

UNIVERSIDADE DO VALE DO PARAÍBA
INSTITUTO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PROCESSAMENTO DE MATERIAIS

DOUGLAS CUBAS PEREIRA

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO POLÍMERO SUPERABSORVENTE (SAP) NO
DESENVOLVIMENTO DE PLÂNTULAS DE CAPOROROCA-VERMELHA
(*RAPANEA FERRUGINEA*) COM RESTRIÇÃO HÍDRICA POR ESPECTROSCOPIA
VIBRACIONAL NO INFRAVERMELHO MÉDIO COM TRANSFORMADA DE
FOURIER (FTIR-UATR)**

São José dos Campos, SP

2021

DOUGLAS CUBAS PEREIRA

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO POLÍMERO SUPERABSORVENTE (SAP) NO
DESENVOLVIMENTO DE PLÂNTULAS DE CAPOROROCA-VERMELHA
(*RAPANEA FERRUGINEA*) COM RESTRIÇÃO HÍDRICA POR ESPECTROSCOPIA
VIBRACIONAL NO INFRAVERMELHO MÉDIO COM TRANSFORMADA DE
FOURIER (FTIR-UATR)**

Dissertação de Mestrado apresentada no Programa de Pós-graduação em Processamento de Materiais, do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento - IP&D, da Universidade do Vale do Paraíba, UNIVAP, como complementação aos créditos necessários para obtenção do grau de Mestre em Processamento de Materiais.

Orientador: Prof^ª. Dr^ª. Kumiko Koibuchi Sakane

São José dos Campos, SP
2021

TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE DIVULGAÇÃO DA OBRA

Ficha catalográfica

Pereira, Douglas Cubas

Avaliação da Eficiência do Polímero Superabsorvente (SAP) no Desenvolvimento de Plântulas de Capororoca-Vermelha (*Rapanea ferruginea*) com Restrição Hídrica por Espectroscopia Vibracional no Infravermelho Médio com Transformada de Fourier (FTIR-UATR) / Douglas Cubas Pereira; orientador, Kumiko Koibuchi Sakane. - São José dos Campos, SP, 2021.

1 CD-ROM, 105 p.

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos. Programa de Pós-Graduação em Processamento de Materiais.

Inclui referências

1. Processamento de Materiais. 2. Polímeros Superabsorventes (SAP). 3. Espectroscopia no Infravermelho com FTIR. 4. Capororoca-Vermelha (*Rapanea ferruginea*). 5. Recuperação Florestal. I. Koibuchi Sakane, Kumiko, orient. II. Universidade do Vale do Paraíba. Programa de Pós-Graduação em Processamento de Materiais. III. Título.

Eu, Douglas Cubas Pereira, autor(a) da obra acima referenciada:

Autorizo a divulgação total ou parcial da obra impressa, digital ou fixada em outro tipo de mídia, bem como, a sua reprodução total ou parcial, devendo o usuário da reprodução atribuir os créditos ao autor da obra, citando a fonte.

Declaro, para todos os fins e efeitos de direito, que o Trabalho foi elaborado respeitando os princípios da moral e da ética e não violou qualquer direito de propriedade intelectual sob pena de responder civil, criminal, ética e profissionalmente por meus atos.

São José dos Campos, 13 de Agosto de 2021.

Autor(a) da Obra



Data da defesa: 30 / 07 / 2021

DOUGLAS CUBAS PEREIRA

“AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO POLÍMERO SUPERABSORVENTE (SAP) NO DESENVOLVIMENTO DE PLÂNTULAS DE CAPOROROCA-VERMELHA (*Rapanea ferruginea*) COM RESTRIÇÃO HÍDRICA POR ESPECTROSCOPIA VIBRACIONAL NO INFRAVERMELHO MÉDIO COM TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR-UATR)”.

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre, do Programa de Pós-Graduação em Processamento de Materiais, do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Paraíba - Univap, pela seguinte banca examinadora:

PROF.^ª DR.^ª VALDIRENE APARECIDA DA SILVA

Valdirene

PROF.^ª DR.^ª KUMIKO KOIBUCHI SAKANE

Kumiko

PROF.^ª DR.^ª LÚCIA VIEIRA

Lúcia

PROF.^ª DR.^ª ANDREA SANTOS LIU -IFSP

Andrea

Prof.^ª Dr.^ª Lúcia Vieira

Diretora do IP&D – Univap

São José dos Campos, 30 de julho de 2021.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais que sempre me apoiaram nos estudos e nunca mediram esforços para que eu chegasse até aqui.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família que sempre me apoiou de diversas formas principalmente nesse período difícil em que a dissertação foi feita, em especial ao meu pai que teve que me acompanhar e aguardar diversas vezes enquanto fazia os experimentos.

Ao Instituto de Pesquisa da Poliacrilotrila (IGTPAN) por confiar no meu projeto e conceder a bolsa de mestrado, em especial ao Sr. Nilton Granado pela confiança e suporte e à todos funcionários do IGTPAN que auxiliaram na avaliação de relatórios e apresentações prévias que foram fundamentais para a conclusão da pesquisa.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo suporte na aquisição do espectrofotômetro *Spectrum Two* utilizado nas análises (Número de Processo FAPESP: 2017/04013-0).

À minha orientadora Dr^a. Kumiko Koibuchi Sakane pela confiança, por ter me auxiliado intelectualmente nos temas abordados na dissertação e por toda atenção e suporte mesmo diante das dificuldades impostas durante a pesquisa.

À Prof^a. Dr^a. Maria Regina por propor minha entrada no curso de mestrado sugerindo apresentar um projeto de pesquisa ao IGTPAN e pelo imenso suporte no início do mestrado.

Ao amigo Breno Pupin pelo apoio nas análises dos dados e pelas conversas sobre o tema de avaliação de plantas por espectroscopia que contribuíram para pesquisa.

Aos amigos Marcio Alves e Mirian Manami por me auxiliarem na utilização dos *softwares* utilizados na análise dos espectros no início do estudo.

Ao Joaquim por ter cultivado e cuidado das mudas na estufa da Univap que foram o posteriormente utilizadas na avaliação da pesquisa.

Ao amigo Allan Squizzato por ter fornecido sementes e sacos plásticos que foram importantes para a preparação do experimento de pesquisa.

À amiga Vitória pela ajuda mútua em diversos momentos do curso de mestrado.

Aos professores do mestrado que ofereceram imenso conhecimento útil para formular o projeto de pesquisa.

À todos amigos e colegas que cursaram o mestrado no mesmo período, mesmo àqueles que devido as dificuldades tiveram que sair do curso.

À todos funcionários que compõem a Univap pelo auxílio, por manter a universidade funcionando mesmo diante das dificuldades do período.

À todos aqueles que posso ter me esquecido que foram importantes para atingir mais este objetivo. Obrigado.

*“Tente de novo. Falhe de novo. Falhe
melhor.”*

(Samuel Beckett)

RESUMO

Os ecossistemas florestais possuem importantes funções ecológicas. Atividades antrópicas como o desmatamento ocasionam a redução da resiliência da regeneração natural, que demandam intervenção por meio do plantio direto. A recuperação ambiental depende da produção de mudas nativas, em especial por espécies resistentes às condições degradadas das áreas, sendo que o principal problema destes locais é a falta de suporte de irrigação. Para solucionar a demanda por irrigação se destaca o uso dos materiais poliméricos superabsorventes (*Super Absorbent Polymers* - SAP), popularmente conhecidos como hidrogéis, no manejo vegetal em ambientes degradados. Estudos conduzidos para avaliar a influência do uso focam na avaliação de aspectos externos das plantas. O uso da espectroscopia no Infravermelho Médio com Transformada de Fourier (FTIR) é uma técnica que permite avaliar as biomoléculas de espécies vegetais. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência do uso do hidrogel sobre desenvolvimento da espécie pioneira Capororoca-Vermelha (*Rapanea ferruginea*) em condições de escassez hídrica simulada por meio do monitoramento quantitativo de constituintes biomoleculares por espectroscopia FTIR. O experimento foi conduzido com os Grupos I e II, compostos por quatro exemplares cultivados com 10% de hidrogel e quatro controle e com o Grupo III, com mudas cultivadas em triplicata com 25%, 20%, 15% e 10% de hidrogel. O monitoramento foi feito por 15, 14 e 13 meses, respectivamente, nos Grupos I, II e III. O teste de germinação foi conduzido com as mesmas concentrações de hidrogel usadas no Grupo III e também se avaliou as espécies Pau d'Alho (*Gallesia integrifolia*) e Jequitibá-Rosa (*Cariniana legalis*). Os espectros foram obtidos na faixa de 4000 a 450 cm^{-1} . Foram avaliadas as áreas das bandas de água (3700-3000), lipídios (3000-2800), pectina (1770-1693), parede celular (1486-1400), hemicelulose (1290-1200), clorofila (1200-1128), amido (1128-1084) e lignina (735-700). O uso do hidrogel apresentou influência positiva sobre a banda de água principalmente nos Grupos I e II. As biomoléculas que se destacaram para a avaliação foram a de clorofila e pectina em todos grupos. No Grupo III, a banda de lipídios teve boa resposta ao uso do hidrogel e no Grupo II a hemicelulose também foi significativa. A concentração de hidrogel que se mostrou ideal ao desenvolvimento da Capororoca-Vermelha foi entre 15% e 20% conforme a avaliação do Grupo III. A influência positiva também foi observada na avaliação da altura e número de folhas dos exemplares cultivados com o insumo. Devido às características fisiológicas da Capororoca-Vermelha, a germinação não teve resultados satisfatórios demandando pesquisas futuras, no entanto, o teste de germinação com espécies que ocorrem no mesmo estrato vegetal apresentaram resultados positivos nas concentrações de 10% e 15% de hidrogel. O uso de hidrogel apresentou influência positiva sobre a Capororoca-Vermelha e o monitoramento do desenvolvimento biomolecular por meio da espectroscopia no Infravermelho com FTIR se mostrou viável.

Palavras-chave: Polímeros Superabsorventes (SAP), Espectroscopia no Infravermelho com FTIR, Capororoca-Vermelha (*Rapanea ferruginea*), Recuperação Florestal, Manejo Hídrico.

ABSTRACT

Forest ecosystems have important ecological functions. Anthropogenic activities such as deforestation reduce the natural regeneration resilience that requires intervention through direct planting. Environmental recovery depends on the production of native seedlings, especially by species resistant to the terrain degraded conditions such as the irrigation support lack. To solve the demand for irrigation, the use of superabsorbent polymeric materials (Super Absorbent Polymers - SAP), popularly known as hydrogels in plant management stands out. Studies conducted to assess use influence focus on evaluating the external aspects of plants. The use of Fourier Transform Middle Infrared Spectroscopy (FTIR) is a technique that allows plant biomolecules evaluation. Thus, the objective of this work was to evaluate the hydrogel use influence on the development of the pioneer species Capororoca-Vermelha (*Rapanea ferruginea*) under simulated water scarcity conditions through the quantitative monitoring of biomolecular constituents by FTIR spectroscopy. The experiment was conducted with Groups I and II, composed of four specimens cultivated with 10% hydrogel and four controls, and with Group III, with seedlings cultivated in triplicate with 25%, 20%, 15% and 10% hydrogel. Monitoring was done by 15, 14 and 13 months respectively for Groups I, II and III. The germination test was conducted with the same hydrogel concentrations used in Group III and the species Pau d'Alho (*Gallesia integrifolia*) and Jequitibá-Rosa (*Cariniana legalis*) were also evaluated. Spectra were obtained in the range from 4000 to 450 cm^{-1} . The areas of the bands of water (3700-3000), lipids (3000-2800), pectin (1770-1693), cell wall (1486-1400), hemicellulose (1290-1200), chlorophyll (1200-1128), starch (1128-1084) and lignin (735-700) were evaluated. The use of hydrogel had a positive influence on the water band mainly in Groups I and II. The biomolecules that stood out for the evaluation were chlorophyll and pectin in all groups. In Group III the lipid band had a good response to the use of hydrogel and in Group II the hemicellulose was also significant. The ideal hydrogel concentration range for the development of Capororoca-Vermelha was between 15% and 20% according to the evaluation of Group III. The positive influence was also observed in the evaluation of height and leaves number of the specimens cultivated with SAP. Due to the physiological characteristics of Capororoca-Vermelha, germination did not have satisfactory results, requiring further research, however, the germination test with species that occur in the same habitat showed positive results at concentrations of 10% and 15% of hydrogel. The use of hydrogel had a positive influence on Capororoca-Vermelha and the monitoring of biomolecular development through Infrared spectroscopy with FTIR proved to be feasible.

Keywords: Superabsorbent Polymers (SAP), FTIR Infrared Spectroscopy, *Rapanea ferruginea*, Forest Recovery, Water Management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - <i>Rapanea ferruginea</i> : A - Aspecto Geral; B - Folhas; C - Frutos; D - Sementes; E - Casca; F - Cerne.....	19
Figura 2 - Estruturas Lipídicas de Plantas - A, B e C - Esteróis Livres	25
Figura 3 - Estrutura Molecular da Pectina Ionizada	25
Figura 4 - Aminoácidos que Constituem Proteínas Vegetais	26
Figura 5 - Estrutura Molecular da Celulose.....	26
Figura 6 - Estrutura da Hemicelulose	27
Figura 7 - Estrutura da Clorofila.....	27
Figura 8 - Estrutura do Polissacarídeo Arabinogalactana	28
Figura 9 - Estrutura da Lignina.....	28
Figura 10 - Espectro Eletromagnético da Luz Solar.....	29
Figura 11 - Transição entre E1 e E2 devido a absorção da radiação eletromagnética	30
Figura 12 - Espectro do Nujol: A - Transmitância; B - Absorbância.....	30
Figura 13 - Vibrações Moleculares	31
Figura 14 - Esquema de graus de liberdade de translação (A), de rotação (B) e de vibração (C) da molécula de água.....	32
Figura 15 - Espectro Infravermelho da Água	32
Figura 16 - Polímero Superabsorvente (SAP)	34
Figura 17 - Perfil do Solo Coletado.....	35
Figura 18 - Exemplo das Amostras Identificadas para Análise	37
Figura 19 - Espectrofotômetro Spectrum Two	38
Figura 20 - Demonstração do Cálculo da Área (Banda de Lipídios)	39
Figura 21 - Tratamentos para Teste de Germinação.....	40
Figura 22 - Fluxograma das Etapas da Metodologia aos Resultados e Discussão	41
Figura 23 - Espectro Infravermelho da Capororoca-Vermelha com Atribuições	44
Figura 24 - Região de Impressão Digital - Zoom.....	44
Figura 25 - Espectros Médios: A - HG1 - Jul/Nov; B - HG1 - Dez/Abr; C - HG1 - Mai/Set; D - SG1 - Jul/Nov; E - SG1 - Dez /Abr; F - SG1 - Mai/Set.....	45
Figura 26 - Áreas - Julho 2019: A - Região 3800 a 2800 cm^{-1} ; B - Região 1800 a 450 cm^{-1} ..	47
Figura 27 - Áreas Agosto 2019: A - Região 3800 a 2800 cm^{-1} ; B - Região 1800 a 450 cm^{-1} ..	48
Figura 28 - Áreas Novembro 2019: A - Região 3800 a 2800 cm^{-1} ; B - Região 1800 a 450 cm^{-1}	49
Figura 29 - Áreas Dezembro 2019: A - Região 3800 a 2800 cm^{-1} ; B - Região 1800 a 450 cm^{-1}	49
Figura 30 - Áreas Abril 2020: A - Região 3800 a 2800 cm^{-1} ; B - Região 1800 a 450 cm^{-1}	50
Figura 31 - Áreas Julho 2020: A - Região 3800 a 2800 cm^{-1} ; B - Região 1800 a 450 cm^{-1}	51
Figura 32 - Áreas Setembro 2020: A - Região 3800 a 2800 cm^{-1} ; B - Região 1800 a 450 cm^{-1}	52
Figura 33 - Dendrogramas HG1 x SG1: A - Out/19; B - Nov/19; C - Dez/19; D - Jan/20.....	53
Figura 34 - Padrão de Crescimento: A - HG1; B - SG1	55
Figura 35 - Desenvolvimento Foliar: A - HG1; B - SG1	56
Figura 36 - Aspecto Externo das Mudanças: A - HG1 (2019); B - SG1 (2019); C - HG1 (2020); D - SG1 (2020)	57
Figura 37 - Espectros Médios: A - HG2 - Ago/Fev; B - HG2 - Mar/Set; C - SG2 - Ago/Fev; D - SG2 - Mar/Set.....	58
Figura 38 - Áreas Agosto 2019: A - Região 3800 a 2800 cm^{-1} ; B - Região 1800 a 450 cm^{-1} ..	60
Figura 39 - Áreas Dezembro 2019: A - Região 3800 a 2800 cm^{-1} ; B - Região 1800 a 450 cm^{-1}	61

Figura 40 - Áreas Fevereiro 2020: A - Região 3800 a 2800 cm ⁻¹ ; B - Região 1800 a 450 cm ⁻¹	61
Figura 41 - Áreas Abril 2020: A - Região 3800 a 2800 cm ⁻¹ ; B - Região 1800 a 450 cm ⁻¹	62
Figura 42 - Áreas Julho 2020: A - Região 3800 a 2800 cm ⁻¹ ; B - Região 1800 a 450 cm ⁻¹	62
Figura 43 - Áreas Setembro 2020: A - Região 3800 a 2800 cm ⁻¹ ; B - Região 1800 a 450 cm ⁻¹	63
Figura 44 - Dendrogramas HG2 x SG2: A - Set/19; B - Dez/19; C - Fev/20; D - Set/20.....	64
Figura 45 - Padrão de Crescimento: A - HG2; B - SG2.....	66
Figura 46 - Desenvolvimento Foliar: A - HG2; B - SG2.....	67
Figura 47 - Aspecto Externo das Mudanças 2019: A - HG2; B - SG2.....	67
Figura 48 - Aspecto Externo das Mudanças 2019: A - HG2; B - SG2.....	68
Figura 49 - Espectros Médios HG3: A - Set/19; B - Out/19.....	68
Figura 50 - Espectros Médios HG3: A - Nov/19; B - Dez/19; C - Jan/20; D - Fev/20; E - Mar/20; F - Abr/20.....	69
Figura 51 - Espectros Médios HG3: A - Mai/20; B - Jun/20; C - Jul/20; D - Ago/20; E - Set/20	70
Figura 52 - Áreas Setembro 2019: A - Região 3800 a 2800 cm ⁻¹ ; B - Região 1800 a 450 cm ⁻¹	74
Figura 53 - Áreas Outubro 2019: A - Região 3800 a 2800 cm ⁻¹ ; B - Região 1800 a 450 cm ⁻¹	75
Figura 54 - Áreas Dezembro 2019: A - Região 3800 a 2800 cm ⁻¹ ; B - Região 1800 a 450 cm ⁻¹	75
Figura 55 - Áreas Janeiro 2020: A - Região 3800 a 2800 cm ⁻¹ ; B - Região 1800 a 450 cm ⁻¹ ..	77
Figura 56 - Áreas Abril 2020: A - Região 3800 a 2800 cm ⁻¹ ; B - Região 1800 a 450 cm ⁻¹	78
Figura 57 - Áreas Julho 2020: A - Região 3800 a 2800 cm ⁻¹ ; B - Região 1800 a 450 cm ⁻¹	79
Figura 58 - Áreas Setembro 2020: A - Região 3800 a 2800 cm ⁻¹ ; B - Região 1800 a 450 cm ⁻¹	80
Figura 59 - Intensidade de Bandas: A - Setembro 2019; B - Outubro 2019.....	81
Figura 60 - Intensidade de Bandas: A - Janeiro 2020; B - Março 2020.....	82
Figura 61 - Dendrogramas H1G3 x SG3: A - Nov/19; B - Dez/19; C - Jan/20; D - Ago/20...	83
Figura 62 - Dendrogramas H2G3 x SG3: A - Dez/19; B - Jan/20; C - Abr/20; D - Ago/20....	85
Figura 63 - Dendrogramas H3G3 x SG3: A - Set/19; B - Out/19; C - Nov/20; D - Dez/20; E - Jan/20; F - Jun/20.....	86
Figura 64 - Dendrogramas H4G3 x SG3: A - Set/19; B - Dez/20; C - Jan/20; D - Fev/20.....	87
Figura 65 - Padrão de Crescimento: A - H1G3 (25%); B - H2G3 (20%).....	89
Figura 66 - Padrão de Crescimento: A - H3G3 (15%); B - H4G3 (10%).....	89
Figura 67 - Desenvolvimento Foliar: A - H1G3 (25%); B - H2G3 (20%).....	91
Figura 68 - Desenvolvimento Foliar: A - H3G3 (15%); B - H4G3 (10%).....	91
Figura 69 - Aspecto Externo das Mudanças: A - H1G3 - 2019; B - H1G3 - 2020; C - H2G3 - 2019; D - H2G3 - 2020.....	92
Figura 70 - Aspecto Externo das Mudanças: A - H3G3 - 2019; B - H3G3 - 2020; C - H4G3 - 2019; D - H4G3 - 2020.....	93
Figura 71 - Solo Aglutinado na Concentração de 25% (H1).....	95
Figura 72 - Germinações de Pau d'Alho: A - H1 (25%); B - H2 (20%).....	96
Figura 73 - Germinações de Pau d'Alho: A - H3 (15%); B - H4 (10%); C - Controle (S).....	97
Figura 74 - Plântulas de Pau d'Alho: A - H1; B - H2; C - H3; D - H4; E - S.....	98
Figura 75 - Germinações de Jequitibá-Rosa: A - H4 (10%); B - H3 (15%).....	99
Figura 76 - Plântulas de Jequitibá-Rosa: A - H4; B - H3; C - S.....	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Regiões do Espectro Infravermelho	29
Tabela 2 - Período de coleta	37
Tabela 3 - Atribuição Aproximada das Faixas de Biomoléculas Avaliadas	43
Tabela 4 - Áreas de Principais Componentes - Mudanças com Hidrogel (HG1) - Grupo I	46
Tabela 5 - Áreas de Principais Componentes - Mudanças sem Hidrogel (SG1) - Grupo I	47
Tabela 6 - Teste de Mann-Whitney - Grupo I	54
Tabela 7 - Áreas de Principais Componentes - Mudanças com Hidrogel (HG2) - Grupo II	59
Tabela 8 - Áreas de Principais Componentes - Mudanças sem Hidrogel (SG2) - Grupo II	59
Tabela 9 - Teste de Mann-Whitney - Grupo II	65
Tabela 10 - Áreas de Principais Componentes - 25% de Hidrogel (H1G3) - Grupo III	71
Tabela 11 - Áreas de Principais Componentes - 20% de Hidrogel (H1G3) - Grupo III	72
Tabela 12 - Áreas de Principais Componentes - 15% de Hidrogel (H3G3) - Grupo III	72
Tabela 13 - Áreas de Principais Componentes - 10% de Hidrogel (H4G3) - Grupo III	72
Tabela 14 - Áreas de Principais Componentes - Sem Hidrogel (SG3) - Grupo III	73
Tabela 15 - Teste de Mann-Whitney - Grupo III	88
Tabela 16 - Germinações - Testes com Pau d'Alho e Jequitibá-Rosa	101

LISTA DE ABREVIATURAS

ATR	Tecnologia de Refletância Atenuada
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
G1	Primeiro grupo de mudas de Capororoca-Vermelha - Grupo I
G2	Segundo grupo de mudas de Capororoca-Vermelha - Grupo II
G3	Terceiro grupo de mudas de Capororoca-Vermelha - Grupo III
H1G3	Mudas cultivadas com 25% de solução de hidrogel no Grupo III
H2G3	Mudas cultivadas com 20% de solução de hidrogel no Grupo III
H3G3	Mudas cultivadas com 15% de solução de hidrogel no Grupo III
H4G3	Mudas cultivadas com 10% de solução de hidrogel no Grupo III
HG1	Mudas cultivadas com 10% de solução de hidrogel no Grupo I
HG2	Mudas cultivadas com 10% de solução de hidrogel no Grupo II
IGTPAN	Instituto Granado de Tecnologia da Poliacrilonitrila
IP&D	Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento
FTIR	<i>Fourier Transformed Infrared</i> - Infravermelho com Transformada de Fourier
MIR	Infravermelho Médio
PAN	Polimerização da Poliacrilonitrila
PCA	<i>Principal Component Analysis</i> - Análise de Componentes Principais
SAP	<i>Super Absorbent Polymers</i> - Polímeros Superabsorventes
SG1	Mudas cultivadas sem solução de hidrogel no Grupo I
SG2	Mudas cultivadas sem solução de hidrogel no Grupo II
SG3	Mudas cultivadas sem solução de hidrogel no Grupo III
S	Exemplares cultivados sem solução de hidrogel
UNIVAP	Universidade do Vale do Paraíba

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivo Geral	17
1.2	Objetivos Específicos	17
2	REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1	Capororoca-Vermelha (<i>Rapanea ferruginea</i>)	19
2.2	Produção de Mudanças para a Recuperação de Áreas Degradadas	20
2.3	Uso de Polímeros Superabsorventes (SAP) na Silvicultura	21
2.4	Componentes Biomoleculares dos Vegetais	24
2.5	Espectroscopia no Infravermelho Médio (FTIR-UATR)	29
3	MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1	Preparação do Hidrogel	34
3.2	Coleta do Solo	34
3.3	Montagem do Experimento	35
3.3.1	Grupo I	35
3.3.2	Grupo II	35
3.3.3	Grupo III	36
3.4	Coleta das Folhas para Análise	36
3.5	Preparação dos Espectros e Análise Estatística	38
3.6	Experimento de Avaliação da Germinação	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4.1	Avaliação das Mudanças de Capororoca-Vermelha - Grupo I	45
4.1.1	Avaliação das Áreas Biomoleculares - Grupo I	46
4.1.2	Análise Multivariada - Grupo I	52
4.1.3	Teste de Mann-Whitney - Grupo I	54
4.1.4	Avaliação da Altura e Número de Folhas - Grupo I	55
4.2	Avaliação das Mudanças de Capororoca-Vermelha - Grupo II	58
4.2.1	Avaliação das Áreas Biomoleculares - Grupo II	59
4.2.2	Análise Multivariada - Grupo II	64
4.2.3	Teste de Mann-Whitney - Grupo II	65
4.2.4	Avaliação da Altura e Número de Folhas - Grupo II	66
4.3	Avaliação das Mudanças de Capororoca-Vermelha - Grupo III	68
4.3.1	Avaliação das Áreas Biomoleculares - Grupo III	71

4.3.2	Análise Multivariada - Grupo III.....	83
4.3.3	Teste de Mann-Whitney - Grupo III.....	88
4.3.4	Avaliação da Altura e Número de Folhas - Grupo III	89
4.4	Avaliação da Influência do Hidrogel sobre a Germinação Vegetal	94
5	CONCLUSÃO.....	102
	REFERÊNCIAS	103

1 INTRODUÇÃO

As florestas possuem importantes funções ecológicas como a absorção de carbono, ciclagem de nutrientes que atuam na manutenção dos solos, proteção de nascentes e suporte da fauna (LARCHER, 2000). Dentre os diversos impactos ambientais causados por atividades antrópicas se destaca o desmatamento como ação que ocasiona grande degradação sobre os recursos naturais e demandam intervenção direta para a recuperação.

O plantio de mudas torna-se necessário para a restauração das condições ideais do ecossistema (FRAGOSO *et al.*, 2016). A principal demanda para a recuperação de áreas degradadas é por espécies pioneiras de rápido crescimento, que possuam resistência ao estado das áreas impactadas e sejam atrativas à fauna. A Capororoca-Vermelha (*Rapanea ferruginea*) se enquadra dentro destes requisitos (LORENZI, 2008).

No entanto, mesmo as espécies mais resistentes necessitam de intenso suporte hídrico tanto no cultivo das mudas em ambiente controlado quanto no plantio direto nas áreas definitivas sendo, portanto, um fator determinante para a recuperação (THEBALDI *et al.*, 2016). A irrigação proporciona impactos sobre os recursos hídricos além de representar uma grande parcela dos altos custos que o reflorestamento demanda (SUMMERS *et al.*, 2015).

Para solucionar o problema da irrigação se destaca o uso dos materiais poliméricos superabsorventes (*Super Absorbent Polymers - SAP*), popularmente conhecidos como hidrogéis, para o cultivo e manejo vegetal em condições ambientais adversas. O uso destes materiais proporciona uma alta retenção hídrica no solo que permite a redução dos intervalos de irrigação, sem impactar negativamente o desenvolvimento vegetal (SARVAS *et al.*, 2007).

Diversos estudos foram conduzidos para avaliar a influência do uso dos SAP sobre o cultivo de espécies arbóreas, entretanto, o foco sempre é nas condições externas do crescimento vegetal e na capacidade de retenção hídrica dos solos (MEWS *et al.*, 2015; FELIPPE *et al.*, 2021). Portanto, é necessário avaliar as condições internas do crescimento vegetal com uso de técnicas modernas que permitam quantificar biomoléculas que respondam a influência de fatores externos como o uso dos SAP.

A espectroscopia no infravermelho médio com Transformada de Fourier (FTIR) é uma técnica muito utilizada atualmente que permite avaliar a composição de amostras orgânicas de forma rápida sem a geração de resíduos (BARBOSA, 2007). Desta forma, o presente trabalho propõe avaliar a influência do uso dos SAP sobre o desenvolvimento biomolecular interno da espécie pioneira Capororoca-Vermelha com uso da espectroscopia FTIR.

O presente trabalho foi conduzido em um sítio experimental no município de Guararema-SP onde foram montados 3 Grupos de mudas de Capororoca-Vermelha. Os Grupos I e II foram constituídos por 4 exemplares com 10% da solução de hidrogel e 4 controles, o intuito do Grupo II foi avaliar a reprodutividade dos resultados e verificar a influência estacional. No Grupo III foram cultivadas mudas com aplicação de 25%, 20%, 15% e 10% de solução em triplicata totalizando 12 mudas.

Os espectros coletados das folhas foram avaliados por cálculo de área das bandas de água, lipídios, pectina, parede celular, hemicelulose, clorofila, amido e lignina. Na sequência foi conduzida a análise multivariada, Teste de Mann-Whitney, avaliação de altura, número de folhas e teste de germinação incluso nas espécies Pau d'Alho e Jequitibá-Rosa. Os objetivos gerais e específicos estão descritos nos tópicos seguintes.

1.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência do polímero superabsorvente (SAP) no desenvolvimento da espécie Capororoca-Vermelha (*Rapanea ferruginea*) em situação de escassez hídrica simulada por meio do monitoramento quantitativo de constituintes biomoleculares da espécie por espectroscopia vibracional no infravermelho médio com Transformada de Fourier (FTIR-UATR).

1.2 Objetivos Específicos

- a) Analisar espectros no infravermelho médio obtidos de folhas de exemplares de *Rapanea ferruginea* submetidas a tratamento com/sem SAP;
- b) Verificar a influência do SAP nas estruturas dos constituintes biomoleculares da *R. ferruginea* por espectroscopia vibracional no infravermelho;
- c) Verificar a existência de uma banda analítica que responda de forma quantitativa a influência do SAP no crescimento vegetal e quantificar a banda correspondente;
- d) Demonstrar se o manejo de mudas de *Rapanea ferruginea* responde positivamente ao uso de SAP;

e) Inferir a viabilidade do uso da técnica de espectroscopia FTIR no monitoramento do crescimento da *Rapanea ferruginea*;

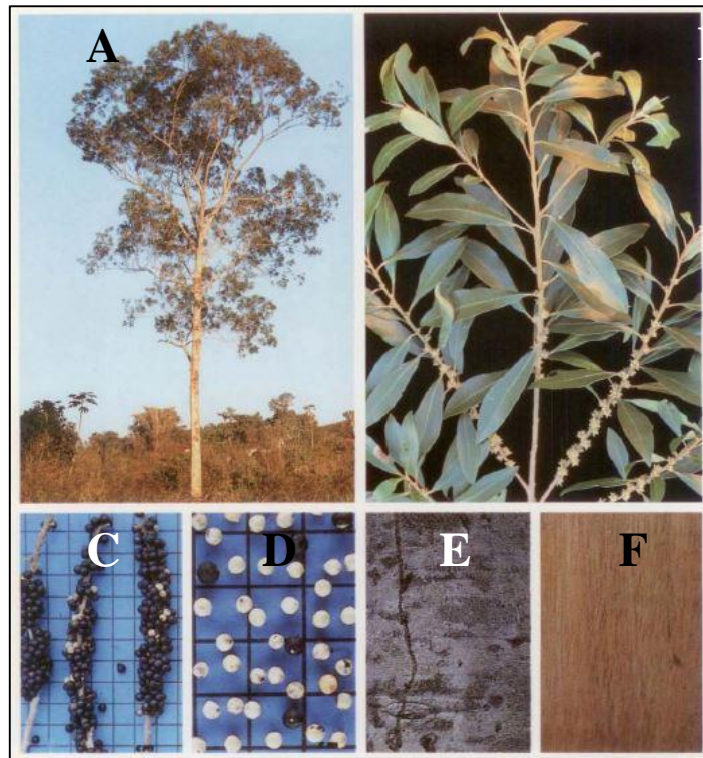
f) Avaliar a influência do SAP sobre a germinação vegetal.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Capororoca-Vermelha (*Rapanea ferruginea*)

O gênero *Rapanea* Aubl. pertence à família Primulaceae, subfamília Myrsinoideae e apresenta cerca de 300 espécies de distribuição pantropical (RICKETSON; PIPOLY, 1997; STAHL; ANDERBERG, 2004). O gênero é circunscrito ao gênero *Myrsine* L. tratado como sinônimo na literatura (FREITAS; KINOSHITA, 2015) e as espécies pertencentes são popularmente conhecidas como capororocas (Figura 1) e ocorrem em quase todas as formações vegetais brasileiras. Seus frutos são muito apreciados pela avifauna, sendo esta a principal forma de propagação das espécies (PASCOTTO, 2007).

Figura 1 - *Rapanea ferruginea*: A - Aspecto Geral; B - Folhas; C - Frutos; D - Sementes; E - Casca; F - Cerne



Fonte: Lorenzi (2008).

A Capororoca-Vermelha (*Rapanea ferruginea*) (Figura 1) é uma espécie arbórea pioneira de porte médio (6 - 12 m), representante da família *Primulaceae*, tipicamente encontrada em áreas de várzea de diversas formações vegetais brasileiras, em especial no bioma Mata Atlântica onde predomina na sucessão ecológica secundária, esta espécie é muito utilizada na recuperação de áreas degradadas por ações antrópicas devido à sua resistência e alta reprodutibilidade em terrenos com baixos teores de nutrientes, como em solos arenosos (LORENZI, 2008).

As espécies pioneiras como a Capororoca-Vermelha são importantes no implemento de processos de recuperação florestal por serem espécies que resistem às condições adversas, como alta incidência solar, baixos teores de nutrientes e umidade do solo e por apresentarem rápido desenvolvimento oferecendo sombreamento para espécies secundárias mais exigentes no manejo florestal. Portanto, a demanda por espécies pioneiras em um projeto de reflorestamento tende a ser maior e para tal é importante o desenvolvimento e aprimoramento de técnicas para produção de mudas de espécies pioneiras.

2.2 Produção de Mudanças para a Recuperação de Áreas Degradadas

A degradação dos ecossistemas naturais é ocasionada por diversas práticas antrópicas altamente impactantes, dentre elas destaca-se a escassez de planejamento na ocupação de áreas aliadas aos manejos indevidos que conduzem ao desmatamento de locais impróprios para agricultura com consequente degradação acelerada do solo e perda de biodiversidade vegetal (FRAGOSO *et al.*, 2016). As áreas impactadas muitas vezes perdem a capacidade de resiliência e para reverter os processos de degradação e restaurar os ecossistemas são necessárias ações como o plantio de mudas nativas (FERRAZ; ENGEL, 2011).

Para produzir mudas de espécies nativas com boa qualidade e resistência para a recuperação de ecossistemas é necessário levar em consideração diversos fatores, como o tipo de recipientes na produção das mudas, pois o sistema radicular deve sofrer a menor perturbação possível até o momento do plantio definitivo (FERRAZ; ENGEL, 2011), aplicação de implementos, sendo que a fertilização do substrato é uma das fases mais imprescindíveis na produção de mudas arbóreas (MORAES NETO *et al.*, 2003). Há diversos adubos orgânicos e inorgânicos provenientes principalmente da agropecuária como esterco bovino seco ou processado e resíduos de culturas agrícolas, a adubação química também é utilizada como complementar em espécies que necessitam de maior suporte (LINARES-GABRIEL *et al.*, 2018), todos estes fatores tendem a causar um alto custo na produção.

Portanto, a produção de mudas nativas é dispendiosa e envolve todo o processo de selecionar as sementes, considerando que o mercado brasileiro de produção de sementes nativas ainda é precário (RIBEIRO-OLIVEIRA; RANAL, 2014), plantio, manejo e alocação nas áreas a serem recuperadas elevam o custo total da recuperação por hectare que variam de acordo com as características do local demandando em geral uma estimativa de gasto entre US\$ 1.000,00 à US\$ 10.000,00 (SUMMERS *et al.*, 2015). Portanto, são necessários métodos que propiciem a

redução dos custos de produção considerando que os produtores em geral possuem grandes limitações financeiras (ENGEL, 2007).

Além de custos econômicos, a produção de mudas florestais em grande escala necessita de uma grande demanda hídrica diária que pode causar a déficit hídrico principalmente nos períodos de seca, a produção agrícola (onde a produção de mudas pode ser enquadrada) consome cerca de 70% dos recursos hídricos no Brasil (BRITO; ANDRADE, 2010), desta forma são necessárias técnicas que melhorem a capacidade de retenção como o uso de polímeros superabsorventes para melhorar a capacidade de retenção hídrica e reduzir a demanda por irrigação tradicional.

2.3 Uso de Polímeros Superabsorventes (SAP) na Silvicultura

O ambiente influencia no desenvolvimento das plântulas, fatores como presença de nutrientes, umidade do solo e radiação são limitantes na progressão de sistemas de recuperação de áreas degradadas (LARCHER, 2000). Dentre os fatores supracitados se destaca a presença de água no solo (umidade), que é responsável por diversos processos além da irrigação como o transporte de macro e micronutrientes imprescindíveis ao desenvolvimento vegetal, portanto, o estresse hídrico é o principal fator responsável pelo insucesso do desenvolvimento de espécies vegetais em áreas rústicas (MUDHANGANYI *et al.*, 2016).

Para contornar estes problemas destaca-se o uso dos SAP, popularmente conhecidos como hidrogéis para aperfeiçoar a irrigação de espécies vegetais sujeitas a estresse hídrico, desde a germinação de sementes ao manejo das mudas e plantas adultas (MUDHANGANYI *et al.*, 2016; LINARES-GABRIEL *et al.*, 2018), com objetivo de reduzir os impactos da irrigação tradicional responsável pelo consumo de 70% dos recursos hídricos potáveis no Brasil (BRAGA *et al.*, 2007). Segundo Mudhaganyi *et al.* (2016), o uso de implementos que propiciem um melhor aproveitamento hídrico é muito importante na recuperação de áreas degradadas considerando que em geral as condições estruturais o solo destes locais é precária principalmente a retenção hídrica em períodos de seca.

Os SAP foram desenvolvidos na década de 1970 no Laboratório de Pesquisa Regional do Norte do Departamento de Agricultura dos EUA a partir da sintetização por meio da hidrólise alcalina de amido-enxerto poliácridonitrila (SPAN) e hidrolisado (HSPAN) com intuito de uso em culturas agrícolas (BOGARIM, 2014). Os SAP são materiais poliméricos hidrofílicos obtidos a partir da polimerização da poliácridonitrila (PAN) constituídos por uma

rede tridimensional de cadeias lineares de polímeros hidrofílicos que permitem uma alta absorção de água (RAMIRES *et al.*, 2016), estes tipos de polímeros possuem uma capacidade de absorver de 400 a 1500 gramas de água por cada grama seca (SLOAN, 1994; KOUPAI *et al.*, 2008).

