir (Tabela 12, Tabela 13).

Período da Estação Úmida

No período da estação úmida o Brotamento Foliar foi significativamente menor na *POP1*, quando comparada a *POP2* ($p = 0,003$) e *POP3* ($p = < 0,001$). Por outro lado, entre *POP2* e *POP3* não houve diferença significativa para esta fenofases ($p = 0,325$).

As intensidades de Folhas Maduras diferiram significativamente entre as três subpopulações, sendo mais intensa na *POP3*, seguida pela *POP2* e *POP1* (Tabela 13).

A intensidade de Senescência Foliar foi estatisticamente diferente entre a *POP1* e *POP3* ($p = < 0,001$) e entre a *POP2* e *POP3* ($p = < 0,001$), sendo a *POP3* com a menor intensidade de Senescência Foliar e as duas restantes com diferenças não significativas ($p = 0,191$). As Folhas Totais diferiram em intensidade entre *POP1* e as demais, com suporte estatístico, no entanto entre a *POP2* e *POP3* não houve diferença significativa (Tabela 12 e Tabela 13).

Período da Estação Seca

No período da seca o Brotamento Foliar da *POP1* foi maior que em *POP3* ($p = 0,009$), porém não diferiu significativamente da *POP2* ($p = 0,545$). A *POP3* também apresentou Brotamento Foliar menor do que a *POP2* com suporte estatístico ($p = 0,002$).

As Folhas Maduras seguiram o mesmo padrão de divergências da estação úmida, ou seja, foram significativamente diferentes para as três subpopulações, com a *POP3* apresentando o maior valor, seguida da *POP2* e *POP1*, respectivamente (Tabela 12 e Tabela 13).

A Senescência Foliar foi significativamente mais evidente na *POP1* e *POP2*, quando comparadas à *POP3* ($p < 0,001$), porém entre *POP1* e *POP3* não observamos diferença significativa ($p = 0,865$).

As Folhas Totais diferiram entre a *POP1* e *POP2* ($p < 0,001$), assim como entre *POP1* e *POP3* ($p < 0,001$), sendo que *POP3* apresentou os maiores valores. Porém, entre a *POP2* e *POP3* não houve diferença significativa ($p = 0,21$).

Tabela 12 - Quadro comparativo para as intensidades das fenofases reprodutivas entre as subpopulações nos períodos da estação seca e estação úmida. *POP1* = intensidade da fenofases na subpopulação 01; *POP2* = intensidade da fenofase na subpopulação 02; *POP3* = intensidade da fenofases na subpopulação 03.

Fenofases	Estações	
	Úmida	Seca
Brotamento Foliar	$POP1 < POP2 = POP3$	$POP1 = POP2 > POP3$
Folhas Maduras	$POP1 < POP2 < POP3$	$POP1 < POP2 < POP3$

Fenofases	Estações	
	Úmida	Seca
Folhas Senescentes	$POP1 = POP2 > POP3$	$POP1 = POP2 > POP3$
Folhas Totais	$POP1 < POP2 = POP3$	$POP1 < POP2 = POP3$

Tabela 13 – Análise estatística comparativa entre as subpopulações de *Nicotiana glandarela* para as fenofases vegetativas considerando os períodos de estação úmida e seca. As subpopulações são denominadas *POP1*, *POP2* e *POP3*. A estação úmida correspondeu aos meses de fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro de 2023 e janeiro de 2024. A estação seca correspondeu aos meses de abril a setembro de 2023. Os valores de *p-value* em negrito correspondem às comparações com diferença significativa (*p-value* ≤ 0,05).

Fenofases	Subpopulações	Estatística Descritiva							Testes de Comparação			
		N	Média	Erro-Padrão	Desvio-Padrão	Mediana	Q1	Q3	p (Shapiro-Wilk)	Teste	Valor do teste	<i>p-value</i>
Estação Úmida												
Brotamento Foliar	POP 1	23	1,490	0,194	0,928	1,170	1,080	1,630	< 0,001	U (Mann-Whitney)	u = 165	0,003
	POP 2	28	1,900	0,122	0,647	1,960	1,250	2,420				
	POP 1	23	1,490	0,194	0,928	1,170	1,080	1,630	< 0,001	U (Mann-Whitney)	u = 126	< 0,001
	POP 3	28	2,070	0,120	0,636	2,000	1,480	2,440				
	POP 2	28	1,900	0,122	0,647	1,960	1,250	2,420				
POP 3	28	2,070	0,120	0,636	2,000	1,480	2,440					
Folhas Maduras	POP 1	23	5,390	0,356	1,710	5,670	4,250	6,250	0,785	t (Welch)	t = -2,92	0,005
	POP 2	28	7,000	0,417	2,210	7,250	5,420	8,540				
	POP 1	23	5,390	0,356	1,710	5,670	4,250	6,250	0,390	t (Welch)	t = -6,09	< 0,001
	POP 3	28	8,700	0,409	2,170	8,630	7,310	9,960				
	POP 2	28	7,000	0,417	2,210	7,250	2,670	11,300				
POP 3	28	8,700	0,409	2,170	8,630	4,750	12,900					
Folhas Senescentes	POP 1	23	2,120	0,206	0,988	1,830	1,583	2,880	0,036	U (Mann-Whitney)	u = 253	0,191
	POP 2	28	1,860	0,252	1,331	1,458	0,729	2,917				
	POP 1	23	2,116	0,206	0,988	1,833	1,583	2,875	0,002	U (Mann-Whitney)	u = 28	< 0,001
	POP 3	28	0,384	0,049	0,261	0,333	0,250	0,500				
	POP 2	28	1,860	0,252	1,331	1,458	0,729	2,917				
POP 3	28	0,384	0,049	0,261	0,333	0,250	0,500					
Folhas Totais	POP 1	23	8,940	0,510	2,450	8,830	7,420	10,040	0,007	U (Mann-Whitney)	u = 160	0,002
	POP 2	28	10,750	0,366	1,940	10,500	9,440	12,210				
	POP 1	23	8,940	0,510	2,450	8,830	7,420	10,040	0,138	t (Welch)	t = -3,18	0,003
	POP 3	28	11,150	0,470	2,490	11,290	9,290	12,370				
	POP 2	28	10,750	0,366	1,940	10,500	9,440	12,210				
POP 3	28	11,150	0,470	2,490	11,290	9,290	12,370					

Fenofases	Subpopulações	Estatística Descritiva							Testes de Comparação			
		N	Média	Erro-Padrão	Desvio-Padrão	Mediana	Q1	Q3	p (Shapiro-Wilk)	Teste	Valor do teste	p-value
Estação Seca												
Brotamento Foliar	POP 1	23	2,150	0,125	0,598	2,080	1,670	2,380	0,302	t (Welch)	t = -6,09	0,545
	POP 2	28	2,270	0,143	0,758	2,170	1,810	2,940				
	POP 1	23	2,150	0,125	0,598	2,080	1,670	2,380	0,009	U (Mann-Whitney)	u = 184	0,009
	POP 3	28	1,710	0,094	0,498	1,630	1,250	2,100				
	POP 2	28	2,270	0,143	0,758	2,170	1,810	2,940	0,341	t (Student)	t = -3,281	0,002
	POP 3	28	1,710	0,094	0,498	1,630	1,250	2,100				
Folhas Maduras	POP 1	23	3,930	0,467	2,240	3,330	2,460	4,790	0,004	U (Mann-Whitney)	u = 118	< 0,001
	POP 2	28	6,330	0,429	2,270	5,880	4,900	7,480				
	POP 1	23	3,930	0,467	2,240	3,330	2,460	4,790	0,118	t (Welch)	t = -8,17	< 0,001
	POP 3	28	9,410	0,482	2,550	2,550	8,130	10,830				
	POP 2	28	6,330	0,429	2,270	5,880	4,900	7,480	0,873	t (Student)	t = -4,77	< 0,001
	POP 3	28	9,410	0,482	2,550	2,550	8,130	10,830				
Folhas Senescentes	POP 1	23	2,050	0,203	0,975	1,750	1,250	2,830	< 0,001	U (Mann-Whitney)	u = 313	0,865
	POP 2	28	2,137	0,262	1,384	1,667	1,229	2,625				
	POP 1	23	2,051	0,203	0,975	1,750	1,250	2,833	0,028	U (Mann-Whitney)	u = 21	< 0,001
	POP 3	28	0,432	0,072	0,383	0,292	0,146	0,583				
	POP 2	28	2,137	0,262	1,384	1,667	1,229	2,625	< 0,001	U (Mann-Whitney)	u = 38	< 0,001
	POP 3	28	0,432	0,072	0,383	0,292	0,146	0,583				
Folhas Totais	POP 1	23	8,130	0,528	2,530	7,420	6,500	9,710	0,002	U (Mann-Whitney)	u = 102	< 0,001
	POP 2	28	10,740	0,399	2,110	10,460	9,580	11,830				
	POP 1	23	8,130	0,528	2,530	7,420	6,500	9,710	0,014	U (Mann-Whitney)	u = 87	< 0,001
	POP 3	28	11,550	0,498	2,640	11,170	10,270	13,310				
	POP 2	28	10,740	0,399	2,110	10,460	9,580	11,830	0,499	t (Student)	t = -1,268	0,21
	POP 3	28	11,550	0,498	2,640	11,170	10,270	13,310				

2.2.3 Associação Potencial com Variáveis Microclimáticas

Variáveis Microclimáticas Obtidas

O registro de variáveis microclimáticas foi de suma importância para esclarecer parte dos fatores ambientais, específicos do microhabitat, que regulam os padrões fenológicos de *Nicotiana glandarela*.

A mensuração robusta das variáveis microclimáticas de temperatura e umidade do ar, baseada em alta frequência de registros (a cada 15 minutos), resultou em um banco de dados minucioso, pelo qual foi possível construir modelos com maior acurácia, os quais estão apresentados na seção seguinte, tendo como base os registros fenológicos obtidos em cada quinzena (Figura 11).



Figura 11 - A: Variáveis microclimáticas mensuradas no presente estudo para o habitat natural de *Nicotiana glandarela*, de outubro de 2022 a janeiro de 2024. B: Fotoperíodo calculado para a localidade específica de *N. glandarela*.

Modelos Potenciais

Para todas as fenofases avaliadas foi possível ajustar os modelos e com base no fator de inflação da variância (VIF) as variáveis **temperatura** e **fotoperíodo** foram totalmente removidas devido à evidência de alta multicolinearidade, restando apenas a variável **umidade**, considerando sua série temporal (umid0, umid1, umid2 e umid3).

De acordo com esta análise, tiveram associação com as variáveis climáticas as intensidades das fenofases Botões Florais (umid0, $p = 0,002$; $R^2 = 0,58$), Flores em Antese (umid0, $p = 0,001$; $R^2 = 0,66$), Frutos Imaturos (umid1; $p = 0,040$; $R^2 = 0,52$), Senescência Foliar (umid1, $p = 0,031$; umid3, $p < 0,001$; $R^2 = 0,79$) e Folhas Maduras (umid1, $p = 0,009$; umid2, $p = 0,011$; umid3, $p < 0,001$; $R^2 = 0,87$), enquanto para Frutos Maduros e Brotamento foliar não foram identificadas relações significativas (Tabela 14).

A produção de botões florais, assim como o desenvolvimento das Flores em Antese estão significativamente relacionados à redução da umidade do ar e apresentaram aumento de atividade concomitantemente com a queda de umidade média. Os valores das umidades dos meses anteriores não apresentaram influências significativas ($p\text{-value} > 0,05$ - Tabela 14).

O aumento de atividade de Frutos Imaturos foi significativamente estimulado pela redução da umidade detectada com um mês de antecedência, enquanto para os Frutos Maduros não foi possível identificar relações significativas (todos $p\text{-value} > 0,05$ - Tabela 14).

Para as fenofases vegetativas, o Brotamento Foliar não apresentou evidências fortes de associação, ao passo que a Senescência apresentou estímulo significativo em relação às reduções de umidade de 1 e 3 meses anteriores, ou seja, foi significativamente associada às variáveis *umid1* e *umid3* (Tabela 14).

O amadurecimento de folhas foi estimulado pelo aumento de umidade nos 3 meses anteriores (*umid1*, *umid2* e *umid3*) e com o valor do coeficiente de determinação mais alto entre os modelos ($R^2 = 0,87$ - Tabela 14)

Tabela 14 - Resultados dos modelos finais utilizados para avaliar a associação entre variáveis climáticas e as fenofases na população geral de *Nicotiana glandarela*. O modelo completo (inicial) contava com as variáveis de Umidade (*Umid*), Temperatura(*temp*) e fotoperíodo (*comp*), na série temporal de zero a três meses anteriores, representado pela seguinte relação: *Intensidade da Fenofase* ~ *temp0* + *temp1* + *temp2* + *temp3* + *umid0* + *umid1* + *umid2* + *umid3* + *comp0* + *comp1* + *comp2* + *comp3*. Os números após cada variável referem-se ao intervalo de tempo utilizado nas análises. Os valores de $p\text{-value}$ em negrito representam uma variável explicativa significativa no modelo. Os valores dos coeficientes estimados (β) estão apresentados na escala logarítmica.

Fenofases	Parâmetros	Variáveis Climáticas				R^2 (ajustado)
		<i>umid0</i>	<i>umid1</i>	<i>umid2</i>	<i>umid3</i>	
REPRODUTIVAS						
<i>Botões Florais</i>	X^2	9,549	0,449	0,750	0,237	0,58
	$p\text{-value}$	0,002	0,503	0,386	0,627	
	β	-0,096	-0,024	-0,036	-0,017	
<i>Flores em Antese</i>	X^2	10,176	0,055	2,818	0,020	0,66
	$p\text{-value}$	0,001	0,815	0,093	0,887	
	β	-0,110	-0,009	-0,080	-0,006	
<i>Frutos Imaturos</i>	X^2	1,552	4,202	0,001	2,703	0,52
	$p\text{-value}$	0,213	0,040	0,978	0,100	
	β	-0,045	-0,084	0,001	-0,069	
<i>Frutos Maduros</i>	X^2	0,012	1,996	1,847	0,279	0,32
	$p\text{-value}$	0,912	0,158	0,174	0,597	
	β	-0,004	-0,058	-0,055	0,020	
VEGETATIVAS						
<i>Brotamento Foliar</i>	X^2	0,529	3,121	1,791	0,402	0,34
	$p\text{-value}$	0,467	0,077	0,181	0,526	
	β	0,006	-0,017	-0,012	0,005	
<i>Senescência</i>	X^2	0,941	4,656	1,285	15,869	0,79
	$p\text{-value}$	0,332	0,031	0,257	< 0,001	
	β	-0,008	-0,021	-0,011	-0,036	
<i>Folhas Maduras</i>	X^2	0,340	6,878	6,460	15,832	0,87
	$p\text{-value}$	0,560	0,009	0,011	< 0,001	

Fenofases	Parâmetros	Variáveis Climáticas				R ² (ajustado)
		umid0	umid1	umid2	umid3	
	β	0,002	0,009	0,009	0,012	

2.3 DISCUSSÃO

Como observado, a espécie apresentou maior proporção de indivíduos anuais, os quais são responsáveis pela concentração das datas médias de início e pico da fenologia reprodutiva na estação seca, conferindo um padrão majoritariamente sazonal para *Nicotiana glandarela*. Ao avaliarmos este padrão à luz das principais características morfológicas dos frutos, ou seja, frutos secos e sementes de porte milimétrico, este comportamento fenológico pode ser esperado, visto que potencialmente se trata de uma adaptação evolutiva para garantir e/ou otimizar o processo natural de dessecação da cápsula e liberação dos propágulos, concomitantemente com uma menor umidade relativa do ar e uma maior incidência de correntes de ar (ventos), otimizando a dispersão primária (Traveset & Rodríguez-Peréz 2008). Os frutos secos de *N. glandarela* não apresentam dispersão balística ou outra forma “ativa” de dispersão e, na ausência de perturbação, a maior parte das sementes fica alojada na cápsula, até que ocorra perturbações externas, como ventos ou colisão por animais. Considerando que a colisão por animais é rara, propõe-se aqui que a dispersão primária é dada principalmente pela ação dos ventos sobre o pedúnculo, ocasionando um movimento similar ao de um pêndulo invertido e desta forma os propágulos atingem pequenas distâncias ao redor da planta mãe (Burrows, 1986). Esta dispersão primária garante a manutenção de parte do banco de sementes local e, considerando o pico de produção de frutos maduros em setembro (último mês da seca), as sementes liberadas ao solo, em pouco tempo (30 a 60 dias), encontram as condições de umidade mais adequadas para a germinação e desenvolvimento. Consequentemente tais propágulos encontram melhores chances de manutenção da população já estabelecida no local. Outro mecanismo de dispersão primária a ser pensado seria o de ejeção por força da água ou “splash-cup”, (Brodie, 1951; Burrows, 1986), no entanto, esta opção pode ser descartada, visto que as populações se encontram fortemente protegidas das chuvas pelos afloramentos rochosos que as abrigam.

Considerando que a dispersão de propágulos em novos ambientes é um fator crucial para perpetuidade da espécie (Howe & Miriti, 2004; Lengyel et al., 2010, Nevo et al., 2023) é possivelmente estratégico que a data média do pico de frutos maduros (em dispersão) não seja exatamente no momento de melhores condições de umidade para a germinação das sementes, pois desta forma permite um período considerável para que a dispersão secundária (médias e longas distâncias) seja viabilizada, propiciando a colonização de novos habitats. Isto porque, caso a maior parte das sementes fossem liberadas na estação úmida, grande parte destes propágulos iniciaria o processo de germinação rapidamente e pouco sobriaria para serem transportadas aos potenciais novos habitats mais distantes.

Com relação à dispersão secundária, a qual seria responsável pela dispersão de média a longas distâncias, propõe-se que provavelmente é realizada por mamíferos e pássaros, que ao caminharem e/ou repousarem sobre o banco de sementes, terminam com alguma quantidade de sementes aderidas nos pelos, penas ou outras partes. A dispersão de longa distância de *Nicotiana* sect. *Suaveolentes* por meio de pássaros já foi sugerida por Mummenhoff & Franske (2007), ao passo que Chase et al. (2018) sugerem que as sementes também podem ficar presas nos pelos de morcegos, quando eles voam através de uma população de *Nicotiana* na entrada de uma caverna. Considerando o hábitat semi-cavernícola de *N. gandarela*, a dispersão por morcegos também poderia ter alguma contribuição, no entanto durante o presente estudo não foram registrados avistamentos de morcegos, ao passo que o registro de pássaros e mamíferos foi consideravelmente frequente. Para estes animais, a dispersão poderia ser ainda realizada pela ingestão não intencional das sementes (devido ao porte milimétrico), visto que tais animais foram observados várias vezes se alimentando de recursos no substrato ao redor dos indivíduos de *N. gandarela*. Desta forma, as sementes aderidas ou ingeridas podem ser transportadas aos novos hábitats, ao final da estação seca, e as sementes remanescentes no local de origem são beneficiadas pelas melhores condições hídricas, na estação chuvosa posterior, para a germinação, estabelecimento e desenvolvimento das plântulas (Hadas, 2005, Osmond et al., 1980).

A dispersão anterior às chuvas também propicia a facilitação da dormência e viabilidade das sementes, visto que podem entrar em um período de dormência durante a estação seca e sincronizar a germinação em um momento em que as condições estejam favoráveis, após as dispersões de média e longa distâncias (Bewley et al. 2013, Willis et al. 2014).

No entanto, Traveset & Rodríguez-Peréz (2008) alerta sobre a possibilidade de erros em interpretar padrões fenológicos reprodutivos como adaptações à dispersão, visto que outros fatores como o aumento de patógenos ou predadores em determinada época poderiam também acarretar seleções e adaptações no comportamento fenológico. Além disso, várias evidências apontam que a sazonalidade de disponibilidade de água, temperatura e fotoperíodo moldam o perfil fenológico de várias espécies (Cortés-Flores et al., 2017; Landoni et al., 2000; van Schaik et al., 1993).

A despeito de encontrarmos fortes evidências para um comportamento majoritariamente anual para as fenofases reprodutivas em *N. gandarela*, a ocorrência de certa defasagem fenológica de início e pico entre subpopulações e entre indivíduos também foi detectada. A defasagem entre as subpopulações, no momento de maior intensidade de floração e frutificação, ou seja, no período da seca, pode ser uma estratégia adaptativa interessante para proporcionar uma disponibilidade contínua e mais duradoura de grãos de pólen e/ou néctar aos visitantes florais, ao nível da população geral (Araujo et al., 1994; Bawa 1983; Waser, 1978; McGuire & Armbruster, 1991)

Além disso, a defasagem entre os indivíduos e certo grau de assincronia ao longo do ano, pode ser resultado de uma adaptação alternativa/paralela, a qual proporciona, mesmo que em baixas intensidades, uma atividade reprodutiva contínua, ao longo ciclo anual, de forma escalonada, ao nível da *POP Geral*. A reprodução contínua é considerada uma estratégia comum em ambientes tropicais, a qual pode estar relacionada a associações mutualísticas com polinizadores e dispersores (Fenner, 1998; Abernethy et al. 2018), assim como associações mutualísticas com outras espécies de plantas para uma disponibilização contínua e mais duradoura de grãos de pólen para visitantes florais compartilhados (Waser & Real, 1979). A diversidade na fenologia reprodutiva, ou seja, diferentes níveis de sazonalidade e sincronicidade, também pode ser vista como uma vantagem frente as oscilações climáticas, conferindo certa plasticidade e resiliência para a manutenção da reprodução (Krenova et al., 2022).

Esses resultados corroboram com aspectos apontados por Newstrom (1994), o qual mencionaram que as espécies tropicais geralmente apresentam padrões heterogêneos em um determinado nível, podendo uma população ser composta por padrões individuais relacionados à idade, tamanho ou particularidades do microhabitat. Visto isso, os padrões heterogêneos na fenologia de *N. gandarela*, considerando também os registros de inatividade em boa parte dos indivíduos, sugere que fatores espaciais específicos, como diferenças pontuais de umidade, luz e nutrientes no solo, assim como fatores intrínsecos genéticos não abordados no presente estudo, possam direcionar a variabilidade fenológica encontrada.

Com relação às associações com as variáveis climáticas, a sincronia entre a diminuição da umidade do ar e o aumento de produção de botões florais e Flores em Antese, ou seja, o início do período reprodutivo em massa, juntamente com a evidência da produção de Frutos Imaturos, associada também com a redução da umidade do ar, com um mês de latência, reforça a evidência de uma estratégia de dispersão de propágulos no auge do período da seca, como adaptação evolutiva, tanto para otimizar o sucesso de germinação no local de origem, quanto para maximizar o potencial de dispersão.

Provavelmente a associação entre Frutos Maduros (em dispersão de sementes) e a variável de umidade não foi detectada pelo fato desta fenofase se manter por mais tempo em cada indivíduo (em comparação com as outras fenofases reprodutivas) e as sucessivas coletas de dados terminam por gerar valores acumulativos (contagem de um mesmo fruto em campanhas subsequentes) afetando a escala de comparação entre as variáveis preditora e a resposta.

