

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**PARÂMETROS FENOMÉTRICOS E QUALIDADE DA
ERVA-MATE EM FUNÇÃO DO SOMBREAMENTO,
VENTO E COBERTURA VEGETAL DO SOLO**

TESE DE DOUTORADO

Tiago Silveira Ferrera

Santa Maria, RS, Brasil

2015

**PARÂMETROS FENOMÉTRICOS E QUALIDADE DA
ERVA-MATE EM FUNÇÃO DO SOMBREAMENTO,
VENTO E COBERTURA VEGETAL DO SOLO**

Tiago Silveira Ferrera

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia,
Área de Concentração Produção Vegetal, da Universidade Federal de Santa
Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Agronomia

Orientador: Prof. Dr. Arno Bernardo Heldwein

Santa Maria, RS, Brasil

2015

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Ferrera, Tiago Silveira
Parâmetros fenométricos e qualidade da erva-mate em função do sombreamento, vento e cobertura vegetal do solo / Tiago Silveira Ferrera.-2015.
131 p.; 30cm

Orientador: Arno Bernardo Heldwein
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, RS, 2015

1. Ilex paraguariensis St. Hil. 2. Estresse mecânico
3. Crescimento 4. Morfofisiologia 5. Qualidade I.
Heldwein, Arno Bernardo II. Título.

© 2015

Todos os direitos reservados a Tiago Silveira Ferrera. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: Coronel João de Deus, 660, Bairro Santa Tereza I, Cruz Alta – RS.

CEP: 98015-370. Fone: (55) 91240993

E-mail: tsferrera@yahoo.com.br

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

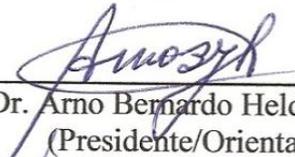
A comissão examinadora, abaixo assinada,
aprova a Tese de Doutorado

**PARÂMETROS FENOMÉTRICOS E QUALIDADE DA
ERVA-MATE EM FUNÇÃO DO SOMBREAMENTO,
VENTO E COBERTURA VEGETAL DO SOLO**

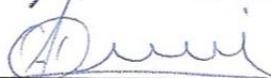
Elaborada por
Tiago Silveira Ferrera

Como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Agronomia

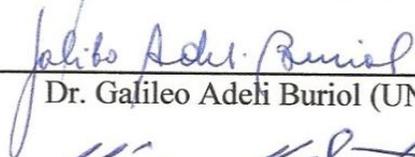
COMISSÃO EXAMINADORA:



Prof. Dr. Arno Bernardo Heldwein (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Dr. Genei Antonio Dalmago (EMBRAPA)



Dr. Galileo Adeli Buriol (UNIFRA)



Prof. Dra. Cláudia Kaehler Sautter (UFSM)



Prof. Dra. Isabel Lago (UFSM)

Santa Maria, 27 de fevereiro de 2015.

*Dedico este trabalho aos meus pais
Claudio e Rosema Ferrera que sempre
acreditaram nos meus sonhos!*

AGRADECIMENTOS

A Deus que me inspira, cativa e me oportuniza aperfeiçoar meus conhecimentos, estudos e trabalho.

À Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Instituição que me possibilitou a realização da Pós-Graduação (Doutorado em Agronomia).

À CAPES pelo incentivo e fomento financeiro através da bolsa de estudos.

Aos meus queridos pais, Claudio e Rosema, pelo amor, carinho, dedicação, apoio e amizade. Eu os amo!

Ao meu orientador professor, Dr. Arno Bernardo Heldwein, que sempre me orientou com paciência, dedicação, disponibilidade, compreensão e ética na condução dos trabalhos de campo e elaboração da Tese. Valeu, professor pela sua amizade!

Agradeço a meus avós paternos Ari (*in memoriam*) e Maria Ferrera e meus avós maternos Eli (*in memoriam*) e Nair da Silveira, pessoas amáveis, elo da minha história e que me presentearam com pessoas fantásticas: meus pais.

Aos professores Dr. Evandro Zanini Righi, Dr. Nereu Augusto Streck e Dr. Galileo Adeli Buriol, pelo incentivo e por comporem o Comitê de Orientação.

Aos professores Dr. Auri Brackman, Ph.D Dilson Bisognin e Dra. Claudia Sautter por emprestarem seus laboratórios para que fossem realizadas as análises colorimétricas (Lab. Pós-Colheita) e análises de compostos fitoquímicos (Lab de Melhoramento vegetal e Laboratórios do Nidal). Aos professores Dra. Mirta Teresinha Petry e Dr. Reimar Carlesso pelo empréstimo do IRGA.

Ao pesquisador Dr. Genei Antônio Dalmago da Embrapa Trigo de Passo Fundo/RS pela disponibilidade, ajuda e apoio na estatística e revisão do trabalho escrito.

À professora e amiga Laura Bagnara pela revisão e correção do abstract.

Aos colegas de Pós-graduação das Salas 30 e 32 do Departamento de Fitotecnia: Dr. Roberto Trentin, Dr. Dioneia Lucas, Dr. Ivan Maldaner, M. Sc. Gabriel Brixner, M. Sc. Fernando Hinnah, M. Sc. Luis Loose, Agr. Mateus Bortoluzzi; Agr. Samuel Kovaleski e Agr.

Francilene Tartaglia pela convivência nestes 3 anos do doutorado. Obrigado pelo apoio e coleguismo.

Aos acadêmicos Felipe Manzoni (Eng. Florestal), Ricardo Ereno (Agronomia) e Junior Cesar Somavilla (agronomia) bolsistas do projeto da erva-mate que ajudaram sempre quando necessário, nos trabalhos de campo e laboratório. Obrigado pelo aprendizado contínuo, por apreendermos juntos sobre a cultura da erva-mate.

Aos acadêmicos e bolsistas que cursam agronomia Jocélia Rosa, Mateus Scherer, Andreia Schuster, Mateus Leonardi, Adriana Amarante (Drica), Vitor Hugo Piovesan, Cadmo dos Santos, Bruno Milanese, Breno Heinz, Leidiana da Rocha, e Valéria dos Santos. Aos acadêmicos da Engenharia Florestal, Diego Cassol, Cristine Tagliapietra, Gabriel Orso, Luna Dalcul e Laura Vargas. A estagiária do IF Farrupilha Tec. Agricultura Ijésica Streck. Que em um momento ou outro ajudaram nas atividades de campo, laboratório entre outras tarefas, muito obrigado!

A mestranda do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia dos alimentos Clarissa Obem e a agrônoma Marta Deprá pela ajuda nas análises fitoquímicas. Obrigado pela parceira, profissionalismo e amizade!

Aos professores do Programa em Pós-Graduação em Agronomia que com seus ensinamentos e experiência ajudaram com suas disciplinas, apoio e suporte acadêmico e científico. Em especial professor Dr. Sidinei Lopes por me auxiliar e tirar dúvidas das análises estatísticas, Prof. Solange Tedesco e prof. Ubirajara Russi Nunes pelo apoio e amizade.

Aos Colegas de Curso que contribuíram de uma forma ou outra para o meu desenvolvimento profissional. Em especial as colegas e biólogas Julia Farias, Alana Wandscheer, Viviane Frescura e Silvia Nunes pelos trabalhos em grupo, convivência e amizade.

A todos os funcionários e técnicos administrativos pela ajuda e apoio nas atividades didáticas, de pesquisa e burocráticas.

Às pessoas que, de um jeito ou outro, cooperaram na elaboração, execução e revisão deste trabalho. E até mesmo aos que não participaram diretamente deste trabalho, mas foram meus amigos(as) e conselheiros(as).

A todos meu muito obrigado, com votos de vitória e sucesso!

*“A sabedoria é árvore que dá vida a quem a abraça;
quem a ela se apega será abençoado.”*

Provérbios 3:18

Oração Ao Tempo

Caetano Veloso

*És um senhor tão bonito
Quanto a cara do meu filho
Tempo, tempo, tempo, tempo
Vou te fazer um pedido
Tempo, tempo, tempo, tempo
Compositor de destinos
Tambor de todos os ritmos
Tempo, tempo, tempo, tempo
Entro num acordo contigo
Tempo, tempo, tempo, tempo
Por seres tão inventivo
E pareceres contínuo
Tempo, tempo, tempo, tempo
És um dos deuses mais lindos
Tempo, tempo, tempo, tempo
Que sejas ainda mais vivo
No som do meu estribilho
Tempo, tempo, tempo, tempo
Ouve bem o que te digo
Tempo, tempo, tempo, tempo
Peço-te o prazer legítimo
E o movimento preciso
Tempo, tempo, tempo, tempo
Quando o tempo for propício
Tempo, tempo, tempo, tempo
De modo que o meu espírito
Ganhe um brilho definido
Tempo, tempo, tempo, tempo
E eu espalhe benefícios
Tempo, tempo, tempo, tempo
O que usaremos pra isso
Fica guardado em sigilo
Tempo, tempo, tempo, tempo
Apenas contigo e comigo
Tempo, tempo, tempo, tempo
E quando eu tiver saído
Para fora do teu círculo
Tempo, tempo, tempo, tempo
Não serei nem terás sido
Tempo, tempo, tempo, tempo
Ainda assim acredito
Ser possível reunirmo-nos
Tempo, tempo, tempo, tempo
Num outro nível de vínculo
Tempo, tempo, tempo, tempo
Portanto, peço-te aquilo
E te ofereço elogios
Tempo, tempo, tempo, tempo
Nas rimas do meu estilo
Tempo, tempo, tempo, tempo*

RESUMO

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Agronomia
Universidade Federal de Santa Maria

PARÂMETROS FENOMÉTRICOS E QUALIDADE DA ERVA-MATE EM FUNÇÃO DO SOMBREAMENTO, VENTO E COBERTURA VEGETAL DO SOLO

AUTOR: TIAGO SILVEIRA FERRERA

ORIENTADOR: ARNO BERNARDO HELDWEIN

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 27 de fevereiro de 2015.

A erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) é uma planta arbórea nativa do Sul e Centro-Oeste brasileiro. A qualidade de seu produto é determinada pelas respostas dessa planta a estresses ecofisiológicos, por tratar-se de uma planta climácica em que seu habitat natural é um microambiente abrigado por extratos arbóreos maiores. A utilização das folhas e ramos da erva-mate como chimarrão e tererê são os mais conhecidos e popularizados nos estados da região Sul do Brasil. Atualmente observa-se uma forte competição com culturas anuais mais rentáveis em expansão e uma demanda crescente pela indústria farmacêutica e alimentícia, devido a sua composição rica em compostos fenólicos e antioxidantes, cuja concentração depende da condição do ambiente de produção, resultando em aumento dos preços dos produtos obtidos e na procura do ambiente mais favorável à alta qualidade. Assim, são necessárias práticas de cultivo e manejo mais adequadas às diferentes condições micrometeorológicas, decorrentes da região e da época do ano. O objetivo deste trabalho foi o de avaliar as respostas fenométricas e qualidade da erva-mate sob diferentes níveis de sombreamento, quanto ao efeito da cobertura do solo por restos vegetais e ao estresse mecânico ocasionado pelo aumento da velocidade do vento. Foram conduzidos dois experimentos junto ao Departamento de Fitotecnia – UFSM. No experimento 1 conduzido com plantas jovens de erva-mate, a campo, avaliou-se o fator cobertura do solo (solo coberto e desnudo) e o fator percentual de sombreamento das plantas (0, 18, 35 e 50%) em um delineamento inteiramente casualizado. Cada parcela se constituiu de 12 plantas de um progênie, com 4 repetições. No experimento 2, conduzido a campo com uma estrutura de proteção lateral foram, testados os fatores sombreamento (18 e 35%) e o velocidade do vento (natural (≈ 0), 2, 4 e 6 m s⁻¹), sendo cada parcela constituída por 12 plantas, em três repetições. A ventilação foi gerada por ventiladores portáteis de diferentes potências. Os resultados demonstraram que a cobertura do solo é benéfica para as plantas jovens havendo um aumento na altura, no número de brotos e coloração com tonalidade verde mais intenso. Os sombreamentos de 35 e 50% apresentaram maior ganho na massa seca, maior área foliar, cor verde mais intensa e aumento da abertura estomática. Quanto a composição fitoquímica a concentração de polifenóis e flavonoides foi maior nos sombreamentos 35% obtendo maior capacidade antioxidante. A aplicação da ventilação forçada reduziu o número de brotos e a abertura estomática, sendo que as folhas apresentaram coloração verde menos intensa e pouco alterando a composição fitoquímica dos compostos fenólicos e flavonoides e a capacidade antioxidante. As erva-mates jovens possuem uma melhor estabelecimento com maior crescimento e melhor desenvolvimento com maior acúmulo de compostos fitoquímicos em solos cobertos, com sombreamento parcial de até 50% e locais com pouco vento.

Palavras-chave: *Ilex paraguariensis* St. Hil. Estresse mecânico. Crescimento. Morfofisiologia. Qualidade.

ABSTRACT

Doctoral Thesis
Graduate Program in Agronomy
Federal University of de Santa Maria

PHENOMETRYC PARAMETERS AND QUALITY OF “MATE-HERB” AS A FUNCTION OF SHADING, WIND AND VEGETAL MULCHING OF THE SOIL

AUTHOR: TIAGO SILVEIRA FERRERA

ADVISOR: ARNO BERNARDO HELDWEIN

Location na date of defense: Santa Maria February 27th 2015.

The herb mate is a Brazilian tree species from the South and Midwestern of Brazil. The quality of its product is determine by its answers to ecophysiological stress, since it is a climax plant which natural habitat is a microenvironment sheltered by larger arboreal extracts. The use of herb mate leaves and branches as *chimarrão* and *tererê* beverages are the best-known and popularized ones in the Southern states of Brazil. Currently, there has been a strong competition from more profitable annual crops expanding, and a growing demand for pharmaceutical and food industries due to its rich composition in phenolic compounds and antioxidants, which concentration depends on the production environment condition, resulting in prices increase of the products obtained and the demand for more favorable environment to high quality. Thus, more appropriate cultivation and handling practices are necessary to different micrometeorological conditions, depending on the region and time of year. The objective of this study was to evaluate the ecophysiological responses of herb mate under different levels of shading, concerning the effect of soil cover by plant residues, and mechanical stress resulting from the increase of wind speed. Two experiments were conduct with the *DF /UFMS*. In experiment one, conducted with young plants of herb mate, the field, the land cover factor (covered and bared soil) and the percentage factor of plants shading (0, 18, 35 and 50%) were evaluated in a completely randomized design. Each sample consisted of 12 plants of a progeny with four replications. In experiment 2, conducted in field by taking advantage of a side protection structure of an old greenhouse, the shading factors were tested (18 and 35%) and wind speed (natural (≈ 0), 2, 4 and 6 m s^{-1}), being tht each sample had 12 plants in three repetitions. Ventilation was generated by portable fans of different powers. The results showed that the soil cobertura is beneficial for young plants having an increased height, the number of sprouts and more intense staining green hue. The shading of 35 and 50% had higher gain in dry mass, higher leaf area, more intense green color and increased stomatal opening. As the phytochemical composition the concentration of polyphenols and flavonoids was higher in sombremenmentos getting 35% higher antioxidant capacity. The application of forced ventilation reduced the number of shoots and stomatal opening, and the leaves were less intense green color and slightly altering the phytochemical composição of phenolic compounds and flavonoids and antioxidant capacity. Young erveiras have better establishment to higher growth and better development with greater accumulation of phytochemicals compounds covered soils with partial shading of 50% and places with little wind.

Key words: *Ilex paraguariensis* St. Hil. Mechanical stress. Growth. Morphophysiology. Quality.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Datas de aplicação de vento em plantas jovens de erva-mate “Cambona” nos tratamentos de diferentes velocidades do Experimento 2. Departamento de Fitotecnia-UFSM, Santa Maria, RS, 2014.....	50
Tabela 2 –	Teores de compostos fenólicos totais de diferentes extratos etanólicos de erva-mate (<i>Ilex paraguariensis</i> St. Hill.) submetidos ao ultrassom.....	53
Tabela 3 –	Média por classe de horário da Temperatura (T) da nervura das folhas de plantas jovens de erva-mate submetidas aos sombreamentos (S) 0, 18, 35 e 50% em solos cobertos com palha (C) e desnudos (D), nos meses de janeiro e fevereiro de 2014. Santa Maria, RS, 2015.....	60
Tabela 4 –	Média por classe de horário da Temperatura (T) da nervura das folhas de erva-mate de plantas jovens submetidas aos sombreamentos (S) 0, 18, 35 e 50% em solos cobertos com palha (C) e desnudos (D), no mês de março e abril de 2014. Santa Maria, RS, 2015.....	63
Tabela 5 –	Altura (Alt), número de brotos (NB), número de ramos (NR), comprimento ramos (CR), número de folhas (NF), área foliar total por planta (AFP), massa fresca (mf) e massa seca (ms) da parte aérea por planta com e sem cobertura de palha no solo com sombreamento de 50% em erva-mate jovem, em Santa Maria, RS. Em Santa Maria, RS, 2015.....	65
Tabela 6 –	Médias de massa fresca das folhas (mff, g·folha ⁻¹), massa seca das folhas (msf, g·folha ⁻¹), área do limbo foliar (ALF, cm ² folha ⁻¹) e de coloração da epiderme foliar (em °H) nas faces adaxial e abaxial das três folhas apicais desenvolvidas (3 ^a , 4 ^a e 5 ^a folhas abaixo do ápice) de plantas jovens de erva-mate cultivadas em solo com e sem cobertura de palha na superfície e sombreamento de 50%. Santa Maria, RS, 2015.....	67

Tabela 7 –	Análise da variância (ANOVA) na 2ª etapa do Experimento 1 (cobertura do solo x sombreamento), sendo 1ª e 2ª avaliação de verão (novembro e dezembro/2013) e 1ª e 2ª avaliação outono (março e abril/2014) que se compôs em um bifatorial com fator (A) cobertura do solo (coberto com palha e desnudo) e fator (D) sombreamento ($\approx 0, 18, 35$ e 50%) com 4 repetições.....	70
Tabela 8 –	Análise da variância (ANOVA) para os resultados da fenometria e colorimetria da 3ª, 4ª e 5ª folhas abaixo do ápice principal obtidos na 2ª etapa do Experimento 1, composto em um bifatorial com fator (A) cobertura do solo (coberto e desnudo) e fator (D) sombreamento ($\approx 0, 18, 35$ e 50%) com 4 repetições, avaliado no verão (dezembro/2013) e no outono (abril/2014), em Santa Maria, RS.....	78
Tabela 9 –	Teores de polifenóis totais, flavonoides e capacidade antioxidante em plantas jovens de erva-mate com e sem cobertura de palha sobre o solo em diferentes níveis de sombreamento. Santa Maria, RS, 2015.....	84
Tabela 10 –	Matriz de Correlação de Person (r_p) para os compostos teores de polifenóis totais, flavonoides e capacidade antioxidante em plantas jovens de erva-mate com e sem cobertura de palha sobre o solo em diferentes níveis de sombreamento. Santa Maria, RS, 2015.....	88
Tabela 11 –	Média móvel horária da temperatura da nervura das folhas ($^{\circ}\text{C}$) nas datas de 03 e 08 de dezembro de 2013 por classe de horário. Nos tratamentos com sombreamento 18% e 35% de sombreamento e velocidade do vento (natural $\approx 0, 2, 4$ e 6 m s^{-1}). Santa Maria, RS, 2015.....	91
Tabela 12 –	Análise da variância do Experimento 2 (sombreamento X velocidade do vento), sendo a 1ª e 2ª avaliação de verão de novembro e dezembro/2013 e avaliação de outono (abril/2014) que se compôs em um bifatorial com fator (A) sombreamento (18 e 35%) e fator (D) velocidade do vento ($0 (\approx \text{natural}), 2, 4$ e 6 m s^{-1}) com 3 repetições.....	93
Tabela 13 –	Análise da variância das variáveis fenométricas e colorimétricas das três folhas apicais desenvolvidas (3ª, 4ª e 5ª folhas abaixo do ápice)	

relativas ao Experimento 2 (sombreamento X velocidade do vento), sendo duas avaliações de 1ª e 2ª avaliação de verão (novembro e dezembro/2013, 1ª e 2ª avaliação respectivamente) e uma avaliação de outono (abril/2014), que se compôs em um bifatorial com fator (A) sombreamento (18 e 35%) e fator (D) velocidade do vento (0 (≈ natural), 2, 4 e 6 m s⁻¹) com 3 repetições..... 100

Tabela 14 – Teores de polifenóis totais (mg EAG L⁻¹) e flavonoides (mg ECA L⁻¹) na concentrações de 20% de solvente etanólico em folhas maduras de plantas jovens de erva-mate cultivadas em sombreamento de 18 e 35% e submetidas a quatro velocidades de vento (v*), coletadas no verão de 2013 e no outono 2014. Santa Maria, RS, 2015..... 104

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** – Imagem de satélite de parte do campus da Universidade Federal de Santa Maria em Camobi, Santa Maria, RS. Destacam-se as duas áreas experimentais próximas ao Prédio 77 do Departamento de Fitotecnia. *Fonte:* Google Earth..... 47
- Figura 2** – Coloração das folhas de plantas jovens erva-mate em ambas as faces (adaxial e abaxial), realizado de 15 de janeiro de 2013. Santa Maria, RS, 2015..... 68
- Figura 3** – Interação entre o fator cobertura de solo (coberto e desnudo) e sombreamento ($\approx 0, 18, 35$ e 50%) em plantas jovens de erva-mate, sendo (a) altura de planta (cm) para o outono em março de 2014, (b) número de brotos para verão em dezembro de 2013, (c) abertura estomática para estação do verão 2013, (d) abertura estomática para o outono de 2014, (e) área foliar total (cm^2) no verão de 2013, (■) solo coberto com palha, (□) solo desnudo e as letras minúsculas demonstram diferenças entre as médias com Teste de Tukey ($p < 0,05$). Santa Maria, RS, 2015..... 71
- Figura 4** – Variáveis fenométricas em plantas jovens de erva-mate submetidas ao fator cobertura do solo (coberto e desnudo) e sombreamento (0, 18, 35 e 50%), mostrando que diferença entre os tratamentos de sombreamento, sendo: (a) altura de (cm) para avaliação de novembro de 2013 com tabela mostrando diferença entre solos coberto e desnudo, (b) altura de planta (cm) para avaliação de dezembro de 2013 com tabela mostrando diferença entre solos coberto e desnudo, (c) Número de folhas para avaliação de março de 2014 com tabela mostrando diferença entre solos coberto e desnudo, (e) comprimento de ramos (cm) para avaliação de dezembro de 2013 e (e) massa caule ou hastes (g) na avaliação de outono em abril de 2014. Santa Maria, RS, 2015..... 74
- Figura 5** – Interação entre o fator cobertura do solo (coberto e desnudo) e o fator sombreamento (0, 18, 35 e 50%), sendo mf a massa fresca (a),

ms a massa seca (b) e área foliar a superfície do limbo foliar (c) das três folhas apicais desenvolvidas da haste principal de plantas jovens de erva-mate (3^a, 4^a e 5^a folhas abaixo do ápice). (■) médias por sombreamento para solo coberto com palha e (□) médias por sombreamento para solo desnudo. Santa Maria, RS, 2015..... 79

Figura 6 – Colorimetria das três folhas apicais desenvolvidas de erva-mate (3^a, 4^a e 5^a folhas abaixo do ápice) no verão em dezembro de 2013 submetidas a fator A cobertura do solo (coberto e desnudo) e fator D % de sombreamento (0, 18, 35 e 50%), sendo (a) Luminosidade (L) da face adaxial com interação entre o fator (A X D), (b) Ângulo de tonalidade HUE (°H) com fator (D) significativo, (c) L para face abaxial com fator (D) significativo e (d) H° da face abaxial com interação (A x D) significativa, (■) solo coberto; (□) solo desnudo e (●) média para tratamentos de sombreamento (0, 18, 35 e 50%) em Santa Maria, RS..... 81

Figura 7 – Temperatura horária da nervura das folhas de erva-mate submetidas aos tratamentos com velocidade do vento (V) natural (≈ 0), 2, 4 e 6 $m s^{-1}$ nos sombreamentos de 18 e 35% (S), nos horários de maior aquecimento, em três dias quentes do mês de dezembro de 2013; com alta incidência de radiação solar acima da tela de sombreamento. Temperatura do ar (—, °C), velocidade do vento (---, $m s^{-1}$), umidade relativa (—, UR%) e radiação solar (---, $KJ m^{-2} h^{-2}$) nas datas de 03 e 08 de dezembro de 2013 obtidos na estação automática do 8º DISME/INMET. Santa Maria, RS, 2015..... 90

Figura 8 – Interação entre os fatores sombreamento (18 e 35%) e velocidade do vento (V) ($0 \approx$ natural), 2, 4 e 6 $m s^{-1}$ para as variáveis altura de planta, na 1^a avaliação de verão (novembro de 2013) (a), N° ramos (b) e Número de brotos (N° brotos) nas plantas jovens de erva-mate na segunda avaliação de verão (dezembro/2013), sendo sombreamento 18% (■) e 35% (□). Santa Maria, RS, 2015..... 94

Figura 9 – Plantas jovens de erva-mate submetidas ao fator sombreamento (18 e 35%) e fator velocidade do vento (V) ($0 \approx$ natural), 2, 4 e 6 $m s^{-1}$, sendo Área foliar total (A.F total, cm^2) nas plantas jovens de erva-

mate com, em (a) interação entre os fatores, no verão (dezembro/2013) (a); A.F total em abril de 2013 com fator velocidade do vento significativo (b); interação da abertura estomática abertura estomática em folhas de erva-mate na data de 20/12/2013 após a aplicação de vento (c); interação da abertura estomática em folhas de erva-mate na data de 29/04/2014 após a aplicação de vento (d); (□) médias dos tratamentos de vento no sombreamento de 18% e (■) médias dos tratamentos de vento no sombreamento de 35%. Santa Maria, RS, 2015.....

97

Figura 10 – Avaliações fenométricas e colorimétricas das três folhas apicais (3^a, 4^a e 5^a folhas abaixo do ápice) de plantas jovens de erva-mate submetidas ao fator sombreamento (18 e 35%) e fator velocidade do vento (V) (0 ≈ natural), 2, 4 e 6 m s⁻¹, sendo Área foliar (cm²) demonstrando interação entre os fatores, realizadas em 20 de dezembro de 2013 (a); Ângulo H° da parte adaxial das folhas de erva-mate demonstrando a interação entre os fatores, em abril de 2014 (b); Luminosidade (L) na face adaxial em dezembro de 2013, mostrando a interação entre os fatores (c); Luminosidade (L) na face adaxial em abril de 2014, mostrando a interação entre os fatores (d); médias dos tratamentos de vento no sombreamento de 18% (□); médias dos tratamentos de vento no sombreamento de 35% (■) e para onde não se encontrou modelo matemático significativo são apresentados as diferenças entre os tratamentos pelo Teste de Tukey (p<0,05) Santa Maria, RS, 2015.....

101

LISTA DE APÊNDICES

APÊNDICE A –	Temperaturas médias ($T_{\text{méd}}$, °C), máximas absolutas ($T_{\text{máx}}$, °C) e mínimas absolutas mensais ($T_{\text{mín}}$, °C) no período dos experimentos de julho de 2012 a junho de 2014. Dados da estação meteorológica automática de Santa Maria (8°DISME/INMET). Santa Maria/RS, 2015.....	125
APÊNDICE B –	Temperaturas médias mensais (T_{med} , °C) do período de julho de 2012 a junho de 2014 e temperaturas médias mensais normais ($T_{\text{méd Normal}}$, período de 1961-1990). Dados da estação meteorológica automática de Santa Maria (8°DISME/INMET). Santa Maria/RS, 2015.....	126
APÊNDICE C –	Temperaturas mínimas absolutas mensais do período de julho de 2012 a junho de 2014 e mínimas absolutas mensais normais (1961-1990). Dados da estação meteorológica automática de Santa Maria (8°DISME/INMET). Santa Maria/RS, 2015.....	127
APÊNDICE D –	Temperaturas máximas absolutas mensais do período de julho de 2012 a junho de 2014 e máximas absolutas mensais normais (1961-1990). Dados da estação meteorológica automática de Santa Maria (8°DISME/INMET). Santa Maria/RS, 2015.....	128
APÊNDICE E –	Precipitação acumulada mensal no período de julho de 2012 a junho de 2014 (coluna clara) e normal mensal de precipitação de 1961-1990 (coluna escura). Dados da estação meteorológica automática de Santa Maria (8°DISME/INMET), , instalada a cerca de 100 m das áreas experimentais. Santa Maria/RS, 2015.....	129
APÊNDICE F –	Radiação solar global incidente média diária (R_n – MJ m ⁻²) no período de julho de 2012 a junho de 2014 e normais mensais de radiação solar de 1975-2005 (WREGGE, 2011). Dados da estação meteorológica automática de Santa Maria	

	(8°DISME/INMET). Santa Maria/RS, 2015	130
APÊNDICE G –	Radiação solar global incidente média diária (R_n – MJ m ⁻²) no período de julho de 2012 a junho de 2014 e níveis de sombreamento 18, 35 e 50% das telas plásticas de sombreamento e P.S (pleno sol).....	131

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	29
1.1 Objetivo geral.....	31
1.2 Objetivos específicos.....	31
2 REVISÃO DE LITERATURA	33
2.1 Breve histórico e atualidades sobre a erva-mate	33
2.2 Biologia da erva-mate.....	36
2.3 Cultivo da erva-mate	39
2.4 Composição físico-química da erva-mate.....	45
3 MATERIAL E MÉTODOS	47
3.1 Local do experimento	47
3.2 Experimento 1 – Cobertura do solo e Sombreamento	48
3.3 Experimento 2 – Vento.....	49
3.4 Variáveis avaliadas	50
3.5 Dados meteorológicos e micrometeorológicos.....	51
3.6 Análises estatísticas	52
3.7 Determinação dos compostos fenólicos e da capacidade antioxidante <i>in vitro</i>	52
3.7.1 Obtenção dos extratos.....	53
3.7.2 Determinação dos compostos fenólicos totais.....	54
3.7.3 Determinação de flavonoides	54
3.7.4 Capacidade antioxidante <i>in vitro</i>	55
3.7.4.1 Método FRAP (Ferric Reducing Antioxidant Power).....	55
3.7.4.2 Método ABTS (ácido 2,2'-azino-bis (3-etilbenzotiazolin) 6-ácido sulfônico).....	55
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.1 Condições meteorológicas	57
4.2 Experimento 1 – cobertura de solo e sombreamento	58
4.2.1 Temperatura das folhas de erva-mate	58
4.2.2 Determinações fenométricas da primeira etapa Experimento 1	64
4.2.3 Resultados obtidos na segunda etapa do experimento 1.....	69
4.2.4 Composição físico-química das folhas de erva-mate sob o efeito de diferentes sombreamentos e cobertura de solo (Experimento 1)	83
4.3 Experimento 2 – Sombreamento e Velocidade do vento.....	89
4.3.1 Temperatura das folhas de erva-mate sob diferentes velocidades do vento.....	89
4.3.2 Avaliações fenométricas no Experimento 2 (Vento).....	92
4.3.3 Composição físico-química das folhas de erva-mate sob o efeito de diferentes velocidades do vento (Experimento 2)	103
5 CONCLUSÕES	107
REFERÊNCIAS	109
APÊNDICES	123

1 INTRODUÇÃO

A erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.), da família botânica Aquifoliaceae, é uma planta arbórea nativa do Sul e Centro-Oeste brasileiro, norte Argentino e Paraguai. A utilização pelos povos nativos indígenas da região sul-americana foi adaptada pelos colonizadores europeus na forma de bebidas quentes como o “chimarrão” e chás, ou frias, da qual se destaca o “tererê”, ambos feitos das folhas e ramos finos. O costume de beber chimarrão ou tererê está arraigado na cultura e tradição em grande parte da população da região de sua origem e no Uruguai.

Segundo o Banco de Dados Agregados do IBGE (2014), no Brasil, em 2012, foram produzidas 513.256 toneladas de erva-mate verde, em uma área de 76 mil hectares, resultando em uma produção média de 6.738 kg ha⁻¹. No entanto, essa produção é bastante variável e está diretamente relacionada à tecnologia adotada na implantação e no manejo dos ervais (JABOINSKI, 2003). A cultura da erva-mate também se destaca por gerar cerca de 710 mil empregos diretos e por seu cultivo ser desenvolvido em mais de 180 mil propriedades rurais de 596 municípios do Brasil, mais especificamente da região Sul em pequenas e médias propriedades, demonstrando sua importância social e econômica (EMBRAPA, 2005). Nas regiões produtoras e industrializadoras a atividade constitui-se numa das principais opções de ocupação, emprego e renda no meio rural, especialmente nos meses de junho, julho e agosto, época da concentração da colheita (EMBRAPA, 2005) e de menor disponibilidade de trabalho em outras atividades agrícolas. Além disso, por ser produzida principalmente em pequenas propriedades absorve mão de obra familiar, contribuindo desta forma para sua sustentabilidade econômica.

A produção da erva-mate, assim como a sua qualidade, estão relacionados às condições de manejo e ambientais. Segundo Croce e Nadal (1995) e Daniel (2009) o conhecimento das condições culturais da erva-mate foi desenvolvido na Argentina por volta de 1960-1970 e no Brasil em meados de 1980, em estudos técnicos, como: adensamento da cultura, consorciação, aplicação de nutrientes, estudos morfológicos, entre outros. Em relação à ecofisiologia das plantas de *I. paraguariensis* sabe-se que trata-se de uma espécie adaptada em seu habitat natural a um microambiente abrigado por extratos arbóreos mais altos, que reduzem a incidência de radiação solar. A temperatura para que a planta tenha seu desenvolvimento ecofisiológico ideal é em torno de 17°C. O abrigo em ambiente florestal

reduz as temperaturas do ar extremas e atenuam a velocidade do vento (KASPARY, 1985; FOSSATI, 1997; DANIEL, 2009).