A utilização de SAP é ideal em áreas que sofreram impactos extremos como a mineração, onde as condições do solo e umidade são fatores chave para o estabelecimento de comunidades vegetais, nestas condições adversas estes fatores tendem a possuir uma influência maior do que em ambientes equilibrados (SARVAS *et al.*, 2007). Há inúmeras áreas com passivos ambientais provenientes do abandono de áreas de mineração no Brasil, no Vale do Paraíba do Sul no estado de São Paulo a mineração de areia deixou um grande rastro de destruição que necessita de recuperação ecossistêmica, o processo de recuperação é lento devido à total remoção do solo superficial e impactos na estrutura física do solo como a compactação dos horizontes que culmina na redução da disponibilidade hídrica e impede o bom desenvolvimento das mudas transferidas (SILVA, 2016; PEREIRA, 2018), nestas localidades é importante o uso de implementos como o SAP, principalmente no início do processo de recuperação.

O uso de hidrogel como implemento no plantio de espécies arbóreas em áreas degradadas iniciou-se nos EUA, na revisão da literatura feita por Sloan (1994) foram abordadas as primeiras experiências do uso de SAP em espécies de coníferas típicas do hemisfério norte, os estudos do período demonstram resultados positivos para espécies com raízes expostas ao sol por um tempo determinado, o desenvolvimento de sementes não sofreu influência positiva do hidrogel, no entanto, é necessário considerar que diversos novos estudos foram conduzidos nos anos seguintes por outros autores que apresentaram resultados positivos, o uso de SAP na inseminação da espécie conífera *Pinus patula* em solos secos no Zimbábue, apresentou melhoria de 20 a 30% no sucesso da germinação (MUDHANGANYI *et al.*, 2016).

Grande parte dos estudos com SAP é conduzido em espécies com interesse comercial (MEWS *et al.*, 2015). Buzetto *et al.* (2002) cita que a irrigação das plântulas de *Eucalyptus urophylla* é uma atividade importante principalmente nas primeiras semanas em períodos de seca prolongada, neste estudo avaliou-se a resposta da espécie à aplicação do polímero acrilamida, o melhor desenvolvimento ocorreu com a aplicação de 0,8 L de solução de SAP preparado na concentração de 5 g/L. A avaliação do uso de hidrogel na cultura do café Conillon (*Coffea canephora* Pierre) apresentou resultados positivos na aplicação de 9 gramas por cafeeiro com turno de rega de 7 dias (ZONTA *et al.*, 2009).

Hafle et al. (2008) avaliou o uso de SAP na cultura do maracujazeiro-doce (*Passiflora alata*) por estaquia, a dose ótima de hidrogel encontrada foi de 4,5 g/L, quantidades acima deste limite causaram efeitos negativos. O uso de hidrogel na manutenção de mudas de *Eucalyptus urograndis* possibilitou um intervalo de 37 dias sem irrigação independentemente da origem das plântulas (SAAD et al., 2010). Além dos benefícios da redução do período de irrigação, o uso de hidrogel possibilita a diminuição da adubação rotineira conforme o estudo conduzido por Bernardi et al. (2012) com o Eucalipto-Cheiroso (*Corymbia citriodora*) o uso de SAP na manutenção das mudas possibilitou a redução de 20% da adubação rotineira dos viveiros podendo chegar até a 40%, resultados importantes que demonstram a viabilidade do uso de SAP para reduzir os custos de produção em viveiros. A aplicação de SAP e fertilizante orgânico apresentou melhoria no desenvolvimento da espécie *Heliconia psittacorum* utilizada como espécie ornamental de interesse comercial (LINARES-GABRIEL et al., 2018).

Na produção de mudas de espécies nativas, o uso do SAP é também largamente citado em estudos na literatura, as pesquisas apresentam diversos resultados positivos e negativos, a utilização do polímero hidrotentor incorporado ao substrato de mudas de Angico-Vermelho (*Anadenanthera peregrina*) influenciou negativamente no desenvolvimento em dosagens elevadas (acima de 4 g/L), o resultado decorre principalmente do tipo de recipientes utilizados (SOUSA et al., 2013). Por sua vez, Mews et al. (2015) demonstraram que a utilização de hidrogel no cultivo de mudas de Ipê-Amarelo-do-Cerrado (*Handroanthus ochraceus*) com dosagem de 2 a 4g/L de SAP sob sombreamento de 50% apresentou melhor desenvolvimento principalmente nos primeiros 80 dias de monitoramento.

O uso de hidrogel na produção de substratos para mudas melhora consideravelmente as características químicas e físicas em especial os atributos que envolvem armazenamento e disponibilização de água à planta, além de influenciar positivamente na disposição de nutrientes provenientes dos fertilizantes adicionados nas plântulas (NAVROSKI et al., 2016). Cardoso (2017) demonstrou que o uso da dosagem de 4 g/L de SAP na produção de mudas de Jatobá-da-Mata (*Hymenea courbaril*) influencia expressivamente o crescimento e o padrão de qualidade desta espécie vegetal, no entanto, as mesmas condições aplicadas à espécie Jatobá-do-Cerrado (*Hymenea stigonocarpa*) não apresentaram resultados positivos, portanto, este estudo demonstra a importância da padronização da quantidade de polímero adicionado nas mudas, quantidades excessivas além de não trazerem benefícios também aumentam os custos do uso de hidrogéis, pequenas quantidades já melhoram as condições de retenção de água e nutrientes (HAFLE et al., 2008).

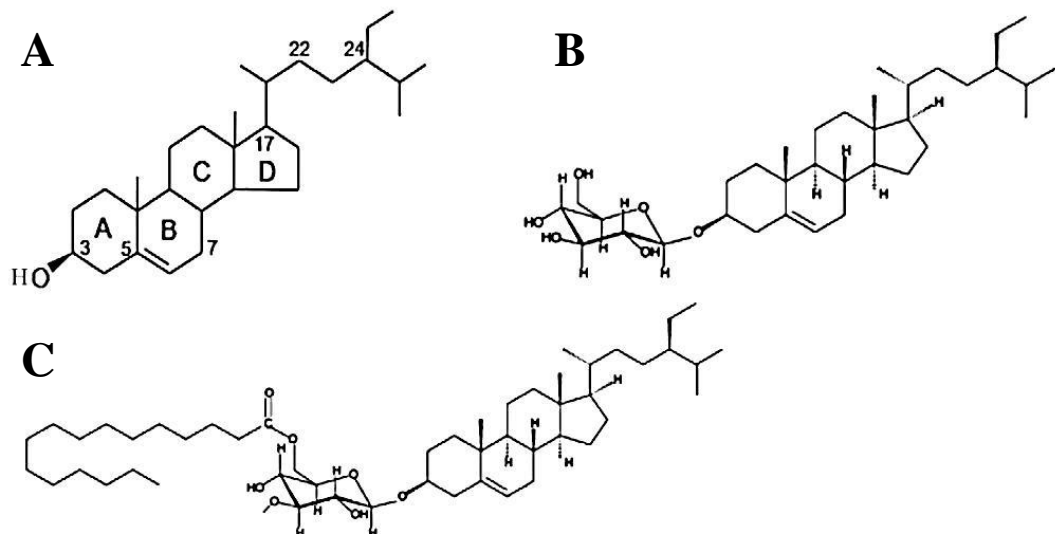
Portanto, o uso de SAP no manejo de espécies florestais é viável de acordo com as padronizações definidas para a necessidade fisiológica de cada espécie, a quantidade de hidrogel aplicado deve ser de acordo com as características do ambiente de origem, espécies higrófilas como o Jatobá-da-Mata apresentaram resultados mais positivos (CARDOSO, 2017) enquanto que espécies adaptadas a condições mais extremas não apresentaram melhora significativa como o Jatobá-do-Cerrado (CARDOSO, 2017), ou até mesmo resultados negativos como os estudos com o Angico-Vermelho indicaram (SOUSA *et al.*, 2013), no entanto estudos com a espécie xerófita *Handroanthus ochraceus* apresentaram resultados positivos (MEWS *et al.*, 2015). Um fator importante a ser considerado é o intervalo de irrigações, mesmo com a presença de hidrogel o intervalo de regas não deve ser muito longo, pois o SAP pode passar a absorver água da própria raiz e causar impacto negativo (BOGARIM, 2014).

O uso de polímeros retentores é importante na recuperação florestal de áreas com condições extremas como solos arenosos com longos intervalos de irrigação natural em campo, como áreas de restingas, a utilização de SAP em área de recuperação de restinga no estado do Rio de Janeiro apresentou redução de mortalidade de mudas em 5% (WERNECK, 2011). Grande parte dos estudos supracitados avaliou a eficiência do uso de SAP por meio de quantificação de folhas, volume de raízes, massa orgânica das mudas e medições do diâmetro do caule (DAC) (WERNECK, 2011; SOUZA *et al.*, 2013; BOGARIM, 2014; MEWS *et al.*, 2015; CARDOSO, 2017). Entretanto, é necessário avaliar o desenvolvimento a nível estrutural das plantas, o crescimento vegetal pode ser avaliado pelo desenvolvimento de constituintes moleculares da planta, como as proteínas pectina e lignina (LARCHER, 2000; LINS, 2017). A avaliação destas biomoléculas pode ser realizada por meio da Espectroscopia no Infravermelho Médio com Transformada de Fourier (FTIR).

2.4 Componentes Biomoleculares dos Vegetais

Os vegetais superiores são compostos por diversas estruturas biomoleculares responsáveis por importantes funções fisiológicas como a clorofila e o amido e proteção externa das plantas como a lignina e a celulose (LARCHER, 2000). Os lipídios são biomoléculas funcionais e estruturais caracterizados por longas cadeias de hidrocarbonetos (Figura 2) que compõem 8% da massa dos vegetais superiores (LARCHER, 2000). Os lipídios fazem parte da estrutura da parede celular estando presentes nos diversos tecidos vegetais.

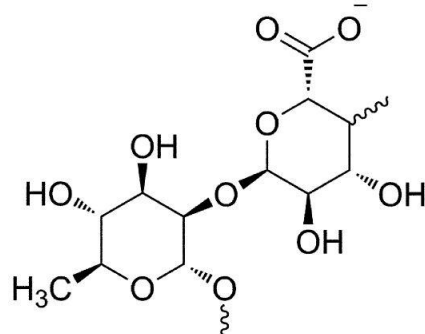
Figura 2 - Estruturas Lipídicas de Plantas - A, B e C - Esteróis Livres



Fonte: Cacas *et al.* (2012).

A pectina é uma biomolécula importante para a avaliação do desenvolvimento estrutural da *R. ferruginea* que está presente na parede celular e possui função de permitir a deposição, separação (*slippage*) e extensão da rede de celulose, controlar a porosidade e adesividade nas células (WILLATS *et al.*, 2001). A constituição da pectina é de polissacarídeos formados por resíduos de ácido galacturônico (Figura 3), aproximadamente constituem um terço da parede celular vegetal (PAGARRA *et al.*, 2014).

Figura 3 - Estrutura Molecular da Pectina Ionizada

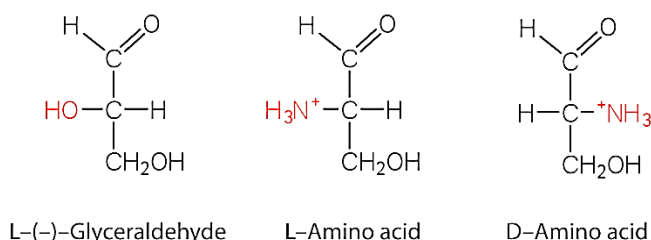


Fonte: Lara-Espinoza *et al.* (2018).

As proteínas compreendem uma gama variada de componentes que totalizam até 25% a massa vegetal (LARCHER, 2000) que atuam em importantes funções de defesa, sinalização, interferindo em atividades hormonais, enzimáticas e processos de recuperação de doenças (CHANDRA, 2018). Responsável por diversas funções de proteção contra influências externas como de resistência química e física, contra a entrada de parasitas e perda de umidade, a

epiderme é formada inúmeras proteínas e polissacarídeos (IVANOVA; SINGH, 2003). As proteínas também permeiam o transporte de nutrientes sendo constituídas por aminoácidos (Figura 4). Utilizada como banda de referência na análise por FTIR (DEPCIUCH *et al.*, 2017).

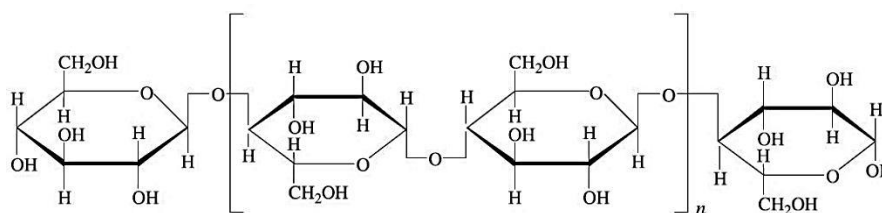
Figura 4 - Aminoácidos que Constituem Proteínas Vegetais



Fonte: Lara-Espinoza *et al.* (2018).

A parede celular dos vegetais é formada principalmente por camadas de células que oferecem proteção física contra impactos bióticos e abióticos, o componente principal da parede celular vegetal é a celulose (ALONSO-SIMÓN *et al.*, 2011). A estrutura da celulose é constituída por cadeias carbônicas (Figura 5) sendo o principal componente da parede celular que determina o formato das células entre outras propriedades importantes como textura, resistência mecânica, proteção contra microrganismos patogênicos e pela capacidade de absorção de íons e moléculas patogênicas (ALONSO-SIMÓN *et al.*, 2011).

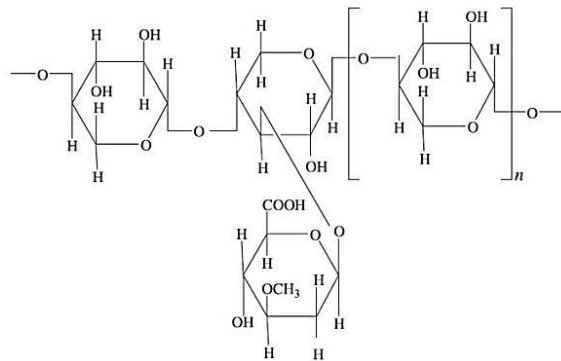
Figura 5 - Estrutura Molecular da Celulose



Fonte: Alam *et al.* (2014).

Além da celulose na parede celular das plantas há uma miríade de compostos dinâmicos e ordenados como a pectina, as proteínas estruturais e as hemiceluloses (KACURAKOVA *et al.*, 2000). As hemiceluloses (Figura 6) são classificadas como heteropolissacarídeos constituídos por monômeros como a arabinose, galactose e a glucose, abundantes nas estruturas do caule vegetal podem ser encontradas em menor quantidade nas folhas (DHYANI; BHASKAR, 2019).

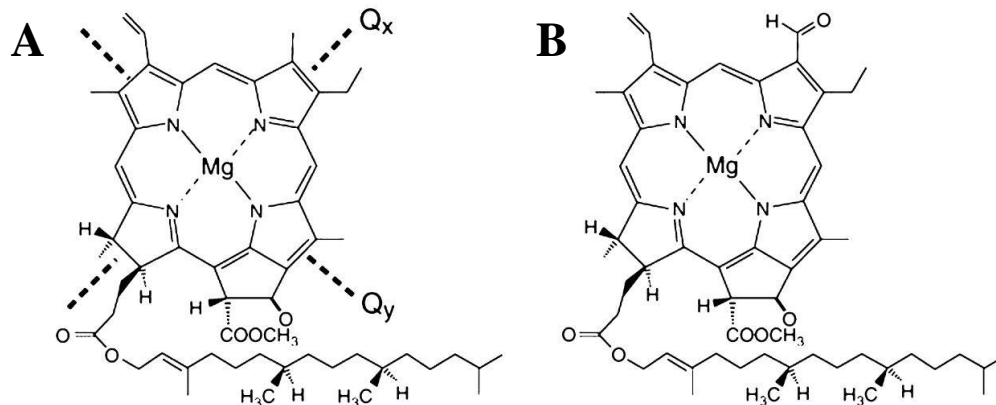
Figura 6 - Estrutura da Hemicelulose



Fonte: Alam *et al.* (2014).

Um componente importante nas células vegetais é a clorofila, um dos principais pigmentos encontrados nas células responsáveis pelo processo de fotossíntese, os cloroplastos, com a função de absorção de luz solar utilizada na produção de alimento vegetal, este composto que reflete a coloração verde característica dos vegetais (MAZUMDER *et al.*, 2014). A estrutura química da clorofila é dividida em duas estruturas principais, a clorofila (a) (Figura 7A) e a clorofila (b) (Figura 7B) (CHEN; BLANKENSHIP, 2011).

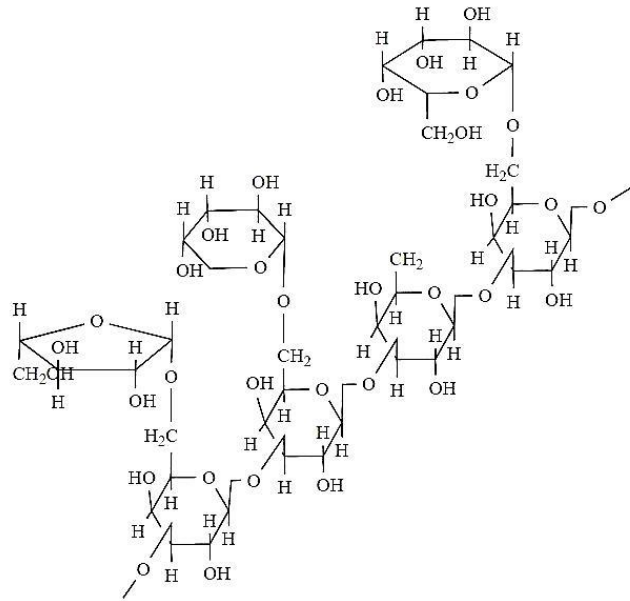
Figura 7 - Estrutura da Clorofila



Fonte: Chen e Blankenship (2011).

Os amidos também denominados de polissacarídeos constituem até 59% da massa orgânica dos vegetais superiores (LARCHER, 2000). A principal função é servir como reserva de matéria carbônica utilizada nos processos de desenvolvimento além de compor a estrutura da parede celular dos vegetais (FERNANDO *et al.*, 2017). Os polissacarídeos podem ser sintetizados para a produção de diversos componentes químicos úteis nas áreas de saúde e alimentação como a arabinogalactana (Figura 8) formada pela arabinose e galactose (YATSENKOVA *et al.*, 2018).

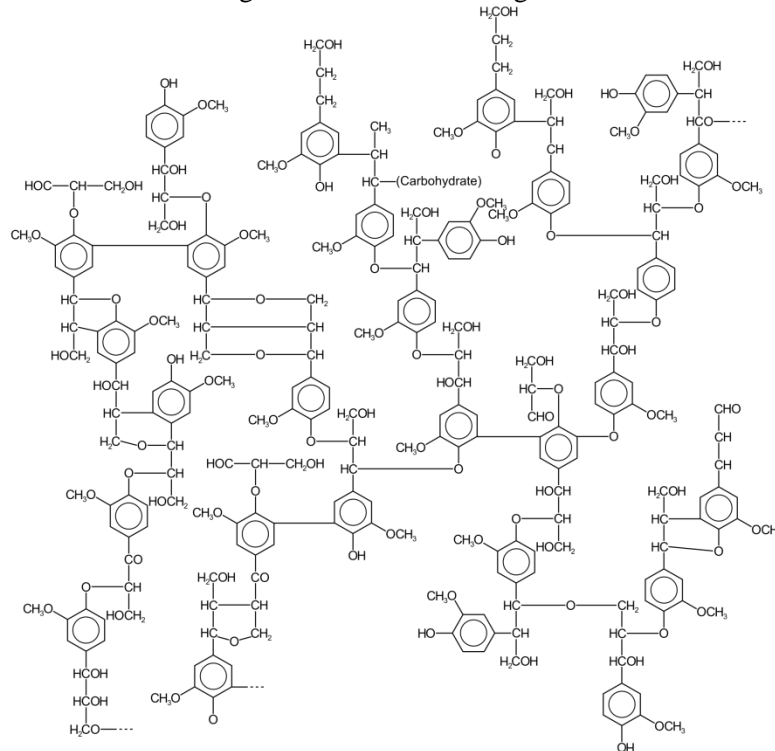
Figura 8 - Estrutura do Polissacarídeo Arabinogalactana



Fonte: Tolstikova *et al.* (2018).

A lignina é uma biomolécula estrutural encontrada na matriz orgânica de tecidos vegetais principalmente no caule, no entanto, pode ser encontrada em menor concentração nos tecidos vasculares das folhas (DHYANI; BHASKAR, 2019). A lignina é formada por uma complexa rede tridimensional de polímeros (Figura 9).

Figura 9 - Estrutura da Lignina

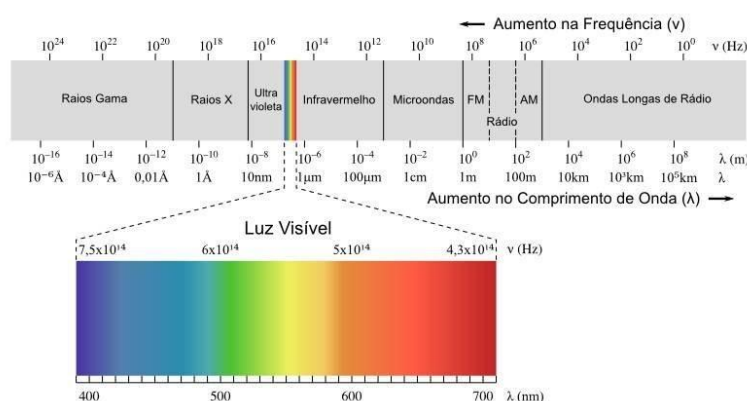


Fonte: Dhyani e Bhaskar (2019).

2.5 Espectroscopia no Infravermelho Médio (FTIR-UATR)

Cada região do espectro eletromagnético possui uma quantidade de energia que apresentam efeitos característicos sobre a matéria, a radiação infravermelha é responsável pela vibração de moléculas que provocam aquecimento (LINS, 2017). Portanto, a espectroscopia vibracional no infravermelho surge das vibrações dos átomos das moléculas que interagem com a radiação na faixa de 10^{-6} a 10^{-3} m na faixa correspondente à região de infravermelho do espectro eletromagnético (Figura 10) (PAVIA *et al.*, 2010).

Figura 10 - Espectro Eletromagnético da Luz Solar



Fonte: Delecave (2011).

A região do infravermelho é composta por diferentes faixas correspondentes a comprimentos de onda específicos (Tabela 1), sendo frequentemente utilizado para caracterização dos compostos orgânicos, inorgânicos e biomoléculas. Recentemente, a região do infravermelho próximo tem recebido destaque na realização de análises quantitativas de compostos orgânicos complexos (BARBOSA, 2007). No presente trabalho, os espectros avaliados foram obtidos na região do infravermelho médio.

Tabela 1 - Regiões do Espectro Infravermelho

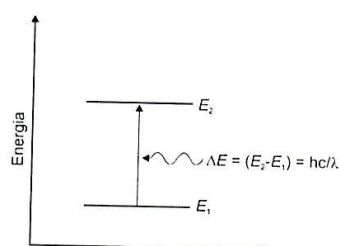
Região	Número de Onda (cm ⁻¹)	Comprimento de Onda (μm)	Frequência (Hz)
Próximo (NIR)	12.800 - 4000	0,78 - 2,50	$3,8 \cdot 10^{14}$ - $1,2 \cdot 10^{14}$
Médio (MIR)	4000 - 200	2,50 - 50	$1,2 \cdot 10^{14}$ - $6,0 \cdot 10^{12}$
Distante (FIR)	200 - 10	50 - 1000	$6,0 \cdot 10^{12}$ - $3,0 \cdot 10^{11}$
Mais Utilizada	4000 - 670	2,50 - 15	$1,2 \cdot 10^{14}$ - $2,0 \cdot 10^{13}$
Impressão Digital	1200 - 600	8,33 - 16,67	$3,6 \cdot 10^{15}$ - $1,8 \cdot 10^{13}$

Fonte: Holler *et al.* (2009).

A avaliação por espectroscopia permite a comparação de duas substâncias distintas já que é improvável que ambas possuam o mesmo espectro principalmente na região de impressão

digital (LINS, 2017). A espectroscopia vibracional se baseia na vibração dos átomos de uma molécula após a absorção de energia de radiação infravermelha (KASIM *et al.*, 2014). O processo que produz a absorção é basicamente o da interação de um campo elétrico com um dipolo elétrico associado à distribuição das cargas nas moléculas que produz a transição de um nível de energia menor E_1 para um maior E_2 (Figura 11), quando a energia associada for igual a diferença entre E_1 e E_2 ocorre a absorção (STUART, 2004).

Figura 11 - Transição entre E_1 e E_2 devido a absorção da radiação eletromagnética

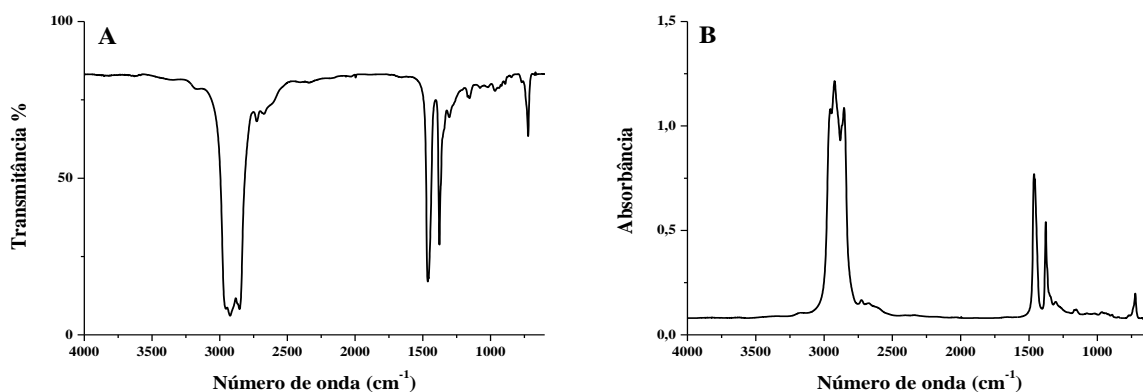


Fonte: Stuart (2004).

O espectro infravermelho de um composto é característico da molécula como um todo, no entanto certos grupos de átomos absorvem nas regiões semelhantes fornecendo a bandas que surgem mais ou menos na mesma frequência, independente da estrutura molecular (STUART, 2004). Estas bandas, chamadas características permitem obtenção de informações para identificação e caracterização de estruturas, as intensidades das bandas podem ser expressas como transmitância ou absorbância, Figuras 12A e 12B (BARBOSA, 2007). A transmitância, T é a razão entre a energia radiante transmitida por amostra e a energia radiante incidente. A absorbância, A é o logaritmo decimal do inverso da transmitância (1).

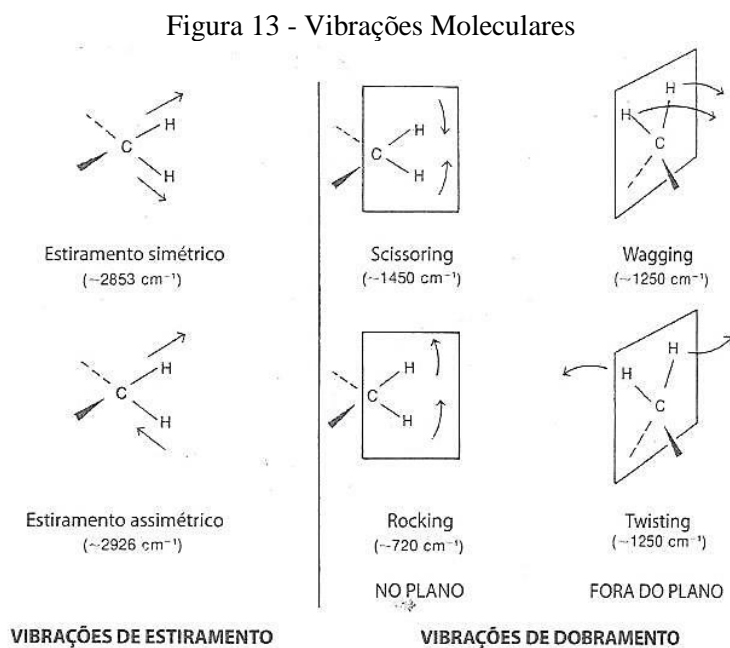
$$A = \log_{10} \frac{1}{T} \quad (1)$$

Figura 12 - Espectro do Nujol: A - Transmitância; B - Absorbância



Fonte: O Autor.

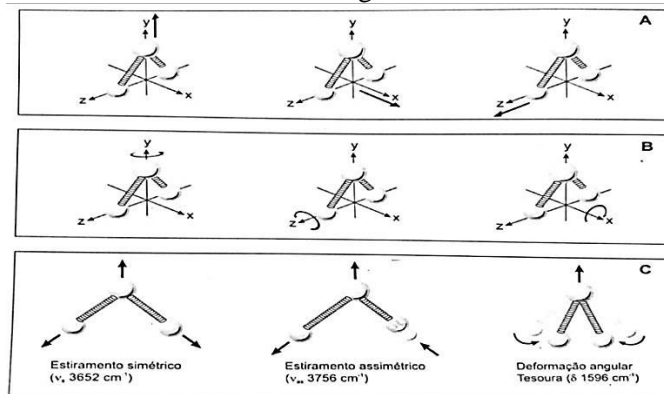
A interação da radiação infravermelha com moléculas pode produzir alterações nos modos vibracionais das moléculas (STUART, 2004). Durante a vibração do estiramento da ligação, a distância interatômica aumenta e diminui alternadamente e as vibrações de deformação angular produzem variação dos ângulos de ligação (BARBOSA, 2007). As posições dos átomos na molécula (Figura 13) oscilam em modos categorizados em estiramento, distância entre os átomos pelo eixo de ligação, e deformação, variação nos ângulos entre as ligações totalizando quatro tipos: simétrica no plano (*scissoring*), assimétrica no plano (*rocking*), simétrica fora do plano (*wagging*) e assimétrica fora do plano (*twisting*) (HOLLER *et al.*, 2009; PAVIA *et al.*, 2010), a regra de seleção para a técnica de espectroscopia vibracional apenas permite a observação das vibrações que levam à alteração do momento dipolar (LINS, 2017).



Fonte: Pavia *et al.* (2010).

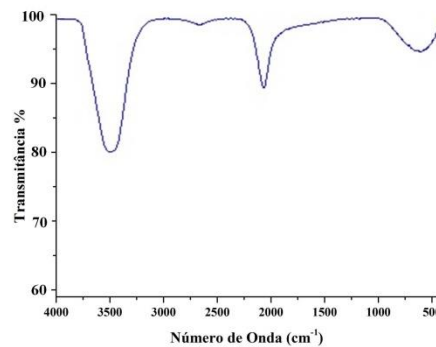
Cada átomo possui $3N$ graus de liberdade correspondentes as coordenadas do sistema cartesiano (x,y,z) , sendo N o número de átomos. As coordenadas x , y e z são necessárias para definir suas posições (STUART, 2004). Para moléculas não-lineares, são necessários $3N-6$ graus de liberdade para vibrações eliminando 3 de translação e 3 de rotação, já para moléculas lineares, são necessários $3N-5$ graus de liberdade para vibrações eliminando 3 de translação e 2 de rotação (STUART, 2004). A molécula de água, H_2O possui 3 modos de vibração pois é constituída de 3 átomos e substituindo em $3N-6$, tem-se 3, o esquema de graus de liberdade pode ser visto no exemplo da Figura 14 e o espectro da água na Figura 15.

Figura 14 - Esquema de graus de liberdade de translação (A), de rotação (B) e de vibração (C) da molécula de água



Fonte: Barbosa (2007).

Figura 15 - Espectro Infravermelho da Água



Fonte: O Autor.

A frequência de cada modo vibracional recebe o nome de fundamental (STUART, 2004). No espectro infravermelho de água é observada sobreposição de duas frequências fundamentais produzindo alargamento de bandas na região de 3600 a 2800 cm^{-1} (Figura 16).

O modelo do oscilador pode explicar a frequência aproximada dos estiramentos de ligações (STUART, 2004). A equação (2) a seguir mostra a relação entre a frequência, as massas atômicas e a constante de força de ligação (f).

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{\mu}} \quad (2)$$

k = constante de força de ligação, traz informação da natureza da ligação

μ = massa reduzida

$$\mu = \frac{m_X m_Y}{m_X + m_Y} \quad (3)$$

m_X e m_Y = massas dos átomos x e y , respectivamente.

As frequências calculadas baseadas no modelo de oscilador harmônico são comumente usadas para obter os valores das constantes de força de ligação. Nos espectros infravermelhos muitas vezes é encontrado o número diferente dos valores teóricos dos picos (STUART, 2004). Alguns fatores influenciam na absorção por exemplo:

- (1) As vibrações fundamentais que não produzem variação no momento dipolar da molécula;
- (2) As vibrações próximas que sobrepõem produzindo o alargamento de bandas;
- (3) Quando a molécula apresenta simetria, pode ocorrer bandas degeneradas;
- (4) Quando ocorrem vibrações harmônicas e de combinações;
- (5) As vibrações fundamentais muito fracas são difíceis de serem observadas.

Diversos fatores influenciam na estrutura do espectro obtido, muitas vezes ocorre a formação de vibrações acopladas, este acoplamento de dois modos fundamentais culmina em novos modos com diferentes frequências (BARBOSA, 2007). Por sua vez, a ligação de hidrogênio altera a constante de força de ligação, ocasionando no deslocamento das bandas de estiramento e deformação angular, a formação de ligação intermolecular pode produzir dímero ou polímero alterando o contorno das bandas (STUART, 2004).

Os organismos vivos como as plantas são constituídos por complexas estruturas moleculares onde cada frequência do espectro representa a sobreposição de diversas bandas correspondentes a importantes componentes (BARBOSA, 2007). Desta forma, o estudo de compostos de origem biológica com o uso da técnica de espectroscopia no infravermelho demanda um tratamento matemático rigoroso, além de basear os estudos com exemplos adotados na literatura.

Atualmente a técnica de espectroscopia FTIR é amplamente utilizada na análise quantitativa de espécies vegetais, pois permite avaliar as variações de estruturas biomoleculares importantes para observar o desenvolvimento vegetal como os lipídios, pectina, proteína, celulose, hemicelulose, polissacarídeos e lignina (KASIM, 2014; DEPCIUCH *et al.*, 2017; LINS, 2017; DURAK; DEPCIUCH, 2020).

A presença de determinados grupos funcionais, os estados e mudanças por interações podem ser monitorados ao analisar a posição e intensidade das bandas de absorção constitui a técnica como imprescindível na análise biológica (OJEDA; DITTRICH, 2012). A espécie *R. ferruginea* já foi monitorada por FTIR na avaliação da influência da radiação solar no desenvolvimento, mostrando-se viável com resultados significativos (LINS, 2017).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nos tópicos a seguir estão definidos os passos da metodologia do trabalho.

3.1 Preparação do Hidrogel

Diversos estudos citados na literatura apresentam técnicas diferentes desde à aplicação seca do polímero superabsorvente quanto com a preparação prévia do hidrogel e em variações quanto a quantidade aplicada (SOUSA *et al.*, 2013; MEWS *et al.*, 2015; NAVROSKI *et al.*, 2016; CARDOSO, 2017), no presente trabalho foi feita a preparação do hidrogel (Figura 16) antes da aplicação. O hidrogel foi preparado com mistura a 1% por meio da adição de 60 gramas de polímero superabsorvente em um volume de 6 litros de água (10 g/L).

Figura 16 - Polímero Superabsorvente (SAP)



Fonte: O Autor.

3.2 Coleta do Solo

O solo utilizado nas mudas transferidas dos tubetes foi coletado no município de Guararema-SP, especificamente nas coordenadas 23°24'18,72"S e 46°3'44,67"O, local onde está localizado o jardim experimental. O solo (Figura 17) foi coletado do horizonte orgânico do solo (O) com profundidade de até 30 cm e preparado com adição de 25% de esterco bovino curtido em relação à massa de solo utilizado por muda.

Figura 17 - Perfil do Solo Coletado



Fonte: O Autor.

3.3 Montagem do Experimento

As mudas foram divididas em Grupos de acordo com o período de transferência. O cultivo não foi realizado em estufa com intuito de simular as condições próximas do campo aberto. O período de incidência solar direto na área de manejo totalizou aproximadamente 8 horas por dia de forma uniforme em todas mudas avaliadas.

As mudas de Capororoca-Vermelha (*Rapanea ferruginea*) utilizadas na avaliação foram previamente cultivadas em estufa na UNIVAP em tubetes com 80% do solo proveniente das cavas de areia e 20% de esterco bovino curtido e estavam em uso no projeto de monitoramento da espécie (Número de Processo FAPESP: 2017/04013-0).

A irrigação das mudas foi mantida constante em todos os exemplares avaliados de todos os grupos (40 mL/dia) sendo apenas a presença de hidrogel o diferencial em relação às mudas controle.

3.3.1 Grupo I

O Grupo I consiste em um total de 8 mudas sendo 4 mudas preparadas com adição de hidrogel e 4 mudas sem o aditivo. As mudas foram transferidas no mês de junho de 2019 para sacos com capacidade de 3 kg de solo, foi necessário um período de um mês até a primeira coleta de folhas para análise por FTIR no mês de julho de 2019 para a adaptação das mudas ao novo jardim experimental. Em cada uma das 4 mudas com hidrogel foi adicionada uma quantidade de 10% de hidrogel (hidrogel se refere a solução à 1% supracitada) preparado em relação a massa de solo de cada muda, misturado de forma homogênea no solo.

3.3.2 Grupo II

O Grupo II foi preparado de acordo com o padrão adotado no Grupo I (4 mudas com e 4 sem o hidrogel), com intuito de verificar a reprodutibilidade estatística dos dados do Grupo I

e observar alterações de sazonalidade no cultivo. As mudas foram preparadas no mês de julho de 2019 e a primeira coleta para análise foi realizada no mês de agosto, também se respeitou o tempo de adaptação das mudas à nova localidade e tipo de solo. Da mesma forma adotada no Grupo I foi adicionado 10% de hidrogel em 4 mudas de forma homogênea.

3.3.3 Grupo III

O Grupo III foi preparado com intuito de verificar a influência de diferentes quantidades de hidrogel no solo sobre as mudas de *Rapanea ferruginea*. As mudas também foram obtidas do cultivo feito em estufa na UNIVAP transferidas para sacos com capacidade para 3 kg de solo.

Foi preparado um grupo experimental de 4 quantidades de hidrogel em triplicata, totalizando 12 mudas. A massa específica da solução de hidrogel apresenta o valor de 1,0073 g/cm³, portanto, próximo da massa específica da água, 1 kg de hidrogel equivale a 1 L. Na sequência hidrogel se refere à solução à 1%. As quantidades utilizadas foram:

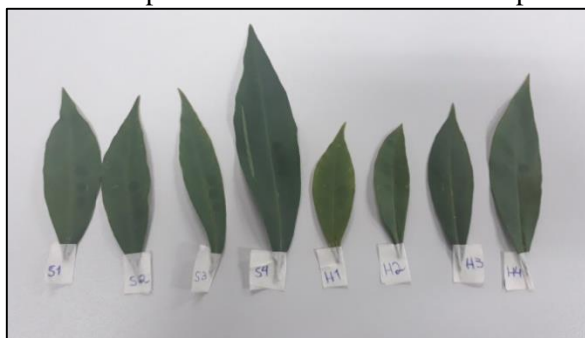
- 750 gramas de hidrogel: 25% de hidrogel.
- 600 gramas de hidrogel: 20% de hidrogel.
- 450 gramas de hidrogel: 15% de hidrogel.
- 300 gramas de hidrogel: 10% de hidrogel.