De acordo com Reich (1995) a fenologia vegetativa em florestas tropicais é distinta de outros ecossistemas por apresentar relações mais estreitas com as variações de umidade e, portanto, menos associadas às variações de temperatura. Corroborando com esta tendência, a fenologia de *N. gandarela* não apresentou associações claras com a temperatura, considerando a metodologia utilizada. A senescência de *N. gandarela* mostrou forte associação com as reduções de umidade, reforçando o papel

desta variável no controle da dinâmica fenológica e a importância das condições microclimáticas para esta espécie. Considerando que foi detectada a associação da intensidade de senescência com a variação de umidade de um a três meses (umid1 e umid3), sugere-se que, de forma adaptativa e estratégica, do ponto de vista de economia energética, a sinalização para a senescência não ocorre com apenas um curto período de seca, mas sim, depende de um período anterior suficientemente longo (~ 3 meses) e uma manutenção posterior de baixa umidade para que a planta de fato possa iniciar o processo de senescência e realocação de recursos em sincronia com a dinâmica ambiental, ao longo do ciclo anual.

Por outro lado, a fenofase de brotamento foliar não pôde ser significativamente relacionada a variável de umidade, podendo estar mais associada à outra variável ambiental não detectada, ou até mesmo a fatores controladores intrínsecos (Panchen et al. 2014; Rankenberg et al. 2021).

Avaliando as diferenças fenológicas entre as subpopulações estudadas, verificou-se que a *POP3* apresentou a maior proporção de indivíduos ativos, assim como a maior proporção de indivíduos anuais em sincronia, a maior produtividade de propágulos, menor taxa de mortalidade, maior equilíbrio entre as proporções de indivíduos para as classes de duração das fenofases, além de um maior número de indivíduos com fenofases reprodutivas as classes de duração Longa e Muito Longa. Além disso, esta subpopulação apresentou a maior intensidade de folhas maduras e menor senescência foliar ao longo do período estudado. Tais características sugerem uma maior estabilidade, maior facilidade na obtenção e manutenção de recursos e maior biomassa, resultando em um maior fitness em relação às demais subpopulações.

No extremo oposto, a *POP1* apresentou a maior proporção de inatividade e mortalidade, além de não completar o ciclo reprodutivo, produzindo apenas botões e flores que foram abortadas. Além disso, a intensidade de Folhas Totais e Folhas Maduras foi a menor entre as subpopulações, conferindo menor biomassa e, portanto, menor fitness entre as subpopulações. Dado este perfil fenológico e considerando que a *POP1* se encontra em uma condição de microhabitat com maior incidência solar em comparação às demais subpopulações (ver item 3.2.5) e, conseqüentemente menores condições de retenção de umidade, sugere-se que esta subpopulação representa de certa forma uma aproximação ao limite de tolerância fisiológica da espécie, ao passo que a *POP3* representa as condições ótimas e a *POP2*, condições intermediárias.

Reich (1995) aponta que para florestas tropicais úmidas a fenologia vegetativa é contínua, em contraste com as Matas Secas, porém não menciona aspectos fenológicos em Florestas Estacionais Semidecíduas, assim como não menciona aspectos fenológicos de ervas e arbustos, focando apenas no estrato arbóreo. Neste sentido o estudo fenológico de *N. gandarela* traz à tona evidências interessantes a respeito do potencial de diversidade de comportamentos fenológicos em Florestas Estacionais Semidecíduas, principalmente aquelas onde se encontram maior heterogeneidade de ambientes, como, por exemplo,

presença e ausência de afloramentos rochosos, relevos acidentados, tipos solos variados, proximidade ou distância de cursos d'água, etc., abrigando maiores diversidades de espécies as quais resguardam suas particularidades e especificidades ecológicas em grande parte ainda desconhecidas.

3 ECOFISIOLOGIA DESCRITIVA E COMPARATIVA ENTRE SUBPOPULAÇÕES DE *NICOTIANA GANDARELA*

3.1 MATERIAL E MÉTODOS

3.1.1 Caracterização do espectro luminoso

Para caracterização luminosa dos microhabitats das 3 subpopulações (*POP1*, *POP2*, *POP3*), foi utilizado o espectrômetro Li-180 (Li-Cor Inc., Lincoln, NE, EUA - Figura 12 - G). Foram medidas a intensidade luminosa e o espectro luminoso em três horários do dia 08/05/2024, às 8h, 12h e 15h a fim de caracterizar a intensidade luminosa nos diferentes comprimentos de onda ao longo do dia, para melhor entender os limites fisiológicos de *Nicotiana glandarela*.

3.1.2 Trocas gasosas

As análises de trocas gasosas foram realizadas com um analisador portátil de gases infravermelho (IRGA) modelo LI 6400XT (Li-Cor Inc., Lincoln, NE, EUA; Figura 12 - C, D) com câmara acoplada de abertura de 6 cm² com uma fonte de luz LED. Contemplando seis indivíduos de cada subpopulação, selecionamos entre a segunda ou terceira folha completamente expandida para as avaliações fotossintéticas. As coletas dos dados foram realizadas entre 8h e 12h em 08/05/2024, na qual consideramos a temperatura foliar de $25 \pm 2^\circ\text{C}$ no momento da medição, umidade relativa entre 60-70% e concentração ambiental de CO₂ próxima a $422 \mu\text{mol}(\text{CO}_2) \text{mol}(\text{ar})^{-1}$. Para as avaliações de trocas gasosas nos utilizamos uma intensidade luminosa de $600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, considerada saturante para a espécie a partir de testes prévios. Obtivemos taxa de assimilação líquida de CO₂ (Pn), transpiração (E), condutância estomática (gsw) e carbono intercelular (Ci) para folhas de indivíduos das três subpopulações de *N. glandarela* (*POP1*, *POP2* e *POP3*). Os valores de eficiência no uso da água (EUA) foram determinados pela fórmula: $\text{EUA} = \text{Pn}/\text{E}$.

Também foram avaliadas as taxas de assimilação de carbono em resposta aos níveis de intensidade luminosa (curvas de luz), em plantas cultivadas a partir de sementes coletadas no local estudado. A temperatura foliar situou-se em aproximadamente $24^\circ\text{C} \pm 2$ e a referência de CO₂ foi de $420 \pm 20 \mu\text{mol CO}_2 \mu\text{mol ar}^{-1}$. As curvas de assimilação líquida de CO₂ (Pn, $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) em resposta à radiação fotossinteticamente ativa (PAR, $\mu\text{mol fóton m}^{-2} \text{s}^{-1}$) foram realizadas de intensidades de luz altas para baixas (1500, 1250, 1000, 800, 500, 250, 100, 50, 25, 0 $\mu\text{mol fóton m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Para estimar a respiração no escuro (RD), o ponto de compensação de luz (Icomp), a assimilação líquida máxima (Amax), o ponto de saturação de luz além do qual não há mudança significativa em Pn (Imax), a curva de resposta à luz foi ajustada ao modelo de melhor ajuste de acordo com Lobo *et. al* (2013).



Figura 12 – Coleta de dados ecofisiológicos. **A-B:** Coleta de dados para avaliação das taxas de assimilação de carbono em resposta aos níveis de intensidade luminosa (curvas de luz), em plantas cultivadas; experimento realizado no Laboratório de Fisiologia Vegetal do Departamento de Botânica - ICB-UFMG. **C - E:** Coletas de dados em campo utilizando os equipamentos PAM-2500 (Walz, Effeltrich, Alemanha) e analisador portátil de gases infravermelho (IRGA) modelo LI 6400XT (Li-Cor Inc., Lincoln, NE, EUA). **F:** Coleta de discos de tecido foliar para análise de pigmentos fotossintetizantes. **G:** Coleta de dados para caracterização do espectro luminoso nos microhabitats de *Nicotiana glandifera*.

3.1.3 Fluorescência da clorofila a: Curvas de luz e rendimento quântico potencial (Fv/Fm)

Entre 8:00 e 12:00 nos selecionamos a segunda ou terceira folha completamente expandida para as avaliações fotossintéticas e 6 indivíduos de cada população foi avaliada. As medidas de rendimento quântico máximo (Fv/Fm) foram tomadas após 30 minutos de adaptação ao escuro, usando PAM-2500 (Walz, Effeltrich, Alemanha; Figura 12 – B, E) com um pulso de saturação de luz de $\sim 8.000 \mu\text{mol f\u00f3tons m}^{-2}\text{s}^{-1}$. A taxa de transporte de elétrons (ETR) em relação à intensidade luminosa foi obtida a partir de curvas rápidas de luz utilizando o PAM-2500 (Walz, Effeltrich, Alemanha). Os 6 indivíduos selecionados previamente de cada subpopulação foram submetidos a curvas de luz entre 0 e $1500 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ no qual foram definidos 9 pontos de aclimatação por 40 segundos a intensidade luminosa antes da leitura com um pulso de luz saturante de $\sim 8.000 \mu\text{mol f\u00f3tons m}^{-2}\text{s}^{-1}$. A taxa máxima de transporte de elétrons (ETR_{max}) e a luminosidade saturante do fotossistema II (PAR₉₀) foram obtidas conforme descrito por Rascher et al. (2000).

3.1.4 Traços foliares

A área foliar (AF), massa seca foliar (MS) e área foliar específica (AFE) foram amostradas em 5 indivíduos de cada subpopulação. Duas folhas por planta foram fotografadas e medidas utilizando o software ImageJ versão 1.46 (National Institutes of Health, MA, EUA) para o cálculo da AF (cm²). Estas folhas foram acondicionadas em embalagens hermeticamente fechadas e levadas ao laboratório para secagem em estufa de circulação forçada de ar a 60°C por 5 dias para obtenção da MS (g). Esses dois parâmetros foram utilizados para calcular a área foliar especificada através da seguinte fórmula: AFE = AF/MS.

3.1.5 Pigmentos fotossintetizantes

Em cada subpopulação (*POP1*, *POP2*, *POP3*), contemplando 5 indivíduos, foram extraídos 2 discos foliares de 0.6 mm (Figura 12 - F) para a quantificação de clorofila *a* (*C_a*), *b* (*C_b*) e carotenoides (*C_{x+c}*). A extração dos pigmentos dos discos foliares foi realizada utilizando 1 ml de DMSO (Dimetilsulfóxido) acondicionado em vidros âmbar armazenados por 48 horas em condições escuras e sob temperatura ambiente ($22 \pm 2^\circ\text{C}$). Para a quantificação dos pigmentos, 3 alíquotas de cada amostra foram avaliadas em um leitor espectrofotômetro (Multiskan FC Microplate Photometer – ThermoFisher) com leitura ajustada para os seguintes comprimentos de onda: 480, 649 e 665nm. Os valores finais para cada pigmento extraído foram calculados conforme Wellburn (1994). Além disso, teor de clorofilas totais (*C_{a+b}*), razão entre clorofila a e b (*C_{a/b}*), e razão entre clorofilas e carotenoides (clorofila total/carotenoides) também foram calculadas.

3.1.6 Análises estatísticas

As fontes de variação para os dados coletados foram definidas como as distintas subpopulações de *N. gandarela* (*POP1*, *POP2* e *POP3*), e as variáveis avaliadas foram obtidas pelas trocas gasosas, fluorescência da clorofila *a*, traços foliares e pigmentos fotossintetizantes. Os dados foram submetidos a testes de normalidade e homocestasticidade através dos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett, respectivamente, com nível de significância de $p < 0.05$. Confirmando essas premissas os dados foram submetidos a one-way ANOVA e teste F ($p < 0.05$) para verificar se haveriam diferenças entre as médias obtidas para cada população. Posteriormente o teste de Tukey ($p < 0.05$) foi aplicado para verificar o nível de diferenças existentes entre as médias das populações. Todas as análises realizadas e gráficos gerados foram obtidos no software Graphpad Prism versão 8.0.2 (San Diego, CA, EUA).

3.2 RESULTADOS

3.2.1 Trocas gasosas

A taxa de assimilação líquida de CO_2 (P_n) foi maior nas plantas amostradas na *POP3*, enquanto as plantas da *POP1* apresentaram menor P_n (Figura 13 - a).

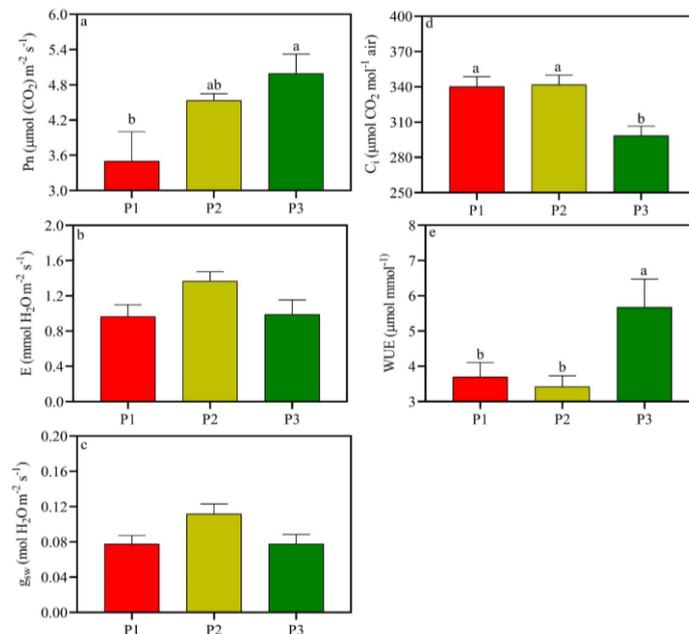


Figura 13 - Avaliação das trocas gasosas são representadas por: a: Taxa de assimilação líquida de CO_2 (P_n); b: transpiração (E); c: condutância estomática (g_{sw}), d: carbono intercelular (C_i); e: eficiência no uso da água (EUA) em folhas de *N. gandarela* em *POP1* (P1 - barras vermelhas), *POP2* (P2 - barras amarelas) e *POP3* (P3 - barras verdes). Diferentes letras representam médias estatisticamente diferentes pela ANOVA one-way seguida de teste Tukey ($P < 0.05$) para comparação das médias. Médias estão representadas com o erro padrão, $n = 6$.

A transpiração (E) e a condutância estomática (g_{sw}) foram semelhantes entre as 3 subpopulações de *N. gandarela*, mas o carbono intercelular (C_i) foi superior em *POP1* e *POP2*, em relação à *POP3* (Figura 13 - **b,c,d**). Já a eficiência no uso da água (EUA ou WUE) foi superior na *POP3*, sendo quase o dobro em comparação com os EUA (WUE) registrados nas plantas da população 1 e 2 (Figura 13 - **e**).

3.2.2 Fluorescência da clorofila a

Os valores do rendimento quântico máximo (F_v/F_m) da clorofila *a* foram similares entre as plantas de todas as populações, próximo a 0.77 (Figura 14 - **a**). Em relação as curvas de luz, todas as subpopulações apresentaram a luminosidade saturante do fotossistema II (PAR_{90}) estatisticamente similar, porém uma ligeira superioridade do PAR_{90} foi observada na *POP1*, superior a $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, enquanto em *POP2* e *POP3* esse valor foi próximo a $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Figura 14 - **b**). A taxa máxima de transporte de elétrons (ETR_{max}) também foi similar entre as 3 subpopulações, mas a *POP3* apresentou ETR_{max} próximo a $39 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ enquanto *POP1* e *POP2* tiveram ETR_{max} próximas a $34 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Figura 14 - **c**).

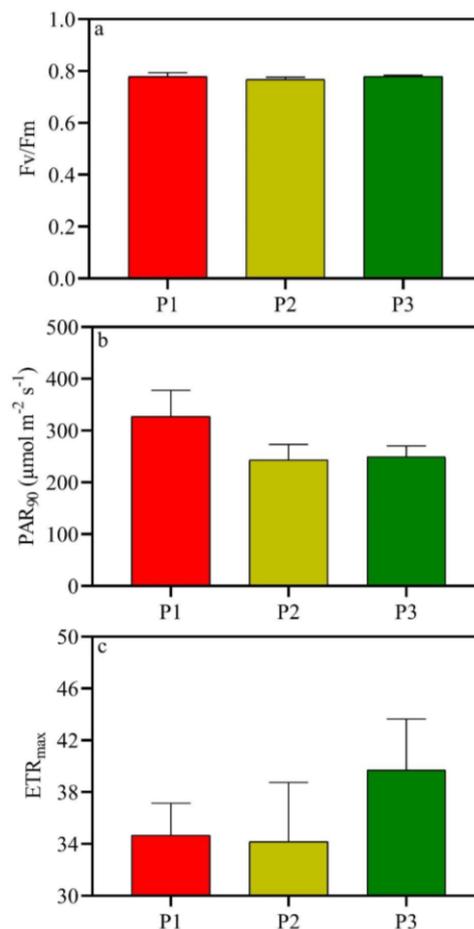


Figura 14 - Avaliação da fluorescência da clorofila a através do: **a**: rendimento quântico máximo (F_v/F_m); **b**: taxa máxima de transporte de elétrons (ETR_{max}); **c** - luminosidade saturante do fotossistema II (PAR_{90}) em folhas de *N. gandarela* nas

populações **POP1** (P1 - barras vermelhas), **POP2** (P2 - barras amarelas) e **POP3** (P3 - barras verdes). Diferentes letras representam médias estatisticamente diferentes pela ANOVA one-way seguida de teste Tukey ($p < 0.05$) para comparação das médias. Médias estão representadas com o erro padrão, $n = 6$.

3.2.3 Traços Foliare

A área foliar (AF) foi similar entre as 3 subpopulações de *N. gandarela*, enquanto a massa seca foliar (MS) em **POP2** foi maior que em **POP3**, ficando a **POP1** com valores intermediários entre elas (Figura 15 – **a**, **b**). A área foliar específica (AFE) foi superior na **POP3** comparado com o restante das subpopulações (Figura 15 - **c**).

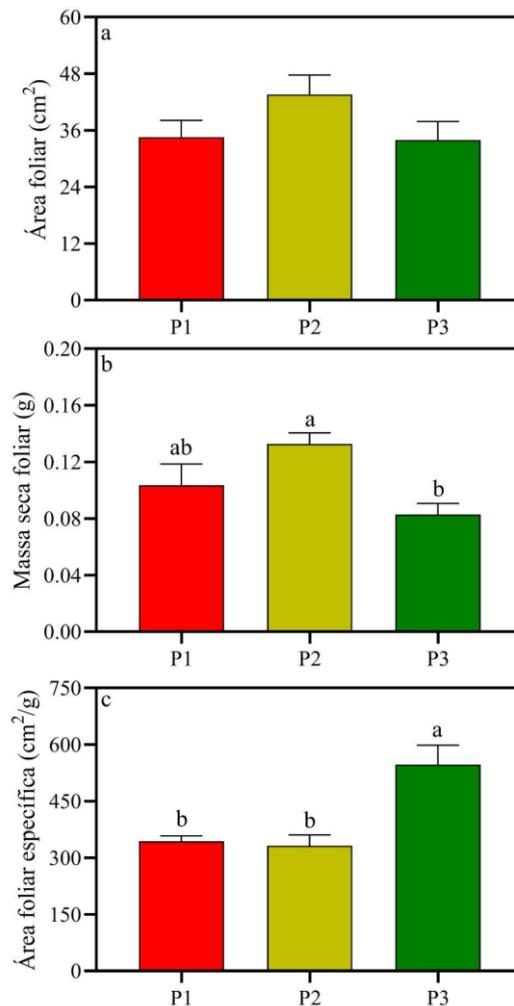


Figura 15 - Traços foliares avaliados em folhas de *N. gandarela* nas subpopulações **POP1** (P1 - barras vermelhas), **POP2** (P2 - barras amarelas) e **POP3** (P3 - barras verdes). **a**: área foliar (AF); **b**: massa seca foliar (MS); **c** - área foliar específica (AFE). Diferentes letras representam médias estatisticamente diferentes pela ANOVA one-way seguida de teste Tukey ($p < 0.05$) para comparação das médias. Médias estão representadas com o erro padrão, $n = 6$.

3.2.4 Quantificação dos pigmentos fotossintetizantes

Dentre os pigmentos fotossintetizantes amostrados, o teor de clorofila *a* (C_a), clorofila *b* (C_b), clorofila total (C_{a+b}) e a razão clorofila *a*/*b* ($C_{a/b}$) não apresentaram diferenças significativas entre as subpopulações (Figura 16 – **a, b, c, d**). O teor de carotenoides (C_{x+c}) foi maior na *POP1*, seguido pela *POP2*, com o menor teor de registrado para a *POP3* (Figura 16 - **e**). Conseqüentemente a razão entre clorofilas totais e carotenoides foi significativamente maior na *POP3* em comparação com *POP2* e *POP1* (Figura 16 - **f**).

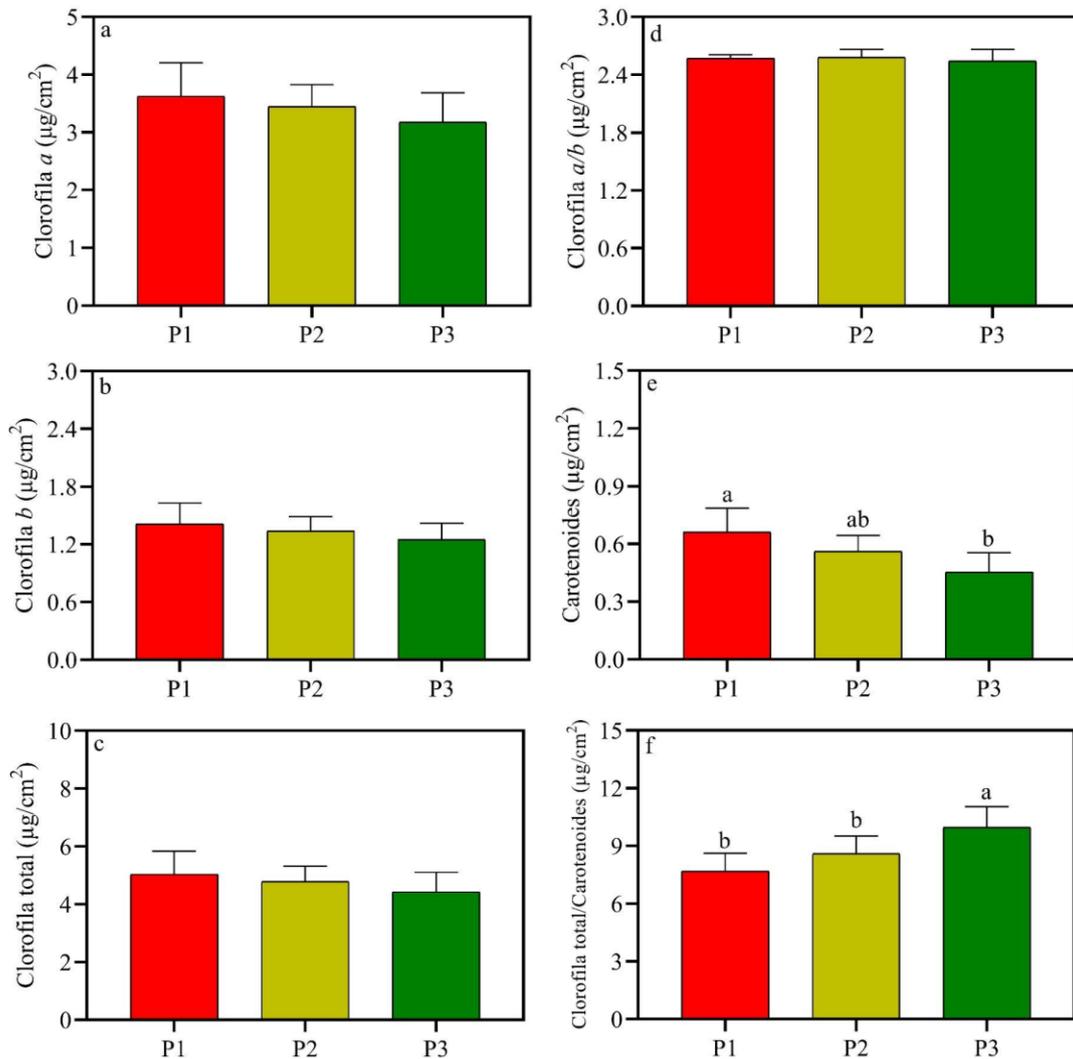


Figura 16 - Pigmentos fotossintetizantes avaliados em folhas de *N. gandarela* nas subpopulações **POP1** (P1 - barras vermelhas), **POP2** (P2 - barras amarelas) e **POP3** (P3 - barras verdes). **a** - clorofila a (C_a); **b** - clorofila b (C_b); **c** - carotenoides (C_{x+c}); **d** - clorofilas totais (C_{a+b}); **e** - razão entre clorofila a e b ($C_{a/b}$); **f** - razão entre clorofila total e carotenoides. Diferentes letras representam médias estatisticamente diferentes pela ANOVA one-way seguida de teste Tukey ($P < 0.05$) para comparação das médias. Médias estão representadas com o erro padrão, $n = 6$.