Em condições adversas ao seu habitat ideal a planta se desenvolve, porém com restrições no seu crescimento e desenvolvimento (FOSSATI, 1997; DANIEL, 2009). Os mesmos autores ainda destacam que em condições adversas ao cultivo ocorrem modificações físico-químicas interferindo na qualidade da erva-mate produzida. Esta qualidade está relacionada ao sabor suave ou amargo, quantidade de teores de metabólitos secundários, como: alcaloides, saponinas, vitaminas, entre outros. Desta forma, observa-se que a composição qualitativa da erva-mate depende das condições ambientais do local de produção (REISSMANN; RADOMSKI; QUADROS, 1999; VIEIRA et al., 2003; OLIVA, 2007). Existem relatos na literatura destacando a condição de cultivo sombreado ou a pleno sol (SUERTEGARRAY, 2002) e a presença ou não da cobertura vegetal (SILVA; BICCA NETO; FOLTRAN, 2007). Pes et al. (1995) e Vieira et al. (2003), realizaram trabalhos em diferentes regiões (do estado do RS ou do Brasil) e épocas do ano, o que possibilitou afirmarem que o sombreamento melhora a qualidade, porém reduz a produção de fitomassa comercial e induz o crescimento em altura em detrimento da ramificação. Isto faz com que haja redução na massa seca comercial, uma vez que na industrialização da erva-mate tipo chimarrão utiliza folhas, pecíolos e ramos finos, tendo uma composição aproximada de 30% ramos e 70% folhas, que são beneficiadas para posterior comercialização (HEINRICHS; MALAVOLTA, 2001).

No entanto, não há clareza e faltam informações de qual é a condição ambiental e o manejo mais adequado de cultivo para a produção de erva-mate que atenda aos padrões do mercado, bem como informações quanto à ecofisiologia da erva-mate sob tais condições. O aprimoramento técnico da produção, adotando manejos específicos adequados a cada condição de cultivo que atenda o mercado com um produto mais padronizado poderá se converter em grande benefício socioeconômico, tanto para o produtor como para a indústria.

Além disso, destaca-se que a perda de qualidade da erva-mate está altamente relacionada a uma resposta por estresses ecofisiológicos, como por exemplo: exposição da planta a níveis críticos de radiação solar, temperatura e velocidade do vento. Portanto, é imprescindível determinar o efeito desses três elementos meteorológicos sobre a produtividade, qualidade da fitomassa comercial de erva-mate e suas variáveis ecofisiológicas, para que se possam identificar as práticas e manejo do cultivo mais adequadas às diferentes condições micrometeorológicas, decorrentes da região e da época do ano.

Assim, as hipóteses do estudo são de que existe uma faixa de densidade de fluxo da radiação solar incidente, na qual se obtém fitomassa de erva-mate de alta qualidade comercial, que não afete significativamente a produtividade, e que essa resposta pode apresentar interação com outros fatores, como a cobertura vegetal do solo. Outra hipótese é que existem níveis críticos de velocidade do vento e temperatura do ar a partir dos quais o crescimento e a qualidade da fitomassa comercial de erva-mate são afetados.

1.1 Objetivo geral

Avaliar as respostas fenométricas e qualidade da erva-mate sob diferentes níveis de sombreamento, quanto ao efeito da cobertura do solo por restos vegetais e ao estresse mecânico ocasionado pelo aumento da velocidade do vento.

1.2 Objetivos específicos

- Comparar a produção de fitomassa de plantas jovens de erva-mate cultivada sob diferentes níveis de sombreamento e a pleno sol, na ausência e presença, de cobertura do solo por restos vegetais;
- Comparar a produção de biomassa de erva-mate parcialmente sombreada em 18 e 35%, sob diferentes níveis de velocidade do vento e na presença de cobertura vegetal morta na superfície do solo;
- Quantificar o crescimento inicial de plantas jovens de erva-mate sob diferentes condições micrometeorológicas;
- Verificar o efeito das condições de sombreamento e de velocidade do vento sobre a cor, área foliar, massa fresca e seca de hastes e folhas;
- Contar a abertura estomática das folhas de erva-mate submetidas aos diferentes sombreamento e velocidades do vento;
- Verificar o efeito das condições de sombreamento e de velocidade do vento sobre a concentração de polifenóis totais, flavonoides e capacidade antioxidante da fitomassa de erva-mate.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A espécie *Ilex paraguariensis* St. Hil., é uma representante da família Aquifoliaceae, nativa da América do Sul. A espécie é conhecida popularmente por erva-mate ou erva-mateira (HEINRICHES; MALAVOLTA, 2001; CARNEIRO et al., 2006; LORENZI, 2008). É uma planta climática do centro sul da América do Sul com distribuição natural desde o norte da Argentina, Paraguai e sul do Brasil (CARNEIRO et al., 2006), onde predominam os tipos climáticos Cfb, Cwb e Cfa. As folhas multiuso da erva-mate são utilizadas *in natura* na forma de chimarrão e tereré, mas também vêm se destacando o do extrato na indústria farmacêutica e alimentícia (DANIEL, 2009).

A Argentina é o maior produtor mundial de erva-mate, seguida do Brasil. No Brasil cerca de 90% da erva-mate produzida é originária de árvores nativas, principalmente da Floresta Araucária (LORENZI, 2008; DANIEL, 2009). A produção brasileira anual atualmente gira em torno de 513,256 toneladas, sendo os principais produtores, em ordem decrescente, os estados do Paraná (71,8%), Santa Catarina, Rio Grande do Sul (RS) e Mato Grosso do Sul (IBGE, 2014). Destes, o RS é o estado com maior consumo, representando cerca de 60% da comercialização no Brasil. Porém, o consumo da erva-mate nos demais estados brasileiros vem aumentando significativamente (CARNEIRO et al., 2006). Além da produção e do consumo, nos estados na região sul do Brasil, o cultivo da erva-mate exerce um notável papel socioeconômico e ambiental, especialmente nas pequenas propriedades rurais (HEINRICHES; MALAVOLTA, 2001; CARNEIRO et al., 2006).

A planta de erva-mate tem potencial de adaptação em outras regiões que não as nativas, podendo expandir-se por outros estados como Mato Grosso, Goiás, Minas Gerais, Tocantins, Rio de Janeiro, região nordestina e talvez Amazônia. Entretanto, um dos grandes problemas de adaptação é sua fase juvenil, período crítico da planta que necessita de mais tratamentos culturais quanto à adubação, sombreamento, controle de pragas e doenças, entre outros (DANIEL, 2009).

2.1 Breve histórico e atualidades sobre a erva-mate

As tribos indígenas já conheciam a erva-mate e seu uso, com destaque para os Tupis-Guaranis do Brasil, Paraguai e Argentina, que a denominavam de “ka-á”. Há registros históricos de que no século XVII os indígenas passaram também a plantar a erva-mate, a

pedido e orientação dos padres jesuítas da Companhia de Jesus, os quais promoveram o manejo quanto ao sistema vegetativo da planta. Dessa forma, os jesuítas foram os pioneiros do cultivo sistemático, contemplando os estudos fenológicos da espécie *I. paraguariensis*, identificando a época de colheita de sementes e produzindo mudas. Além disso, os jesuítas contribuíram para a difusão do consumo da bebida, adaptando e melhorando seu preparo (BORRILE et al., 2006).

A denominação *mati* é original da língua quéchua, e significa cabaça, cuia ou porongo, porém a espécie possui várias outras denominações populares como erva-mate, chá-de-paraguai, chá dos jesuítas, erva do diabo, yerba-santas (assim nominadas pelos uruguaios) e ka'a em guarani. Logo, a origem da erva-mate remete às populações pré-colombianas e hoje é difundida por todo o mundo (DANIEL, 2009).

Os guaranis ensinaram o uso da erva-mate aos espanhóis durante a ocupação espanhola no Paraguai e em 1670 os jesuítas deram início ao cultivo da planta. A expulsão dos jesuítas em 1767 representou um atraso histórico da erva-mate, pois não houve mais cultivos e a exploração da erva-mate voltou a ser dos ervais naturais de forma exclusiva e inadequada. No ano de 1820, no Brasil, por pressões do mercado internacional o país obrigou-se a explorar ainda mais as populações nativas (LINHARES, 1969; BORRILE et al., 2006; DANIEL, 2009).

As primeiras plantações de erva-mate foram realizadas pelos jesuítas por volta de 1704 a 1737, cujos padres da Companhia de Jesus fundaram as Missões Jesuítas aonde atualmente é o território do Paraguai, Argentina e Brasil. As plantações foram feitas em linhas a uma distância equivalente a 2,5 m, o que eles denominaram três passos (PRAT KRICUN; BELNGHERI, 1995).

Foi no século XIX que o naturalista francês August de Saint-Hilaire em viagens ao Brasil, por volta de 1820-1823, identificou a planta. Os primeiros ervais que se tem conhecimento foram cultivados na região próxima a Curitiba-PR, em locais geralmente com a mata de Araucária, mas isso não era uma regra. No ano de 1920 o Brasil era considerado maior exportador de erva-mate para Argentina, país que industrializava 100% da planta importada. A partir daí os ervais ganham importância no Brasil e crescem em competitividade (LINHARES, 1969; DANIEL, 2009).

Segundo Daniel (2009), a história da erva-mate remonta os seguintes cenários: (1) épocas de carência do produto alternados com período de grande demanda; (2) períodos em que a erva-mate era adulterada com adição de outras plantas e; (3) a erva-mate

costumeiramente mais consumida como chimarrão e tererê, forma cultural da região sul da América do Sul que contribui para restringir sua expansão.

A Argentina é o maior produtor de erva-mate. Até o ano de 1920 a Argentina importava 100% da erva-mate que consumia. Desde então, começou a investir em ervais. Os ervais hoje se destacam nas províncias de Misiones e Corrientes, na região nordeste da Argentina, com uma produção de erva-mate cancheada cerca de 140 a 300 mil toneladas numa área entre 150 e 216 mil ha. O setor movimenta cerca de 500 milhões de dólares e mantém 80 mil empregos diretos e indiretos, onde mais de 70% da produção está operando com ervais de até 10 ha. Em 1991 o país tornou-se exportador do produto. O Paraguai está em terceiro no ranque de produção de erva-mate, contando com 30 mil ha. O Chile e o Uruguai destacam-se pelo consumo do produto, sendo que o Uruguai importa cerca de 30 mil toneladas por ano. No Chile o hábito de tomar mate é comum em algumas regiões, porém em cuíais bem menores devido ao preço do produto. Ambos países preferem a erva-mate brasileira pelo seu sabor (LINHARES, 1969; DANIEL, 2009).

Em 1938 havia no Brasil o INM (Instituto Nacional do Mate) que funcionava no Rio de Janeiro, longe das zonas produtoras, porém fazia parte da realidade burocrática brasileira. O INM legislava sobre a erva-mate. Em 1964 o INM foi extinto devido a “Revolução de 64” e em 1965 foi criada a IBDF (Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal) este instituto focou-se mais intensivamente ao cultivo de pinus e eucaliptos (LINHARES, 1969; TORMEN, 1995).

O setor ervateiro brasileiro, atualmente, encontra-se em plena expansão, sendo o Brasil o segundo maior produtor mundial, porém com baixo nível de organização, fomento de pesquisas e tecnologia. A produção brasileira abrange cerca de 490 municípios, mais de 700 empresas processadoras, 700 mil trabalhadores diretos e indiretos. Os estados consumidores em ordem decrescente são: RS, PR, SC, MS, RO, SP e RJ. O maior produtor são os estados do PR, SC, RS e MS. Desde 1996 observa-se uma importação do produto que chega a 26 mil toneladas ano⁻¹ (DANIEL, 2009; IBGE, 2014).

Nos estados do Sul do Brasil a produção de erva-mate é mais significativa no Paraná, posto ocupado até 1996 pelo estado de Santa Catarina. No Paraná o crescimento da área cultivada nos anos 90 foi constante, enquanto em Santa Catarina houve uma enorme redução na produção de erva-mate cancheada de 1994-2001. Santa Catarina destaca-se por apresentar 80% de ervais nativos e o restante cultivado, o que provavelmente fez com que perdesse o posto de liderança na produção nacional. O Rio Grande do Sul figura em terceiro estado produtor com maior demanda do produto, cujas áreas dos ervais nativos após anos de

exploração e devastação deram lugar a produção de grãos. O estado do Mato Grosso do Sul, região Centro Oeste do país, tem uma produção muitíssimo pequena de erva-mate concentrada ervais cultivados (DANIEL, 2009).

A erva-mate é uma cultura alternativa altamente rentável, que ao mesmo tempo ajuda na preservação e recuperação de ecossistemas. A cultura da erva-mate propícia um melhor manejo e conservação do solo e permite consórcio com outras espécies de culturas anuais ou perenes (CROCE; NADAL, 1995).

Em setembro de 1992 ocorreu em Porto Alegre – RS, na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), a Primeira Reunião Técnica do Cone Sul sobre a cultura da erva-mate, com participação intensa da Argentina e Brasil. Em 1997 teve-se a II Reunião em Colombo no Paraná. A erva-mate também pode ser considerada como símbolo do Mercosul por ser característica da área e estar tão intimamente ligada a economia e cultura dos povos sul-americanos (WINGE et al., 1995; DANIEL, 2009).

No Rio Grande do Sul a erva-mate foi oficialmente escolhida como árvore símbolo do Estado, chegando há algum tempo atrás ser incluída na “cesta básica” estadual. Na Argentina nos anos de 1970-1980 teve-se um grande investimento em estudos e tecnologias acerca da cultura da erva-mate, sendo a base das pesquisas sobre a erva-mate vindas deste país (WINGE et al., 1995).

Os grandes desafios apresentados por Carpanezzi (1995) na matecultura são as lacunas como: condução da arquitetura da planta, adubação, controle de pragas e invasoras. A erva-mate é um cultivo que se liga a silvicultura, porém aproxima-se da fruticultura, pois seu uso difere da produção de madeira estando mais relacionado a cultivos perenes como a cafeicultura.

Com a recente criação do IBRAMATE (Instituto Brasileiro da Erva-Mate), sediado em Ilópolis-RS em 2014, aliado ao PROMATE (Programa do Agronegócio da Erva-Mate), todos os pontos de estrangulamento da cadeia produtora e do comércio, bem como das ações de treinamento (OSELAME, 2015) e de pesquisa, passaram a ser articuladas e coordenadas por esses dois órgãos, esperando-se um incremento no fomento, rentabilidade e estabilidade do Setor.

2.2 Biologia da erva-mate

A erva-mate com nome científico de *Ilex paraguariensis* foi descrita por August de Saint-Hilaire em 1822, e as exsicatas estão depositadas no Museu de História Natural de

Paris, é uma planta que pertence a Família das Aquifoliaceae; Ordem: Celastrales; Subclasse: Rosidea; Classe Magnoliopsida; Divisão: Anthophyta. É conhecida popularmente como erva-mate, Caaguaçi, orelha-de-burro, caá, erva-mate-de-tolo-branco, erva-piriquita, carvalho-branco, mate, erva, entre outras denominações (DANIEL, 2009).

O gênero *Ilex* habita as regiões tropicais, subtropicais e temperadas em todo o globo, com cerca de 700 espécies. O gênero é considerado cosmopolita, melhor adaptada a regiões quentes e úmidas do que em climas temperados e frios. O Brasil e a Venezuela, são, respectivamente os países com maiores táxons enquanto o Uruguai apresenta somente uma espécie confirmada (LORENZI, 2008).

A espécie *I. paraguariensis* possui uma morfologia muito variável, o que já foi anteriormente motivo para erros de classificação taxonômica, onde o próprio descritor catalogou duas espécies *I. paraguariensis* e *I. curitibensis*, porém anos mais tarde constatou-se que a espécie era a mesma (DANIEL, 2009).

Quanto a biologia a erva-mate destaca-se como uma espécie arbórea perene e se caracteriza-se por ser uma planta dióica. No entanto, mesmo sendo dióica encontram-se estames e pistilos em todas as flores. Os estames não são funcionais nas flores femininas, e nas flores masculinas o pistilo é abortado, havendo, portanto somente a forma de reprodução através da fecundação cruzada (FERREIRA FILHOS, 1957).

A proporção de indivíduos masculinos para femininos é de sete masculinos para um feminino. Os polinizadores como abelhas e outros insetos são comuns, destacando-se também o papel do vento no processo da polinização (FERREIRA et al., 1983). Entretanto, quando se procura aumentar a produção de sementes, deve-se observar a manutenção da proporção de três erveiras femininas para uma erveira masculina (ZANON, 1988).

A árvore de erva-mate é perenifólia em condições naturais possui e 10 a 15 m de altura, com diâmetro a altura do peito-DAP de 20-40 cm, pode atingir até 25 m de altura com 70 de DAP. Em cultivos o mais adequado para colheita é uma variação de 3 a 5 m de altura. A espessura da cascas em árvores adultas e mais velhas pode chegar a 2 cm. As folhas são alternas, simples, geralmente estipuladas, glabras, de 5 a 10 cm de comprimento e 3 a 5 cm de largura, subcoriácea a coriácea. A coloração das folhas varia de verde-escuro na face adaxial e verde-claro na face abaxial, com bordos denteados e pecíolo medindo de 7 a 15 mm um tanto retorcido (DANIEL, 2009).

As flores são hermafroditas, pequenas, brancas e não muito vistosas, são unissexuais por aborto, ou seja, flores femininas os estames são inoperantes e nas masculinas os pistilos. Quanto o número de peças florais: 4 sépalas de coloração verde-clara, 4 pétalas com corola

branca e entre 4 estames largos. A erva-mate é uma planta dioica, isso quer dizer que apresenta indivíduos com flores masculinas e flores femininas denominadas, vulgarmente, plantas macho e fêmea. O fruto de erva-mate é uma baga-drupa globular ou ovoide-globular, ou ainda drupa globosa, pequena medindo entre 4 e 8 mm de diâmetro. A semente tem uma consistência dura sendo pirênio trigonal, com tegumento fino e coloração amarelo-clara ou parda (EDWIN; REITZ, 1967).

Quanto à fenologia da espécie *I. paraguariensis* a floração ocorre de setembro a dezembro e a frutificação de dezembro a abril. A polinização é realizada em sua maioria pelo vento e por insetos, assim como a dispersão das sementes é de forma zoocórica. A erva-mate destaca-se por ser uma planta clímax, esciófita que quer dizer aceita mais a sombra e higrófito seletiva. A árvore é mais adaptada à mata das Araucárias (EDWIN; REITZ, 1967; DANIEL, 2009).

Ferreira et al. (1994), destacam que a erva-mate apresenta fenofases ou estádios fenológicos bem definidos, os quais podem ser alterados conforme o microclima de algumas regiões. Os ramos levam entre 35 a 40 dias após o corte para rebrotar, levando 40 a 45 dias após a brotação para ter 50% da planta com flores, 30 a 40 dias após a floração para a produção de frutos e igual período até a maturação.

A ocorrência natural da erva-mate é nas regiões subtropicais e temperadas da América do Sul, distribuindo-se desde a latitude 21° até 30° S e longitude 48° 30' até 56° 10' O. No Brasil a erva-mate compreende desde a região centro-norte até a depressão central do Rio Grande do Sul, passando por quase todo o estado de Santa Catarina avançando pelo centro-sul do estado do Paraná até o nordeste próximo ao estado de São Paulo e no oeste do Paraná a sul do estado o Mato Grosso do Sul. Na Argentina ocorre nas províncias de Misiones e Corrientes e na região oriental do Paraguai (DANIEL, 2009).

A diversidade populacional da erva-mate e a morfologia das folhas estão diretamente relacionados ao habitat e as condições ecológicas da planta como intensidade luminosa, suplemento hídrico. Como a erva-mate é uma planta tolerante a sombra (*shade-tolerant*) seu cultivo torna-se mais viável em áreas geograficamente com predomínio de sombreamento de moderado a leve. Essa característica é essencial na morfologia demonstrando diferenças no comprimento e na largura das folhas e variações na área foliar (COELHO et al., 2002).

2.3 Cultivo da erva-mate

A erva-mate desenvolve-se em climas predominantemente pluviais temperados, simbolizados pela letra C, na região centro-sul da América do Sul. O clima Cfa é caracterizado por ser sempre-úmido, com chuvas regulares durante o ano todo (f) e temperatura média do mês mais quente superior a 22°C. O clima Cfb diferencia-se do anterior apenas pela temperatura média do mês mais quente ser inferior a 22°C. Nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná a cultura da erva-mate predomina em clima Cfb segundo a classificação de Köppen. Ocorrem ainda em pequenas áreas os tipos climáticos Cwa, clima temperado úmido com inverno seco e verão quente; e Aw, clima tropical com estação seca de inverno (FOSSATI, 1997; DANIEL, 2009).

Alguns trabalhos científicos já contribuíram para se conhecer a ecofisiologia da planta, bem como sua adaptação a diferentes microclimas e as influências meteorológicas na erva-mate (KASPARY, 1985; FOSSATI, 1997; CATAPAN, 1998; SUERTEGARAY, 2002; VIEIRA, 2003; FOLTRAN, 2004; MAZUCHOWSKI, 2007; CARON et al., 2014a b).

Segundo Fossati (1997) a temperatura média ideal para erva-mate é em torno de 17°C. De modo geral, as plantas de erva-mate adaptam-se melhor em solos sem deficiência hídrica, mas permeáveis, não sendo encontrada em solos hidromórficos. Pode ser considerada como tolerante à baixa fertilidade natural, tolerando solos degradados com baixo teor de nutrientes trocáveis e alto teor de alumínio. Solos com mais silte e argila são os mais adequados, sendo mais frequente sua ocorrência natural em solos com texturas média e argilosa e raramente é encontrada em solos com predominância de areia. De acordo com Reitz et al. (1979), a erva-mate nativa ocorre nos planaltos, onde predominam solos de origem basáltica, estando associada às florestas com araucária, nas quais apresenta-se como espécie ciófito e seletiva higrófito, de modo a formar agrupamentos densos.

Para a formação de ervais de produção pode-se distinguir dois sistemas: erval nativo, com manejo dividido em formação de ervais nativos e seu adensamento; e os ervais cultivados em monocultivo. Quanto ao plantio de ervais são observados alguns procedimentos de preparo do solo que variam com o clima, vegetação natural, topografia, tipo e condições do solo, mas principalmente em função do manejo previsto para o erval que varia conforme o perfil do produtor (FOSSATI, 1997). O autor destaca que as plantas de erva-mate se adaptam melhor na sombra, em cultivo consorciado com outras árvores de maior porte.

Nos experimentos de Prat Kricun e Belngheri (1995) na Província de Misiones (Argentina), foi observado que o incremento da densidade de plantas corresponde a um

aumento proporcional de rendimento de massa seca comercial. A redução da distância entre linhas de 4,5 m para 2,25 m implica em aumento do rendimento sem competição. A distância entre plantas de 2,0 a 1,5 m apresenta incremento no rendimento e com 1,0 m já se registra competição entre as plantas e redução do rendimento sendo mais indicado o plantio em linhas simples. Observaram ainda que o corte/poda é mais indicado em meados de abril (corte de outono) e junho a agosto (corte de inverno).

Piccollo (1995) estudou a recuperação de ervais cultivados com capim-elefante (*Pennisetum purpureum*) que aumentou a concentração de nitrogênio e matéria orgânica no solo. Essa espécie de capim-elefante é bem difundida e reconhecida como recondicionadora dos solos.

As vantagens do consórcio da erva-mate com outras espécies são: (a) após a implantação do erval nos quatro primeiros anos, a espécie consorciada pode ser explorada como alternativa de renda; (b) produção de grãos para alimentação animal e humana; (c) minimiza impactos de erosão e degradação do solo pelo uso de culturas anuais; (d) reciclagem de nutrientes, em que a erva-mate melhor aproveita os nutrientes do solo devido ao sistema radicular pivotante, entre outras vantagens (CROCE; NADAL, 1995; DANIEL, 2009).

Em cultivos consorciados com milho e soja em diferentes espaçamentos, as mudas de erva-mate foram plantadas, ajustando-se o pH para 6, usando cana como cobertura. As erveiras foram podadas e o experimento foi conduzido por sete anos com previsão de duração do erval por 20 anos. O sistema mostrou-se rentável, e o ganho dependeu do grau de densidade de erveiras, porém se a intenção é a produção de grãos é mais conveniente diminuir a densidade de plantas. Pode-se viabilizar nos primeiros anos, em ervais com baixa densidade, favorecendo a cultura de grãos e gradualmente aumentando a densidade de erveiras, sendo que a rentabilidade da erva-mate pode ser obtida a partir do quarto ano de plantio (CROCE; NADAL, 1995).

A fisiologia da erva-mate está relacionada com a boa qualidade das folhas, flores e frutos da planta (REISSMANN et al., 1987). Nesse sentido, é imprescindível o conhecimento de quais e o quanto de nutrientes está sendo disponibilizado para a cultura e como esses nutrientes farão parte do produto final que se deseja. Assim, pode-se associar o crescimento, a produtividade e a qualidade da erva-mate produzida à disponibilidade de nutrientes, de forma a corrigir seus níveis para obter uma adequada nutrição das plantas. Uma das formas práticas mais simples de atenuar os problemas nutricionais é a obtenção de uma liberação gradual de nutrientes a partir de cobertura vegetal morta sobre o solo (VUADEN, 2009), a qual também serve para atenuar a variação da temperatura do solo.

O crescimento e o desenvolvimento da erva-mate não dependem apenas das condições nutricionais. *I. paraguariensis* tem preferência por solos bem drenados, sem restrição ao sistema radicular nos primeiros horizontes, suportando solos ácidos com elevados teores de alumínio trocável e de matéria orgânica, e baixa saturação de bases. Estas condições são típicas da ocorrência natural da espécie (DANIEL, 2009). Reissmann e Carneiro (2004) destacam que a condição nutricional da erva-mate relaciona-se diretamente com o genótipo do indivíduo, forma, disposição, arquitetura e idade da folha e da planta, condições climáticas, tratos culturais, competição, rocha de origem, formação e condição de solo, pragas e agentes patogênicos.

Os eventos fisiológicos relacionados ao crescimento e desenvolvimento da erva-mate são também determinados por fatores externos que exercem influência decisiva sobre o processo de adaptação das mudas, crescimento, desenvolvimento, indução floral e produção de sementes (CATAPAN, 1998). Para isso são essenciais, a disponibilidade hídrica e oxigênio no solo, a condição térmica no solo e no ar, déficit de saturação do ar e a exposição a um mínimo de radiação solar (CATAPAN, 1998; SUERTEGARAY, 2002).

Conforme Pinto e Flores (1999), os estudos que se têm com relação à fisiologia da erva-mate, particularmente quanto às exigências de disponibilidade de água no solo para a plântula em fase de crescimento/desenvolvimento. O crescimento e o desenvolvimento das plantas é afetado diretamente pelo nível do déficit hídrico na planta e indiretamente pelo nível do déficit hídrico no solo, não só modificando a anatomia e a morfologia, como também interferindo em muitas reações metabólicas e causando redução da área foliar (PINTRO; FLORES, 1999).

O déficit hídrico na planta afeta praticamente todos os aspectos do crescimento/desenvolvimento, não só modificando a anatomia e a morfologia como também interferindo em muitas reações metabólicas, e redução da área foliar (PINTRO; FLORES, 1999). Outros parâmetros do crescimento/desenvolvimento, como o número de folhas e altura do caule também são afetados pelo déficit hídrico. Por outro lado, o excesso de umidade no solo também é prejudicial devido à redução da disponibilidade de oxigênio para as raízes das plantas (PINTRO; FLORES, 1999).

O crescimento da erva-mate é afetado não só pelo déficit hídrico, mas também a temperatura do ar e a radiação solar tem efeito direto no desenvolvimento e no crescimento dessa planta. A erva-mate caracteriza-se por ser uma espécie clímax e tolerante a certo grau de sombreamento. Destaca-se pelo seu habitat natural e crescimento em associações arbóreas, principalmente com pinheiros. É uma espécie ocorrente e bem característica e adaptada da

Floresta Ombrófila Mista, sempre em associações nítidas com a espécie *Araucaria angustifolia* (BERGER, 2006), o que parece ser decorrente do fato dessa espécie permitir melhor transmissão de radiação para os estratos inferiores, onde se encontra a erva-mate.

Assim, com relação à luminosidade, a erva-mate é caracterizada como planta ciófito, espécie vegetal adaptada a se desenvolver na sombra em qualquer idade, embora tolere mais luz na fase adulta, além de ser relativamente tolerante ao frio ocorrente nas regiões de seu habitat natural (CARVALHO, 1994). Vieira et al. (2003), afirmam que em sistemas complexos, como os agroflorestais, as implicações da intensidade luminosa, temperatura e umidade do ar e do solo sobre o crescimento e desenvolvimento das plantas de erva-mate mostram-se importantes, principalmente pela competição por energia solar que se estabelece naqueles ambientes. Verificaram ainda, que o crescimento de caules e folhas da erva-mate poderá ser severamente limitado sob condições de sombreamento excessivo por outras espécies, inferindo que o fator luminosidade (ou radiação fotossinteticamente ativa), aliado à época de poda, induzem variações nos teores dos compostos químicos vinculados ao sabor.

No limite mínimo de disponibilidade de radiação solar a erva-mate se adapta preservando o seu funcionamento, efetuando aumento de área foliar por folha e reduzindo a emissão de novas folhas e a altura do caule, de forma a esperar condições de radiação mais favoráveis (MAZUCHOWSKI, 2007). Disponibilidade de radiação solar mais favorável normalmente ocorre então na abertura de uma clareira por morte de alguma árvore, mudança da declinação solar com a época do ano ou senescência de folhas das outras espécies nos estratos superiores do dossel da mata no inverno. Com as alterações das condições de intensidade luminosa, a planta de erva-mate responde modificando suas características morfológicas das folhas. Com o aumento da radiação solar global incidente ocorre espessamento das folhas, aumento da espessura da cutícula e da pubescência, redução da densidade estomática e da área do limbo foliar (MAZUCHOWSKI, 2007).

A erva-mate responde diretamente às condições ambientais, como densidade de fluxo de radiação solar global incidente e teores de nutrientes, podendo alterar sua morfologia e seus processos metabólicos que alteram a fisiologia da planta (FOSSATI, 1997). Os vegetais de sub-bosque ou de áreas sombreadas alteram sua espessura foliar quando expostas em pleno sol, isso porque a água, o solo e a intensidade luminosa influenciam também na sua estrutura foliar (MAZUCHOWSKI, 2007). Vuaden (2009) considera que parâmetros morfológicos como a área de projeção da copa, a altura de planta e comprimento de brotos são afetados pelo sombreamento da planta e cobertura do solo. Na mesma linha Vieira et al. (2003), demonstraram que as diferenças microclimáticas dos sistemas agroflorestais e dos

monocultivos pode ser evidenciada pelos valores de temperaturas máximas e mínimas absolutas e pela amplitude de variação desses parâmetros. Verificaram ser a radiação solar o parâmetro que exerceu maior influência na área foliar e produção de fitomassa da erva-mate comercial. Com isso inferem-se efeitos microclimáticos, que influenciam o crescimento das plantas de erva-mate, independente do estágio de desenvolvimento.

O sombreamento se faz necessário no estabelecimento da cultura, uma vez que a erva-mate requer intensidades baixas de radiação para o seu desenvolvimento inicial. Tal prática protege o sistema radicular delicado das mudas do aquecimento excessivo do solo e sua secagem por evaporação. Também protege a parte aérea das plantas, por diminuir a incidência de energia solar além de diminuir a temperatura do ar e a quantidade de regas, já que estando parcialmente sombreada, diminui a transpiração da planta e a evaporação da água na superfície do solo (MINAMI, 1995).

Nas plantas, no geral, a radiação solar absorvida pelas plantas controla o processo fotossintético e transpiratório, sendo fonte de energia para todas as atividades metabólicas da planta intrinsicamente relacionadas ao crescimento e desenvolvimento (LARCHER, 2004, SIMON, 2010, TAIZ; ZEIGER, 2013). Simon (2010) destaca que o balanço de energia das plantas está diretamente relacionado à radiação solar disponível no ambiente e este está relacionando ao processo de síntese através do balanço de carbono (fotossíntese) e da transpiração.

Righi et al. (2002) e Dalmago et al. (2003), evidenciam que o processo fotossintético e evapotranspiratório nas plantas está relacionado a radiação solar disponível, temperatura do ar e déficit de saturação do ar. Simon (2010) reforça esta ideia correlacionando estes elementos meteorológicos ao balanço de energia, a taxa fotossintética, a troca de dióxido de carbono e transpiração, atividades ecofisiológicas que conferem à planta crescimento e produção de biomassa.

Segundo Angelocci (2002), que discorre sobre a base biofísica para uma boa produção solar é a disponibilidade de radiação solar e água. A obtenção de carbono pela planta para o processo fotossintético é intimamente relacionado ao processo de abertura estomática (ANGELOCCI, 2002; LARCHER, 2004; TAIZ; ZEIGER, 2013). Angelocci (2002) afirma que este processo complexo de transferência de energia física em química é eficaz para as plantas. A energia do sol ativa biofísicamente os cloroplastos que através do ciclo de Calvin utilizam o dióxido de carbono que entrou pelo poro estomático para as reações de carboxilação, podendo ser realizadas as atividades bioquímicas da planta e mais adiante a

produção de compostos primários e secundários da planta (ANGELOCCI, 2002; LARCHER, 2004).

Os estudos sobre os efeitos da velocidade do vento na cultura da erva-mate são escassos e genéricos. Sentelhas et al. (1993), destaca que o crescimento e produção de diferentes culturas são afetados tanto pelo microclima criado pela comunidade vegetal, quanto pelas condições climáticas que predominam na localidade. As trocas de elementos constituintes da atmosfera entre as plantas e o ar, dependem das condições micrometeorológicas predominantes.

O vento constitui-se no movimento de massa dos componentes do ar. Tem influência direta no microclima dos dosséis vegetativos de uma área ou região, podendo resultar tanto em aspectos positivos quanto negativos ao crescimento de culturas (HODGES; BRANDLE, 1996). Dessa forma, ventos que ocorrem com velocidade excessiva e contínua apresentam-se por vezes como um problema para o desenvolvimento de atividades agrícolas, sendo necessário dispor de alternativas, como os quebra-ventos, para proteger as culturas (PEREIRA et al., 2007), que para velocidades entre 10 e 20 m s⁻¹, comuns em áreas de cultivo, se mostram muito eficientes (HODGES; BRANDLE, 1996). Conforme destacam Durigan e Simões (1987), Volpe e Schöffel (2001) e Schöffel e Volpe (2004), em decorrência da interferência de quebra-ventos, há alteração nas condições micrometeorológicas na área protegida, que, por sua vez, induz alterações nos processos fisiológicos e nas características da planta (HODGES; BRANDLE, 1996). Plantas não protegidas do vento excessivo apresentam alterações morfológicas e na taxa fotossintética, aumento da temperatura da folha, alteração no desenvolvimento e diminuição da transpiração, crescimento, área foliar e número de estômatos (PEREIRA et al., 2002; HODGES; BRANDLE, 1996), resultando em menor produtividade.