O solo foi coletado e preparado de acordo com metodologia adotada nos Grupos I e II. O hidrogel foi adicionado à massa de solo e misturado até a homogeneização de solo e hidrogel, as mudas foram então transferidas em triplicata para cada quantidade avaliada. As mudas foram preparadas em agosto de 2019, a primeira coleta para avaliação por FTIR foi feita em setembro de 2019. As mudas do Grupo III foram comparadas com exemplares do grupo controle do Grupo I.

3.4 Coleta das Folhas para Análise

Para cada coleta foi selecionada uma folha da parte superior das mudas para a análise por FTIR, desconsiderando-se folhas muito novas e com condições fitossanitárias adversas (LINS, 2017), as folhas (Figura 18) foram avaliadas na condição natural, com intuito de observar a influência direta da presença de água sobre os componentes estruturais avaliados.

Figura 18 - Exemplo das Amostras Identificadas para Análise



Fonte: O Autor.

As amostras foram devidamente identificadas e transportadas em sacos plásticos de acordo com o grupo avaliado, para evitar a perda de água no trajeto entre os municípios de Guararema, onde está localizado o jardim experimental e São José dos Campos, local das análises no Laboratório de Espectroscopia Vibracional no Infravermelho no Instituto de Pesquisa & Desenvolvimento (IP&D). A partir de março de 2020 por conta das dificuldades impostas pela pandemia de COVID-19, as coletas (Tabela 2) continuaram a ser feitas e as folhas foram armazenadas em baixa temperatura, de acordo com o procedimento citado na literatura (DEPCIUCH; DURAK, 2020) para a avaliação posterior a partir de agosto de 2020. Posteriormente foi observada influência do armazenamento sobre os espectros, no entanto, a análise comparativa ainda foi possível de ser feita.

Tabela 2 - Período de coleta

Nº	Meses	Grupos avaliados
1	Julho 2019	I
2	Agosto 2019	I e II
3	Setembro 2019	I, II e III
4	Outubro 2019	I, II e III
5	Novembro 2019	I, II e III
6	Dezembro 2019	I, II e III
7	Janeiro 2020	I, II e III
8	Fevereiro 2020	I, II e III
9	Março 2020	I, II e III
10	Abril 2020	I, II e III
11	Mai 2020	I, II e III
12	Junho 2020	I, II e III
13	Julho 2020	I, II e III
14	Agosto 2020	I, II e III
15	Setembro 2020	I, II e III

Fonte: O Autor.

As coletas sempre foram feitas em triplicata ($n= 3$) para a obtenção da média e desvio padrão de cada grupo. Além da avaliação por FTIR das folhas foi feito o acompanhamento do

desenvolvimento de altura e de número de folhas das mudas de todos os grupos. O período de coleta foi feito até que o limite de desenvolvimento foi atingido nas condições limitadas do experimento.

3.5 Preparação dos Espectros e Análise Estatística

Os espectros foram obtidos ao colocar as amostras de folhas diretamente no porta amostra do espectrofotômetro, com intuito de observar as condições próximas do ambiente natural, portanto, os espectros foram obtidos por meio de refletância total atenuada (ATR) e o único procedimento realizado foi a limpeza da superfície foliar com algodão e álcool 70%, para a retirada de impurezas que poderiam obstruir a obtenção de espectros de qualidade.

Foram processados 1164 espectros obtidos na faixa do infravermelho médio (MIR) de 4000 cm^{-1} a 450 cm^{-1} com resolução de 4 cm^{-1} e 32 varreduras à temperatura ambiente. Utilizou-se o espectrofotômetro *Spectrum Two* com transformada de Fourier (FTIR) e tecnologia de refletância atenuada (ATR) da *PerkinElmer* (Figura 19) adquirido com o projeto FAPESP Processo 2017/04013-0. Os espectros obtidos foram processados com o *software Spectrum 5.3* (*PerkinElmer*), com a realização de correções de linha de base, suavização espectral com o algoritmo *Savitsky Golay* (9 pontos), normalização e plotagem em absorbância.

Figura 19 - Espectrofotômetro Spectrum Two



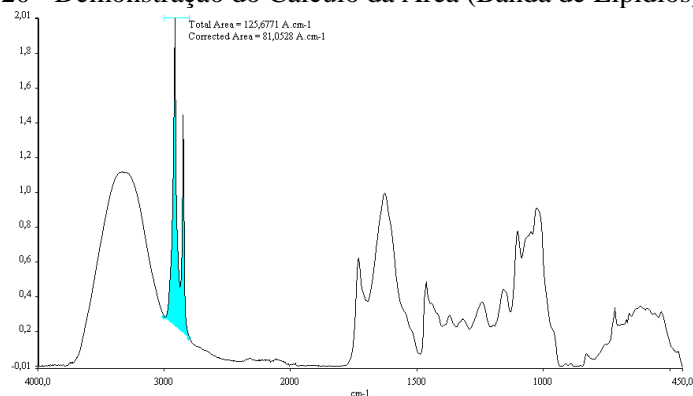
Fonte: O Autor.

Uma etapa importante na avaliação dos espectros é a definição de um padrão de análise na normalização que deve ser adotado em todos os grupos, para permitir a comparação estatística dos resultados. Observando-se as características dos espectros foi possível notar que a região espectral com a menor variação de intensidade compreende a faixa de 1680 cm^{-1} - 1620 cm^{-1} que corresponde à composição de proteínas (amida I) (BERTHOMIEU; HIENERWADEL, 2009), desta forma, adotou-se esta faixa como ideal para a normalização

como banda de referência com valor de uma unidade, dos espectros obtidos em todos os grupos avaliados.

De cada amostra de folha coletada foram obtidos espectros FTIR de 3 três diferentes pontos da superfície foliar. Para realizar o cálculo da média foi selecionado o espectro obtido do terceiro ponto de cada uma das folhas, este ponto foi escolhido por apresentar o espectro com a melhor definição. Os espectros médios foram obtidos utilizando-se o *software Spectrum 5.3*, a formatação foi realizada somente na etapa final para evitar a propagação de erros que poderiam afetar os dados da análise. A avaliação quantitativa foi realizada por meio do cálculo de áreas (Figura 20) das bandas em absorbância das faixas correspondentes às ligações químicas que estão presentes em diferentes compostos estruturais da planta e que possuem correlação direta com a área e a concentração de moléculas de material (KASIM, 2014).

Figura 20 - Demonstração do Cálculo da Área (Banda de Lipídios)



Fonte: O Autor.

Todos os grupos passaram pela análise da variação de áreas das bandas de água (3700 cm^{-1} - 3000 cm^{-1}), lipídios (3000 cm^{-1} - 2800 cm^{-1}), pectina (1770 cm^{-1} - 1693 cm^{-1}), parede celular ou celulose (1486 cm^{-1} - 1400 cm^{-1}), hemicelulose (1290 cm^{-1} - 1200 cm^{-1}), clorofila (1200 cm^{-1} - 1128 cm^{-1}), amido (1128 cm^{-1} - 1084 cm^{-1}) e lignina (735 cm^{-1} - 700 cm^{-1}), a banda de proteína (1693 cm^{-1} - 1486 cm^{-1}) foi definida como banda de referência (BERTHOMIEU; HIENERWADEL, 2009). Os dados obtidos após o processamento no *software Spectrum 5.3* assim como os dados obtidos da medição da altura e número de folhas foram plotados no *software Origin Pro 7.5* para a preparação dos gráficos e cálculos das retas de ajuste dos dados.

A grande quantidade de dados obtidos demanda um processamento estatístico para a melhor compreensão dos resultados. A análise dos componentes principais (*Principal Component Analysis* - PCA) permite a redução dos dados matriciais à menor matriz ortogonal de acordo com a covariância ou correlação dos dados (BRO; SMILDE, 2014). A matriz obtida

pode ser submetida à análise multivariada para classificar as variáveis em grupos de acordo com a similaridade estatística (DOS SANTOS GRASEL *et al.*, 2016).

Os espectros obtidos foram avaliados por análise multivariada no *software MiniTab 17* com objetivo de observar quais regiões apresentaram diferenças significativas na estrutura biomolecular da Capororoca-Vermelha proporcionadas pela influência do uso do hidrogel. Os dados foram diferenciados por covariância com utilização do método aglomerativo de Ward para avaliar a distância estatística entre os grupos. Além da análise multivariada também foi feito o teste de hipótese de Mann-Whitney para observar se a diferença estatística entre os espectros obtidos foi significativa.

3.6 Experimento de Avaliação da Germinação

Foi montado o experimento para avaliar a influência de diferentes quantidades de hidrogel no substrato sobre a germinação da Capororoca-Vermelha (*Rapanea ferruginea*) e sobre as espécies do mesmo estrato sucessional. As sementes de árvores possuem dormência que necessitam de diferentes formas de tratamento para a quebra antes do processo de plantio. Foi feito a quebra de dormência por meio da imersão em água por 24 horas.

Foram selecionados 4 tratamentos diferentes de acordo com a quantidade de hidrogel, seguindo a metodologia adotada no plantio do Grupo III, 25%, 20%, 15% e 10% de hidrogel adicionado no solo, também foi montado um tratamento sem hidrogel como controle. Para cada tratamento selecionou-se 370 sementes, as sementes foram cultivadas em jardineiras com capacidade para 2 kg de solo (Figura 21).

Figura 21 - Tratamentos para Teste de Germinação



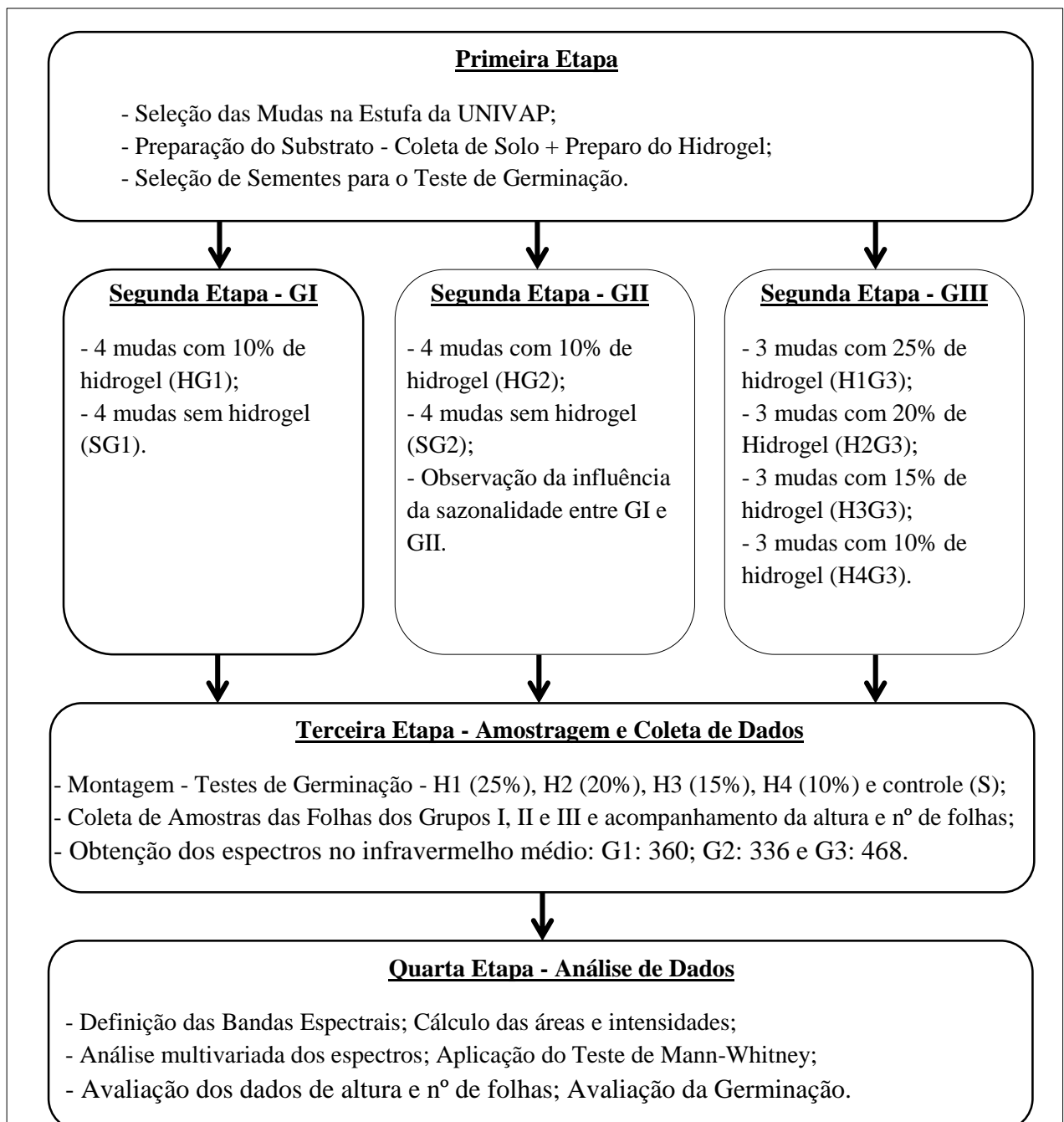
Fonte: O Autor.

A Capororoca-Vermelha (*Rapanea ferruginea*) é uma espécie nativa com taxa de germinação baixa, a emergência dos frutos ocorre após 30-60 dias (LORENZI, 2008). No ambiente natural a germinação é favorecida pelo consumo das sementes por animais principalmente aves, as sementes passam pelo trato digestivo facilitando a quebra do tegumento que propicia a germinação (PASCOTTO, 2007).

Portanto, devido à baixa taxa de germinação da Capororoca-Vermelha concomitantemente também foi feito o teste de germinação com a mesma metodologia nas espécies arbóreas Pau d'Alho (*Gallesia integrifolia*) e Jequitibá-Rosa (*Cariniana legalis*) que apresentam taxa de germinação maior, entre 50% e 80% (LORENZI, 2008). O estudo foi feito com intuito de observar a influência do hidrogel sobre espécies nativas que ocorrem em estratos florestais similares ao da Capororoca-Vermelha e utilizadas nos processos de recuperação ambiental.

Na Figura 22 está disposto o fluxograma com o resumo das atividades realizadas na metodologia do trabalho até os resultados discutidos na sequência.

Figura 22 - Fluxograma das Etapas da Metodologia aos Resultados e Discussão





Resultados e Discussão

- Análise comparativa de dados dos principais meses de monitoramento das mudas com hidrogel em relação ao controle nos Grupos I, II e III;
- Discussão dos dados obtidos com trabalhos de referência.

O Autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As amostras foliares dos Grupos I, II e III foram submetidas à avaliação por espectroscopia no infravermelho médio com Transformada de Fourier (FTIR). O monitoramento do desenvolvimento das biomoléculas da Capororoca-Vermelha foi feito por meio do cálculo das áreas das bandas correspondentes (Tabela 3).

Tabela 3 - Atribuição Aproximada das Faixas de Biomoléculas Avaliadas

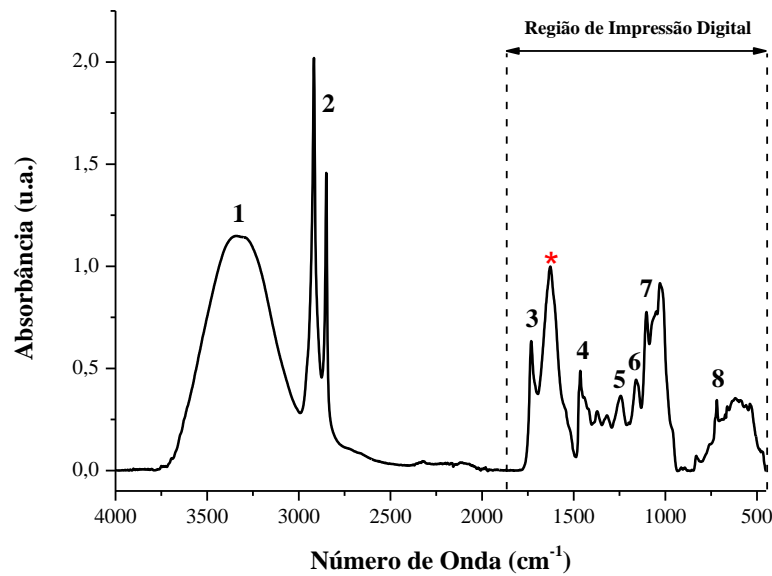
Nº	Faixa (cm ⁻¹)	Atribuição Aproximada	Componentes	Referências
1	3700-3000	v da ligação O-H	Água (Umidade)	Gorgulu et al. (2007)
2	3000-2800	v _{ass} da ligação C-H no grupo -CH ₂ v _s da ligação C-H no grupo -CH ₂	Lipídios	Gorgulu et al. (2007)/ Depciuch et al. (2017)
3	1770-1693	v da ligação C=O no grupo éster	Pectina	Gorgulu et al. (2007)/Sato et al. (2011)
4	1486-1400	δ _{ass} da ligação C-H no grupo -CH ₃ δ _s da ligação C-H no grupo -CH ₂	Parede Celular (Celulose)	Dokken & Davis (2007)/Depciuch et al. (2017)
5	1290-1200	v da ligação C-N e δ da ligação N-H	Hemicelulose ou Celulose (Amida III)	Gorgulu et al. (2007)/ Depciuch et al. (2017)
6	1200-1128	v _{ass} da ligação C-O no grupo -COOH	Clorofila	Luz (2005)
7	1128-1084	v da ligação C-O	Amido (Polissacarídeos)	Thumanu et al. (2014)/Depciuch et al. (2017)
8	735-700	δ _{ass} da ligação -CH ₂ no plano - "rocking"	Lignina (Anéis)	Dokken & Davis (2007)

Legenda: v: Estiramento. v_s: Estiramento simétrico. v_{ass}: Estiramento assimétrico. δ: Deformação angular. δ_s: Deformação angular simétrica. δ_{ass}: Deformação angular assimétrica.

Fonte: Adaptado de Lins (2017).

Os números correspondem na Figura 23 às bandas que as áreas foram calculadas descritas na Tabela 3, o asterisco vermelho marca a banda de proteínas (amida I) que foi utilizada para normalizar os espectros (BERTHOMIEU; HIENERWADEL, 2009).

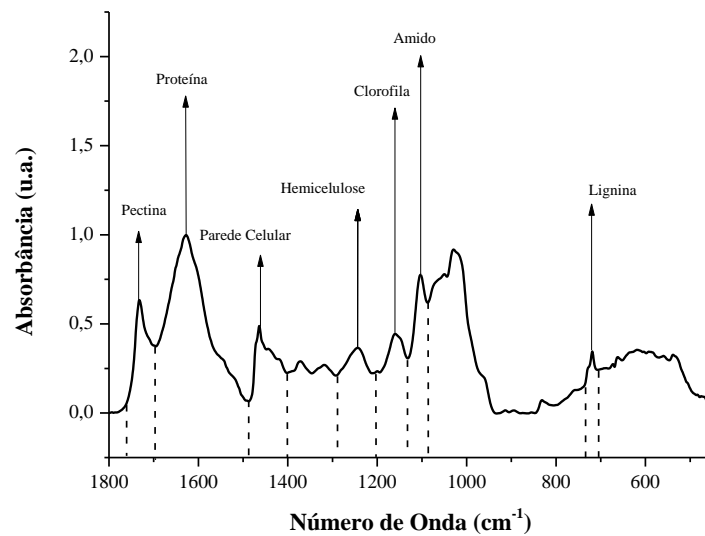
Figura 23 - Espectro Infravermelho da Capororoca-Vermelha com Atribuições



Fonte: Adaptado de Lins (2017).

As bandas foram escolhidas por apresentar boa resposta de intensidade no espectro infravermelho que permite a rápida avaliação, sendo ideal para monitorar alterações provocadas por fatores externos do ambiente sobre as plantas (DEPCIUCH et al., 2017). Na de impressão digital (Figura 24) estão localizados os metabólitos primários que indicam crescimento e secundários que respondem às alterações ambientais externas (BARBOSA, 2007).

Figura 24 - Região de Impressão Digital - Zoom

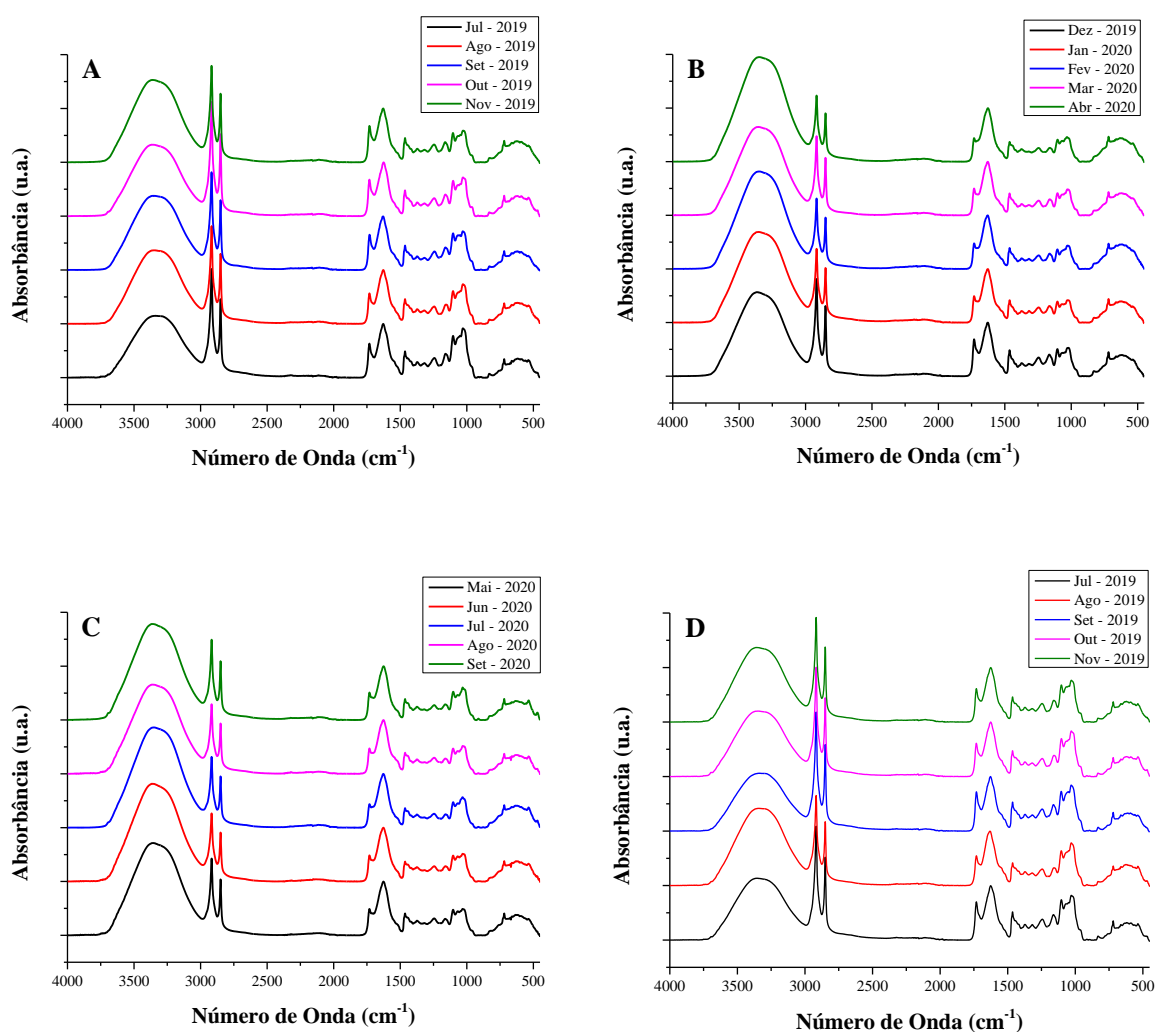


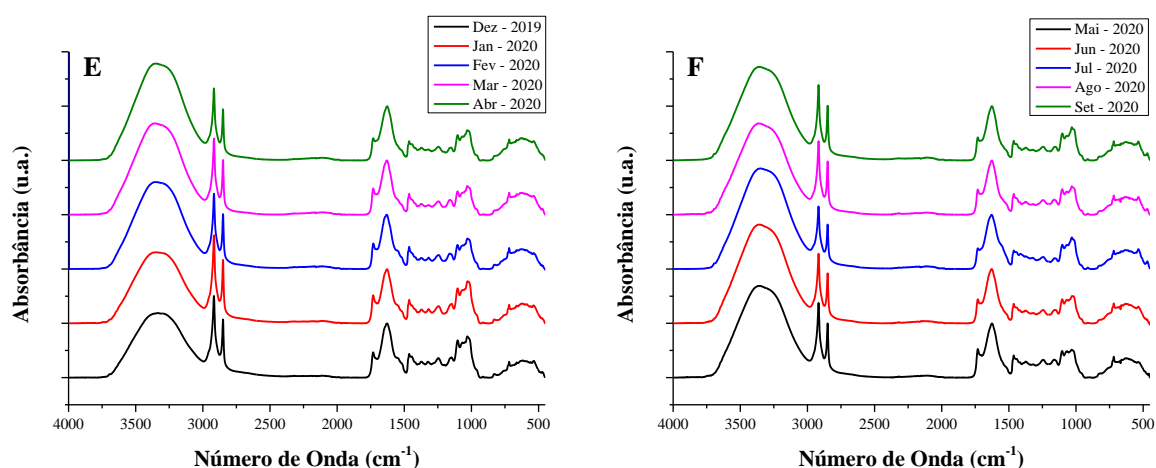
Fonte: Adaptado de Lins (2017).

4.1 Avaliação das Mudanças de Capororoça-Vermelha - Grupo I

O Grupo I foi o primeiro a ser preparado, as coletas para análise totalizaram 15 meses de monitoramento de julho de 2019 a setembro de 2020. Foram obtidos 360 espectros das 8 mudas (4 com hidrogel - HG1 e 4 sem hidrogel - SG1) no período total, a avaliação foi feita em triplicata ($n = 3$) para cada exemplar de Capororoça-Vermelha. Os espectros obtidos apresentaram boa reprodutibilidade das bandas analisadas tanto nos exemplares com hidrogel (Figuras 25A, 25B e 25C) quanto nos controles (Figuras 25D, 25E e 25F) que permitiu a quantificação e comparação das áreas obtidas.

Figura 25 - Espectros Médios: A - HG1 - Jul/Nov; B - HG1 - Dez/Abr; C - HG1 - Mai/Set; D - SG1 - Jul/Nov; E - SG1 - Dez /Abr; F - SG1 - Mai/Set





Fonte: O Autor.

4.1.1 Avaliação das Áreas Biomoleculares - Grupo I

O desenvolvimento vegetal é influenciado por diversos fatores internos e externos intrinsecamente correlacionados às estações climáticas, sendo marcados por ciclos (LARCHER, 2000). Foi feito o cálculo das áreas de bandas indicadoras do desenvolvimento vegetal das mudas com hidrogel (Tabela 4) e mudas controle (Tabela 5) nos meses onde se observou uma oscilação típica do crescimento em sistemas biológicos.

Tabela 4 - Áreas de Principais Componentes - Mudanças com Hidrogel (HG1) - Grupo I

Mês - Área (u.a.)	Água	Lipídios	Pectina	Parede Celular	Hemicelulose	Clorofila	Amido	Lignina
Jul 2019	379,93	81,30	11,04	13,96	5,50	4,67	5,71	1,94
Ago 2019	466,97	71,48	8,59	13,18	4,98	4,09	4,40	1,85
Set 2019	467,57	71,10	10,38	12,25	4,79	4,56	4,62	1,84
Out 2019	444,39	84,95	11,45	14,15	4,89	5,78	5,43	2,01
Nov 2019	515,74	70,52	10,67	12,33	4,51	5,41	4,26	1,90
Dez 2019	535,46	74,34	11,05	13,28	4,29	6,29	3,99	2,36
Jan 2020	579,29	51,60	5,85	10,67	3,64	4,74	2,94	2,07
Fev 2020	624,69	48,81	5,44	10,68	3,54	4,54	2,82	2,04
Mar 2020	564,81	56,54	6,35	11,20	4,06	4,57	2,99	1,98
Abr 2020	658,02	43,21	4,63	10,00	2,66	2,56	2,68	1,90
Mai 2020	576,80	52,40	6,22	10,48	3,33	2,71	3,15	1,91
Jun 2020	615,43	46,56	5,81	9,47	3,09	2,40	3,04	1,60
Jul 2020	636,07	47,45	4,83	10,07	3,18	2,15	3,34	1,66
Ago 2020	560,06	48,39	5,51	10,14	3,11	2,25	3,47	1,60
Set 2020	603,15	55,76	6,83	11,15	2,82	2,71	4,12	1,79

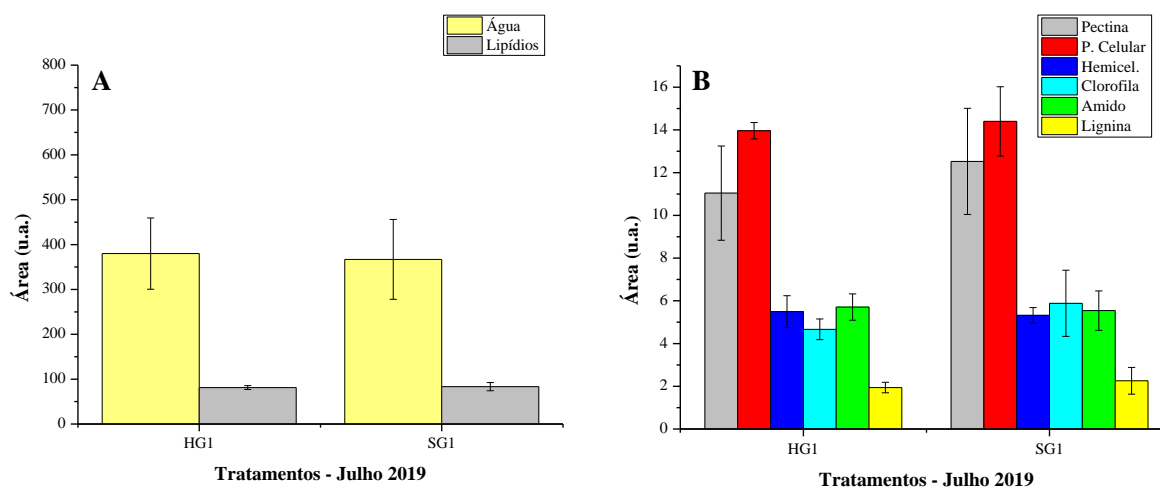
Fonte: O Autor.

Tabela 5 - Áreas de Principais Componentes - Mudanças sem Hidrogel (SG1) - Grupo I.

Mês - Área (u.a.)	Água	Lipídios	Pectina	Parede Celular	Hemicelulose	Clorofila	Amido	Lignina
Jul 2019	366,97	83,25	12,53	14,40	5,32	5,88	5,54	2,26
Ago 2019	452,32	65,75	7,89	12,11	4,88	3,22	5,05	1,61
Set 2019	348,48	88,14	12,56	14,79	5,27	5,70	5,43	2,14
Out 2019	400,60	81,09	10,11	13,85	5,18	4,70	5,36	1,87
Nov 2019	462,78	76,03	9,67	13,34	5,17	4,80	4,94	1,91
Dez 2019	391,85	61,43	6,58	11,83	3,95	2,02	4,65	1,38
Jan 2020	439,49	65,01	7,49	11,66	4,66	3,37	4,44	1,59
Fev 2020	540,75	50,99	5,35	10,79	3,83	3,88	3,05	1,81
Mar 2020	575,91	52,71	5,68	10,67	3,63	3,96	3,32	1,73
Abr 2020	609,68	46,63	4,26	9,78	3,28	2,40	3,57	1,45
Mai 2020	576,31	51,87	7,08	10,54	3,20	2,95	2,76	1,85
Jun 2020	605,51	45,06	4,73	9,14	2,87	2,37	2,87	1,58
Jul 2020	625,96	38,62	3,13	8,07	2,64	1,40	3,30	1,28
Ago 2020	567,49	50,11	5,48	10,02	2,80	2,64	3,47	1,56
Set 2020	583,12	49,40	4,79	10,01	2,90	2,51	3,89	1,49

Fonte: O Autor.

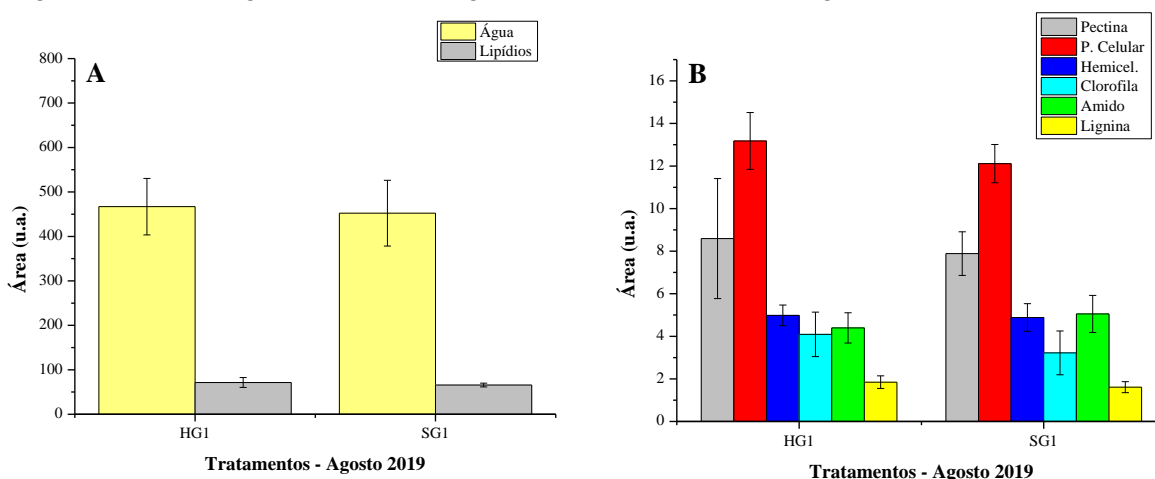
Adotou-se a análise comparativa dos principais meses de variação a fim de discutir como as bandas dos espectros FTIR da Capororoca-Vermelha foram influenciadas pelo uso do hidrogel e como o desenvolvimento destas bandas ocorreram nos meses de acordo com a variação estacional. Foi comparada a situação inicial no primeiro mês de monitoramento do Grupo I (Julho de 2019). Devido a diferença de escala os gráficos das áreas calculadas estão separados (Figuras 26A e 26B).

Figura 26 - Áreas - Julho 2019: A - Região 3800 a 2800 cm^{-1} ; B - Região 1800 a 450 cm^{-1} 

Fonte: O Autor.

Em Julho de 2019 observou-se que as maiores áreas de bandas calculadas foram das mudas controle com exceção apenas das bandas de água e hemicelulose. Este resultado está relacionado à adaptação inicial das mudas às novas condições do substrato (NAVROSKI et al., 2016). As mudas foram transferidas de um substrato sem hidrogel e separadas em grupos, onde a presença do hidrogel foi um fator diferencial que permitiu resposta diferente nas bandas biomoleculares dos espectros FTIR da Capororoca-Vermelha. Importante salientar que a banda de água foi 3,53% maior nas mudas com hidrogel logo no primeiro mês, sugerindo que o uso do hidrogel proporcionou maior absorção hídrica que refletiu no desenvolvimento do mês seguinte (Figuras 27A e 27B).

Figura 27 - Áreas Agosto 2019: A - Região 3800 a 2800 cm^{-1} ; B - Região 1800 a 450 cm^{-1}



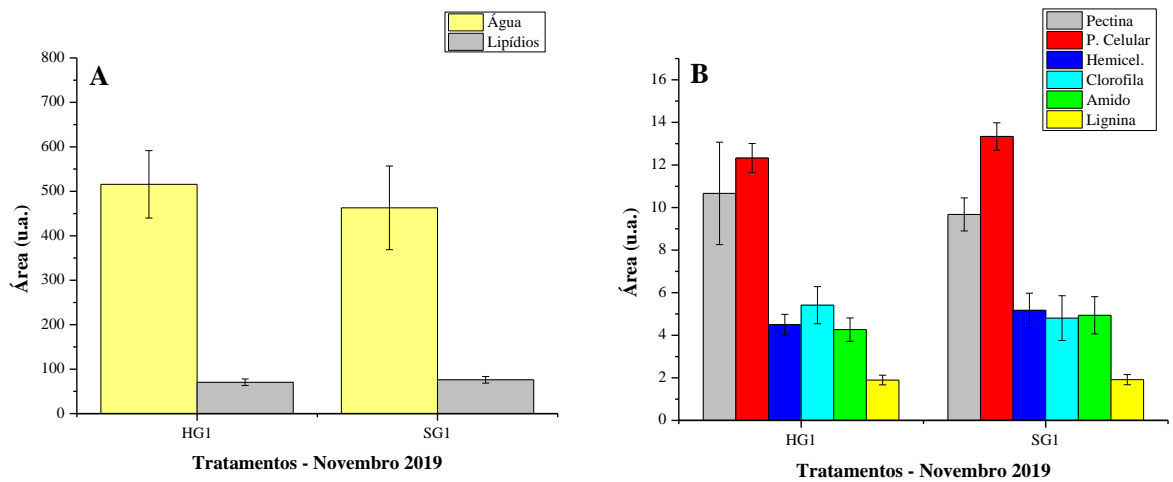
Fonte: O Autor.

Em agosto começa a alteração climática da transferência do inverno para a primavera, com mudanças na temperatura e incidência solar que influenciam no desenvolvimento vegetal (LARCHER, 2000). Portanto, foi importante observar como o crescimento das bandas se diferenciou nas mudas com e sem hidrogel neste período. Os resultados demonstram que as mudas com hidrogel se adaptaram às novas condições e superaram quantitativamente os valores de área das bandas do grupo controle, com exceção apenas da banda de amido.

As bandas com área percentualmente maiores em HG1 foram as da água (3,24%), lipídios (8,71%), pectina (8,97%), parede celular (8,81%), hemicelulose (2,04%), clorofila (26,95%) e lignina (14,61%). As mudas com hidrogel responderam melhor às novas condições climáticas, sendo que a banda de clorofila apresentou o melhor desenvolvimento, portanto, um resultado que sugere melhor aproveitamento da incidência solar e melhor crescimento (KUMAR *et al.*, 2015). O ciclo de desenvolvimento da Capororoca-Vermelha no Grupo I alternou em oscilações de queda e aumento das bandas de 1 a 2 meses nas mudas com hidrogel,

nos meses de setembro e outubro ocorreram variações similares aos meses de julho e agosto, com redução em setembro seguida de recuperação em outubro. Em novembro no período de transição da primavera para o verão houve nova redução nas áreas das mudas com hidrogel (Figuras 28A e 28B), no entanto com menor intensidade.

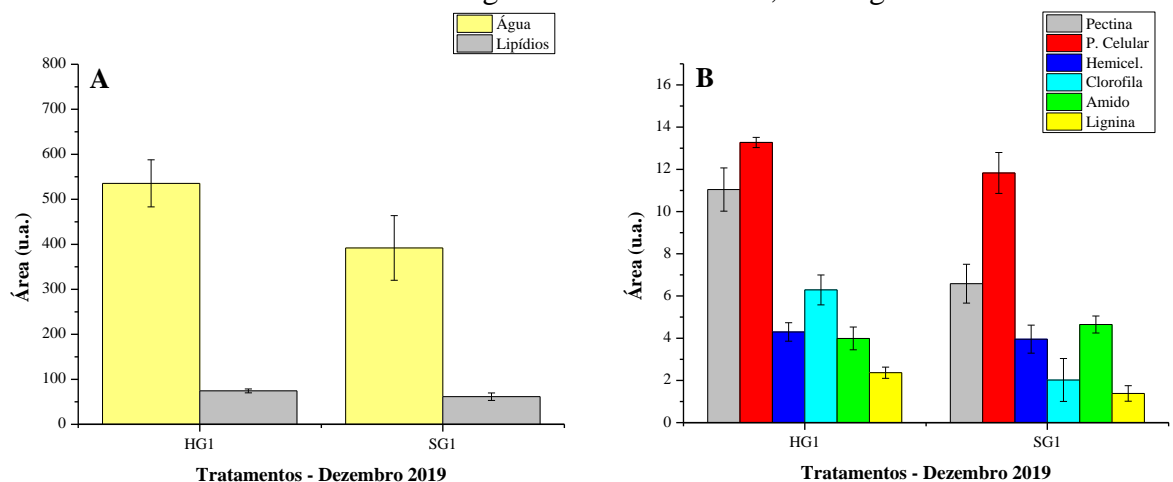
Figura 28 - Áreas Novembro 2019: A - Região 3800 a 2800 cm^{-1} ; B - Região 1800 a 450 cm^{-1}



Fonte: O Autor.