3.2.5 Caracterização do espectro luminoso

A avaliação da intensidade e qualidade da luz nos três ambientes revelou diferenças significativas no regime luminoso ao qual as populações estão sujeitas ao longo do dia. O espectro luminoso (i.e., composição da luz nos diferentes comprimentos de onda) foi similar para as três subpopulações, nos três horários avaliados, 8h, 12h e 15h.

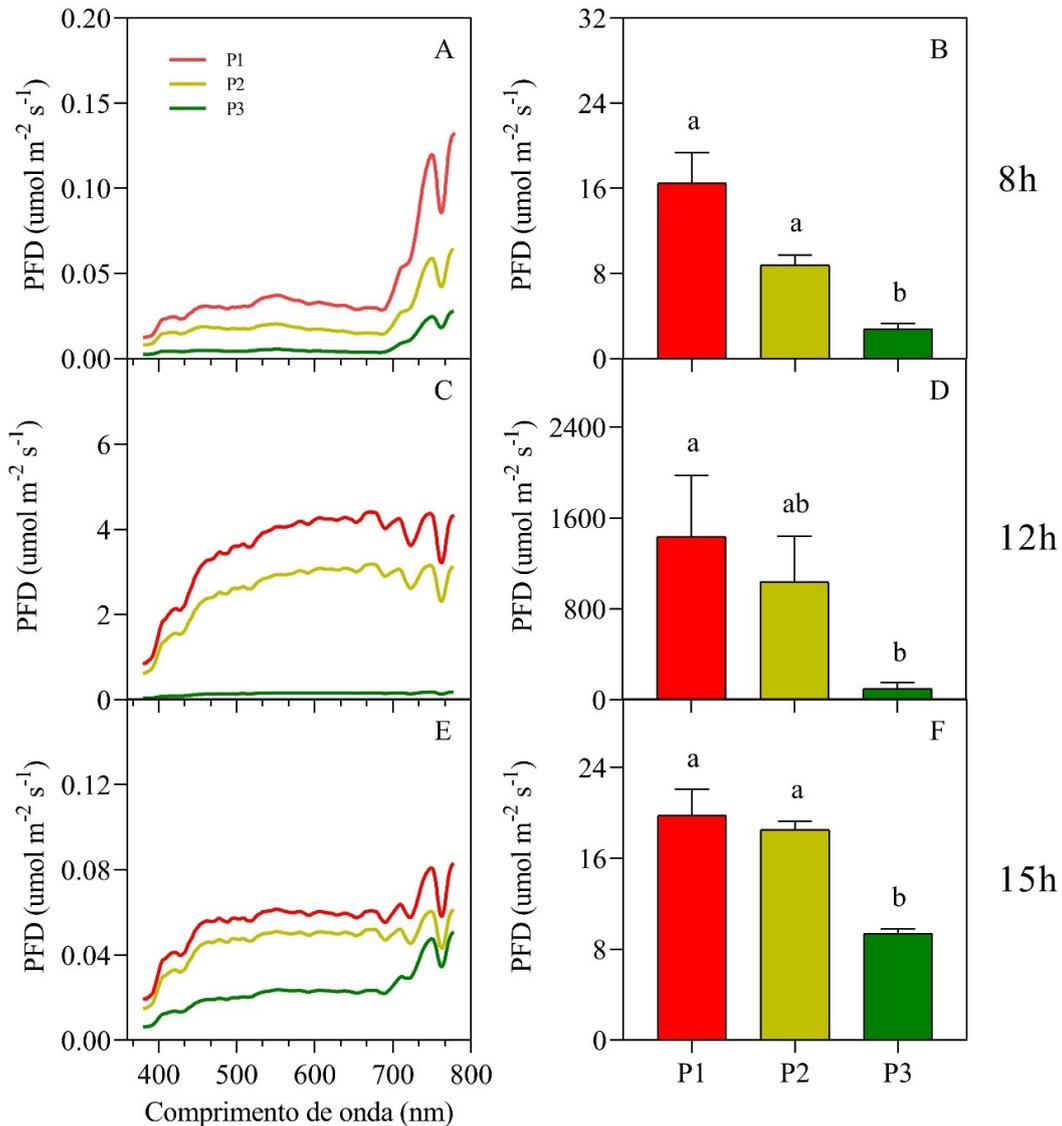


Figura 17 - Caracterização do espectro luminoso em três microhabitats ocupados por três subpopulações de *N. gandarela*. Os gráficos A, C e E representam os espectros solares nos horários 8h, 12h e 15h respectivamente. Gráficos B, D e F representam a densidade de fluxo de fótons (PFD) nos três horários do dia 8h, 12h e 15h respectivamente. As barras e linhas vermelhas representam as subpopulações *POP1* (P1), as amarelas *POP2* (P2) e as verdes, *POP3* (P3). As Barras representam as médias \pm erro padrão, letras minúsculas diferentes representam diferença significativa de acordo com teste Tukey a nível de significância de 5%. (n = 4).

Apesar do espectro ser similar, houve variação significativa na intensidade luminosa entre *POP3* e as demais, sendo de $16,49 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, $8,78 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e $2,81 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ às 8h da manhã para *POP1*, *POP2* e *POP3* respectivamente (Figura 17 - B). Às 12h a diferença no PFD entre *POP1* e *POP3* foi de 14 vezes ($1438,62 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para *POP1* e $102,09 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para *POP3*). Os dados avaliados às 15h revelaram diferenças significativas neste parâmetro apenas para *POP3* em relação a *POP1* e *POP2*, onde PFD para *POP1* foi de $19,77 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, *POP2* com $18,54 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e *POP3* com $9,4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Figura 17 - F).

A resposta de assimilação líquida de carbono (P_n) em relação às intensidades de luz fotossinteticamente ativa (PAR) nos auxiliam a caracterizar a eficiência fotossintética de *N. gandarela* e sua capacidade de sobreviver em ambientes escassos em luz. A partir dessa curva foram obtidos dados de respiração no escuro ($R_D = 0,35 \mu\text{mol (CO}_2\text{) m}^{-2} \text{s}^{-1}$), ponto de compensação de luz ($I_{\text{comp}} = 5,024 \mu\text{mol(photosyn) m}^{-2} \text{s}^{-1}$), taxa máxima de assimilação ($A_{\text{max}} = 5,02 \mu\text{mol (CO}_2\text{) m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e ponto de saturação de luz a partir do qual não ocorre variação significativa na taxa fotossintética ($I_{\text{max}} = 83 \mu\text{mol(photosyn) m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

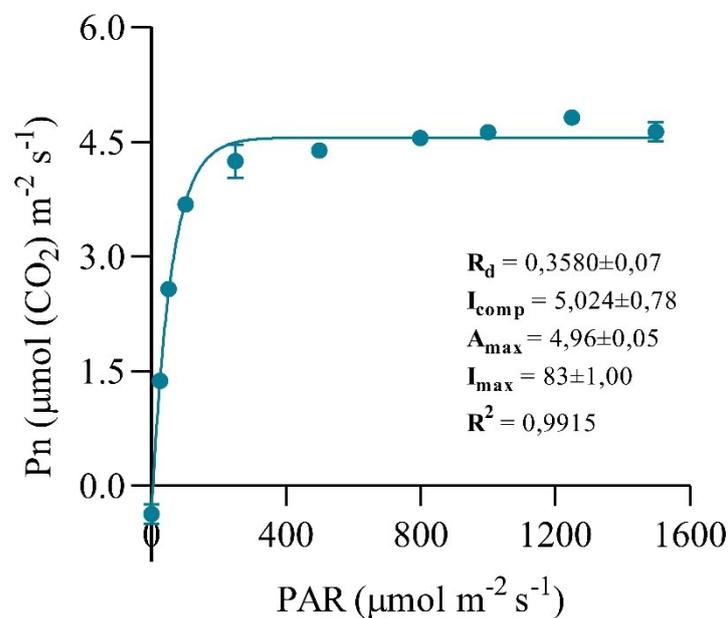


Figura 18 - Curva e variáveis obtidas a partir de curvas de assimilação em resposta a luz em *N. gandarela*. **Rd**: respiração no escuro [$\mu\text{mol (CO}_2\text{) m}^{-2} \text{s}^{-1}$]; **Icomp**: ponto de compensação de luz [$\mu\text{mol(photosyn) m}^{-2} \text{s}^{-1}$]; **Amax**: taxa fotossintética máxima [$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$]; **Imax**: ponto de saturação de luz a partir do qual não ocorre aumento significativo na assimilação líquida [$\mu\text{mol(photosyn) m}^{-2} \text{s}^{-1}$]; Média \pm erro padrão. (n = 2).

3.3 DISCUSSÃO

Como já esperado, por meio das observações preliminares em campo, nas quais notamos nuances na intensidade luminosa entre os microhabitats das três subpopulações de *Nicotiana glandarela*, confirmou-se um evidente gradiente luminoso, no qual se destaca principalmente a discrepância das condições luminosas onde se desenvolvem as subpopulações *POP1* (com maiores intensidades luminosas) e *POP3* (com menores intensidades luminosas) (Figura 17). Apesar dessas diferenças terem suporte estatístico para os três horários de medição, verificou-se que, ao meio-dia, horário em que a radiação solar apresenta o maior potencial energético, a *POP3* se encontra fortemente sombreada e, portanto, evidentemente mais protegida de excessos de irradiação neste momento, assim como no resto do dia (Figura 17). O sombreamento encontrado em *POP3* se deve à maior inclinação do afloramento rochoso presente, somada à cortina arbórea que se encontra logo à frente da entrada da lapa (abrigo). No entanto, mesmo sujeita a uma maior incidência luminosa, a qual proporciona respostas fisiológicas divergentes da *POP3*, a *POP1* ainda se encontra em um ambiente sombreado, em virtude do afloramento rochoso e da cortina arbórea que limita a irradiância solar em boa parte do dia.

Como observado, a taxa de assimilação líquida de CO₂ (Pn) foi maior na *POP3*, em relação a *POP1*, indicando claramente uma menor eficiência fotossintética em *POP1*. De acordo com Zhang et al. (2021), o excesso de energia luminosa pode causar danos ao aparato fotossintético ou induzir a fotoinibição do fotossistema II (PSII), prejudicando o ganho de carbono fotossintético. Por outro lado, Hans et al. (2008), aponta também que baixas intensidades de luz limitam a fotossíntese, reduzindo o ganho líquido de carbono e o crescimento da planta.

Visto isso, considerando que *POP3* se encontra em um micro-habitat consideravelmente mais sombreado e apresenta maior eficiência fotossintética, esses registros reforçam as evidências de que *Nicotiana glandarela* seja de fato uma espécie de sombra e, provavelmente, obrigatória de sombra “obligate shade plants” (Hans et al. 2008).

Em consonância com essas evidências, se encontram os resultados obtidos na fenologia comparativa (Tópico 2.2), nos quais verificamos que *POP1* apresentou a maior proporção de inatividade reprodutiva e mortalidade de indivíduos, abortamento geral de flores, com conseqüente ausência de produção de frutos, além de menor biomassa (menor intensidade de folhas totais, inclusive folhas maduras) e, portanto, um menor *fitness* entre as subpopulações.

A ausência de diferenças significativas na condutância estomática (gsw) entre as três subpopulações, rejeita a interpretação da possibilidade de uma limitação estomática em *POP1*, o que sugere que a provável causa de perda de eficiência fotossintética esteja na carboxilação ou na taxa de transporte de elétrons (ETR).

Apesar de não apresentar suporte estatístico, os resultados apontam que houve uma tendência de maior eficiência na taxa de transporte de elétrons máxima (ETR_{max}) na população *POP3* em comparação com as demais subpopulações, provavelmente carecendo de um *n* amostral maior para atingir o suporte estatístico.

No contexto de plantas de sombra, uma maior ETR_{max} permite maior eficiência fotossintética, compensando a disponibilidade reduzida de luz, favorecendo a manutenção da produção de ATP e NADPH, apoiando nos processos metabólicos e na tolerância ao estresse de alta luminosidade de curto prazo, que pode ocorrer quando plantas de sombra são repentinamente expostas à irradiações mais intensas, “*sunflecks*”, (Gjindali *et al.* 2021; Lambers *et al.* 2008; Zhang Jin-Yan *et al.* 2021)

De acordo com Gjindali *et al.* (2021), para maximizar a eficiência da captura de luz em todos os momentos, as plantas precisam garantir que as capacidades de transporte de elétrons e metabolismo excedam a taxa máxima de absorção de luz ao longo das variadas condições ambientais experimentadas.

Considerando que os valores do rendimento quântico máximo (F_v/F_m) foram estatisticamente iguais entre as populações, podemos descartar a possibilidade de ocorrência de fotoinibição crônica (Pietro *et al.*, 2009). Portanto, a menor eficiência fotossintética em *POP1* pode estar relacionada à danos causados ao fotossistema, devido ao excesso de luz em *POP1*, principalmente no período do meio-dia, quando as diferenças de irradiância são mais discrepantes e as médias da intensidade luminosas são maiores, desencadeando o mecanismo de fotoinibição dinâmica, hipótese a qual carece de estudos mais aprofundados para o esclarecimento.

A fotoinibição dinâmica é um processo reversível e adaptativo que regula negativamente a fotossíntese em resposta a variações de irradiância, proporcionando a aclimação e consequente proteção ao sistema fotossintético. A redução da eficiência fotossintética por meio do quenching não fotoquímico (NPQ) da energia de excitação absorvida pelo fotossistema II (PSII), previne a absorção excessiva de luz e danos ao aparato fotossintético, evita geração espécies reativas de oxigênio (ROS) excessivas e previnem a degradação da proteína D1 (Takahashi & Murata, 2008; Takahashi & Badger, 2011), garantindo que a fotossíntese ocorra em uma taxa que corresponda às demandas de energia da planta (homeostase fotossintética).

Respostas de aclimação sob condições de aumento intenso de luz, assim como flutuações de intensidade ao longo do dia (*sunflecks*), podem também incluir aumento do conteúdo de PSBS (Roach & Krieger-Liszkay, 2012) e a concentração de pigmentos do ciclo da xantofila, levando a um fortalecimento da capacidade fotoprotetora do NPQ (Alter *et al.*, 2012; Caliandro *et al.*, 2013)

Considerando que encontramos uma maior concentração de carotenoides em *POP1* em relação à *POP3*, este pode ser um indicativo de aclimação para aumentar capacidade de fotoproteção dessas plantas

que estão sob maior condição de estresse luminoso, em função do maior regime de irradiância ao longo do dia e, principalmente, nas horas próximas ao meio-dia.

As plantas também podem responder às diferentes irradiâncias adaptando uma série de características morfológicas e, dentre elas, a área foliar específica (AFE), a qual se trata de uma característica funcional essencial das plantas, subjacente à variação na taxa de crescimento entre as espécies (Legner et al., 2014; Rozendaal et al., 2006; Valladares e Niinemets, 2008). Embora seja frequentemente assumido implicitamente que essas mudanças morfológicas e fisiológicas são respostas plásticas ativas para aliviar os efeitos do estresse ambiental na planta, elas também podem refletir respostas plásticas passivas à disponibilidade reduzida de recursos (van Kleunen e Fischer, 2005).

Em geral plantas desenvolvem uma AFE maior quando se encontram em condições mais sombreadas, aumentando a eficiência da captura de luz e assimilação de carbono em tais ambientes (Gommers et al., 2013), em função de uma maior taxa de fotossíntese máxima por unidade de massa (Evans e Poorter, 2001; Pérez-Harguindeguy et al., 2013).

Alguns estudos mostram que a plasticidade sobre o AFE em resposta as condições ambientais de sombreamento são realmente adaptativas, resultando em maior ou menor desempenho fotossintético (Steinger et al., 2003; Avramov et al., 2006; Sanchez-Gomez et al., 2006; McIntyre e Strauss, 2014).

Desta forma os maiores valores obtidos para a AFE em *POP3*, concomitantemente à maior eficiência fotossintética mensurada, reforçam a hipótese de preferência *N. glandarela* por ambientes mais sombreados, porém também apontam certa plasticidade morfológica adaptativa.

Com base na curva de luz com indivíduos de *Nicotiana glandarela* cultivados trazemos à tona maior evidência para caracterizar a alta capacidade de adaptação à sombra, tais como baixa taxa de respiração (R_d), baixo ponto de compensação de luz (I_{comp}) e a necessidade de baixas intensidades de luz para quase saturar os fotossistemas (I_{max}) (Hans et al. 2008; Valladares e Niinemets, 2008).

O valor de $83 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, encontrado para o ponto de saturação de luz (I_{max}) indica que em ambientes onde a intensidade luminosa ultrapassa esse valor, o excesso não acrescenta vantagem fotossintética aos indivíduos de *N. glandarela* e, pelo contrário, com base nos dados obtidos em *POP1*, proporcionam prejuízos à eficiência fotossintética.

Em um estudo feito com folhas de cacau continuamente expostas a intensidades de luz maiores que 100% da intensidade fotossintética de saturação, a taxa de fotossíntese começou declinar quase imediatamente. (Kozlowski & Pallardy, 1997).

Desta forma, podemos prever que, sementes dispersas estocasticamente e eventuais plântulas de *N. glandarela* em início de desenvolvimento em locais não sombreados durante boa parte do dia, onde o

PFD atinge 1500 a 2000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, durante várias horas no dia, certamente acarretaria uma depressão do sistema fotossintético e provavelmente resultaria na fotodegradação dos pigmentos fotossintéticos, seguida de morte do organismo. Por meio das medições verificamos que em *POP3* o PFD máximo diário, medido ao meio-dia, foi de $102,1649 \pm 43,48 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, sendo que este valor é menor ainda ao longo dos períodos da manhã e tarde e, portanto, ao longo do dia os valores se encontram em intensidades mais favoráveis para a manutenção da fotossíntese ótima para a espécie, o que configura sua adaptação especializada ao hábitat em que se encontra em termos de aproveitamento da luz.

No extremo de sobrevivência, entre as subpopulações avaliadas, se encontra a *POP1*, na qual mensuramos valores em torno de $1438,62 \pm 379,37 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ao meio-dia. No entanto esta densidade de fótons se mantém por poucos minutos sobre as folhas dos indivíduos, de forma que as potenciais aclimações desenvolvidas nestes são suficientes para lidar com este período curto de maior irradiância luminosa. No entanto, os dados presentes no estudo fenológico (item 2.2) mostram evidências de menor taxa de reprodução para a *POP1*, assim como menor produtividade vegetativa e maior intensidade de senescência ao longo de todo o ciclo anual, o que também nos dá sinais de que pequenos excessos de luminosidade já são capazes de prejudicar o estabelecimento de *N. gandarela* em novos ambientes.

Valladares & Niinemets (2008) apontam a necessidade de cuidado no uso do conceito de tolerância à sombra (*shade-tolerant*), visto que, embora muitas plantas possam tolerar condições de baixa luminosidade, apenas uma fração delas pode se reproduzir nessas condições. Considerando os resultados obtidos para *Nicotiana gandarela*, pelos quais evidenciamos que tanto o estado fisiológico, quando a capacidade reprodutiva (ver item 2.2) são superiores no microhábitat mais sombreado (*POP3*), torna-se mais forte a hipótese de se trata de uma espécie obrigatória de sombra, o que direciona com mais clareza o entendimento sobre o seu caráter de raridade, assim como exalta a importância da diversidade de microhábitats/microclimas no interior de uma matriz florestal, como fator propulsor de biodiversidade e endemismos.

4 ANÁLISE DE SOLO, ELEMENTOMA E BUSCA POR NOVAS POPULAÇÕES DE *NICOTIANA GANDARELA* E HABITATS POTENCIAIS DE OCORRÊNCIA NA SERRA DA GANDARELA

4.1 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1.1 Coleta e Análise de Solos

A coleta de amostras de solo foi realizada de acordo com as orientações descritas na literatura especializada (Nogueira *et al.* 1998; Prezzoti & Guarçoni 2013) e adequações necessárias às condições naturais inerentes à espécie avaliada (solo extremamente raso em contato direto com a matriz rochosa).

Para a coleta de solos onde se desenvolvem *N. gandarela*, foram traçados cinco transectos lineares, correspondentes às 5 subpopulações conhecidas e considerando os espaços em que ocorrem maiores adensamentos de indivíduos da espécie. Para cada transecto, com comprimento de no máximo 10 metros, foram coletadas subamostras de solo com profundidade de no máximo 5 cm, a cada 0,5 m, somando aproximadamente 25 cm³, cada. Estas subamostras foram homogeneizadas para a composição final. As amostras relativas às subpopulações *POP1*, *POP2* e *POP3* foram homogeneizadas, resultando em 3 amostra referentes aos cinco transectos.

A título de comparação, para tentar evidenciar possíveis influências diretas dos afloramentos rochosos sobre os solos de *N. gandarela*, foram também realizadas amostragens de solo no fragmento de Floresta Estacional Semidecidual (FES) presente no entorno imediato do afloramento rochoso em que se desenvolve *N. gandarela*., onde os afloramentos carbonáticos não são ocorrentes. A amostragem na área de FES foi considerada importante para a interpretação de possíveis influências restritivas do solo sobre a ocorrência da espécie, visto que em termos de luminosidade e umidade o interior deste fragmento se assemelha, a princípio, ao ambiente de ocorrência espécie, porém ali ela não é encontrada, configurando em primeira análise impressões um solo mais desenvolvido e típico de área florestal.

A coleta de solo no ambiente florestal seguiu a metodologia de 5 transectos de 30 metros com coletas de subamostras a cada 1 m, com profundidade de 5 cm, de forma a obter apenas a informação edáfica no contexto da rizosfera de *N. gandarela*, a qual não apresenta raízes profundas, permanecendo nos primeiros centímetros do substrato. Estas subamostras foram homogeneizadas para compor uma amostra única.