A atenuação da condição desfavorável de velocidade de vento para valores menores da crítica para determinada cultura pode reduzir as perdas de água do solo por evapotranspiração das plantas, aumentar a temperatura do ar e do solo durante o dia, reduzir o estresse e os danos mecânicos e auxiliar na diminuição da erosão eólica do solo (PEREIRA et al., 2007; HODGES; BRANDLE, 1996). O aumento da temperatura do ar e da água disponível às plantas intensifica e amplia a duração do processo fotossintético, levando ao aumento da produção nas áreas protegidas (DURIGAN; SIMÕES, 1987).

Plantas de tomateiro expostas a velocidades de vento de 14 e 21 km h⁻¹ apresentaram nanismo em relação às plantas submetidas à velocidade de em torno de 7 km h⁻¹ (PEREIRA et al., 2002). Pressupõe-se que em plantas originárias de habitat ombrófilo, abrigadas de

condições ambientais extremas, tal como a erva-mate e o café, sejam mais sensíveis do que solanáceas, como o tomateiro. Em plantas jovens de cafeeiro, velocidades acima de $2,0 \text{ m s}^{-1}$ induziram as plantas a uma drástica redução da taxa de assimilação líquida e crescimento, resultando em menor altura, comprimento de entrenós, área foliar e massa seca (CARAMORI, 1981). Também foi verificado um espessamento do caule e diminuição da evapotranspiração a partir de $2,0 \text{ m s}^{-1}$ e velocidades maiores. Tais respostas ecofisiológicas também podem ser esperadas para a erva-mate, o que em termos práticos resultaria em recomendação de utilização de proteção arbórea na forma de quebra-ventos para a melhora da produção e qualidade em condição de monocultivos. No entanto, não se dispõe de informações precisas e consistentes para recomendar tal prática nos ervais estabelecidos, sendo esta uma incógnita a ser respondida pela pesquisa. Plantas jovens ou em fase reprodutiva são mais sensíveis ao estresse causado por vento (HODGES; BRANDLE, 1996) e, portanto, é com plantas de erva-mate nesse estágio de desenvolvimento que devem ser iniciadas as determinações das respostas dessa planta ao estresse causado por vento.

2.4 Composição físico-química da erva-mate

O clima, o tipo de cultivo, o manejo e a origem da progênie afetam a composição da erva-mate. Grande número de compostos químicos ativos têm sido identificados em biomassa comercial e em seus extratos, dos quais vários podem ser benéficos à saúde. Dois grupos de compostos são mais elevados: os polifenóis (ácidos clorogênicos, ácido cafeico; ácido 3,4-dicafeoilquínico; ácido 3,5-dicafeoilquínico e ácido 4,5-dicafeoilquínico) e as xantinas (cafeína e teobromina), seguidos pelo subgrupo de polifenóis flavonóides (quercetina, caempferol e rutina), aminoácidos, minerais (principalmente P, Fe e Ca) e vitaminas, principalmente dos complexos C, B1 e B2 (DARTORA, 2010).

As bebidas feitas a partir da erva-mate apresentam efeitos sobre a saúde humana como: aumento da força muscular, estimulante do sistema nervoso central, cardíaco e respiratório, facilita a digestão e causa uma sensação de bem estar e é revigorante. A bebida contém cafeína, mas em uma fração muito baixa de cerca de 1%. A estimulação é realizada pelas xantinas que atuam no sistema nervoso central. Quanto às propriedades da erva-mate, pode-se destacar: descanso dos músculos, atenuadora da fome, rica em alcaloides e diurética (DANIEL, 2009).

Nos vegetais, os compostos fitoquímicos são produtos naturais, conhecidos como metabólitos secundários, apresentando funções ecológicas importantes como proteção contra

herbívoros e patógenos, ação alelopática, além de agir como atrativos para animais polinizadores (TAIZ; ZEIGER, 2013). Segundo Escalada (2011), os compostos físico-químicos da erva-mate estão diretamente relacionados ao cultivo e processamento da matéria prima. No que diz respeito aos polifenóis, segundo Rossa 2013, os compostos fenólicos pertencem a uma classe de substâncias químicas que podem ser de estruturas simples e complexas, derivadas dos aminoácidos fenilalanina e da tirosina, que possuem em sua fórmula química pelo menos um anel aromático com um ou mais grupamentos hidroxilas (-OH). Os compostos fenólicos podem se dividir em flavonoides (antocianinas, flavonóis, e isoflavonas) e não flavonoides (ácidos fenólicos).

Os compostos fenólicos bioativos pertencentes aos vegetais são encontrados na forma de estruturas variadas, como os ácidos fenólicos, derivados da cumarina, taninos e flavonoides, que podem atuar como agentes redutores, sequestrantes de radicais livres, quelantes de metais ou desativadores do oxigênio singlete. Atualmente, os compostos fenólicos tem se tornado compostos de grande interesse, devido às propriedades benéficas a saúde, sendo alvo de muitos estudos (TAIZ; ZEIGER, 2013; ROSSA, 2013).

Segundo Ferreira (2011) os compostos de ação antioxidante da erva-mate também tem sido alvo de pesquisas, por substituição dos antioxidantes sintéticos por extratos de plantas, os chamados antioxidantes naturais, pois segundo alguns órgãos de saúde pública, como a OMS a utilização extensiva de antioxidantes sintéticos e sua ingestão prolongada pode ser associado com o desenvolvimento cancerígeno.

Segundo Canterle (2005) a atividade antioxidante das plantas de erva-mate (*I. paraguariensis*) é maior que em outras espécies do gênero *Ilex* spp., e que a mesma é preservada no chimarrão e tererê, isso porque a planta apresenta alto teores de ácido cafêico, cafeoil e outros compostos. Tanto os compostos fenólicos quanto a atividade antioxidante apresentam uma gama de efeitos biológicos, incluindo ação antioxidante, antimicrobiana, anti-inflamatória e vasodilatadora. Os benefícios são atribuídos ao consumo da infusão de erva-mate, liberando os compostos que atuam como antioxidantes no organismo humano, sendo oxidados em preferência a outros constituintes do alimento ou componentes celulares e tecidos (ROSSA, 2013).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local do experimento

Os experimentos foram conduzidos no Departamento de Fitotecnia, da Universidade Federal de Santa Maria em Santa Maria, RS (29° 42' 23"S; 53° 43' 15"W; 95 m). Segundo a classificação de Köppen que se baseia, principalmente, nas características térmicas e na distribuição sazonal da precipitação pluvial, o município de Santa Maria tem clima Subtropical Úmido sem estação seca definida (Cfa), ou seja, com valores normais de chuva regularmente distribuídas no ano com precipitação média anual de 1712,9 mm e temperatura média normal do ar do mês mais quente superior a 22 °C, tendo temperatura média anual de 19 °C (KUINCHTNER; BURIOL, 2001).

Foram realizados dois experimentos a campo (Figura 1) com plantas jovens de erva-mate da matriz Cambona, adquiridas em Machadinho, RS. No Experimento 1 foi avaliada a influência da cobertura do solo com resíduo vegetal e do sombreamento no crescimento e desenvolvimento das plantas e no Experimento 2 o efeito do sombreamento e da velocidade do vento (Figura 1).



Figura 1 – Imagem de satélite de parte do campus da Universidade Federal de Santa Maria em Camobi, Santa Maria, RS. Destacam-se as duas áreas experimentais próximas ao Prédio 77 do Departamento de Fitotecnia.

Fonte: Google Earth. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps/@-29.7233914,-53.7188539,162m/data=!3m1!1e3>.

3.2 Experimento 1 – Cobertura do solo e Sombreamento

O primeiro experimento foi implantado em 15 de agosto de 2012, com mudas da matriz Cambona, sendo a área experimental formada por 32 canteiros com dimensões de 3,10 m x 1,70 m. O espaçamento usado entre linhas e entre plantas foi de 0,55 m, totalizando 12 plantas por parcela. O delineamento foi o inteiramente casualizado, composto por dois tratamentos e 16 repetições, totalizando 32 parcelas.

Na primeira etapa do experimento avaliou-se apenas o uso de cobertura do solo com restos de vegetais (mistura de bagaço de cana-de-açúcar, palha de milho, palha de trigo, capim) e solo sem cobertura (desnudo). Uma vez que não houve número suficiente de parcelas com stand uniforme, optou-se em manter todas as parcelas sob o mesmo nível de sombreamento (50%).

Em cada uma das parcelas foi montado uma estrutura de sustentação a 1,0 m de altura. Para isso foi preparada uma estrutura com estacas de madeira e arame liso esticado horizontalmente, que serviram para sustentar a tela plástica com sombreamento de 50%. A tela plástica recobriu toda parte superior das parcelas, bem como toda a lateral do lado norte e oeste, de modo a evitar a incidência direta de radiação solar. As avaliações fenométricas e colorimétricas foram realizadas em 15 de janeiro de 2013, aos 154 dias após o transplante.

De 15 a 18 de maio de 2013 foi realizado o replantio das mudas nas covas onde houve a morreram. A condição de sombreamento de 50% permaneceu então a mesma em todas as parcelas até 31 de julho de 2013. Em 1º de agosto de 2013 foi implantada a segunda etapa do experimento I para avaliação da influência do grau de sombreamento e da presença ou não de cobertura do sol no crescimento e desenvolvimento das plantas. Utilizou-se o delineamento experimental inteiramente casualizado, num esquema bifatorial com quatro repetições por tratamento. Os tratamentos constaram de sombreamento com tela plástica de 18%, 35% e 50% mais o tratamento a pleno sol, com e sem cobertura de solo, totalizando 8 tratamentos. A mesma estrutura de sustentação foi usada para instalação das telas plásticas de sombreamento.

A cobertura do solo foi renovada a cada quatro meses deixando-se uma camada com espessura média de três cm de restos vegetais. Foram realizadas duas avaliações, uma no verão (novembro e dezembro) e outra no outono (março e abril). As avaliações fenométricas, colorimétricas, fisiológicas e físico-químicas foram realizadas para as estações do verão (novembro e dezembro de 2013) quando foi realizada uma colheita e poda e no outono de 2014 (março e abril 2014), antes da segunda colheita.

3.3 Experimento 2 – Vento

Neste experimento foi avaliado o efeito do sombreamento e da velocidade do vento no crescimento e desenvolvimento das plantas de erva-mate. O transplante das mudas foi realizado na data de 28 de agosto de 2012, sendo estas oriundas da matriz Cambona, de Machadinho, RS.

As dimensões de cada canteiro foram de 2,90 m x 1,90 m, e todos os tratamentos receberam cobertura contínua de 3 cm de palha sobre o solo, similar aos tratamentos com cobertura no Experimento 1. O espaçamento usado entre as plantas foi de 0,85 m x 0,60 m, totalizando 12 plantas por parcela. Uma estrutura de 1,0 m de altura, semelhante ao primeiro experimento, foi montada para sustentação da tela plástica de sombreamento. De agosto de 2012 a dezembro de 2012 foi mantido um sombreamento de 18% como condição padrão para adaptação das plantas jovens. A partir de então metade das parcelas ao acaso de cada tratamento de vento recebeu sombreamento por tela plástica de 35%.

Foi adotado o delineamento inteiramente casualizado, em um esquema bifatorial composto por oito tratamentos e três repetições, totalizando 24 unidades experimentais. Os tratamentos foram: sombreamento de tela plástica de 18% e de 35%. Em ambos os tratamentos as plantas foram submetidas a velocidades de vento $\approx 0,0 \text{ m s}^{-1}$ (vento natural), 2 m s^{-1} , 4 m s^{-1} e 6 m s^{-1} . A aplicação de vento deu-se, de dois em dois dias seguidos, conforme as condições meteorológicas do dia, sendo aplicado das 9 às 17 horas em três épocas (Tabela 1). As diferentes velocidades do vento foram geradas por ventiladores portáteis de diferentes potenciais localizados dentro das parcelas, sendo a velocidade conferida diariamente por anemômetro digital portátil CE *Anemometer Instrutherm AD-250*, localizado junto às plantas nas quais foram feitas as avaliações.

Tabela 1 – Datas de aplicação de vento em plantas jovens de erva-mate “Cambona” nos tratamentos de diferentes velocidades do Experimento 2. Departamento de Fitotecnia-UFSM, Santa Maria, RS, 2014.

Data aplicação do vento		
1ª Avaliação Outono/2013	2ª Avaliação Verão/2013	3ª Avaliação Outono/2014
19/04/2013	05/11/2013	19/03/2014
21/04/2013	07/11/2013	21/03/2014
23/04/2013	09/11/2013	23/03/2014
25/04/2013	14/11/2013	25/03/2014
27/04/2013	16/11/2013	28/03/2014
-	18/11/2013	30/03/2014
-	21/11/2013	01/04/2014
-	22/11/2013	03/04/2014
-	24/11/2013	05/04/2014
-	26/11/2013	07/04/2014
-	27/11/2013	09/04/2014
-	29/11/2013	10/04/2014
-	02/12/2013	12/04/2014
-	04/12/2013	14/04/2014
-	06/12/2013	16/04/2014
-	08/12/2013	18/04/2014
-	09/12/2013	20/04/2014
-	12/12/2013	22/04/2014
-	14/12/2013	24/04/2014
-	17/12/2013	26/04/2014
-	19/12/2013	28/04/2014

3.4 Variáveis avaliadas

As avaliações foram realizadas no verão (2013-2014) e outono (2014) em três plantas da parcela útil de cada unidade experimental do experimento 1 cuidando-se para que as mesmas não apresentassem falhas de plantas vizinhas. No experimento 2 foi avaliada a planta que recebeu diretamente a ventilação com a velocidade controlada. Foram determinadas as seguintes variáveis: número de folhas (NF), altura de planta (Alt, cm), número de ramos (NR), comprimento de ramos (CR, cm), número de brotos (NB), área foliar total (AFt, cm²) e massa total.

A Área Foliar Total (AFt, cm²) por planta, foi determinada pelo somatório das áreas de cada folha (AF), calculadas através da multiplicação do seu comprimento pela largura e Fator de Forma (FF), sendo usado o valor de FF de 0,68 (SAIDELLES et al., 2003).

$$AF = \text{Comprimento} \times \text{Largura} \times FF \quad (1)$$

A AFt por planta foi obtida pelo somatório das AF de todas as folhas de cada planta. A massa total (mt, g planta⁻¹) foi fragmentada em massa seca das hastes e massa seca das folhas, usando-se uma balança de precisão modelo *Marte ALS*, com resolução de 1mg.

Em ambos os experimentos foram realizadas análises foliares fenométricas e colorimétricas utilizando-se três folhas por planta, posicionadas como a terceira, quarta e quinta folha na haste principal de cima para baixo. As análises fenométricas compreenderam a massa fresca (mff, g), massa seca (msf, g) e a área do limbo foliar (AF, cm²) com o integrador de área eletrônico *Portable Area Meter* LiCor (LI-3000C).

A análise colorimétrica foi determinada na epiderme foliar adaxial e abaxial com um colorímetro marca Minolta, modelo CR 310. Os parâmetros de cor medidos foram: o sistema tridimensional de cores, representado pelo ângulo hue (°H), o qual mostra a localização da cor em um diagrama (em que o ângulo 0° representa vermelho puro, 90° representa o amarelo puro, 180° o verde puro e 270° o azul), e a luminosidade (L) (0=preto e 100=branco).

A determinação de abertura estomática foi realizada nos experimentos 1 e 2 através de observações histológicas, no horário das 12-13h. Na análise da superfície foliar, foi utilizado o método de impressão da epiderme com cola instantânea (Super Bonder®), seguido da contagem dos estômatos abertos. As lâminas foram observadas e analisadas utilizando um microscópio LEICA com 400x de aumento, num campo de contagem com área de 18 x 2,5 µm. A contagem foi realizada em três lâminas e em cada lâmina três campos de contagem, sendo que para o experimento 1 essa avaliação ocorreu em dezembro de 2013 e abril de 2014 e no Experimento 2 nas nos últimos dias de aplicação do vento no verão (19/12/2013) e no outono (28/04/2014).

3.5 Dados meteorológicos e micrometeorológicos

Durante o período do experimento os dados diários de temperatura do ar (média, máxima e mínima), precipitação pluvial, radiação solar global incidente e velocidade do vento foram obtidos da estação meteorológica automática do Instituto Nacional de Meteorologia (8° DISME/INMET), localizada aproximadamente a 100 m do experimento e são apresentados na forma de valores mensais nos apêndices A a G, com os respectivos normais climatológicos.

As determinações micrometeorológicas foram realizadas em algumas datas nas estações do verão de 2013/2014 e outono de 2014, medindo-se a temperatura da nervura das

folhas e radiação solar global acima da tela de sombreamento. A temperatura da nervura das folhas foi medida com termopares de cobre-constantan tipo T, instalados na nervura principal no centro das folhas de erva-mate, sendo conectados a dataloggers modelos *Campbell Scientific* CR-1000 e *DaqPRO Data Logger* para armazenamento dos dados a cada 15 minutos.

3.6 Análises estatísticas

Os dados das avaliações dos experimentos 1 e 2 referentes às respostas das plantas como altura de planta, número de folhas, número de ramos, comprimento de ramos, número de brotos, área foliar total, massa fresca e seca das hastes, caule e total, massa fresca e seca por folha, área do limbo foliar, cor da epiderme foliar e abertura estomática foram testados quanto à normalidade, homogeneidade e independência, procedendo-se a transformação dos dados para Ln (logaritmo neperiano) quando necessário. Realizou-se então a Análise da Variância (ANOVA) e análise de regressão (FERREIRA, 2008). Quando não se encontrou modelos matemáticos significativos, foram feitas as comparações de média pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. As análises estatísticas foram realizadas com o *software* SISVAR 5.3 e os gráficos de regressão com as curvas de tendências com o *software* EXCEL 2010.

Para o fator cobertura do solo (solo coberto e desnudo) no experimento 1 na avaliação de 2012-2013, as variáveis estudadas foram submetidos aos testes de pressupostos (normalidade, heterogeneidade e independência), realizando-se a Análise da Variância (ANOVA) com teste F com 10% de significância.

Os dados meteorológicos e micrometeorológicos foram sintetizados em forma de médias diárias horárias, ou médias por classe de horário, sendo apresentados na forma de tabelas. Os dados da composição fitoquímica foram comparados com teste de Tukey com 5% de significância. Nos dados de compostos fitoquímicos foram realizados teste de Tukey a 5% e no Experimento 1 foi realizada correlação de Person (r_p) para correlacionar as análises entre si.

3.7 Determinação dos compostos fenólicos e da capacidade antioxidante in vitro

As folhas maduras de erva-mate foram coletadas no final dos experimentos em dezembro de 2013 (verão) e em abril de 2014 (outono) nos experimentos 1 e 2,

respectivamente, e foram avaliadas em relação ao teor de compostos fenólicos e da capacidade antioxidante *in vitro*, a partir da obtenção dos extratos.

3.7.1 Obtenção dos extratos

Os extratos foram obtidos de folhas adultas (maturas) de erva-mate de cada planta das parcelas dos experimentos 1 e 2. Foram coletadas 20 folhas de erva-mate por tratamento pegando-se indivíduos da área útil no experimento 1 e os indivíduos que receberam a ventilação forçada no experimento 2. No experimento 1 (sombreamento x cobertura do solo), tiveram-se os 8 tratamentos com 4 repetições e no experimento 2 (velocidade do vento x sombreamento), tiveram-se 8 tratamentos com 3 repetições. Após a coleta as folhas foram congeladas com nitrogênio líquido e acondicionadas em *frezzer*. Para a obtenção dos extratos as amostras de erva-mate foram secas em estufa com circulação forçada de ar (55 °C/24 horas) e trituradas em micromoinho refrigerado (Marconi[®], modelo MA630) com tamanho de partícula inferior a 1mm.

Para obtenção dos extratos foi realizada um pré-teste para se verificar qual o melhor extrator com solventes etanol: água destilada nas proporções de 10:90v/v, 20:80 v/v, 60:40 v/v e 80:20 v/v (Tabela 2), mostrando-se mais viável e melhor o uso do extrator etanólico na proporção de 20:80 v/v em ultrassom (Tabela 2). Os extratos foram preparados na proporção de 1:50 (p/v) amostra: solvente. As extrações foram realizadas em banho ultrassônico com frequência de 40 KHz (*Ultra Sonic Clean*, modelo USC 1600) por 15 minutos à temperatura ambiente (21 °C ± 2 °C). Após os extratos foram filtrados em papel filtro e acondicionados em *ependorfs*, devidamente identificados, e estocados a – 18 °C até o momento das análises.

Tabela 2 – Teores de compostos fenólicos totais de diferentes extratos etanólicos de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hill.) submetidos ao ultrassom.

Extrações etanólicas com ultrassom (%)	Compostos Fenólicos (mg EAG L ⁻¹)
0	306,7* b
10	353,4 a
20	333,9 ab
60	331,2 ab
80	245,8 c

*Letras minúsculas diferentes correspondem a diferenças significativas entre os diferentes extratos etanólicos, pelo teste de Tukey (p≤0,05) n = 9.

3.7.2 Determinação dos compostos fenólicos totais

A quantificação dos compostos fenólicos totais em cada extrato foi determinada por espectrofotometria, por meio da reação de oxirredução com reagente de Folin-Ciocalteu, o qual reage com as hidroxilas presentes nos polifenóis, segundo a metodologia descrita por Singleton e Rossi (1965).

Neste procedimento, o extrato foi diluído em solução extratora alcoólica acidificada, etanol:água:HCl (70:30:1), a seguir foi pipetado em tubo de ensaio, 200 μL do extrato diluído, 1000 μL do reagente de Folin-Ciocalteu (1:10 H_2O) e 800 μL de solução de carbonato de sódio (Na_2CO_3) 7,0%.

As amostras foram agitadas e permaneceram em repouso, ao abrigo da luz, por duas horas em temperatura ambiente. As leituras foram realizadas em triplicata das absorvâncias em espectrofotômetro UV-visível (HOMIS SF 200DM) em comprimento de onda de 765 nm. O cálculo do teor de compostos fenólicos foi determinado por interpolação da absorvância das amostras contra uma curva de calibração construída com padrão de ácido gálico, nas concentrações de 0; 10; 20; 30; 40, 50, 60, 70 e 80 mg L^{-1} . Os resultados foram expressos em miligrama de equivalentes de ácido gálico® por litro (mg EAG L^{-1}).

3.7.3 Determinação de flavonoides

O teor de flavonoides foi analisado pelo método colorimétrico descrito por Zhishen, Mengcheng e Jianming (1999).

Alíquotas de 1 mL dos extratos diluídos obtidos das folhas que foram adicionadas em balão volumétrico de 10 mL contendo 4 mL de água destilada. No tempo zero, foi adicionado ao balão volumétrico 0,3 mL de NaNO_2 5%. Após cinco minutos adicionou-se 0,6 mL de AlCl_3 10%. Seis minutos depois, foi adicionado 2 mL de NaOH 1 M e o volume completado até 10 mL com água destilada.

As leituras das amostras foram realizadas em triplicata das absorvâncias em espectrofotômetro UV-visível (HOMIS SF 200DM) em comprimento de onda de 510 nm. O teor de flavonoides foi determinado utilizando-se uma curva padrão de catequina (0-250 mg L^{-1}) e os resultados, determinados a partir de uma equação de regressão, expressos em miligramas de equivalentes de catequina por litro (mg ECA L^{-1}).

3.7.4 Capacidade antioxidante *in vitro*

3.7.4.1 Método FRAP (Ferric Reducing Antioxidant Power)

Para a determinação da capacidade antioxidante total pelo método de redução do ferro (FRAP) foi utilizado o procedimento descrito por Benzie e Strain (1996). Este ensaio se baseia na medida direta de habilidade dos antioxidantes (redutores) da amostra em reduzirem, em meio ácido (pH 3,6), o complexo Fe^{3+} /tripiridiltriazina (TPTZ), para formar Fe^{2+} , de intensa cor azul e absorção máxima a 593 nm.

No ensaio FRAP, soluções de tampão acetato, $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 20 mM e TPTZ (10 mM) foram adicionadas na proporção 10:1:1, originando o reagente FRAP. As amostras dos extratos de erva-mate foram diluídas em água destilada, a seguir, alíquotas (0,2 mL) de cada extrato foram misturadas com 1,8 mL do reagente FRAP e a absorbância da mistura de reação medida a 593 nm em espectrofotômetro UV-visível (HOMIS SF 200DM), após incubação em banho-maria a 37 °C durante 30 min. O Trolox (1 mM) foi utilizado como padrão para construir uma curva de calibração, nas concentrações de 0; 0,025; 0,05; 0,075; 0,100, 0,150, 0,200 e 0,250 mM de Trolox sendo os resultados expressos em mM TROLOX L^{-1} (capacidade antioxidante equivalente ao Trolox).

3.7.4.2 Método ABTS (ácido 2,2'-azino-bis (3-etilbenzotiazolin) 6-ácido sulfônico)

Para a determinação da atividade antioxidante pelo método do radical $\text{ABTS}^{\bullet+}$, utilizou-se a metodologia descrita por Re et al., (1999). Inicialmente, foi formado o radical $\text{ABTS}^{\bullet+}$, a partir da reação de 14 mM de ABTS com 4,9 mM de persulfato de potássio (1:1 v/v), os quais foram incubados à temperatura ambiente e na ausência de luz, por 16 horas. Transcorrido esse tempo, a solução foi diluída em etanol até a obtenção de uma solução com absorbância de 0,680 a 0,720 ($0,700 \pm 0,02$).

Para realizar as análises, foram adicionados em tubos de ensaio a solução contendo o radical $\text{ABTS}^{\bullet+}$ e o extrato diluído em etanol. A absorbância foi monitorada em espectrofotômetro UV-visível (HOMIS SF 200DM) a 750 nm, após 15 minutos de reação.

Uma curva de calibração foi construída, utilizando-se como solução-padrão o antioxidante sintético Trolox nas concentrações de 0; 0,025; 0,05; 0,075; 0,100 e 0,150 mM em etanol. Todas as leituras foram realizadas em triplicata, e os resultados expressos em mM de Trolox por litro (mM TROLOX L^{-1}) (capacidade antioxidante equivalente ao Trolox).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Condições meteorológicas

As condições meteorológicas mensais relativas ao período da condução dos experimentos (julho de 2012 a junho de 2014) estão apresentadas nos Apêndices A a G. As médias mensais das temperaturas médias, máximas e mínimas do ar não apresentaram desvios expressivos em relação à condição típica do clima descrito para Santa Maria, RS, por Kuinchtner; Buriol (2001). Nos três invernos ocorreram temperaturas mínimas absolutas do ar mensais iguais ou menores do que 0,6 °C e, embora tenham ocorrido geadas fracas a moderadas, não foi observado dano por frio nas erveiras jovens, tais como sintomas de paralisação do metabolismo foliar e desidratação das folhas, conforme descreve Daniel (2009), ou injúrias. As temperaturas máximas absolutas do ar foram superiores a 35°C, nos meses de dezembro de 2012, janeiro, fevereiro e dezembro de 2013 e janeiro e fevereiro de 2014, alcançando 38,6 C e 40,0°C em fevereiro de 2013 e 2014, respectivamente, muito acima da normal climatológica das médias das absolutas mensais.

As grandes diferenças entre as temperaturas máximas médias e extremas ocorridas nos dois verões em relação às condições térmicas nos invernos indicam que as plantas jovens de erva-mate foram submetidas a uma variação anual de temperatura do ar muito acima dos prováveis valores que ocorrem em seu habitat natural no Sul do Brasil, que é de abrigo parcial por extratos arbóreos superiores e verões mais amenos. Devido à dificuldade de enraizamento e expansão do sistema radicular de parte das plantas jovens, observaram-se sintomas visuais de estresse como folhas de cor amarelada e crescimento insipiente, além da morte de parte das plantas. Assim, infere-se que o possível estresse em determinadas plantas tenha como causa o sistema radicular insuficientemente desenvolvido, potencializado pelo efeito adverso de alta temperatura e déficit de saturação do ar, associado a elevada incidência de radiação solar e, eventualmente, a ventos moderados a fortes, uma vez que as erveiras foram mantidas sob irrigação complementar por gotejamento.

No apêndice F, observa-se a radiação solar global incidente no período de julho de 2012 a junho de 2014, correspondente ao período de condução dos experimentos com erva-mate, comparada com as médias mensais normais de radiação solar de 1975-2005. Nos meses de outubro e dezembro de 2012, março, maio, junho e julho de 2013 e fevereiro e março de 2014, a radiação solar ficou abaixo da normal. Os meses de novembro de 2012, janeiro,

setembro, outubro, novembro e dezembro de 2013, janeiro, maio e junho de 2014 ficaram com radiação solar acima da normal do período de 1975-2005. Nos meses de novembro de 2012, fevereiro, maio, junho, julho, setembro e dezembro de 2013, a precipitação e, possivelmente, a nebulosidade, foi abaixo da média histórica. Essa condição também pode ter contribuído para possíveis condições de estresse nos tratamentos menos sombreados, uma vez que a menor disponibilidade hídrica regional e a menor nebulosidade resultam em aumentos da temperatura e do déficit de saturação vapor no período diurno (MONTEITH; UNSWORD, 1990). Essa condição provavelmente contribuiu para o aumento do transporte advectivo de calor e vapor devido ao efeito de “oásis” (ALLEM et al., 1998), uma vez que a bordadura da na área experimental irrigada era pequena.

No Apêndice G está apresentado a radiação solar estimada para os meses do período experimental para os respectivos graus de sombreamento com tela plástica dos tratamentos nos experimentos 1 e 2, em que ficam visíveis as diferenças de condições micrometeorológicas a pleno sol com a redução dos sombreamentos de 18, 35 e 50%. A utilização de telas de sombreamento na fase inicial do cultivo da erva-mate tende a atenuar as condições de temperatura do ar e luminosidade elevadas, o que deve ter contribuído para diminuir os efeitos de condições extremas de radiação solar, resultando em melhor qualidade das folhas da erva-mate e, principalmente, melhor estabelecimento inicial, crescimento e desenvolvimento das plantas jovens de erva-mate (KASPARY, 1985; CATAPAN, 1998; MAZUCHOWSKI, 2004; MAZUCHOWSKI; SILVA; JUNIOR, 2007; VUADEN, 2009).

4.2 Experimento 1 – cobertura de solo e sombreamento

4.2.1 Temperatura das folhas de erva-mate

Os resultados de temperatura das folhas de erva-mate, medida com termopar na nervura central, são apresentadas com médias por classe de horário com teste de Tukey a 5%, na estação do verão (Tabela 3). Verifica-se que na estação do verão ocorreu grande variação nos meses de janeiro e fevereiro de 2014 (Tabela 3), alcançando valores extremos máximos de médias horárias muito altas em alguns dias, indicando condições de possível estresse térmico. Os valores mais altos de temperatura das folhas de erva-mate chegaram próximos ou ultrapassaram aos os 39°C nas datas de 21, 22, 23 e 30 de janeiro e 6 e 21 de fevereiro, principalmente nos tratamentos com 0% de sombreamento, pleno sol, com e sem cobertura de palha sobre o solo (Tabela 3). O valor máximo extremo ocorreu no período das 13 às 14 horas

de 6 de fevereiro de 2014, alcançando média horária de 41,34 °C. Na estação meteorológica do INMET, localizada próxima aos experimentos, às condições térmicas extremas nos dois verões foram similares (Anexo D), permitindo inferir que também no verão anterior (2013/2013) em diferentes datas as plantas jovens de erva-mate podem ter sofrido estresse térmicos por consequência de temperatura do ar muito elevada.

Os tratamentos com sombreamento de 50% apresentam menores médias, nas datas de 21, 22 e 23 de janeiro e 21 de fevereiro de 2014, diferindo estatisticamente dos dois tratamentos mais expostos ao sol (pleno sol e 180% de sombreamento), que não diferiram entre si (Tabela 3). Na data de 21 de fevereiro de 2014 o sombreamento 35% também apresentou média estatisticamente menor do que o tratamento a pleno sol (0% de sombreamento).

O sombreamento atua na atenuação das temperaturas elevadas. Folhas sombreadas tendem a apresentar temperatura mais próxima da temperatura do ar do que folhas expostas a pleno sol (LARCHER, 2004; PASCALE; DAMARIO, 2004; TAIZ; ZEIGER, 2013), sendo a diferença maior nos horários e dias com maior incidência de radiação solar, principalmente sob baixa velocidade do vento (MONTEITH; UNSWORD, 1990; ZANELLA et al., 2006). No experimento 1, a maior elevação da temperatura nas nervuras das folhas da erva-mate no decorrer do dia geralmente ocorreu nos horários das 12 às 15 horas (Tabela 3), quando se tem maior incidência de radiação solar (12 às 13 horas) e maior energia disponível devido ao maior aquecimento do solo e do ar.

As temperaturas elevadas registradas podem ser consideradas limitantes para a erva-mate em Santa Maria, pois conforme denotam Ferreira et al. (1994), Vieira et al. (2003) e Foltran (2004), as temperaturas máximas do ar muito elevadas interferem diretamente na temperatura das folhas de erva-mate e resultam em alta demanda evapotranspirativa e aumento do estresse da folha especialmente sob déficit hídrico no solo. Assim, a irrigação complementar foi realizada no atual experimento para isolar o efeito de estresse térmico em relação ao estresse causado por déficit hídrico no solo. Considerando os resultados obtidos, infere-se então que tanto sobre solo coberto quanto sobre solo desnudo, o sombreamento de 50% se apresenta mais eficaz na diminuição do estresse da planta por altas temperaturas da folha nos meses de janeiro e fevereiro (Tabela 3).

Tabela 3 – Média por classe de horário da Temperatura (T) da nervura das folhas de plantas jovens de erva-mate submetidas aos sombreamentos (S) 0, 18, 35 e 50% em solos cobertos com palha (C) e desnudos (D), nos meses de janeiro e fevereiro de 2014. Santa Maria, RS, 2015.