Houve quedas nas áreas das bandas em HG1 com exceção das bandas de água, pectina e clorofila que foram 11,44%, 10,26% e 12,66% respectivamente maiores do que as mudas controle. Importante observar que o desenvolvimento da clorofila permaneceu melhor nas mudas com hidrogel que garantiu um melhor crescimento e adaptação ao início do verão como os dados do mês de dezembro sugeriram na sequência (Figura 29A e 29B).

Figura 29 - Áreas Dezembro 2019: A - Região 3800 a 2800 cm^{-1} ; B - Região 1800 a 450 cm^{-1}

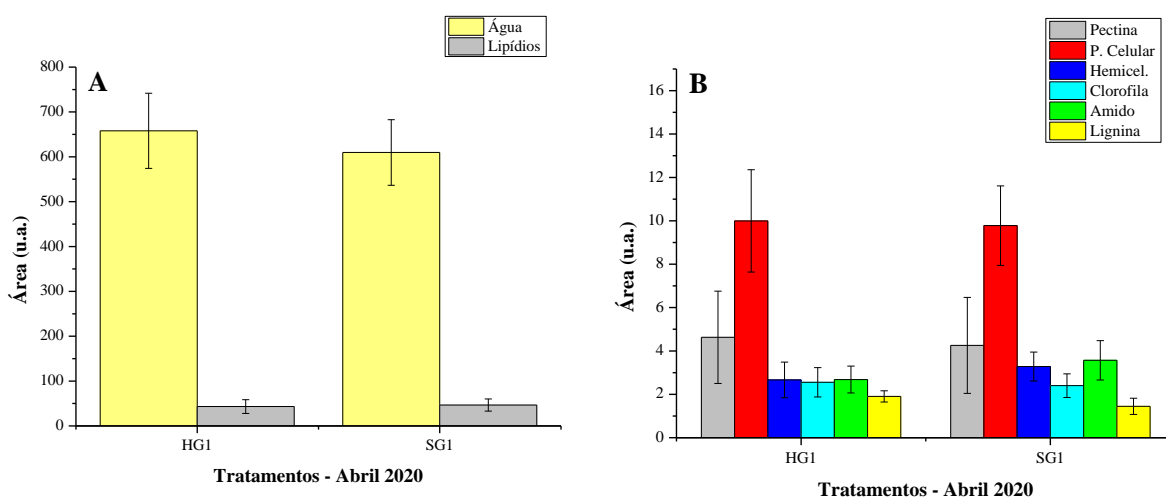


Fonte: O Autor.

O mês de dezembro marca o início do verão com maiores temperaturas e maior evapotranspiração que pode afetar o desenvolvimento vegetal em condições de restrição hídrica (LARCHER, 2000). Os resultados obtidos sugerem que o uso do hidrogel manteve o aproveitamento hídrico da Capororoca-Vermelha permitindo um melhor desenvolvimento biomolecular. As bandas que apresentaram maior área percentual em relação ao controle foram as de água (36,65%), lipídios (21,02%), pectina (67,78%), parede celular (12,21%), hemicelulose (8,62%), clorofila (211,08%) e lignina (70,92%).

A absorção hídrica permaneceu alta durante toda a estação do verão como as áreas maiores da banda de água sugeriram no período de dezembro a março de 2020. A banda de clorofila também se destacou na estação do verão indicando melhor atividade fotossintética nas mudas com hidrogel. Após o período do verão houve redução na transferência para o outono em abril de 2020, porém menos acentuada que a queda de novembro como indicam os gráficos das áreas das bandas (Figuras 30A e 30B).

Figura 30 - Áreas Abril 2020: A - Região 3800 a 2800 cm^{-1} ; B - Região 1800 a 450 cm^{-1}

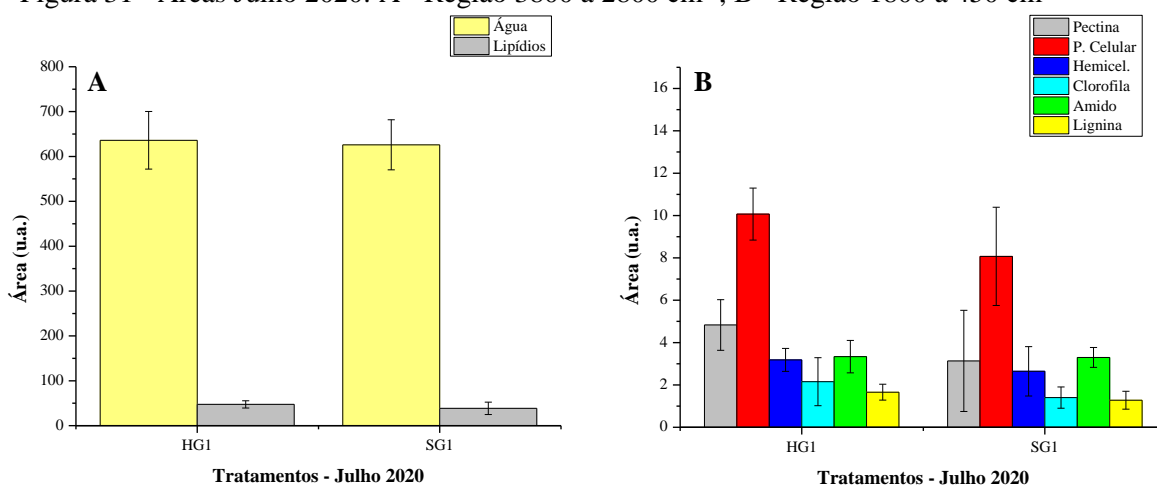


Fonte: O Autor.

Em abril ocorreu uma redução geral no patamar das áreas das bandas de ambos os grupos em comparação ao período de julho de 2019 a fevereiro de 2020, este fenômeno pode estar relacionado a mudança estacional do verão para o outono combinado ao método de coleta e armazenamento adotado a partir de março devido às dificuldades impostas pela pandemia. As amostras coletadas *in natura* foram guardadas na temperatura de 4°C para reduzir a degradação conforme o método citado na literatura (DURAK; DEPCIUCH, 2020). Inicialmente foi observado pouca alteração nas bandas, no entanto, após a análise comparativa nos meses foi percebido uma redução nas áreas.

Apesar do imprevisto na avaliação a comparação entre os grupos ainda mostrou diferenças entre os tratamentos em abril já que todas as amostras foram avaliadas da mesma forma. Em abril houve redução nas bandas de lipídios (7,34%), hemicelulose (18,84%) e amido (24,86%) nas mudas com hidrogel, porém o desenvolvimento percentual das áreas foi positivo nas bandas de água (7,93%), pectina (8,70%), parede celular (2,22%), clorofila (6,56%) e lignina (31,55%) indicando boa adaptação das mudas com hidrogel à mudança estacional. A variação das bandas se manteve relativamente estável na estação de outono e na mudança para o inverno apresentando bom resultado em Julho de 2020 (Figuras 31A e 31B).

Figura 31 - Áreas Julho 2020: A - Região 3800 a 2800 cm^{-1} ; B - Região 1800 a 450 cm^{-1}



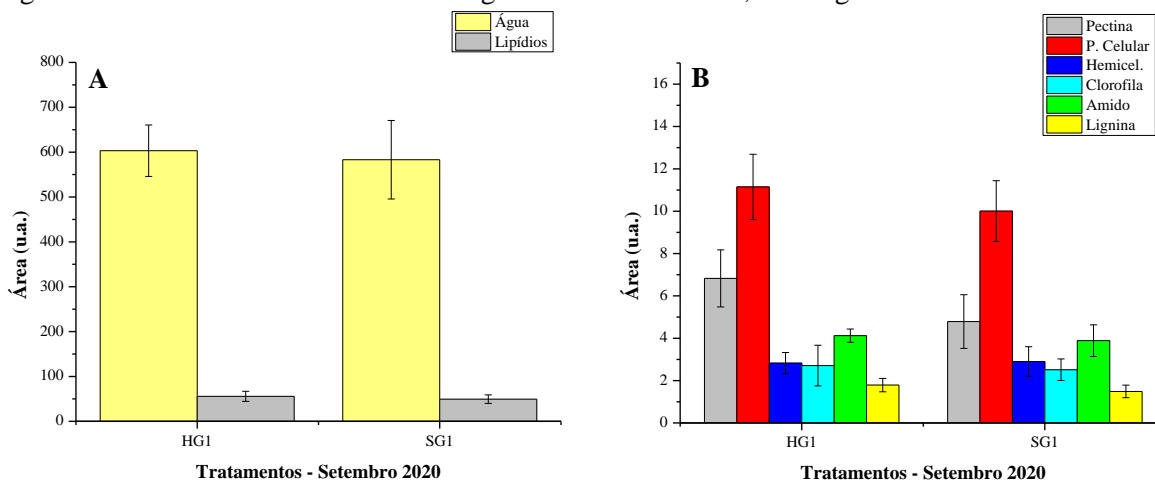
Fonte: O Autor.

Todas as bandas avaliadas apresentaram percentual de área maior do que o grupo controle em julho, a banda de água (1,62%), lipídios (22,88%), pectina (54,13%), parede celular (24,73%), hemicelulose (20,31%), clorofila (53,64%), amido (1,15%) e lignina (29,55%). O resultado em julho demonstra a melhor capacidade de resiliência às alterações estacionais nas mudas cultivadas com hidrogel no Grupo I, a banda de clorofila permaneceu maior indicando que o mecanismo de fotossíntese foi menos afetado com a diminuição da incidência solar no inverno refletindo em um melhor desenvolvimento biomolecular na Capororoca-Vermelha.

Dentre todas as biomoléculas avaliadas que apresentaram resultados positivos em julho também se destaca a pectina, que é um importante composto celular envolvido em diversos processos de crescimento celular que indica a integridade e a rigidez dos tecidos vegetais e por ser um composto aniônico, está ligada ao processo de transporte de nutrientes intimamente relacionado à capacidade de retenção de água (VORAGEN *et al.*, 2009). A banda de pectina apresentou ótimo desenvolvimento nas mudas cultivadas com hidrogel sendo maior que o controle em 11 dos 15 meses monitorados que indica que o processo de transporte foi melhor

com o hidrogel. O desenvolvimento das bandas permaneceu positivo na transição para a primavera até o fim do monitoramento em setembro (Figura 32A e 32B).

Figura 32 - Áreas Setembro 2020: A - Região 3800 a 2800 cm^{-1} ; B - Região 1800 a 450 cm^{-1}



Fonte: O Autor.

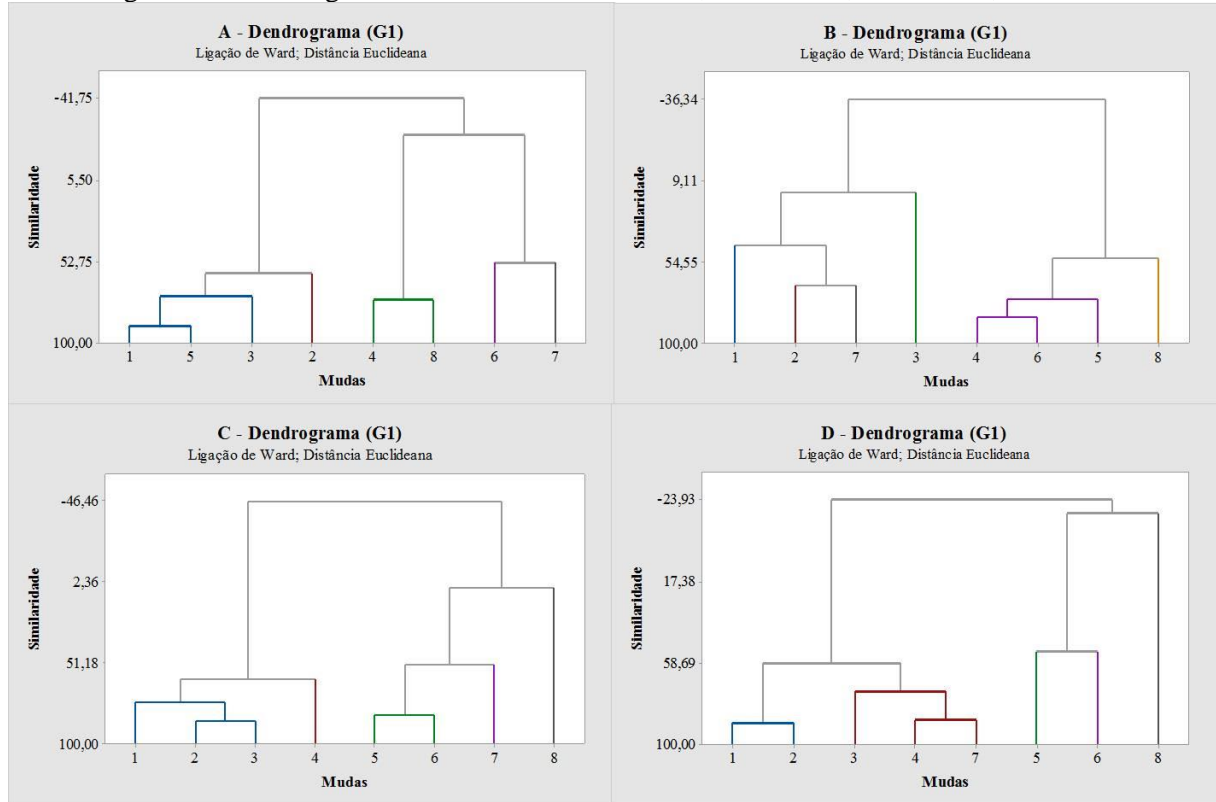
Mesmo após mais de um ano de monitoramento foi observado melhor desenvolvimento nas bandas das mudas com hidrogel em setembro. As bandas percentualmente maiores foram a de água (3,43%), lipídios (12,87%), pectina (42,60%), parede celular (11,39%), clorofila (7,82), amido (6,07%) e lignina (20,16%), apenas a banda de hemicelulose reduziu (2,66%). Os resultados do monitoramento sugeriram um melhor desenvolvimento de biomoléculas nas mudas cultivadas com hidrogel, todas as bandas avaliadas apresentaram bom desempenho em grande parte dos meses, porém as bandas biomoleculares marcadoras no Grupo I foram a de clorofila e pectina. A absorção hídrica foi maior em HG1 e houve influência direta sobre a banda de água.

4.1.2 Análise Multivariada - Grupo I

Os espectros obtidos no Grupo I foram submetidos à análise multivariada, foram selecionadas cada uma das três repetições para cada mês de avaliação. As bandas selecionadas para a análise corresponderam às faixas das biomoléculas de lipídios, pectina, parede celular, hemicelulose, clorofila, amido e lignina, apenas a banda de água foi retirada devido a maior variação entre os meses. Foi feita a análise dos componentes principais para reduzir os dados à menor matriz ortogonal com significatividade de diferença de covariância (BRO; SMILDE, 2014). Os resultados dos meses de julho a setembro de 2019 apresentaram uma alta dispersão sem separar os grupos de acordo com a presença e ausência de hidrogel, no período de outubro

de 2019 a janeiro de 2020 ocorreu uma leve tendência de equilíbrio com separação parcial das mudas em grupos (Figura 33 A à D).

Figura 33 - Dendrogramas HG1 x SG1: A - Out/19; B - Nov/19; C - Dez/19; D - Jan/20



Legenda: Mudas = Com Hidrogel (1, 2, 3 e 4) - Sem Hidrogel (5, 6, 7 e 8)

Fonte: O Autor.

No mês de outubro (Figura 33A) houve a formação de um grupo entre as mudas com hidrogel 1, 2 e 3. No entanto, o exemplar sem hidrogel 5 se misturou ao grupo apresentando 90,03% de similaridade a muda 1. A semelhança entre a muda 1 e 3 foi de 72,96% e de 59,65% entre os exemplares 2 e 3. Em novembro (Figura 33B) o grupo se manteve, porém a muda 7 sem hidrogel apresentou semelhança à muda 2 (67,40%), as mudas 1 e 2 apresentaram similaridade de 44,81% e o exemplar 3 se assemelhou levemente à 1 (15,98%).

Em dezembro (Figura 33C) os grupos separaram, as mudas 2 e 3 se assemelharam em 86,62% e ambas tiveram 74,86% de semelhança à muda 1 que por sua vez foi 60,62% similar à 4. Em janeiro (Figura 33D) a dispersão aumentou e a muda 7 sem hidrogel agrupou com 87,30% de similaridade à 4, os exemplares 1 e 2 apresentaram 88,87% de similaridade entre si e ambas se assemelharam 58,72% à 3 que por sua vez teve 73,27% de semelhança à 4 e 7. Na sequência dos meses de monitoramento as mudas voltaram a se espalhar em grupos com menor definição, apesar de ter mostrado uma progressão à um equilíbrio entre setembro a janeiro não é possível afirmar que a separação ainda que parcial tenha sido ocasionada pela presença do

hidrogel, a avaliação das áreas das bandas no tópico anterior demonstrou de forma mais clara as diferenças do desenvolvimento das mudas com hidrogel em comparação ao controle no Grupo I.

4.1.3 Teste de Mann-Whitney - Grupo I

Existem diversos testes estatísticos para avaliar a significatividade da diferença entre duas distribuições de dados. Para definir a aplicabilidade é necessário avaliar o tipo de distribuição (PIMENTEL-GOMES, 2015). As faixas do espectro adotadas na análise multivariada foram submetidas ao teste de normalidade no *software MiniTab 17*, os resultados obtidos indicaram que a distribuição dos dados dos espectros foi não-normal ($p < 0,05$).

Para analisar uma distribuição não-normal é necessário empregar métodos de análise não-paramétricos como o Teste de Mann-Whitney que permite comparar as distribuições a partir da diferença entre as medianas dos dados (PIMENTEL-GOMES, 2015), e possui aplicabilidade para analisar dados de espectros FTIR (DURAK; DEPCIUCH, 2020). Portanto, se aplicou o Teste de Mann-Whitney comparando os espectros por mês obtendo-se os resultados da Tabela 6.

Tabela 6 - Teste de Mann-Whitney - Grupo I

Meses	Valor P (H x S)
Jul - 2019	0,014*
Ago - 2019	0,286
Set - 2019	0,000*
Out - 2019	0,423
Nov - 2019	0,610
Dez - 2019	0,038*
Jan - 2020	0,012*
Fev - 2020	0,477
Mar - 2020	0,000*
Abr - 2020	0,011*
Mai - 2020	0,000*
Jun - 2020	0,000*
Jul - 2020	0,000*
Ago - 2020	0,000*
Set - 2020	0,000*

*Diferença Significativa ($p < 0,05$)

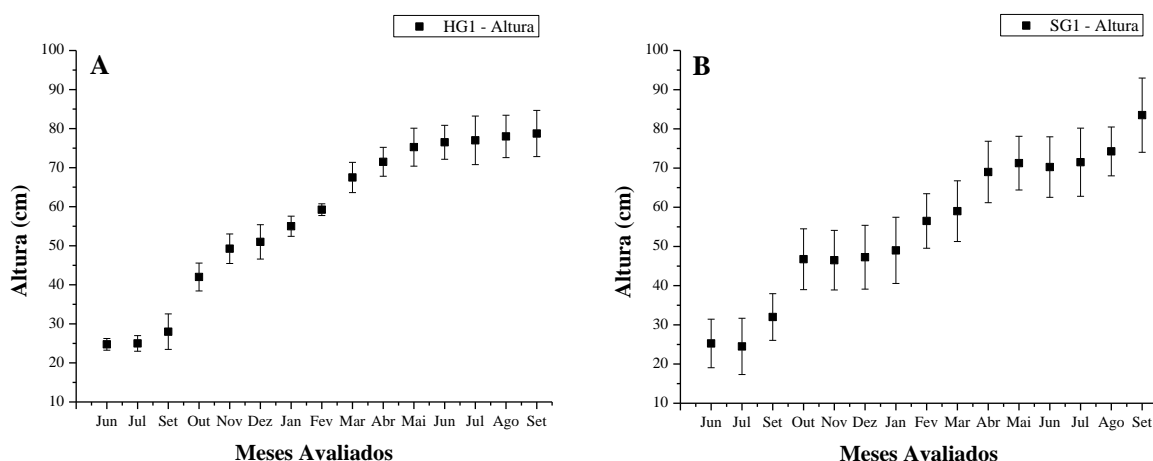
Fonte: O Autor.

A comparação dos meses indicou diferença significativa nos espectros do Grupo I ($p < 0,05$) na maior parte dos meses de monitoramento com exceção apenas de agosto, outubro, novembro e fevereiro. Assim como na análise multivariada o resultado do Teste de Mann-Whitney aponta a diferença estatística, porém não permite observar quais as causas, sendo uma análise complementar a avaliação das áreas biomoleculares que feita anteriormente.

4.1.4 Avaliação da Altura e Número de Folhas - Grupo I

O Grupo I teve a altura acompanhada desde de junho de 2019, antes da transferência para o local do experimento em julho. A altura média de HG1 era de 24,75 cm em junho de 2019, o dobro da altura foi atingido em novembro, 49,3 cm contra 46,5 cm de SG1, dois meses antes que as mudas sem hidrogel alcançaram a mesma marca. O hidrogel proporcionou uma maior disponibilidade hídrica que permite um melhor desenvolvimento com menor impacto sobre as funções fisiológicas (LARCHER, 2000). O padrão de crescimento das mudas com e sem hidrogel estão dispostos nas Figuras 34A e 34B respectivamente.

Figura 34 - Padrão de Crescimento: A - HG1; B - SG1



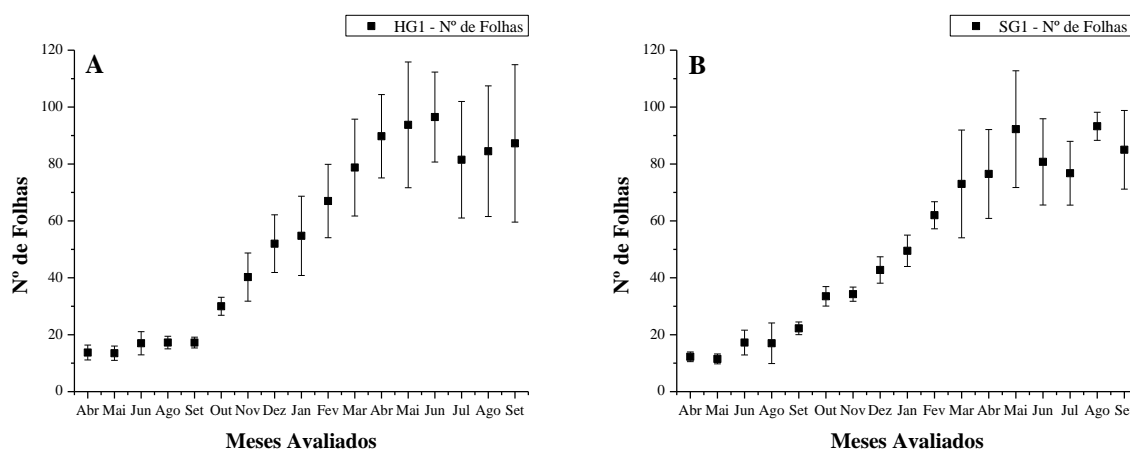
Fonte: O Autor.

O crescimento percentual das mudas com hidrogel no período de junho de 2019 a setembro de 2020 foi de 218,18% enquanto que as mudas sem hidrogel apresentaram um aumento de 230,69%. O valor médio maior nas mudas sem hidrogel foi proporcionado por um crescimento heterogêneo entre agosto e setembro de 2020, entretanto, até agosto o grupo com hidrogel apresentava um maior desenvolvimento percentual 215% contra 194% do grupo sem hidrogel e o limite do desenvolvimento foi notado a partir de maio de 2020. O grupo com

hidrogel apresentou um desenvolvimento uniforme como o desvio padrão sugere, enquanto que as mudas sem hidrogel apresentaram maior heterogeneidade.

O desenvolvimento foliar começou a ser monitorado antes da transferência, enquanto as mudas ainda estavam na estufa na UNIVAP em abril de 2019. Nos gráficos da Figura 35 e é possível notar o período em que o limite de desenvolvimento foi atingido entre Maio e Junho assim como os gráficos de altura demonstraram nos grupos. Houve leve recuperação até setembro que demarcou o período de coleta de folhas para análise por FTIR.

Figura 35 - Desenvolvimento Foliar: A - HG1; B - SG1



Fonte: O Autor.

O desvio padrão do desenvolvimento de folhas em geral foi maior, resultado esperado considerando que em sistemas biológicos há diversos fatores que podem influenciar cada indivíduo (LARCHER, 2000). Nas mudas de Capororoça-Vermelha com hidrogel notou-se um maior crescimento de ramos que proporcionou um desvio maior do que o das mudas sem hidrogel a partir de novembro, o aparecimento de ramos foi mais tarde nas mudas controle. O pico de número de folhas foi atingido em junho com crescimento percentual de 601,82% nos exemplares com hidrogel e de 653,06% nas mudas sem hidrogel, o maior desenvolvimento nas mudas controle foi proporcionado pelo tardio aparecimento de ramos na fase final.

No período final do monitoramento na transferência do inverno para a primavera de 2020 ocorreu uma forte onda de calor que impactou as mudas, principalmente no desenvolvimento de folhas, após este impacto as mudas com hidrogel reagiram melhor na recuperação com um leve desenvolvimento positivo até setembro, enquanto os exemplares sem hidrogel apresentaram maior heterogeneidade.

O uso do hidrogel apresentou resultados positivos sobre o aspecto externo da Capororoça-Vermelha. Na Figura 36A é possível observar como logo no primeiro semestre de

monitoramento o volume de folhas, ramos e uniformidade do crescimento era maior do que o das mudas controle (Figura 36B), o padrão de crescimento permaneceu no segundo semestre nas mudas com hidrogel (Figura 36C), as mudas sem hidrogel só passaram a desenvolver mais ramos tardiamente como a Figura 36D indica.

Figura 36 - Aspecto Externo das Mudanças: A - HG1 (2019); B - SG1 (2019); C - HG1 (2020); D - SG1 (2020)



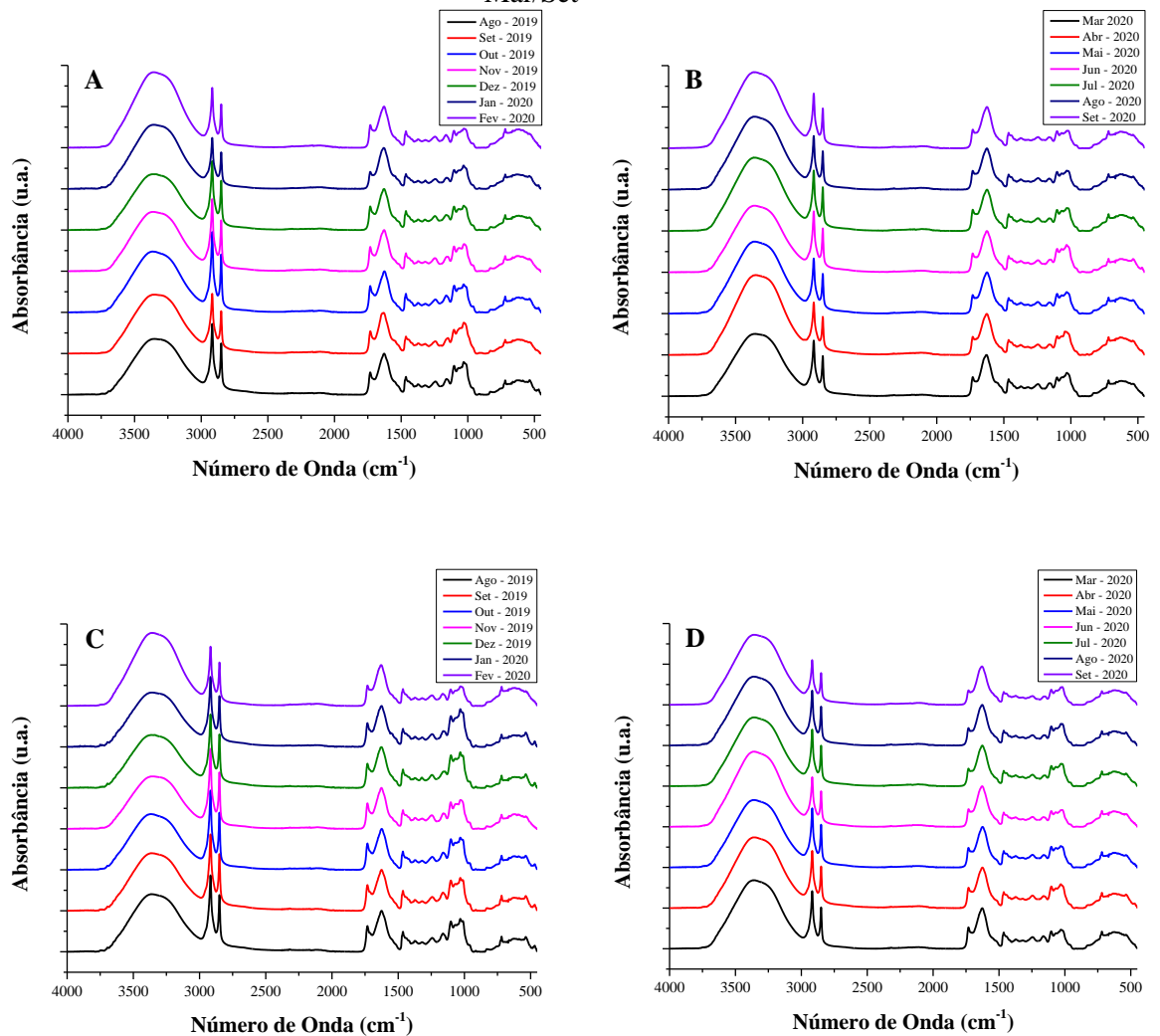
Fonte: O Autor.

A avaliação do desenvolvimento de mudas cultivadas com o uso de hidrogel geralmente é feito somente com o acompanhamento do crescimento de tecidos externos como as folhas e raízes, para calcular as massas úmidas e secas dos vegetais é necessário sacrificar os exemplares no estudo (MEWS *et al.*, 2015; NAVROSKI *et al.*, 2016). Os resultados obtidos na análise dos espectros infravermelho no Grupo I demonstraram como o desenvolvimento biomolecular da Capororoca-Vermelha foi melhor nas mudas com hidrogel, portanto, a técnica permitiu avaliar sem a necessidade de causar impacto aos exemplares utilizados no estudo. Os resultados da análise da altura e número de folhas foram coerentes à avaliação por FTIR no grupo, demonstrando que o desenvolvimento foi mais homogêneo nas mudas com hidrogel.

4.2 Avaliação das Mudanças de Capororoca-Vermelha - Grupo II

O Grupo II foi preparado como o Grupo I, composto por 4 mudas com hidrogel (HG2) e 4 sem hidrogel (SG2) com as coletas de amostras para FTIR em triplicata ($n = 3$). O monitoramento foi realizado no período de agosto de 2019 à setembro de 2020 totalizando um período de 14 meses, as coletas foram feitas até atingir o limite de desenvolvimento nas condições limitadas do experimento. Apesar de preparado um mês após o Grupo I, o limite de crescimento e desenvolvimento foliar foi atingido no mesmo período. Foram obtidos 336 espectros no infravermelho médio com boa reprodutibilidade das bandas analisadas dos exemplares com hidrogel (Figuras 37A e 37B) e nas mudas controle (Figuras 37C e 37D) que permitiu a análise quantitativa da variação das áreas das biomoléculas.

Figura 37 - Espectros Médios: A - HG2 - Ago/Fev; B - HG2 - Mar/Set; C - SG2 - Ago/Fev; D - SG2 - Mar/Set



Fonte: O Autor.

4.2.1 Avaliação das Áreas Biomoleculares - Grupo II

Seguindo a mesma metodologia de avaliação de bandas adotada no Grupo I se calculou as áreas das mudas com hidrogel (Tabela 7) e sem hidrogel (Tabela 8) do Grupo II, foi observada oscilação típica do desenvolvimento vegetal similar ao resultado do Grupo I. Para melhor compreender as diferenças nas mudas foi feita a análise dos principais meses.

Tabela 7 - Áreas de Principais Componentes - Mudanças com Hidrogel (HG2) - Grupo II

Mês - Área (u.a.)	Água	Lipídios	Pectina	Parede Celular	Hemicelulose	Clorofila	Amido	Lignina
Ago 2019	449,61	61,95	7,98	12,23	4,78	3,77	5,19	1,76
Set 2019	484,95	57,48	7,47	11,72	4,04	3,42	3,26	1,47
Out 2019	493,78	77,86	10,34	13,24	3,90	5,26	4,91	2,04
Nov 2019	479,60	68,14	8,50	12,18	4,68	4,16	4,13	1,66
Dez 2019	457,75	69,51	8,84	12,10	3,67	4,15	4,10	1,84
Jan 2020	524,62	45,28	4,31	9,17	3,37	2,91	3,08	1,82
Fev 2020	620,00	53,90	7,20	10,56	3,80	5,14	3,36	1,99
Mar 2020	513,10	52,51	5,50	11,00	3,98	3,73	2,70	1,72
Abr 2020	653,27	44,98	5,00	9,75	2,95	2,27	2,71	1,67
Mai 2020	587,97	47,88	5,29	9,77	2,97	1,99	3,33	1,62
Jun 2020	541,34	54,47	5,71	10,41	3,18	2,10	3,41	1,49
Jul 2020	607,38	54,27	6,63	10,89	3,19	2,61	3,41	1,83
Ago 2020	600,52	46,18	5,31	9,23	2,88	2,30	3,26	1,54
Set 2020	636,20	46,87	5,15	9,96	2,54	2,57	3,15	1,78

Fonte: O Autor.

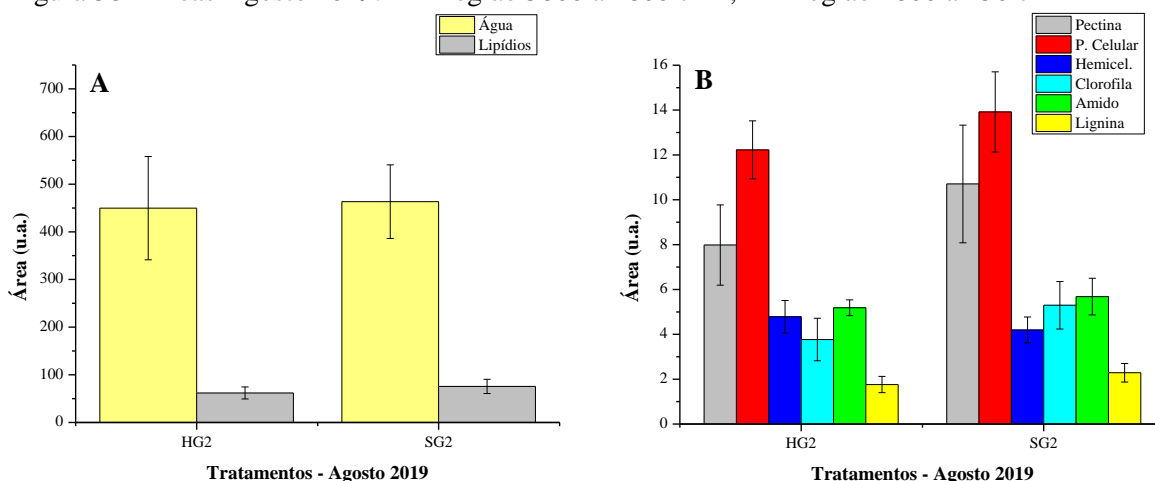
Tabela 8 - Áreas de Principais Componentes - Mudanças sem Hidrogel (SG2) - Grupo II

Mês - Área (u.a.)	Água	Lipídios	Pectina	Parede Celular	Hemicelulose	Clorofila	Amido	Lignina
Ago 2019	463,24	75,69	10,71	13,92	4,20	5,30	5,68	2,29
Set 2019	416,66	72,26	8,49	12,32	4,67	3,86	4,78	1,61
Out 2019	453,87	79,04	11,02	13,34	4,33	4,89	5,74	1,99
Nov 2019	429,58	76,61	9,70	12,74	4,91	4,55	4,82	1,74
Dez 2019	418,51	72,51	9,30	12,29	3,33	3,68	5,60	1,91
Jan 2020	431,97	68,99	9,05	12,44	4,51	3,81	5,54	1,58
Fev 2020	615,02	54,91	6,17	11,17	3,74	4,83	3,09	2,15
Mar 2020	582,14	55,02	6,91	10,99	3,62	4,28	3,42	1,86
Abr 2020	590,05	52,75	6,54	10,41	3,17	2,18	3,81	1,77
Mai 2020	560,42	53,25	6,20	10,45	2,94	2,19	3,28	1,75
Jun 2020	631,09	43,00	4,62	8,70	2,48	2,39	2,75	1,64
Jul 2020	577,62	50,28	5,03	9,62	3,03	1,60	3,40	1,58
Ago 2020	574,63	48,88	4,82	9,28	2,72	2,06	3,59	1,44
Set 2020	625,17	38,46	3,32	8,07	2,38	1,85	2,96	1,31

Fonte: O Autor.

Apesar de apresentar oscilação similar no período de monitoramento apenas as bandas de água e clorofila exibiram um desenvolvimento com tendência crescente acentuada como observado no Grupo I. Mesmo sendo cultivadas nas mesmas condições fatores internos influenciam o crescimento vegetal, os exemplares selecionados para o grupo controle exibiram uma tendência de crescimento acentuada no início do monitoramento, como será discutido na sequência da avaliação que pode ter refletido nos valores das áreas de bandas. A tendência de desenvolvimento dos exemplares com hidrogel foi mais lento no Grupo II ocorrendo principalmente na fase final do monitoramento. No primeiro mês de monitoramento em agosto de 2019, SG2 teve maiores áreas de bandas (Figuras 38A e 38B).

Figura 38 - Áreas Agosto 2019: A - Região 3800 a 2800 cm^{-1} ; B - Região 1800 a 450 cm^{-1}

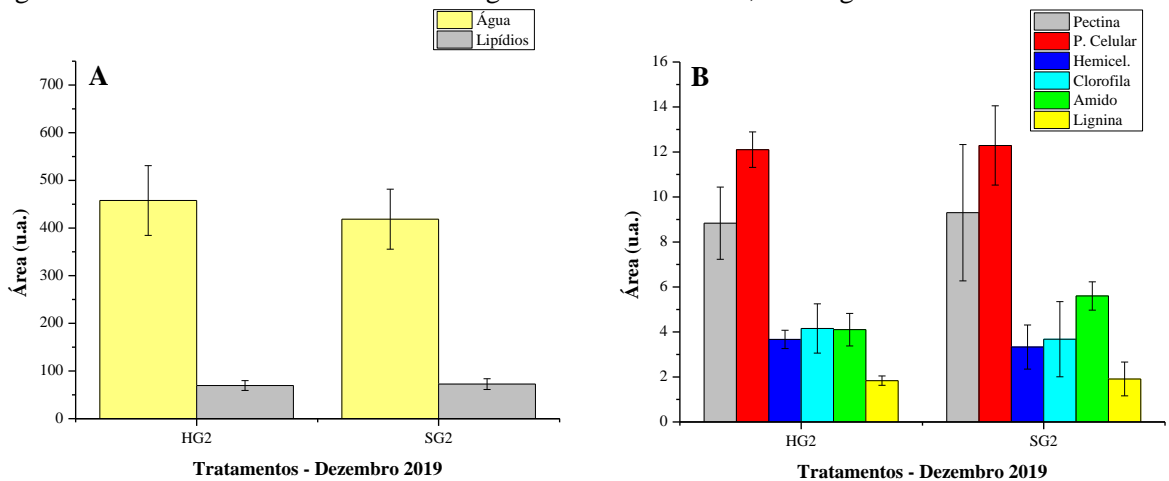


Fonte: O Autor.