Durante as buscas por possíveis afloramentos/habitats de ocorrência da espécie, foram também recolhidas amostras de solo seguindo, sempre que possível, o mesmo padrão estabelecido para o solo de ocorrência de *Nicotiana gandarela*, descrito acima.

Para a composição das amostras compostas, as subamostras (amostras simples) foram reunidas em sacolas de plástico individuais e com tamanho suficiente para a realização de destorroamento e homogeneização. Posteriormente ao período de secagem à sombra, foram retirados aproximadamente 300 g dessa mistura, as quais foram colocadas sacos plásticos limpo, identificados e enviados ao laboratório de análise do Departamento de Solos – DPS – UFV (Figura 19).



Figura 19 – Amostras de solo enviadas para o Laboratório de análise de solos do Departamento de Solos – DPS, da Universidade Federal de Viçosa - UFV

Os teores de nutrientes determinados foram comparados com valores de referência, apresentados em tabelas de interpretação, permitindo assim a classificação do nível de fertilidade do solo, assim como compostos que se encontram abaixo ou acima de níveis médios.

Desta forma e, em conjunto com a análise foliar, foram analisadas possíveis restrições impostas pelas características específicas do solo de ocorrência da espécie, as quais possam trazer à tona respostas para uma melhor compreensão acerca de sua distribuição de ocorrência em função de seu potencial edafismo.

4.1.2 Coleta e Análise de Tecido Foliar

A coleta de amostras de tecido foliar de *N. gandarela* foi realizada de acordo com as orientações descritas na literatura especializada (Nogueira *et al.* 1998; Prezzoti & Guarçoni 2013) e adequações necessárias em virtude das particularidades morfológicas inerentes à espécie avaliada.

A amostragem foi padronizada considerando 1 folha maduras e visualmente sádia por indivíduo, totalizando 20 indivíduos (amostra FM - Figura 20). A título de comparação também foram amostradas 20 folhas oriundas de 20 indivíduos, porém considerando folhas amareladas com aspecto de senescência (amostra FS - Figura 20). As amostras foram coletadas e acondicionadas em sacolas de papel e inseridas em caixa de isopor com refrigeração temporária (sacolas de gelo em gel), posteriormente em refrigerador (4° C) e enviadas no dia seguinte ao laboratório de análise do Departamento de Solos – DPS – da universidade Federal de Viçosa - UFV.



Figura 20 – Aspecto geral das amostras de tecido foliar de *Nicotiana glandarela* enviados para o laboratório de análises do Laboratório de Análise de Solo, Tecido Vegetal e Fertilizante do departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa. À esquerda folhas maduras sadias (FM) e a direita folhas em aspecto de senescência (FS).

4.1.3 Busca por Novas Populações e Habitats Potenciais de Ocorrência na Serra da Gandarela

Previamente foram realizadas análises de relevo e da paisagem na região da serra da Gandarela, com base em softwares livres de análise geoespacial (Google Earth Pro e QGIS) para o direcionamento de localidades potenciais para novos registros de populações da espécie *Nicotiana glandarela*.

Em função dos conhecimentos incipientes acerca dos requerimentos ambientais exigidos pela espécie em questão, foi dada preferência para prospecção de populações em locais com alta probabilidade de ocorrência de afloramentos dolomita e mármore dolomítico, no interior da área abrangida pela formação Gandarela, com destaque para as áreas que se encontram no interior do Parque Nacional da Serra do Gandarela - PARNA Gandarela (Brasil, 2014).

Em função da predominância de vegetação florestal na área de estudo, atrelado ao fato de que os afloramentos carbonáticos da formação gandarela raramente se sobressaem nesta vegetação, ou seja, ficam em grande parte pouco detectáveis nas imagens de satélite, uma das estratégias utilizadas foi a identificação visual de drenagens e cursos d'água bem encaixados no relevo, como ponto de partida para a posterior avaliação *in loco* de potenciais afloramentos rochosos e populações de *N. glandarela*.

A partir da definição dos locais potenciais foram avaliados os possíveis acessos (estradas e trilhas) que apresentavam condições mínimas para a chegada aos locais de ocorrência potencial. Com auxílio das ferramentas de geoanálise foram delineados os trajetos (caminhamentos) potenciais e os dados foram exportados para gps (modelo Garmin 64S), assim como foram confeccionados mapas para a orientação em campo.

Por meio de contato direto com a comunidade de André do Mato Dentro, localidade Tipo da espécie em questão, também foram levantadas informações valiosas sobre os melhores acessos às áreas previamente selecionadas

De posse das informações obtidas, foram planejadas as logísticas de campo, considerando os melhores acessos, sob a ótica de menor tempo de deslocamento, economia, segurança, condições climáticas, de forma a tornar as atividades de busca pela espécie mais assertivas possível.

Durante as campanhas de busca em campo os caminhamentos e orientação foram principalmente realizados por meio de ferramentas digitais de localização em tempo real, como GPS e aplicativos especializados para androide (Alpine Quest, Avenza Maps) e mapas confeccionados.

No intuito de avaliar o potencial de estabelecimento de *Nicotiana glandulosa*, dentre os afloramentos rochosos encontrados, foram selecionados aqueles que apresentavam condições de proteção contra precipitação (lapas/abrigos), ausência de indícios de enxurrada, assim como sombreamento relevante, características principais do ambiente de desenvolvimento da espécie. Para estes afloramentos foram realizadas coletas de amostras de solo, das quais cinco subamostras foram coletadas na extensão total de cada afloramento, considerando espaçamentos iguais e uma profundidade de 5 cm, seguindo a padronização feita para a coleta de solos das populações de *N. glandulosa*. As cinco subamostras foram homogeneizadas para a representação de cada afloramento.

Em função de adequação de custos (análise laboratorial de solos), os solos de afloramentos que se situavam muito próximos, ou seja, num mesmo setor, foram combinados formando amostras compostas, devidamente detalhadas Tabela 16, na seção de resultados.

Caso fossem encontradas novas populações para a espécie em questão, seriam realizadas coletas de material botânico, observando as orientações padrão para herborização no herbário BHCB, do Departamento de Botânica do Instituto de Ciências Biológicas da UFMG. Para cada população encontrada seriam realizadas coletas em triplicatas, se possível com materiais reprodutivos e vegetativos, desde que não comprometesse a estrutura populacional. Caso fossem encontradas populações com número reduzido de indivíduos, o registro seria feito com base em fotografia digital, registro de coordenadas geográficas e material em sílica. A licença de coleta de material botânico foi solicitada junto ao órgão competente (ICMBio), em anexo.

4.1.4 Análise comparativa entre solos do Quadrilátero Ferrífero

Na tentativa de analisar a magnitude de divergências entre os solos de *N. glandulosa*, assim como dos demais afloramentos rochosos carbonáticos encontrados durante o estudo, os resultados da análise solo foram confrontados com outros estudos de solo no Quadrilátero Ferrífero, com destaque para aqueles associados à afloramentos rochosos distintos (Canga, Quartzitos e Granitóides). Para tanto foram

compilados dados de Carmo (2014), Reis et al. (2014), Carvalho Filho *et al.* (2010) e Carvalho Filho (2008).

Para os dados de Reis et al. (2014) e Carvalho Filho (2008, 2010), foram compilados apenas as informações obtidas para os horizontes A e/ou O dos solos, atentando para não incluir informações de horizontes abaixo dos 10 a 15 cm, visto que se tratam de trabalhos de análises completas de perfil edáfico.

Primeiramente foram realizadas análises multivariadas (PCA) e de agrupamento, com base em 25 atributos solo, sendo 21 químicos (pH H₂O, P, K, Ca²⁺, Mg²⁺, Al³⁺, H + Al, SB, t, T, V, m, MO, P-Rem, Ca:Mg, S, B, Cu, Mn, Fe, Zn) e 4 físicos (areia grossa, areia fina, silte e argila), contemplando os solos de afloramentos (lapas) carbonáticos, o solo da Floresta Estacional (FES) e o solo composto de 3 afloramentos (lapas) presumivelmente de itabiritos, juntamente com o solo onde se desenvolve *Nicotiana glandarela*.

Em seguida foram realizadas a análises de PCA e Agrupamentos, contemplando os dados médios de atributos do solo presentes em Reis (2014) e Carmo (2014). As análises foram feitas separadamente em função da falta de algumas variáveis em determinados estudos. Portanto para esta análise foram considerados 17 atributos, sendo 15 químicos (pH H₂O, P, K, Ca²⁺, Mg²⁺, Al³⁺, SB, t, V, m, MO, Ca:Mg, Mn, Fe, Zn) e três físicos (areia total, silte e argila).

Para as análises de agrupamento os dados foram padronizados (*Standardize data*), e utilizou-se a método de agrupamento de Ward, com medida Euclidiana de distância. Foi gerado o dendrograma e o mapa de calor para melhor visualização dos agrupamentos. Com base na PCA foi gerado o gráfico bi-plot para melhor visualização dos agrupamentos e suas possíveis associações com as variáveis. Os cálculos e gráficos foram realizados no software Jamovi Versão 2.5 (The Jamovi Project, 2024) e módulo snowCluster (Seol, 2024).

4.2 RESULTADOS

4.2.1 Busca por Novas Populações e Habitats Potenciais de Ocorrência na Serra da Gandarela

Por meio das buscas realizadas não foi possível registrar novas ocorrências da espécie *Nicotiana glandarela*. No entanto foram encontrados vários afloramentos rochosos (lapas) os quais apresentam características potenciais para o estabelecimento da espécie, como proteção contra chuva, enxurradas e irradiação solar. Considerando que as florestas da serra da Gandarela passaram por vários episódios desmatamento, é possível que tais afloramentos possam ter abrigado a espécie no passado e, considerando sua dependência por ambientes sombreados, terminaram extintas nestes locais. Considerando essa hipótese, para estes afloramentos foram realizadas coletas de solo, como detalhado

nos materiais e métodos, para avaliarmos as possíveis semelhanças com os solos onde se desenvolvem as únicas populações de *N. gandarela* conhecidas até o momento. A seguir se encontram o mapa de localização e os registros fotográficos dos afloramentos.

Tabela 15 – Coordenadas geográficas dos afloramentos carbonáticos e na Formação Gandarela onde foram coletadas amostras de solo para as análises comparativas, assim como para uma área de Floresta Estacional Semidecidual (FES).

Setores	Ponto	Longitude	Latitude
<i>Nicotiana gandarela</i>	POPgeral	-43.644	-19.995
	POP04	-43.644	-19.995
	POP05	-43.645	-19.995
Cassimira	Lapa 01	-43.645	-19.995
	FES	-43.645	-19.995
	Lapa 02	-43.654	-20.014
	Lapa Cafezal	-43.643	-19.996
Fundão	Lapa 5	-43.65	-20.044
	Lapa 3	-43.649	-20.041
	Lapa 7	-43.652	-20.043
	Lapa 2	-43.647	-20.041
Rio Preto (RP)	Lapa 1	-43.671	-20.06
	Lapa 2	-43.672	-20.063
	Lapa 3	-43.672	-20.063
	Lapa 4	-43.672	-20.064
Funil	Lapa 8	-43.656	-20.04
	Lapa 9	-43.656	-20.04
	Lapa 10	-43.656	-20.04
Pau-Oco (PO)	Lapas 1-2-3	-43.641	-19.992

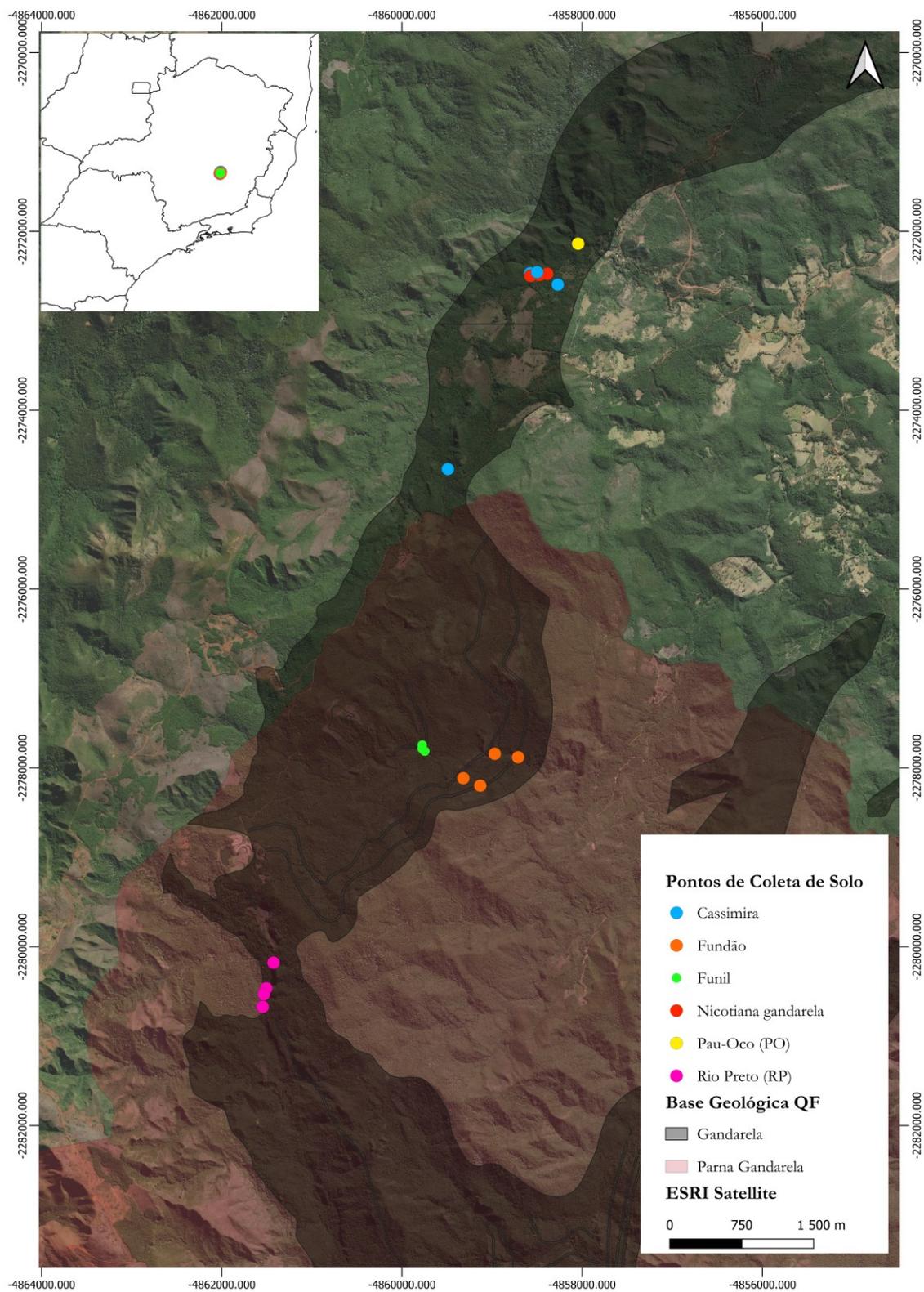


Figura 21 - Mapa de localização dos afloramentos rochoso carbonáticos encontrados na Formação Gandarela, nos quais foram realizadas as coletas de amostras de solo.

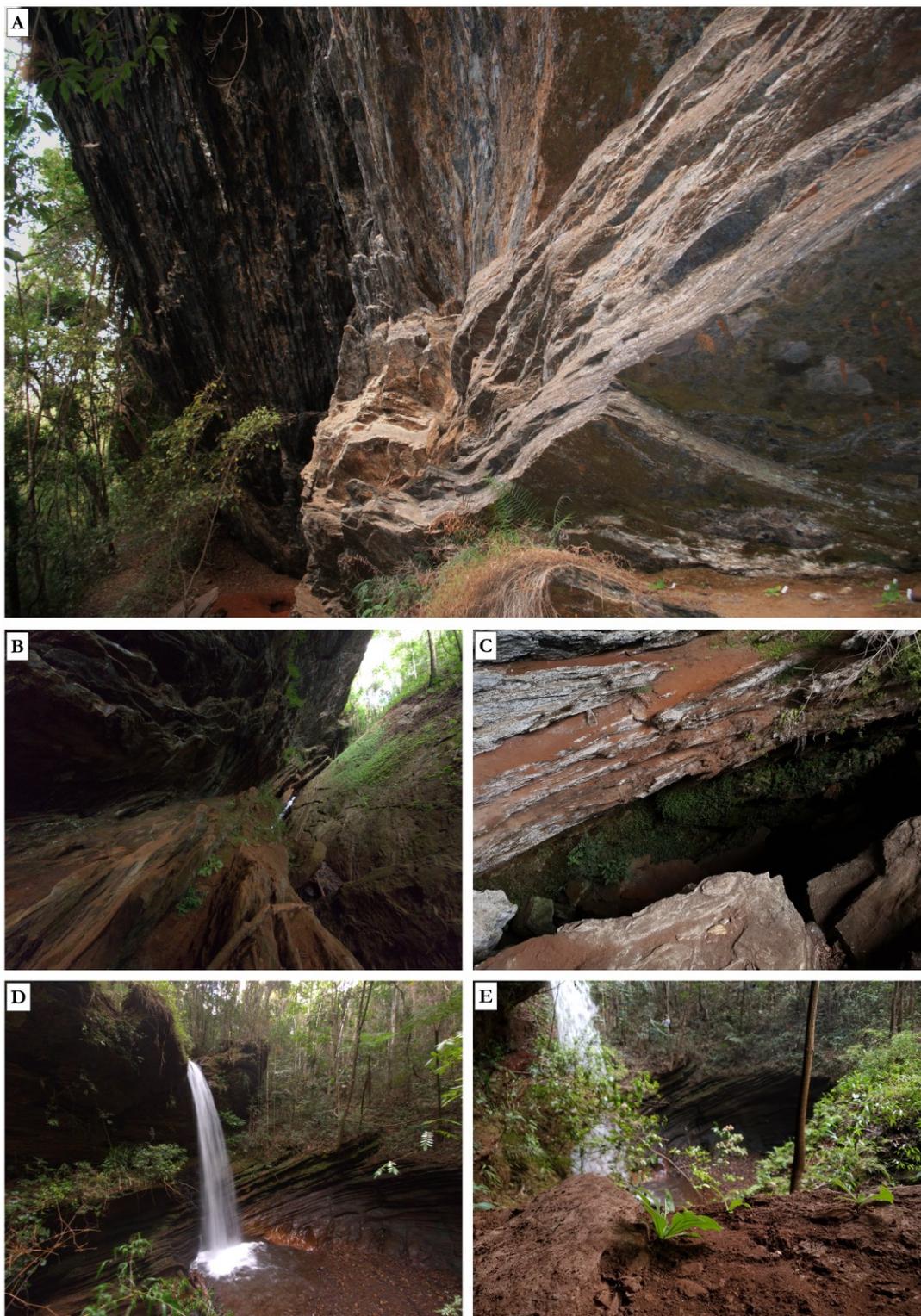


Figura 22 – Populações de *Nicotiana glandarela* e locais de coleta de amostra de solo associado. A: local da maior população referida como *POP* Geral no presente estudo a qual é formada pelas subpopulações *POP1*, *POP2*, *POP3*. B - C: Local da subpopulação *POP4*. D-E: Local da Subpopulação *POP5*, a qual se encontra na lapa, atrás da queda d'água. E: detalhe para um indivíduo de *N. glandarela* em fenofase vegetativa.



Figura 23 – Setor Cassimira. **A – E** : Afloramento carbonático formando abrigo (lapa). **A**: detalhe para a capacidade de sombreamento e proteção contra chuvas. **D – E**: detalhe para a textura e colorações do afloramento, bastante similar aos afloramentos de ocorrência de *N. gandarela*.

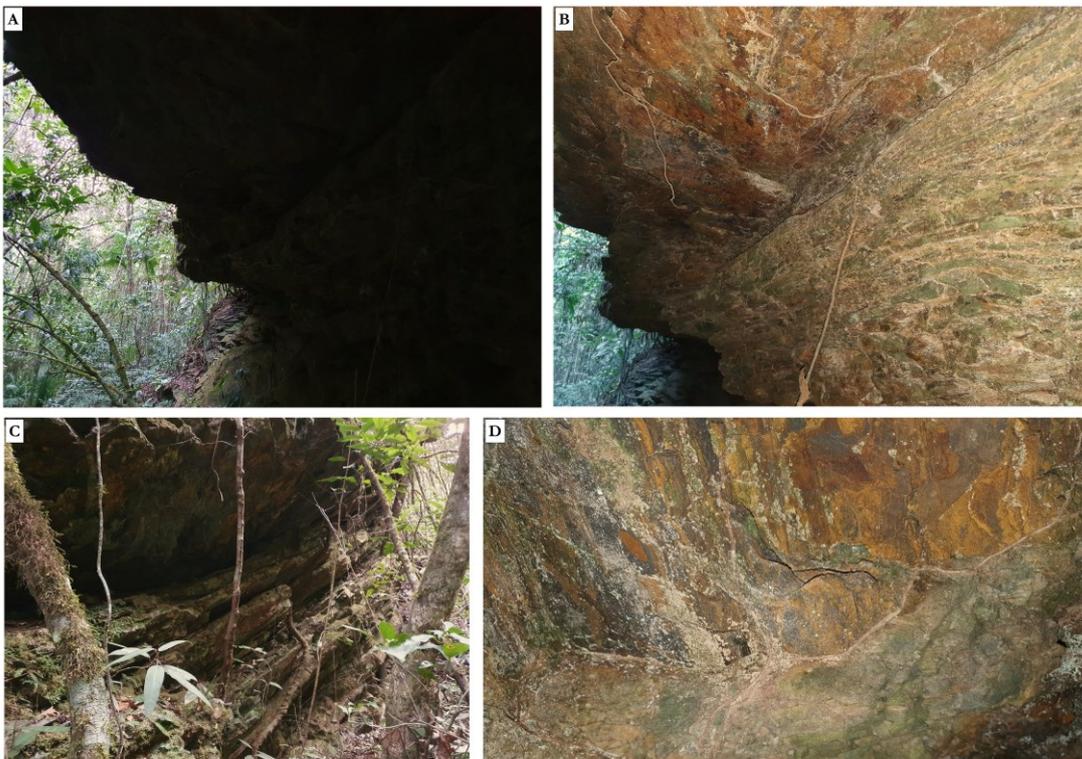


Figura 24 – Setor Pau-Oco (PO). **A – C**: Afloramentos de itabirito formando abrigo (lapa). **A**: detalhe para a capacidade de sombreamento e proteção contra chuvas. **D**: detalhe para a textura e colorações do afloramento, com aspecto distinto dos afloramentos de ocorrência de *N. gandarela*.