Trat.	Classe Hor.	(% Sombreamento)				Média
		0	18	35	50	
21/01/2014						
C ¹	11-12h	37,45 *	37,51	-	35,17	36,71 a***
D ²		37,19	38,77	-	35,91	37,29 a
Média		37,42 A**	38,14 A	-	35,54 B	
C	12-13h	38,08	38,49	-	35,56	37,38 a
D		37,79	36,57	-	36,33	36,90 a
Média		37,94 A	37,53 A	-	35,95 B	
C	13-14h	37,63	37,48	-	35,32	36,81 a
D		37,51	36,29	-	36,23	36,68 a
Média		37,57 A	36,88 A	-	35,78 B	
C	14-15h	38,32	38,24	-	35,85	37,47 a
D		38,25	38,62	-	36,77	37,88 a
Média		38,28 A	38,43 A	-	36,31 A	
C	15-16h	38,57	38,88	-	36,01	37,82 a
D		38,33	38,80	-	37,17	38,10 a
Média		38,45 A	38,84 A	-	36,59 A	
22/01/2014						
C	11-12h	36,25	38,20	-	35,36	36,60 a
D		39,36	37,34	-	36,24	37,65 a
Média		37,80 A	37,76A	-	35,79 B	
C	12-13h	36,56	38,45	-	35,44	36,82 a
D		38,68	37,94	-	35,58	37,39 a
Média		37,62 A	38,17 A	-	35,50 B	
C	13-14h	36,56	38,45	-	35,44	36,94 a
D		38,68	37,94	-	36,76	37,55 a
Média		37,62 A	38,17 A	-	35,75 B	
C	14-15h	37,49	38,82	-	36,81	37,46 a
D		38,45	38,38	-	37,32	38,89 a
Média		39,23 A	38,59 A	-	36,70 B	
C	15-16h	-	-	-	-	-
D		-	-	-	-	-
Média		-	-	-	-	
23/01/2014						
C	11-12h	37,95	39,64	-	35,83	37,80 a
D		39,52	38,38	-	38,97	38,95 a
Média		38,72 A	39,00 A	-	37,40 A	
C	12-13h	38,64	-	-	36,37	38,61 a
D		39,74	39,17	-	39,65	39,50 a
Média		39,17 A	40,00 A	-	38,00 B	
C	13-14h	38,74	-	-	36,37	38,50 a
D		39,92	39,23	-	39,86	39,57 a
Média		39,33 A	39,81 A	-	38,11 A	
C	14-15h	38,53	39,24	-	36,66	37,78 a
D		39,14	38,79	-	38,92	38,95 a
Média		38,59 A	39,01 A	-	37,49 A	
C	15-16h	37,96	38,46	-	35,80	37,4 a
D		39,55	38,35	-	38,72	38,70 a
Média		38,50 A	38,40 A	-	37,25 A	

continua...

Teste de Tukey ($p < 0,05$) sendo, * Letras minúsculas comparam os diferentes tratamentos de cobertura do solo quando há interação (cobertura de solo X sombreamento) ** letras maiúsculas comparam sombreamentos entre si, *** letras minúsculas comparam as coberturas do solo, ¹ Solo Coberto (C) e ² Solo Desnudo (D).

Trat.	Classe Hor.	(% Sombreamento)				Média
		0	18	35	50	
30/01/2014						
C ¹	11-12h	34,46*	34,24	-	33,92	34,02 a***
D ²		35,74	34,46	-	35,43	35,21 a
Média		35,10 A **	34,34 A		34,26 A	
C	12-13h	36,77	35,52	-	34,89	35,72 a
D		37,39	36,52	-	37,15	36,91 a
Média		37,08 A	36,01 A		36,02 A	
C	13-14h	37,44	36,57	-	35,15	36,38 a
D		38,21	37,42	-	37,65	37,76 a
Média		37,82 A	36,99 A		36,40 A	
C	14-15h	37,99	37,33	-	34,75	36,67 a
D		38,18	38,55	-	38,15	38,24 a
Média		38,08 A	37,92 A		36,37 A	
C	15-16h	37,99	37,56	-	34,88	36,81 a
D		38,44	38,28	-	38,36	38,25 a
Média		38,21 A	37,92 A		36,45 A	
06/02/2014						
C	11-12h	-	36,34	-	35,85	36,92 a
D		-	37,49	-	-	37,49 a
Média		-	36,90 A	-	35,85 A	
C	12-13h	-	37,29	-	36,17	37,27 a
D		-	38,23	-	-	38,23 a
Média		-	37,75 A	-	36,17 B	
C	13-14h	38,94 b	37,37 a	-	36,31 a	37,55
D		41,34 a	38,32 a	-	-	39,54
Média		40,15	37,85	-	36,31	
C	14-15h	37,74 b	38,14 a	-	37,24 a	37,71
D		41,23 a	39,57 a	-	-	40,81
Média		39,49	38,60	-	37,24	
C	15-16h	37,93 b	38,15 a	-	37,56 a	37,88
D		41,75 a	38,98 a	-	-	40,37
Média		39,40	38,57	-	37,56	
21/02/2014						
C	11-12h	36,67	-	32,87	-	34,77 a
D		34,11	-	32,93	32,50	33,18 a
Média		35,38 A	-	32,90 B	32,50 B	
C	12-13h	38,67	-	34,74	-	34,77 a
D		35,23	-	34,29	32,70	34,07 a
Média		36,95 A	-	34,38 B	32,70 B	
C	13-14h	38,49	-	34,18	-	36,33 a
D		34,92	-	34,61	32,36	33,97 a
Média		36,70 A	-	34,39 B	32,36 B	
C	14-15h	39,84	-	34,69	-	37,26 a
D		34,87	-	35,26	32,93	34,36 a
Média		37,35 A	-	34,97 B	32,93 B	
C	15-16h	38,28	-	33,95	-	36,12 a
D		33,83	-	34,89	31,99	33,57 a
Média		36,05 A	-	34,41 B	31,99 C	

Teste de Tukey ($p < 0,05$) sendo, * Letras minúsculas comparam os diferentes tratamentos de cobertura do solo quando há interação (cobertura de solo X sombreamento) ** letras maiúsculas comparam sombreamentos entre si, *** letras minúsculas comparam as coberturas do solo, ¹ Solo Coberto (C) e ² Solo Desnudo (D).

Na estação do outono, observou-se uma gradativa diminuição da radiação solar em relação ao verão, sendo que as médias de temperatura da nervura das folhas, obtidas por

classe de horário, não apresentaram diferenças pelo teste de Tukey a 5% (Tabela 4). Nessa época os valores máximos de temperatura da folha alcançaram entre 30 e 36 °C nos três dias do mês de março de 2014 e em torno dos 20 a 25 °C nos quatro dias do mês de abril de 2014 (Tabela 4), portanto bem menores do que no verão. Isso evidencia que nestes meses do outono o estresse térmico das folhas é diminuído, o que favorece o metabolismo das plantas de erva-mate segundo Kaspary (1985), Mazuchowski (2004), Foltran (2004) e Mazuchowski, Silva e Junior (2007), que apresentam o nível térmico de cerca de 17 °C como temperatura ideal de crescimento e desenvolvimento.

Em abril a maior diferenciação numérica com relação à temperatura da nervura das folhas ocorreu nas horas mais quentes no tratamento 0% de sombreamento. Assim, a pleno sol, com cobertura do solo, a temperatura, tanto do ar quanto das folhas é maior, provavelmente devido ao maior fluxo de calor sensível em detrimento do fluxo de calor latente como forma de dissipação de calor na superfície da palha. Nos demais tratamentos a temperatura tende a aumentar no decorrer do dia mantendo mais semelhança entre os tratamentos. Para Mazuchowski (2004), Foltran (2004) e Mazuchowski, Silva e Junior (2007) em plantas jovens de erva-mate sombreadas a temperatura é menor favorecendo o metabolismo como um todo, principalmente o fotossintético, assim como em plantas adultas, em que Caron et al. (2014a e b) também demonstram que a radiação solar é melhor utilizada pelas ervaíras, quando cultivadas em plantios consorciados com outras espécies sombreadoras.

Tabela 4 – Média por classe de horário da Temperatura (T) da nervura das folhas de erva-mate de plantas jovens submetidas aos sombreamentos (S) 0, 18, 35 e 50% em solos cobertos com palha (C) e desnudos (D), no mês de março e abril de 2014. Santa Maria, RS, 2015.

Trat.	Classe Hor.	(% Sombreamento)				Média
		0	18	35	50	
26/03/2014						
C ¹	11-12h	29,73*	27,10	27,68	27,40	27,98 a***
D ²		27,72	28,13	28,13	27,71	27,92 a
Média		28,39 A	27,57 A	27,86 A	27,23 A	
C	12-13h	29,45	27,47	27,86	27,74	28,13 a
D		28,14	28,48	28,53	27,39	28,12 a
Média		28,79 A	27,97 A	28,19 A	27,56 A	
C	13-14h	29,29	27,52	27,81	27,63	28,06 a
D		28,13	28,48	28,18	27,26	28,20 a
Média		28,70 A	27,99 A	27,99 A	27,44 A	
C	14-15h	-	28,22	28,17	28,78	28,39 a
D		28,95	29,26	28,95	28,68	28,96 a
Média		28,65 A	28,73 A	28,55 A	28,38 A	
C	15-16h	28,95	29,26	28,95	28,68	28,80 a
D		29,28	29,66	28,96	28,64	29,11 a
Média		29,87 A	28,94 A	28,56 A	28,86 A	
29/03/2014						
C	11-12h	35,66	32,85	34,87	34,58	34,49 a
D		33,98	35,13	33,90	33,54	34,14 a
Média		34,37 A	33,95 A	34,38 A	34,06 A	
C	12-13h	36,72	33,70	34,42	35,46	35,07 a
D		34,00	35,65	34,27	34,43	34,59 a
Média		35,35 A	34,67 A	34,34 A	34,91 A	
C	13-14h	36,11	33,22	33,68	34,72	34,43 a
D		33,96	35,42	34,43	33,59	34,75 a
Média		35,02 A	34,32 A	34,05 A	34,15 A	
C	14-15h	36,55	33,52	33,83	34,96	34,91 a
D		34,74	35,71	34,85	34,11	34,85 a
Média		35,64 A	34,61 A	34,31 A	34,53 A	
C	15-16h	34,34	32,19	31,86	32,86	32,91 a
D		32,83	33,61	33,30	32,38	33,01 a
Média		33,58 A	32,90 A	32,57 A	32,58 A	
31/03/2014						
C	11-12h	27,76	27,11	26,51	27,15	27,13 a
D		27,47	26,73	26,98	26,75	26,68 a
Média		27,61 A	26,86 A	26,74 A	26,94 A	
C	12-13h	27,69	26,81	26,29	26,92	26,93 a
D		27,38	26,53	27,96	27,25	27,28 a
Média		27,53 A	26,67 A	26,69 A	26,96 A	
C	13-14h	26,78	26,45	25,57	25,96	26,82 a
D		26,69	25,75	26,56	25,92	26,99 a
Média		26,69 A	25,89 A	26,06 A	25,94 A	
C	14-15h	27,71	26,69	26,41	26,91	26,93 a
D		27,33	26,64	27,18	27,12	27,06 a
Média		27,52 A	26,66 A	26,75 A	27,01 A	
C	15-16h	27,59	26,54	26,20	26,77	26,77 a
D		27,30	26,56	26,89	26,85	26,90 a
Média		27,44 A	26,55 A	26,54 A	26,81 A	

Continua...

Teste de Tukey ($p < 0,05$) sendo, * letras maiúsculas comparam sombreamentos entre si, *** letras minúsculas comparam as coberturas do solo, ¹ Solo Coberto (C) e ² Solo Desnudo (D).

Trat.	Classe Hor.	(% Sombreamento)				Média
		0	18	35	50	
15/04/2014						
C ¹	11-12h	22,33 *	19,46	-	-	20,89 a***
D ²		-	21,35	-	21,40	21,38 a
Média			22,33 A	20,40 A	-	21,12 A
C	12-13h	24,79	22,50	-	23,65	23,36 a
D		23,50	23,70	-	23,96	23,72 a
Média			24,14 A	23,09 A	-	23,80 A
C	13-14h	24,89	22,90	-	23,83	23,57 a
D		23,99	24,50	-	24,58	24,36 a
Média			24,43 A	23,45 A	-	24,20 A
C	14-15h	27,43	23,34	-	25,85	25,27 a
D		24,47	25,56	-	25,55	25,19 a
Média			25,94 A	24,44 A	-	25,315 A
C	15-16h	27,36	23,65	-	24,50	24,73 a
D		24,80	25,12	-	25,63	25,18 a
Média			26,07 A	24,09 A	-	25,06 A
22/04/2014						
C	11-12h	22,70	22,11	21,87	22,19	22,22 a
D		23,80	-	22,42	22,76	22,99 a
Média			22,88 A		22,14A	22,47 A
C	12-13h	23,95	23,34	22,97	23,25	23,38 a
D		23,45	-	23,52	23,64	23,54 a
Média			23,67 A	-	23,25 A	23,44 A
C	13-14h	23,44	-	22,49	22,96	22,94 a
D		23,23	-	23,19	22,84	23,08 a
Média			23,33 A	-	-	22,89 A
C	14-15h	24,35	23,50	22,52	23,95	23,58 a
D		23,10	-	23,48	22,81	23,03 a
Média			23,56 A		23,00A	22,95 A
C	15-16h	24,73	22,93	22,57	23,14	23,34 a
D		23,62	-	23,33	23,45	23,47 a
Média			24,17 A	-	22,94A	23,09 A

Teste de Tukey ($p < 0,05$) sendo, * letras maiúsculas comparam sombreamentos entre si, *** letras minúsculas comparam as coberturas do solo, ¹ Solo Coberto (C) e ² Solo Desnudo (D).

4.2.2 Determinações fenométricas da primeira etapa Experimento 1

O número de folhas (NF) e a área foliar total por planta (AF) diferiram significativamente entre os tratamentos, com médias maiores para solos com cobertura vegetal morta (Tabela 5). As variáveis: altura de planta, comprimento de ramos, número de brotos (NB) e número de ramos (NR) por planta, massa fresca e massa seca da parte aérea não diferiram significativamente.

Tabela 5 – Altura (Alt), número de brotos (NB), número de ramos (NR), comprimento ramos (CR), número de folhas (NF), área foliar total por planta (AFP), massa fresca (mf) e massa seca (ms) da parte aérea por planta com e sem cobertura de palha no solo com sombreamento de 50% em erva-mate jovem, em Santa Maria, RS. Em Santa Maria, RS, 2015.

Cobertura do solo	Alt (cm)	NB (unid)	NR (unid)	CR (cm)	NF (unid)	AFT (cm²)	mf (g)	ms (g)
Com palha	26,98a*	2,93a	1,70a	8,60a	36,82 ^a	415,39a	9,90a	2,84a
Sem palha	22,06a	3,01a	2,66a	6,50a	23,33b	241,99b	9,56a	2,46a

*Médias com letras diferentes na vertical diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade de erro.

As grandes variações na temperatura do ar ao longo do período experimental, possivelmente foram causadoras de estresse térmico para as plantas (Apêndices A, B, C e D). Segundo Fossati (1997) e Daniel (2009), a temperatura ideal para o crescimento e desenvolvimento da erva-mate é de aproximadamente 17 °C. Assim, temperaturas mínimas muito baixas e temperaturas máximas muito elevadas podem ter favorecido o estresse térmico e retardado o crescimento e desenvolvimento das plantas. Constata-se que o número de folhas e área foliar total foram maiores nos tratamentos com cobertura (Tabela 5), condição que pode ter atenuado os efeitos adversos de temperaturas muito elevadas no solo e no ar.

Conforme Larcher (2004), Gliessman (2005) e Taiz; Zeiger (2013), o estresse térmico causado pelas altas temperaturas do ar aliado a baixa disponibilidade hídrica restringe a transpiração, causa superaquecimento, inibe a fotossíntese e prejudica a função das membranas e estabilidade das proteínas. Na primeira etapa do experimento 1, as plantas jovens de erva-mate foram favorecidas pela presença de cobertura do solo, evidenciando-se que o crescimento foi mais significativo, possivelmente também favorecido pela liberação gradual de nutrientes para as plantas. Segundo Fossati (1997) o aumento da área foliar das plantas de erva-mate, aliado a um bom estado nutricional aumenta a superfície de assimilação, que resulta em aumento da produção.

Os resultados apresentados na Tabela 5 são similares aos de Kaspary (1985), em que a massa fresca não apresentou alteração significativa, mas houve um incremento da superfície da área foliar, o que, segundo o autor, é um mecanismo da planta para aumentar sua capacidade fotossintética. Taiz e Zeiger (2013) também confirmam que o aumento da área foliar implica em aumento da taxa fotossintética e que solos com cobertura vegetal morta propiciam maior liberação gradual de nutrientes e diminuem a perda de água por evaporação na superfície do solo e o estresse térmico causado pelas altas temperaturas do ar.

Kaspary (1985) verificou também que plantas de erva-mate sombreadas alcançaram melhor desempenho quanto à área foliar, altura de planta e produção de massa seca com a redução da intensidade luminosa com sombreamento de 50 e 70% e cobertura do solo, mas o número de folhas não variou significativamente, tal como no atual trabalho. Embora não tenha ocorrido aumento significativo de mf e ms da parte aérea, houve tendência de um ganho qualitativo, pois ocorreu um aumento do número de folhas, da área foliar total por planta, significativamente maior nos tratamentos com cobertura de palha sobre o solo (Tabela 5).

Segundo Taiz e Zeiger (2013), sob o ponto de vista bioquímico as folhas de “plantas de sombra” têm mais clorofila “a” e geralmente são mais finas que as folhas de “plantas de sol”. As plantas de sol possuem mais rubisco e xantofilas. Em plantas de sombra a razão de fotossistema I (PSI) e fotossistema II (PSII) são de 3:1, já em plantas de sol são de 2:1. Temperaturas elevadas, acima de 40 °C, como as registradas nas determinações de verão, reduzem a fotossíntese em mais da metade na maioria das plantas, assim como as temperaturas baixas são limitantes, diminuindo a disponibilidade de fosfatos nos cloroplastos (LARCHER, 2004; TAIZ; ZEIGER, 2013). Porém, destaca-se que não foram medidas temperaturas baixas, possíveis causadoras de estresse por frio, nas datas de determinação e nos dados meteorológicos de verão e outono de 2013/2014. Do ponto de vista de adaptação ecológica, cada espécie vegetal possui uma temperatura ótima para alcançar as taxas fotossintéticas máximas e ultrapassando esta temperatura a assimilação fotossintética tende a diminuir (TAIZ; ZEIGER, 2013). No caso em questão, fica evidenciado que as plantas jovens de erva-mate ficaram expostas a temperaturas máximas para as quais não tinham suficiente adaptação ecológica, porém a caracterização do efeito adverso não se diferenciou de forma clara nas variáveis avaliadas nos diferentes tratamentos.

Na Tabela 6 estão apresentados os dados de massa fresca e seca das três folhas apicais desenvolvidas e da sua respectiva área do limbo foliar e cor das folhas individuais. Estes resultados foram obtidos da coleta da terceira, quarta e quinta folhas desenvolvidas no sentido ápice para base da haste principal de cada planta. Os resultados diferem significativamente para área do limbo foliar (ALF), sendo maior para plantas que foram submetidas à cobertura do solo com vegetação morta (12,73 cm² folha⁻¹). No entanto, a média da massa fresca e seca unitária das folhas, não diferiu estatisticamente entre os tratamentos com e sem cobertura do solo com restos vegetais (Tabela 6).

Tabela 6 – Médias de massa fresca das folhas (mff, g·folha⁻¹), massa seca das folhas (msf, g·folha⁻¹), área do limbo foliar (ALF, cm² folha⁻¹) e de coloração da epiderme foliar (em °H) nas faces adaxial e abaxial das três folhas apicais desenvolvidas (3^a, 4^a e 5^a folhas abaixo do ápice) de plantas jovens de erva-mate cultivadas em solo com e sem cobertura de palha na superfície e sombreamento de 50%. Santa Maria, RS, 2015.

Cobertura do solo	mff (g·folha ⁻¹)	msf (g·folha ⁻¹)	ALF (cm ² ·folha ⁻¹)	Cor da folha (°H)	
				Face adaxial	Face abaxial
Com palha	0,392 a*	0,1176 a	12,73 a	123,61 a A	121,02 a B
Sem palha	0,339 a	0,1017 a	10,61 b	121,37 b A	120,10 a A

*Médias com letras diferentes minúsculas na vertical e maiúsculas na horizontal diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

No tratamento com solo coberto com palha, a tonalidade (°H) e cor do limbo foliar diferiram estatisticamente entre as faces abaxial e adaxial, o que não aconteceu nas plantas que estavam em solo desnudo (Tabela 6). Na face adaxial da folha houve diferenças significativas de coloração entre os dois tratamentos de cobertura do solo, sendo maior no solo coberto, enquanto que na face abaxial não ocorreu diferença significativa, apenas valor numérico ligeiramente maior para o tratamento com solo coberto.

Nos tratamentos com cobertura vegetal morta do solo e sem cobertura, o ângulo hue (°H) ficou na ordem de 120-124°H. Considerando que os ângulos mais próximos de 180°H conferem coloração aproximada ao verde, esses valores medidos representam uma coloração verde-amarelada, sendo ligeiramente mais verde nas folhas onde havia cobertura morta sobre o solo. Não se espera que essa diferença seja decorrente de deficiência de nitrogênio, pois nos períodos chuvosos, foram realizadas adubações de 1 g N m⁻² em cobertura em todos os tratamentos.

A cobertura vegetal do solo tem como finalidade diminuir a evaporação, reduzir as variações de temperatura e a perda de calor do solo, bloqueando o frio, diminuindo o estresse pelo calor no sistema radicular e favorecem a liberação gradual de nutrientes (DANIEL, 2009). Com os dados obtidos no presente estudo, essa condição provavelmente deve ter corroborado para aumento da área do limbo foliar e incremento da coloração na tonalidade verde das folhas das plantas cultivadas sob tais condições. A menor tonalidade da cor verde observado em tal combinação deve-se à decomposição estrutural da clorofila. Esse processo é causado por mais de um fator dos que podem atuar em conjunto ou isoladamente, sendo estes a alteração do pH, a atividade de enzimas (clorofilase) e/ou a presença de sistemas oxidantes (STÖCKER; AZEVEDO; SILVA, 2010). A tonalidade da cor verde deprecia a aparência das plantas devido ao seu amarelecimento (Figura 2C e 2D) e do produto final.

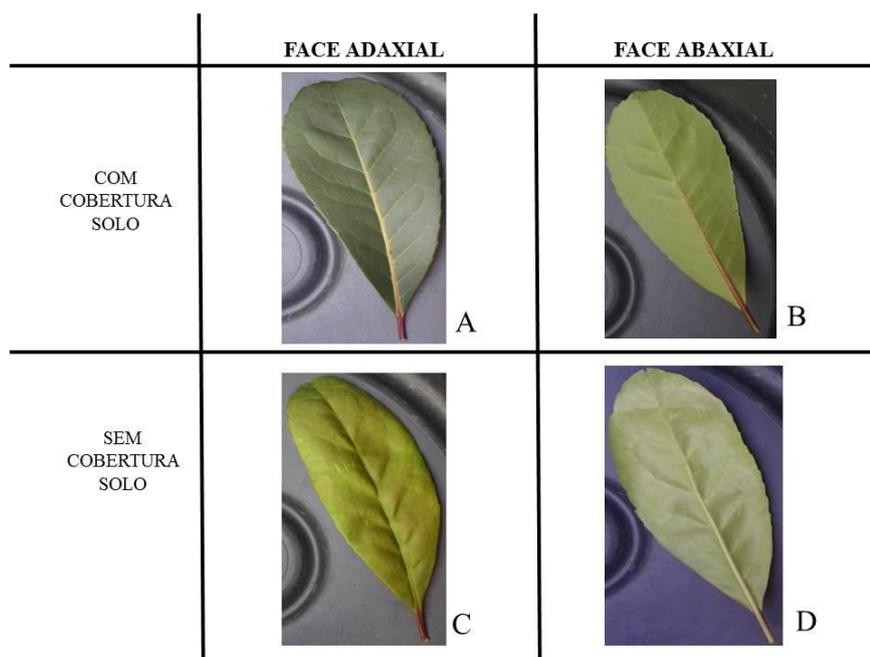


Figura 2 – Coloração das folhas de plantas jovens erva-mate em ambas as faces (adaxial e abaxial), realizado de 15 de janeiro de 2013. Santa Maria, RS, 2015.

O estudo da colorimetria permite verificar variações na cor dos vegetais que podem estar relacionados com o sistema de cultivo e condições micrometeorológicas às quais a cultura estava submetida, bem como da massa fresca e área foliar, que são parâmetros de crescimento dos vegetais (TAIZ; ZEIGER, 2009; LACHER, 2000). Conforme Cia et al. (2010) e Brackmann et al. (2012), que estudaram a diferença da cor em frutas, o parâmetro coloração é importante, pois é um método de quantificar e diferenciar qualidade e durabilidade das frutas. O mesmo conceito se aplica a erva-mate, pois a coloração da folha também é um importante parâmetro de qualidade do produto comercial, sendo muitas vezes determinante na compra do produto pelo consumidor.

Ainda cabe destacar que as plantas jovens recém-transplantadas de erva-mate devem ser conduzidas sob um sombreamento de 50 a 70% nos primeiros meses, além de serem expostas paulatinamente ao sol, até que com cerca de 15 cm de altura possam ficar a pleno sol (DANIEL, 2009; KASPARY, 1985). Isso se faz necessário, mesmo nas regiões agroclimáticas em que erva-mate ocorre naturalmente adaptada, por ser determinante na porcentagem de plantas que sobrevivem após o transplante, principalmente nos períodos mais críticos com maior densidade de fluxo de radiação solar, como na primavera e verão subsequentes. Desta forma, esta técnica promove um microclima mais favorável ao pegamento e ao crescimento das plantas nos primeiros anos, pois protege a planta de estresse abiótico e evitando o solo de superaquecimento.

Quanto às técnicas que visam à proteção de solo indicam-se recursos alternativos como serragem, resto de palhadas, etc. As condições de sombreamento da planta de erva-mate jovem e de cobertura do solo oferecem condições mais próximas das ideias de sua condição ecológica de origem, sendo adequada ao estabelecimento da espécie (LOURENÇO; MEDRADO, 1998; PES, 1995).

4.2.3 Resultados obtidos na segunda etapa do experimento 1

As análises da variância dos resultados das avaliações fenométricas da segunda etapa do experimento 1, que compreendeu um bifatorial com o fator cobertura de solo (coberto e desnudo) e fator percentual de sombreamento ($\approx 0, 18, 35$ e 50%) mostram que praticamente todas as variáveis apresentaram alguma diferença entre os tratamentos (Tabela 7). Também ocorreram respostas diferentes nas avaliações realizadas na estação do verão (novembro e dezembro de 2013) e no outono (março e abril de 2014). Cabe destacar que quando o fator cobertura do solo foi significativo às médias são apresentadas em separado e quando o fator sombreamento ou a interação entre cobertura do solo e sombreamento foram significativos os resultados são apresentados na forma gráfica.

A altura média das plantas submetidas a $\approx 0, 18, 35$ e 50% de sombreamento em solos cobertos e desnudos, na primeira avaliação de outono apresentou interação (Tabela 7, Figura 3a). A maior diferença foi verificada entre o tratamento com 50% de sombreamento com solo coberto ($h = 57,25$ cm) e o tratamento com solo desnudo a pleno sol, no qual as plantas de erva-mate tiveram praticamente a metade da altura média (Figura 3a). Para solos cobertos e desnudos ajustaram-se modelos matemáticos lineares (Figura 3).

Verifica-se que no tratamento com solo coberto e sombreamento de 50% a altura de plantas foi maior, demonstrando que o sombreamento aliado à cobertura do solo é mais eficiente para o estabelecimento e crescimento das plantas jovens de erva-mate. Isso está em concordância com Kaspary (1985) utilizando plantas a campo e com Fossati (1997), Gliessmann (2000) e Mazuchowski (2004), trabalhando com mudas de erva mate em viveiro, que afirmam que o sombreamento mais eficaz é de 50 a 70% . Os resultados obtidos também estão de acordo com os resultados obtidos mais recentemente por Caron et al. (2014a, b) em plantas adultas de erva-mate em consórcio com *Pinus elliottii*.

Tabela 7 – Análise da variância (ANOVA) na 2ª etapa do Experimento 1 (cobertura do solo x sombreamento), sendo 1ª e 2ª avaliação de verão (novembro e dezembro/2013) e 1ª e 2ª avaliação outono (março e abril/2014) que se compôs em um bifatorial com fator (A) cobertura do solo (coberto com palha e desnudo) e fator (D) sombreamento ($\approx 0, 18, 35$ e 50%) com 4 repetições.

Variável	Avaliação	Fator (A) Cob. Solo	Fator (D) Somb.	Interação (A x D)	Erro	CV ⁴ %	Média geral	
Nº de folhas	1ª Ver.	QME	0,0193	0,0036	0,0268	0,0197	7,86	64,32
		Pvalor	0,3310	0,9060	0,2780	-		
	2ª Ver.	QME	0,1007	0,0606	0,0524	0,0384	10,07	99,04
		Pvalor	0,1180	0,2200	0,2770	-		
	1ª Out.	QME	0,1288	0,0229	0,0162	0,0073	5,26	44,27
		Pvalor	0,0000*	0,0449*	0,1130	-		
2ª Out.	QME	0,1519	0,0051	0,0315	0,0355	9,25	118,94	
	Pvalor	0,0490*	0,9320	0,4610	-			
Altura de planta	1ª Ver.	QME	0,1231	0,0240	0,0074	0,0102	6,34	41,10
		Pvalor	0,0020*	0,097*	0,5440	-		
	2ª Ver.	QME	0,0696	0,0230	0,0017	0,0082	5,42	49,36
		Pvalor	0,0070*	0,062*	0,1370	-		
	1ª Out.	QME	0,0810	0,0297	0,0130	0,0049	4,29	44,15
		Pvalor	0,0000*	0,0030*	0,071*	-		
2ª Out.	QME	0,0756	0,0098	0,0561	0,0398	10,11	103,44	
	Pvalor	0,1800	0,9600	0,2640	-			
Nº de ramos	1ª Ver.	QME	0,0314	0,0156	0,0295	0,0182	18,04	5,88
		Pvalor	0,2100	0,4750	0,2100	-		
	2ª Ver.	QME	0,1390	0,3940	0,1490	-	21,72	10,96
		Pvalor	0,2101	0,0006	0,0462	0,0320	18,73	9,96
	1ª Out.	QME	0,0170*	0,9950	0,2540	-	24,36	11,35
		Pvalor	0,0543	0,0362	0,0681	0,0556		
2ª Out.	QME	0,2310	0,5910	0,3250	-	13,29	69,62	
	Pvalor	0,1421	0,2260	0,2230	0,0564			
Compr. Ramos	1ª Ver.	QME	0,1250	0,7530	0,7560	-	14,05	127,94
		Pvalor	0,2123	0,0596	0,9750	0,0807		
	2ª Ver.	QME	0,1170	0,5390	0,3270	-	14,57	143,16
		Pvalor	0,3043	0,0072*	0,1623	0,0902		
	1ª Out.	QME	0,078*	0,9700	0,1740	-	13,90	142,89
		Pvalor	0,4020	0,0171	0,1527	0,0818		
2ª Out.	QME	0,036*	0,8890	0,1620	-	14,47	4,44	
	Pvalor	0,0957	0,0155	0,0232	0,0084			
Nº de brotos	1ª Ver.	QME	0,0020*	0,1650	0,063*	-	18,75	15,93
		Pvalor	0,0687	0,0258	0,0572	0,0464		
	2ª Ver.	QME	0,2350	0,6490	0,3190	-	27,70	5,44
		Pvalor	0,0823	0,0146	0,0323	0,0375		
	1ª Out.	QME	0,1510	0,7600	0,4700	-	29,08	2,56
		Pvalor	0,0127	0,1245	0,2721	0,1549		
2ª Out.	QME	0,7760	0,5040	0,1820	-	36,26	5,70	
	Pvalor	0,1174	0,1690	0,1379	0,0899			
ms' caule	Ver.	QME	0,2640	0,1600	0,2370	-	36,15	7,61
	Out.	QME	0,4441	0,1080	0,2128	0,1087	21,01	17,51
ms folha	Ver.	Pvalor	0,0540*	0,0412*	0,1470	-		
	Out.	QME	0,1517	0,1329	0,0937	0,0603		
ms total	Ver.	Pvalor	0,1250	0,1330	0,2260	-	26,82	69,77
	Out.	QME	0,1012	0,1603	0,0857	0,0869		
AFt ²	Ver.	Pvalor	0,2913	0,1663	0,4163	-	19,94	23,22
	Out.	QME	0,1419	0,1409	0,1030	0,0656		
Abert. est. ³	Ver.	Pvalor	0,1540	0,1200	0,2200	-	22,92	24,27
	Out.	QME	0,1670	0,1435	0,1155	0,0861		
Abert. est. ³	Ver.	Pvalor	0,1760	0,2000	0,2840	-	21,30	0,14
	Out.	QME	0,1807	0,2499	0,2176	0,0393		
Abert. est. ³	Ver.	Pvalor	0,0420*	0,0020*	0,0040*	-	30,71	0,14
	Out.	QME	0,0172	0,0959	0,1025	0,0825		
Abert. est. ³	Ver.	Pvalor	0,6520	0,3440	0,3160	-	1,37	114,10
	Out.	QME	0,0080	0,0236	0,0031	0,0007		
Abert. est. ³	Ver.	Pvalor	0,3120	0,0000*	0,0200*	-	1,22	105,78
	Out.	QME	0,0026	0,0092	0,0018	0,0006		
Abert. est. ³	Ver.	Pvalor	0,0450*	0,0000*	0,0470*	-		
	Out.	QME						

* probabilidade do erro de 0,10; ¹ massa seca (ms); ² Área foliar total (Aft); ³ Abertura estomáticas (Abert. Est.) e

⁴ Coeficiente de variação (CV)

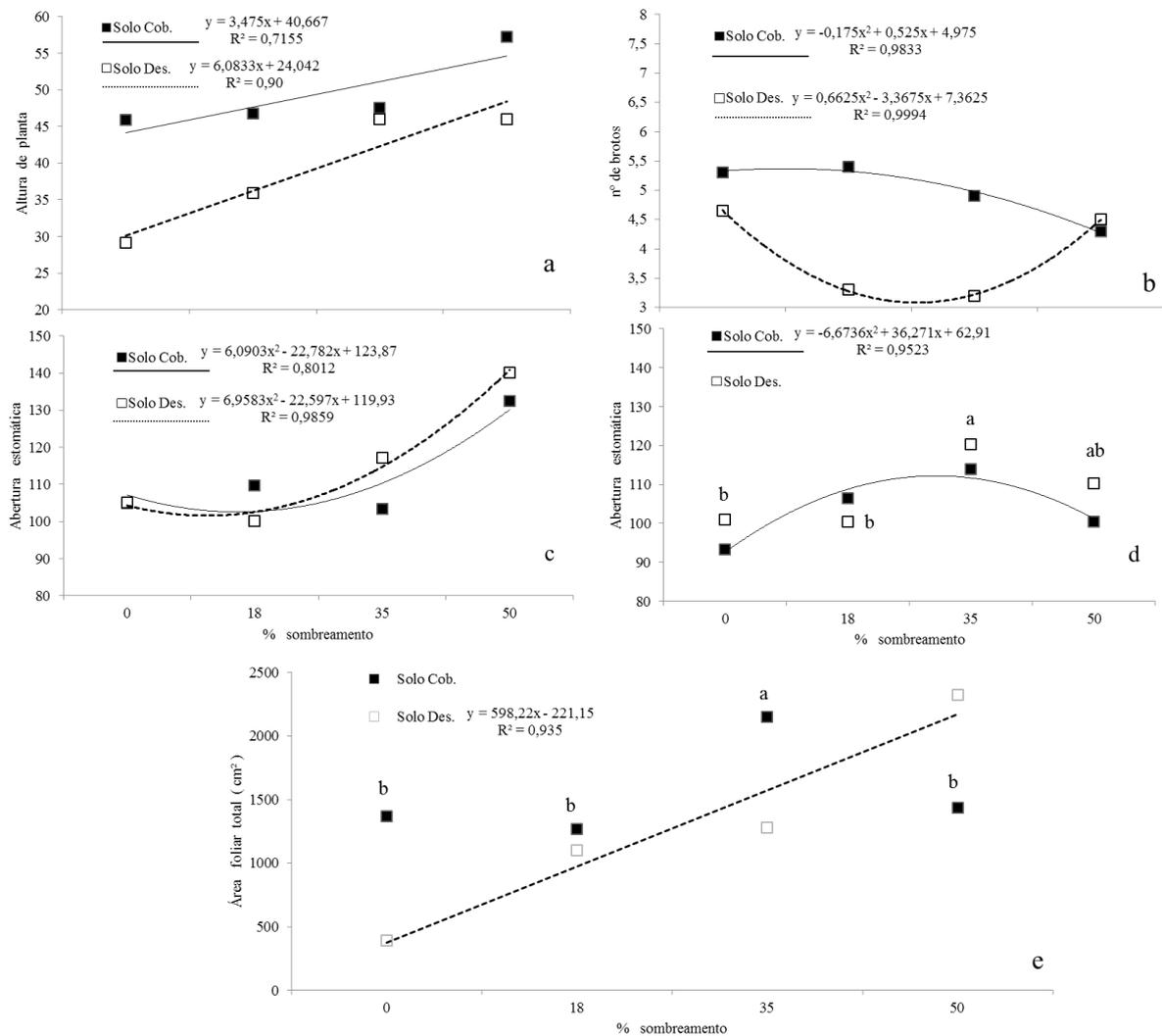


Figura 3 – Interação entre o fator cobertura de solo (coberto e desnudo) e sombreamento (≈0, 18, 35 e 50%) em plantas jovens de erva-mate, sendo (a) altura de planta (cm) para o outono em março de 2014, (b) número de brotos para verão em dezembro de 2013, (c) abertura estomática para estação do verão 2013, (d) abertura estomática para o outono de 2014, (e) área foliar total (cm²) no verão de 2013, (■) solo coberto com palha, (□) solo desnudo e as letras minúsculas demonstram diferenças entre as médias com Teste de Tukey (p<0,05). Santa Maria, RS, 2015.