Inicialmente em agosto as mudas controle apresentaram valores de áreas de bandas maiores do que das mudas com hidrogel refletindo os mesmos fatores discutidos no Grupo I concernentes à adaptação às novas condições do sítio experimental. As bandas percentualmente maiores nas mudas sem hidrogel foram a de água (2,94%), lipídios (18,16%), pectina (25,45%), parede celular (12,15%), clorofila (28,83%), amido (8,73%) e lignina (22,94%), apenas a banda de hemicelulose apresentou área maior em HG2 (13,99%).

Diferente do Grupo I, a banda de água foi menor no primeiro mês de monitoramento, refletindo que o processo de adaptação das mudas de Capororoca-Vermelha foi mais demorado no Grupo II, a partir de setembro a banda de água passou a ser dominante nas mudas com hidrogel. Em outubro iniciou a recuperação em HG2 com maior área de clorofila (7,56%), no entanto, somente em dezembro que houve uma tendência de melhor desenvolvimento nas mudas com hidrogel (Figuras 39A e 39B).

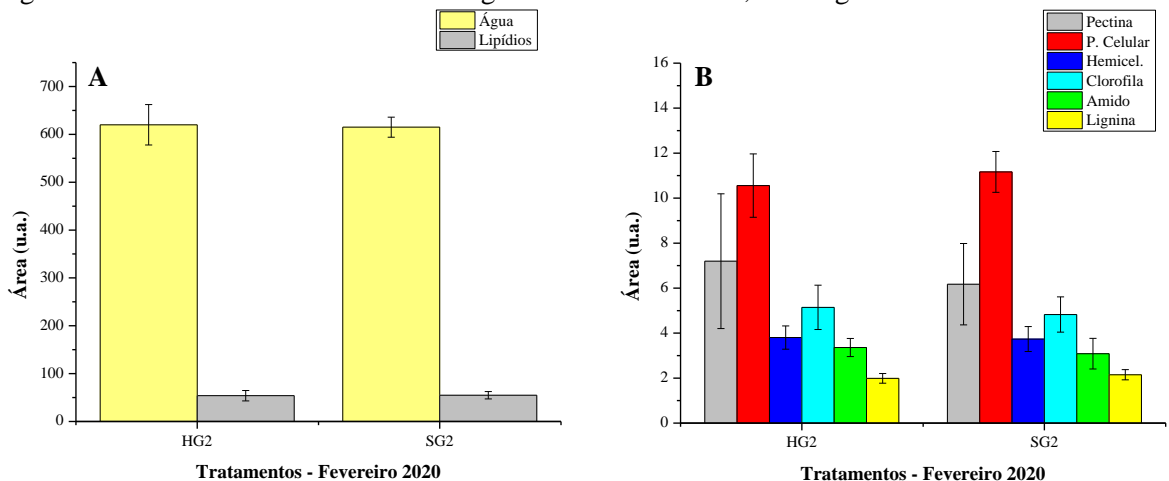
Figura 39 - Áreas Dezembro 2019: A - Região 3800 a 2800 cm^{-1} ; B - Região 1800 a 450 cm^{-1}



Fonte: O Autor.

Na estação da primavera a adaptação das mudas com hidrogel não apresentou sinais claros nas bandas avaliadas. Em dezembro na transferência para o verão com a maior incidência solar houve recuperação acentuada na banda de clorofila com área 12,96% maior do que o grupo controle, a técnica de FTIR permite monitorar metabólitos secundários importantes como a clorofila (KUMAR et al., 2015). Respectivamente, as bandas de água e hemicelulose apresentaram áreas 9,38% e 10,17% maiores que o controle. Somente no final do verão HG2 apresentou resposta nas demais bandas em fevereiro (Figuras 40A e 40B).

Figura 40 - Áreas Fevereiro 2020: A - Região 3800 a 2800 cm^{-1} ; B - Região 1800 a 450 cm^{-1}

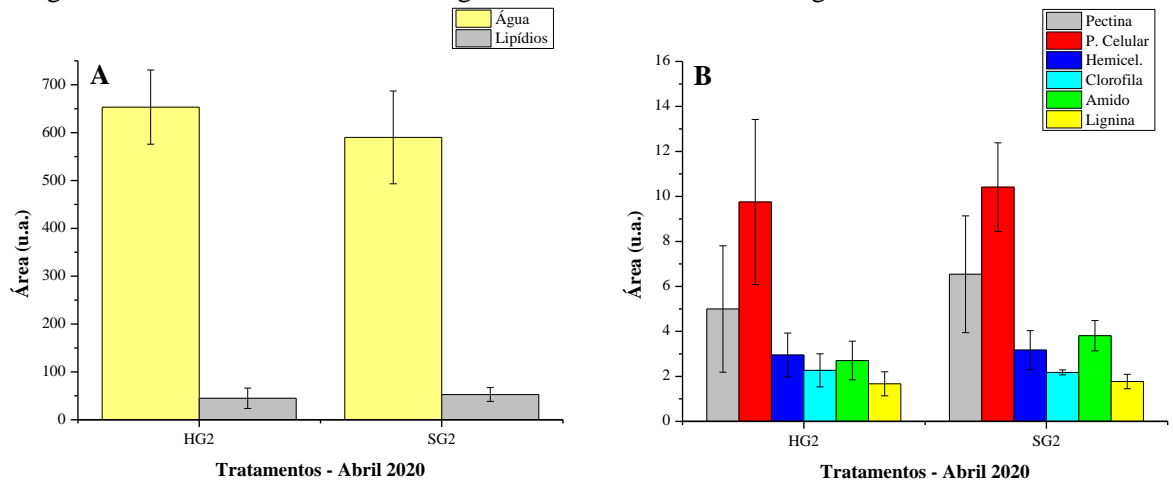


Fonte: O Autor.

No mês de fevereiro houve a melhor recuperação das mudas com hidrogel desde o início do monitoramento com áreas maiores nas bandas de água (0,81%), pectina (16,57%), hemicelulose (1,81%), clorofila (6,58%) e amido (8,86%). O melhor desenvolvimento da banda

de pectina sugere que o mecanismo de transporte de nutrientes das mudas com hidrogel apresentou uma melhora durante a estação do verão, sugerindo que o uso do hidrogel mantém a melhor absorção hídrica mesmo nas condições de maior evapotranspiração que permite um desenvolvimento mais homogêneo às mudas. Em abril houve queda (Figuras 41A e 41B).

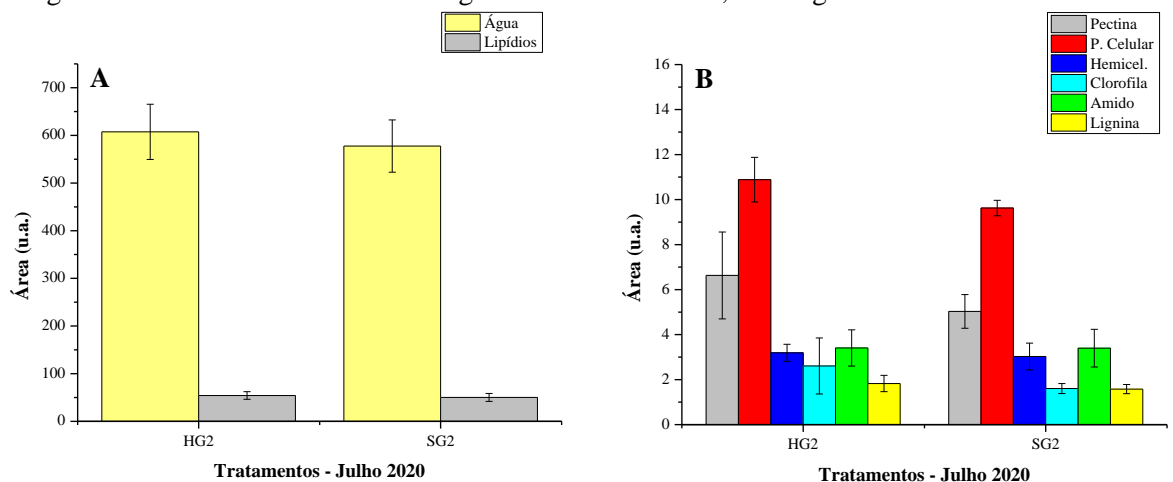
Figura 41 - Áreas Abril 2020: A - Região 3800 a 2800 cm^{-1} ; B - Região 1800 a 450 cm^{-1}



Fonte: O Autor.

. As bandas que apresentaram diminuição percentual na área em abril foram as de lipídios (14,73%), pectina (23,63%), parede celular (6,34%), hemicelulose (6,85%), amido (28,97%) e lignina (5,69%). Mesmo com a queda na insolação, a banda de clorofila permaneceu maior (4,19%) e a absorção hídrica também se manteve (10,71%), apesar do possível impacto do armazenamento na sequência do monitoramento o grupo com hidrogel apresentou a melhor recuperação das áreas em julho (Figuras 42A e 42B).

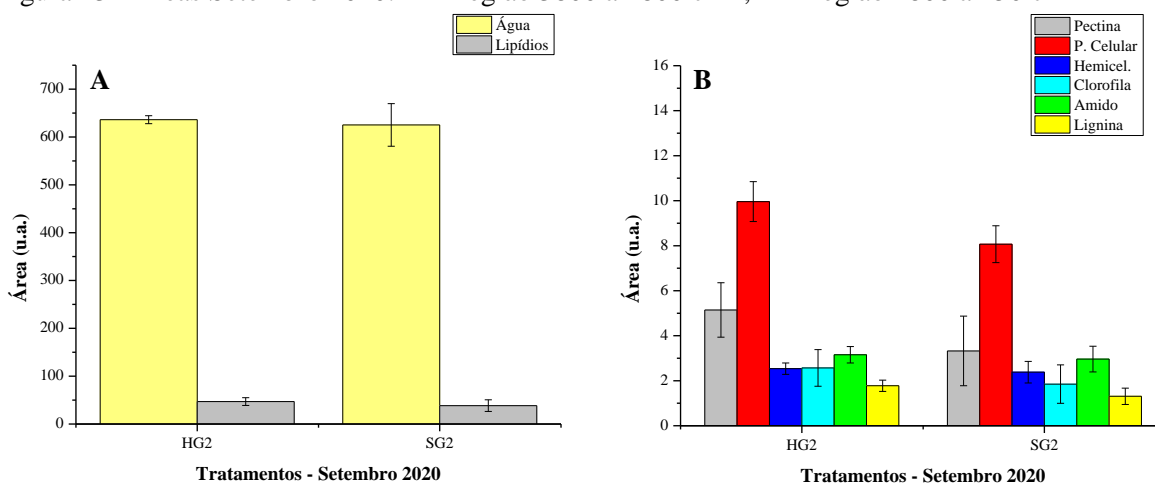
Figura 42 - Áreas Julho 2020: A - Região 3800 a 2800 cm^{-1} ; B - Região 1800 a 450 cm^{-1}



Fonte: O Autor.

A análise das mudas com hidrogel do Grupo I apresentaram bom resultado no mês de julho, o mesmo perfil se repetiu no Grupo II indicando uma alta capacidade de resiliência nas mudas cultivadas com hidrogel com boa adaptação às condições mais severas ao desenvolvimento vegetal da estação do inverno (LARCHER, 2000). Todas as bandas avaliadas apresentaram área percentual maior em HG2, a de água (5,15%), lipídios (7,94%), pectina (31,80%), parede celular (13,10%), hemicelulose (5,47%), clorofila (62,55%), amido (0,33%) e lignina (35,80%). No mês de agosto houve uma tendência de redução, porém as bandas de água, pectina, hemicelulose e clorofila se mantiveram maiores que o controle, no último mês de monitoramento houve nova recuperação em setembro de 2020 (Figuras 43A e 43B).

Figura 43 - Áreas Setembro 2020: A - Região 3800 a 2800 cm^{-1} ; B - Região 1800 a 450 cm^{-1}



Fonte: O Autor.

O último mês de monitoramento apresentou resultados positivos nas áreas das bandas avaliadas nas mudas cultivadas com hidrogel, assim como os exemplares do Grupo I. Todas as bandas apresentaram áreas maiores que o controle, a de água (1,76%), lipídios (21,86%), pectina (54,77%), parede celular (23,44%), hemicelulose (6,65%), clorofila (38,95%), amido (6,54%) e lignina (35,80%). Os resultados demonstram a maior resiliência de HG2 após os 14 meses de monitoramento do Grupo II, o uso do hidrogel afetou diretamente na banda de água nos espectros FTIR, sendo maior que o grupo controle em 11 dos 14 meses monitorados.

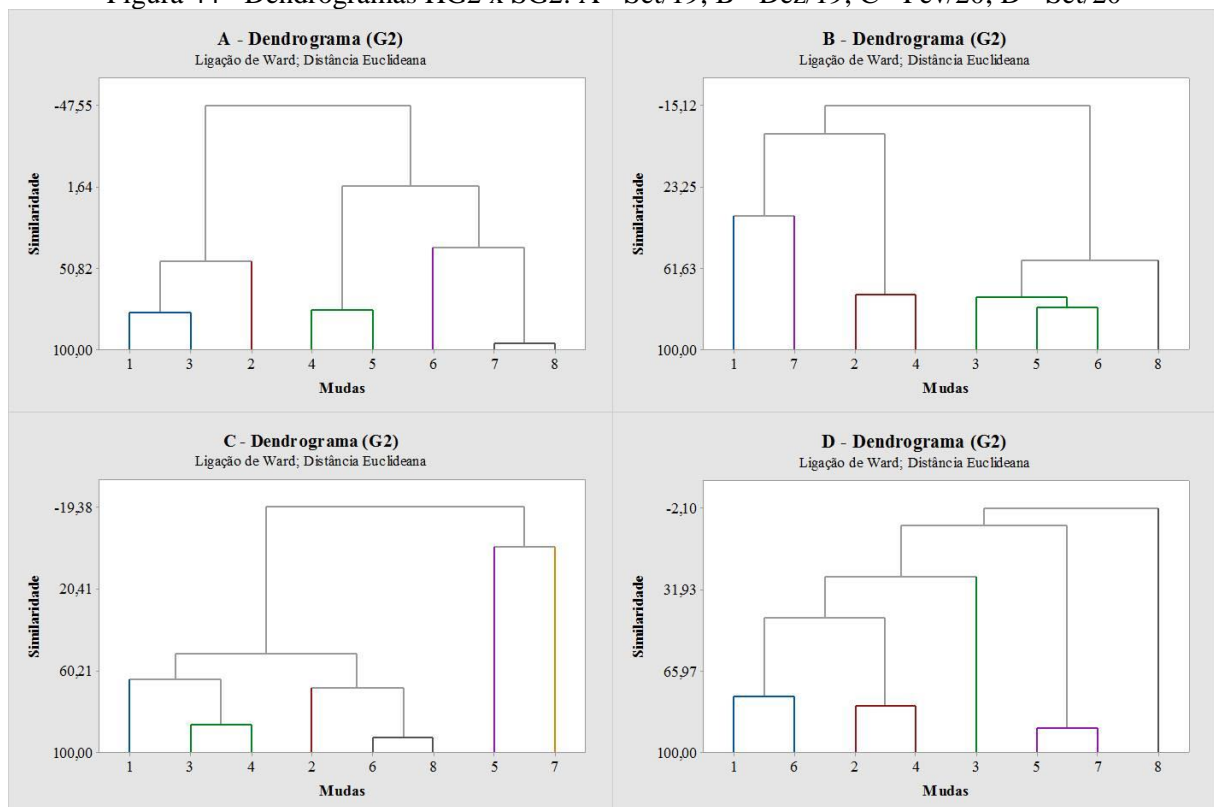
As biomoléculas apresentaram um desenvolvimento mais tardio do que o Grupo I, as principais que podem ser consideradas marcadoras do desenvolvimento no Grupo II foram a de clorofila, pectina e hemicelulose. A pectina apresentou desenvolvimento menor que as demais bandas, porém o crescimento na fase final do monitoramento entre junho e setembro de 2020 foi significativo para demonstrar como o mecanismo de transporte de nutrientes permaneceu com melhor desempenho mesmo após um período de adaptação longo. A

biomolécula de hemicelulose possui ligação direta com a pectina nos processos que ocorrem na membrana celular dos vegetais apesar de serem compostos por redes independentes (KACURAKOVA et al., 2000). A maior capacidade de absorver água pelo uso do hidrogel possibilitou um melhor desenvolvimento biomolecular da Capororoca-Vermelha no Grupo II.

4.2.2 Análise Multivariada - Grupo II

Os espectros do Grupo II foram submetidos à avaliação por meio de análise multivariada. Na análise do Grupo I foi observada uma tendência à separação em grupos independentes no primeiro semestre seguida de dispersão dos dados, no Grupo II os dados foram mais dispersos e as mudas se separaram apenas parcialmente nos meses de setembro de 2019 (Figura 44A), dezembro de 2019 (Figura 44B), fevereiro de 2020 (Figura 44C) e setembro de 2020 (Figura 44D).

Figura 44 - Dendrogramas HG2 x SG2: A - Set/19; B - Dez/19; C - Fev/20; D - Set/20



Legenda: Mudás = Com Hidrogel (1, 2, 3 e 4) - Sem Hidrogel (5, 6, 7 e 8)

Fonte: O Autor.

Em setembro de 2019 as mudas com hidrogel 1, 2 e 3 formaram grupo, os exemplares 1 e 3 se assemelharam em 77,15% e ambas apresentaram semelhança de 46,24% à muda 2, apenas o exemplar 4 se separou misturando-se as mudas sem hidrogel. Na sequência em

dezembro a dispersão aumentou, a muda 1 se assemelhou ao exemplar sem hidrogel 7 em 36,91%, as mudas 2 e 4 apresentaram semelhança de 73,99% e ambas formaram grupo com 1 e 7, porém com baixa significatividade. Em fevereiro as mudas com hidrogel apresentaram maior similaridade. As mudas 3 e 4 se assemelharam em 86,58% e ambas apresentaram 64,66% de similaridade à muda 1, o exemplar 2 separou em outro grupo ligado as mudas sem hidrogel 6 e 8, no entanto, com 51,81% de semelhança às mudas 1, 3 e 4.

No último mês de monitoramento as mudas 1, 2 e 4 formaram grupo, entretanto, com a muda sem hidrogel 6 se misturando. Os exemplares 2 e 4 apresentaram semelhança de 80,54% enquanto 1 e 6 teve similaridade de 76,39% e ambas formaram grupo com 2 e 4 (43,61%). Assim como no Grupo I, devido a alta dispersão não foi possível afirmar se as separações parciais que ocorreram foram por conta do uso do hidrogel. A comparação das áreas das bandas nos meses no tópico anterior demonstrou melhor como o crescimento se diferenciou nos tratamentos e como o hidrogel influenciou as bandas biomoleculares no FTIR.

4.2.3 Teste de Mann-Whitney - Grupo II

Os espectros do Grupo II foram submetidos ao Teste de Mann-Whitney para observar se os tratamentos apresentaram diferença significativa (Tabela 9).

Tabela 9 - Teste de Mann-Whitney - Grupo II

Meses	Valor P (H x S)
Ago - 2019	0,003*
Set - 2019	0,139
Out - 2019	0,907
Nov - 2019	0,044*
Dez - 2019	0,000*
Jan - 2020	0,000*
Fev - 2020	0,117
Mar - 2020	0,742
Abr - 2020	0,000*
Mai - 2020	0,000*
Jun - 2020	0,000*
Jul - 2020	0,000*
Ago - 2020	0,000*
Set - 2020	0,000*

*Diferença Significativa ($p < 0,05$)

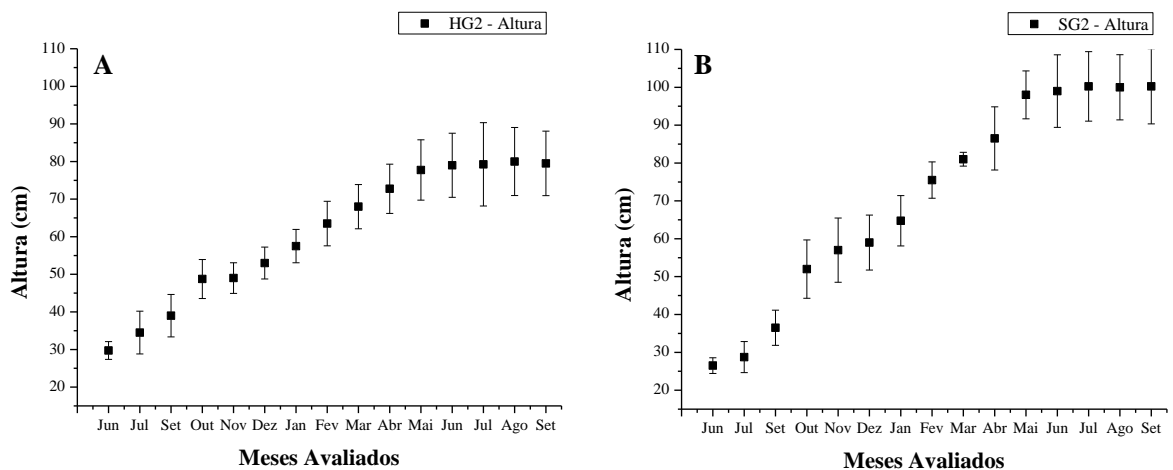
Fonte: O Autor.

O resultado obtido se assemelhou ao do Grupo I com diferença significativa entre os tratamentos com e sem hidrogel com exceção de apenas quatro meses, setembro de 2019, outubro, fevereiro e março, sendo que a diferença em setembro e março ainda foi alta (entre 80% e 90%). Portanto, o teste foi complementar à análise das áreas e indicou diferença estatística nos espectros do Grupo II.

4.2.4 Avaliação da Altura e Número de Folhas - Grupo II

As mudas do Grupo II foram cultivadas com as mesmas condições que as mudas do Grupo I, no entanto, foi observado um padrão de crescimento diverso. Os exemplares sem hidrogel apresentaram maior crescimento no período (Figuras 45A e 45B).

Figura 45 - Padrão de Crescimento: A - HG2; B - SG2



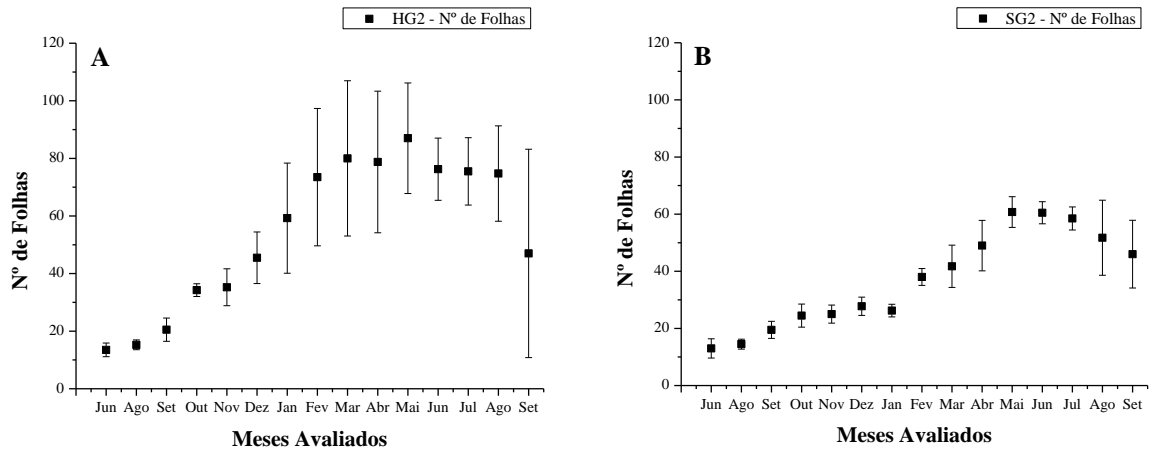
Fonte: O Autor.

O resultado observado no grupo II foi pontual e não apresentou indícios de ser um fator provocado pelo uso do hidrogel, as mudas sem hidrogel apresentam uma característica morfológica distinta com menor quantidade de ramos, um perfil colunar típico da espécie (LORENZI, 2008). O subgrupo com hidrogel apresentou um crescimento percentual de 167,23% de junho de 2019 a setembro de 2020, enquanto que as mudas sem hidrogel tiveram 278,30% de aumento em altura média no mesmo período. O desvio padrão se manteve baixo nos subgrupos durante o período de monitoramento, entre maio e junho o limite começou a ser notado como no Grupo I.

O desenvolvimento de folhas refletiu às características morfológicas observadas, o grupo com hidrogel apresentou um maior crescimento foliar proporcionado pela maior

quantidade de ramificações, enquanto que as mudas sem hidrogel apresentaram maior similaridade como o desvio padrão indicou, porém com menos folhas (Figuras 46A e 46B).

Figura 46 - Desenvolvimento Foliar: A - HG2; B - SG2

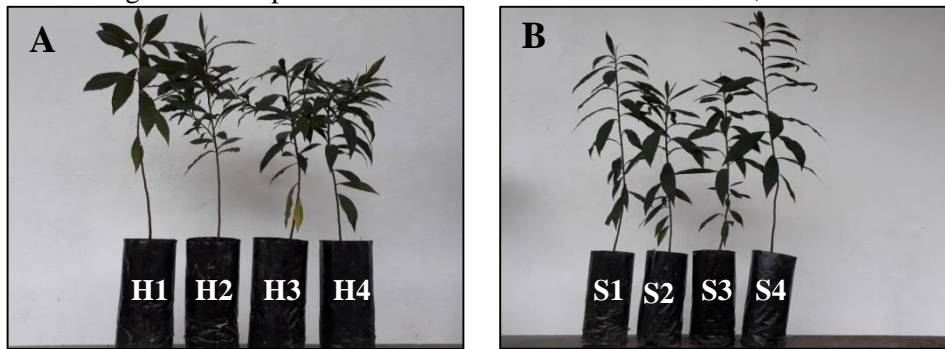


Fonte: O Autor.

As mudas com hidrogel apresentou o pico de maior número de folhas em maio com crescimento percentual de 544,44%, entre maio e setembro houve queda de 45,98%, indicando o limite de desenvolvimento foliar no ambiente controlado. No grupo sem hidrogel o crescimento foi bem menos acentuado até maio (367,31%), seguido de queda de 24,28% até setembro. O desvio padrão do grupo com hidrogel foi alto devido à maior quantidade de ramificações nos exemplares com hidrogel.

O desvio padrão foi mais acentuado no mês de setembro nas mudas com hidrogel por conta da perda de folhas de um dos exemplares que foi afetado pela onda de calor que durou uma semana, no entanto, logo em seguida ocorreu a recuperação. No início do monitoramento em 2019 se pode observar certa similaridade entre as mudas com hidrogel (Figura 47A) e sem (Figura 47B). Porém, em 2020 notou-se uma diferenciação morfológica acentuada, as mudas cultivadas com hidrogel apresentaram uma quantidade maior de ramos e folhas (Figura 48A) enquanto que o controle apresentou perfil colunar com menos folhas (Figura 48B).

Figura 47 - Aspecto Externo das Mudas 2019: A - HG2; B - SG2



Fonte: O Autor.

Figura 48 - Aspecto Externo das Mudas 2019: A - HG2; B - SG2



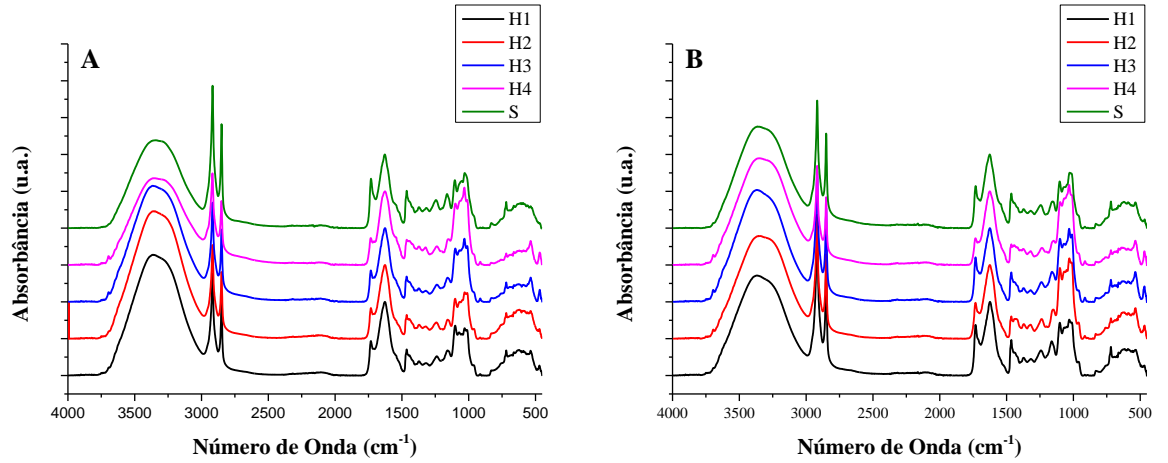
Fonte: O Autor.

Os Grupos I e II apresentaram similaridades quanto à avaliação das áreas das bandas no FTIR, resultado esperado considerando que as mudas foram cultivadas seguindo o mesmo procedimento. A única diferença pontual foi o crescimento acentuado das mudas sem hidrogel no Grupo II, porém as evidências encontradas na análise indicam que a principal causa se deveu as características morfológicas dos exemplares selecionados (LORENZI, 2008). O uso do hidrogel foi positivo sobre o desenvolvimento biomolecular do Grupo II.

4.3 Avaliação das Mudas de Capororoca-Vermelha - Grupo III

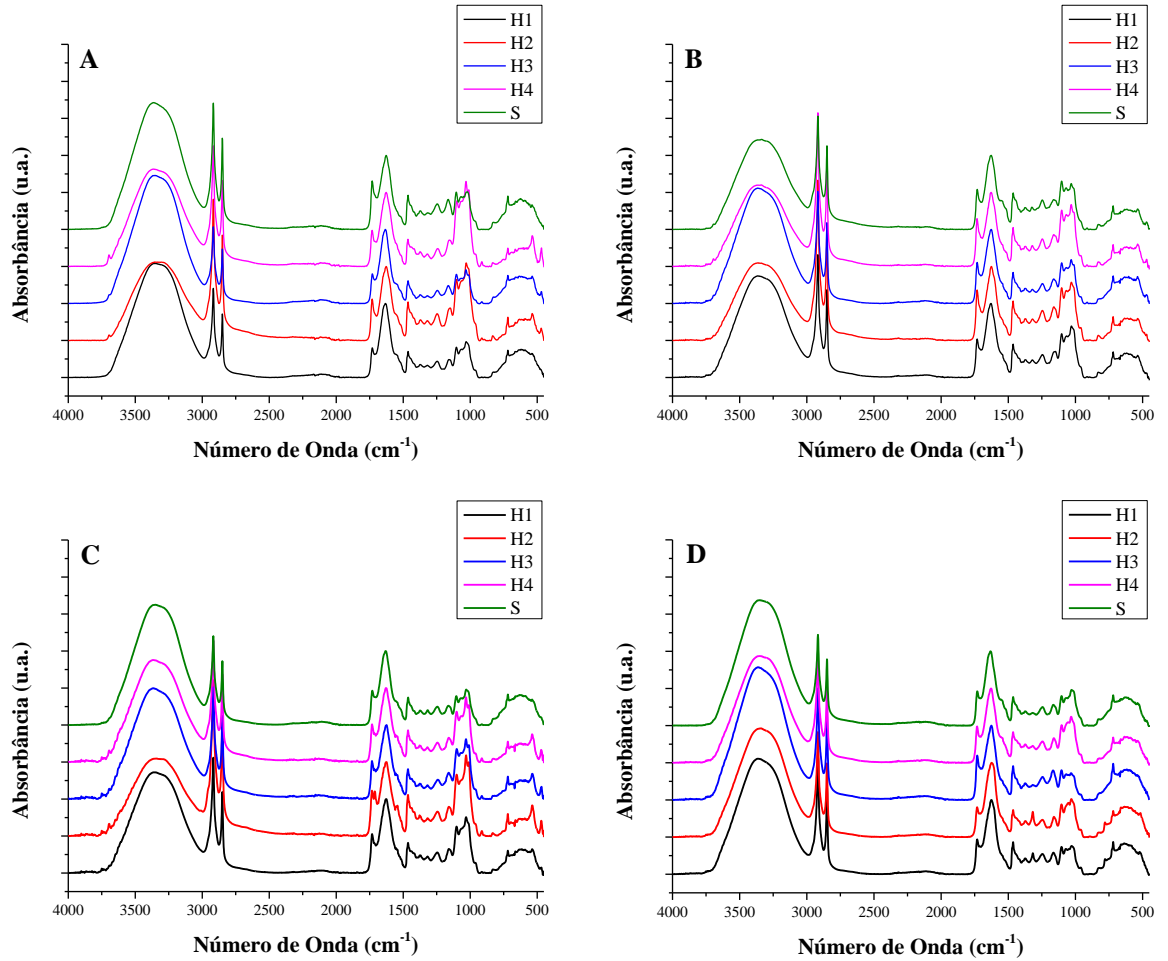
O Grupo III foi montado para avaliar como diferentes quantidades de hidrogel influenciam o desenvolvimento da Capororoca Vermelha. Foram obtidos 468 espectros no período de setembro de 2019 à setembro de 2020, com boa reprodutibilidade de bandas para a análise (Figuras 49, 50 e 51), assim como os dados obtidos dos Grupos I e II.

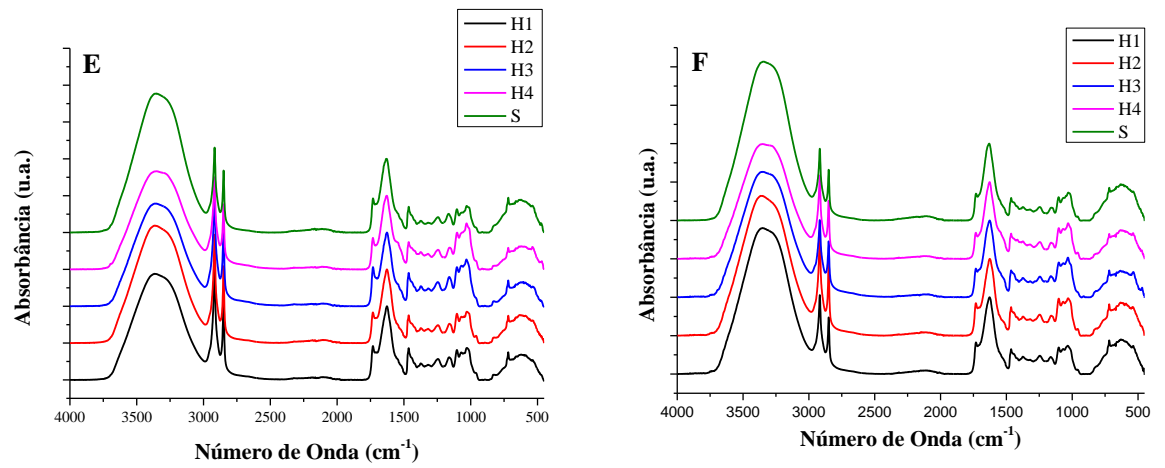
Figura 49 - Espectros Médios HG3: A - Set/19; B - Out/19



Fonte: O Autor.

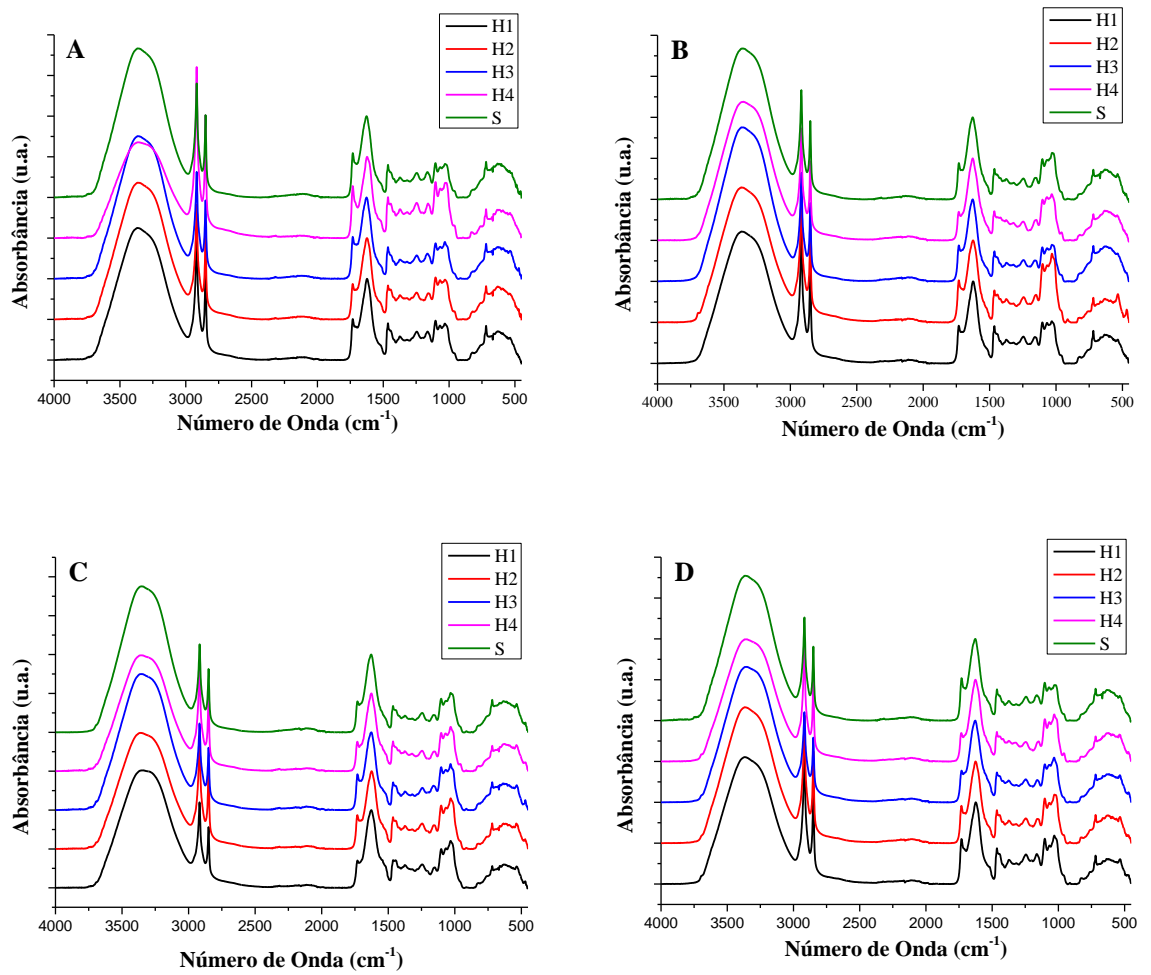
Figura 50 - Espectros Médios HG3: A - Nov/19; B - Dez/19; C - Jan/20; D - Fev/20; E - Mar/20; F - Abr/20

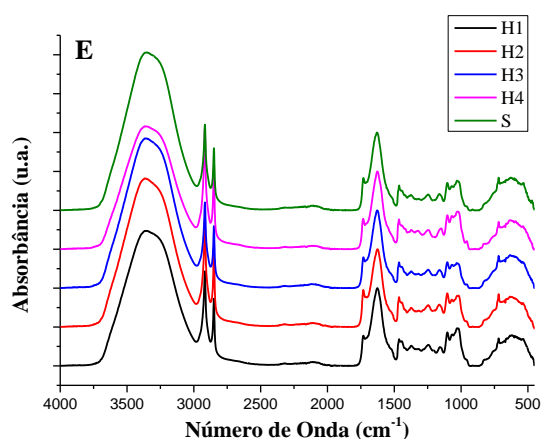




Fonte: O Autor.