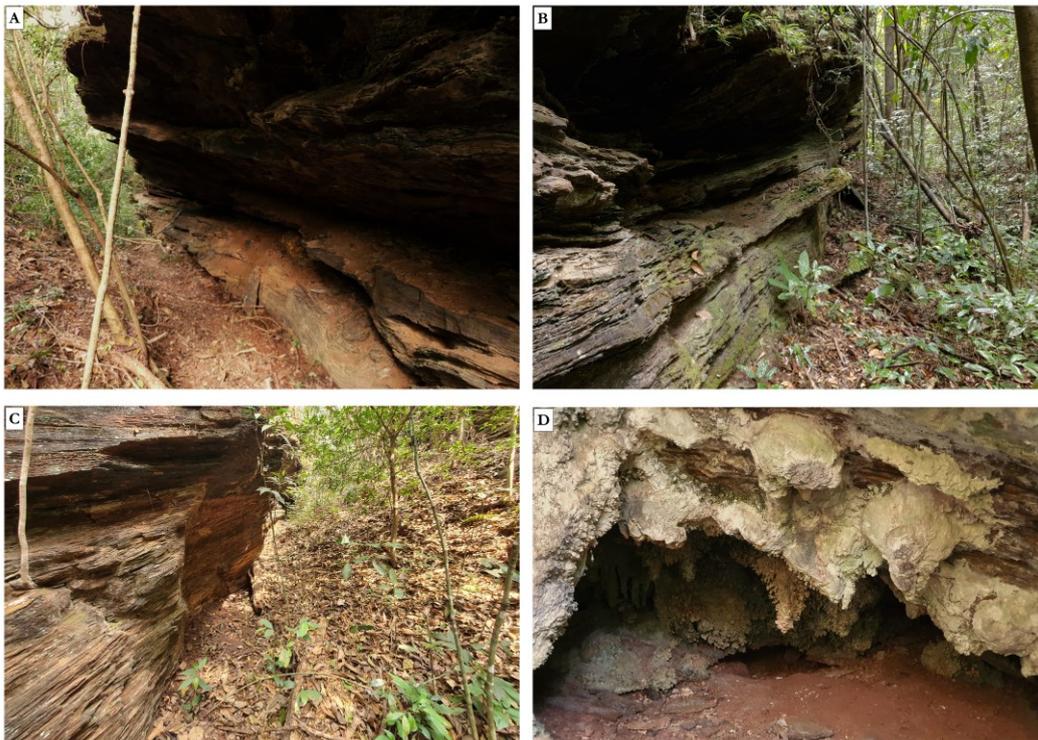


Figura 25 – Lapa 01 (Setor Cassimira). A – C : Afloramento carbonático formando abrigo (lapa). A - B: Detalhe para a capacidade de sombreamento e proteção contra chuvas. C - D: Detalhe para a textura e colorações do afloramento próximas àquelas encontradas nos afloramentos de ocorrência de *N. gandarela* e com presença de pequenos epeleotemas.



Figura 26 – Lapa 02 (Setor Cassimira). Afloramento carbonático formando abrigo (lapa). detalhe para a textura e colorações do afloramento próximas àquelas encontradas nos afloramentos de ocorrência de *N. gandarela* afloramentos de ocorrência de *N. gandarela*.

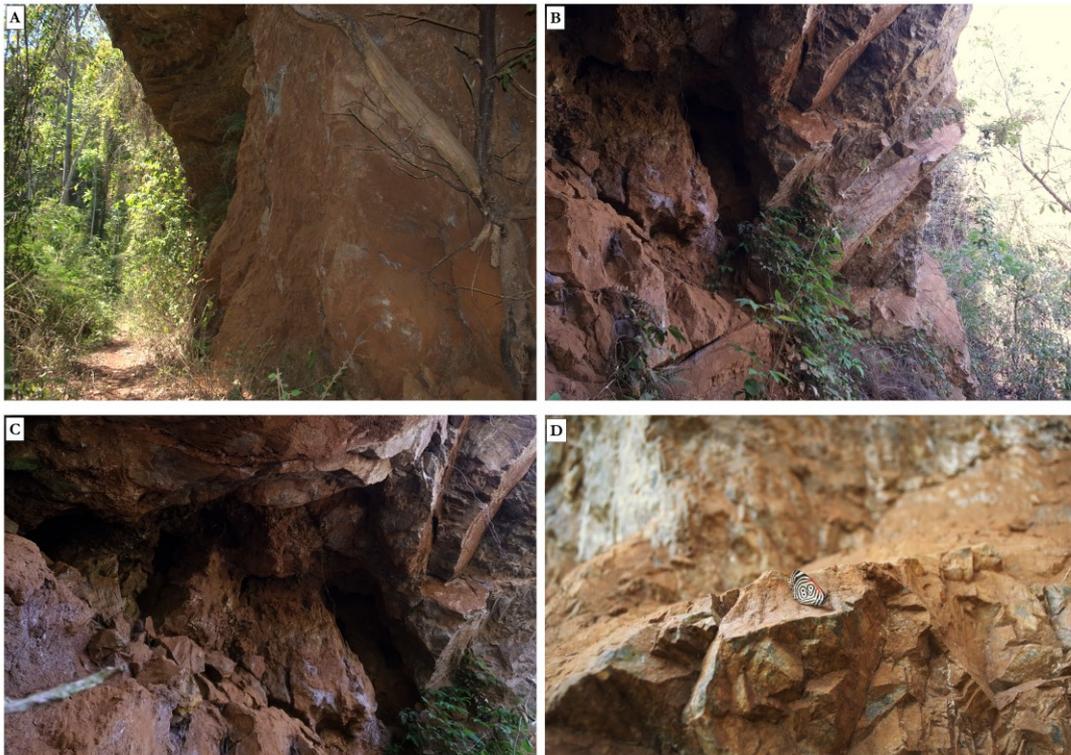


Figura 27 – Lapa 01 (Setor Rio Preto – RP). **A – C** : Afloramento carbonático (Mármore Dolomítico), formando abrigo (lapa), com capacidade de sombreamento e proteção contra chuvas. **D**: detalhe para a textura e colorações do afloramento, bastante similar aos afloramentos de ocorrência de *N. gandarela*.



Figura 28 - Lapa 02 (Setor Rio Preto – RP). **A – B** : Afloramento carbonático (Mármore Dolomítico), formando abrigo (lapa), com capacidade de sombreamento e proteção contra chuvas. **C - D**: detalhe para a textura e colorações do afloramento, distintas dos afloramentos de ocorrência de *N. gandarela*.



Figura 29 - Lapa 03 (Setor Rio Preto – RP). **A – B** : Afloramento carbonático (Dolomítico), formando abrigo (lapa), com capacidade de sombreamento e proteção contra chuvas. **C - D**: detalhe para a textura e colorações do afloramento, similares aos afloramentos de ocorrência de *N. gandarela*.



Figura 30 – Lapa 04 (Setor Rio Preto – RP). Afloramento carbonático (Dolomítico), formando abrigo (lapa), com pouca capacidade de sombreamento e proteção contra chuvas (baixa inclinação). As textura e colorações do afloramento são similares aos afloramentos de ocorrência de *N. gandarela*.



Figura 31 – Afloramentos no Setor Fundão **A – B**: Lapa 3; **C – E**: Lapa 2; **F – G**: Lapa 5; **H**: Lapa 7. Este setor apresentou afloramentos dolomíticos com variações nas colorações (avermelhadas e azuladas/acinzentadas), porém texturas semelhantes aos afloramentos de *N. gandarela*. Em geral apresentam inclinações fortes e promovem evidentes proteções contra chuvas e irradiação solar, com destaque para a Lapa 7.



Figura 32 – Afloramentos no Setor Funil. A: Lapa 8; B: Lapa 9; Lapa 10. Os afloramentos deste setor foram os menores encontrados, porém formam pequenas lapas, com proteção à chuvas e irradiação solar. Em geral apresentam texturas similares aos afloramentos de *N. gandarela* e colorações também aczentadas/azuladas.



Figura 33- Setor Cassimira – Aspecto geral da Floresta estacional Semidecidual (FES) que se situa logo à frente da abertura da Lapa onde se desenvolvem as populações de *Nicotiana gandarela*. A - B: FES vista a partir de dentro da Lapa de *N. gandarela*; C: aspecto geral do sub-bosque da FES; D: Aspecto geral do solo da FES.

4.2.2 Caracterização do solo preferencial de *Nicotiana glandarela*

Os solos onde se desenvolvem as três populações de *Nicotiana glandarela* apresentaram valores altos de pH (8,33, 8,24 e 8,39), sendo, portanto, classificados como solos fortemente alcalinos. Os teores de Alumínio (Al^{3+}) foram nulos, como esperado pelo caráter básico do solo. A Capacidade de Trocas Catiônicas Totais (T) pode ser considerada média (8.80, 9.84 e 8.58). Esses valores foram encontrados também para a Capacidade de Trocas Catiônicas efetiva (t), o que configura uma t classificada como alta. Devido à ausência de Al^{3+} a Soma de Bases Trocáveis (SB) também apresentou os mesmos valores, sendo considerada alta e um Índice de Saturação por Bases (V) igual a 100% (muito alto), o que geralmente embasa as classificações de solos eutróficos (Santos *et al.* 2018). Devido a completa ausência de Al^{3+} , o índice de saturação por Al^{3+} foi de 0% (muito baixo), assim como para a acidez potencial (H+Al).

O teor de matéria orgânica (MO) pode ser considerado médio para as três populações, sendo 1,85 dag/kg (POP Geral), 3,15 dag/kg (POP04) e 2,50 dag/kg (POP05).

O potássio registrado foi de 27 mg/dm³ (POP Geral), 30 mg/dm³ (POP04) e 26 mg/dm³ (POP05), sendo considerados valores baixos. Seguindo a mesma ordem das amostras, o fósforo (P) foi registrado com valores considerados muito baixos, de 0,2 mg/dm³, 0,6 mg/dm³ e 0,7 mg/dm³, no entanto, verificou-se que o fósforo remanescente (P-Rem) foi de 12,3 mg/dm³, 13,3 mg/dm³ e 15,9 mg/dm³, ou seja, a capacidade de retenção de fósforo pelo solo pode ser considerada média, tendo em vista a textura de característica média do solo.

Os teores de cálcio trocável (Ca^{2+}) foram considerados médios para a POP Geral (2,81 cmolc/dm³) e POP04 (3,58 cmolc/dm³) e alto para a POP05 (5,58 cmolc/dm³), portanto com uma média de 3,99 cmolc/dm³. O magnésio trocável (Mg^{2+}) apresentou valores elevados, sendo o mais alto para 5,92 cmolc/dm³ (POP Geral), 4,18 cmolc/dm³ (POP04) e 4,93 cmolc/dm³ para a POP05, resultando em uma média de 5,01 cmolc/dm³, o que representa um teor alto para este nutriente.

O enxofre (S) apresentou valores considerados baixos, sendo 2,3 mg/dm³ (POP Geral), 1,2 mg/dm³ (POP04) e 0,0 mg/dm³ para a POP05.

Com relação aos micronutrientes, foram registrados teores baixos de Boro (B), sendo 0,04 mg/dm³ (POP Geral), 0,13 mg/dm³ (POP04) e 0,00 mg/dm³ (POP05). Seguindo a mesma sequência de amostras, os valores de Cobre (Cu) foram 0,33 mg/dm³, 0,41 mg/dm³ e 0,38 mg/dm³, considerados de baixo a médio teor.

As amostras das POP Geral e POP05 apresentaram altos teores de Manganês (Mn) 13,3 mg/dm³ e 40,7 mg/dm³, enquanto a POP04 apresentou um valor de 2,4 mg/dm³, considerado médio.

Os teores de Ferro (Fe) foram encontrados com uma média de 4,1 mg/dm³, considerado baixo, sendo 5,5 mg/dm³ (*POP Geral*), 2,9 mg/dm³ (*POP04*) e 3,9 mg/dm³ (*POP05*). O zinco (Zn) apresentou um teor baixo de 0,64 mg/dm³ para a *POP05* e valores não detectáveis para *POP Geral* e *POP04*.

Considerando as respectivas proporções de areia, silte e argila, as texturas dos solos foram classificadas como Franca (*POP Geral* – 47,5 : 36,7 : 15,8 %), Franca-Siltosa (*POP04* – 27,7 : 51,7 : 20,6 %) e Franca (*POP05* – 39,9 : 39,4 : 20,7 %) de acordo com o triângulo textural adotado pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS).

De acordo com os parâmetros estabelecidos pela Instrução Normativa SPA nº 2 de 09/10/2008, as três amostras podem ser classificadas como solos de textura média, com teor mínimo de 15% de argila e menor do que 35%, nos quais a diferença entre o percentual de areia e o percentual de argila menor do que 50.

Com base em Teixeira *et al* (2021) as classes de água disponível (AD) previstas para as três amostras foram AD5 para a *POP Geral* (1,26 mm/cm), AD6 (*POP04* – 1,61 mm/cm) e AD5 (*POP05* – 1,31 mm/cm).

Tabela 16 – Análises química e física das amostras de solos das lapas com ocorrência de *Nicotiana glandarela* e áreas de lapas com ausência de ocorrência da espécie. Legenda: # = amostra composta de solo presente nas subpopulações *POP1*, *POP2* e *POP3*; * amostras compostas; FES: Área de Floresta Estacional Semidecidual (solo não associado com afloramentos/lapas) (1) SBCS (Triângulo textural); (2) ZARC (IN SPA/MAPA 02/2008); (3) Classificação da Água Disponível - ZARC (IN SPA/MAPA 01 e 02/2022); (!) valor calculado para predição da água disponível no solo em função da granulometria de acordo com Teixeira *et al.* (2021).

Parâmetros	Lapas com presença de <i>Nicotiana glandarela</i>			Setores e Lapas com ausência de <i>Nicotiana glandarela</i>										
	POPGERAL #	POP04	POP05	Casimira			Fundão	Rio Preto				Funil	Pau-Oco	
				Lapa 01	Lapa 02	FES	* Lapas: 2; 3; 5 e 7	Lapa 01	Lapa 02	Lapa 03	Lapa 04	* Lapas: 8; 9 e 10	* Lapas: 1; 2; 3	
Análise Química														
pH H₂O	8,33	8,24	8,39	7,23	7,73	6,04	8,03	8,25	7,84	7,99	7,82	7,92	5,15	
P	mg/dm ³	0,2	0,6	0,7	6,8	49,1	3,4	0,5	3,1	4,3	1,0	5,9	0,9	1,5
K		27	30	26	60	81	91	44	36	83	24	89	43	32
Ca²⁺		2,81	5,58	3,58	6,46	7,64	12,38	6,35	2,89	6,79	7,89	6,86	4,28	0,26
Mg²⁺		5,92	4,18	4,93	2,83	4,42	5,40	3,22	3,96	2,54	1,13	3,35	3,20	0,12
Al³⁺	cmolc/d m ³	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,48
H + Al		0,0	0,0	0,0	0,7	0,0	4,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,9
SB		8,80	9,84	8,58	9,44	12,27	18,01	9,68	6,94	9,54	9,08	10,44	7,59	0,46
t		8,80	9,84	8,58	9,44	12,27	18,01	9,68	6,94	9,54	9,08	10,44	7,59	0,94
T		8,80	9,84	8,58	10,14	12,27	22,91	9,68	6,94	9,54	9,08	10,44	7,59	5,36
V	%	100,0	100,0	100,0	93,1	100,0	78,6	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	8,6
m		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	51,1
MO	dag/kg	1,85	3,15	2,50	3,58	5,55	14,15	3,21	0,63	2,13	1,03	4,33	2,94	1,90
P-Rem	mg/L	12,3	13,3	15,9	20,6	18,7	27,8	8,6	2,5	6,2	1,7	3,8	3,9	29,6
Ca:Mg		0,47	1,33	0,73	2,28	1,73	2,29	1,97	0,73	2,67	6,98	2,05	1,34	2,17
S		2,3	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	28,8	0,0	2,7	18,4	0,0	12,2
B		0,04	0,13	0,00	0,24	0,07	0,26	0,12	0,18	0,32	0,16	0,43	0,15	0,23
Cu	mg/dm ³	0,33	0,41	0,38	0,98	1,05	0,56	0,83	0,76	1,00	0,57	1,00	0,77	1,48
Mn		13,3	2,4	40,7	245,4	435,7	593,3	562,0	142,6	759,6	397,5	997,2	608,7	79,3
Fe		5,5	2,9	3,9	34,4	40,0	6,6	15,4	6,1	18,3	27,6	94,4	43,7	117,9
Zn		0,00	0,00	0,64	5,16	9,65	5,47	3,41	7,18	5,01	1,45	12,09	3,09	0,80

Análise Física

Parâmetros	Lapas com presença de <i>Nicotiana glandarela</i>			Setores e Lapas com ausência de <i>Nicotiana glandarela</i>										
	POPGERAL #	POP04	POP05	Casimira			Fundão	Rio Preto				Funil	Pau-Oco	
				Lapa 01	Lapa 02	FES	* Lapas: 2; 3; 5 e 7	Lapa 01	Lapa 02	Lapa 03	Lapa 04	* Lapas: 8; 9 e 10	* Lapas: 1; 2; 3	
Areia grossa	0,192	0,09	0,178	0,209	0,172	0,139	0,181	0,087	0,18	0,088	0,111	0,113	0,202	
Areia fina	kg/kg	0,283	0,187	0,221	0,283	0,235	0,237	0,155	0,102	0,181	0,085	0,169	0,206	0,302
Silte		0,367	0,517	0,394	0,336	0,408	0,362	0,382	0,667	0,411	0,689	0,583	0,426	0,331
Argila		0,158	0,206	0,207	0,172	0,186	0,262	0,282	0,143	0,228	0,138	0,136	0,255	0,165
Classe Textural (1)		Franca	Franco-Siltosa	Franca	Franca	Franca	Franca	Franco-Argilosa	Franco-Siltosa	Franca	Franco-Siltosa	Franco-Siltosa	Franca	Franca
Classif. ZARC	Tipo (2)	2	2	2	2	2	2	2	1	2	1	1	2	2
	Textura	Média	Média	Média	Média	Média	Média	Média	Arenosa	Média	Arenosa	Arenosa	Média	Média
	AD (3)	AD5 (t)	AD6 (t)	AD5 (t)	AD5 (t)	AD5 (t)	AD5 (t)	AD5 (t)	AD4	AD5	AD4	AD4	AD5	AD5 (t)
	Quantidade de AD (mm/cm)	1,26 (t)	1,61 (t)	1,31 (t)	1,19 (t)	1,35 (t)	1,24 (t)	1,28 (t)	0,97	1,08	0,95	1,03	1,1	1,18 (t)

Tabela 17 – Análise de semelhanças entre os solos de ocorrência de *Nicotiana glandarela* e os solos amostrados para afloramentos/lapas dolomíticas Classificação de atributos químicos dos solos de acordo com dados publicados pelo Instituto da Potassa & Fosfato (1998).

Parâmetros	Lapas com presença de <i>Nicotiana glandarela</i>			Setores e Lapas com ausência de <i>Nicotiana glandarela</i>									
	POPGERAL #	POP04	POP05	Lapa 01	Casimira Lapa 02	FES	Fundão * Lapas: 2; 3; 5 e 7	Lapa 01	Lapa 02	Rio Preto Lapa 03	Lapa 04	Funil * Lapas: 8; 9 e 10	Pau-Oco * Lapas: 1; 2; 3
<i>Análise Química</i>													
pH H ₂ O	Fortemente alcalino	Fortemente alcalino	Fortemente alcalino	<i>Fracamente alcalino</i>	<i>Fracamente alcalino</i>	<i>Fracamente ácido</i>	Fortemente alcalino	Fortemente alcalino	Fortemente alcalino	Fortemente alcalino	Fortemente alcalino	Fortemente alcalino	Medianamente ácido
P	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	<i>Alto</i>	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	<i>Médio</i>	Baixo	Baixo
K	Baixo	Baixo	Baixo	<i>Médio</i>	<i>Alto</i>	<i>Alto</i>	Baixo	Baixo	<i>Alto</i>	Baixo	<i>Alto</i>	Baixo	Baixo
Ca ²⁺	Médio	Alto	Médio	Alto	Alto	Alto	Alto	Médio	Alto	Alto	Alto	Alto	Baixo
Mg ²⁺	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	<i>Baixo</i>
Al ³⁺	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	<i>Médio</i>
H + Al	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	<i>Médio</i>	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	<i>Médio</i>
SB	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	<i>Baixa</i>
t	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	<i>Média</i>
T	Média	Média	Média	<i>Alta</i>	<i>Alta</i>	<i>Alta</i>	Média	Média	Média	Média	<i>Alta</i>	Média	Média
V	Muito Alta	Muito Alta	Muito Alta	Muito Alta	Muito Alta	<i>Alta</i>	Muito Alta	Muito Alta	Muito Alta	Muito Alta	Muito Alta	Muito Alta	Muito Baixa
m	Muito Baixa	Muito Baixa	Muito Baixa	Muito Baixa	Muito Baixa	Muito Baixa	Muito Baixa	Muito Baixa	Muito Baixa	Muito Baixa	Muito Baixa	Muito Baixa	<i>Alta</i>
MO	Média	Alta	Média	Alta	Alta	Alta	Alta	<i>Baixa</i>	Média	<i>Baixa</i>	Alta	Média	Média
P-Rem	Baixo	Baixo	Baixo	<i>Médio</i>	Baixo	<i>Médio</i>	Baixo	<i>Baixo</i>	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	<i>Médio</i>
Ca:Mg	0,47	1,33	0,73	2,28	1,73	2,29	1,97	0,73	2,67	6,98	2,05	1,34	2,17
S	Médio	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	<i>Alto</i>	Baixo	Médio	<i>Alto</i>	Baixo	<i>Alto</i>
B	Baixo	Baixo	Baixo	<i>Médio</i>	Baixo	<i>Médio</i>	Baixo	Baixo	<i>Médio</i>	Baixo	<i>Médio</i>	Baixo	<i>Médio</i>
Cu	Médio	Médio	Médio	<i>Alto</i>	<i>Alto</i>	Médio	<i>Alto</i>	Médio	<i>Alto</i>	Médio	<i>Alto</i>	Médio	<i>Alto</i>
Mn	Alto	Médio	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto
Fe	Baixo	Baixo	Baixo	<i>Alto</i>	<i>Alto</i>	<i>Médio</i>	<i>Alto</i>	<i>Médio</i>	<i>Alto</i>	<i>Alto</i>	<i>Alto</i>	<i>Alto</i>	<i>Alto</i>
Zn	Baixo	Baixo	Médio	<i>Alto</i>	<i>Alto</i>	<i>Alto</i>	<i>Alto</i>	<i>Alto</i>	<i>Alto</i>	<i>Alto</i>	<i>Alto</i>	<i>Alto</i>	Médio
<i>Análise Física</i>													
Classe Textural (1)	Franca	Franco-Siltosa	Franca	Franca	Franca	Franca	<i>Franco-Argilosa</i>	Franco-Siltosa	Franca	Franco-Siltosa	Franco-Siltosa	Franca	Franca
Classif. ZARC	2	2	2	2	2	2	2	1	2	1	1	2	2
Tipo (2)	Média	Média	Média	Média	Média	Média	Média	<i>Arenosa</i>	Média	<i>Arenosa</i>	<i>Arenosa</i>	Média	Média
Textura	AD5	AD6	AD5	AD5	AD5	AD5	AD5	<i>AD4</i>	AD5	<i>AD4</i>	<i>AD4</i>	AD5	AD5
AD (3)													
Porcentagem de semelhança de atributos em relação ao solo das lapas de ocorrência de <i>Nicotiana glandarela</i>				64%	68%	60%	80%	68%	76%	72%	52%	92%	48%

4.2.3 Caracterização da composição elementar (elementoma) nos tecidos foliares de *Nicotiana glandarela*

Na Tabela 18 estão listados os resultados da análise química do tecido foliar de *N. glandarela*, para amostras de folhas maduras e sadias (FM) e folhas senescentes (FS), assim como os valores de referência, faixas médias críticas e faixas adequadas segundo a bibliografia consultada (Broadley et al, 2012; CAES, 2024; Hauer-Jákli and Tränkner, 2019; Prezotti & Guarçoni 2013).