O número de brotos (Figura 3b) também teve interação entre os fatores sombreamento ≈0, 18, 35 e 50% nos solos cobertos e desnudos, na segunda avaliação de verão em dezembro de 2013. Em solos cobertos, o número de brotos foi maior do que em solos desnudos, principalmente nos sombreamentos intermediários, havendo tendência do modelo de pequena redução no maior sombreamento, mas nos solos desnudos o sombreamento de 50% foi o mais eficiente na emissão de brotos (Figura 3b).

O número de brotos é um importante indicativo do crescimento e adaptabilidade das erva-mates, sendo que o sombreamento de 50 e 70% favorece o desenvolvimento de novos

brotos e seu ganho em biomassa. Já em plantas expostas a pleno sol há incremento do sistema radicular e diminuição da biomassa aérea e brotos (KASPARY, 1985; FOSSATI, 1997; GLIESSMANN, 2000; VUADEN, 2009).

A abertura estomática nas folhas de erva-mate apresentou interação entre os fatores cobertura do solo (coberto e desnudo) e sombreamento ($\approx 0, 18, 35$ e 50%) nas avaliações de verão e outono (Tabela 7, Figura 3c, 3d). Na avaliação de verão, ao observar a abertura dos estômatos da face abaxial das folhas de erva-mate, através da microscopia com aumento de 400 vezes, verificou-se que o número de estômatos abertos (EA) variou de $100 \text{ EA } \mu\text{m}^{-2}$ nos tratamentos a pleno sol ($\approx 0\%$ de sombreamento) até valores superiores a $130 \text{ EA } \mu\text{m}^{-2}$ com sombreamento de 50% (Figura 3c). A interação dos fatores cobertura de solo com palha e grau de sombreamento é representada por modelos quadráticos para solos cobertos e desnudos, ambos com coeficientes de determinação maiores que $0,80$, sendo que o maior número de estômatos abertos foi verificado sob sombreamento de 50% (Figura 3c).

Na avaliação de outono, também houve interação entre os fatores cobertura do solo e sombreamento (Figura 3d). A resposta ao sombreamento nos tratamentos com solo coberto é representada por um modelo quadrático com ponto de máxima próximo a 30% de sombreamento ($R^2 = 0,95$), mostrando que o sombreamento de 50% tende a diminuir a abertura estomática. Assim, dentre os tratamentos testados, a máxima eficiência foi observada com solo coberto e sombreamento de 35% com cerca de $115 \text{ EA } \mu\text{m}^{-2}$ (Figura 3d). Em solo desnudo não houve ajuste de modelo matemático, sendo apresentadas as diferenças de médias pelo teste de Tukey a 5% , em que o tratamento com maior abertura estomática foi no sombreamento de 35% com $120 \text{ EA } \mu\text{m}^{-2}$ (Figura 3d).

Na epiderme da folha, os estômatos podem ocorrer em ambos os lados, ou seja, nas faces adaxial e abaxial (RAVEN et al., 2007). Na grande maioria dos vegetais C_3 , os estômatos estão sempre acompanhados por células anexas que são identificadas pelo formato ou pela constância em número (ESAU, 1974). Na erva-mate, foi observado que os estômatos ocorrem predominantemente apenas na face abaxial, porém há relatos de alguns pesquisadores nos quais essa estrutura também aparece na face adaxial (RAKOCEVIC et al., 2012). A predominância dos estômatos na face abaxial aparentemente permite que a perda de água pela transpiração seja minimizada (SMITH et al., 1997).

Conforme descrição de Valduga (1994), Mariath et al. (1995) e Rakocevic et al. (2012), a erva-mate só apresenta estômatos na face abaxial, sendo a densidade de estômatos de diferentes tamanhos influenciada pelas condições ambientais de exposição a estresses. Rakocevic et al. (2012) descrevem que a espécie *I. paraguariensis* tem a capacidade de

proteção dos estômatos da forte radiação solar, pois estão na face abaxial da folha, o que é confirmado pelos dados do experimento aqui desenvolvido com plantas jovens, pois a abertura de estômatos foi maior para o sombreamento de 35% no outono, denotando que o sombreamento de 50% determina redução devido a radiação solar insuficiente, enquanto que no verão tende ser maior com 50% de sombreamento visto que a incidência de radiação solar nesta época é maior e, devido a irrigação complementar, nessa condição de sombreamento não se espera estresse hídrico.

A área foliar total (AF_T) por planta de erva-mate apresentou interação entre os fatores cobertura do solo (coberto e desnudo) e sombreamento (0, 18, 35 e 50%) na avaliação de verão (Figura 3e).

No tratamento com cobertura do solo com palha, o sombreamento de 35% apresentou o maior incremento da AF_T apresentando média superior a 2.000 cm² por planta, não havendo ajuste de um modelo de regressão aos dados. Já para a AF_T , obtida para os tratamentos com solos desnudos, obteve-se ajuste de um modelo linear em que as plantas apresentam média de a AF_T crescente de 450 cm² em pleno sol até 2.025 cm² sob sombreamento de 50%. Assim, para as condições de Santa Maria, RS, pode-se deduzir que qualquer sombreamento igual ou superior a 18% até pelo menos 50% no verão resulta em maior AF_T em erva-mate jovens, sendo esta uma prática fundamental no primeiro ano de cultivo (Figura 3e).

Em seus estudos Kaspary (1985) observou valores superiores de área foliar de plantas jovens sob diferentes condições de sombreamento, sendo que nos sombreamentos menores (10-30%) houve certa redução e a pleno sol as plantas jovens apresentaram a menor área foliar total. Ferreira (1994) observou valor máximo de área foliar em sombreamentos de 60 a 80%. Rachwal et al. (1998) discorre em seu trabalho sobre o decréscimo da área foliar em erva-mate nos tratamentos a pleno sol e sombreamento de 25%. Foltran (2004) trabalhando com mudas de erva-mate em viveiro também observou aumento de área foliar total nas erva-mate com sombreamento de 50 a 70 %. Porém, conforme Caron et al. (2014a) em erva-mate adultos solteiros expostos ao sol a área foliar é maior do que em cultivos agroflorestais com *P. elliotti*.

Assim, os resultados aqui obtidos confrontados com os de outros autores, indicam que na fase juvenil as erva-mate são mais suscetíveis à radiação solar direta, por consequente aumento de temperatura do ar e da folha, fazendo com que no tecido jovem, ainda em crescimento, provavelmente ocorra estresse.

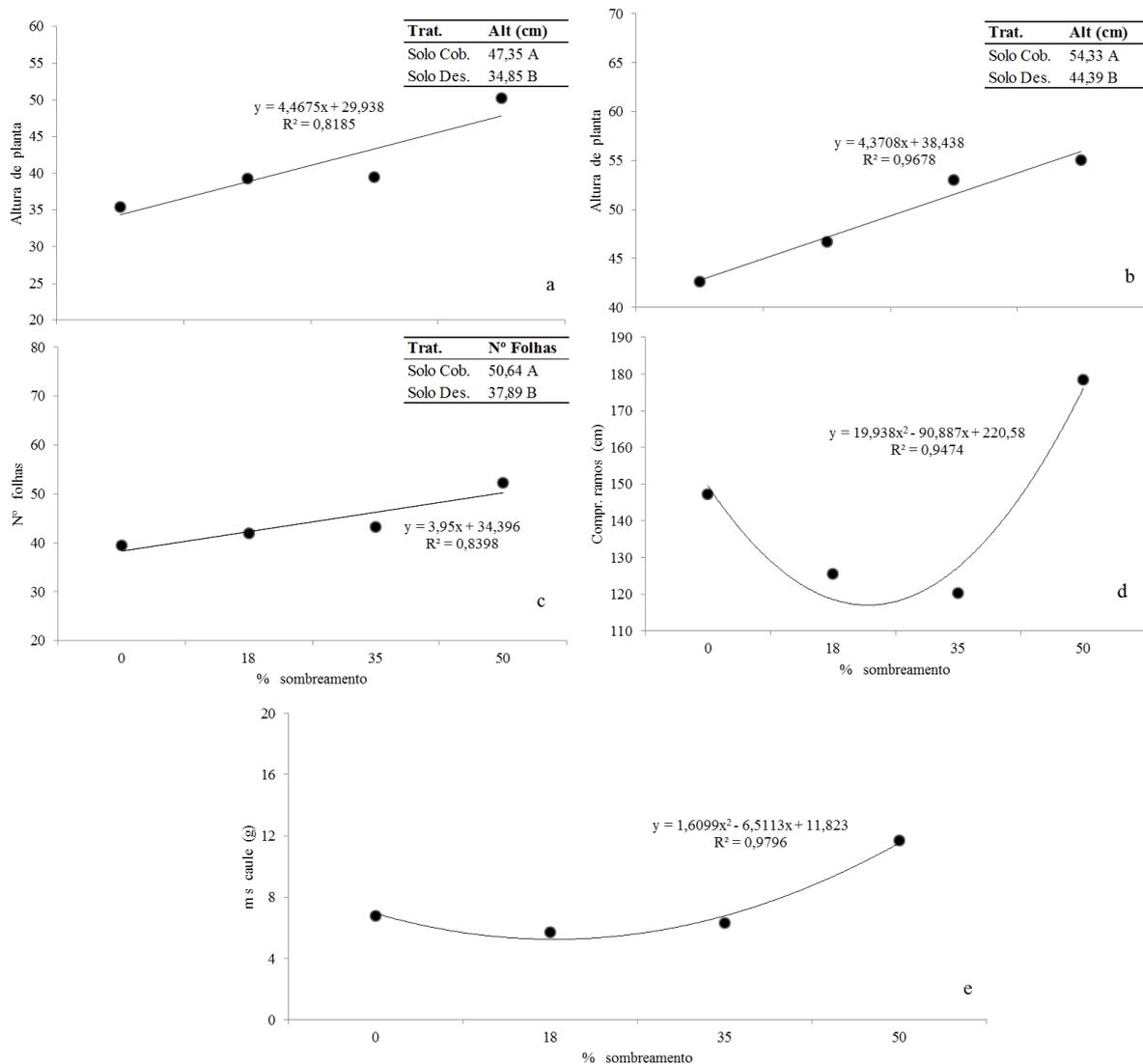


Figura 4 – Variáveis fenométricas em plantas jovens de erva-mate submetidas ao fator cobertura do solo (coberto e desnudo) e sombreamento (0, 18, 35 e 50%), mostrando que diferença entre os tratamentos de sombreamento, sendo: (a) altura de (cm) para avaliação de novembro de 2013 com tabela mostrando diferença entre solos coberto e desnudo, (b) altura de planta (cm) para avaliação de dezembro de 2013 com tabela mostrando diferença entre solos coberto e desnudo, (c) Número de folhas para avaliação de março de 2014 com tabela mostrando diferença entre solos coberto e desnudo, (e) comprimento de ramos (cm) para avaliação de dezembro de 2013 e (e) massa caule ou hastes (g) na avaliação de outono em abril de 2014. Santa Maria, RS, 2015.

Para o número de folhas o fator sombreamento foi significativo na 1ª avaliação de outono em março/2014 (Tabela 7), sendo o maior número de folhas obtido com o maior sombreamento (Figura 4c), com modelo matemático linear ($R^2=0,84$). O número de folhas no tratamento com 50% de sombreamento é de 52 folhas e de 39 folhas no tratamento a pleno sol. Também, verifica-se que o número de folhas é de 50,6 folhas nos tratamentos com solo coberto e 37,9 folhas nos tratamentos com solo desnudo, demonstrando que o número de

folhas no fator cobertura do solo diferiu significativamente pelo teste F (Tabela 7). Portanto, fica evidenciada a importância da cobertura de solo e do sombreamento para o aumento do número de folhas nas plantas jovens de erva-mate, assim como descrevem Lourenço e Medrado (1998) e Daniel (2009), o que ratifica os resultados obtidos na primeira etapa desse Experimento 1.

Conforme Kaspary (1985) e Caron et al. (2014a, b), o número de folhas tende a aumentar com a utilização do sombreamento adequado. Porém, Gliessmann (2000) afirma que o aumento do número de folhas da erva-mate pode ser severamente limitado quando em condições de sombreamento excessivo, o que não foi observado no presente estudo mesmo no período com menor radiação analisado (outono) e sob o sombreamento de 50%.

Destaca-se também que o número de folhas, bem como sua forma anatômica, influencia diretamente na atividade fotossintética e conseqüentemente no crescimento e desenvolvimento das plantas (TAIZ; ZEIGER, 2013; LACHER, 2000). Como na erva-mate o produto de consumo é propriamente a folha da planta, um maior número de folhas e com boa qualidade é garantia de aumento de produção por área (FOSSATI, 1997; DANIEL, 2009).

Nas condições estudadas da estação do outono, o sombreamento de 50% promoveu um aumento significativo (Figura 4c), enquanto no verão percebe-se certa tendência no mesmo sentido, porém não há diferenças significativas pelo teste F ($p = 0,11$ a $0,28$) (Tabela 7).

Com relação à altura das plantas de erva-mate nas avaliações de verão, o fator cobertura do solo foi significativo pelo teste F a 5% para as avaliações de novembro e dezembro de 2013. Na primeira avaliação em novembro de 2013, as plantas estabelecidas em solo com cobertura vegetal morta apresentaram maior crescimento em altura com média de 47,4 cm e em solo desnudo obteve-se média de 35,8 cm (Figura 4a). Na segunda avaliação, em dezembro de 2013, observou-se novamente a altura das plantas significativamente maior (+ 22,7%) para o solo coberto com palha em relação ao solo desnudo (Figura 4b). Os resultados evidenciam que provavelmente ocorre uma condição mais favorável ao crescimento inicial das plantas jovens de erva-mate no período do verão nos solos com cobertura de palha, mas essa melhor condição tende a se equilibrar ao longo do outono, pois na segunda avaliação do outono a diferença já não foi significativa. Portanto, pode-se inferir que a cobertura de palha e outros restos vegetais na superfície do solo, auxilia a superar o provável efeito negativo de um estresse térmico no período mais quente do ano sobre o crescimento em altura de plantas jovens de erva-mate.

Conforme Lourenço e Medrado (1998), Mazuchowski (2004) e Daniel (2009), a cobertura do solo é importante para o cultivo de erva-mate, pois é um facilitador de liberação gradual de nitrogênio, estando relacionado ao crescimento em altura da planta.

A altura média das plantas submetidas a ≈ 0 , 18, 35 e 50% de sombreamento em solos cobertos e desnudos, na primeira (Figura 4a) e segunda avaliação de verão (Figura 4b) apresentaram diferenças significativas para sombreamento (Tabela 7). A maior diferença foi verificada entre o tratamento com 50% de sombreamento e o tratamento a pleno sol. Os resultados obtidos, representados modelos lineares (Figura 4a, 4b), são concordantes com os de Kaspary (1985), utilizando plantas a campo, e com os de Fossati (1997), Gliessmann (2000) e Mazuchowski (2004), trabalhando com mudas de erva mate em viveiro, que afirmam que o sombreamento mais eficaz é de 50 a 70%. Os resultados obtidos também estão de acordo com os resultados obtidos mais recentemente por Caron et al. (2014a, b) em plantas adultas de erva-mate em consórcio com *Pinus elliottii*.

O teste F também foi significativo para o fator cobertura do solo para o número de ramos na avaliação de março de 2014, sendo a média do número de ramos de 12 para o tratamento de cobertura do solo com palha e de 8 ramos para solo desnudo. Na segunda avaliação de outono (abril de 2014), o número de ramos ainda se manteve maior em solo coberto com palha, enquanto a soma do comprimento dos ramos passou também a ser significativamente maior (81%) para solos cobertos (184,6 cm) em relação à média para as ervaíras em solo desnudo (Tabela 7).

Os graus de sombreamento de 35 e 50% apresentaram-se eficazes para o estímulo do crescimento dos ramos novos, mesmo não havendo diferenças significativas. Uma ramificação numerosa das ervaíras garante um crescimento e um ganho em área foliar e, conseqüentemente um maior potencial de produção de fotoassimilados para todas as necessidades metabólicas relacionadas ao desenvolvimento e crescimento inicial da planta.

Segundo Kaspary (1985), Reissmann et al. (1985), Fossati (1997), Rachwal (2002) e Mazuchowski (2004), as partes colhidas da ervaíra são suas folhas e ramos do ano e, portanto, um maior número de ramos resulta em maior produção.

O comprimento dos ramos (CR) foi significativo entre os tratamentos de sombreamento 0, 18, 35 e 50% (Tabela 7, Figura 4d). O sombreamento de 50% apresentou maior crescimento dos ramos na avaliação de dezembro de 2013, com média de 180 cm de CR, enquanto que nos tratamentos a pleno sol, com cerca de 150 cm, foi menor (Figura 4d). O número e comprimento dos ramos são de grande importância para as ervaíras, pois representam um dos aspectos de maior interesse na área produtiva (RACHWAL, 2002). Tanto

a cobertura do solo com palha, quanto o sombreamento de em torno dos 50%, também considerado adequado por outros autores, são importantes para obtenção de ramos de qualidade e aumento na produção (FOSSATI, 1997; VIEIRA et al., 2004; DANIEL, 2009).

O número de brotos novos nas erveiras foi significativo para cobertura de solo pelo teste F a 5% na primeira avaliação de verão em novembro de 2014 (Tabela 7), sendo que os tratamentos com solo coberto com palha apresentaram a média de cinco brotos e com solo desnudo apenas três. Portanto, em qualquer das duas épocas do ano o número de brotos novos é favorecido pela cobertura de palha, mas no verão ele é bem menor. O número de brotos é um importante indicativo do crescimento e adaptabilidade das erveiras, sendo que o sombreamento em nível de 50 e 70% favorece o desenvolvimento de novos brotos e seu ganho em biomassa, já em plantas expostas a pleno sol há incremento do sistema radicular e diminuição da biomassa aérea e brotos (KASPARY, 1985; FOSSATI, 1997; GLIESSMANN; 2000; VUADEN, 2009).

Quanto à massa das hastes houve diferença significativa apenas em nível de 10% erro (Tabela 7) para o fator cobertura do solo na avaliação de outono, sendo aproximadamente o dobro nos tratamentos com cobertura de solo em relação aos tratamentos com solos desnudos. A média da massa seca das hastes da parte aérea, na estação do outono, com 50% de sombreamento das plantas foi de 12g e na condição oposta, a pleno sol de apenas a metade (Figura 4e). Para os sombreamentos de ≈ 0 , 18, 35 e 50% com solo coberto, obteve ajuste de um modelo com tendência quadrática ($R^2=0,97$), mas nos níveis intermediários de sombreamento (18 e 35%) a cobertura do solo não melhorou o acúmulo de massa seca (Figura 4e).

A massa seca da parte aérea, mais precisamente dos ramos finos e das folhas, é um importante parâmetro de produção comercial das erveiras (FOSSATI, 1997; DANIEL, 2009). Ao analisar a Figura 4e, observa-se que o maior sombreamento (50%) promoveu maior incremento de massa, o que está de acordo com os estudos de Kaspary (1985), que evidenciam que sombreamentos de 40% em plantas jovens de erva-mate incrementam a biomassa seca, o que não aconteceu a pleno sol.

O mesmo efeito positivo do sombreamento das plantas no acúmulo de biomassa seca, tanto nas folhas como nas hastes, também foi exposto em outros trabalhos, como os de Catapan (1998), Rachwal (2002), Foltran (2004), Viera et al. (2004) Mazuchowski (2004), Mazuchowski (2007), Vuaden (2009), Rossa (2013) e Caron et al. (2014a e b). O que é realçado no presente trabalho são os resultados micrometeorológicos, que demonstram a tendência de atenuação da temperatura da nervura da folha com uso de tela de sombreamento,

o que provavelmente proporcionou menos estresse às plantas jovens de erva-mate, principalmente na época do verão, quando a demanda atmosférica é maior. O menor estresse no verão se realça nos resultados nas avaliações de outono, quando se obteve maior número de folhas, altura de planta, número e comprimento de ramos e número de brotos novos para os tratamentos com maior sombreamento.

As análises da variância (ANOVA) para as avaliações fenométricas (massa foliar fresca, massa foliar seca e área do limbo foliar) e colorimétricas (luminosidade “L” e ângulo H “°H”, ambas das faces adaxial e abaxial das folhas) apresentaram significância para todas as variáveis na época do verão (Tabela 8). Para a época de outono não houve diferenças, mas com relação ao fator sombreamento os valores de probabilidade de erro variaram entre 0,11 e 0,13, portanto, bastante próximos de $p < 0,10$.

Tabela 8 – Análise da variância (ANOVA) para os resultados da fenometria e colorimetria da 3ª, 4ª e 5ª folhas abaixo do ápice principal obtidos na 2ª etapa do Experimento 1, composto em um bifatorial com fator (A) cobertura do solo (coberto e desnudo) e fator (D) sombreamento (≈0, 18, 35 e 50%) com 4 repetições, avaliado no verão (dezembro/2013) e no outono (abril/2014), em Santa Maria, RS.

Variável	Avaliação	Fator (A) Cob. Solo	Fator (D) Somb.	Interação (A x D)	Erro	CV ⁶ %	Média geral
mf ¹ (g)	Ver.	QME <i>Pvalor</i>	0,0000 0,095*	0,1414 0,0000*	0,1321 0,0182*	0,0147 -	0,67
	Out.	QME <i>Pvalor</i>	0,0015 0,8640	0,3770 0,1120	0,0642 0,3063	- 0,0504	33,19 34,19
ms ² (g)	Ver.	QME <i>Pvalor</i>	0,0034 0,6740	0,1091 0,0040*	0,3170 0,0239*	0,0193 -	0,25
	Out.	QME <i>Pvalor</i>	0,0034 0,6740	0,1091 0,1420	0,0239 0,3160	0,0183 -	22,30 20,30
A. F ³ (cm ²)	Ver.	QME <i>Pvalor</i>	0,0020 0,8760	0,0975 0,1140	0,3161 0,0000*	0,0092 -	18,74
	Out.	QME <i>Pvalor</i>	0,0002 0,8760	0,0975 0,1201	0,0114 0,3210	0,0092 -	7,70 6,70
L ⁴ (adaxial)	Ver.	QME <i>Pvalor</i>	0,0000 0,9800	0,0254 0,0010*	0,3210 0,0023*	0,0023 -	53,47
	Out.	QME <i>Pvalor</i>	0,0000 0,9080	0,0020 0,1103	0,0000 0,4120	0,0001 -	2,81 2,88
H ⁵ (adaxial)	Ver.	QME <i>Pvalor</i>	0,7540 0,0000	0,0000* 0,0020	0,4980 0,0001	- 0,0001	122,65
	Out.	QME <i>Pvalor</i>	0,7540 0,7540	0,1322 0,4980	0,4980 -	- -	0,42 121,74
L (abaxial)	Ver.	QME <i>Pvalor</i>	0,0008 0,3920	0,0108 0,0000*	0,0006 0,6630	0,0011 -	62,69
	Out.	QME <i>Pvalor</i>	0,0008 0,3920	0,0108 0,1191	0,0006 0,6630	0,0011 -	1,88 1,65
H ⁵ (abaxial)	Ver.	QME <i>Pvalor</i>	0,0000 0,8840	0,0006 0,3500	0,0000 0,0000*	0,0000 -	120,03
	Out.	QME <i>Pvalor</i>	0,0000 0,8840	0,0006 0,1238	0,0000 0,3550	0,0000 0,0000	0,32 0,29

* probabilidade do erro de 0,10; ¹ massa fresca (mf); ² massa seca (ms); ³ Área foliar (A.F); ⁴ Luminosidade (L); ⁵ Ângulo de tonalidade HUE (°H) e ⁶ Coeficiente de Variação (CV)

Com relação à análise fenométrica da massa fresca das folhas (g folha^{-1}) de erva-mate (Figura 5a, 5b), dentre os tratamentos com cobertura de palha no solo, nas avaliações de verão com sombreamento de 35% obteve-se média $0,9 \text{ g folha}^{-1}$, no tratamento com solo desnudo 50% de sombreamento a média foi $1,1 \text{ g folha}^{-1}$. Na interação observa-se que, em solo coberto ajustou-se um modelo quadrático aos dados, e para os sombreamentos em solo desnudo a tendência foi descrita por uma regressão linear (Figura 5a). Esse resultado está de acordo com Rachwal et al. (1998) e Vieira et al. (2004), que demonstraram que o sombreamento de 30% resulta em maior massa fresca nas erveiras adultas, embora no atual experimento os dados foram obtidos com erveiras jovens.

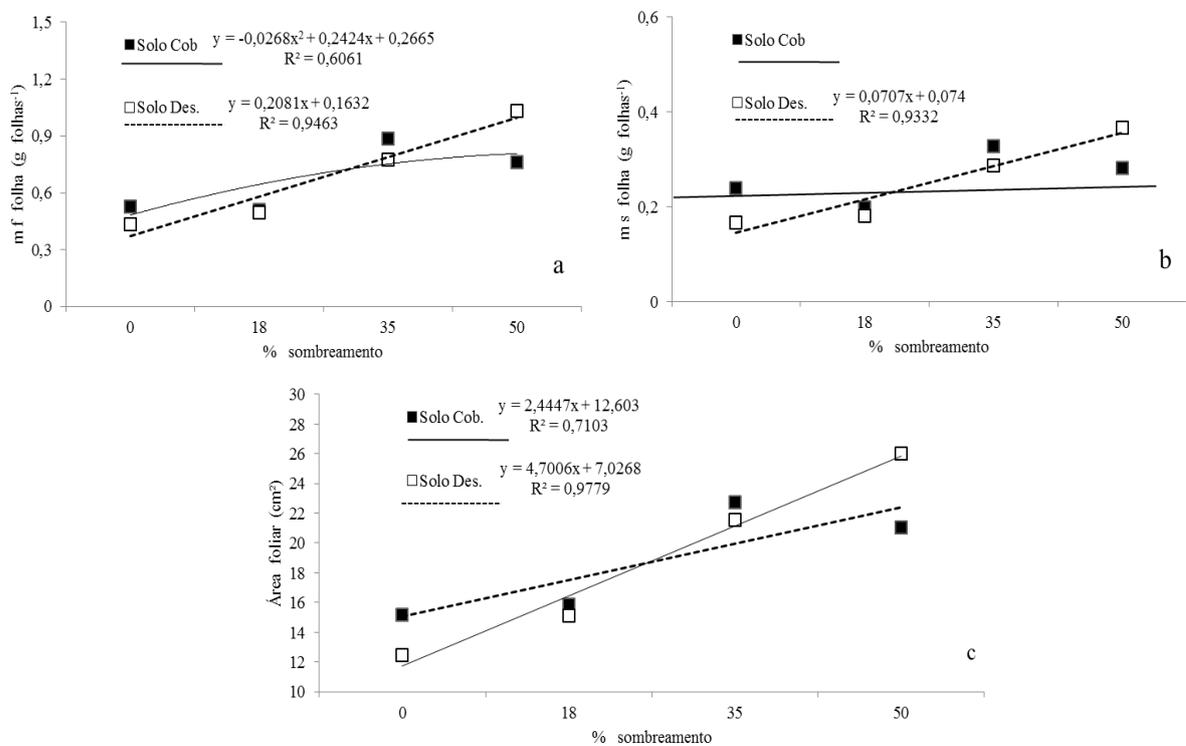


Figura 5 – Interação entre o fator cobertura do solo (coberto e desnudo) e o fator sombreamento (0, 18, 35 e 50%), sendo mf a massa fresca (a), ms a massa seca (b) e área foliar a superfície do limbo foliar (c) das três folhas apicais desenvolvidas da haste principal de plantas jovens de erva-mate (3^a, 4^a e 5^a folhas abaixo do ápice). (■) médias por sombreamento para solo coberto com palha e (□) médias por sombreamento para solo desnudo. Santa Maria, RS, 2015.

Na avaliação de verão da massa seca das folhas (g folha^{-1}) de erva-mate, a interação entre cobertura de solo e sombreamentos (0, 18, 34 e 50%) mostrou-se significativa pelo teste F a 5% (Tabela 8 e Figura 5b). O tratamento com solo coberto e sombreamento 50% apresentou a maior média ($0,35 \text{ g folha}^{-1}$), não havendo ajuste de um modelo matemático aos

dados (Figura 10b). Já para o solo desnudo, foi possível representar a relação da massa seca das folhas em função do sombreamento por um modelo linear (Figura 5b).

Considerando todos os resultados referentes à variável massa seca foliar das plantas jovens de erva-mate, esta tendeu a ser crescente com o aumento do sombreamento até os 50% no experimento 1. O mesmo foi observado em outros trabalhos com erva-mate por Kaspary (1985); Catapan (1998); Foltran (2004); Mazuchowski (2004); Mazuchowski; Silva; Júnior (2007) e Vuaden (2009) e em plantas adultas por Rachwal (2002), Viera et al. (2004), Rossa (2013) e Caron et al. (2014a e b).

Na análise da área do limbo foliar (cm^2) das folhas de erva-mate para estação do verão (Figura 5c) houve interação entre o fator cobertura do solo e sombreamento (Tabela 8). Em ambas as condições de cobertura do solo o aumento do sombreamento resultou em aumento linear da área do limbo foliar, sendo o aumento mais acentuado em solo desnudo.

A AF foi crescente até o sombreamento de 50%, quando alcançou valor de 26 cm^2 . Modelo similar ao alcançado com 35% de sombreamento sobre solo coberto com palha e 127% maior em relação ao tratamento a pleno sol sem palha (Figura 5c). Esses resultados são concordantes com os de Kaspary (1985) e Foltran (2004), que mostraram que o sombreamento favorece o incremento de área foliar em erva-mate. Isso comprova que as espécies climácias com metabolismo C_3 são favorecidas com aumento de massa e da área foliar pelo sombreamento, que permite que o metabolismo fisiológico seja maximizado pela não incidência direta da radiação solar e atenuação da temperatura do ar e das folhas (LARCHER, 2004; TAIZ; ZEIGER, 2013).

A análise colorimétrica, que compreendeu a análise da luminosidade (L) e o ângulo de tonalidade HUE ($^\circ\text{H}$) nas faces adaxial e abaxial da lâmina foliar, gerou resultados de respostas significativas como função da variação do grau de sombreamento das plantas jovens de erva-mate, nas duas condições de cobertura do solo (Tabela 8, Figura 6).