Figura 51 - Espectros Médios HG3: A - Mai/20; B - Jun/20; C - Jul/20; D - Ago/20; E - Set/20





Fonte: O Autor.

4.3.1 Avaliação das Áreas Biomoleculares - Grupo III

As mudas do Grupo III foram cultivadas em tratamentos separados com 25% (H1G3), 20% (H2G3), 15% (H3G3) e 10% de hidrogel (H4G3) além do controle sem hidrogel (SG3) para observar como as diferentes concentrações influenciaram o desenvolvimento da Capororoca-Vermelha. As áreas calculadas obtidas apresentaram desenvolvimento temporal diferente dos Grupos I e II nos cultivos com 25%, 20% e 15% de hidrogel (Tabelas 10, 11 e 12), o grupo com 10% (Tabela 13) apresentou maior similaridade ao padrão das mudas com hidrogel dos Grupos I e II, resultado esperado considerando as mudas dos referidos grupos também foram cultivadas com 10% de hidrogel.

Tabela 10 - Áreas de Principais Componentes - 25% de Hidrogel (H1G3) - Grupo III

Mês - Área (u.a.)	Água	Lipídios	Pectina	Parede Celular	Hemicelulose	Clorofila	Amido	Lignina
Set 2019	516,44	55,99	6,65	10,63	3,40	3,06	4,50	1,51
Out 2019	451,18	84,18	11,23	14,02	4,46	5,71	5,66	2,18
Nov 2019	424,40	58,07	5,73	11,39	4,89	3,40	4,14	1,62
Dez 2019	466,76	64,64	7,10	11,54	4,13	3,97	3,92	1,74
Jan 2020	441,57	67,97	8,40	11,89	4,49	4,29	4,67	1,74
Fev 2020	592,50	50,60	4,47	9,61	3,54	4,04	2,74	1,72
Mar 2020	498,77	62,42	6,95	11,39	3,92	4,38	3,27	1,79
Abr 2020	674,65	39,03	3,75	8,80	2,71	2,28	2,55	1,73
Mai 2020	585,11	52,82	5,60	11,25	2,91	2,08	3,37	1,90
Jun 2020	570,58	66,42	8,22	12,20	3,15	3,68	3,73	2,20
Jul 2020	538,42	27,97	1,62	6,35	3,14	0,63	2,13	0,76
Ago 2020	584,11	56,25	6,49	11,10	2,95	2,15	4,13	1,64
Set 2020	577,70	50,40	5,25	9,76	2,84	1,64	3,87	1,48

Fonte: O Autor.

Tabela 11 - Áreas de Principais Componentes - 20% de Hidrogel (H1G3) - Grupo III

Mês - Área (u.a.)	Água	Lipídios	Pectina	Parede Celular	Hemicelulose	Clorofila	Amido	Lignina
Set 2019	560,46	54,52	6,15	10,99	3,54	3,45	4,68	1,67
Out 2019	486,97	76,26	10,57	13,44	4,55	5,17	6,02	2,03
Nov 2019	442,98	73,57	8,12	13,93	4,85	4,92	4,84	2,31
Dez 2019	478,24	75,05	9,30	12,87	3,99	5,22	3,96	2,24
Jan 2020	318,55	89,33	11,84	15,25	5,19	4,39	6,17	1,93
Fev 2020	550,59	58,01	6,67	10,74	3,68	4,99	3,19	1,92
Mar 2020	535,30	63,34	7,50	11,98	4,00	5,30	3,52	2,15
Abr 2020	611,97	53,59	6,77	10,78	3,22	2,39	3,67	1,91
Mai 2020	586,60	50,20	5,39	11,16	2,97	2,08	3,05	1,96
Jun 2020	478,96	51,04	5,82	10,28	2,63	2,26	3,30	1,66
Jul 2020	561,83	46,73	4,77	10,09	3,03	1,73	3,42	1,61
Ago 2020	615,33	51,24	5,56	10,51	2,88	2,53	3,57	1,81
Set 2020	699,13	35,71	3,72	8,74	1,94	2,35	2,79	1,75

Fonte: O Autor.

Tabela 12 - Áreas de Principais Componentes - 15% de Hidrogel (H3G3) - Grupo III

Mês - Área (u.a.)	Água	Lipídios	Pectina	Parede Celular	Hemicelulose	Clorofila	Amido	Lignina
Set 2019	492,08	58,51	6,42	11,06	3,50	2,74	5,38	1,46
Out 2019	456,87	79,60	10,20	12,81	4,10	4,30	6,30	1,67
Nov 2019	499,99	55,44	5,04	10,60	3,62	3,08	4,80	1,36
Dez 2019	573,21	64,39	7,79	11,15	3,12	4,62	4,17	1,90
Jan 2020	461,71	61,67	6,82	10,85	3,60	3,29	5,46	1,53
Fev 2020	564,81	76,10	7,76	11,45	3,96	5,35	3,41	2,16
Mar 2020	464,99	72,74	8,61	12,82	4,30	5,44	3,63	2,02
Abr 2020	569,90	51,59	5,90	10,26	2,83	2,43	3,43	1,69
Mai 2020	609,54	52,14	7,12	10,68	2,76	2,94	3,34	1,88
Jun 2020	582,22	60,69	6,45	11,74	3,09	2,95	3,66	1,92
Jul 2020	537,74	47,54	4,80	9,99	2,76	1,38	3,98	1,35
Ago 2020	558,86	46,77	4,88	9,73	2,74	1,99	3,16	1,52
Set 2020	664,39	38,93	4,18	8,39	2,08	2,21	2,94	1,51

Fonte: O Autor.

Tabela 13 - Áreas de Principais Componentes - 10% de Hidrogel (H4G3) - Grupo III

Mês - Área (u.a.)	Água	Lipídios	Pectina	Parede Celular	Hemicelulose	Clorofila	Amido	Lignina
Set 2019	539,45	31,36	2,23	8,03	2,09	0,72	3,71	0,74
Out 2019	505,34	64,86	7,97	11,47	3,38	3,34	5,35	1,49
Nov 2019	475,26	63,69	6,70	11,65	3,97	3,80	5,22	1,53
Dez 2019	365,66	87,59	10,44	13,72	4,05	4,38	5,29	1,94
Jan 2020	444,78	67,94	7,73	11,63	3,73	3,56	5,40	1,45
Fev 2020	513,47	55,28	5,34	10,54	3,91	3,53	3,11	1,60
Mar 2020	449,25	55,50	5,14	10,17	3,94	3,19	3,21	1,42
Abr 2020	561,96	40,56	3,38	8,50	2,90	1,37	2,87	1,20
Mai 2020	499,13	67,50	9,64	12,07	3,97	2,34	3,89	1,94
Jun 2020	589,08	54,73	5,38	10,40	3,06	3,17	3,23	1,74
Jul 2020	537,42	46,60	4,05	9,41	3,11	1,87	2,99	1,37
Ago 2020	520,65	57,41	5,44	10,73	3,16	1,90	4,42	1,45
Set 2020	628,82	42,99	3,98	8,77	2,37	2,05	2,86	1,41

Fonte: O Autor.

As mudas do grupo controle (SG3) apresentaram um padrão de variação diferente das mudas cultivadas com hidrogel nas biomoléculas (Tabela 14). Na sequência da avaliação foram comparadas as áreas de biomoléculas dos tratamentos com hidrogel com o grupo controle nos principais meses do monitoramento, em especial na transferência entre as estações.

Tabela 14 - Áreas de Principais Componentes - Sem Hidrogel (SG3) - Grupo III

Mês - Área (u.a.)	Água	Lipídios	Pectina	Parede Celular	Hemicelulose	Clorofila	Amido	Lignina
Set 2019	352,81	91,62	13,46	15,59	5,32	6,14	5,65	2,30
Out 2019	426,19	78,88	10,20	13,74	4,87	4,94	5,11	1,94
Nov 2019	465,95	76,47	10,11	13,56	5,12	5,16	4,90	1,98
Dez 2019	414,63	61,49	6,70	11,94	3,74	2,42	4,51	1,50
Jan 2020	451,33	60,73	7,11	11,43	4,70	3,13	4,36	1,50
Fev 2020	597,65	48,90	5,30	10,44	3,63	4,12	2,86	1,86
Mar 2020	592,90	52,10	5,65	10,70	3,65	4,16	3,27	1,77
Abr 2020	611,43	47,16	4,53	10,03	3,35	2,50	3,64	1,50
Mai 2020	585,08	57,76	8,40	11,52	3,20	3,64	3,14	2,05
Jun 2020	633,95	45,79	5,10	9,52	3,05	2,59	2,98	1,67
Jul 2020	649,88	33,49	2,17	7,29	2,29	1,24	3,12	1,21
Ago 2020	553,84	57,19	6,74	11,02	3,03	3,47	3,57	1,81
Set 2020	615,49	48,44	4,87	9,85	2,61	2,75	3,66	1,63

Fonte: O Autor.

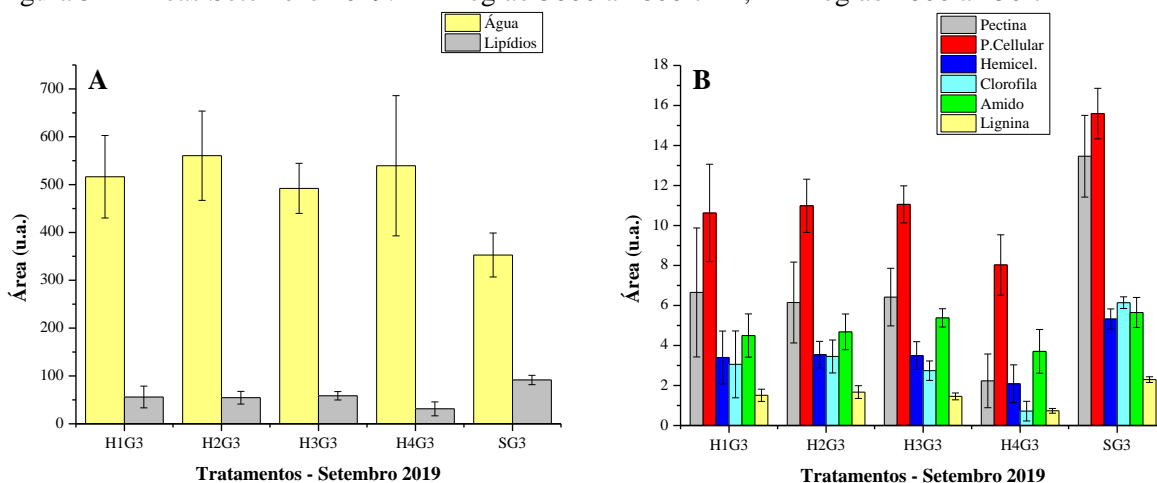
O Grupo III foi monitorado por 13 meses entre setembro de 2019 e setembro de 2020, o limite de crescimento foi atingido no mesmo período dos Grupos I e II, que provavelmente se deveu a combinação de dois fatores, nas mudas com hidrogel a maior capacidade de absorver água proporcionada pelo hidrogel permitiu crescimento mais acentuado e o cultivo dos

exemplares foi feito na primavera diferente dos Grupos I e II que ainda passaram pela transferência estacional do inverno onde o crescimento vegetal é limitado pelas condições climáticas (LACHER, 2000).

O desenvolvimento das bandas biomoleculares nos tratamentos com hidrogel foi diferente dos Grupos I e II, a oscilação de quedas e altas nas áreas foi mais acentuada nos grupos cultivados com concentração maior de hidrogel, resultado que indica um ciclo de desenvolvimento diferente do observado nos exemplares dos Grupos I e II. Para cada tratamento observou-se um comportamento diferente das bandas avaliadas em comparação ao controle, as bandas que melhor demonstraram o desenvolvimento das mudas com hidrogel nos Grupos I e II foram a de pectina e clorofila, nos tratamentos do Grupo III estas bandas responderam positivamente principalmente nos meses da estação de verão.

A banda de lipídios apresentou melhor resposta na avaliação mensal no Grupo III, resultado importante considerando que devido a maior intensidade, se destaca em compostos biológicos e permite rápida avaliação dos espectros (KASIM, 2014), se mostra ideal para o monitoramento vegetal. Assim como observado nos Grupos I e II no primeiro mês de análise das bandas, os maiores valores de área foram encontrados nas mudas controle, indicando um período de adaptação às novas condições de substrato com hidrogel (Figura 52A e 52B).

Figura 52 - Áreas Setembro 2019: A - Região 3800 a 2800 cm^{-1} ; B - Região 1800 a 450 cm^{-1}

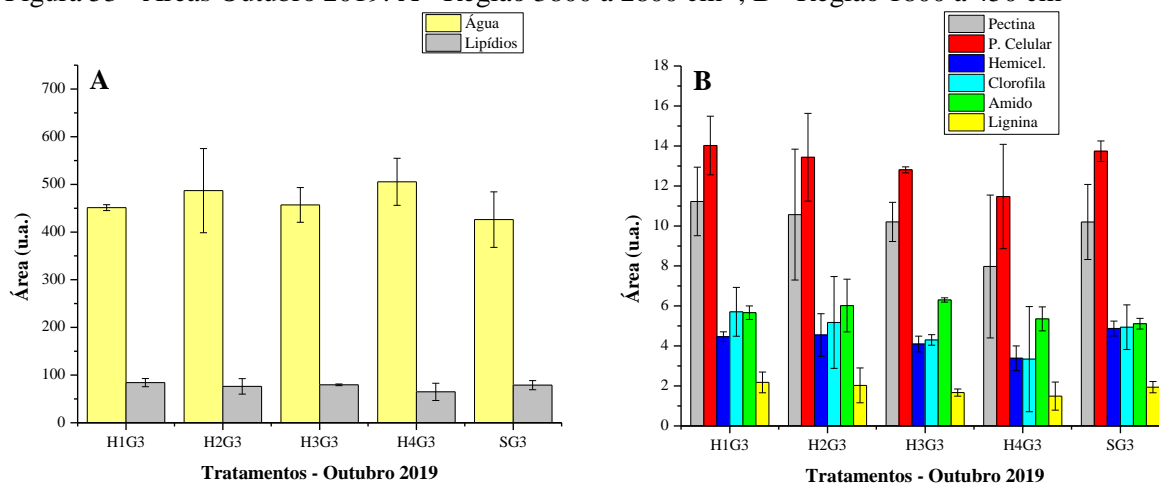


Fonte: O Autor.

O início do monitoramento demonstrou que as maiores áreas de biomoléculas foram dominadas pelo grupo controle (SG3). No entanto, a área de banda de água foi percentualmente maior que o controle em H1G3 (46,38%), H2G3 (58,86%), H3G3 (39,48%) e H4G3 (52,90%), resultado que sugere uma maior absorção hídrica proporcionada pelo uso do hidrogel, com resposta logo no primeiro mês de avaliação. A maior capacidade de retenção hídrica refletiu na

rápida recuperação e adaptação das mudas no mês seguinte de monitoramento, como pode ser observado nos gráficos das Figuras 53A e 53B.

Figura 53 - Áreas Outubro 2019: A - Região 3800 a 2800 cm^{-1} ; B - Região 1800 a 450 cm^{-1}

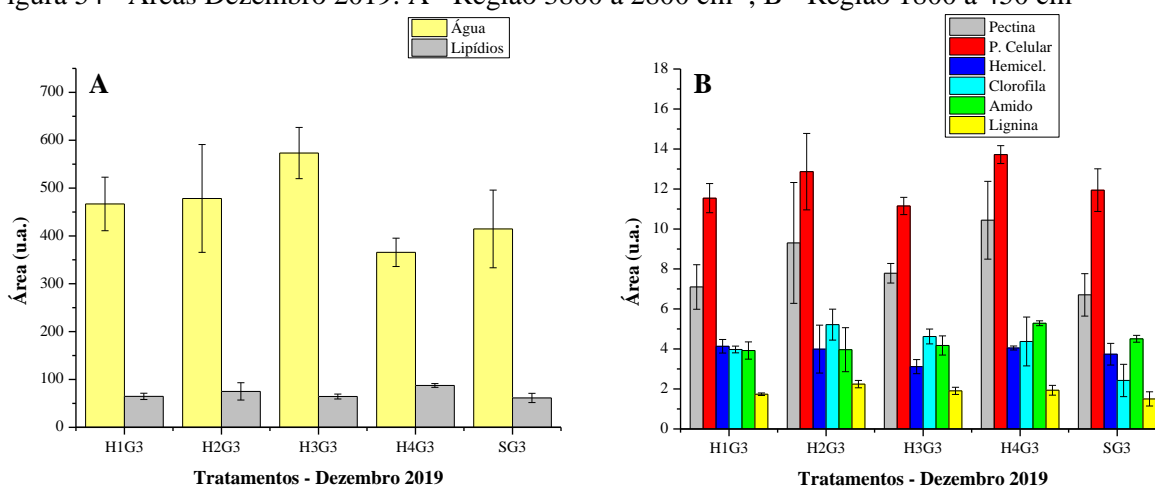


Fonte: O Autor.

No mês de outubro os tratamentos H1G3 e H2G3 apresentaram adaptação às condições de cultivo com o hidrogel que refletiu em maiores áreas das biomoléculas que o controle. Os resultados sugerem recuperação mais rápida nas mudas de Capororoca-Vermelha cultivadas com 25% e 20% de hidrogel em comparação aos tratamentos com 15% e 10%. O grupo H1G3 apresentou recuperação com áreas maiores nas bandas de água (5,86%), lipídios (6,72%), pectina (10,07%), parede celular (2,07%), clorofila (15,53%), amido (10,75%) e lignina (12,29%) em relação ao controle, apenas a banda de hemicelulose foi menor (8,41%), o grupo H1G3 foi o que apresentou melhor adaptação inicial.

O tratamento H2G3 também apresentou boa recuperação percentual nas áreas de água (14,26%), pectina (3,61%), clorofila (4,77%), amido (17,71%) e lignina (4,60%), somente foram menores as bandas de lipídios (3,32%), parede celular (2,20%) e hemicelulose (6,65%). A boa recuperação nas bandas de clorofila e pectina em ambos os tratamentos sugere que o mecanismo de fotossíntese e de transporte de nutrientes teve recuperação mais rápida que H3G3 e H4G3 durante a estação da primavera (VORAGEN et al., 2009; KUMAR et al., 2015). Os demais tratamentos somente apresentaram recuperação na mudança para o verão no mês de dezembro, enquanto H1G3 e H2G3 mantiveram o padrão (Figuras 54A e 54B).

Figura 54 - Áreas Dezembro 2019: A - Região 3800 a 2800 cm^{-1} ; B - Região 1800 a 450 cm^{-1}



Fonte: O Autor.

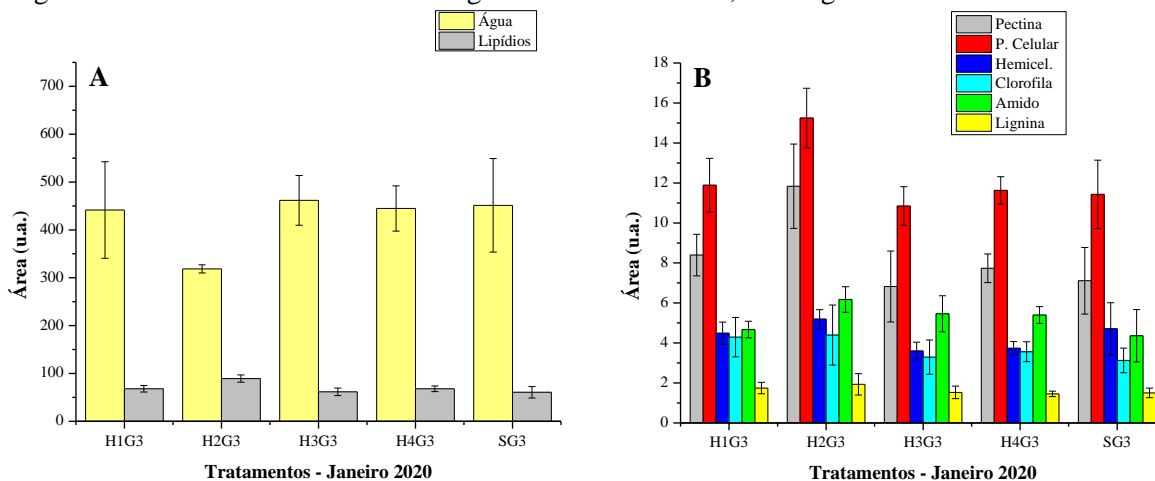
Após um período de oscilação nas áreas biomoleculares em novembro, todos os tratamentos com hidrogel apresentaram maiores áreas nas bandas da maior parte das biomoléculas avaliadas em dezembro. O mês demarca a transferência da estação da primavera para o verão com aumento na temperatura média, umidade atmosférica e incidência solar (LARCHER, 2000), o melhor desempenho nas mudas com hidrogel sugere uma melhor adaptação às novas condições ambientais. As mudas de H1G3 mantiveram o bom desenvolvimento iniciado em outubro e apresentaram maior área nas bandas de água (12,57%), lipídios (5,13%), pectina (5,89%), hemicelulose (10,53%), clorofila (63,91%) e lignina (15,00%), apenas as bandas de parede celular e amido foram menores no mês (3,33% e 13,02%).

O Grupo H2G3 também manteve o bom desempenho com maiores áreas de água (15,34%), lipídios (22,05%), pectina (38,75%), parede celular (7,75%), hemicelulose (6,73%), clorofila (115,15%) e lignina (49,22%) com exceção apenas da banda de amido que apresentou menor área que o controle (12,08%). As mudas de H3G3 apresentaram a primeira boa recuperação em dezembro com maiores áreas de água (38,25%), lipídios (4,72%), pectina (16,12%), clorofila (90,71%) e lignina (26,74%). O grupo H4G3 também apresentou melhor desempenho em relação ao controle com áreas maiores de lipídios (42,46%), pectina (55,68%), parede celular (14,90%), hemicelulose (8,26%), clorofila (80,52%), amido (17,26%) e lignina (28,78%), diferente dos demais tratamentos a banda de água teve área menor (11,81%).

As bandas avaliadas que melhor demonstraram o desempenho das mudas com hidrogel foram pectina e clorofila, que se destacaram na avaliação de todos os grupos de Capororoca-Vermelha cultivadas com hidrogel, sugerindo a importância de monitorar estas biomoléculas na avaliação por FTIR. Os tratamentos que se destacaram do mês inicial até dezembro de 2019

foram, em ordem de relevância, H2G3 e H3G3. O desempenho positivo nas mudas com hidrogel continuaram na sequência do verão em janeiro (Figuras 55A e 55B).

Figura 55 - Áreas Janeiro 2020: A - Região 3800 a 2800 cm^{-1} ; B - Região 1800 a 450 cm^{-1}



Fonte: O Autor.

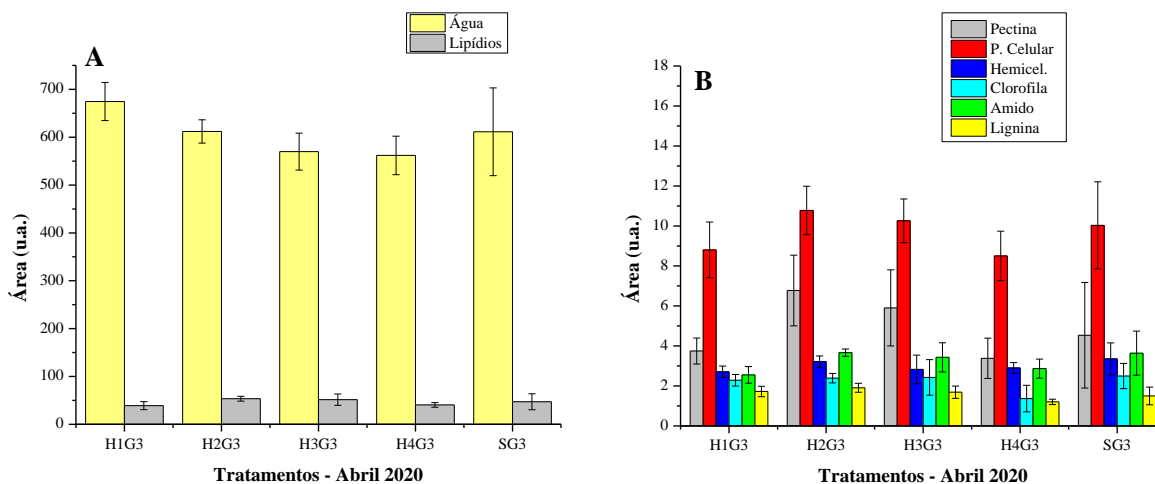
O bom desenvolvimento das mudas cultivadas com hidrogel permaneceu durante toda a estação do verão, com destaque para H2G3 que manteve a maior parte das áreas de bandas maiores que o controle entre dezembro e abril no verão até a transferência para o outono. No grupo H1G3 as áreas percentuais foram maiores nas bandas de lipídios (11,92%), pectina (18,07%), hemicelulose (3,99%), clorofila (37,18%), amido (7,06%) e lignina (16,03%), com exceção apenas das bandas de água e hemicelulose que foram 2,16% e 4,62% menores que o controle, mesmo com a menor área de água não houve influência negativa sobre o desenvolvimento biomolecular no grupo.

O grupo H2G3 manteve as maiores áreas nas bandas de lipídios (47,10%), pectina (66,47%), parede celular (33,39%), hemicelulose (10,35%), clorofila (40,52%), amido (41,55%) e lignina (28,40%), no período do verão houve ótimo desenvolvimento das bandas de pectina, clorofila e lipídios no grupo. O grupo H3G3 manteve o padrão de dezembro com áreas percentuais maiores de água (2,30%), lipídios (1,55%), clorofila (5,18%), amido (25,20%) e lignina (1,64%), as áreas foram menores nas bandas de pectina (4,03%), parede celular (5,09%) e hemicelulose (23,56%), o grupo não teve desempenho tão positivo como H1G3 e H3G3 na estação.

H4G3 manteve maiores as áreas de lipídios (11,88%), pectina (8,75%), parede celular (1,74%), clorofila (13,86%) e amido (23,77%), as bandas de água, hemicelulose e lignina foram 1,45%, 20,69% e 3,28% menores no mês. Os grupos mantiveram o bom desempenho até a

transferência para o outono, quando houve queda na maior parte dos grupos em abril (Figuras 56A e 56B).

Figura 56 - Áreas Abril 2020: A - Região 3800 a 2800 cm^{-1} ; B - Região 1800 a 450 cm^{-1}



Fonte: O Autor.

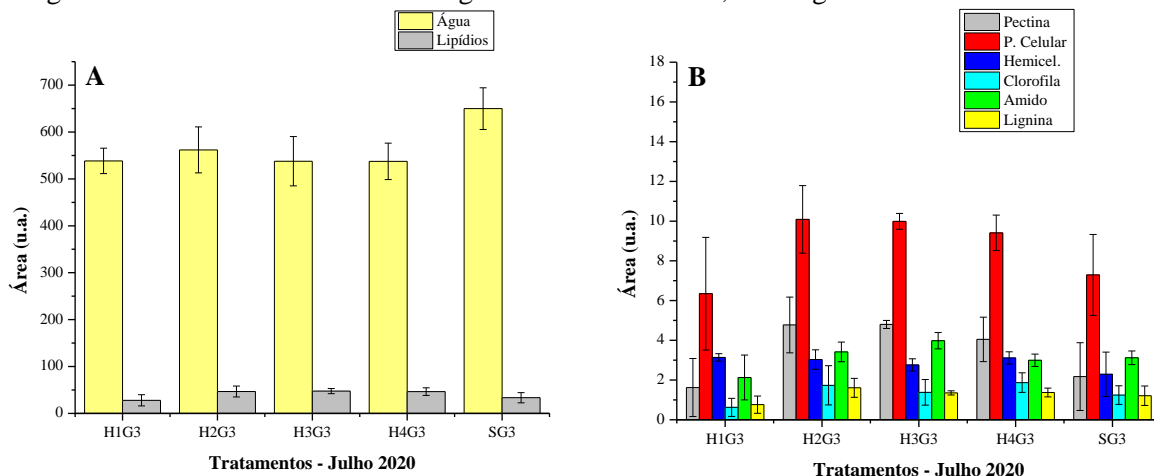
No mês de abril foi observada uma queda acentuada no patamar de áreas de todos os tratamentos avaliados como também se observou nos dados obtidos dos Grupos I e II, por conta da possível influência do armazenamento das amostras combinado à mudança estacional. Apesar do impacto a comparação das amostras de mudas com e sem hidrogel ainda possuem importância para avaliar o Grupo III já que todas foram armazenadas na mesma condição. O grupo H1G3 apresentou áreas menores nas bandas de lipídios (17,24%), pectina (17,36%), parede celular (12,22%), hemicelulose (19,19%), clorofila (8,49%) e amido (29,85%), apenas a água (10,34%) e a lignina (14,95%) foram maiores que o controle.

Diferente da tendência dos demais tratamentos em H2G3 houve áreas maiores nas bandas de lipídios (47,10%), pectina (66,47%), parede celular (33,39%), hemicelulose (10,35%), clorofila (40,52%), amido (41,55%) e lignina (28,40%), a banda de água praticamente se manteve constante em relação ao controle e as áreas foram menores na hemicelulose (4,06%) e clorofila (4,21%), a redução na banda de clorofila sugere uma influência da mudança estacional sobre o mecanismo fotossintético (KUMAR et al., 2015).

Em H3G3 as áreas foram menores nas bandas de água (6,79%), hemicelulose (15,64%), clorofila (2,84%) e amido (5,75%) e maiores nos lipídios (9,39%), pectina (30,19%), parede celular (2,28%) e lignina (12,51%), uma queda nas áreas menos impactante que a de H1G3. O grupo H4G3 com menor concentração de hidrogel apresentou áreas menores em todas as bandas, na de água (8,09%), lipídios (14,00%), pectina (25,42%), parede celular (15,24%), hemicelulose (13,47%), clorofila (45,09%), amido (21,24%) e lignina (19,73%). Os resultados

indicam melhor desempenho nas mudas com concentração de 20% de hidrogel. A adaptação dos grupos ao inverno ocorreu em julho (Figuras 57A e 57B).

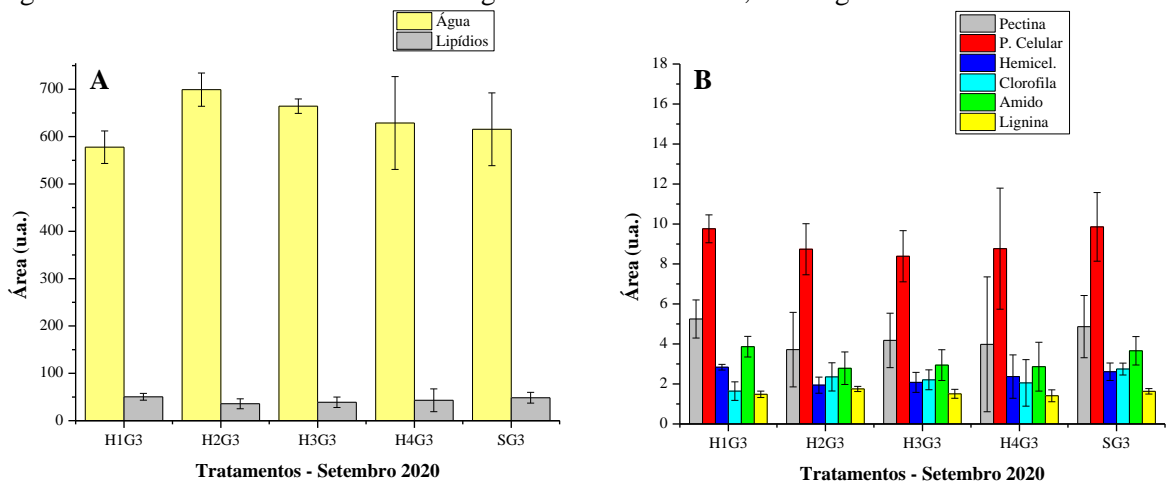
Figura 57 - Áreas Julho 2020: A - Região 3800 a 2800 cm^{-1} ; B - Região 1800 a 450 cm^{-1}



Fonte: O Autor.

Em julho os tratamentos H2G3, H3G3 e H4G3 apresentaram recuperação com as maiores áreas em relação ao controle. H1G3 apresentou desempenho abaixo dos demais pois a recuperação ocorreu no mês de junho e foi seguido de queda nas bandas de água (17,15%), lipídios (16,51%), pectina (25,23%), parede celular (12,93%), clorofila (49,67%), amido (31,83%) e lignina (37,17%), apenas a banda de hemicelulose apresentou área maior (37,06%). O grupo H2G3 teve boa recuperação em julho com áreas maiores nas bandas de lipídios (39,52%), pectina (119,75%), parede celular (38,39%), hemicelulose (32,39%), clorofila (39,47%), amido (9,49%) e lignina (32,91%), apenas a banda de água foi menor que do controle (13,55%), as bandas de pectina, clorofila e lipídios sugerem como a resiliência das mudas do grupo foi maior no inverno.

O grupo H3G3 teve desenvolvimento similar à H2G3 com maiores áreas nos lipídios (41,93%), pectina (120,97%), parede celular (37,02%), hemicelulose (20,44%), clorofila (10,97%), amido (27,47%) e lignina (11,68%), somente a banda de água foi menor (17,26%), a redução na banda de água nos grupos em julho provavelmente se deveu a baixa umidade da estação do inverno. O tratamento H4G3 apresentou maiores áreas nas bandas de lipídios (39,12%), pectina (86,33%), parede celular (29,07%), hemicelulose (35,93%), clorofila (50,46%) e lignina (13,48%), as áreas foram menores nas bandas de água (17,30%) e amido (4,09%). No desempenho no inverno os grupos H2G3 e H3G3 se destacaram no desenvolvimento, ao final do monitoramento os grupos apresentaram redução nas áreas por atingir o limite de desenvolvimento em setembro de 2020 (Figuras 58A e 58B).

Figura 58 - Áreas Setembro 2020: A - Região 3800 a 2800 cm^{-1} ; B - Região 1800 a 450 cm^{-1} 

Fonte: O Autor.

Após o fim do inverno na transição para a primavera, as mudas dos tratamentos sentiram o impacto depois do longo período de desenvolvimento, entre agosto e setembro de 2020 ocorreu uma forte onda de calor em duas semanas de monitoramento que afetaram negativamente os exemplares do Grupo III, nos Grupos I e II o impacto também ocorreu de forma mais branda, mesmo apresentando indícios de recuperação os danos foram observados na avaliação das bandas.

O grupo H1G3 apresentou a melhor recuperação após o impacto sofrido entre agosto e setembro. As áreas foram menores nas bandas de água (6,14%), parede celular (0,96%), clorofila (40,18%) e lignina (9,17%) e maiores que o controle nos lipídios (4,04%), pectina (7,86%), hemicelulose (8,66%) e amido (5,65%). O impacto sobre H2G3 foi mais acentuado do que em H1G3 com queda nas áreas de lipídios (26,28%), pectina (23,64%), parede celular (11,32%), hemicelulose (25,61%) clorofila (14,31%) e amido (23,84%), as áreas foram maiores apenas nas bandas de água (13,59%) e lignina (7,28%).

H3G3 teve impacto mais acentuado e apenas a banda de água foi maior (7,94%), as biomoléculas apresentaram áreas menores que o controle nos lipídios (19,64%), pectina (14,13%), parede celular (14,89%), hemicelulose (20,30%), clorofila (19,62%), amido (19,53%) e lignina (7,68%). Da mesma forma que H3G3, o grupo H4G3 teve área menor de lipídios (11,24%), pectina (18,17%), parede celular (11,04%), hemicelulose (9,13%), clorofila (25,26%), amido (21,77%) e lignina (13,66%), somente a banda de água foi maior que o controle (2,17%).

O uso do hidrogel proporciona melhor desenvolvimento vegetal nas condições de restrição hídrica (MUDHANGANYI et al., 2016). Segundo Larcher (2000), cada espécie arbórea demanda uma quantidade diferente de água para o melhor crescimento, o uso do

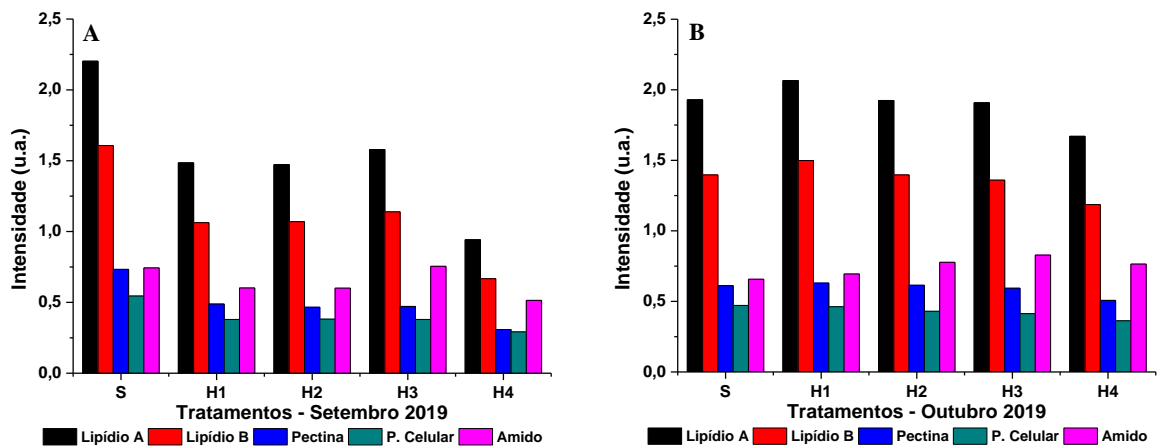
hidrogel pode influenciar nestas propriedades, desta forma é imprescindível avaliar como a espécie responde ao uso de diferentes concentrações de hidrogel no substrato (NAVROSKI et al., 2016).

Os resultados obtidos da avaliação de diferentes quantidades de hidrogel no cultivo da Capororoca-Vermelha por FTIR sugere um melhor desenvolvimento biomolecular nas mudas tratadas com 20% de hidrogel (H2G3). As bandas que melhor responderam a influência do hidrogel nos tratamentos do Grupo III foram a de pectina, clorofila e lipídios, principalmente nos tratamentos com 20% (H2G3) e 15% de hidrogel (H3G3), portanto, a faixa entre 15% e 20% mostrou-se ideal para o cultivo da espécie.

A fim de complementar a avaliação da influência direta do uso do hidrogel sobre os exemplares de Capororoca-Vermelha no Grupo III, foram selecionadas 5 bandas com boa definição, finas e com menos sobreposições para a avaliação da intensidade (STUART, 2004). As bandas selecionadas foram: lipídios, com picos característicos em 2917 cm^{-1} (A) e 2850 cm^{-1} (B) que no cálculo de área foram avaliadas em conjunto; pectina (1730 cm^{-1}); parede celular (1464 cm^{-1}) e amido (1102 cm^{-1}). A análise de intensidade é importante para a inspeção visual de espectros, que pode ser útil para avaliar de forma inicial alterações provocadas por influências ambientais externas, neste caso do hidrogel sobre as biomoléculas da Capororoca-Vermelha.

As bandas que se destacaram na avaliação de intensidade foram as de lipídios e pectina. Inicialmente foi observado uma dominância do grupo controle (S) em setembro de 2019 (Figura 59A) seguida de melhor adaptação dos grupos com hidrogel a partir de outubro de 2019 (Figura 59B), padrão também visto na análise das áreas anteriormente.