Os teores de nitrogênio e fósforo foram maiores em FM (N = 2,703 dag/kg; P = 0,38 dag/kg) quando comparados com FS (N = 1,137 dag/kg; P = 0,27 dag/kg), ao passo que para o potássio o valor encontrado em FS foi 32 % maior (K = 1,221 dag/kg , FM; K = 1,618 dag/kg). Os teores de ferro e enxofre também foram maiores em FS (Fe = 107,345 dag/kg ; S = 0,182 dag/kg) quando comparados aos de FM (Fe = 91,07 ; S = 0,143).

Para o restante dos nutrientes, a amostra FM apresentou maiores teores em relação a FS como pode ser visto na Tabela 18, indicando reduções no valores de 44,4% (B), 35,5% (Ca), 33,3% (Mn), 31,3% (Mg), 31,1% (Cu), 27,6% (Zn) e 1,4% (C) .

Em FM os teores de N, K, Mg, S, Fe, B, se encontraram dentro de faixas de deficiência determinadas para várias espécies (Broadley *et al*, 2012; CAES, 2024, Hauer-Jákli and Tränkner 2019). Com base na mesma literatura de referência, P, Mn, Cu e Zn ficaram acima das faixas de deficiência e se encontram dentro de faixas consideradas adequadas para 62 culturas (Prezotti & Guarçoni 2013), porém sempre com valores ao redor dos teores mínimos, considerando o desvio padrão.

Visto isso, em geral, os teores de macro e micronutrientes foram caracterizados como baixos em relação aos valores de referência confrontados, não havendo ocorrências de teores em faixas de toxicidade (Broadley et al., 2012; CAES, 2024) e, muito menos, evidências de hiperacumulação (Jaffré *et al.*, 1976; Krämer, 2010; Rascio & Navari-Izzo, 2011; Reeves, 1992, 2021), considerando o tecido foliar.

O teor de carbono encontrado em FM (49,41 dag/kg) e FS (48,718 dag/kg) superam o valor médio encontrado por Ma et al. (2017) para 5181 herbáceas a nível global (44,73 % ± 3.45).

Para a amostra FS, Nitrogênio (1,137 dag/kg) e Boro (16,425 mg/kg) foram encontrados com valores abaixo da faixa de deficiência. Com valores dentro da faixa de deficiência estão P (0,27 dag/kg), S (0,182 dag/kg), Zn (15,085 mg/kg) e Cu (4,535 mg/kg).

Em função da diminuição do teor de nitrogênio e aumento de potássio nas folhas senescentes, verifica-se em FS elevações consideráveis nas razões C/N (134%) e K/N (215%).

A razão K/Ca foi encontrada com um valor 105% maior na amostra FS, em função de maior teor de K e menor de Ca em comparação com FM.

Tabela 18 – Análise dos teores de macro e micronutrientes no tecido foliar de *Nicotiana glandarela* e valores de referência encontrados na literatura. Legenda: * = Broadley et al (2012); ! = Hauer-Jákli and Tränkner (2019); † = CAES (2024); FM = 20 folhas maduras e sadias de 20 indivíduos de *Nicotiana glandarela*; FS= 20 Folhas amareladas (Senescentes) de 20 indivíduos de *Nicotiana glandarela*. Faixas médias de teores foliares considerados adequados para 62 culturas (Prezotti & Guarçoni 2013).

Nutrientes	<i>Nicotiana glandarela</i>			Faixas Críticas		Faixas Adequadas (Prezotti & Guarçoni 2013)			
	FM	FS	FS:FM	Deficiência	Toxidade	Médias	DP	EP	
N	2,703	1,137	42,1%	2 - 4,25 †	4,5 - 5 †	Mín	2,65	1,00	0,13
						Max	3,81	1,52	0,20
P	0,308	0,270	87,7%	0,12 - 0,3 †	-	Mín	0,21	0,10	0,01
						Max	0,43	0,25	0,03
K	1,221	1,618	132,5%	0,75 - 2,0 †	-	Mín	2,31	1,22	0,15
						Max	3,66	1,76	0,23
Ca	0,908	0,586	64,5%	< 0,06 †	-	Mín	1,33	0,93	0,12
						Max	2,38	1,45	0,19
Mg	0,358	0,246	68,7%	0,05 - 0,72 !	-	Mín	0,34	0,16	0,02
						Max	0,66	0,28	0,04
S	0,143	0,182	127,3%	0,1 - 0,3 †	-	Mín	0,26	0,16	0,02
						Max	0,44	0,28	0,04
Fe	91,070	107,345	117,9%	50 - 150 *	500 *	Mín	78,49	87,23	11,17
						Max	223,30	123,85	16,55
Zn	20,835	15,085	72,4%	15 - 20 *	100 - 300 *	Mín	23,02	7,94	1,02
						Max	86,69	63,73	8,59
Cu	6,585	4,535	68,9%	1 - 5 *	20 - 30 *	Mín	7,38	4,10	0,53
						Max	18,95	9,13	1,22
Mn	43,400	28,950	66,7%	10 - 20 *	200 - 5300 *	Mín	70,48	79,60	10,19
						Max	262,46	238,42	31,86
B	29,560	16,425	55,6%	20 - 70 *	100 - 2500 *	Mín	27,64	11,65	1,49
						Max	61,46	25,58	3,42
C	dag/kg	49,41	48,718	99%	-	-	-	-	-
C/N	-	18,28	42,85	234%	-	-	-	-	-
N/P	-	8,78	4,21	48%	-	-	-	-	-
K/Ca	-	1,34	2,76	205%	-	-	-	-	-
N/S	-	18,9	6,25	33%	-	-	-	-	-
P/K	-	0,25	0,17	66%	-	-	-	-	-
Ca/Mg	-	2,54	2,38	94%	-	-	-	-	-
K/N	-	0,452	1,423	315%	-	-	-	-	-
K/(Ca+Mg)	-	0,964	1,945	202%	-	-	-	-	-

4.2.4 Análise Comparativa entre o solo de *Nicotiana glandarela*, demais solos amostrados em afloramentos rochosos e solos no Contexto do Quadrilátero Ferrífero

De acordo com a Análise de Componentes Principais (Figura 34 - A), o solo onde se desenvolve *Nicotiana glandarela* apresenta maiores semelhanças com aqueles amostrados para os setores Funil, Fundão e Rio Preto, estando fortemente e positivamente relacionados com valores de ph, silte, índice de saturação por bases, assim como, com menor força, aos valores de magnésio, manganês, cálcio, zinco, capacidade de troca catiônica efetiva (t), soma de bases (SB) e argila. Por outro lado, estão fortemente negativamente relacionados com valores de ferro, alumínio, areia (fina e grossa), fósforo remanescente, boro e razão Ca/Mg.

Além disso, como esperado, a amostra de solo obtida no setor Pau-Oco, foi posicionada de forma isolada das demais amostras de SAC e da amostra de solos da FES. Tal solo apresentou relações opostas aos solos dos outros afloramentos levantados no presente estudo, estando positivamente associado a teores de ferro, alumínio, cobre, enxofre, boro, índice de saturação de alumínio, acidez, areia grossa e fina. Este resultado corrobora com as observações em campo, em que notamos diferenças texturais nos afloramentos deste setor, os quais apresentavam características mais próximas dos afloramentos típicos de itabirito do Quadrilátero Ferrífero, diferenciando-se visualmente dos afloramentos carbonáticos da formação Gandarela.

Por meio da análise multivariada, dendrograma de agrupamentos e mapa de calor obtidos (Figura 35), verificamos que, com exceção da amostra de solo coletada em Pau-Oco (PO), o restante das amostras, estritamente associadas à afloramentos rochosos carbonáticos, forma um grupo consistente e distanciado, em termos físico-químicos, dos solos utilizados como comparação, os quais estão diretamente associados com afloramentos rochosos distintos no Quadrilátero Ferrífero (Cangas, Quartzitos e Granitoides), inclusive com aqueles presentes no mesmo complexo da serra da Gandarela (CGanC e CGanR, Figura 35).

A amostra de solo composta obtida na Floresta Estacional Semidecidual nas proximidades da área de ocorrência de *Nicotiana gandarela* (FES, Figura 35) se manteve isolada, separada tanto dos agrupamentos formados pelos afloramentos carbonáticos, quanto dos agrupamentos formados pelos solos de Canga, Granito e Quartzito. No entanto, apesar de totalmente isolada, a amostra FES apresentou maior proximidade com as amostras de solos dos afloramentos rochosos carbonáticos, apresentando relações positivas com valores de K, Ca^{2+} , Mn, SB, estando mais relacionada com os solos dos afloramentos rochosos do setor Cassimira, como esperado, em função do critério de localização.

Os solos que mais se distanciam daqueles encontrados para *Nicotiana gandarela* e demais afloramentos carbonáticos estudados, foram os solos de Cangas da Serra da Gandarela e Serra do Rola Moça, os quais apresentam, principalmente, teores mais elevados de ferro, alumínio, matéria orgânica, argila e valores consideravelmente menores de pH, cálcio, magnésio, manganês e silte. O Mapa de calor deixa essas disparidades e agrupamentos bem evidente, no qual podemos visualizar com facilidade o contraste físico-químico entre os grupos (Figura 35, C)

Além disso, o balanço entre cálcio e magnésio é fortemente diferenciado ao compararmos os solos de afloramentos carbonáticos (SACs) com os demais, mostrando que mesmo com maiores teores de cálcio e magnésio em SACs, a razão Ca/Mg é consideravelmente menor para estes solos, em comparação com solos associados as Cangas, Quartzitos e Granitoides.

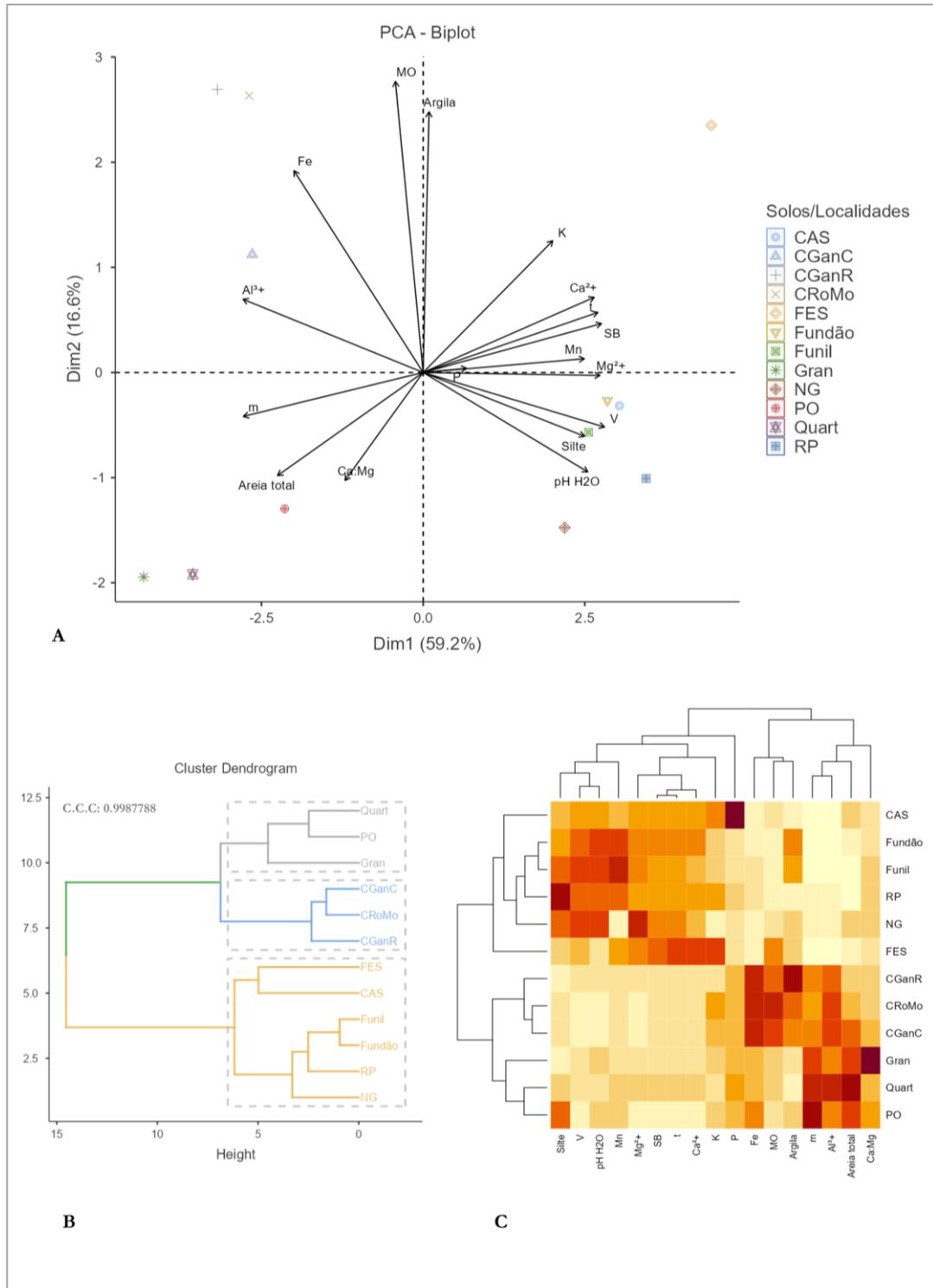


Figura 35 – Análise comparativa entre os solos de ocorrência de *Nicotiana glandarela*, demais solos associados à afloramentos carbonáticos investigados no presente estudo e solos associados a outros tipos de afloramentos rochosos no Quadrilátero Ferrífero. Legenda (em referência à Tabela 19): NG, solo de ocorrência de *Nicotiana glandarela*; CAS, Cassimira; PO, Pau-Oco; Fundão, Fundão; RP, Rio Preto; Funil, Funil; FES, FES (Floresta Estacional Semidecidual); CGanR, Cangas na Serra do Gandarela (Reis, 2014); CRoMo, Cangas na Serra do Rola Moça (Carmo, 2014), CGanC Cangas na Serra do Gandarela (Carmo, 2014), Gran, Granitóides na Serra da Moeda (Carmo, 2014), Quart, Quartzitos na Moeda, Rola Moça e Água Limpa (Carmo, 2014). **A:** Análise de Componentes Principais (PCA) com base em 17 atributos do solo, 15 químicos e 3 físicos. **B:** Análise de agrupamento (Ward; Distância Euclidiana; 10000 permutações). **C:** Mapa de calor relacionando agrupamentos e variáveis. Análises e Gráficos realizados por meio do software Jamovi, Versão 2.5 (The Jamovi Project, 2024) e módulo snowCluster, versão 7.3.9 (Seol, 2024).

Tabela 19 - Tabela comparativa de alguns dos atributos químicos encontrados nos setores amostrados no presente estudo e outros estudos realizados na região do Quadrilátero Ferrífero. Legenda: (1) Estudo realizado na aba externa ocidental da sinclinal do Gandarela (Reis, 2014); (2) Estudo realizado em várias áreas do Quadrilátero Ferrífero (Carvalho Filho, 2008); (3) Estudo realizado em afloramentos rochosos no Quadrilátero Ferrífero (Carmo, 2014).

Localidades	pH	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Ca:M	Al ³⁺	H + Al	SB	t	T	V	m	MO	P-Rem	S	B	Cu	Mn	Fe	Zn	
	H ₂ O	mg/dm ³	mg/dm ³	cmolc/dm ³	cmolc/dm ³	g	cmolc/dm ³	%	dag/kg	mg/L	mg/dm ³	mg/dm ³										
Microhábitat de <i>Nicotiana gandarela</i> (Médias)	8,32	0,5	27,67	3,99	5,01	0,80	0	0	9,07	9,07	9,07	100	0	2,5	13,8 ₃	1,17	0,0 ₆	0,37	18,8	4,1	0,2 ₁	
Setores amostrados no presente estudo (ausência de <i>N. gandarela</i>)	Casimira	7,48	27,9 ₅	70,5	7,05	3,63	1,94	0	0,35	10,8 ₆	10,8 ₆	11,21	96,55	0	4,57	19,6 ₅	0	0,1 ₆	1,02	340,5 ₅	37,2	7,4 ₁
	Pau-Oco	5,15	1,5	32	0,26	0,12	2,17	0,48	4,9	0,46	0,94	5,36	8,6	51,1	1,9	29,6	12,2	0,2 ₃	1,48	79,3	117,9	0,8
	Fundão	8,03	0,5	44	6,35	3,22	1,97	0	0	9,68	9,68	9,68	100	0	3,21	8,6	0	0,1 ₂	0,83	562	15,4	3,4 ₁
	Rio Preto	7,98	3,58	58	6,11	2,75	2,22	0	0	9	9	9	100	0	2,03	3,55	12,4 ₈	0,2 ₇	0,83	574,2 ₃	36,6	6,4 ₃
	Funil	7,92	0,9	43	4,28	3,2	1,34	0	0	7,59	7,59	7,59	100	0	2,94	3,9	0	0,1 ₅	0,77	608,7	43,7	3,0 ₉
	FES	6,04	3,4	91	12,38	5,4	2,29	0	4,9	18,0 ₁	18,0 ₁	22,91	78,6	0	14,15	27,8	0	0,2 ₆	0,56	593,3	6,6	5,4 ₇
Cristas do Gandarela (1)	Média	4,67	3,22 ₂	27,77 ₈	0,788	0,214	3,68	1,15 ₇	19,96 ₇	1,09 ₇	2,25 ₃	21,06 ₇	5,089	52,38 ₉	11,71 ₂	8,06 ₇	—	—	0,50 ₈	31,78 ₉	420,44 ₄	1,81
	Máximo	5,23	6,2	38	1,63	0,51	3,20	1,64	26,1	2,05	3,01	28,2	7,3	72,5	24,54	22,9	—	—	0,81	82,5	2377	3,93
	Mínimo	4,02	1,2	12	0,35	0,09	3,89	0,58	17,8	0,51	1,76	18,7	2,7	30,9	2,39	1,7	—	—	0,32	18,2	100	0,59
Vale do Gandarela (2)	Média	5,3	—	—	0,38	0,014	27,14	0,26	—	3,3	—	11,22	28,6	25,8	38,97 ₆	—	—	—	—	—	—	
	Máximo	6,2	—	—	0,822	0,028	29,36	0,7	—	6,4	—	15,3	59	67	67,51 ₂	—	—	—	—	—	—	
	Mínimo	4	—	—	0,025	0,001	25,00	0	—	0,2	—	9,4	2	0	22,96 ₈	—	—	—	—	—	—	
Vale do Conceição (2)	Média	4,42	—	—	0,087	0,005	17,40	2,5	—	0,43 ₃	—	14,3	3,667	74,83 ₃	57,01 ₄	—	—	—	—	—	—	
	Máximo	5,1	—	—	0,1	0,006	16,67	4,6	—	0,5	—	20,7	8	91	77,25 ₆	—	—	—	—	—	—	
	Mínimo	3,6	—	—	0,075	0,004	18,75	0,4	—	0,3	—	3,9	2	44	15,31 ₂	—	—	—	—	—	—	

Localidades	pH H ₂ O	P mg/dm ³	K mg/dm ³	Ca ²⁺ cmolc/dm ³	Mg ²⁺ cmolc/dm ³	Ca:M g	Al ³⁺ cmolc/dm ³	H + Al cmolc/dm ³	SB cmolc/dm ³	t cmolc/dm ³	T cmolc/dm ³	V %	m %	MO dag/kg	P- Rem mg/L	S mg/dm ³	B mg/dm ³	Cu mg/dm ³	Mn mg/dm ³	Fe mg/dm ³	Zn mg/dm ³
Serras Itabiríticas (2)	Média	4,87	—	—	0,158	0,007	22,57	0,85 7	—	0,82 9	—	12,15 7	11,85 7	35,57 1	58,88 7	—	—	—	—	—	—
	Máximo	5,8	—	—	0,224	0,009	24,89	3	—	1,5	—	32	20	83	161,8 2	—	—	—	—	—	—
	Mínimo	4,5	—	—	0,1	0,003	33,33	0	—	0,2	—	2,5	2	0	13,39 8	—	—	—	—	—	—
Depressão do Paraopeba (2)	Média	4,82	—	—	—	—	—	1,01 7	—	1,05	—	9,383	12	47,66 7	35,98 9	—	—	—	—	—	—
	Máximo	5,3	—	—	—	—	—	2,5	—	2,3	—	15,9	26	73	60,03	—	—	—	—	—	—
	Mínimo	4,2	—	—	—	—	—	0,1	—	0,3	—	4	3	12	21,22 8	—	—	—	—	—	—
Platô da Moeda (2)	Média	5,25	—	—	0,311	0,009	34,56	0,31 7	—	1,6	—	10,2	15,5	16,66 7	44,66	—	—	—	—	—	—
	Máximo	5,5	—	—	0,374	0,012	31,17	0,7	—	2,3	—	13,3	22	35	55,85 4	—	—	—	—	—	—
	Mínimo	5	—	—	0,249	0,007	35,57	0	—	0,9	—	8,3	10	0	33,93	—	—	—	—	—	—
Vale do Rio das Velhas (2)	Média	4,94	—	—	0,116	0,011	10,55	1,24 7	—	0,89 4	—	8,824	12,47 1	53,94 1	38,95 6	—	—	—	—	—	—
	Máximo	6,1	—	—	0,149	0,019	7,84	3,6	—	3,3	—	18,9	57	84	78,12 6	—	—	—	—	—	—
	Mínimo	4,2	—	—	0,075	0,004	18,75	0	—	0,2	—	3	4	0	13,74 6	—	—	—	—	—	—
Serra do Caraça (2)	5,1	—	—	—	—	—	—	—	—	2	—	10	20	52	25,75 2	—	—	—	—	—	—
Cangas do Rola Moça (3)	Média	4,45	3,65 0	49,40 0	1,800	0,150	12,00	1,20 0	—	1,95 0	3,10 0	—	8,400	38,55 0	14,25 0	—	—	—	—	27,80 0	411,60 0
	Máximo	4,60	4,40 0	53,60 0	2,200	0,200	11,00	1,50 0	—	2,40 0	3,30 0	—	10,50 0	48,40 0	14,70 0	—	—	—	—	38,10 0	432,60 0
	Mínimo	4,30	2,90 0	45,20 0	1,400	0,100	14,00	0,90 0	—	1,50 0	2,90 0	—	6,300	28,70 0	13,80 0	—	—	—	—	17,50 0	390,60 0
Cangas da Gandarela (3)	Média	4,47	2,86 7	42,16 7	1,033	0,200	5,17	0,86 7	—	1,36 7	2,30 0	—	7,967	39,00 0	9,720	—	—	—	—	40,90 0	302,93 3
	Máximo	4,70	3,30 0	42,30 0	1,400	0,300	4,67	1,00 0	—	1,80 0	2,80 0	—	9,100	48,20 0	12,40 0	—	—	—	—	54,70 0	397,60 0
	Mínimo	4,30	2,40 0	42,00 0	0,800	0,100	8,00	0,60 0	—	1,10 0	2,00 0	—	6,300	32,40 0	4,560	—	—	—	—	25,80 0	232,40 0

Localidades	pH H ₂ O	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Ca:M g	Al ³⁺	H + Al	SB	t	T	V	m	MO	P- Rem	S	B	Cu	Mn	Fe	Zn	
		mg/dm ³		cmolc/dm ³			cmolc/dm ³				%		dag/kg	mg/L	mg/dm ³							
Granitóides da Moeda (3)	Média	4,80	3,05 0	32,60 0	0,050	0,000	–	1,05 0	–	0,15 0	1,25 0	–	2,250	87,95 0	3,750	–	–	–	–	18,30 0	123,20 0	–
	Máximo	4,80	4,00 0	33,80 0	0,100	0,000	–	1,10 0	–	0,20 0	1,30 0	–	2,800	90,40 0	4,300	–	–	–	–	25,40 0	134,70 0	–
	Mínimo	4,80	2,10 0	31,40 0	0,000	0,000	–	1,00 0	–	0,10 0	1,20 0	–	1,700	85,50 0	3,200	–	–	–	–	11,20 0	111,70 0	–
Quartzitos: Moeda, Agua Limpa e Rola Moça (3)	Média	4,40	3,03 3	18,40 0	0,333 3	0,066 7	5,00	1,10 0	–	0,43 3	1,53 3	–	6,200	71,86 7	2,900	–	–	–	–	10,30 0	71,533	–
	Máximo	4,50	3,40 0	23,00 0	0,400 0	0,100 0	4,00	1,30 0	–	0,50 0	1,70 0	–	8,000	78,60 0	3,300	–	–	–	–	15,00 0	85,400	–
	Mínimo	4,30	2,80 0	15,00 0	0,200 0	0,000 0	–	0,80 0	–	0,40 0	1,30 0	–	5,200	60,60 0	2,600	–	–	–	–	7,900	63,700	–

Tabela 20 Tabela comparativa de alguns dos atributos físicos encontrados nos setores amostrados no presente estudo e estudos realizados na região do Quadrilátero Ferrífero. Legenda: (1) Estudo realizado na aba externa ocidental da sinclinal do Gandarela (Reis, 2014); (2) Estudo realizado em várias áreas do Quadrilátero Ferrífero (Carvalho Filho, 2008).