A média da luminosidade (L) na face adaxial, na avaliação do verão de 2013, apresentou variação inversa em relação aos níveis de sombreamento (Figura 6a), mostrando que a luminosidade tende a diminuir, isto é, a folha tende a ser mais escura, com aumento do percentual de sombreamento. Portanto, o aumento do sombreamento proporciona diminuição da luminosidade na face adaxial, resultando em folhas mais escuras. Nesta avaliação de dezembro de 2013 ocorreu interação dos fatores cobertura do solo e sombreamento, sendo que para ambas as coberturas de solo (coberto e desnudo) são apresentadas regressões lineares com tendência inversa e com $R^2 \geq 0,86$ (Tabela 8; Figura 6a).

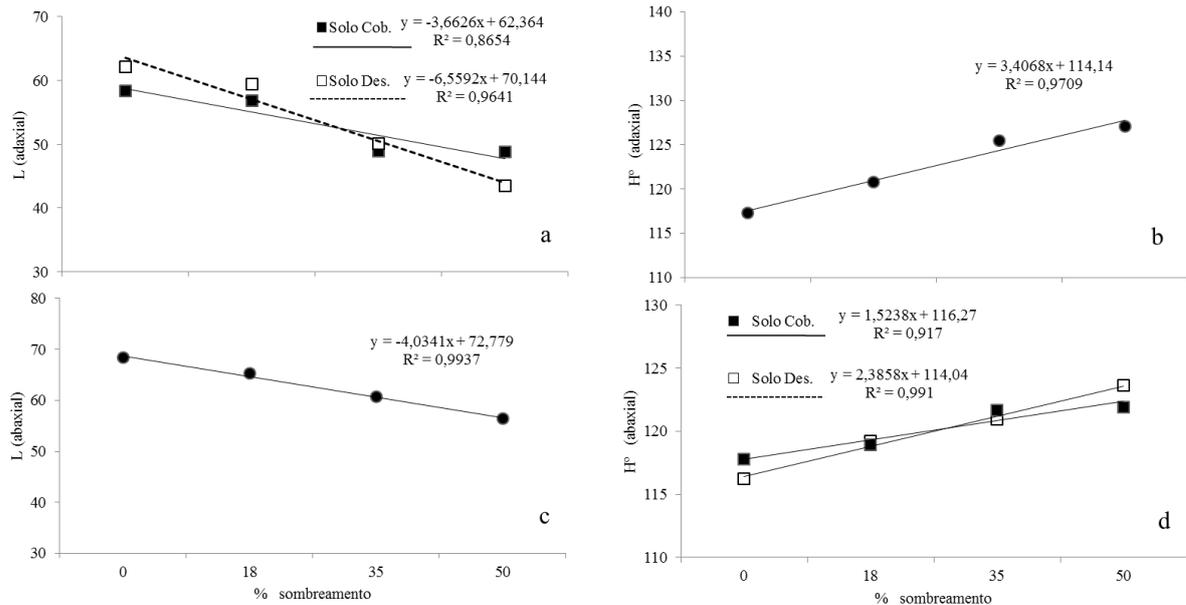


Figura 6 - Colorimetria das três folhas apicais desenvolvidas de erva-mate (3^a, 4^a e 5^a folhas abaixo do ápice) no verão em dezembro de 2013 submetidas a fator A cobertura do solo (coberto e desnudo) e fator D % de sombreamento (0, 18, 35 e 50%), sendo (a) Luminosidade (L) da face adaxial com interação entre o fator (A X D), (b) Ângulo de tonalidade HUE (°H) com fator (D) significativo, (c) L para face abaxial com fator (D) significativo e (d) H° da face abaxial com interação (A x D) significativa, (■) solo coberto; (□) solo desnudo e (●) média para tratamentos de sombreamento (0, 18, 35 e 50%) em Santa Maria, RS.

A tonalidade (°H), mensurada na face adaxial em dezembro de 2013, foi positiva e significativa para o fator sombreamento (Tabela 8 e Figura 6b). Nas duas condições de cobertura do solo a linha de tendência ajustada aos dados é descrita por um modelo linear com $R^2 \geq 0,97$ (Figura 6b). Verifica-se que há uma tendência de estabilização da tonalidade (°H) a partir do nível de sombreamento acima de 35% apenas na condição de solo coberto com palha (128°H), ou seja, foi no tratamento com palha sobre o solo que as folhas estavam mais verdes, mais próximo ao ângulo 180°H (Figura 6b).

A colorimetria em dezembro de 2013, mostrou que quanto maior o sombreamento mais escuras as folhas e com tonalidade mais verde (Figura 6a, 6b). Isso corrobora com os resultados já mostrados de massa fresca e seca do limbo foliar, bem como da área foliar, denotando que este conjunto de informações mostra o quanto às plantas a pleno sol (sombreamento 0%) são afetadas na coloração, com folhas mais claras e menos verdes na época de maior demanda atmosférica, como no verão, quando se tem maior incidência de radiação solar e maior aumento da temperatura do ar, condições que podem aumentar a temperatura das nervuras das folhas (Tabelas 3) acentuando o estresse térmico.

A luminosidade na parte abaxial também apresentou diferenças significativas para o fator de sombreamento pelo teste F a 5% (Tabela 8, Figura 6c). Na época do verão, em dezembro de 2013, a linha de tendência, representada por funções lineares ($R^2 \geq 0,99$), indica maior luminosidade nos tratamentos a pleno sol, ou seja, 0% de sombreamento e luminosidade menor, com decréscimo proporcional ao aumento de sombreamento (Figura 6c), qualquer que seja a condição de cobertura do solo.

Na face abaxial a tonalidade ($^{\circ}$ H) apresentou relação direta positiva com o sombreamento e ocorreu interação entre os fatores cobertura do solo e sombreamento na avaliação de dezembro de 2013 (Tabela 8, Figura 6d). Destaca-se que há uma tendência de estabilização da tonalidade ($^{\circ}$ H) a partir do nível de sombreamento acima de 35%, porém apenas na condição de solo coberto com palha. Os modelos matemáticos apresentam regressões lineares positivos com coeficiente de determinação superior a 0,91, mostrando que as folhas possuem coloração verde mais intensa na face inferior das erveiras que receberam o sombreamento.

Ambas as faces das folhas de erva-mate apresentaram coloração com tonalidade mais esverdeada (mais próximo do ângulo 180° do verde puro) com aumento do sombreamento, sendo que na face adaxial a tonalidade pode chegar a mais de 130° H na avaliação do verão (Figuras 6). Isso mostra que as condições micrometeorológicas no verão de maior radiação solar e temperatura afetam as folhas mais expostas, ou seja, as folhas mais do topo da erva jovem.

Segundo Daniel (2009), os três atributos avaliados na erva-mate referentes à qualidade são cor, sabor e a textura, sendo que a cor constitui-se no primeiro critério de qualidade utilizado na aceitabilidade pelos consumidores de erva-mate na hora da aquisição. A colorimetria nas plantas é um importante parâmetro morfofisiológico que visa auxiliar na quantificação da qualidade dos produtos comercializados (CIA et al., 2010; BRACKMANN et al., 2012).

O sombreamento parcial em plantas com metabolismo C_3 contribui para que aumentem seu teor de clorofila e se tornem mais verdes, mostrando um aumento da eficiência fisiológica (TAIZ; ZEGEIR, 2013). Nas plantas jovens de erva-mate se observou exatamente isso, sendo que os tratamentos com 35 e 50% de sombreamento e em solos com cobertura de palha as folhas apresentaram coloração mais verde escuro no limbo.

Nas folhas expostas a pleno sol, a tonalidade da cor verde é mais amarelada. Acredita-se que isso esteja relacionado à decomposição da clorofila, que ocorre através da clorofilase. Isso é relatado por Larcher (2004) e Taiz e Zegueir (2013) que observaram que em condições

de muita luz a clorofila se excita de tal maneira que se torna produtora de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) oxidando o pigmento de clorofila. Kasparý (1985) descreve que as plantas jovens submetidas à baixa luminosidade, como no caso dos tratamentos com 50% de sombreamento neste experimento 1, apresentaram tonalidade verde-forte, enquanto as plantas expostas ao sol apresentaram coloração mais amarelada do que esverdeada, porém não apresenta medidas colorimétricas.

4.2.4 Composição físico-química das folhas de erva-mate sob o efeito de diferentes sombreamentos e cobertura de solo (Experimento 1)

As análises do teor de polifenóis totais, flavonoides e capacidade antioxidante, realizados nas amostras colhidas na estação do verão em dezembro de 2013 e outono em abril de 2014, mostraram haver efeito dos tratamentos aplicados na composição das folhas (Tabela 9).

A maior média de teor de polifenóis, na estação do verão foi obtida nas erva-mates em solos cobertos e sombreamento de 50% ($81,75 \text{ mg EAG L}^{-1}$), sendo estatisticamente igual ao tratamento com solo coberto e sombreamento de 35%, enquanto que em solo desnudo e 0% de sombreamento (a pleno sol) verificou-se uma concentração reduzida (Tabela 9). Conforme Donaduzzi et al. (2003), a constituição química da erva-mate apresenta dentre outros compostos fenólicos, ácidos fenólicos e flavonóides, afirmando que os flavonóides são compostos que sofrem pouca variação estrutural e relacionam-se principalmente à quercetina livre e seus derivados glicosilados, além da presença de kaempferol, mas não associam essas respostas às condições ambientais. No atual trabalho não foi possível avaliar a concentração de kaempferol e de quercetina livre e seus derivados, mas foi possível estudar os flavonóides totais, sendo os resultados concordantes similares aos de Donaduzzi et al. (2003).

No outono, a maior média para polifenóis totais foi verificada para solo desnudo e 35% de sombreamento ($150,4 \text{ mg EAG L}^{-1}$) e a menor foi de $76,2 \text{ mg EAG L}^{-1}$ para a condição de solo desnudo e a pleno sol (Tabela 9). Os resultados comparados pelo Teste de Tukey a 5% demonstram que o acúmulo de compostos fenólicos é maior nos tratamentos com maior sombreamento, destacando-se o sombreamento a 35% de modo geral, sendo que na estação do outono o acúmulo de compostos é maior do que no verão (Tabela 9), o que corrobora com a época de colheita no RS para os erva-mates nativos (DANIEL, 2009). Evidencia-se assim, que um pequeno estresse gerado pela radiação solar é suficiente para produzir metabólitos secundários ($126,9 \text{ mg EAG L}^{-1}$) a pleno sol no outono (Tabela 9). Porém, esse

estresse quando intensificado nas condições de verão (54,03 mg EAG L⁻¹) na ausência de sombreamento (pleno sol) explica uma degradação dos compostos fenólicos comparada com o outono, não sendo por isso acumulando nas folhas maduras.

Tabela 9 – Teores de polifenóis totais, flavonoides e capacidade antioxidante em plantas jovens de erva-mate com e sem cobertura de palha sobre o solo em diferentes níveis de sombreamento. Santa Maria, RS, 2015.

Concentração do solvente e tratamentos	Polifenóis totais (mg EAG L ⁻¹)		Flavonoides (mg ECA L ⁻¹)	
	Verão (Dez/2013)	Outono (Abr/2014)	Verão (Dez/2013)	Outono (Abr/2014)
C ¹ S0%	54,03 cd	126,92 ab	38,90 cd	132,64 c
D ² S0% ³	40,80 d	76,22 c	30,91 d	88,87 c
CS18%	59,12 bcd	114,06 abc	46,80 bc	115,43 c
DS18%	67,21 abc	102,98 bc	62,45 a	110,56 c
CS35%	77,33 ab	145,26 a	58,79 ab	286,04 a
DS35%	53,41 cd	150,35 a	55,28 ab	243,12 ab
CS50%	81,75 a	138,37ab	62,98 a	207,51 b
DS50%	64,95 abc	101,62 bc	52,65 b	94,57 c
	ABTS ⁴ (mM TROLOX L ⁻¹) ⁴		FRAP ⁵ (mM TROLOX L ⁻¹)	
	Verão (Dez/2013)	Outono (Abr/2014)	Verão (Dez/2013)	Outono (Abr/2014)
C ² S0%	0,54 cd	0,83 a	0,57 c	2,72 c
D ³ S0% ³	0,49 d	0,73 a	0,52 c	1,18 d
CS18%	0,61 bc	0,82 a	0,65 bc	1,64 d
DS18%	0,69 ab	0,84 a	0,82 ab	1,62 d
CS35%	0,74 a	0,89 a	0,95 a	4,35 ab
DS35%	0,61 bc	0,87 a	0,70 bc	5,10 a
CS50%	0,69 ab	0,91 a	0,93 a	3,20 bc
DS50%	0,62 bc	0,70 a	0,81 ab	1,42 d

¹cobertura de solo e ²solo desnudo, ³percentual de sombreamento, ⁴Ácido 2,2'-azino-bis (3-etilbenzotiazolin) 6-ácido sulfônico e ⁵ *Ferric Reducing Antioxidant Power*. Letras minúsculas diferentes na mesma coluna correspondem a diferenças significativas entre os tratamentos de mesma concentração do solvente, pelo teste de Tukey (p<0,05) n = 3.

Suertegaray (2002) ao analisar a composição físico-química da erva-mate colhida de plantas adultas, verificou aumento na concentração de compostos fenólicos no período de verão no sistema agroflorestal onde o sombreamento é maior que em monocultivos, diferentemente do observado no experimento 1, em plantas jovens, aonde o sombreamento de 35% no verão e outono se obteve maior concentração dos compostos do que a pleno sol,

principalmente na estação do outono. Suertegaray (2002) para erva-mate e Larcher (2004) e Taiz e Zeiger (2013) nas plantas em geral para diferentes espécies, relatam que o aumento da radiação solar ou a sua diminuição pode ser benéfica às plantas, dependendo da fenofase do vegetal. No caso das erva-mates jovens, do presente trabalho, o aumento da radiação solar, da temperatura do ar e temperatura das folhas na estação de maior demanda atmosférica (verão), mostram que o sombreamento de 35% a 50% são os melhores para o acúmulo de compostos fenólicos quando a planta de erva-mate ainda é mais frágil e está na fase juvenil.

As altas temperaturas dos meses de verão influenciam diretamente na concentração de compostos fenólicos, pois quanto maior a temperatura em torno dos 35-40°C maior será a degradação ou inativação de enzimas e/ou proteínas inibindo o metabolismo (LARCHER, 2004; TAIZ; ZEIGER, 2013). Outro fator que deve ser considerado em relação a concentração de polifenóis é que o aumento da radiação solar induz o fechamento estomático e o aumento da concentração intercelular de dióxido de carbono. Conforme Bertagnoli et al. (2007), em uvas a concentração elevada de dióxido de carbono no meio celular inibe a síntese de compostos fenólicos, pois para formação de tais compostos é necessária a liberação de CO₂. Isso explica a preferência dos consumidores por uma erva-mate mais suave, que geralmente são de sistema agroflorestal, que permite uma incidência de radiação solar de menor intensidade. Suertegaray (2002) relata que plantas adultas de erva-mate a pleno sol, em diferentes microclimas produziram valores discrepantes em decorrência das peculiaridades do microclima onde as plantas se encontravam: monocultivos e sistemas agroflorestais.

A composição fenólica em plantas de erva-mate já foi estudada por diversos autores, como Zampier (2001), Rachwal et al. (2002), Suertegaray (2002), Donaduzzi et al. (2003), Heck e Mejia (2007), Dutra et al. (2010), Escalada; Brumovsky e Hartwig (2011) e Rossa (2012), dos quais poucos a relacionam com o ambiente de produção encontrando-se resultados concordantes e conflitantes com os atuais. No experimento 1, o uso da tela de sombreamento demonstrou resultados mais coerentes, associando-se as concentrações de polifenóis e flavonóides (Tabela 9). No caso das erva-mates jovens, em fase de adaptação às condições de campo, o sombreamento de 35% no outono apresenta-se mais eficaz para produção de compostos fenólicos, bem como está correlacionado ao aumento de área foliar e abertura estomática. Donaduzzi et al. (2003) avaliando amostras comerciais de erva mate, encontraram diferenças nos teores de polifenóis, assim como Rachwal et al. (2002) encontraram variação e correlação positiva do teor de polifenóis com a luminosidade em plantas adultas na condição de outono.

Em erva-mate adulta Escalada; Brumovsky e Hartwig (2011) avaliaram o efeito da época de colheita que influenciou no conteúdo de compostos fenólicos, independentemente da origem e do tipo de secagem a que foram submetidas as folhas verdes. Verificaram que as primeiras colheitas próximas ao outono possuem maior concentração de compostos fenólicos, assim como em plantas jovens de erva-mate, que, como demonstrado no experimento 1 do atual trabalho, no verão tiveram concentração dos compostos fenólicos menor do que no outono.

Na avaliação geral conjugada dos resultados (Tabela 9), sobressai o fato importante de que nos melhores tratamentos de outono (35% de sombreamento) o teor de flavonóides é cerca de 4,5 vezes maior do que nos mesmos tratamentos no verão e que o cultivo a pleno sol, ou com sombreamento insuficiente, no outono e principalmente no verão desfavorece a produção de polifenóis, especialmente dos flavonóides, o que pode ser consequência de possíveis estresses causados por alta temperatura, além da exposição à radiação solar excessiva. Também se verifica que no outono o sombreamento de 50% tende a ser o limite de sombreamento a partir do qual pode ocorrer redução no teor desses compostos na medida em que se aproxima o inverno.

Em uma revisão sobre os fatores que influenciam o teor de metabólitos secundários em plantas medicinais, Gobbo-Neto e Lopes (2007) relatam que no geral existe associação positiva entre intensidade de radiação solar e produção de compostos fenólicos, dentre os quais se enquadram os flavonoides, taninos e antocianinas, porém não especificam sob que condição climática, época do ano ou região isso é válido, o que dificulta a comparação com os resultados obtidos no experimento 1. O que se evidencia pelos dados de radiação solar medidos durante o período do experimento 1 no verão e do outono é que especificamente para a erva-mate nos primeiros anos de cultivo a resposta não é a mesma que a apreendida por Gobbo-Neto e Lopes (2007) para fitoterápicos, sendo necessário um nível intermediário de radiação solar para maximizar a produção de polifenóis totais e flavonóides e que radiação solar intensa diminui a concentração desses compostos secundários.

A atividade antioxidante em erva-mate é considerada maior que em outras espécies do gênero *Ilex* spp., sendo que capacidade antioxidante (CA) da mesma é preservada em suas bebidas como o chimarrão e tererê, devido a planta apresentar altos teores de ácidos cafêicos, cafeoil e outros compostos (CANTERLE, 2005). Os resultados da CA obtidos (Tabela 9) são relevantes no sentido de nortear técnicas de manejo de produção, visando obter melhor qualidade da produção de erva-mate em plantas jovens. Isso se ressalta, principalmente por que o manejo deverá ser o mesmo para obter melhor qualidade em termos de composição em

flavonoides e compostos fenólicos totais, uma vez que os respectivos resultados apresentaram tendência similar relativa aos tratamentos de sombreamento e cobertura de palha sobre o solo aplicados no experimento 1 (Tabela 9).

Segundo Pereira e Cardoso (2012) a CA é conferida pelos peroxissomos, com a ação de enzimas (catalase, peroxidase, superóxido dismutase) e também um conjunto heterogêneo de substâncias formado por pigmentos naturais, fenóis, carotenoides, e outros compostos vegetais. Tais substâncias bloqueiam o efeito danoso dos radicais livres, formados nas reações metabólicas ou por fatores externos à planta, os quais são denominados elicitores abióticos (radiação solar, temperatura do ar e estresse hídrico). A geração de radicais livres é normalmente equilibrada pela ação dos antioxidantes endógenos. Então, nas erveiras jovens do experimento 1 é possível perceber que a homeostase das atividades fisiológicas é melhor com a cobertura vegetal do solo e sombreamento parcial de 35 a 50%, em épocas de maior estresse como verão.

A análise da CA pode ser mensurada pelas técnicas de ABTS, ácido 2,2'-azino-bis (3-etilbenzotiazolin) 6-ácido sulfônico e FRAP (*Ferric Reducing Antioxidant Power*) (Tabela 9). Para as amostras coletadas no período de outono, a técnica de ABTS não diferenciou os efeitos dos tratamentos, obtendo-se apenas valores com a tendência verificada com a utilização da técnica de FRAP. A técnica de FRAP é mais específica do que a ABTS para erva-mate, pois se consegue discriminar os tratamentos, havendo uma correlação da técnica de FRAP para polifenóis e flavonoides no presente estudo.

Em relação à capacidade antioxidante, analisada pela técnica de FRAP, os valores são maiores nos tratamentos com 35% de sombreamento na estação do outono, corroborando com os teores de polifenóis totais, sobretudo aos flavonoides totais (Tabela 9). Já a menor concentração de antioxidantes foi verificada no verão, nos tratamentos a pleno sol, independente do solo estar coberto por palha ou desnudo (0,57 e 0,52 mM TROLOX L⁻¹). No outono a menor capacidade antioxidante foi verificada nas amostras coletadas nos tratamentos com solo desnudo sem sombreamento e com 50% de sombreamento (1,18 e 1,42 mM TROLOX L⁻¹), respectivamente (Tabela 9). No verão a maior capacidade antioxidante foi obtida como os tratamentos com 35% e 50% de sombreamento. No entanto estes os valores nestes tratamentos são menores que os tratamentos de outono independentemente do sombreamento, pelas concentrações elevadas dos compostos fenólicos especialmente os flavonoides. Os resultados indicam que nessa época mais quente do ano este grau de proteção de sombreamento não é suficiente para evitar a redução da capacidade antioxidante em relação ao outono. Assim, fica evidenciado que nas condições de verão quente acima da

média normal de temperaturas máximas de Santa Maria, em plantas jovens de erva-mate não só seria necessário aumentar o grau de sombreamento e manter a cobertura de palha no solo, para melhorar a capacidade antioxidante, mas a temperatura muito elevada é um provável fator limitante e importante a considerar em um zoneamento agroclimático para a qualidade da produção.

Segundo Heck e Mejia (2007) há grande correlação entre a concentração de compostos fenólicos e antioxidantes, assim como observado no Experimento 1 pela correlação de Pearson (Tabela 10). No experimento 1 também pode-se observar esta correlação, aonde plantas sombreadas com 35% apresentaram maior concentração de antioxidantes e compostos fenólicos (Tabela 9), mas a pleno sol houve diminuição de antioxidantes. Isso deve ser diretamente relacionado à busca de qualidade pelo mercado consumidor assim como relatados nos trabalhos de Viera et al. (2004) e Daniel (2009).

Tabela 10 – Matriz de Correlação de Person (r_p) para os compostos teores de polifenóis totais, flavonoides e capacidade antioxidante em plantas jovens de erva-mate com e sem cobertura de palha sobre o solo em diferentes níveis de sombreamento. Santa Maria, RS, 2015.

Compostos	Polifenóis Verão	Polifenóis Outono	Flavonoides Verão	Flavonoides Outono	ABTS ¹ Verão	ABTS Outono	FRAP ² Verão	FRAP Outono
Polifenóis Verão	1,00*	0,51	0,85	0,50	0,91	0,57	0,94	0,29
Polifenóis Outono		1,00	0,55	0,88	0,54	0,82	0,49	0,91
Flavonoides Verão			1,00	0,52	0,92	0,59	0,90	0,42
Flavonoides Outono				1,00	0,6	0,77	0,57	0,94
ABTS Verão					1,00	0,61	0,94	0,4
ABTS Outono						1,00	0,49	0,71
FRAP Verão							1,00	0,39
FRAP Outono								1,00

* Índice de correlação de Person (r_p); ¹ABTS - Ácido 2,2'-azino-bis (3-etilbenzotiazolin) e ²FRAP - *Ferric Reducing Antioxidant Power*.

Os resultados obtidos também comprovam que os compostos fenólicos, flavonoides e as capacidades antioxidantes das amostras colhidas em cada época (verão/outono) estão altamente correlacionados ($r_p = 0,94$) (Tabela 10). Isso permite inferir que dentro do grupo dos polifenóis totais produzidos, os majoritários são os flavonoides e que correspondem

majoritariamente à capacidade antioxidante pelos dois métodos de ABTS e FRAP, sendo que a capacidade antioxidante pelo método de FRAP é mais sensível (Tabela 10).

Por isso, conclui-se que em relação às erveiras jovens do experimento 1, o sombreamento parcial de 50%, no verão e 35% no outono são as melhores recomendações independentemente da cobertura ou não do solo, sendo o outono a melhor época de colheita neste sistema de cultivo.

4.3 Experimento 2 – Sombreamento e Velocidade do vento

4.3.1 Temperatura das folhas de erva-mate sob diferentes velocidades do vento

Os resultados de temperatura das folhas, mensurada com termopares nas nervuras em dois dias de aplicação de vento no verão, momento no qual houve as maiores demandas atmosféricas por vapor d'água são apresentados na Figura 7 e Tabela 17. Nestes dois dias (03 e 08/12/2013), o tratamento com sombreamento 35% sem aplicação de vento apresentou temperaturas superiores a 40 °C nos horários de maior demanda atmosférica (12-15h). O mesmo foi observado para o tratamento de 35% de sombreamento e velocidade do vento de 4 m s⁻¹, porém com temperaturas inferiores ao anterior provavelmente devido à renovação do ar próximo as folhas (Figura 7). No tratamento com sombreamento 18% e velocidade do vento de 2 m s⁻¹ ocorreu a menor temperatura de folha, não sendo superior a 35°C (Figura 7). As condições meteorológicas nesses dois dias foram de céu límpido, baixa unidade relativa do ar alta incidência de radiação solar global e vento fraco a moderado (Figura 7).

A aplicação de ventilação fez com a temperatura na nervura da folha diminuísse no verão. Conforme Larcher (2004), Pascale e Damario (2004) e Taiz e Zeiger (2013), ventos moderados auxiliam na diminuição da temperatura no microambiente da planta. Os resultados obtidos com as erveiras jovens submetidas à ventilação forçada no Experimento 2, convergem para esse entendimento de que ventos moderados de até 2 m s⁻¹ são benéficos, agindo como mecanismo aumento de troca do ar quente diminuindo o calor sensível (H) da folha e otimizando sua perda de calor latente (LE). No entanto, velocidades de vento acima de 4 m s⁻¹ podem fazer com que a planta tenha transpiração excessiva em relação ao fluxo de água desde o solo e feche os estômatos devido ao decrescente potencial hídrico na folha e da concentração de vapor d'água da camada limiar de ar junto às folhas da planta.

Conforme Sentelhas et al. (1993) o crescimento e produção de diferentes culturas são afetados tanto pelo microclima criado pela comunidade vegetal, quanto pelas condições

climáticas que predominam na localidade. As trocas de elementos constituintes da atmosfera entre as plantas e o ar, dependem das condições micrometeorológicas predominantes.

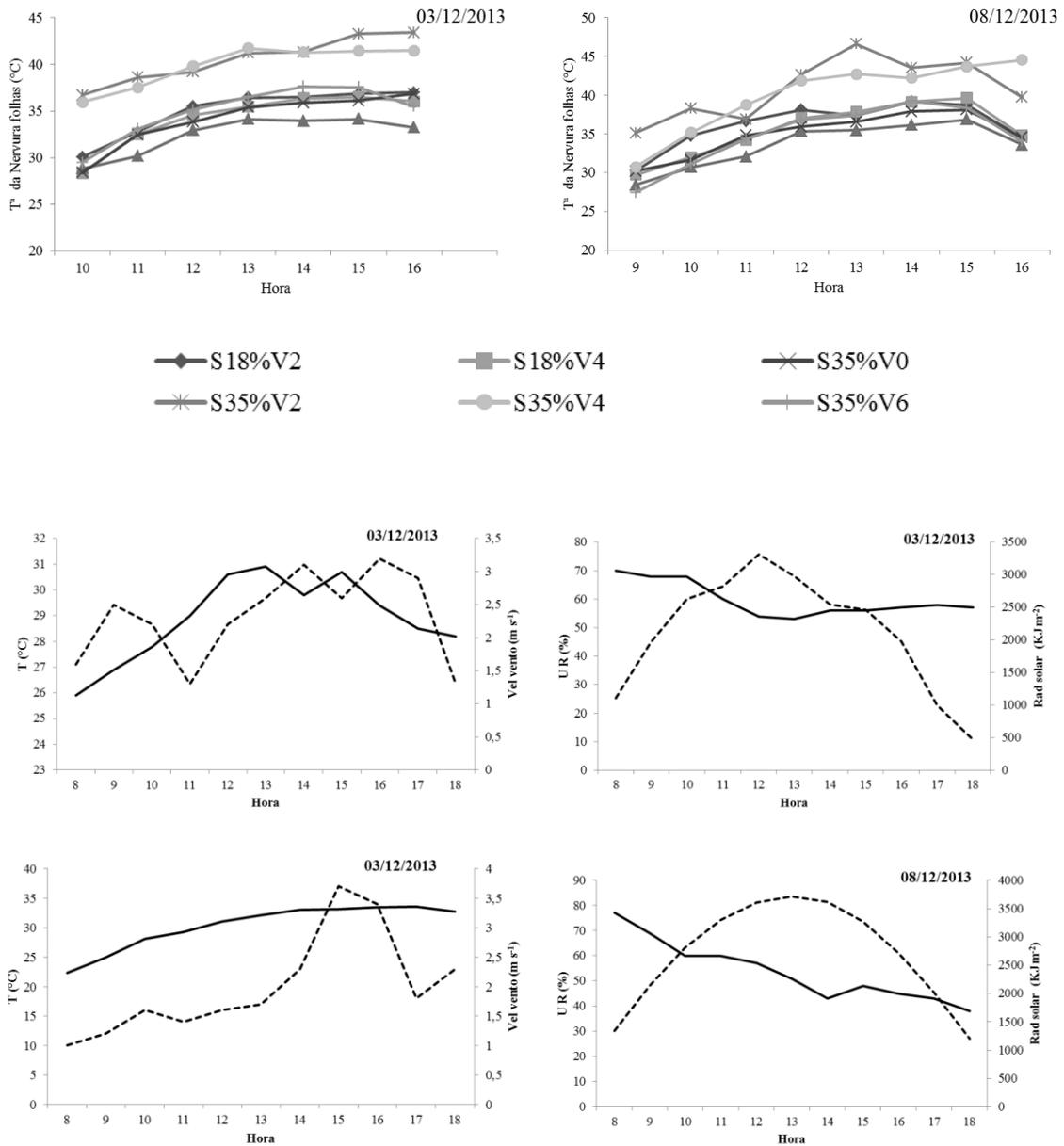


Figura 7 – Temperatura horária da nervura das folhas de erva-mate submetidas aos tratamentos com velocidade do vento (V) natural (≈ 0), 2, 4 e 6 $m s^{-1}$ nos sombreamentos de 18 e 35% (S), nos horários de maior aquecimento, em três dias quentes do mês de dezembro de 2013; com alta incidência de radiação solar acima da tela de sombreamento. Temperatura do ar (—, °C), velocidade do vento (---, $m s^{-1}$), umidade relativa (—, UR%) e radiação solar (---, $KJ m^{-2} h^{-2}$) nas datas de 03 e 08 de dezembro de 2013 obtidos na estação automática do 8° DISME/INMET. Santa Maria, RS, 2015.

Considerando a média móvel por classe de horário nas datas de 03 e 08/12/2013 com teste de Tukey a 5% (Tabela 11) verifica-se que nos tratamentos com sombreamento de 35% e

velocidade do vento de 2 e 4 m s⁻¹ ocorreram as maiores médias de temperatura nas duas datas nas classes de horários das 12-13h, 13-14h, 14-15h e 15-16h. Já a menor temperatura foi medida no tratamento com sombreamento de 18% e velocidade do vento de 6 m s⁻¹ como na data de 03 de dezembro de 2013, por exemplo, na classe de hora 13-14h, apresentando uma diferença de 7°C dos tratamentos 35% de sombreamento com velocidade do vento de 2 e 4 m s⁻¹ (Tabela 11).

Tabela 11 – Média móvel horária da temperatura da nervura das folhas (°C) nas datas de 03 e 08 de dezembro de 2013 por classe de horário. Nos tratamentos com sombreamento 18% e 35% de sombreamento e velocidade do vento (natural≈0, 2, 4 e 6 m s⁻¹). Santa Maria, RS, 2015.

Trat.	Classe Hor.	Velocidade do Vento (m s ⁻¹)				Média
		0	2	4	6	
03/12/2013						
Sombr. 18% ¹	10-11h	-	31,41 b	30,42 b	29,51 a	30,44
Sombr. 35% ²		-	37,65 a	36,73 a	31,28 a	34,02
Média		-	34,53	33,57	30,39	
Sombr. 18%	11-12h	-	34,13 b	33,52 b	31,57 a	33,07
Sombr. 35%		-	38,9 a	38,66 a	34,11 a	36,20
Média		-	36,51	36,09	32,84	
Sombr. 18%	12-13h	-	35,96 b	35,01 b	33,54 a	34,84
Sombr. 35%		-	40,21 a	40,77 a	35,83 a	37,85
Média		-	38,08	37,89	34,69	
Sombr. 18%	13-14h	-	36,45 b	35,92 b	34,04	35,47
Sombr. 35%		-	41,26 a	41,5 a	37,07	38,87
Média		-	38,85	38,71	35,56	
Sombr. 18%	14-15h	-	36,66 b	36,45 b	34,02 b	35,71
Sombr. 35%		-	42,29 a	41,35 a	37,59 a	39,30
Média		-	39,48	38,90	35,80	
Sombr. 18%	15-16h	-	36,94 b	36,28 a	33,68 a	35,63
Sombr. 35%		-	43,34 a	41,46 b	36,51 b	39,45
Média		-	40,14	38,87	35,09	
08/12/2013						
Sombr. 18%	10-11h	-	35,69	33,11	31,38	33,39 a
Sombr. 35%		-	37,61	36,95	32,72	35,12 a
Média		-	36,64 A	35,03 A	32,05 B	
Sombr. 18%	11-12h	-	37,36	35,62	33,7	35,56 a
Sombr. 35%		-	39,78	40,29	35,6	37,75 a
Média		-	38,56 A	37,95 A	34,65 B	
Sombr. 18%	12-13h	-	37,73	37,45	35,41	36,86 B
Sombr. 35%		-	44,61	42,3	37,11	40,06 A
Média		-	41,17 A	39,87 AB	36,26 B	
Sombr. 18%	13-14h	-	38,27	38,5	35,82	37,53 B
Sombr. 35%		-	45,06	42,49	38,34	40,77 A
Média		-	41,66 A	40,49 A	37,07 B	
Sombr. 18%	14-15h	-	38,93	39,39	36,52	38,28 A
Sombr. 35%		-	43,86	42,97	38,82	40,91 A
Média		-	41,39 A	41,18 A	37,67 B	
Sombr. 18%	15-16h	-	36,58	37,23	35,23	36,34 A
Sombr. 35%		-	41,95	44,13	36,17	39,64 A
Média		-	39,26 A	40,68 A	35,69 B	

Teste de Tukey ($p < 0,05$) sendo, * Letras minúsculas comparam os diferentes tratamentos quando há interação (cobertura de solo X % sombreamento) ** letras maiúsculas comparam sombreamentos entre si, *** letras minúsculas comparam as coberturas do solo, ¹ Sombreamento de 18% (Sombr. 18%) e ² Sombreamento de 35% (Sombr. 35%).