Figura 59 - Intensidade de Bandas: A - Setembro 2019; B - Outubro 2019



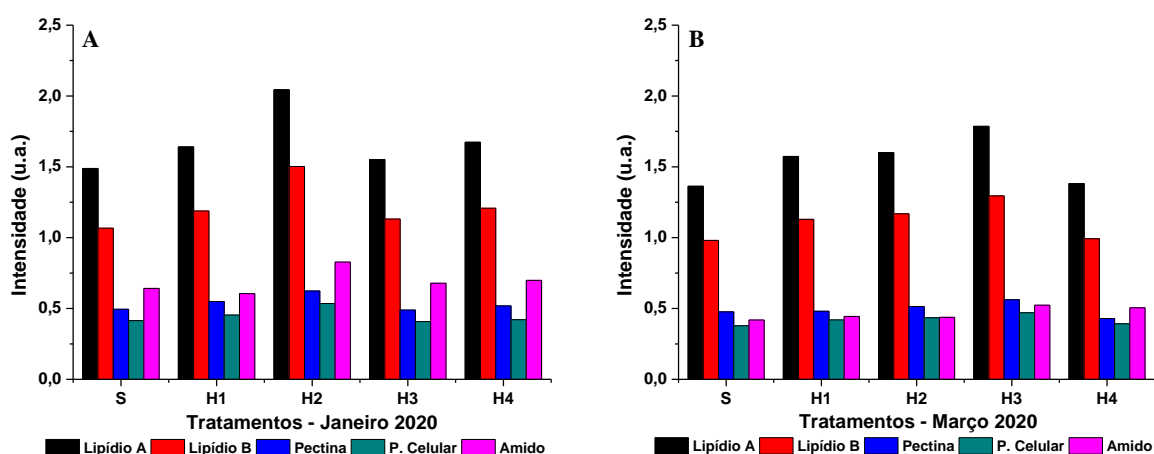
Fonte: O Autor.

No mês de setembro de 2019, o grupo controle dominava com as maiores intensidades de bandas biomoleculares com exceção apenas da banda de amido em H3G3. As mudas com hidrogel estavam em processo de adaptação às novas condições, refletindo nas bandas do espectro FTIR, pois as plantas são extremamente sensíveis à alterações no substrato (NAVROSKI *et al.*, 2016), portanto, observar como a Capororoca-Vermelha se adaptou às diferentes concentrações de hidrogel é importante para a adoção da melhor forma de manejo.

Em outubro, os grupos cultivados com hidrogel apresentaram uma recuperação na intensidade das bandas avaliadas que sugere uma adaptação às novas condições como é possível observar a queda acentuada das intensidades das bandas no grupo controle e aumento nos cultivos com hidrogel (Figura 59B). O tratamento que apresentou melhor recuperação foi H1G3, que apresentou maiores percentuais de intensidade que o controle nas bandas de lipídios (A: 7,04%; B: 7,25%), pectina (2,99%) e amido (5,63%). Os demais tratamentos apresentaram menor intensidade que o controle na maior parte das bandas, porém com percentual de diferença menor (10%) que setembro onde as bandas variaram em 40%.

A recuperação continuou na transferência para o verão nos meses de novembro e dezembro atingindo a hegemonia de intensidade de bandas nos tratamentos com hidrogel em janeiro de 2020 (Figura 60A) que permaneceu constante no verão até o fim da estação em março na transferência para o outono (Figura 60B).

Figura 60 - Intensidade de Bandas: A - Janeiro 2020; B - Março 2020



Fonte: O Autor.

Em janeiro todos os grupos com hidrogel apresentaram melhor desempenho que o controle. H2G3 se destacou com aumento percentual da intensidade de lipídios (A: 37,34%; B: 40,84%) e pectina (26,18%), H4G3 também teve aumento e todas as bandas em relação ao controle. No mês de março o padrão se manteve e os grupos H2G3 e H3G3 se destacaram

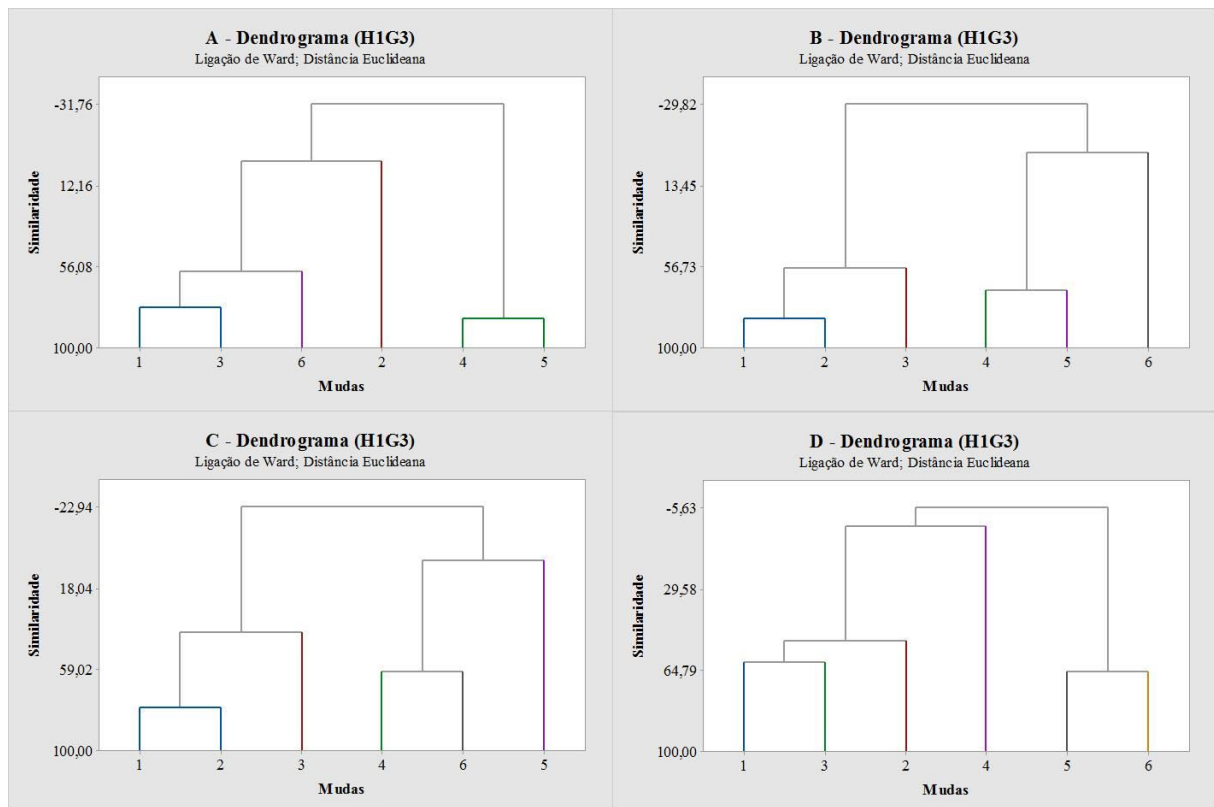
principalmente na banda de lipídios em relação ao controle, os picos foram mais intensos entre 20% a 30% comparados ao controle, o pico da banda de pectina também foi mais intenso de 10% a 20% nos tratamentos com hidrogel.

Portanto, os resultados da avaliação da intensidade sugerem que as bandas de lipídios e pectina se destacam para avaliar a influência do hidrogel sobre a Capororoca-Vermelha e que os grupos com 20% (H2G3) e 15% (H3G3) apresentaram a melhor evolução. A banda de lipídios é importante para quantificar alterações sobre o desenvolvimento vegetal e se destacam no monitoramento por FTIR (KASIM et al., 2014).

4.3.2 Análise Multivariada - Grupo III

Os espectros obtidos das mudas de Capororoca-Vermelha do Grupo III foram avaliados por meio de análise multivariada, seguindo a mesma metodologia de análise dos Grupos I e II foram comparados cada tratamento com hidrogel com as mudas controle com intuito de observar as diferenças entre os grupos nos meses de avaliação. Os resultados obtidos no Grupo III foram melhores do que dos demais grupos avaliados, a separação completa em grupos independentes ocorreu em todos os tratamentos em alguns meses do monitoramento. Na avaliação das mudas de H1G3 não houve separação em novembro de 2019 (Figura 61A) ocorrendo posteriormente nos meses de dezembro de 2019 (Figura 61B), janeiro de 2020 (Figura 61C) e agosto de 2020 (Figura 61D).

Figura 61 - Dendrogramas H1G3 x SG3: A - Nov/19; B - Dez/19; C - Jan/20; D - Ago/20



Legenda = Mudanças - Com Hidrogel (1, 2 e 3) - Sem Hidrogel (4, 5 e 6)
Fonte: O Autor.

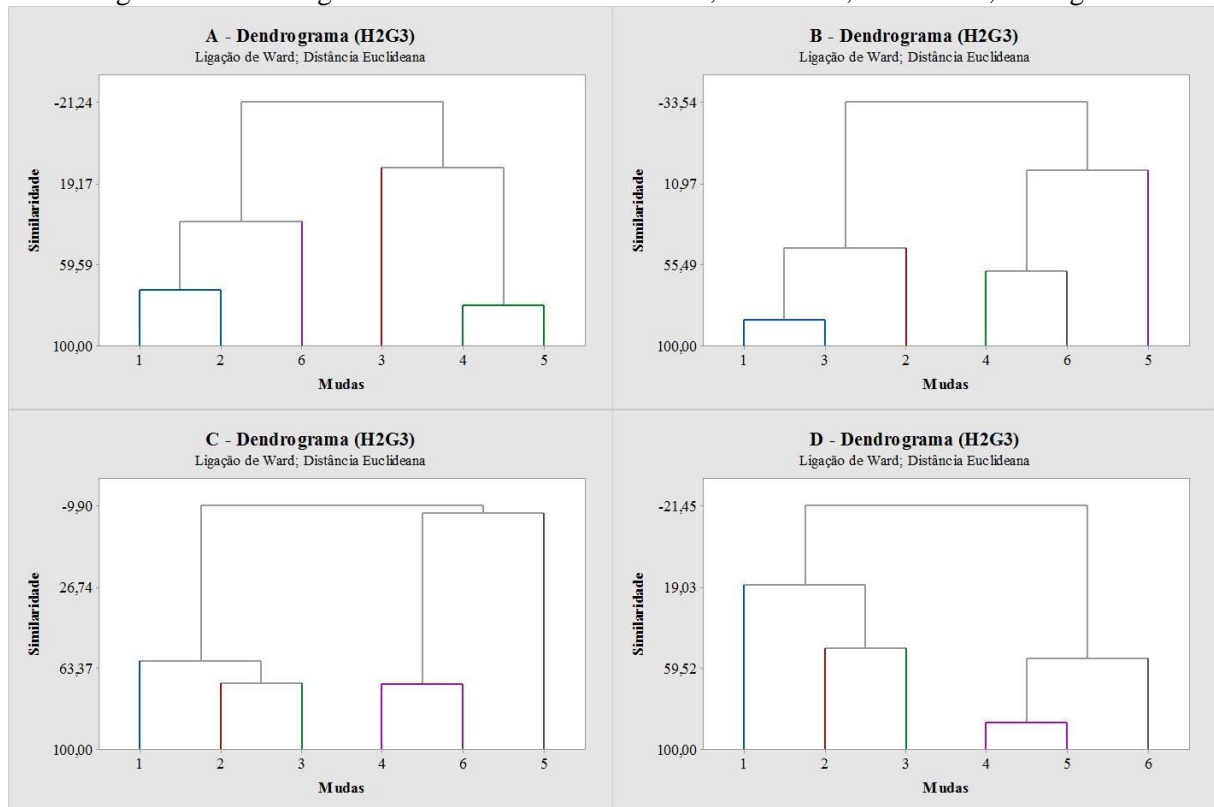
Em H1G3 ocorreu uma progressão para uma melhor separação das mudas de novembro de 2019 a janeiro de 2020. Em novembro (Figura 61A) os grupos separaram parcialmente, os exemplares com hidrogel 1 e 3 apresentaram similaridade de 77,82%, apenas a muda 2 se misturou com as mudas sem hidrogel. No mês de dezembro os grupos se separaram de forma independente. As mudas com hidrogel formaram um grupo mais homogêneo, os exemplares 1 e 2 apresentaram 84,15% de similaridade e ambas se assemelharam em 57,49% à muda 3, as mudas sem hidrogel (4, 5 e 6) formaram um grupo mais heterogêneo (Figura 61B).

A separação dos grupos permaneceu em janeiro (Figura 61C), com uma diminuição na homogeneidade no agrupamento dos exemplares de H1G3, no entanto, com menor heterogeneidade que os exemplares de SG3. As mudas com hidrogel 1 e 2 se assemelharam em 77,97% e ambas apresentaram 39,70% de similaridade à muda 3.

A homogeneidade dos grupos diminuiu na sequência do monitoramento e houve dispersão entre os grupos no período de fevereiro à julho, somente no mês de agosto (Figura 61D) que as mudas com hidrogel apresentaram maior similaridade, as mudas 1 e 3 se assemelharam em 61,06% e ambas apresentaram semelhança de 51,81% à muda 2, os exemplares controle (4, 5 e 6) se espalharam de forma heterogênea.

Em setembro a dispersão entre H1G3 e SG3 voltou a ocorrer e os grupos não se separaram independentemente na análise multivariada. Houve similaridade com os resultados de H1G3. A separação foi parcial em dezembro de 2019 (Figura 62A) e completa em janeiro de 2020 (Figura 62B), abril de 2020 (Figura 62C) e junho de 2020 (Figura 62D).

Figura 62 - Dendrogramas H2G3 x SG3: A - Dez/19; B - Jan/20; C - Abr/20; D - Ago/20



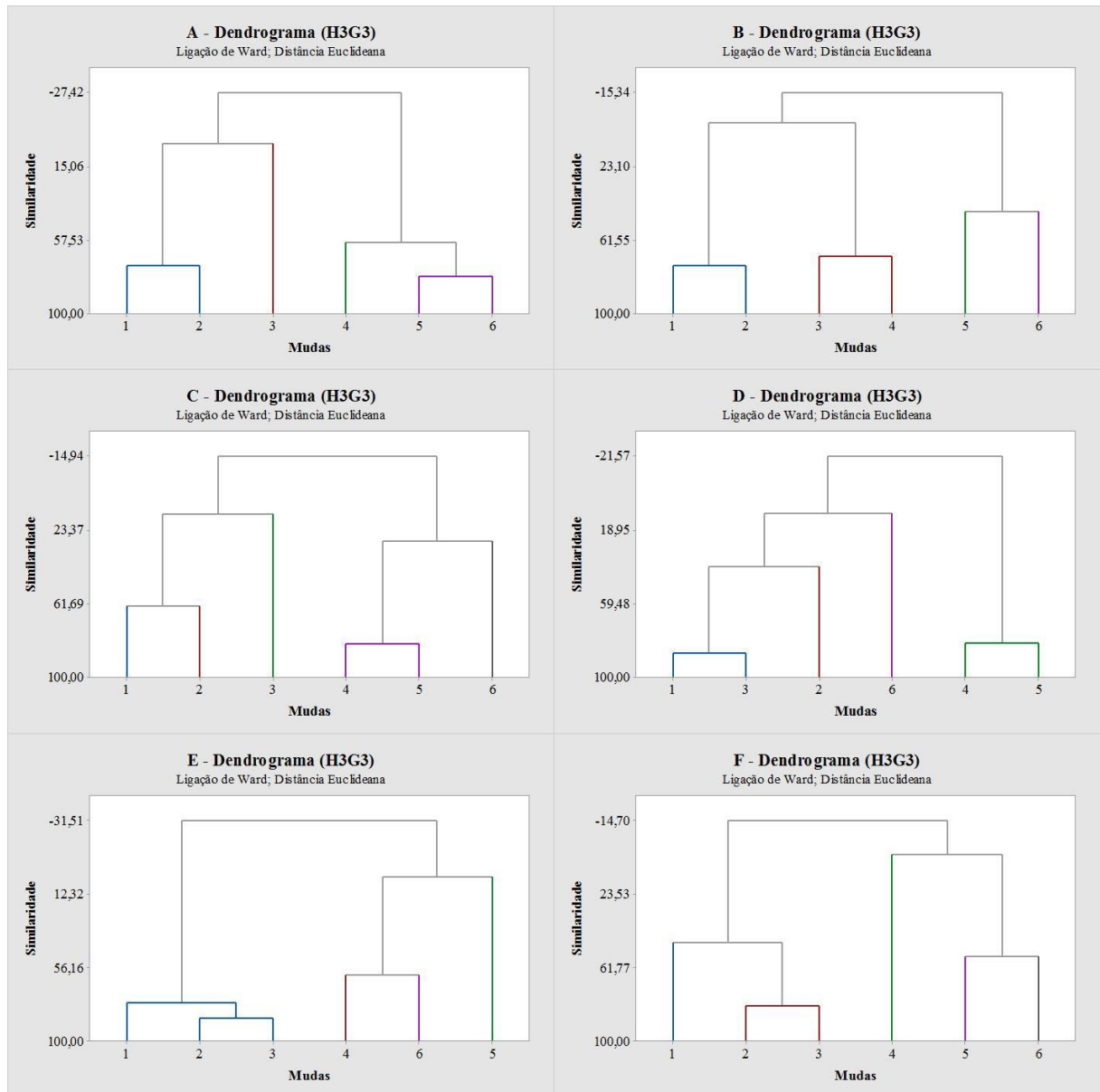
Legenda = Mudanças - Com Hidrogel (1, 2 e 3) - Sem Hidrogel (4, 5 e 6)

Fonte: O Autor.

Não houve separação em dezembro (Figura 62A), as mudas com hidrogel 1 e 2 se assemelharam em 72,23%, apenas a muda 3 se misturou às mudas sem hidrogel. No mês de janeiro (Figura 62B) houve separação completa, os exemplares 1 e 3 apresentaram semelhança de 85,10% e ambas se assemelharam em 46,48% à muda 2, H2G3 foi mais homogêneo que SG3. Nos meses de fevereiro o março houve dispersão. Em abril (Figura 62C) os grupos separaram com 69,94% de similaridade entre os exemplares com hidrogel 2 e 3 e ambos se assemelharam em 59,95% à muda 1. A dispersão voltou em maio e no mês de junho houve formação separação (Figura 62D), as mudas 2 e 3 tiveram 49,79% de semelhança e ambas apresentaram 17,81% de similaridade à muda 1.

O grupo H3G3 apresentou melhor separação na análise multivariada dos meses (Figuras 63A a 63F).

Figura 63 - Dendrogramas H3G3 x SG3: A - Set/19; B - Out/19; C - Nov/20; D - Dez/20; E - Jan/20; F - Jun/20



Legenda = Mudás - Com Hidrogel (1, 2 e 3) - Sem Hidrogel (4, 5 e 6)

Fonte: O Autor.

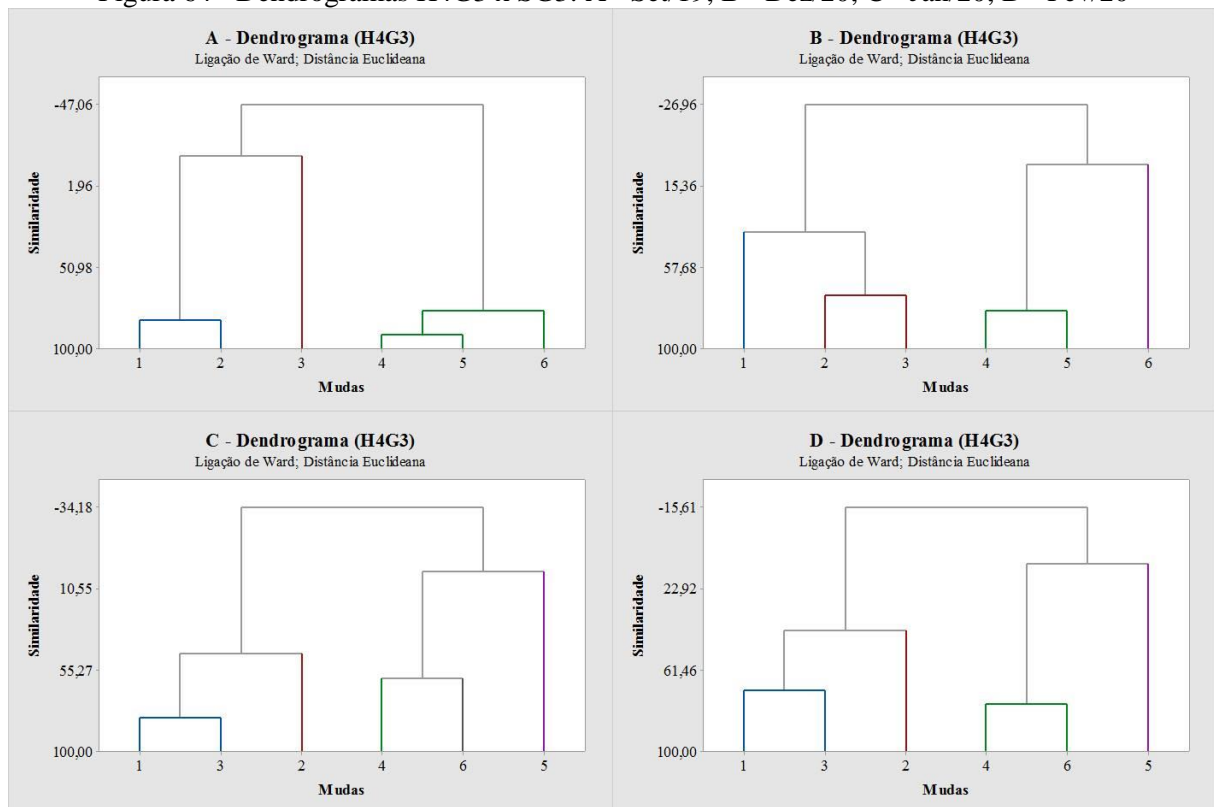
Em setembro de 2019 (Figura 63A) a similaridade entre 1 e 2 foi de 72,34% e ambas formaram grupo com a muda 3 ainda que com similaridade estatisticamente baixa (1,96%). Em outubro (Figura 63B) o exemplar sem hidrogel 4 se misturou com similaridade de 70,05% ao exemplar 3. As mudas 1 e 2 assemelharam 75,11% e ambas formaram grupo com as mudas 3 e 4. No mês de novembro (Figura 63C), os exemplares 1 e 2 assemelharam 62,64% e ambas formaram grupo com a muda 3 (15,33%).

Em dezembro o padrão permaneceu (Figura 63D), as mudas 1 e 3 apresentaram 86,64% de similaridade e ambas se assemelharam em 38,94% ao exemplar 2. O mês de janeiro (Figura 63E) apresentou a maior homogeneidade nas mudas com hidrogel, os exemplares 2 e 3 se

assemelharam em 85,96% e ambas tiveram 77,34% de semelhança à muda 1. Entre fevereiro e maio houve dispersão, os grupos separaram em junho (Figura 63F), os exemplares 2 e 3 se assemelham 81,65% e ambos tiveram 48,75% de semelhança à muda 1, na sequência os tratamentos dispersaram de julho a setembro.

O desempenho das mudas de H4G3 foi melhor que H1G3 e H2G3, porém abaixo de H3G3 principalmente no início do monitoramento (Figuras 64A à 64D).

Figura 64 - Dendrogramas H4G3 x SG3: A - Set/19; B - Dez/20; C - Jan/20; D - Fev/20



Legenda = Mudas - Com Hidrogel (1, 2 e 3) - Sem Hidrogel (4, 5 e 6)

Fonte: O Autor.

As mudas de H4G3 se separaram de SG3 em setembro (Figura 64A), os exemplares 1 e 2 se assemelharam 82,61% e ambas formaram grupo com a muda 3, porém com baixa significatividade. Após dispersão nos meses de outubro e novembro houve formação de grupos independentes em dezembro (Figura 64B), os exemplares 2 e 3 se assemelharam 71,81% e ambas apresentaram 39,14% de similaridade à muda 1. O padrão de separação permaneceu na sequência, os exemplares 1 e 3 se assemelharam em 81,07% em janeiro e 71,12% em fevereiro formando grupo com a muda 2 com 45,91% e 42,26% de semelhança nos meses respectivos. Entre março e setembro a dispersão aumentou e não houve separação.

Compostos orgânicos vegetais de mesma origem podem ser de difícil discriminação por análise multivariada mesmo com as diferenças existentes entre os exemplares comparados

(TAPP et al., 2003). Apesar de ter ocorrido separação completa nos tratamentos do Grupo III em alguns meses do monitoramento, na análise multivariada não é possível afirmar que a separação tenha sido pelo uso do hidrogel, no entanto, permanece como uma possibilidade já que análise das áreas das bandas demonstrou de forma clara como o desenvolvimento se diferenciou nos tratamentos.

4.3.3 Teste de Mann-Whitney - Grupo III

Os espectros obtidos no Grupo III foram comparados estatisticamente por meio do Teste de Mann-Whitney. Os resultados obtidos sugerem houve diferença significativa na maior parte dos meses entre as mudas com hidrogel comparadas ao controle (Tabela 15).

Tabela 15 - Teste de Mann-Whitney - Grupo III

Valor P	H1 x S	H2 x S	H3 x S	H4 x S
Set - 2019	0,000*	0,000*	0,000*	0,000*
Out - 2019	0,850	0,798	0,001*	0,000*
Nov - 2019	0,000*	0,000*	0,000*	0,000*
Dez - 2019	0,000*	0,000*	0,000*	0,092
Jan - 2020	0,657	0,000*	0,000*	0,000*
Fev - 2020	0,076	0,000*	0,000*	0,000*
Mar - 2020	0,000*	0,000*	0,000*	0,000*
Abr - 2020	0,000*	0,000*	0,000*	0,004*
Mai - 2020	0,000*	0,063	0,000*	0,000*
Jun - 2020	0,000*	0,000*	0,000*	0,004*
Jul - 2020	0,000*	0,000*	0,000*	0,000*
Ago - 2020	0,392	0,001*	0,042*	0,000*
Set - 2020	0,000*	0,024*	0,357	0,000*

*Diferença Significativa ($p < 0,05$)

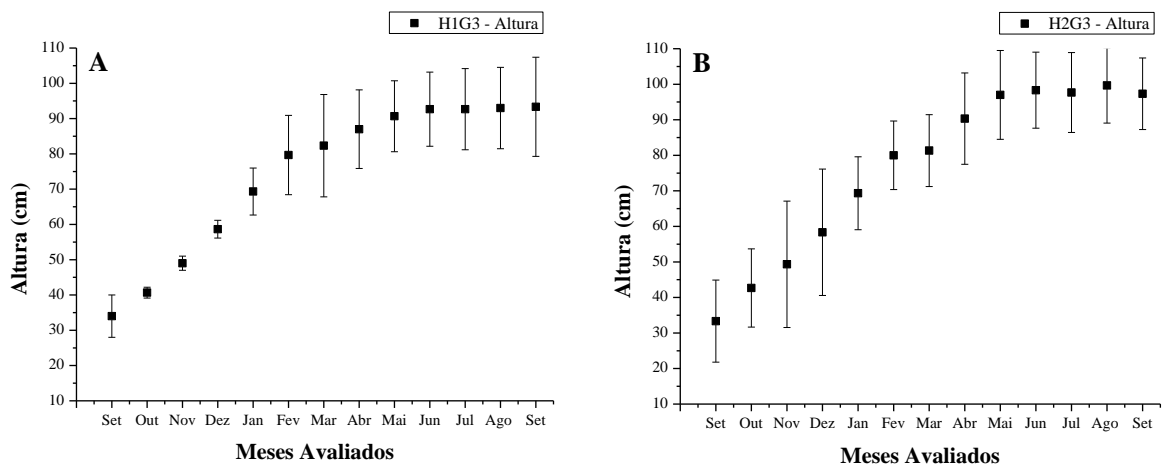
Fonte: O Autor.

As mudas cultivadas em H3G3 e H4G3 apresentaram diferenças significativas em 12 dos 13 meses de comparação com exceção apenas dos meses de setembro de 2020 em H3G3 e dezembro de 2019 em H4G3. O grupo H2G3 teve 11 dos 13 meses com diferença significativa em relação à SG3, exceto os meses de outubro de 2019 e maio de 2020. As mudas de H1G3 apresentaram similaridade em menos meses que os demais tratamentos (9 dos 13 meses), não sendo significativa nos meses de outubro, janeiro, fevereiro e agosto. Os resultados demonstram a diferença existente entre os espectros dos cultivos com hidrogel em relação ao controle, porém sem sugerir a causa. A avaliação das áreas das bandas dos espectros permitiram observar melhor como o uso do hidrogel influenciou o desenvolvimento das mudas de Capororoca-Vermelha.

4.3.4 Avaliação da Altura e Número de Folhas - Grupo III

O Grupo III foi preparado com diferentes concentrações de hidrogel com intuito de observar a resposta do desenvolvimento da *Rapanea ferruginea* nas diferentes condições. O manejo de irrigação, controle de pragas e adubação permaneceu o mesmo adotado nos grupos I e II, somente as diferentes quantidades de hidrogel aplicadas diferiram nas mudas avaliadas. A avaliação do crescimento indicou que as mudas do Grupo III atingiram o mesmo valor de altura das mudas com e sem hidrogel cinco meses antes dos Grupos I e II, portanto, o uso de hidrogel seguindo a metodologia adotada no grupo III possibilitou um melhor desempenho de crescimento da *R. ferruginea*. Nas Figuras 65A e 65B estão dispostos os padrões de crescimento das mudas com 25% (H1G3) e 20% (H2G3) de hidrogel.

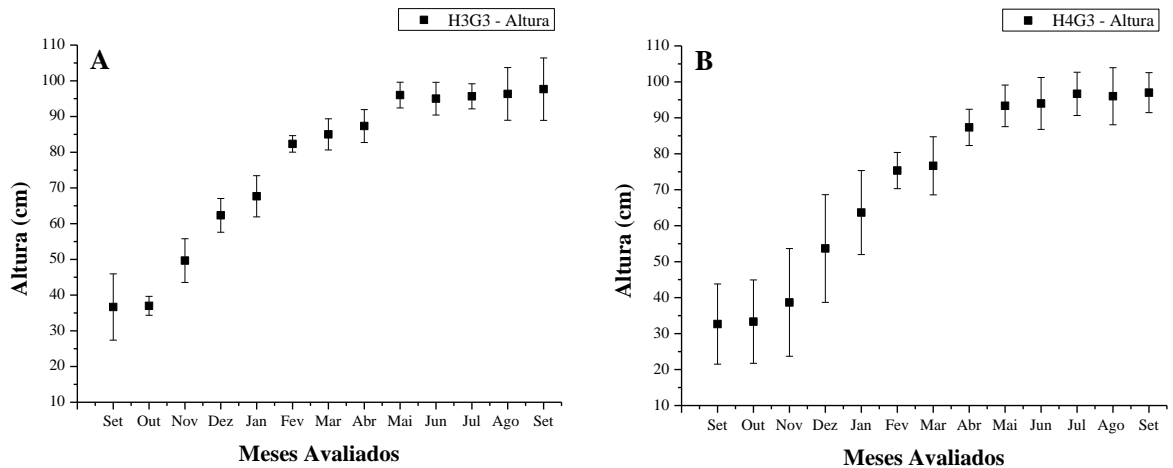
Figura 65 - Padrão de Crescimento: A - H1G3 (25%); B - H2G3 (20%)



Fonte: O Autor.

Ambos os tratamentos dobraram a altura média inicial medida em setembro de 2019, 4 meses depois da primeira medida, um mês antes do resultado observado nos Grupos I e II nas mudas com hidrogel. Houve crescimento percentual de 174,51% na altura do subgrupo H1 (25%) e 192,00% no grupo H2 (20%). O desvio padrão médio de H2 indica maior heterogeneidade no grupo em todo o intervalo, enquanto que o grupo H1 aumentou o desvio a partir de fevereiro de 2019. Nas Figuras 66A e 66B estão dispostos os padrões de 15% (H3) e 10% (H4).

Figura 66 - Padrão de Crescimento: A - H3G3 (15%); B - H4G3 (10%)

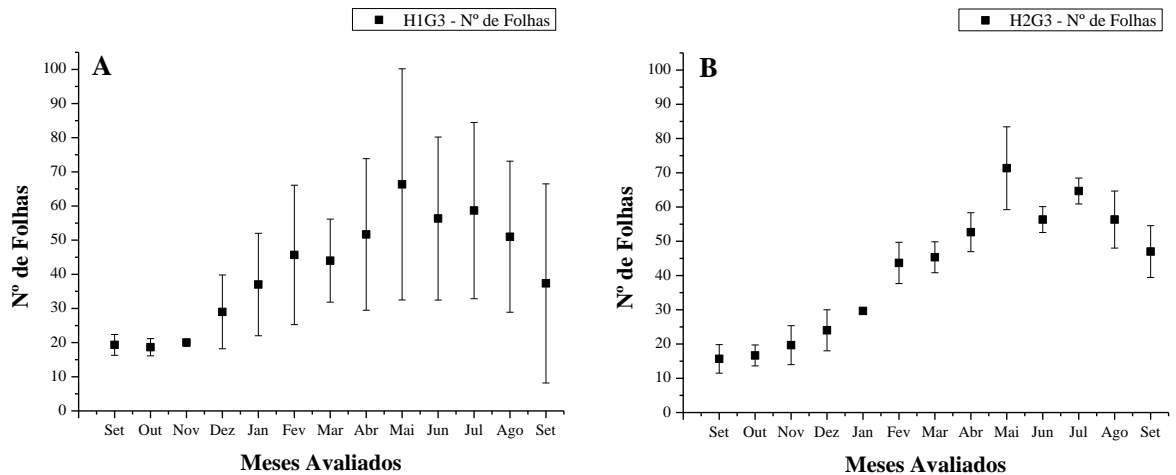


Fonte: O Autor.

A tendência de crescimento em H3G3 foi percentualmente menor (166,26%) do que os H1G3 e H2G3 no período total de monitoramento, no entanto o crescimento foi o mais homogêneo dentre todos avaliados. As mudas de H4G3 apresentou o maior crescimento percentual dentre todos os grupos (196,94%), o desvio padrão foi relativamente alto até janeiro de 2020, porém a partir deste período as mudas ficaram mais homogêneas. Portanto, pela análise dos gráficos as mudas cultivadas com 10% (H4G3) e 20% de hidrogel (H2G3) apresentaram o melhor desempenho de crescimento. As mudas com 15% (H3G3) apresentaram o crescimento mais homogêneo dentre os tratamentos.

As mudas do Grupo III foram afetadas pela forte onda de calor no final do monitoramento, principalmente as mudas do grupo de 25% (H1G3) no qual um dos exemplares perdeu quase todas as folhas como também ocorreu com uma das mudas do Grupo II, este fenômeno resultou em um desvio padrão médio alto no mês de setembro. O monitoramento também demarcou o ponto do limite de desenvolvimento como observado nas mudas dos Grupos I e II. Nas Figuras 67A e 67B estão dispostos os padrões das mudas com 25% (H1G3) e 20% (H2G3) de hidrogel.

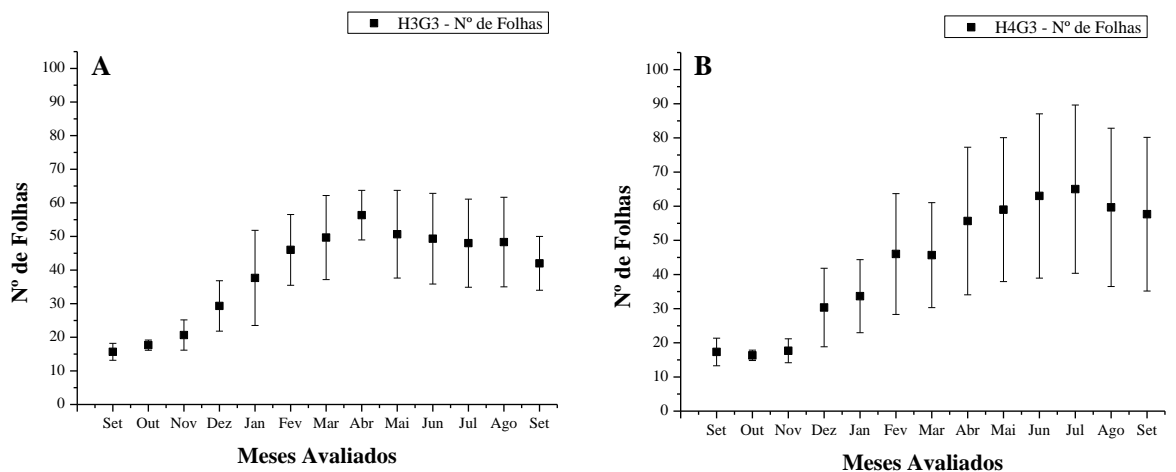
Figura 67 - Desenvolvimento Foliar: A - H1G3 (25%); B - H2G3 (20%)



Fonte: O Autor.

As mudas de H1G3 apresentaram o pico de número de folhas em maio, totalizando crescimento percentual de 243,10%, entre maio a setembro houve queda de 43,72%, o desvio padrão foi alto em grande parte do período de medição devido às diferenças morfológicas entre os exemplares, que apresentaram grande volume de ramos. As mudas de H2G3 tiveram melhor desenvolvimento até o pico em maio (355,32%) seguido de queda de 34,11% até setembro com desvio padrão médio mais baixo dentre os subgrupos avaliados no Grupo III. Nas Figuras 68A e 68B estão dispostos os padrões de 15% (H3) e 10% (H4).

Figura 68 - Desenvolvimento Foliar: A - H3G3 (15%); B - H4G3 (10%)



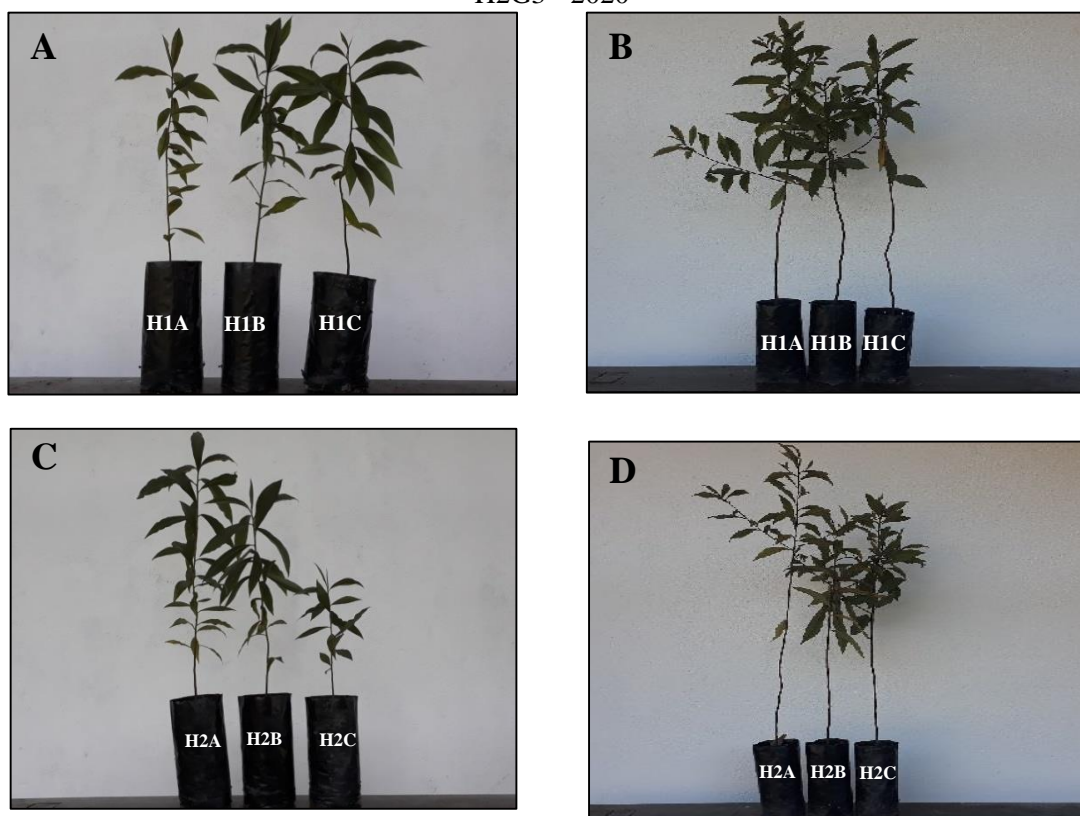
Fonte: O Autor.