Localidades	Análise Granulométrica					
	Areia grossa	Areia fina	Areia total	Silte	Argila	
	kg/kg					
Setores amostrados no presente estudo	Nicotiana	0,153	0,230	0,384	0,426	0,190
	Casimira	0,191	0,259	0,450	0,372	0,179
	Pau-Oco	0,202	0,302	0,504	0,331	0,165
	Fundão	0,181	0,155	0,336	0,382	0,282
	Rio Preto	0,117	0,134	0,251	0,588	0,161
	Funil	0,113	0,206	0,319	0,426	0,255
	FES	0,139	0,237	0,376	0,362	0,262
Cristas do Gandarela (1)	Média	–	–	0,396	0,194	0,410
	Máximo	–	–	0,530	0,320	0,510
	Mínimo	–	–	0,310	0,100	0,280
Serras Itabiríticas (2)	Média	0,359	0,259	0,575	0,196	0,213
	Máximo	0,461	0,45	0,793	0,343	0,467
	Mínimo	0,246	0,092	0,246	0,126	0,061
Platô da Moeda (2)	Média	0,452	0,088	0,541	0,213	0,247
	Máximo	0,532	0,127	0,659	0,227	0,351
	Mínimo	0,372	0,05	0,422	0,198	0,143
Vale do Gandarela (2)	Média	0,227	0,169	0,397	0,335	0,268
	Máximo	0,282	0,237	0,462	0,435	0,368
	Mínimo	0,168	0,127	0,296	0,223	0,206
Vale do Rio das Velhas (2)	Média	0,148	0,124	0,272	0,208	0,510
	Máximo	0,214	0,245	0,459	0,240	0,629
	Mínimo	0,072	0,029	0,101	0,153	0,388
Vale do Conceição (2)	Média	0,213	0,0625	0,276	0,249	0,476
	Máximo	0,258	0,092	0,350	0,286	0,513
	Mínimo	0,168	0,033	0,201	0,212	0,438
Cangas do Rola Moça (3)	Média	–	–	0,45	0,246	0,304
	Máximo	–	–	0,496	0,268	0,328
	Mínimo	–	–	0,404	0,224	0,28
Cangas da Gandarela (3)	Média	–	–	0,515	0,239	0,246
	Máximo	–	–	0,64	0,28	0,3
	Mínimo	–	–	0,42	0,176	0,184
Granitóides da Moeda (3)	Média	–	–	0,723	0,133	0,144
	Máximo	–	–	0,726	0,136	0,144
	Mínimo	–	–	0,72	0,13	0,144
Quartzitos na Moeda, Rola Moça e Água Limpa (3)	Média	–	–	0,699	0,219	0,082
	Máximo	–	–	0,744	0,26	0,126
	Mínimo	–	–	0,614	0,192	0,052

4.3 DISCUSSÃO

Os indivíduos de *Nicotiana glandarela* conhecidos até o momento se desenvolvem sob um solo estritamente associado aos afloramentos rochosos (Dolomito/Itabirito Dolomítico) e que apresenta características fortemente distintas dos solos mais desenvolvidos, presentes na matriz florestal circundante. O solo de *N. glandarela* e demais solos encontrados no presente estudo são também extremamente distintos de uma grande variedade de solos encontrados no Quadrilátero Ferrífero - QF (Coelho *et al.*, 2017, Carvalho Filho *et al.* 2010), mesmo quando consideramos aqueles encontrados em vários afloramentos rochosos de Canga, Quartzito e Granitoides no QF (Carmo, 2014; Reis *et al.*, 2014).

Um dos atributos que mais chama a atenção no solo de *N. glandarela* é o alto valor de ph encontrado (ph > 8), assim como os valores comparativamente altos de cálcio e magnésio em relação a outros solos no QF, porém com a razão Ca:Mg consideravelmente mais baixa.

Mota *et al.* (2021) aponta que a razão Ca:Mg pode ser um fator importante para entender a associação de espécies estreitamente relacionadas com o substrato, tema já abordado por Loew & May (1901). Segundo Mota *et al.* (2021), em solos/substratos oriundos de rochas ultramáficas o Mg predomina sobre o Ca, ao passo que em afloramentos de gesso (gypsum) ocorre o oposto, restando para os afloramentos de calcário e dolomita os valores intermediários. A dolomita é uma rocha carbonática composta de carbonato de cálcio e magnésio, tipicamente $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$.

Além da razão Ca:Mg, elevado ph, baixos valores de Fe, P e K, há uma série de características que são comuns a todas as descrições da vegetação associadas aos afloramentos dolomíticos, a despeito das amplitudes geográficas e da heterogeneidade geomorfológica e climática, resultando em fenômeno global, denominado “*Dolomite Phenomenon*”, também conhecido por **dolomitofilia** ou edafismo da dolomita (Mota *et al.* 2021, 2017, 2008). Portanto, tais ambientes, principalmente onde se encontram microclimas, exigem adaptações altamente especializadas, resultando em ocorrências de espécies muito raras e/ou ausentes em quaisquer outros ambientes (Allison & Stevens, 2001; Frisby *et al.*, 2019), sendo, muitas das vezes, áreas que contribuem fortemente com a diversidade vegetal regional (Cacho *et al.*, 2014). De acordo com Mota *et al.* (2021) esse tipo de comunidade florística é, quase sempre, facilmente identificável devido às características fisionômicas e às adaptações apresentadas pelas plantas que as compõem. No entanto, neste ponto, este autor está se referindo principalmente às vegetações abertas sobre os afloramentos dolomíticos, as quais naturalmente se apresentam contrastantes em relação às vegetações circundantes, não havendo menções específicas sobre possíveis espécies se desenvolvendo em plena sombra nestes afloramentos dolomíticos.

Apesar das principais abordagens a respeito da flora presente em dolomitos serem relacionadas a vegetações abertas e ou clareiras, vários aspectos mencionados nestes artigos trazem *insights* para um

melhor entendimento sobre os ambientes onde encontramos *Nicotiana glandarela*, quando focamos a atenção para os atributos químicos do solo e do tecido foliar.

De acordo com Mota *et al.* (2021), os solos de dolomitos destacam-se pelo pH em torno de 8,0 (7,5 a 8,6) e pela razão Ca:Mg entre 1,61 a 2,56 (média $2,03 \pm 0,35$ DP). Considerando que os valores Ca:Mg encontrados para as lapas de afloramentos carbonáticos, incluindo aquelas onde se encontra *N. glandarela*, apresentaram uma faixa de 0,85 a 6,98 com uma média de $2,03 \pm 1,79$ (DP) e pH entre 7,23 a 8,33, reforçam-se as pistas para o entendimento sobre a associação especializada de *N. glandarela* em relação ao solo onde se encontra, assim como ressalta a potencial influência dos dolomitos e mármores dolomíticos presentes na formação Gandarela frente à comunidade vegetal que ali se desenvolve.

Os solos ultramáficos/serpentininas (Brady *et al.*, 2005) apresentam geralmente valores menores para Ca:Mg (0,86 a 0,92), porém com pHs menores, entre 6,5 a 6,81 (Mota *et al.*, 2021). Já em afloramentos calcários (*Limestone*) e de gesso (*Gypsum*) a razão Ca:Mg atinge valores bem maiores, notadamente pelos maiores valores de cálcio. Portanto, para a razão Ca:Mg os solos dos afloramentos carbonáticos amostrados no presente estudo se assemelham mais aos solos dolomíticos.

Com relação aos atributos químicos dos tecidos vegetais, o conhecimento do ionoma ou elementoma vegetal é considerado um aspecto fundamental para entender globalmente os ecossistemas da Terra, assim como para compreender as estratégias de adaptações de determinadas espécies em relação aos atributos físico-químicos presentes no solo onde se desenvolvem (Peñuelas *et al.* 2019; Kattge *et al.*, 2011). De acordo com Mota *et al.* (2021) os estudos de ionoma em plantas dolomitófilas, assim como plantas endêmicas de Serpentina e Gesso (*Gypsum*) estão mais focados em compreender as razões N:P e Ca:Mg, sendo considerados padrões, ou “assinaturas” que proporcionam a identificação de relações específicas e restritivas entre as espécies e os solos onde se desenvolvem.

A razão Ca:Mg encontrada em tecidos foliares de *N. glandarela* foi de 2,54, ao passo que a média encontrada para 90 espécies dolomitófilas foi de $2,95 \pm 2,95$ (DP), em uma cadeia de montanhas de dolomito na Espanha e uma média de $3,35 \pm 2,95$ (DP) em 28 plantas de dolomito na Hungria (Mota *et al.*, 2021). Por outro lado, a razão N:P em *N. glandarela* (8,78) se encontra bem abaixo da média de $25,43 \pm 10,83$ (DP) apontada para as mesmas 90 espécies dolomitófilas.

Em relação aos macronutrientes *N. glandarela* apresenta valores mais altos de N (2,703 %), P (0,308 %) e K (1,221%) mais altos que as médias das plantas dolomitófilas apresentadas em Mota *et al.* (2021), ou seja, N ($1,69 \pm 0,45$ DP), P ($0,07 \pm 0,02$ DP) e K ($0,82 \pm 0,19$ DP). Por outro lado os valores de Ca (0,908), Mg (0,358) e S (0,143) foram menores do que as médias apresentadas por Mota *et al.* (2021) para as dolomitófilas, ou seja, Ca ($1,98 \pm 0,72$), Mg ($0,71 \pm 0,37$) e S ($0,19 \pm 0,20$).

Mota et al. (2021) aponta que em plantas dolomitófilas o fósforo apresenta baixos teores (média de 0,07 %), o que pode se corresponder a uma adaptação destas plantas para tolerar baixos níveis deste nutriente, visto que em solos associados a dolomitos este elemento também apresenta baixos teores, sendo, portanto, um fator limitante. As análises do presente estudo mostraram que apesar de que o teor de P nos solos de *N. gandarela* possam ser considerados baixos (Instituto da Potassa & Fosfato, 1998), o valor de P detectado no tecido foliar se encontra acima do limite máximo da faixa de deficiência (CAES, 2024), o que pode indicar uma adaptação para a otimização da absorção deste nutriente.

Dentro de faixas de referência de deficiência em nutrientes para tecidos foliares, detectamos valores para Nitrogênio, Potássio, Magnésio, Enxofre e Boro. Com exceção do Magnésio, os outros nutrientes se encontram em baixos teores no solo de *N. gandarela*, o que sugere que a espécie também pode apresentar adaptações específicas para manutenção dos processos fisiológicos com baixos níveis destes nutrientes. No caso do Magnésio, o baixo teor encontrado no tecido foliar é curioso, visto que o teor de Mg no solo é alto, assim como o pH (> 8,0), o qual também facilita a disponibilidade para as raízes. Além disso, considerando o papel crucial deste elemento nos processos fotossintéticos, ainda mais em uma planta que se desenvolve em sombra (Cakmak & Kirkby, 2008; Guo, 2017; Ishfaq et al. 2022) esta evidência provoca reflexões sobre as adaptações fisiológicas de *N. gandarela*. No entanto, de acordo com Guo (2017), teores elevados de cálcio, como encontrado no solo de *N. gandarela*, resultam em menor disponibilidade de magnésio nas raízes, fazendo com que Ca seja absorvido em maiores volumes, o que poderia explicar os baixos valores de Mg no tecido foliar de *N. gandarela*.

Considerando também que Mg tem um papel crucial para a tolerância ao estresse térmico e defesa foto-oxidativa (Hauer-Jákli & Tränkner, 2019, Mengutay *et al.*, 2013) e, portanto, um requisito essencial para minimizar danos relacionadas à alta radiação e calor, os baixos teores deste elemento em *N. gandarela* podem ser oriundos de processo de adaptação/seleção, podendo ajudar a entender melhor o fato da espécie ser encontrada exclusivamente em ambientes sombreados e os principais fatores que impedem seu desenvolvimento em ambientes com maiores taxas de irradiação luminosa.

Caso a razão Ca:Mg seja de fato uma “assinatura” realmente robusta para caracterizar uma espécie como dolomitófila, os resultados aqui obtidos representam um ponto de partida interessante para testar a hipótese da dolomitofilia (*Dolomite Phenomenon*) nos dolomitos e mármore dolomíticos da formação Gandarela, assim como em outras regiões do Brasil, visto a escassez de estudos com este tema e o potencial de novas descobertas em vários campos da botânica e ecologia.

A diversidade, raridade e endemismo de solos é um tema que vem sendo cada vez mais explorado nas últimas décadas e recentes descobertas apontam a grande importância e correlação deste fator ambiental com índices de biodiversidade e endemismos (Bockheim, 2005; Carmo, 2014; Carmo & Jacobi, 2016; Benites 2007)

As peculiaridades presentes em micro-habitats, como fissuras, cavidades, fendas em afloramentos rochosos são, em geral, fatores chave para o estabelecimento de uma alta diversidade de nichos para muitas espécies de plantas especializadas (Cantero et al., 2020; Jacobi *et al.* 2007; Nowak et al., 2014). Aspectos como a estrutura da rocha matriz, sua composição química, assim como dos sedimentos, regolitos e solos associados, são considerados um dos principais fatores que sustentam a biodiversidade em vegetações que se desenvolvem em afloramentos rochosos (Porembski et al., 1996, 1998; Burke, 2002; Parmentier, 2003; Harrison et al., 2006).

Apesar dos avanços e acúmulo considerável de conhecimentos relacionados à flora e vegetação associadas aos afloramentos rochosos no Brasil, a grande maioria destes estudos são focados nos complexos rochosos mais evidentes, ou seja, quartzitos, arenitos, *inselbergs* (granito), cangas e afloramentos calcários (*limestones*). Estes últimos, em grande maioria, relacionados com ambientes xéricos e fortemente sazonais. Obviamente, o grande contraste que tais afloramentos rochosos massivos provocam na paisagem, chamam a atenção de vários pesquisadores e as descobertas científicas os tornam cada vez mais interessantes como objeto de estudo. Em contraste, afloramentos rochosos pouco evidentes na paisagem são, portanto, quase que negligenciados.

Considerando o caráter microendêmico de *Nicotiana gandarela*, a qual se desenvolve em um solo altamente específico, provavelmente também endêmico (Bockheim, 2005), além do conjunto de condições de luminosidade, temperatura e umidade proporcionadas pelos afloramentos rochosos onde habita (ver itens 2.2.3 e 3.2.5), ressalta-se aqui o enorme potencial que os afloramentos carbonáticos, distribuídos na matriz florestal da Formação Gandarela, apresentam para futuras novas descobertas científicas nos mais variados campos da biologia.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio do presente estudo podemos evidenciar que a raridade da espécie *Nicotiana gandarela* está atrelada à sua adaptação evolutiva e restritiva aos ambientes formados pelos afloramentos rochosos carbonáticos nos quais se desenvolve. Dentre outros fatores que possam restringir a dispersão e colonização da espécie em outros ambientes, verificou-se que as características físico-químicas do solo, com destaque para os altos valores de ph, magnésio e silte, tem um papel crucial no estabelecimento e manutenção dos requisitos fisiológicos da espécie. Neste sentido, os dados sugerem que existem baixas probabilidades de ocorrência de *N. gandarela* em afloramentos rochosos não carbonáticos (Cangas, Quartzitos, Granitos), mesmo que estes apresentem condições de sombreamento, proteção contra precipitação, temperaturas e umidade favoráveis, já que nos solos destes Geossistemas, em geral, se

apresentam com baixos valores de ph, altos teores de alumínio, cobre, enxofre, além de ferro, no caso específico dos Geossistemas Ferruginosos.

As análises comparativas entre as subpopulações, com base nos registros fenológicos e fisiológicos, evidenciaram com clareza a importância dos afloramentos rochosos carbonáticos, em formato de “lapas” para propiciar os requisitos de sombreamento mínimos e proteção contra precipitação, pelos quais a espécie se encontra adaptada, para a manutenção de seu estado fisiológico ótimo, assim como a manutenção das características físico-químicas dos solos onde se desenvolvem.

No entanto, ressalta-se também a importância crucial da matriz florestal que envolve estes afloramentos, a qual, em função das cortinas arbóreas, proporciona sombreamento e proteção contra as correntes de ar excessivas e evapotranspiração, fatores essenciais para a manutenção da umidade nestes microhabitats. Com base nos dados, é possível que algumas populações de *N. gandarela* tenham sido extintas localmente em função de supressão da vegetação, visto que, segundo moradores locais essa prática foi muito comum no passado.



Figura 36 – Simpatria entre *Nicotiana gandarela* (ao fundo) e *Phyllanthus gandarelensis*, no primeiro plano

Considerando o caráter microendêmico e os requisitos ambientais restritivos de *N. gandarela*, os resultados das análises de solo, juntamente com o elementoma, apontam para uma possível existência de uma comunidade florística altamente especializada e singular no complexo de afloramentos

dolomíticos e de mármore dolomíticos, entremeados nas matrizes florestais, da formação Gandarela distribuída no Quadrilátero Ferrífero

Essa hipótese é ainda reforçada pelo fato de que recentemente Mendes *et al.* (2024) descreveram uma nova espécie, *Phyllanthus gandarelensis* J.C.R.Mendes, R.Secco & P.L.Viana, a qual se desenvolve, única e exclusivamente em simpatria com *Nicotiana gandarela*.

Por fim, além da possibilidade de estarmos negligenciando há muito tempo uma comunidade de “dolomitófitas” prestes a ser revelada, acreditamos que este trabalho representa apenas um pontapé inicial para muitas descobertas fascinantes, em diversas áreas da biologia, no contexto dos Geossistemas Carbonáticos do Quadrilátero Ferrífero e espera-se que os resultados e abordagens aqui reveladas contribuam para um olhar mais atento para a enorme importância da conservação da Geodiversidade no Quadrilátero Ferrífero.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alexander, E.B., Coleman, R.G., Keeler-Wolf, T., Harrison, S.P., (2007). **Serpentine Geocology of Western North America: Geology, Soils and Vegetation**. Oxford Univ. Press, New York.
- Allison, J.R.; Stevens, T.E. (2001). **Vascular flora of Ketona dolomite outcrops in Bibb County, Alabama**. *Castanea* (2001), 66, 154–205.
- Anderson, J.; Chow, W.; Goodchild, DJ. (1988). **Thylakoid Membrane Organisation in Sun/Shade Acclimation**. *Functional Plant Biology*. 15. 11-26. 10.1071/PP9880011.
- Augsten, M., Meyer, P.B., Freitas, L.B., Batista, J.A.N., Stehmann, J.R. (2022). ***Nicotiana gandarela* (Solanaceae), a new species of 'tobacco' highly endangered from the Quadrilátero Ferrífero in Brazil**. *PhytoKeys*. 2022 Feb 25;190:113-129. doi: 10.3897/phytokeys.190.76111. PMID: 35586789; PMCID: PMC8897371.
- Boardman, N.K. (1977). **Comparative photosynthesis of sun and shade plants**. – *Annu. Rev. Plant Physio.* 28: 355-377, 1977.
- Bockheim, J.G. (2005). **Soil endemism and its relation to soil formation theory**. *Geoderma*, Volume 129, Issues 3–4, Pages 109-124, ISSN 0016-7061, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.12.044>.
- Borchert, R.; Renner, S.S.; Calle, Z.; Navarrete, D.; Tye, A.; Gautier, L.; Spichiger, R.; von Hildebrand, P. (2005). **Photoperiodic induction of synchronous flowering near the Equator**. *Nature*. 2005 Feb 10;433(7026):627-9. doi: 10.1038/nature03259. PMID: 15703746.
- Brady, K. U.; Kruckeberg, A. R.; & Bradshaw, H. D. (2005). **Evolutionary Ecology of Plant Adaptation to Serpentine Soils**. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 36, 243–266. <http://www.jstor.org/stable/30033804>
- Brasil (2014). **Decreto de 13 de Outubro de 2014**. Cria o Parque Nacional da Serra do Gandarela, localizado nos Municípios de Nova Lima, Raposos, Caeté, Santa Bárbara, Mariana, Ouro Preto, Itabirito e Rio Acima, Estado de Minas Gerais. Brasília, 13 de outubro de 2014.
- Brook, B.; Traill, L.; Bradshaw, C. (2006). **Minimum viable population sizes and global extinction risk are unrelated**. *Ecology Letters*. 9. 375-82. 10.1111/j.1461-0248.2006.00883.x.
- Brooks, R.R., (1987). **Serpentine and its Vegetation: A Multidisciplinary Approach**. Dioscorides Press, Portland, OR.