4.3.2 Avaliações fenométricas no Experimento 2 (Vento)

A análise da variância para as observações fenométricas, no experimento 2, referentes às avaliações realizadas no verão de 2013 e outono de 2014, após a aplicação dos tratamentos de vento mostrou significância para algumas variáveis (Tabela 12).

A altura de plantas jovens de erva-mate, em novembro de 2013, submetidas aos sombreamentos (18 e 35%) e velocidades do vento ((0 \approx natural), 2, 4 e 6 m s⁻¹) obteve interação entre estes fatores, sendo apresentados modelos com seus coeficientes de determinação na Figura 8a. Observa-se que as plantas sombreadas com 18% nos tratamentos com maior ventilação forçada reduziram sua altura (Figura 8a).

O número de ramos, na segunda avaliação de verão, dezembro/2013, apresentou interação entre sombreamento (18 e 35%) e velocidade do vento ((0 \approx natural), 2, 4 e 6 m s⁻¹) (Figura 8b), sendo que no tratamento com sombreamento 35% e velocidade natural obteve-se média de 30 ramos e o no mesmo sombreamento com 18% de sombreamento em velocidade de 6 m s⁻¹ a média de 11 ramos. Verifica-se, portanto, que o vento interfere no número de folhas e no comprimento dos ramos, diminuindo o crescimento das plantas jovens de erva-mate submetidas ao estresse pela ventilação mecânica.

Quanto ao número de brotos também se obteve interação entre os fatores sombreamento (18 e 35%) e velocidade do vento ((0 \approx natural), 2, 4 e 6 m s⁻¹) demonstrada na Tabela 12, Figura 8c. O sombreamento 18% obteve-se um modelo quadrático ($R^2 = 0,76$), em que a máxima eficiência se encontra mais próxima do tratamento com velocidade de vento 2 m s⁻¹ (28 brotos) do que com 4 e 6 m s⁻¹ (Figura 22). No sombreamento 35% verifica-se que a aplicação do vento artificial com velocidade de vento maior ou igual a 2 m s⁻¹, reduz o número de brotos para menos da metade (Figura 22).

Segundo Mota (1983) e Resende e Junior (2011), ventos fortes afetam o crescimento das plantas, por estresse mecânico, diminuindo a altura, número de ramos, comprimento dos ramos e número de brotos. Isso ocorreu no Experimento 2, pois houve estresse nas erva-mates jovens, submetidas ao aumento da velocidade do vento por ventilação forçada, resultando em diminuição da altura das plantas, do número de folhas, do número de ramos e principalmente do número de brotos novos. Evidencia-se assim que houve estresse mecânico das erva-mates jovens submetidas à ventilação forçada, sendo que o estresse diminuiu as principais variáveis de crescimento das plantas submetidas a maiores velocidades do vento em pelo menos uma das três avaliações.

Tabela 12 – Análise da variância do Experimento 2 (sombreamento X velocidade do vento), sendo a 1ª e 2ª avaliação de verão de novembro e dezembro/2013 e avaliação de outono (abril/2014) que se compôs em um bifatorial com fator (A) sombreamento (18 e 35%) e fator (D) velocidade do vento (0 (\approx natural), 2, 4 e 6 m s⁻¹) com 3 repetições.

Váriavel	Avaliação	Fator (A) Somb.	Fator (D) Vel.vento	Interação (A x D)	Erro	CV ⁴ %	Média geral	
Nº de folhas	1ª Ver.	QME	0,0176	0,0330	0,0601	0,0320	8,85	114,33
		Pvalor	0,4680	0,4050	0,1730	-		
	2ª Ver.	QME	0,0120	0,0261	0,0499	0,0549	11,16	141,00
		Pvalor	0,6450	0,7030	0,4580	-		
	Out.	QME	0,0454	0,0637	0,0659	0,4460	9,08	240,29
		Pvalor	0,3280	0,2710	0,2580	-		
Altura de planta	1ª Ver.	QME	0,0029	0,0048	0,0143	0,0056	4,48	47,77
		Pvalor	0,4820	0,4820	0,091*	-		
	2ª Ver.	QME	0,0253	0,0065	0,0038	0,0118	6,28	55,93
		Pvalor	0,1630	0,6540	0,8060	-		
	Out.	QME	0,0461	0,0176	0,0157	0,0143	66,58	68,95
		Pvalor	0,092*	0,3310	0,3800	-		
Nº de ramos	1ª Ver.	QME	0,0501	0,0394	0,0279	0,0320	18,06	10,76
		Pvalor	0,2280	0,3300	0,4750	-		
	2ª Ver.	QME	0,0072	0,0589	0,1568	0,0489	19,75	15,29
		Pvalor	0,0705*	0,3390	0,051*	-		
	Out.	QME	0,0163	0,0256	0,0132	0,3530	13,27	28,25
		Pvalor	0,1180	0,5500	0,7710	-		
Compr. Ramos	1ª Ver.	QME	0,0945	0,0509	0,0934	0,0688	12,12	171,13
		Pvalor	0,2580	0,5430	0,2910	-		
	2ª Ver.	QME	0,0010	0,0606	0,1015	0,0985	13,54	252,56
		Pvalor	0,9730	0,6040	0,4050	-		
	Out.	QME	0,1284	0,0439	0,0447	0,0696	9,81	568,16
		Pvalor	0,1930	0,6050	0,9980	-		
Nº de brotos	1ª Ver.	QME	0,1580	0,1030	0,0124	0,0988	31,08	6,95
		Pvalor	0,2240	0,4000	0,9430	-		
	2ª Ver.	QME	0,0001	0,0472	0,2348	0,0484	18,00	19,72
		Pvalor	0,9550	0,4280	0,0130*	-		
	Out.	QME	0,8815	0,3565	0,0932	0,4790	30,19	4,66
		Pvalor	0,1930	0,5412	0,8957	-		
ms ¹ caule	Ver.	QME	1,5557	0,2407	1,2395	1,1530	35,08	5,69
		Pvalor	0,1720	0,1160	0,4450	-		
	Out.	QME	0,0303	0,1040	0,0703	0,0940	26,05	18,70
ms folha	Ver.	QME	4,9688	0,5344	4,0978	3,9451	34,04	15,92
		Pvalor	0,2780	0,9370	0,4020	-		
	Out.	QME	0,0644	0,1015	0,0644	0,9480	19,52	46,42
ms total	Ver.	QME	6,1972	0,5065	5,7342	5,1283	33,14	21,69
		Pvalor	0,2870	0,9590	0,3710	-		
	Out.	QME	0,0556	0,0974	0,0642	0,0927	17,65	65,03
Aft ²	Ver.	QME	0,0013	0,4100	0,0926	0,1349	30,85	0,26
		Pvalor	0,9210	0,5730	0,0590*	-		
	Out.	QME	0,1027	0,1295	0,1000	0,0500	17,92	0,38
Abert. est. ³	Ver.	QME	0,0047	0,0598	0,0002	0,0008	1,48	9,61
		Pvalor	0,0320*	0,0000*	0,0835*	-		
	Out.	QME	0,0001	0,0069	0,0007	0,0016	2,04	101,98
		Pvalor	0,7770	0,7470	0,0240*	-		

*probabilidade do erro de 0,10; ¹ massa seca (ms); ² Área foliar total (Aft); ³ Abertura estomáticas (Abert. Est.) e ⁴ Coeficiente de variação (CV)

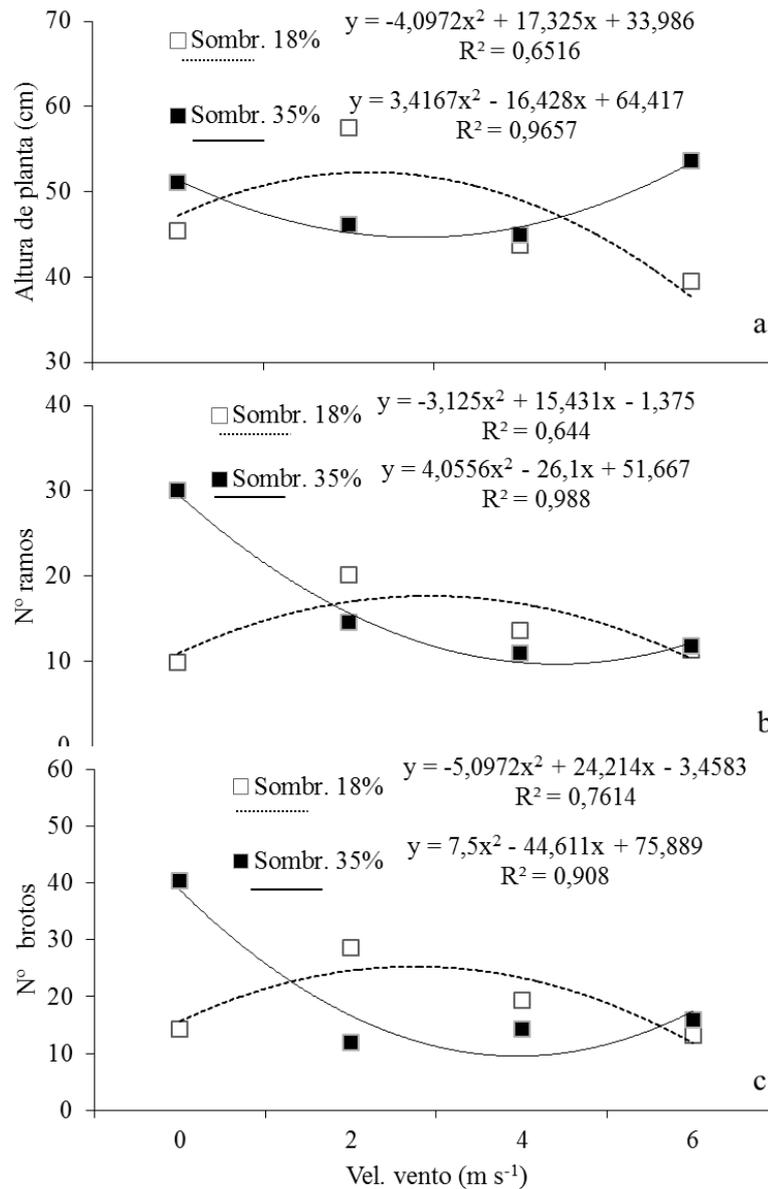


Figura 8 – Interação entre os fatores sombreamento (18 e 35%) e velocidade do vento (V) (0 \approx natural), 2, 4 e 6 $m\ s^{-1}$ para as variáveis altura de planta, na 1ª avaliação de verão (novembro de 2013) (a), N° ramos (b) e Número de brotos (N° brotos) nas plantas jovens de erva-mate na segunda avaliação de verão (dezembro/2013), sendo sombreamento 18% (■) e 35% (□). Santa Maria, RS, 2015.

Apesar de não ter sido significativamente diferentes a ocorrência de maior número de folhas nos tratamentos onde não houve aplicação de ventilação forçada (vento natural) e redução do menor número de folhas sob velocidade do vento de 6 $m\ s^{-1}$ era esperado em função de que as plantas sob ventilação natural provavelmente estiveram expostas a condição de menor estresse, assim como observado por Caramori et al. (1986) e Larcher (2004). Assim, tem-se uma resposta bem visível do estresse pelo vento, pois no tratamento com velocidade

do vento de 6 m s^{-1} e sombreamento de 18% na data de 14 de dezembro de 2013, além da menor emissão de folhas, foi observada queda de 4 folhas em média por erva.

Conforme Caramori et al. (1986), o estresse pelo vento com velocidade superior a 4 m s^{-1} , é causador da diminuição do crescimento nas diferentes variáveis de avaliação como altura, número de folhas, número e comprimento dos ramos. Para Larcher (2004) e Pascale e Damario (2004) o efeito de ventos fortes sobre as plantas é evidenciado no menor crescimento e na diminuição das variáveis fenométricas. Segundo estes autores, sob ventos fortes “*a planta investe em seu sistema radicular em detrimento da parte aérea*”, o que para culturas como da erva-mate é indesejável, visto que a folha é o produto colhido e processado para consumo.

No experimento 2 os resultados destes danos mecânicos podem ser percebidos na Figura 8c onde o aumento da velocidade do vento forçou as plantas de erva-mate a diminuir sua nova brotação ao mesmo tempo em que provavelmente houve uma possível realocação de fotoassimilados para fortalecer a estrutura dos ramos e maior crescimento do sistema radicular, para aumentar sua estabilidade diante do vento. No entanto, não ficou evidenciado o efeito do aumento da velocidade do vento na indução à senescência, embora esta tenha sido observada em uma das avaliações. Pode-se inferir então que as plantas jovens conseguiram se adaptar de certa forma para evitar a senescência das folhas, o que também se verifica sob condição de sombreamento excessivo.

Conforme Langre (2008) o atrito entre o ar e as estruturas das plantas como caule, folhas, flores, frutos e, em algumas plantas, raízes, faz com que o primeiro dano seja mecânico e afete diretamente o crescimento, o segundo dano relaciona-se mais ao desenvolvimento diretamente atrelado à morfofisiologia destes órgãos, fazendo com que a modificação estrutural dos tecidos atue nos processos fisiológicos de transpiração e fotossíntese, principalmente. A terceira linha seria a modificação de compostos das plantas, tanto em processo de transformação, quanto no armazenamento.

Alguns estudos com outras espécies corroboram para os resultados aqui obtidos com plantas jovens de erva-mate, tal como os de Caramori et al. (1986), que evidenciaram os efeitos do vento em mudas de café, no qual observaram uma redução significativa da altura e comprimento das plantas quando foram submetidas a ventos com velocidade superior a 2 m s^{-1} ($7,6 \text{ km h}^{-1}$). Em bananeiras Borges e Souza (2004) mencionam perdas por danos causados pelo vento estimados em 20 a 30% de quebra. Nesse sentido a cultura da bananeira suporta vento de até 40 km h^{-1} , porém as variedades de menor porte toleram ventos mais fortes, denotando que quanto maior a altura da cultura, mais acentuados são os efeitos

prejudiciais do vento. Em erveiras pode-se perceber que velocidades do vento de 6 m s^{-1} ou $21,6 \text{ km h}^{-1}$ afetam significativamente a emissão de novos brotos, bem como podem causar a queda de algumas folhas.

Em videira os trabalhos de Hamilton (1989) e Pedro Júnior et al. (1998) destacam o dano físico nos brotos e ramos novos, que devem ser tutorados ou amarrados, sendo que ventos moderados e constantes reduziram a produtividade das videiras, mas em erveiras jovens esse tipo de injúria não foi observado.

Quanto a massa seca (hastes, folhas e total) não houve significância para os resultados do Experimento 2 (Tabela 20), porém numericamente na ventilação forçada de 6 m s^{-1} houve menor acúmulo de massa seca total, apresentando a mesma tendência verificada em outras espécies. Assim como Langre (2008) destaca que o aumento da velocidade do vento pode contribuir para a redução de massa seca dos vegetais e diminuição da produção, Caramori et al. (1986) destacam que ocorre redução da massa seca em plantas jovens de cafeeiro e seringueira, respectivamente. As seringueiras nativas quando jovens crescem protegidas por estratos superiores de outras espécies, tal como o café e a erva-mate e, portanto, espera-se menor tolerância ao vento. Assim, existem clones de seringueira com propensão à quebra pelo vento que são descartados para produção de mudas (BENESI, 1999; BENESI; BENESI, s/a), o que provavelmente decorre da adaptação dessa espécie ao ambiente do estrato inferior da mata, ocorrendo menor estruturação e acúmulo de massa seca em lenho e celulose para a sustentação da planta.

A área foliar total (A.F total, cm^2), mensurada após o período de aplicação de vento nas avaliações do verão (dezembro/2013) obteve interação significativa entre os fatores sombreamento (18 e 35%) e velocidade do vento ($0 \approx$ natural), 2, 4 e 6 m s^{-1}) (Tabela 12) e resultou no ajuste de modelos quadráticos ($R^2 > 0,95$) para os resultados obtidos no verão (Figura 9a). Observa-se que no verão o aumento da velocidade do vento proporcionou a diminuição da área foliar total (Figura 9a), tal como indicam Pascale e Damario (2004), Lacher (2004) e Langre (2008). Sob ventilação de 0 m s^{-1} (natural) mediu-se maior média de área foliar, sendo que nos tratamentos de 4 m s^{-1} ela foi reduzida a menos da metade (Figura 9a). A mesma redução de área foliar nos tratamentos submetidos a maior velocidade de vento também foi significativa para o outono (Figura 9b).

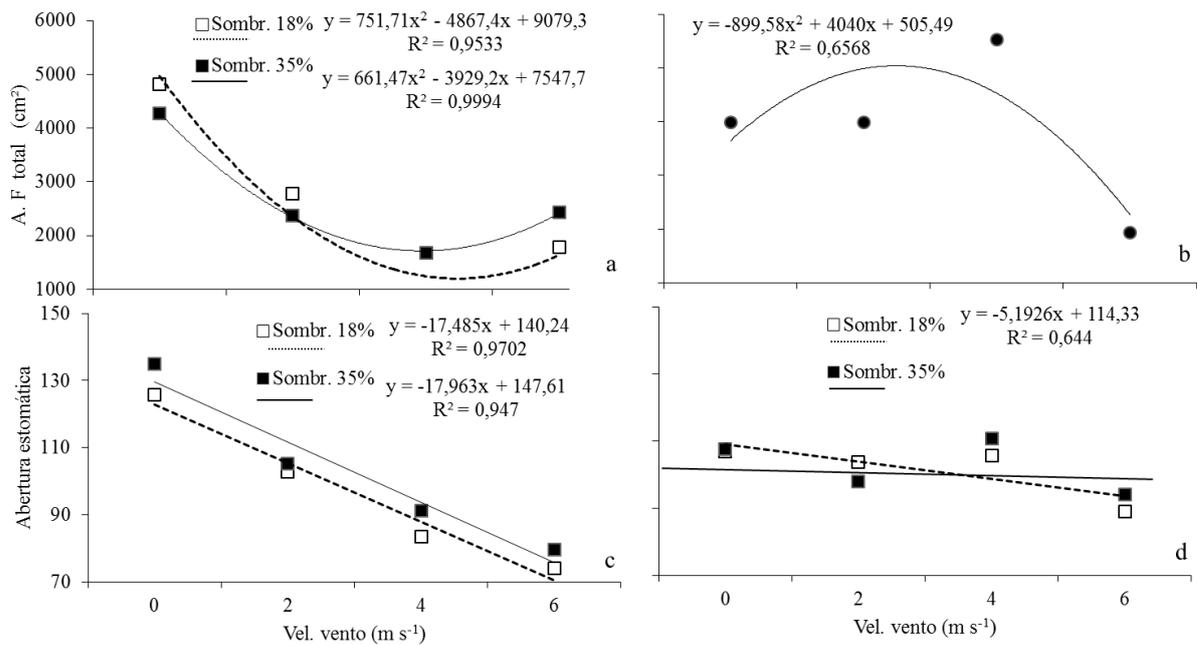


Figura 9 – Plantas jovens de erva-mate submetidas ao fator sombreamento (18 e 35%) e fator velocidade do vento (V) ($0 \approx$ natural), 2, 4 e $6 m s^{-1}$, sendo Área foliar total (A.F total, cm^2) nas plantas jovens de erva-mate com, em (a) interação entre os fatores, no verão (dezembro/2013) (a); A.F total em abril de 2013 com fator velocidade do vento significativo (b); interação da abertura estomática abertura estomática em folhas de erva-mate na data de 20/12/2013 após a aplicação de vento (c); interação da abertura estomática em folhas de erva-mate na data de 29/04/2014 após a aplicação de vento (d); (\square) médias dos tratamentos de vento no sombreamento de 18% e (\blacksquare) médias dos tratamentos de vento no sombreamento de 35%. Santa Maria, RS, 2015.

Quanto à área foliar total Caramori et al. (1986) demonstraram que em mudas de caféiro os efeitos adversos do vento aparecem com velocidades superiores a $2 m s^{-1}$, havendo diminuição da área foliar. Nas erva-mate jovens do experimento 2, observa-se essa diminuição de área foliar total, sendo concordantes os resultados de Caramori et al., (1986).

A abertura estomática obteve interação significativa entre os fatores sombreamento (18 e 35%) e velocidade do vento ($0 \approx$ natural), 2, 4 e $6 m s^{-1}$) (Tabela 12, Figuras 9c, 9d). Na avaliação da abertura estomática para estação do verão, no final do período da aplicação da ventilação forçada, para os tratamentos com 18% de sombreamento, a abertura estomática foi maior no tratamento com ventilação natural e menor no tratamento com $6 m s^{-1}$ de velocidade do vento. O efeito da velocidade do vento pode ser descrito por uma função linear com coeficiente de determinação de 0,97 (Figura 9c). Observou-se uma média de 125 estômatos abertos no tratamento com ventilação natural e 18% de sombreamento, enquanto no tratamento com velocidade de $6 m s^{-1}$ apenas 70 estômatos estavam abertos, apresentando assim uma diferença de 46,2%. Para abertura estomática nas diferentes velocidades do vento

com as plantas sob sombreamento de 35% (Figura 9c) também houve ajuste de um modelo linear aos dados ($R^2 = 0,94$), similar ao verificado para a condição de 18% de sombreamento, mas com decréscimo mais acentuado entre a ventilação natural e a maior velocidade.

Em ventilação natural (veloc. vento $\approx 0 \text{ m s}^{-1}$), na data de 20/12/13 (verão) a densidade de estômatos abertos foi de 128 e de 135 para 18% e 35% de sombreamento respectivamente, enquanto que em 28/04/14 (outono) foi um pouco menor, com cerca de 110 estômatos abertos em ambos os tratamentos de sombreamento (Figura 9d). Com a aplicação de vento artificial com maior velocidade, ocorreu uma redução no número de estômatos abertos à medida que a velocidade do vento foi aumentada para 6 m s^{-1} , mas significativo apenas nos tratamentos com 18% de sombreamento. Essa diferença de resposta pode estar associada a outros elementos micrometeorológicos, tais como maior temperatura e déficit de saturação de vapor d'água no ar no levantamento de dados de dezembro, pois se estas se apresentaram com valores próximos ou no limite da condição de estresse, com o aumento da velocidade do vento passaram ter efeito de estresse mais pronunciado.

Apesar da manutenção de alto teor de umidade no solo por irrigação localizada por gotejamento, o aumento da velocidade do vento em condição de alta temperatura, déficit de saturação do ar e disponibilidade de radiação solar provavelmente aumentou a taxa de transpiração (ANGELOCCI, 2002) a ponto de reduzir o potencial da água nas folhas o suficiente para induzir o fechamento de parte dos estômatos (TAIZ; ZEIGER, 2013). Nesse sentido, pode-se deduzir ainda que a exposição das plantas de erva-mate a pleno sol ou a um sombreamento menor do que 18% em dias ensolarados e quentes no verão pode condicioná-las a estresse de água na folha a velocidades de vento ainda baixas ou mesmo sob a condição de calmaria mesmo com boa disponibilidade de água no solo, mas no outono esse estresse por vento nessas condições de umidade do solo é pouco pronunciado, pelo menos até 6 m s^{-1} .

Assim, considerando a aplicação prática desses resultados, verifica-se que a erva-mate precisa ser protegida por sombreamento parcial durante o verão e, preferencialmente, de tal forma que a arquitetura arbórea utilizada para o sombreamento também reduza a velocidade do vento o suficiente para evitar o estresse em dias muito quentes, ventosos e com baixa umidade no ar. Já para a condição de final de abril (e provavelmente durante todo o inverno), o sombreamento pode ser considerado desnecessário e, portanto, deve-se dar preferência ao uso de árvores caducifólias.

Os estômatos tem um importante papel regulador nas trocas gasosas das folhas e a eficiência dessa regulação pode impactar a produtividade das culturas agrícolas (TAIZ; ZEIGER, 2013). Quanto a botânica estrutural da disposição de estômatos na erva-mate,

Mariath et al. (1995) predominou a presença de um par de células, similares as células guardas de estômato, porém com aspecto morfológico irregular, atípico.

Segundo Esau (1974) e Raven et al. (2007), na epiderme da folha os estômatos podem ocorrer em ambos os lados da folha, ou seja, nas faces adaxiais e abaxiais, porém na erva-mate observou-se somente na face abaxial. Plantas com estômatos em ambas as faces, comumente, permitem que a perda de água pela transpiração seja minimizada e/ou impedem que o excesso de água da chuva bloqueie o poro estomático (ESAU, 1974), o que teoricamente parece contraditório. Conforme Azevedo (2007) a presença de estômatos nas faces abaxiais e adaxiais facilita a difusão e absorção de dióxido de carbono, bem como facilita a transpiração. Estas características estão diretamente relacionadas à restrição de perda de água e tolerância as altas taxas de irradiação permitindo uma fixação eficiente do CO₂. Dessa forma, considerando que na erva-mate só se registrou a presença de estômatos na face abaxial, infere-se que as trocas gasosas sejam maiores nessa face do que em outras espécies.

Os dados do experimento 2 comprovam para erva-mate que para velocidades de vento maiores do que 2 m s⁻¹, ocorre fechamento estomático no verão, assim como os resultados de Caramori et al. (1986), comprovam que ventos superiores a 2 m s⁻¹ estão associados ao fechamento estomático e possível diminuição da transpiração de cafeeiro. Para Hamilton (1989), em videiras o estresse pelo vento causa danos físicos e fisiológicos, visto que com velocidades superiores a 4 m s⁻¹ a transpiração é reduzida pelo fechamento dos estômatos, fato associado à diminuição da produtividade.

Os resultados das análises fenométricas (massa fresca, massa seca e área foliar) e colorimétrica (Luminosidade “L” adaxial e abaxial e ângulo HUE “°H” adaxial e abaxial), das três folhas apicais desenvolvidas (3^a, 4^a e 5^a folhas abaixo do ápice), são apresentadas na Tabela 13.

A área do limbo foliar (cm²) das folhas apicais nas avaliações do verão e de outono, quando da aplicação dos tratamentos das diferentes velocidades do vento foi significativa para o fator velocidade do vento (0 ≈ natural, 2, 4, 6 m s⁻¹), na estação do verão (Tabela 13, Figura 10a). Verifica-se que a área foliar para os tratamentos de diferentes velocidades do vento com sombreamento de 18% diminui com o aumento da velocidade até cerca de 3 m s⁻¹ e aumenta para velocidades maiores. Assim, o tratamento com maior velocidade do vento (6 m s⁻¹) apresentou a maior área de limbo foliar por folha, com 25 cm² (Figura 10a). Esse valor é contraditório ao que se encontra na literatura, onde velocidades maiores de vento determinam que as folhas ou folíolos de folhas compostas sejam menores devido ao estresse mecânico (LANGRE, 2008; RESENDE et al., 2011).

Tabela 13 – Análise da variância das variáveis fenométricas e colorimétricas das três folhas apicais desenvolvidas (3^a, 4^a e 5^a folhas abaixo do ápice) relativas ao Experimento 2 (sombreamento X velocidade do vento), sendo duas avaliações de 1^a e 2^a avaliação de verão (novembro e dezembro/2013, 1^a e 2^a avaliação respectivamente) e uma avaliação de outono (abril/2014), que se compôs em um bifatorial com fator (A) sombreamento (18 e 35%) e fator (D) velocidade do vento (0 (\approx natural), 2, 4 e 6 m s⁻¹) com 3 repetições.

Váriavel	Avaliação	Fator (A) Sombr.	Fator (D) Vel. Vento	Interação (A x D)	Erro	CV ⁶ %	Média geral	
mf ¹ (g)	Ver.	QME	0,0086	0,0675	0,0179	0,0278	24,88	0,64
		Pvalor	0,5860	0,1030	0,5960	-		
	Out.	QME	0,0281	0,0115	0,0252	0,0266	37,58	0,75
		Pvalor	0,3180	0,7320	0,4410	-		
ms ² (g)	Ver.	QME	0,0090	0,0729	0,0236	0,34	27,38	0,23
		Pvalor	0,6130	0,1350	0,5680	-		
	Out.	QME	0,0197	0,0080	0,0218	0,0222	24,69	0,26
		Pvalor	0,3600	0,7800	0,4260	-		
A. F ³ (cm ²)	Ver.	QME	0,0016	0,0408	0,0112	0,0132	9,02	19,66
		Pvalor	0,7280	0,0570*	0,4890	-		
	Out.	QME	0,0253	0,0087	0,0253	0,059	11,58	26,08
		Pvalor	0,3370	0,7980	0,4280	-		
L ⁴ (adaxial)	Ver.	QME	0,0033	0,0059	0,0002	0,002	2,64	52,91
		Pvalor	0,2210	0,0670	0,9340	-		
	Out.	QME	0,0081	0,0004	0,0008	0,0003	3,63	49,39
		Pvalor	0,1590	0,9410	0,9550	-		
H ⁵ (adaxial)	Ver.	QME	0,0000	0,0010	0,0003	0,0005	1,10	123,96
		Pvalor	0,9820	0,9310	0,5760	-		
	Out.	QME	0,0016	0,0023	0,0026	0,0035	2,85	120,22
		Pvalor	0,5040	0,5800	0,0541*	-		
L (abaxial)	Ver.	QME	0,0007	0,0025	0,0002	0,0005	1,29	61,48
		Pvalor	0,2450	0,0767*	0,0140*	-		
	Out.	QME	0,0004	0,0060	0,0091	0,0027	3,67	27,04
		Pvalor	0,0707*	0,1250	0,054*	-		
H ⁵ (abaxial)	Ver.	QME	0,0000	0,0001	0,0001	0,0001	0,53	121,26
		Pvalor	0,8140	0,2880	0,7130	-		
	Out.	QME	0,0000	0,0000	0,0001	0,0001	0,64	119,36
		Pvalor	0,7400	0,8910	0,7530	-		

* Probabilidade do erro de 0,10; ¹ massa fresca (mf); ² massa seca (ms); ³ Área foliar (A.F); ⁴ Luminosidade (L); ⁵ Ângulo de tonalidade HUE (°H) e

⁶ Coeficiente de Variação (CV)

No entanto, devido à limitação de conduzir o experimento na condição de campo, a aplicação dos tratamentos de velocidade do vento (não aplicável à noite devido ao molhamento dos motores elétricos por orvalho) ocorreu em apenas 21 dias, sendo estes distribuídos em períodos relativamente curtos (05/11 a 19/12/13 no verão e 19/03 a 28/04/2014 no outono), pois a aplicação estava programada para dias alternados e nos dias com precipitação pluviométrica os ventiladores eram recolhidos. Assim, parte do crescimento das três folhas colhidas para a determinação da área do limbo foliar provavelmente ocorreu antes da aplicação das diferentes velocidades do vento. Também é possível que a aplicação de vento artificial, realizada apenas no período diurno em dias alternados, isto quando possível, não produziu estresse contínuo nas folhas, permitindo a expansão do limbo foliar durante a

noite e ou nos dias sem aplicação de vento. Assim, os resultados de área do limbo foliar, obtidos no verão no experimento 2, não podem ser tomados como definitivos e carecem de experimentos adicionais para elucidar melhor essa resposta.

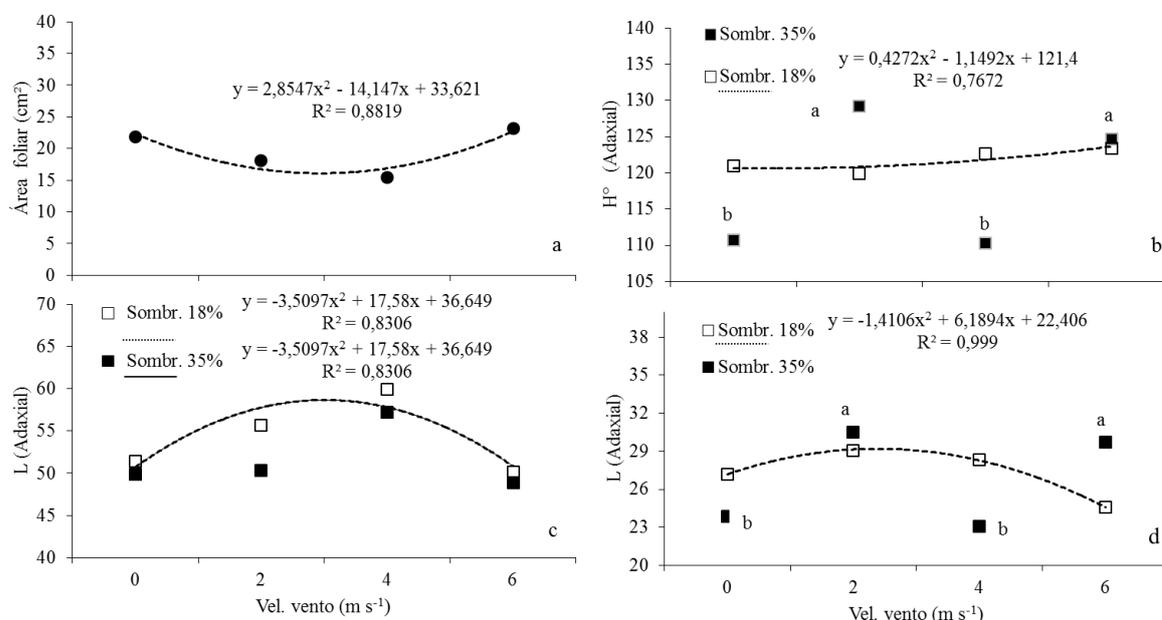


Figura 10 – Avaliações fenométricas e colorimétricas das três folhas apicais (3^a, 4^a e 5^a folhas abaixo do ápice) de plantas jovens de erva-mate submetidas ao fator sombreamento (18 e 35%) e fator velocidade do vento (V) (0 ≈ natural), 2, 4 e 6 m s⁻¹, sendo Área foliar (cm²) demonstrando interação entre os fatores, realizadas em 20 de dezembro de 2013 (a); Ângulo H° da parte adaxial das folhas de erva-mate demonstrando a interação entre os fatores, em abril de 2014 (b); Luminosidade (L) na face adaxial em dezembro de 2013, mostrando a interação entre os fatores (c); Luminosidade (L) na face adaxial em abril de 2014, mostrando a interação entre os fatores (d); médias dos tratamentos de vento no sombreamento de 18% (□); médias dos tratamentos de vento no sombreamento de 35% (■) e para onde não se encontrou modelo matemático significativo são apresentadas as diferenças entre os tratamentos pelo Teste de Tukey (p<0,05) Santa Maria, RS, 2015.