O pico nas mudas de H3G3 ocorreu em abril de 2020 totalizando crescimento de 259,57% desde o início do monitoramento, de abril a setembro de 2020 houve queda de 25,44% no número de folhas, o desvio foi maior que o grupo H2G3, porém não foi disperso como os padrões de H1G3 e H4G3. As mudas de H4G3 tiveram desenvolvimento de 275,00% até o pico

em julho, seguido de leve queda de 11,28% de julho a setembro, apesar de ser o segundo grupo com maior crescimento médio o desvio padrão indicou uma alta heterogeneidade no grupo. Portanto, ao observar os padrões de crescimento e os desvios padrão os melhores desempenhos de desenvolvimento foliar no Grupo III ocorreram nas concentrações de 20% e 15% de hidrogel.

As mudas cultivadas no Grupo III apresentaram um perfil externo colunar com similaridade aos exemplares sem hidrogel cultivados no Grupo II, no entanto, com maior volume de ramos e folhas. As mudas cultivadas com 25% de hidrogel (H1G3) apresentaram uma homogeneidade em 2019 (Figura 69A) que se manteve em 2020 (Figura 69B). Apesar de ter altura heterogênea em 2019 (Figura 69C) as mudas com 20% de hidrogel (H2G3) atingiram altura similar em 2020 (Figura 69D). Observou-se bom desenvolvimento foliar proporcionado pelo suprimento de água absorvido pelo hidrogel no substrato dos

Figura 69 - Aspecto Externo das Mudanças: A - H1G3 - 2019; B - H1G3 - 2020; C - H2G3 - 2019; D - H2G3 - 2020



Fonte: O Autor.

As mudas de Caporoça-Vermelha cultivadas com 15% de hidrogel (H3G3) apresentaram um perfil de altura com bastante homogeneidade em 2019 (Figura 70A) se assemelhando à H1G3, em 2020 (Figura 70B) o crescimento manteve-se similar com que refletiu no baixo valor de desvio padrão de altura, também houve maior desenvolvimento foliar

em 2020. Os exemplares cultivados com 10% de hidrogel (H4G3) apresentaram bastante heterogeneidade na altura em 2019 como em H2G3 (Figura 70C) que diminuiu com o tempo apresentando patamar similar em 2020 que refletiu na redução do desvio padrão (Figura 70D).

Figura 70 - Aspecto Externo das Mudanças: A - H3G3 - 2019; B - H3G3 - 2020; C - H4G3 - 2019; D - H4G3 - 2020



Fonte: O Autor.

A avaliação dos aspectos externos das mudas de Capororoça-Vermelha do Grupo III evidenciaram semelhanças com os resultados da análise das bandas biomoleculares dos espectros FTIR obtidos. As mudas cultivadas com 20% (H2G3) se destacaram em ambas avaliações, resultado que sugere que esta concentração proporciona o melhor desenvolvimento. Importante salientar que todas as concentrações utilizadas não ofereceram limitações para o desenvolvimento da Capororoça-Vermelha.

O uso do hidrogel mostrou-se positivo para o crescimento vegetal sobre as condições de restrição hídrica impostas no experimento, as evidências foram observadas internamente, pela avaliação das bandas correspondentes às importantes biomoléculas nos espectros obtidos, e externamente, pelo acompanhamento da altura e desenvolvimento foliar nos exemplares de Capororoça-Vermelha dos Grupos I, II e III. O estresse hídrico é um dos principais fatores limitantes para o crescimento por afetar diretamente os processos fisiológicos dos vegetais

superiores (LARCHER, 2000), desta forma, a recuperação de áreas degradadas com baixa irrigação se torna problemática (MUDHANGANYI *et al.*, 2016).

Os resultados obtidos na avaliação do uso do hidrogel no cultivo da Capororoca-Vermelha sob restrição hídrica mais uma vez sugere os benefícios sobre a capacidade de resiliência das plantas ao ambiente também abordados em pesquisas com outras espécies vegetais (SARVAS *et al.*, 2007; MEWS *et al.*, 2015; NAVROSKI *et al.*, 2016; MUDHANGANYI *et al.*, 2016; LINARES-GABRIEL *et al.*, 2018). Além da influência positiva sobre os aspectos externos dos exemplares avaliados, foram obtidas importantes evidências do bom desenvolvimento biomolecular da Capororoca-Vermelha pela avaliação por espectroscopia no infravermelho com FTIR, confirmando a viabilidade do uso da técnica de FTIR na avaliação da influência ambiental externa sobre o desenvolvimento vegetal (ZIMMERMAN; KOHLER, 2014; DEPCIUCH *et al.*, 2017; LINS, 2017; DURAK; DEPCIUCH, 2020).

O melhor desenvolvimento biomolecular das mudas de Capororoca-Vermelha foi evidenciado principalmente nas bandas de clorofila e pectina nos exemplares dos Grupos I, II e III e na banda de lipídios especialmente nas mudas cultivadas com maiores concentrações no Grupo III, as demais biomoléculas avaliadas também apresentaram resultados positivos em comparação às mudas sem hidrogel nos Grupos. As bandas supracitadas são sugeridas como importantes para o monitoramento da influência do hidrogel na espécie, porém não é possível afirmar que são bandas marcadoras desta influência, pois diversos fatores afetam concomitantemente o crescimento vegetal.

4.4 Avaliação da Influência do Hidrogel sobre a Germinação Vegetal

As sementes da Capororoca-Vermelha e demais espécies pertencentes ao gênero *Rapanea* possuem um tegumento fibroso que dificulta o processo de germinação, em especial no cultivo experimental, onde a taxa de germinação é baixa em torno de 30% (LORENZI, 2008). No ambiente natural o processo de degradação do tegumento é facilitado pela passagem das sementes pelo trato digestivo de animais, especialmente da avifauna (PASCOTTO, 2007). Em condições artificiais são conduzidos processos de quebra de dormência das sementes, nos testes realizados na pesquisa as sementes utilizadas foram imersas em água por 24 horas (LORENZI, 2008).

Para a realização do teste de germinação foram adquiridas sementes por meio de compra *on-line* no segundo semestre de 2019, os testes iniciais foram inconclusivos com germinação

esparsa de alguns exemplares. Pela observação da característica das plântulas observou-se que as sementes correspondiam à espécie congênere *Rapanea guianensis*. As sementes das espécies do gênero são bastante similares que conduziu ao erro de identificação do fornecedor (LORENZI, 2008).

Mesmo com o insucesso do experimento inicial foram obtidos resultados importantes quanto ao manejo do hidrogel no cultivo para germinação. O plantio foi conduzido com 5 tratamentos distintos, 25% (H1), 20% (H2), 15% (H3), 10% (H4) de hidrogel e o controle (S). A germinação das sementes de *R. guianensis* foi inconclusiva nos tratamentos, porém foi observado no uso da concentração mais alta de hidrogel (25%) uma aglutinação do solo (Figura 71) que pode ter dificultado a germinação. Esta resposta foi importante para determinar uma melhor forma de preparo nos testes seguintes.

Figura 71 - Solo Aglutinado na Concentração de 25% (H1)



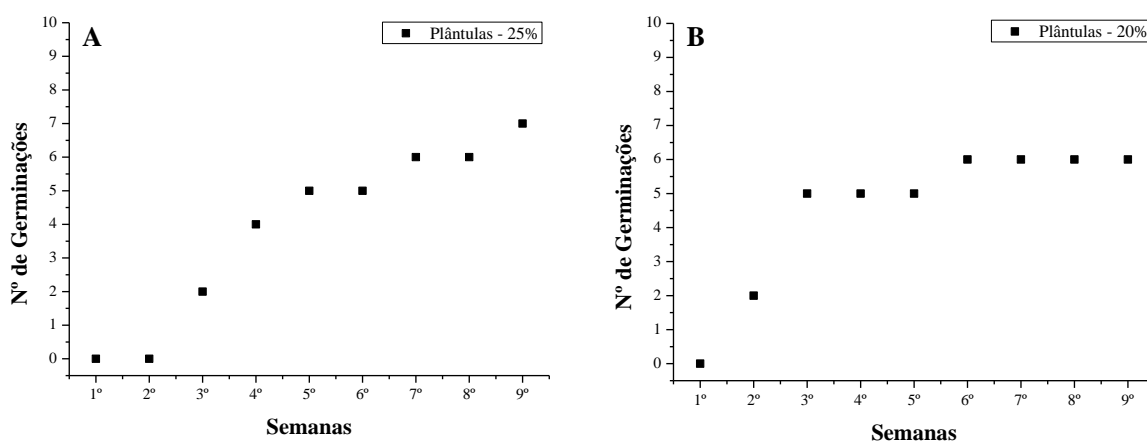
Fonte: O Autor.

Na preparação dos cultivos do teste seguinte foram tomadas precauções. O solo coletado foi seco por um período mais longo antes da adição das concentrações de hidrogel, pois o excesso de umidade em conjunto com o hidrogel pode ter sido um dos fatores que contribuíram para a aglutinação do solo. As sementes foram coletadas de exemplares devidamente identificados no campo em Guararema-SP no local do experimento. Para cada tratamento (25%, 20%, 15%, 10% e controle) foram coletadas 300 sementes que passaram pelo processo de quebra de dormência.

Sabendo da dificuldade de germinar a Capororoca-Vermelha também foram preparados testes de germinação com as espécies arbóreas nativas Pau d'Alho (*Gallesia integrifolia*) o Jequitibá-Rosa (*Cariniana legalis*) que possuem taxa de germinação maior. Ambas as espécies ocorrem nos mesmos biomas da Capororoca-Vermelha, em especial na transição da formação florestal secundária para a primária da Mata Atlântica, sendo bastante empregadas no plantio de reflorestamento misto (LORENZI, 2008).

O Pau d'Alho possui uma taxa de germinação de 80% em 20 dias, que pode variar dependendo do tempo de armazenamento das sementes (LORENZI, 2008). Os tratamentos de solo foram montados de acordo com os procedimentos adotados nos testes anteriores. As sementes após a quebra de dormência foram divididas em 20 unidades para cada tratamento (25%, 20%, 15%, 10% e controle). O plantio das sementes foi feito no primeiro semestre de 2020 no dia 26 de março de 2020, as primeiras germinações ocorreram nos tratamentos H2 (20%) e H4 (10%) após duas semanas. Nas Figuras 72A e 72B estão dispostas as progressões de germinação nos tratamentos H1 (25%) e H2 (20%).

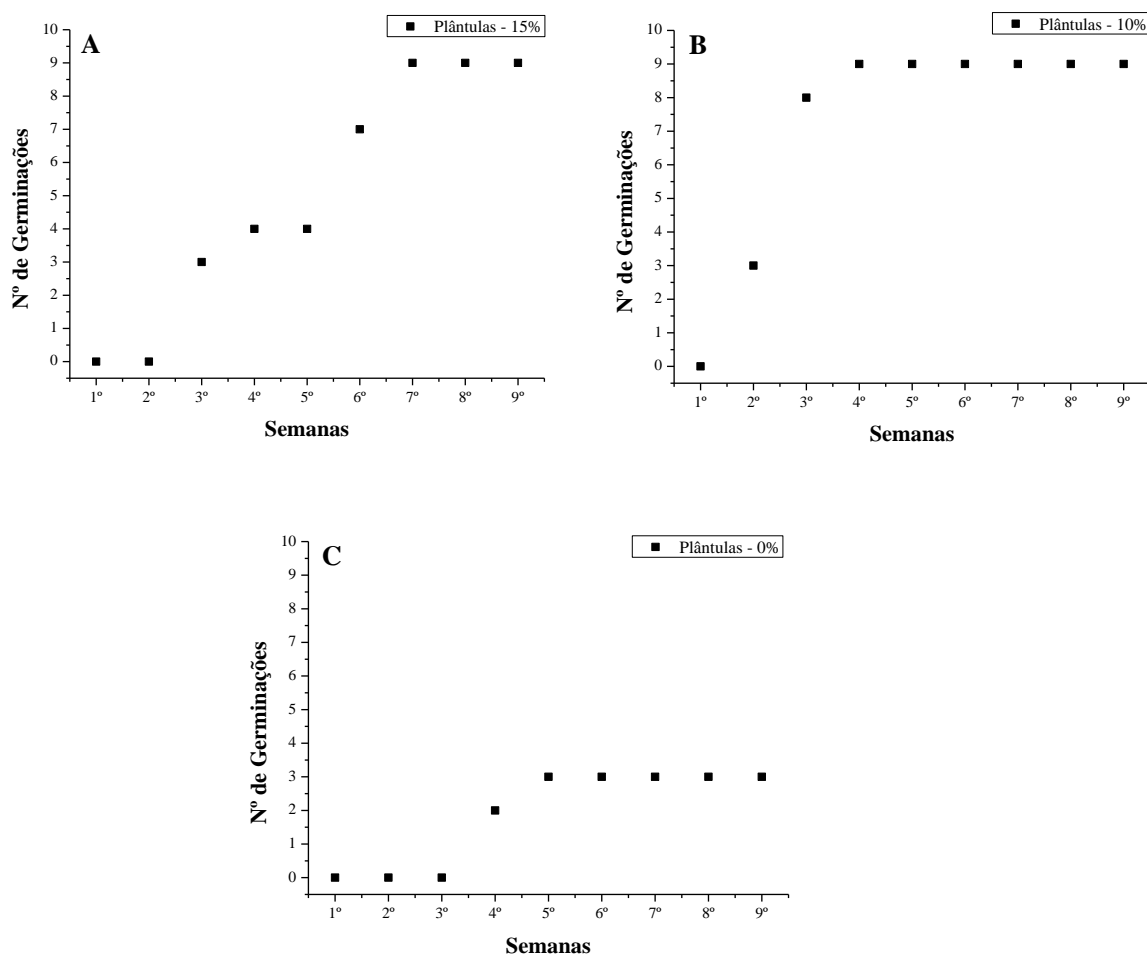
Figura 72 - Germinações de Pau d'Alho: A - H1 (25%); B - H2 (20%)



Fonte: O Autor.

O tratamento com 25% de hidrogel (H1) apresentou as duas primeiras germinações na terceira semana após o plantio. O máximo de sementes germinadas em H1 foi atingido na nona semana de monitoramento com 7 indivíduos germinados. Portanto, o sucesso de germinação no grupo foi de 35%. Apesar de ter apresentado as primeiras duas germinações uma semana antes de H1 apenas 6 indivíduos nasceram em H2 (20%) até a sexta semana, taxa percentual de 30% no grupo. Após o máximo de tempo foi verificado que as demais sementes degradaram no solo. Os padrões de germinação dos tratamentos com 15% (H3), 10% (H4) e controle estão dispostos nas Figuras 73A, 73B e 73C.

Figura 73 - Germinações de Pau d'Alho: A - H3 (15%); B - H4 (10%); C - Controle (S)



Fonte: O Autor.

Em H3 as primeiras duas germinações ocorreram na terceira semana após o plantio e o máximo de germinações (9 exemplares) no grupo ocorreu na sétima semana de monitoramento, já em H4 a progressão foi mais rápida com os dois primeiros exemplares germinando na segunda semana e com máximo de 9 germinados na quarta semana. Portanto, ambos os tratamentos apresentaram a melhor taxa de germinação de Pau d'Alho (45%). No grupo controle as primeiras germinações ocorreram apenas na quarta semana, e o máximo de plântulas germinadas foram 3 (taxa de 15%), um valor bem abaixo dos resultados nos tratamentos com hidrogel. Após averiguação foi observado que as demais sementes degradaram no substrato e não germinaram. Nas Figuras 74A a 74E estão dispostas as fotos do aspecto morfológico das plântulas dos tratamentos H1, H2, H3, H4 e S, respectivamente.

Figura 74 - Plântulas de Pau d'Alho: A - H1; B - H2; C - H3; D - H4; E - S



Fonte: O Autor.

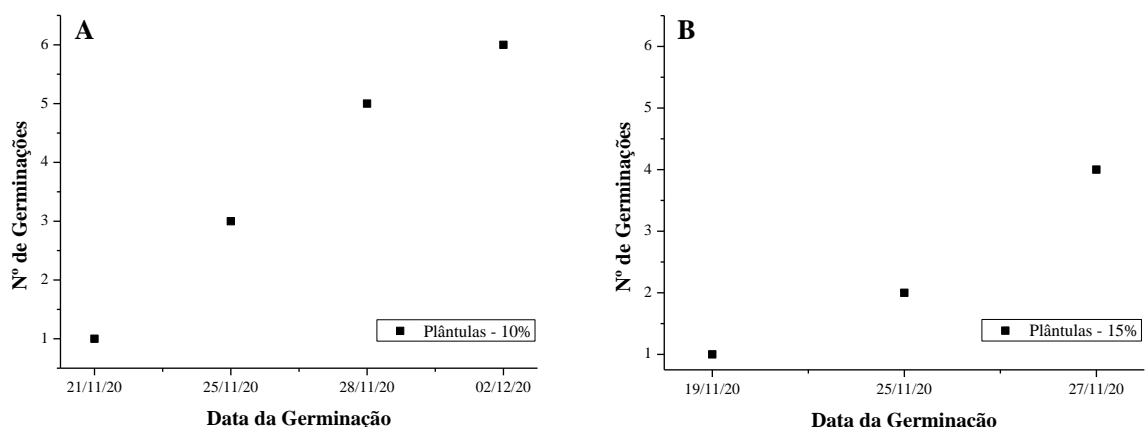
Os grupos que apresentaram o melhor desempenho de germinação foram H4 (Figura 74D) e H3 (Figura 74C) com 45% de sucesso, é possível observar nas imagens como o

desenvolvimento foliar nas plântulas dos tratamentos foi melhor nestes grupos. O Grupo H1 teve o terceiro melhor desempenho (35%), apesar de que no momento da foto (Figura 74A) alguns exemplares terem apenas quebrado o tegumento, não aparecendo como no Grupo H2 (Figura 74B) onde a germinação foi menor (30%), porém com aspecto foliar externo atrativo.

As taxas de germinação foram abaixo de 80% provavelmente pelo tempo de armazenamento das sementes, porém os resultados obtidos foram satisfatórios. Foi evidente como o uso do hidrogel proporcionou melhor germinação em comparação ao controle (Figura 73E), onde apenas 3 exemplares germinaram, porém 2 feneceram após 10 semanas. As condições do substrato são muito importantes para o desenvolvimento inicial das plântulas de espécies arbóreas, fatores como umidade e transporte de nutrientes são limitantes ao crescimento (LARCHER, 2000), o uso do hidrogel influenciou positivamente nestes fatores.

Seguindo a mesma metodologia foi efetuado o teste de germinação com a espécie Jequitibá-Rosa (*Cariniana legalis*). A taxa de germinação da espécie é média em torno de 50% em um período de 12-20 dias, apesar de ser uma espécie climácica é muito utilizada no plantio direto em conjunto com espécies pioneiras como a Capororoca-Vermelha por ser tolerante à luz solar direta (LORENZI, 2008). As sementes selecionadas passaram pelo processo de quebra de dormência e foram divididas e 12 exemplares para cada um dos tratamentos. Apenas os grupos com 10% (H4) e 15% (H3) apresentaram germinações da espécie, nas Figuras 75A e 75B estão dispostos os padrões respectivos.

Figura 75 - Germinações de Jequitibá-Rosa: A - H4 (10%); B - H3 (15%)



Fonte: O Autor.

O plantio das sementes de Jequitibá-Rosa foi feito no segundo semestre de 2020 no dia 30 de outubro de 2020, o primeiro exemplar ocorreu no dia 19 de novembro, 22 dias após o

plantio, dentro do padrão de germinação da espécie. Os tratamentos com 25% (H1) e 20% (H2) não apresentaram nenhuma germinação no período total do monitoramento, é possível que a concentração de hidrogel utilizada tenha sido prejudicial ao processo de quebra do tegumento das sementes, outra possibilidade é que a maior retenção de umidade tenha propiciado uma infecção por fungo nas sementes que degradaram rapidamente no substrato. O grupo H4 (10%), por sua vez teve ótimo desempenho com 50% das sementes germinadas (6 sementes), dentro da taxa padrão da espécie, o tratamento com 15% (H3) também teve boa resposta com 33,3% de germinação (4 sementes). O grupo controle (S) apresentou apenas duas germinações (16%) valor abaixo dos tratamentos com hidrogel H4 e H3. Nas Figuras 76A, 76B e 76C estão dispostas as fotos das plântulas de H4, H3 e S.

Figura 76 - Plântulas de Jequitibá-Rosa: A - H4; B - H3; C - S



Fonte: O Autor.

Observando as fotos das plântulas é evidente como, além de ter mais germinações, o aspecto externo das plântulas foi mais saudável nos tratamentos com hidrogel. O uso do hidrogel na concentração ideal proporciona a quantidade de umidade necessária para a quebra do tegumento das sementes e supre as necessidades fisiológicas de água das plântulas que é utilizado nos processos de transporte de nutrientes, que determinam o crescimento das mudas na sequência do desenvolvimento (SARVAS et al., 2007). Assim como na avaliação da germinação do Pau d'Alho, os melhores resultados foram obtidos nos tratamentos de 10% e 15% de hidrogel, que mais uma vez sugere que esta é a faixa percentual ideal para a germinação de plântulas de espécies arbóreas. Na Tabela 16 está disposto o resumo de número de germinações e percentuais para ambas as espécies avaliadas.

Tabela 16 - Germinações - Testes com Pau d'Alho e Jequitibá-Rosa

Tratamentos	Nº - Pau d'Alho	Percentual (%) - Pau d'Alho	Nº - Jequitibá-Rosa	Percentual (%) - Jequitibá
H1 (25%)	7	35,0	0	0
H2 (20%)	6	30,0	0	0
H3 (15%)	9	45,0	6	50,0
H4 (10%)	9	45,0	4	33,3
S (0%)	3	15,0	2	16,0

Fonte: O Autor.

Os testes de germinação com a Capororoca-Vermelha continuaram no período em que o Pau d'Alho e Jequitibá-Rosa foram testados, porém sem a obtenção de resultados satisfatórios. Portanto há necessidade de trabalhos futuros para avaliar a influência sobre a germinação da espécie. Muitos fatores influenciam a germinação vegetal, além da taxa da espécie ser baixa, os resultados sugerem que o insucesso se deveu principalmente por conta das características fisiológicas da espécie (LORENZI, 2008).

O hidrogel não foi limitante ao desenvolvimento das plântulas, como o teste com outras espécies arbóreas nativas demonstrou. O uso da concentração de 10% a 15% mostrou-se a ideal para a germinação das espécies Pau d'Alho e Jequitibá-Rosa. Ainda que não tenha cumprido completamente o objetivo da avaliação da germinação demonstra a viabilidade do uso do hidrogel na germinação de sementes de espécies nativas que ocorrem no mesmo estrato ecológico da Capororoca-Vermelha.

5 CONCLUSÃO

Conclui-se que foi positiva a influência do polímero superabsorvente (SAP) sobre os constituintes biomoleculares dos exemplares de Capororoca-Vermelha (*Rapanea ferruginea*) dos três grupos monitorados quantitativamente por espectroscopia vibracional no infravermelho médio com Transformada de Fourier (FTIR-UATR). O monitoramento se estendeu por 15, 14 e 13 meses, respectivamente, nos Grupos I, II e III onde se observou que o desenvolvimento biomolecular da Capororoca-Vermelha apresentou oscilações influenciadas pela variação estacional, portanto, a avaliação levou em consideração este fator.

Foi feita a quantificação das bandas espectrais correspondentes aos constituintes de água, lipídios, pectina, parede celular, hemicelulose, clorofila, amido e lignina. A comparação entre os exemplares cultivados com SAP e o controle indicou diferenças quantitativas nas bandas de todos os grupos. A banda de água apresentou resposta acentuada ao uso do hidrogel, evidenciada principalmente na avaliação dos Grupos I e II. As bandas de clorofila e pectina se destacaram para diferenciar os tratamentos nos Grupos I, II e III. No Grupo II, também se destacou a banda de hemicelulose e na avaliação de diferentes concentrações no Grupo III a banda de lipídios também se mostrou como indicadora do desenvolvimento.

Por meio da avaliação das principais bandas foi observado um melhor desenvolvimento nos exemplares cultivados com 20% (H2G3) e 15% (H3G3) de hidrogel no Grupo III, portanto, esta faixa percentual se mostrou ideal para o cultivo da Capororoca-Vermelha. A análise multivariada e aplicação do Teste de Mann-Whitney ($p < 0,05$) dos espectros apontou diferenças entre os tratamentos em alguns meses monitorados principalmente no Grupo III, porém não foi possível afirmar que as diferenças encontradas por meio destas análises estatísticas tenham sido causadas pelo uso do hidrogel, somente por meio da quantificação das bandas foi possível realizar a avaliação.

Foi realizado o teste de influência do hidrogel na germinação da Capororoca-Vermelha, no entanto, devido às características fisiológicas da espécie não foi bem sucedido sendo necessário trabalhos futuros. Fato que não foi ocasionado pelo hidrogel, pois o teste feito com as espécies Pau d'Alho e Jequitibá-Rosa evidenciou melhor germinação de sementes no cultivo com 10% e 15% de hidrogel. Portanto, o uso da técnica de FTIR mostrou-se viável para monitorar a influência do hidrogel sobre a Capororoca-Vermelha e o cultivo com hidrogel foi positivo no desenvolvimento biomolecular que refletiu diretamente na altura e número de folhas dos exemplares monitorados de todos os grupos.

REFERÊNCIAS

- ALAM, M. M. et al. Application and Advances in Microprocessing of Natural Fiber (Jute) - Based Composites. **Comprehensive Material Processing**, v.7, p. 243-260. 2014.
- ALONSO-SIMÓN, A. et al. The use of FTIR spectroscopy to monitor modifications in plant cell wall architecture caused by cellulose biosynthesis inhibitors. **Plant signaling and behavior**, v. 6, n. 8, p. 1104-1110, 2011.
- BARBOSA, L. C. de A. **Espectroscopia no Infravermelho: Na Caracterização de Compostos Orgânicos**. 1. Ed. Viçosa: UFV, 2007. 189 p.
- BERNARDI, M. R. et al. Crescimento de mudas de *Corymbia citriodora* em função do uso de hidrogel e adubação. **Cerne**, v. 18, n. 1, p. 67-74. 2012.
- BERTHOMIEU, C.; HIENERWADEL, R. Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy. **Photosynth Res.**, v. 101, p. 157-170, 2009.
- BOGARIM, E. P. de A. **Uso de Hidrogel do Desenvolvimento de Espécies Nativas, Visando Aplicação em Áreas Degradadas**. 2014. 62 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2014.
- BRAGA, B. et al. **Introdução à Engenharia Ambiental: O desafio do desenvolvimento sustentável**. 2. ed. São Paulo: Pearson, 2005. 318 p.
- BRITO, R. A. L.; ANDRADE, C. de L. T. de. Qualidade da água na agricultura e no meio ambiente. **Informe Agropecuário.**, Belo Horizonte. v. 31. n. 259. p. 50-57, 2010.
- CACAS, J., et al. Lipids of plant membrane rafts. **Progress in lipid research.**, v.51, n.3 p.272-299, 2012.
- CARDOSO, R. R. et al. de. **Efeito da incorporação de hidrogel em substratos na produção de mudas de jatobá-da-mata (*Hymenaea courbaril* Lee & Lang) e jatobá-do-cerrado (*Hymenaea stigonocarpa* Mart.)**. 2017. Trabalho de Conclusão (Engenharia Florestal) - Universidade de Brasília, 2017.
- CHANDRA, S. Fourier transform infrared (Ft-Ir) spectroscopic analysis of *Nicotiana glauca* (Solanaceae). **Journal of Medicinal Plants**, v. 7, n. 1, p. 82-85, 2019.
- CHEN, M.; BLANKENSHIP, R. E. Expanding the solar spectrum used by photosynthesis. **Trends in Plant Science.**, v.16, p.427-431, 2011.
- BUZETTO, F. A. et al. **Avaliação de polímero adsorvente à base de acrilamida no fornecimento de água para mudas de *Eucalyptus urophylla* em pós-plantio**. Piracicaba: IPEF; 2002. 9 f. (Circular Técnico n. 195). Disponível em: <<http://www.ipef.br/publicacoes/ctecnica/>>. Acesso em: 17 mai. 2019.
- DELECAVE, B. A Ciência das Cores. **Ciência**, 09 de jan. 2011. Disponível em: <<http://www.invivo.fiocruz.br/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?infoid=1095&sid=9&tpl=printerview>>. Acesso em: 09 de mar. 2021.

DEPCIUCH, J. et al. FTIR analysis of molecular composition changes in hazel pollen from unpolluted and urbanized areas. **Rev. Aerobiologia**, v.33, n.1, p. 1-12, 2017.

DHYANI, V.; BHASKAR, T. A comprehensive review on the pyrolysis of lignocellulosic biomass. **Renewable Energy**, v. 129, p. 695-716, 2018.

DURAK, T.; DEPCIUCH, J. Effect of plant sample preparation and measuring methods on ATR-FTIR spectra results. **Environmental and Experimental Botany**, v. 169, p. 103915, 2020.

ENGEL, V. L. Restauração ecológica de florestas tropicais: aliando benefícios ecológicos, econômicos e sociais. **Revista Opiniões sobre o Setor de Celulose, Papel e Floresta**, p.11, mar.-maio de 2007. Disponível em: <https://florestal.revistaopinioes.com.br/revista/detalhes/4-restauracao-ecologica-de-florestas-tropicais-ali/>

FELIPPE, D. *et al.* Hydrogel in the seedling growth of *Eucalyptus dunnii* Maiden under different irrigation management. **Revista Ambiente & Água**, v. 16, n. 1, p. e2582, 2021. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2582>

FERNANDO, I. P. *et al.* FTIR characterization and antioxidant activity of water soluble crude polysaccharides of Sri Lankan marine algae. **Algae**, v. 32, n. 1, p. 75-86, 2017.

FERRAZ, A. de V.; ENGEL, V. L. Efeito do tamanho de tubetes na qualidade de mudas de Jatobá (*Hymenaea courbaril* L.VAR. *stilbocarpa* (HAYNE) LEE ET LANG.), Ipê-Amarelo (*Tabebuia chrysotricha* (MART. EX DC.) SANDL.) e Guarucuia (*Parapiptadenia rigida* (BRENTH.) BRENAN). **Revista Árvore**, v. 35, n. 3, p. 413-423, 2011.

FRAGOSO, R. de O. et al. Recuperação de área degradada no domínio floresta estacional semidecidual sob diferentes tratamentos. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 3, p. 699-711, 2016.

FREITAS, M. F.; KINOSHITA, L. S. Myrsine (Myrsinoideae- Primulaceae) no sudeste e sul do Brasil. **Rodriguésia**, Rio de Janeiro, v. 1, n. 66, p. 167-189, 2015. Disponível em: <<http://rodriguesia.jbrj.gov.br>>. Acesso em: 30 abr.2019.

HAFLE, O. M. *et al.* Produção de mudas de maracujazeiro-doce através da estaquia utilizando polímero hidrorretentor. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. v. 3, n. 3, p. 232-236. 2008.

HOLLER, F. J. *et al.* **Princípios de análise instrumental**. Tradução: Celio Pasquini (Coord.); Jarbas José Rodrigues Rohwedder et al. 6 ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. 1056 p.

IVANOVA, D. G.; SINGH, B. R. Nondestructive FTIR monitoring of leaf senescence and elicitor-induced changes in plant leaves. **Biopolymers: Original Research on Biomolecules**, v. 72, n. 2, p. 79-85, 2003.

KACURAKOVA, M. et al. FT-IR study of plant cell wall model compounds: pectic polysaccharides and hemicelluloses. **Carbohydrate polymers**, v. 43, n. 2, p. 195-203, 2000.

KASIM, N. E. et al. Using Infrared Absorption Spectroscopy in Studying Nitrogen, Chlorophyll and Starch Contents in Manzenillo Olive Leaves Before Harvest Stage. **World Applied Sciences Journal**, v. 31, n. 7, p. 1337-1340, 2014.

KOUPAI, J.A. *et al.* Enhancing the available water content in unsaturated soil zone using hydrogel, to improve plant growth indices. **Ecohydrology & Hydrobiology**, v.8, n.1, p.67-75, 2008.

LARA-ESPINOZA, C. *et al.* Pectin and pectin-based composite materials: Beyond food texture. **Molecules.**, n. 23, v. 4, p.942, 2018.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. 1. ed. São Carlos: RiMA, 2000. 531 p.

LINARES-GABRIEL, A. *et al.* Application of soil amendments and their effect in the growth of heliconia. **Ornam. Hortc. (Campinas).**, v. 24, n. 3, p.249-254, 2018.

LINS, E. F. **Estudo das respostas fisiológicas de essências florestais nativas de *Rapanea ferruginea* submetidas a diferentes faixas de radiação solar por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR-ATR)**. 2017. 57 f. Dissertação (Mestrado em Bioengenharia) – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento, Universidade do Vale do Paraíba, 2017.

LORENZI, H. **Árvores Brasileiras: Manual de Identificação e Cultivo de Plantas Arbóreas Nativas do Brasil**. 5. ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2008. v. 1. 385 p.

MAZUMDER, A. Major food grade pigments from microalgae and their health benefits A review. **Indian Food Industry Mag.**, n. 4, v. 33, p. 19-30, 2014.

MEWS, C. L. *et al.* Efeito do Hidrogel e Ureia na Produção de Mudanças de *Handroanthus ochraceus* (Cham.) Mattos. **Floresta e Ambiente.**, v. 22, n. 1, p. 107-116, 2015.

MORAES NETO, S. P. *et al.* Produção de mudas de espécies arbóreas nativas com combinações de adubos de liberação controlada e prontamente solúveis. **Rev. Árvore**, v. 27, n. 6, p. 779-789, 2003.

MUDHANGANYI, A. *et al.* The influence of hydrogel soil amendment on the survival and growth of newly transplanted *Pinus patula* seedlings. **Journal of Forestry Research.**, v.29, n.1, p.103-109.

NAVROSKI, M. C. *et al.* Influência do Polímero Hidroretentor nas Características do Substrato Comercial para Produção de Mudanças Florestais. **Interciencia.**, v. 41, n. 5, p. 357-361, 2016.

OJEDA, J. J.; DITTRICH, M. Fourier Transform Infrared Spectroscopy for Molecular Analysis of Microbial Cells. **Methods in molecular biology.**, v. 881, p. 187-211, 2012.

PAGARRA, H. *et al.* Isolation of pectin from *Nephrolepis biserrata* leaves at different extraction time. **Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering), UTM Malaysia.**, n. 69, v. 5, p.17-9, 2014.

PASCOTTO, M. C. *Rapanea ferruginea* (Ruiz & Pav.) Mez. (Myrsinaceae) como uma importante fonte alimentar para as aves em uma mata de galeria no interior do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Zoologia**, v. 3, n. 24, p. 735-741, 2007.

PAVIA, D. L. *et al.* **Introdução à espectroscopia**. São Paulo: Cengage Learning, 2010. 708 p.

PEREIRA, D. C.; SANTOS, R.; AQUINO-SILVA, M. R. **Análise dos Atributos Mecânicos do Solo da Fazenda do Poço - Jacareí - UNIVAP Campus Urbanova**. 2018. Trabalho de Conclusão (Engenharia Ambiental e Sanitária) - Universidade do Vale do Paraíba, 2018.

RAMIRES, A. *et al.* Materiales Polimeros de Tipo Hidrogeles: Revisión Sobre su Caracterización Mediante FTIR, DSC, MEB y MET. **Rev. LatinAm. Metal. Mat.**, v. 36, n. 2, p-108-130, 2016.

RIBEIRO-OLIVEIRA, J. P.; RANAL, M. A. Sementes florestais brasileiras: Início precário, presente inebriante e o futuro, promissor? **Ciência Florestal**, v. 24, n. 3, p. 771-784, 2014.

RICKETSON, J. M; PIPOLY, J. J. Nomenclatural notes and synopsis of the genus *Myrsine* (Myrsinaceae) in Mesoamerica. **SIDA**, v.17, n. 3, p. 579-589, 1997.

SAAD, J. C. C.; LOPES, J. L. W.; SANTOS, T. A. Manejo hídrico em viveiro e uso de hidrogel na sobrevivência pós-plantio de *Eucalyptus urograndis* em dois solos diferentes. **Engenharia Agrícola.**, v. 29, n. 3, p. 404-411, 2009.

SARVAS, M. *et al.* Effect of hydrogel application on survival and growth of pine seedlings in reclamations. **Journal of Forest Science.**, v. 53, n. 5, p. 204-209, 2007.

SATO, M. F. *et al.* Chemical and instrumental characterization of pectin from dried pomace of eleven apple cultivars. **Acta Scientiarum Agro.**, v. 33, n. 3, p. 383-389, 2011.

SILVA, M. A. A. **Avaliação da qualidade ambiental de áreas degradadas em recuperação: Fazenda do Poço (Jacareí/SP) – um estudo de caso**. 2016. 71 f. Dissertação (Mestrado Profissional) – Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos. Programa de Pós-Graduação em Bioengenharia, São José dos Campos, 2016.

SLOAN, J. P. The Use of Rootdips on North American Conifer Seedlings: A Review of the Literature. **The Planter's Notes**, v. 45, n. 1, p. 26-31, 1994.

SOUSA, G. T. O. *et al.* Incorporação de polímero hidroretentor no substrato de produção de mudas de *Anadenanthera peregrina* (L.) SPEG. **Enciclopédia Biosfera**, v. 9, n. 16, p. 1270-1278. 2013.

STÅHL, B.; ANDERBERG, A.A. Myrsinaceae. *In*: KUBTSKI, K. (ed.) **The families and genera of vascular plants**. VI. Flowering Plants Dicotyledons. Celastrales, Oxalidales, Rosales, Cornales, Ericales. Berlin: Springer, 2004. p. 266-281.

STUART, B. **Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications**. 1th. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2004. 242 p.

SUMMERS *et al.* The costs of reforestation: a spatial model of the costs of establishing environmental and carbon plantings. **Land Use Policy**, v. 44, p. 110-121, 2015.

THEBALDI, M. S. *et al.* Eficiência de sistemas de irrigação em mudas de espécies florestais nativas produzidas em tubetes. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, p. 401-410, 2016.

TOLSTIKOVA, T. G. *et al.* The complexes of drugs with carbohydrate-containing plant metabolites as pharmacologically promising agents. **Mini reviews in medicinal chemistry**, v. 9, n. 11, p. 1317-1328, 2009.

VORAGEN, A. G. J. *et al.* Pectin, a versatile polysaccharide presents in plant cell walls. **Structural Chemistry**, v. 20, n. 2, p. 263-275, 2009.

ZONTA, J. H. *et al.* Influência de diferentes turnos de rega e doses de hidroabsorvente no desenvolvimento inicial da cultura do café conillon (*Coffea canephora* Pierre). **IDESIA (Chile)**, v. 27, n. 3, p. 29-34, 2009.

WERNECK, L. G. **Uso de um Polímero Hidroretentor, em Condições de Campo, no Plantio de Árvores Nativas na Ecorregião da Mata Atlântica Estacional de Tabuleiros do Norte Fluminense**. 2011, 93 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental) - Instituto Federal Fluminense, 2011.

WILLATS, W. G. T, *et al.* Pectin: cell biology and prospects for functional analysis. **Plant molecular biology**, n. 47, v. 1-2, p.9-27, 2001.

YATSENKOVA, O. V. *et al.* The kinetic investigation and optimization of the processes of larch arabinogalactane hydrolysis in the presence of dissolved and solid acid catalysts. **Journal of Siberian Federal University. Chemistry**, v. 2, n. 11, p. 167-183, 2018.