- Burke, A.. (2002). **Island–matrix relationships in Nama Karoo inselberg landscapes Part II: Are some inselbergs better sources than others?** *Plant Ecology*. 158. 41-48. 10.1023/A:1014791501882.
- Cacho, N.I.; Strauss, S.Y. (2014). **Occupation of bare habitats, an evolutionary precursor to soil specialization in plants.** *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 2014, 111, 15132–15137.
- CAES (2024). **College of Agricultural & Environmental Sciences) at the University of Georgia.** <https://www.caes.uga.edu/>
- Cakmak, I.; and Kirkby, E. A. (2008). **Role of magnesium in carbon partitioning and alleviating photooxidative damage.** *Physiol. Plant.* 133, 692–704. doi: 10.1111/j.1399-3054.2007.01042.x
- Cantero, J.J.; Sfragulla, J.A.; Núñez, C.; Bonalumi, A.; Mulko, J.; Amuchastegui A.; Chiarini, F.; Barboza, G.E.; Ariza Espinar, L. (2011). **Flora de los afloramientos de mármoles y serpentinitas de las Sierras de Cordoba (Argentina).** *Kurtziana* 36, 11–45. <http://www.scielo.org.ar/pdf/kurtz/v36n2/v36n2a03.pdf>.
- Cantero, J.J.; Núñez, C.O.; Zeballos, S. R.; Sfragulla, J., Amuchástegui, A.; Brandolin, P.; Bonalumi, A.; Cabido, M.R. (2021). **Vegetation and flora of marble outcrops and their nearby matrices in mountains of central Argentina.** *Rock chemistry also matters, Flora*, Volume 274, 2021, 151757, ISSN 0367-2530, <https://doi.org/10.1016/j.flora.2020.151757>.
- Carmo, F. F. do; Jacobi, C. M. (2013). **A vegetação de canga no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais: caracterização e contexto fitogeográfico.** *Rodriguésia*, 64(3), 527–541. <https://doi.org/10.1590/S2175-78602013000300005>
- Carmo, F.; Kamino, L.; (2023). **Controversies and hidden risks in biodiversity offsets in critically threatened Canga (ironstone) ecosystems in Brazil.** *Oryx*, 57(1), 63-71. doi:10.1017/S0030605322000333
- Carmo, F.F. do (2010). **Importância Ambiental e Estado de Conservação dos Ecossistemas de Cangas no Quadrilátero Ferrífero e Proposta de Áreas-Alvo para a Investigação e Proteção da Biodiversidade em Minas Gerais.** Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre (ECMVS) da Universidade Federal de Minas Gerais para a obtenção de título de Mestre. Belo Horizonte – MG, 2010.
- Carmo, F.F. do (2014). **Padrões de diversidade, composição florística e estrutura de comunidades de plantas em afloramentos rochosos, Quadrilátero Ferrífero, Brasil.** Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais. <http://hdl.handle.net/1843/BUOS-9PAKPW>
- Carmo, F.F. & Jacobi, C. M. (2016). **Diversity and plant trait-soil relationships among rock outcrops in the Brazilian Atlantic rainforest.** *Plant and Soil*. 403. 10.1007/s11104-015-2735-7.

Carvalho Filho, A. de (2008). **Solos e ambientes do quadrilátero ferrífero (MG) e aptidão silvicultural dos tabuleiros costeiros**. 245 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

Carvalho Filho, A. de; Curi, N.; Shinzato, E. (2010). **Relações solo-paisagem no Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais**. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, v.45, n.8, p.903-916, ago. 2010.

Carvalho, G.O., Vergara-Meriño, B., Díaz, A., Villagra, C.A., Guerrero, P.C., (2019). **Rocky outcrops conserve genetic diversity and promote regeneration of a threatened relict tree in a critically endangered ecosystem**. *Biodivers. Conserv.* 28, 2805–2824. <https://doi.org/10.1007/s10531-019-01797-6>.

Coelho, M. R.; Vasques, G. De M.; Tassarini, D.; Souza, Z. R. De; Oliveira, A. P. De; Moreira, F. M. de S. (2017). **Solos do quadrilátero ferrífero sob diferentes coberturas vegetais e materiais de origem**. *Boletim de pesquisa e desenvolvimento*, 264, Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2017.

Corlett, R., Tomlinson, K.W., (2020). **Climate change and edaphic specialists: irresistible force meets immovable object?** *Trends Ecol. Evol.* 35, 367–376. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2019.12.007>.

Cuzzuol, G.R.F.; Milanez C.R.D. (2012). **Morphological and physiological adjustments in juvenile tropical trees under contrasting sunlight irradiance**. – In: Najafpour M.M. (ed.): *Advances in Photosynthesis. Fundamental Aspects*. Pp. 501-518. In Tech Croatia, Rijeka 2012.

Deil, U.; Galán D. M.A.; Vicente-Orellana, J.A. (2008). **Rock and scree plant communities in the Serra de Monchique (SW Portugal)**. *Feddes Repert* 119, 556–585. <https://doi.org/10.1002/fedr.200811180>.

Didukh, Y., Vasheniak, Y.A., (2018). **Vegetation of limestone outcrops in Western and Central Podillia (Ukraine)**. *Tuexenia* 38, 419–444. 10.14471/2018.38.023.

Dorr, J. V. N. (1958). **The Gandarela Formation**. *Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia*, 1958.

Fitzsimons, J.A.; Michael, D.R.; (2017). **Rocky outcrops: a hard road in the conservation of critical habitats**. *Biol. Conserv.* 211, 36–44. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.11.019>.

Frankie, G.W.; Baker, H.G.; Opler, P.A. (1974). **Tropical plant phenology: applications for studies in community ecology**. In: Lieth, H. (Ed.), *Phenology and Seasonality Modeling*. Springer, New York, pp. 287–296.

Frisby, A.W.; Siebert, S.J.; Struwig, M.; Cilliers, D.P. (2019). **Plant endemism in Griqualand West, South Africa**. *S. Afr. J. Bot.* 2019, 124, 127–137.

Gandullo, Ricardo, & Faggi, A. Maria. (2006). **La vegetación rupícola del Parque Provincial Copahue: Neuquén, Argentina**. Kurtziana, 32(1-2), 13-24. Recuperado en 25 de febrero de 2025, de https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1852-59622006000100002&lng=es&tlng=es.

Gilpin, M.E.; Soule, M.E. (1986). **Minimum viable populations: the processes of species extinction**. In: Soule ME (ed) **Conservation biology: the science of scarcity and diversity**. Sinauer, Sunderland, pp 13–34

Giulietti, A.M.; Pirani, J.R.; Harley, R.M. (1997). **Espinhaço Range Region Eastern Brazil**. In: DAVIS, S. D., (Ed.) **Centres of plant diversity: a guide and strategy for their conservatoin**. The Americas. WWF/IUCN Publications Unit., 1997. v.3. p.397-404.

Grace, J.; Savord, H.; Harrison, S.; (2007). **Large-scale causes of variation in the serpentine vegetation of California**. Plant Soil 293, 121–132. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9196-6>.

Guo, W. (2017). **Magnesium homeostasis mechanisms and magnesium use efficiency in plants**. In Plant Macronutrient Use Efficiency: Molecular and Genomic Perspectives in Crop Plants; Hossain, M.A., Kamiya, T., Burritt, D., Tran, L.S.P., Fujiwara, T., Eds.; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2017; pp. 197–213.

Harrison, S.; Safford, H. D.; Grace, J. B.; Viers, J. H.; Davies, K. F. (2006). **Regional and Local Species Richness in an Insular Environment: Serpentine Plants in California**. Ecological Monographs, 76(1), 41–56. doi:10.1890/05-0910

Hauer-Jákli, M.; Tränkner, M. (2019). **Critical Leaf Magnesium Thresholds and the Impact of Magnesium on Plant Growth and Photo-Oxidative Defense: A Systematic Review and Meta-Analysis From 70 Years of Research**. Front. Plant Sci. 10:766. doi: 10.3389/fpls.2019.00766

INPE (2017). **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), 2017. Disponível em: <http://labren.ccst.inpe.br/>.

Instituto da Potassa & Fosfato (1998). **Manual internacional de fertilidade do solo**. 2 ed. Piracicaba: POTAFOS, 1998.

Ishfaq, M.; Wang, Y.; Yan, M.; Wang, Z.; Wu, L.; Li, C.; Li, X. (2022). **Physiological Essence of Magnesium in Plants and Its Widespread Deficiency in the Farming System of China**. Front Plant Sci. 2022 Apr 25;13:802274. doi: 10.3389/fpls.2022.802274. PMID: 35548291; PMCID: PMC9085447.

Jacobi, C.M.; Carmo, F. F.; Vincent, R.; Stehmann, J.R. (2007). **Plant communities on ironstone outcrops: A diverse and endangered Brazilian ecosystem. Biodiversity and Conservation.** 16. 2185-2200. 10.1007/s10531-007-9156-8.

Jacobi, C.M. & Carmo, F.F. (2008). **Diversidade dos campos rupestres ferruginosos no Quadrilátero Ferrífero, MG.** Megadiversidade 4: 24-32.

Kassambara, A.; Mundt, F. (2020). **Factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses.** [R package]. URL <https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>.

Kattge, J.; Diaz, S.; Lavorel, S.; Prentice, I.C.; Leadley, P.; Bönisch, G.; Garnier, E.; Westoby, M.; Reich, P.B.; Wright, I.J.; et al. (2011). **TRY—a global database of plant traits.** Glob. Chang. Biol. 2011, 17, 2905–2935.

Kontapanou, A.; Panitsa, M. (2020). **Habitat islands on the Aegean Islands (Greece): elevational gradient of chasmophytic diversity, endemism, phytogeographical patterns and need for monitoring and conservation.** Diversity (Basel) 12, 33. <https://doi.org/10.3390/d12010033>.

Kozłowski, T.T.; Pallardy, S.G.. (1997). **Photosynthesis.** In: Physiology of Woody Plants (Second Edition), Academic Press, 1997, Pages 87-133, ISBN 9780124241626, <https://doi.org/10.1016/B978-012424162-6/50022-3>.

Kumar, S.; Singh, K.P.; Vinay Daboriya, V.;Yadav, L. (2022). **Phenology and Reproductive Success of Nicotiana pumbaginifolia Vivane: A wild Tobacco.** International Journal of Novel Research and Development – IJNRD, Volume 7, Issue 5 May 2022, ISSN: 2456-4184, IJNRD.ORG.

Kypriotakis, Z.; Tzanoudakis, D.; (2001). **Contribution to the study of the Greek insular flora: the chasmophytic flora of Crete.** Bocconea 13, 495–503. https://doi.org/10.1007/978-94-011-5274-7_41.

Lamounier, W.; Carvalho, V.; Salgado, A. & Marent, B. (2010). **A influência da litologia na distribuição da cobertura vegetal e no uso do solo na Serra do Gandarela, Quadrilátero Ferrífero - MG.** Revista Geografias. 6. 10.35699/2237-549X..13289.

Lamounier, W. (2011). **Serra do Gandarela: possibilidade de ampliação das unidades de conservação no Quadrilátero Ferrífero - MG.** Geography Department, University of Sao Paulo. 171-192. 10.7154/RDG.2011.0022.0009.

Lobo, F. de A., de Barros, M.P.; Dalmagro, H.J., et al (2013). **Fitting net photosynthetic light-response curves with Microsoft Excel - a critical look at the models.** Photosynthetica 51:445–456. <https://doi.org/10.1007/s11099-013-0045-y>

- Loew, O.; May, D.W. (1901). **The Relation of Lime and Magnesia to Plant Growth: I. Liming of Soils from a Physiological Standpoint (No. 1)**; US Government Printing Office: Washington, DC, USA, (1901).
- Lyons E.E.; Mully T.W. (1992). **Density effects of flowering phenology and mating potential in *Nicotiana glauca***. *Oecologia*. 1992 Aug;91(1):93-100. doi: 10.1007/BF00317246. PMID: 28313379.
- Martinelli, G. et al. (2013). **Capítulo 5: Avaliações de risco de extinção de espécies da flora brasileira**. In: Livro Vermelho da Flora do Brasil, Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2013.
- Martínez Carretero, E. (2000). **La vegetación de los Andes centrales de la Argentina. El Valle de Uspallata**. *Bol. Soc. Arg. Bot.* 34, 127–148.
- Mathur, Sonal & Jain, Lakshmi & Jajoo, Anjana. (2018). **Photosynthetic efficiency in sun and shade plants**. *Photosynthetica*. 56. 10.1007/s11099-018-0767-y.
- Medina-Cazorla, J.M.; Carrasco, C.G.; Merlo, M.E.; Martínez-Hernández, F.; Garrido-Becerra, J.A.; Salmerón, E.; Mendoza, A.J.; Pérez-García, F.J.; Mota, J.F. (2010). **The dolomite shrublands of the *Convolvulaceae* order and their preservation by means of the Habitats Directive**. *Acta Bot. Gall.* 157, 611–625. <https://doi.org/10.1080/12538078.2010.10516235>.
- Mendes, J.; Secco, R.; Viana, P. (2024). **An account of a new and endangered tiny species of *Phyllanthus* (Phyllanthaceae) from Serra da Gandarela, Minas Gerais, Brazil**. *Brittonia*. 76. 10.1007/s12228-024-09779-x.
- Mengutay, M.; Ceylan, Y.; Kutman, U.; Cakmak, I. (2013). **Adequate magnesium nutrition mitigates adverse effects of heat stress on maize and wheat**. *Plant Soil* 2013, 368:57–72.
- Moeller, D.A., (2004). **Facilitative interactions among plants via shared pollinators**. *Ecology* 85, 3289–3301.
- Morellato LPC, Alberti LF, Hudson IL (2010). **Applications of circular statistics in plant phenology: a case studies approach**. In: Hudson IL, Keatley MR (eds) *Phenological research: methods for environmental and climate change analysis*. Springer, Dordrecht, pp 339-359
- Morellato, L.P.C. (2003). **Phenology: An Integrative Environmental Science**. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, pp. 75–92.
- Mota, J.; Medina-Cazorla, J.M.; Navarro, F.B.; Pérez-García, J.; Pérez-Latorre, A.; Sánchez-Gómez, P.; Torres, J.; Benavente, A.; Blanca, G.; Gil, C.; Lorite, J.; Merlo, M. E. (2008). **Dolomite flora of the Baetic Ranges glades (South Spain)**. *Flora* 203, 359–375. 10.1016/j.flora.2007.06.006.

- Mota, J.F.; Garrido-Becerra, J.A.; Merlo, M.E.; Medina-Cazorla, J.M.; Sánchez-Gómez, P. (2017). **The Edaphism: Gypsum, Dolomite and Serpentine Flora and Vegetation in the Vegetation of the Iberian Peninsula**; Plant and Vegetation series; Loidi, J., Ed.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2017; Volume 3, pp. 277–354.
- Müller, B.; Glösmann, M.; Peichl, L.; Knop, G.C.; Hagemann, C. & Ammermüller, J. (2009). **Bat eyes have ultraviolet-sensitive cone photoreceptors**. *PloS ONE*, 4, e6390.
- Nie, Y., Ding, Y., Zhang, H., Chen, H., (2019). **Comparison of woody species composition between rocky outcrops and nearby matrix vegetation on degraded karst hillslopes of Southwest China**. *J. For. Res.* 30, 911–920. <https://doi.org/10.1007/s11676-018-0682-x>.
- Niyogi, K. K., & Truong, T. B. (2013). **Evolution of flexible non-photochemical quenching mechanisms that regulate light harvesting in oxygenic photosynthesis**. *Current Opinion in Plant Biology*, 16(3), 307–314. doi:10.1016/j.pbi.2013.03.011
- Nowak, A.; Nowak, S.; Nobis, M.; Nobis, A. (2014). **Vegetation of rock clefts and ledges in the Pamir Alai Mts, Tajikistan (Middle Asia)**. *Central European Journal of Biology*. 9. 444-460. 10.2478/s11535-013-0274-x.
- Osmond, Barry & Forster, Britta. (2006). **Photoinhibition: Then and Now**. 10.1007/1-4020-3579-9_2.
- Parmentier, I., (2003). **Study of the vegetation composition in three inselbergs from Continental Equatorial Guinea: effects of site, soil factor and positive relative to forest fringe**. *Belgian J. Bot.* 136, 63–72. <https://doi.org/10.2307/20794516>.
- Peñuelas, J.; Fernández-Martínez, M.; Ciais, P.; Jou, D.; Piao, S., Obersteiner, M.; Vicca, S.; Janssens, I.A., Sardans, J. (2019). **The bioelements, the elementome, and the biogeochemical niche**. *Ecology*. 2019 May;100(5):e02652. doi: 10.1002/ecy.2652. Epub 2019 Mar 22. PMID: 30901088.
- Pérez-García, F.J.; Martínez-Hernández, F., Mendoza-Fernández, A.J., Merlo, M.E., Sola, F., Salmeron-Sánchez, E., Garrido-Becerra, J.A., Mota, J.F., (2017). **Towards a global checklist of the world gypsophytes: a qualitative approach**. *Plant Soc.* 54, 61–76. <https://doi.org/10.7338/pls2017542S1/06>.
- Pérez-Harguindeguy, N., Díaz, S., Garnier, E., Lavorel, S., Poorter, H., Jaureguiberry, P., ... Cornelissen, J. H. C. (2013). **New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide**. *Australian Journal of Botany*, 61(3), 167. doi:10.1071/bt12225
- Pérez-Pereira, N., Wang, J., Quesada, H. et al. **Prediction of the minimum effective size of a population viable in the long term**. *Biodivers Conserv* 31, 2763–2780 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10531-022-02456-z>

Porembski, S., Szarzynski, J., Mund, J.-P., & Barthlott, W. (1996). **Biodiversity and vegetation of small-sized inselbergs in a West African rain forest (Tai, Ivory Coast)**. *Journal of Biogeography*, 23(1), 47–55. doi:10.1046/j.1365-2699.1996.00982.x

Posit team (2024). **RStudio: Integrated Development Environment for R**. Posit Software, PBC, Boston, MA. URL: <http://www.posit.co/>.

Prieto, P.; Penuelas, J.; Llusia, J.; Asensio, D.; Estiarte, M. (2009). **Effects of long-term experimental night-time warming and drought on photosynthesis, Fv/Fm and stomatal conductance in the dominant species of a Mediterranean shrubland**. *Acta Physiologiae Plantarum*. 31. 729-739. 10.1007/s11738-009-0285-4.

Proctor, J.; Woodell, S.R.J.; (1975). **The ecology of serpentine soils**. *Adv. Ecol. Res.* 9, 255–366. [https://doi.org/10.1016/S0065-2504\(08\)60291-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2504(08)60291-3).

Rascher, U.; Liebig, M.; Luttge, U. (2000). **Evaluation of instant light-response curves of chlorophyll fluorescence parameters obtained with a portable chlorophyll fluorometer on site in the field**. *Plant, Cell and Environment*, 23(12), 1397–1405. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2000.00650.x>

Rivera, G.; Borchert, R.; (2001). **Induction of flowering in tropical trees by a 30-min reduction in photoperiod: evidence from field observations and herbarium specimens**. *Tree Physiol.* 21, 201–212.

Roach, T.; Krieger-Liszkay, A. (2012). **The role of the PsbS protein in the protection of photosystems I and II against high light in Arabidopsis thaliana**. *Biochim Biophys Acta*. 2012 Dec;1817(12):2158-65. doi: 10.1016/j.bbabi.2012.09.011. Epub 2012 Sep 19. PMID: 23000078.

Roberts, B.A.; Proctor, J.; (1992). **The ecology of areas with serpentinized rocks: a world view**. In: *Geobotany*, 17. Kluwer Academic, Dordrecht, The Netherlands.

Santos, H. G. dos; Jacomine, P. K. T.; Anjos, L. H. C. dos; Oliveira, V. A. de; Lumberras, J. F.; Coelho, M. R.; Almeida, J. A. de; Araujo Filho, J. C. de; Oliveira, J. B. de; Cunha, T. J. F. (2018). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

Seol, H. (2024). **snowCluster: Multivariate Analysis**. (Version 7.3.9) [jamovi module]. URL <https://github.com/hyunsooseol/snowCluster>.

Shaffer, M.L. (1981). **Minimum Population Sizes for Species Conservation**, *BioScience*, Volume 31, Issue 2, February 1981, Pages 131–134, <https://doi.org/10.2307/1308256>

Silva, J. R. da; Salgado, A. A. R. (2009). **Mapeamento das unidades de relevo da região da Serra do Gandarela, Quadrilátero Ferrífero, MG.** Revista Geografias, 5(2), 107–125. <https://doi.org/10.35699/2237-549X.13274>

Spósito, T. C.; Stehmann, J. R. (2006). **Heterogeneidade florística e estrutural de remanescentes florestais da Área de Proteção Ambiental ao Sul da Região Metropolitana de Belo Horizonte (APA Sul-RMBH), Minas Gerais, Brasil.** Acta Botânica Brasilica, 20(2), 347–362. <https://doi.org/10.1590/S0102-33062006000200010>

Staggemeier, V.G.; Diniz Filho, J.A.F.; Morellato, L.P.C. (2010). **The shared influence of phylogeny and ecology on the reproductive patterns of Myrteae (Myrtaceae).** J. Ecol. 98, 1409–1421.

Sturges, H. A. (1926). **The Choice of a Class Interval.** Journal of the American Statistical Association, 21(153), 65–66. <http://www.jstor.org/stable/2965501>

Takahashi, S. & Murata, N. (2008). **How do environmental stresses accelerate photoinhibition?** Trends in plant science. 13. 178-82. 10.1016/j.tplants.2008.01.005.

Takahashi, S.; Badger, M.R. (2011). **Photoprotection in plants: a new light on photosystem II damage.** Trends Plant Sci. 2011 Jan;16(1):53-60. doi: 10.1016/j.tplants.2010.10.001. Epub 2010 Nov 1. PMID: 21050798.

The jamovi project (2024). **jamovi.** (Version 2.5) [Computer Software]. Retrieved from <https://www.jamovi.org>.

Valladares, F.; Niinemets, Ü. (2008). **Shade Tolerance, a Key Plant Feature of Complex Nature and Consequences.** Annual Review of Ecology Evolution and Systematics. 39. 237–257. 10.1146/annurev.ecolsys.39.110707.173506.

Walters, R.G. (2005): **Towards an understanding of photosynthesis acclimation.** – J. Exp. Bot. 56: 435-447, 2005.

Way, D.A.; Pearcy, R.W. (2012). **Sunflecks in trees and forests: from photosynthetic physiology to global change biology.** – Tree Physiol. 32: 1066-1081, 2012.

Wellburn, A. R. (1994). **The Spectral Determination of Chlorophylls a and b, as well as Total Carotenoids, Using Various Solvents with Spectrophotometers of Different Resolution.** Journal of Plant Physiology, 144(3), 307–313. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(11\)81192-2](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)81192-2)

Wright, S.J.; Calderon, O.; (1995). **Phylogenetic Patterns Among Tropical Flowering Phenologies.** J. Ecol. 83, 937–948.

Wright, S.J.; Van Schaik, C.R.; (1994). **Light and the phenology of tropical trees**. Am. Nat. 143, 192–199.

Zar, J.H. (2010). **Biostatistical analysis**. Prentice-Hall, New Jersey.