Quando analisados os resultados referentes das três folhas apicais desenvolvidas (3^a, 4^a e 5^a folhas abaixo do ápice), que estão mais expostas ao maior estresse por vento, os efeitos de redução de área foliar e da massa fresca e seca das folhas não foram verificados (Tabela 13). Portanto para essas variáveis nas condições do experimento o efeito do vento não foi no crescimento, mas sim nas respostas fisiológicas como fotossíntese e transpiração, mostrando certa adaptabilidade das folhas. Conforme Esau (1974) descreve, a adaptabilidade dos tecidos, principalmente dos cuticulares e da epiderme, faz com que em condições de estresse de temperatura ou vento a planta se ampare morfoanatomicamente, havendo espessamento dos

tecidos da planta para evitar danos mecânicos e fisiológicos como a queda da transpiração e fotossíntese.

Mariath et al. (1995), destacam que a erva-mate possui uma estrutura abaxial reforçada com estômatos, sendo discutida a presença de estômatos na face adaxial, uma vez que raramente aparecem. Esse fator é relevante comparando-se os dados pontuais de fenometria da área foliar e massa fresca e seca das folhas do experimento 1, pois como a face adaxial é mais exposta ao vento e à radiação solar, as estruturas estomáticas ficam protegidas, atenuando a ocorrência de sintomas de estresse pelo vento em partes localizadas.

Na Tabela 13 e Figura 10b mostra-se a interação significativa entre o fator sombreamento (18 e 35%) e velocidade do vento (0 (\approx natural), 2, 4 e 6 m s⁻¹) para o ângulo °H na face adaxial, na avaliação de verão, realizada em 20 de dezembro de 2013. A tonalidade para face adaxial no verão no tratamento com sombreamento 35% e velocidade do vento 2 m s⁻¹ foi maior (128°H), mostrando-se diferenças pelo teste de Tukey, pois não encontrou-se modelo significativo (Figura 10b). Já nos tratamentos com sombreamento de 35% o maior valor (124°H) ocorreu com e velocidade de 6 m s⁻¹, com tendência quadrática ($R^2 = 0,76$), o que mostra que com maior sombreamento, o aumento da velocidade do vento, no verão, causou um aumento na tonalidade. Quanto a luminosidade (L) na face adaxial nas avaliações de verão e outono (Tabela 13, Figura 10c, 10d) obteve-se interação entre os fatores sombreamento (18 e 35%) e velocidade do vento (0 (\approx natural), 2, 4 e 6 m s⁻¹) obtendo-se maior luminosidade nos tratamentos com velocidade do vento intermediária entre 2 e 4 ms⁻¹ (Figura 10c, 10d).

Assim, na avaliação de colorimetria das folhas expostas à ventilação forçada, o que se observa é que a luminosidade e a tonalidade verde são mais fortes na face adaxial das folhas de plantas jovens de erva-mate, havendo tendência de um incremento da cor verde. Isso ocorre provavelmente por estresse ambiental (RAVEN, 2007; TAIZ; ZEIGER, 2013), como por exemplo, o vento provoca aumento da concentração de pigmentação de clorofila, para maximização dos processos fisiológicos e metabolismo primário e secundário da planta, o que não se evidenciou de forma clara considerando as velocidades aplicadas. No entanto, pode explicar porque no verão L e °H foram maiores que no outono.

Outros aspectos relevantes quanto à colorimetria das erva-mate jovens expostas a ventilação forçada é que no verão a luminosidade foi maior do que no outono (Tabela 13), pois, segundo Taiz e Zeiger (2013), a diminuição da radiação solar favorece a acumulação de clorofila diminuindo sua oxidação, por isso as folhas ficam mais escuras. Isso pode estar relacionado às folhas que se tornam mais espessas em condições de estresse (LARCHER,

2004; PASCALE; DAMARIO, 2004). Conforme Larcher (2004), a cor esta relacionada a mudanças fisiológicas nas moléculas de clorofila que podem desencadear modificações da morfologia e fisiologia das folhas.

4.3.3 Composição físico-química das folhas de erva-mate sob o efeito de diferentes velocidades do vento (Experimento 2)

A quantificação do teor de polifenóis totais, flavonoides e capacidade antioxidantes, nas amostras de folhas submetidas aos tratamentos de vento ($0 \approx$ natural, 2, 4, 6 $m s^{-1}$) no final da 2ª avaliação de verão (20/12/2013) e final da 3ª avaliação (27/04/2014) no outono, têm seus resultados apresentados na Tabela 14.

Os polifenóis totais tiveram maiores médias no verão de 2013, no sombreamento 35% com velocidade do vento de 0 $m s^{-1}$ (101,32 mg EAG L^{-1}) e de 2 $m s^{-1}$ (98,27 mg EAG L^{-1}) (Tabela 14). A menor quantidade de polifenóis foi observada no tratamento com sombreamento 18% com 2 $m s^{-1}$, com 61,48 mg EAG L^{-1} (Tabela 14). Já no outono, não houve diferenças significativas entre os tratamentos, porém o acúmulo de polifenóis foi 30% maior do que no verão. Com relação aos flavonoides (Tabela 14) tanto no verão quanto no outono não houve diferenças significativas, assim como ocorreu à mesma tendência dos polifenóis que, no outono acumulou-se 25% a mais do que no verão.

Canterle (2005) destaca que a capacidade antioxidante (CA) na erva-mate para chimarrão auxilia o metabolismo humano. Observou diferenças na CA dos produtos disponíveis no mercado, provavelmente devido às diferenças de ambiente de origem de produção e tempo de armazenamento. Para o mercado consumidor uma erva-mate com maior CA é melhor, como destaca Daniel (2009), levando ao interesse da indústria pelos antioxidantes naturais para conservação de alimentos.

Quanto à capacidade antioxidante, nas erva-mates jovens, expostas a ventilação artificial, são apresentados os métodos de FRAP e ABTS (Tabela 14). No método de FRAP, observa-se que a velocidade do vento não influenciou na CA, porém a tela de sombreamento de 18% associado à velocidade do vento de 6 $m s^{-1}$ gerou um estresse suficiente reduzindo assim sua capacidade antioxidante (Tabela 14) o que também é observado pelo método de ABTS apesar deste ser menos sensível.

Tabela 14 – Teores de polifenóis totais (mg EAG L⁻¹) e flavonoides (mg ECA L⁻¹) na concentrações de 20% de solvente etanólico em folhas maduras de plantas jovens de erva-mate cultivadas em sombreamento de 18 e 35% e submetidas a quatro velocidades de vento (v*), coletadas no verão de 2013 e no outono 2014. Santa Maria, RS, 2015.

Concentração do solvente e tratamentos	Polifenóis totais (mg EAG L ⁻¹)		Flavonoides (mg ECA L ⁻¹)	
	Verão	Outono	Verão	Outono
	(Dez/2013)	(Abr/2014)	(Dez/2013)	(Abr/2014)
S18% ¹ v0 ²	87,07 ab	115,72 a	100,40 a	133,66 a
S35%v0	101,32 a	143,14 a	75,54 a	143,90 a
S18%v2	61,48 b	144,40 a	61,06 a	79,12 a
S35%v2	98,27 a	113,30 a	97,03 a	139,59 a
S18%v4	85,87 ab	129,28 a	50,09 a	144,12 a
S35%v4	80,68 ab	146,88 a	64,57 a	133,23 a
S18%v6	72,21 ab	113,30 a	61,79 a	109,17 a
S35%v6	89,29 ab	115,48 a	74,00 a	115,46 a
	ABTS ⁴ (mM TROLOX L ⁻¹)		FRAP ³ (mM TROLOX L ⁻¹)	
	Verão	Outono	Verão	Outono
	(Dez/2013)	(Abr/2014)	(Dez/2013)	(Abr/2014)
S18%v0	7,09 ab	7,26 b	0,99 ab	2,32 ab
S35%v0	8,00 a	9,15 a	1,29 a	2,29 ab
S18%v2	5,61 bc	6,40 b	0,95 ab	1,98 ab
S35%v2	4,69 c	4,96 c	1,24 a	1,51 b
S18%v4	2,69 de	2,94 d	1,17 ab	2,44 ab
S35%v4	4,14 cd	4,19 c	0,98 ab	3,70 a
S18%v6	0,87 f	0,90 e	0,84 b	2,16 ab
S35%v6	1,85ef	1,72 e	0,98 ab	2,07 b

¹percentual de sombreamento (S18% e S35%), ² velocidade do vento (0 = vento natural, 2 = 2 m s⁻¹, 4 = 4 m s⁻¹, 6 = 6 m s⁻¹), ³ FRAP - *Ferric Reducing Antioxidant Power* e ⁴ ABTS - Ácido 2,2'-azino-bis (3-etilbenzotiazolin) 6-ácido sulfônico). Letras minúsculas diferentes na mesma coluna correspondem à diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste de Tukey (p<0,05) n = 3.

No entanto na estação do outono a velocidade do vento pode contribuir para o aumento da capacidade antioxidante. Este fato pode ser observado com o sombreamento de 35% sob vento de 4 m s⁻¹ que obteve a maior capacidade antioxidante, mas no mesmo sombreamento com velocidade do vento de 2 m s⁻¹ obteve-se a menor CA pelo método de

FRAP (Tabela 14). Desta forma pode-se inferir que a velocidade de 4 m s^{-1} com baixa incidência de radiação solar e temperaturas mais amenas podem contribuir para qualidade da erva-mate, apesar de não estar correlacionado com os compostos fenólicos totais ($r_p = 0,43$) e flavonoides ($r_p = 0,16$). Portanto, esta capacidade antioxidante pode estar relacionada a um pequeno grupo de compostos fenólicos ou outros antioxidantes naturais, tais como os carotenoides. Conforme relatam Larcher (2004) e Pascale e Damario (2004), as condições de estresse das plantas derivariam seus produtos fisiológicos, que é o metabolismo secundário. Logo o aumento da velocidade até 4 m s^{-1} do vento faz com que as erva-mates jovens aumentem a sua atividade antioxidante, tentando minimizar o estresse nas plantas.

Porém, no método ABTS observa-se que a maior capacidade antioxidante foi conferida as plantas sob 35% de sombreamento e não submetidas à ventilação (Tabela 14). Confirmando os dados obtidos no Experimento 1 onde conclui-se que o sombreamento a 35% é mais eficaz e também que método de FRAP é mais sensível que o ABTS. Dessa forma fica claro que a exposição de plantas jovens ao vento reduz sua capacidade antioxidante no verão (Tabela 14). Também ficou evidenciado que o sombreamento parcial de cerca de 35% atenua a redução da capacidade antioxidante da erva-mate, principalmente sob velocidades de vento $\geq 4 \text{ m s}^{-1}$, assim como já discutido no Experimento 1 no item 4.2.4.

Considerando que esses resultados foram obtidos em um verão quente em Santa Maria – RS e considerando os resultados obtidos por Suertegarray (2002) em Gentil - RS, em plantas adultas, pode-se inferir que se o objetivo é produzir erva-mate com maior capacidade antioxidante, visando atender certos fins industriais e comerciais, as erva-mates devem ser conduzidas com pouco sombreamento em torno de 35% e protegidas de ventos fortes. De modo geral, a hipótese de que a aplicação de estresse poderia incrementar a produção de produtos metabólicos secundários desejáveis ao produto colhido fica parcialmente confirmada até 4 m s^{-1} e refutada maiores velocidade do vento nas condições ambientais em que se desenvolveram os experimentos no atual trabalho.

5 CONCLUSÕES

Com as plantas jovens de erva-mate submetidas à cobertura do solo, sombreamento e diferentes velocidades do vento nas condições meteorológicas do período experimental, pode-se concluir que:

- O solo coberto com palha é melhor para o estabelecimento e crescimento inicial da erva-mate, havendo um maior incremento de massa seca, área foliar e coloração verde mais intensa das folhas;
- O sombreamento de 35 e 50% são mais eficientes no crescimento e desenvolvimento das erva-mates obtendo-se maior número de folhas, altura das plantas, número de brotos novos e de ramos, e comprimento de ramos;
- A produção de massa seca da parte aérea total não é afetada significativamente pelo sombreamento, porém tende a ser maior quando as plantas jovens recebem sombreamento de 35 a 50%;
- A produção de massa seca das hastes é maior nos sombreamentos de 35 a 50%;
- A temperatura da nervura das folhas é menor sob sombreamento de 50% do que sob sombreamento de 18% ou a pleno sol nos dias de maior demanda atmosférica no verão, enquanto no outono é similar em todos os níveis de sombreamento avaliados;
- As folhas das erva-mates expostas a sombreamentos de 35 e 50% são mais escuras quanto à luminosidade e apresentam cor verde mais intensa;
- A abertura estomática é maior nas folhas de erva-mates jovens expostas a sombreamentos de 35 e 50%;
- O sombreamento de 35% é mais eficaz no verão para o acúmulo de compostos fitoquímicos como polifenóis, principalmente do grupo dos flavonoides, o que amplia a capacidade antioxidante da erva-mate;
- O outono é a melhor época de colheita das folhas das erva-mates, para obter melhor qualidade em acúmulo de compostos fenólicos e flavonoides;
- Para análise da capacidade antioxidante da erva-mate, o método de FRAP é mais adequado do que o método ABTS;
- A ventilação forçada acima de 2 m s^{-1} diminui a temperatura da nervura das folhas de erva-mate no verão, sendo que ventos acima de 4 m s^{-1} diminuem

expressivamente a brotação com tendência de diminuição de área foliar e massa seca;

- Nas velocidades de vento $\geq 2 \text{ m s}^{-1}$ a abertura estomática é menor;
- A coloração das folhas de erva-mate pouco se altera pelo aumento da velocidade do vento até 6 m s^{-1} , sendo que na face adaxial os ventos acima de 4 m s^{-1} tendem a ter maior luminosidade e cor verde menos intensa;
- O vento pouco altera a composição fitoquímica das erveiras jovens, sendo que velocidades de 4 m s^{-1} , no outono, aumentam a concentração de polifenóis, porém estes não estão relacionados aos flavonoides, pertencendo a outros grupos de polifenóis, e a capacidade antioxidante nesse caso não tem correlação com os compostos fenólicos e flavonoides.

REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998, 297p.

ALVARENGA, A. A.; CASTRO, E. M.; LIMA JUNIOR, É. de C.; MAGALHAES, M. M. Effects of different light levelson the initial growthand photosynthesis of *Crotonurucurana* Baill. Insoutheastern Brazil. **Rev. Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 1, p. 53-57, 2003.

ANDRIOLO, J. L. **Fisiologia das culturas protegidas**. Santa Maria, RS: UFSM, 1999. 142p.

AZEVEDO, C. S. **Anatomia e ultra-estrutura foliar de *Pectis brevipedunculata* ontogenia de cavidades secretoras e estrutura de Kranz**. 2007. 52f. Dissertação (Mestrado em Botânica) UFV, Viçosa, 2007.

BENESI, J. F. C.; BENESI, E. C. P. G. **Preparo de Mudás, Plantio e Condução de Seringais**. São Paulo: Congresso da Seringueira, s/a. Disponível em: <http://www.incaper.es.gov.br/congressos/congresso_seringueira/downloads/apresentacao_palestras/Jose_Fernandes/palestra.pdf> Consultado em 12/12/2014.

BENESI, J. F. C. (Coord.). **A cultura da seringueira para o Estado de São Paulo**. Campinas: CATI, 1999. 90p.

BENZIE, I. F. F.; STRAIN, J. J. The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of antioxidant power: The FRAP assay. **Analytical Biochemistry**, v. 239, n. 1, p. 70-76, 1996.

BERGER, G. **Biomassa e nutrientes em plantios de erva-mate (*Ilex paraguariensis* A. ST.-Hil.), no município de Nova Prata, RS**. 2006. 93f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

BERTAGNOLLI, S. M. M. et al. Influência da maceração carbônica e da irradiação ultravioleta nos níveis de trans-resveratrol em vinhos de uva cabernet sauvignon. **Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas**, v. 43, p. 71-77, 2007.

BORGES, A. L.; SOUZA, L. da S. Cultivo da bananeira. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**. Cruz das Alma, Bahia, p. 21, 119, 120, 150, 151, 157, 2004.

BORILLE, A. M. W.; REISSMANN, C. B.; FREITAS, R. J. S. Relação entre compostos fitoquímicos e o nitrogênio em morfotipos de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.). **Boletim do CEPPA**, v. 23, n. 1, p. 183-196, 2006.

BRACKMANN, A. et al. Atmosfera controlada para o armazenamento de goiaba cultivar 'Paluma'. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 59, n. 2, p. 151-156, mar./abr., 2012.

BRAND-WILLIAMS, W.; CUVELIER, M. E.; BERSET, C. Use of free radical method to evaluate antioxidante activity. **Lebensmittel-Wissenschaftund-Technologie**, v. 22, n. 1, p. 25- 30, 1995.

CALBO, M. E. R.; MORAES, J. A. P. V. Fotossíntese, condutância estomática, transpiração e ajustamento osmótico de plantas de buriti submetidas a estresse hídrico. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 9, p. 117-123, 1997.

CANTERLE, L. P. **Erva-mate e atividade antioxidante**. 2005. 99f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

CARAMORI, P. H.; OMETTO, J. C.; VILLA NOVA, N. A.; COSTA, J. D. Efeitos do vento sobre mudas de cafeeiro mundo novo e catuaí vermelho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 21 (11), p. 1113-1118, 1986.

CARAMORI, P. H. **Caracterização dos efeitos do vento sobre mudas de cafeeiro (*Coffea arábica*, L.), cv. Mundo Novo e Catuaí Vermelho**. 1981, 81f. Dissertação (Mestrado em Agrometeorologia), ESALQ/USP, Piracicaba, 1981.

CARNEIRO, C.; REISSMANN, C. B.; MARQUES, R. Comparação de Método de Análise Química de K, Ca, Mg e Al em Folhas de Erva-Mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.). **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 113-122, abr./jun., 2006.

CARON et al. Biomassa e acúmulo de nutrientes em *Ilex paraguariensis*. St. Hil. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 24, n. 2, p. 1-10, abr./jun., 2014.

CARON, B. O.; SCHMIDT, D.; MANFRON, P. A.; BEHLING, A.; ELOY, E.; BUSANELLO, C. Eficiência do uso da radiação solar por plantas *Ilex paraguariensis* cultivadas sob sombreamento e a pleno sol. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 24, n. 2, p. 1-9, abr./jun., 2014.

CARON, B. O. et al. Relações fisiológicas em mudas de pata-de-vaca (*Bauhinia forficata* Link). **Revista Brasileira de Plantas Medicinai**s. v. 16, n. 2, p. 196-201. 2014.

CARVALHO, C. M. et al. Comportamento ecofisiológico das culturas de milho e feijão-de-corda sob diferentes condições de cultivo. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, v. 2, n. 2, p. 75-83, 2009.

CARVALHO, P. E. R. **Espécies florestais brasileiras: recomendações silviculturais, potencialidades e uso da madeira**. Colombo: Embrapa - CNPF; Brasília: Embrapa-SPI, 639p., 1994.

CATAPAN, M. I. S. **Influência da temperatura, substrato e luz na germinação de sementes de *Ilex paraguariensis* St. Hil.** 1998. 108f. Dissertação (Mestrado Engenharia Florestal)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 1998.

CIA, P. et al. Quitosana no controle pós-colheita da podridão mole em caqui 'rama forte'. **Bragantia**, Campinas, v. 69, n. 3, p. 745-752, 2010.

COELHO, G. C.; MARIATH, J. E. de A. & SCHENKEL, E. P. Populational diversity on leaf morphology of maté (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil., Aquifoliaceae). **Brazilian Archives of Biology and Technology**, p. 45:47-51, 2002.

COSTA, G. F.; MARENCO, R. A. Fotossíntese, condutância estomática e potencial hídrico foliar em árvores jovens de andiroba (*Carapaguianensis*). **Acta Amazonica**, v. 37, p. 229-234, 2007.

DA CROCE, D. M.; NADAL, R. Viabilidade técnico-econômica de sistemas de produção de erva-mate (*Ilexparaguariensis* A. St. Hil.) consorciada com culturas anuais. In: **Erva- mate: Biologia e cultura no Cone Sul** / organizado por Helga Winge, Alfredo Gui Ferreira, Jorge Ernesto de Araújo Mariath e Luiz Carlos Tarascone. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 1995. 47-54p.

DALMAGO, G. A. et al. Evapotranspiração máxima e coeficiente de cultura do pimentão em estufa plástica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 11, n. 1, p. 33-41, 2003.

DANIEL, O. **Erva-mate: sistema de produção e processamento industrial** / Omar Daniel. Dourados, MS : UFGD ; UEMS, 2009. 288p.

DARTORA, N. **avaliação dos polissacarídeos e metabolitos secundários das folhas de erva-mate (*Ilexparaguariensis*) em diferentes estados fisiológicos e de processamento**. 2010. 109f. Dissertação (Ciências Bioquímica)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 2010.

DONADUZZI, C. M.; COELHO, S. R. M.; CARDOSO JUNIOR, E. L.; GALLO, A. G.; HUPPES, G. K.; KUHN, I. M. V.; SCHICHEL, C. Teores de cafeína, polifenóis totais e taninos em amostras de erva-mate comercializadas na região de Toledo Paraná. In: CONGRESSO SUL-AMERICANO DA ERVA-MATE, 2.; REUNIAO TECNICA DA ERVA-MATE, 3., 2000, Encantado. **Anais..** Porto Alegre: Comissão dos Organizadores; Universidade do Rio Grande do Sul; Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária, 2000. p. 158-161.

DURIGAN, G.; SIMÕES, J. W. Quebra-ventos de *Grevillea robusta* A. Cunn. Efeitos sobre a velocidade do vento, umidade do solo e produção do café. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF), n. 36, ago., p. 27-34, 1987.

DUTRA, F. L. G.; HOFFMANN, R.; RIBANI, M. determinação de compostos fenólicos por cromatografia líquida de alta eficiência isocrática durante estacionamento da erva-mate. **Quim. Nova**, v. 33, n. 1, p. 119-123, 2010.

EDWIN, G.; REITZ, R. Aquifoliáceas. Flora Ilustrada Catarinense, Itajaí, I Parte: as Plantas, Fascículo: **AQUI**, dez. 1967. 47p.

EMBRAPA. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**. Acesso na Internet. Disponível em :http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Ervamate/CultivodaErvaMate/01_importancia_socioec.htm. Acesso em 20 de maio de 2012. Publicado em 2005.

ESAU, K. **Anatomia das plantas com semente**. São Paulo: Edgard Blücher, 1974.293p.

ESCALADA, G.; BRUMOVSKY, L. A.; HARTWIG, V. G. Influencia de la zona de cultivo y procesamiento de la yerba mate sobre su contenido de polifenoles totales y capacidad antioxidante. **Revista Ciência e Tecnologia**, Piracicaba, v. 13, n. 15, p. 66-74, 2011.

FAHL, J. I.; CARELLI, M. L. C.; VEGA, J.; MAGALHÃES, A. C. Nitrogen and irradiance levels affecting net photosynthesis and growth of young coffee plants (*Coffea Arabica* L.). **Journal of Horticultural Science**, Ashford, v. 69, p. 161-169, 1994.

FERREIRA, A. G.; KASPARY, R.; FERREIRA, H. B.; ROSA, L. M. Proporção de sexo e polinização em *Ilex paraguariensis* St. Hil. Brasil Florestal, n. 53, p. 29-33, jan./mar., 1983.

FERREIRA, A. G.; ALMEIDA, J. S.; CUNHA, G. G. **Fisioecologia de *Ilexparaguariensis* St. Hil.com ênfase na embriologia experimental**. In: REUNIÃO TÉCNICA DO CONE SUL SOBRE A CULTURA DA ERVA-MATE (1: 1994: Porto Alegre) Fapergs, p. 161, 1994.

FERREIRA, D. F. SISVAR: um programa para análise e ensino de estatística. **Revista Científica Symposium**, Lavras, v. 6, n. 2, p. 36-41. 2008.

FERREIRA, E. L.; SAMPAIO, G. R.; TORRES, E. A. F. da S.; BASTOS, D. H. M. **Natural Antioxidant from Yerba Maté (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) Prevents Hamburger Peroxidation**, v. 54, n. 4 p. 803-809, 2011.

FERREIRA FILHO, J. C. **Cultura e preparo da erva-mate**. 2. ed. Rio de Janeiro, Editora Signor. 64 p., 1957.

FOLTRAN, B. N. **Efeito de diferentes níveis de intensidade luminosa na produção de mudas de erva-mate (*Ilex paraguariensis* st. hill)**. 2005. 82f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

FOSSATI, L. C. **Avaliação do estado nutricional e da produtividade de erva-mate *Ilexparaguariensis* St. Hil., em função do sítio e da dióica**. 1997. 113f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - UFPR, Curitiba, PR, 1997.

GATES, D. M. **Biophysical Ecology**. Springer-Verlang, New York, 1980, 611p.

GLIESSMAN, S. R. **Agroecologia: processos ecológicos em agricultura sustentável**. 3. ed., Porto Alegre. Ed. UFRGS, 2005. 653p.

GOBBO-NETO, L.; LOPES, N. P. Plantas medicinais: fatores de influência no conteúdo de metabólitos secundários. **Química Nova**, v. 30, n. 2, p. 374-381, 2007.

GOOGLE MAPS BRASIL. **Mapa por satélite UFSM**. Disponível em: < <https://www.google.com.br/maps/@-29.7233914,53.7188539,162m/data=!3m1!1e3>>. Acesso em: 15 ago. 2014.

HAMILTON, R. P. Wind and its effects on viticulture. **Australian Grape Grower & Winemaker**, Sidney, v. 303, p. 16-17, 1989.

HECK, C. I.; SCHMALKO, M.; GONZALEZ E. de M. Effect of growing and drying conditions on the phenolic composition of mate teas (*Ilex paraguariensis*). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. Washington, v. 56, p. 8394-8403, 2008.

HEINRICHS, R.; MALAVOLTA, E. Composição Mineral Do Produto Comercial Da Erva-Mate (*Ilexparaguariensis* St. Hil.) **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n. 5, p. 781-785, 2001.

HELDWEIN, A. B.; BURIOL, G. A.; STRECK, N. A. O clima de Santa Maria. **Ciência e Ambiente**, v. 38, p. 43-58, 2009.

HODGES, L.; BRANDLE, J. R. Windbreaks: an important component in a plasticulturesistem. **HortTechnology**, v. 6, n. 3, p. 177-181, 1996.

IBGE-Brasil. **Produção da extração vegetal e da silvicultura – 2009**. 2014.

INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia**: Normais Climatológicas (1961-1990), Brasília – Distrito Federal, 1992, 82p.

JABOINSKI, N. J. **Avaliação da eficiência produtiva da cultura da erva-mate na região do alto Uruguai gaúcho através da utilização de um diagrama de causa e efeito**. 2003. 115f. Dissertação (Mestrado em Agronegócio)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

KASPARY, R. **Efeitos de diferentes graus de sombreamento sobre o desenvolvimento de plantas jovens de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.)**. 1985. 54f. Porto Alegre, Dissertação (Mestrado em Botânica)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1985.

KUINCHTNER, A.; BURIOL, G. A. Clima do Estado do Rio Grande do Sul segundo a classificação climática de Köppen e Thornthwaite. **Disciplinarum Scientia**, Santa Maria, v. 2, p. 171-182, 2001.

KUMAR, D.; TIESZEN, L. L. Photosynthesis in *Coffea arabica*: effects of light and temperature. **Experimental Agriculture**, New York, v. 16, n. 1, p. 13-19, 1980.

LANGRE, E. de. Effects of Wind on Plants. **Annual Review of Fluid Mechanics**, Palaiseau, France, v. 40, p. 141-168, 2008.

LARCHER, W. **Ecofisiologia Vegetal**. São Carlos: RiMa. 2004. 531p.

LIMA, M. de A. et al. Trocas gasosas em folhas de sol e sombreadas de cajueiro anão em diferentes regimes hídricos. **Revista Ciência Agronômica**. v. 41, n. 4, p. 654-663, 2010.

LINHARES, T. **História Econômica do Mate**. Editora Livraria José Olympio, Rio de Janeiro, 1969.

LOPES, J. P. et al. Análise de crescimento e trocas gasosas na cultura de milho em plantio direto e convencional. **Bragantia**, Campinas, v. 68, n. 4, p. 839-848, 2009.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras**: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. 5. ed. Nova Odessa, Instituto Plantarum, 2008. v. 1. 368p.

LOURENÇO, R. S.; MEDRADO, M. J. S. **Cobertura morta na produção de erva-mate**. Colombo: EMBRAPA – CNPF, 1998. 15p. (EMBRAPA – CNPF. Circular Técnica, 30).

MARENCO, R. A.; LOPES, N. F. **Fisiologia Vegetal**: fotossíntese, respiração, relações hídricas e nutrição mineral, Editora UFV. Viçosa, MG, 2005. 451p.

MARENCO, R. A.; LOPES, N. F. **Fisiologia vegetal: fotossíntese, respiração, relações hídricas e nutrição mineral**. 2. ed. Editora UFV, Viçosa, MG, 2007. 469 p.

MARIATH, W. I.; MARIATH, J. E. A. Variabilidade Genética em populações nativas de erva-mate e a implantação de bancos de germoplasma. In: **Erva-mate: Biologia e cultura no Cone Sul** / org. por Helga Winge, Alfredo Gui Ferreira, Jorge Ernesto de Araújo Mariath e Luiz Carlos Tarascone. POA: Ed. UFRGS, 1995. 47-54p.

MAZUCHOWSKI, J. Z. **Influência de níveis de sombreamento e de nitrogênio na produção de massa foliar da erva-mate (*Ilexparaguariensis* A. St.-Hil.)**. 2004, 130 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

MAZUCHOWSKI, J. Z.; SILVA, E. T.; JUNIOR, A. G. Efeito da luminosidade e da adição de nitrogênio no crescimento de plantas de *Ilex paraguariensis* st. hil. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 31, n. 4, p. 619-627, 2007.

MINAMI, K. **Produção de mudas de alta qualidade em horticultura**. São Paulo: T. A. Queiroz. 128 p., 1995.

MIRÓ, C. P. **Efeitos alelopáticos de frutos maduros de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) sobre a germinação e o crescimento inicial do milho**. 1994. 106f. Dissertação (Mestrado Fitotecnia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

MONTEITH, J. L.; UNSWORD, M. H. **Principles of environmental physics**. 2. ed. London, Edward Arnold, 1990, 291p.

MORAIS, H. et al. Características fisiológicas e de crescimento de cafeeiro sombreado com guandu e cultivado a pleno sol. **Pesquisa Agropecuária Brasileira.**, v. 38, n. 10, p. 1131-1137, 2003.

MOTA, F. S. **Meteorologia agrícola**. São Paulo, SP: Nobel, 1976. 376p.

OLIVA, E. V. **Composição química e produtividade de procedências e progênies de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) cultivadas em Latossolo Vermelho distrófico no município de Ivaí – PR**. 2007. 73f. .Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo)- Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

OSELAME, I. **Ibramate apresenta plano de ação na região Alta do Vale**. O Informativo do Vale. 25 de Fevereiro de 2015. Disponível em: <http://www.informativo.com.br/site/noticia/visualizar/id/64736/?Ibramate-apresenta-plano-de-acao-na-regiao-Alta-do-Vale.html>. Acessado em 16/01/2015.

PASCALE, A. J.; DAMARIO, E. A. **Climatologia agrícola y agroclimatologia**. Buenos Aires: EFA, 2004, 550p.

PEDRO JÚNIOR, M. J.; PEZZOPANE, J. R. M.; MARTINS, F. P.; POMMER, C. V.; MORAES, A. V. C. Efeito do uso de quebra-ventos na produtividade da videira “Niagara Rosada”. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 75-79, 1998.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Meteorologia Agrícola**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – USP, 125 p., 2007.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia. Fundamentos e Aplicações Práticas**. Ed. Agropecuária: Guaíba. 2002, 478p.

PEREIRA, R. J.; CARDOSO, M. G. Metabólitos secundários vegetais e benefícios antioxidantes Vegetable secondary metabolites and antioxidants benefits. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 3, n. 4, p. 146-152, 2012.

PES, L.; HOPPE, J. M.; STORCK, L.; OLIVEIRA, O. dos S. Comportamento da erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hill). **Ciências Florestais**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 19-32, 1995.

PÍCCOLO, G. A. **Efecto de tratamientos de recuperación de un Rodudalf típico (serie africana) en la provincia de Misiones. Análisis de algunas variables físicas y químicas.** In: WINGE, H. et alii. eds. Erva-mate: biologia e cultura no Cone Sul. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 1995, p. 89-106.

PINTRO, J. C.; FLORES, F. E. V. Efeito de diferentes níveis de disponibilidade de água do solo sobre o desenvolvimento de plantas jovens de erva-mate. **Acta Scientiarum**, v. 21, n. 3, p. 505-510, 1999.

PRAT KRICUN, S. D.; BELINGHERI, L. D. **Aplicación de nitrógeno en plantaciones de yerba mate com diferentes densidades.** In: WINGE, H.; FERREIRA, A. G.; MARIATH, J. E. DE A.; TARASCONI, L. C. (Org.). Erva-mate: biologia e cultura no cone sul. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 1995. p. 73-79.

RACHWAL, M. F. G.; COELHO, G. C.; DEDECEK, R. A.; CURCIO, G. R.; SCHENKEL, E. P. Influência da Luminosidade sobre a Produção de Massa Foliar e Teores de Macronutrientes, Fenóis Totais, Cafeína e Teobromina em Folhas de Erva-mate. **Comunicado Técnico Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento**, Colombo-PR, v. 81 n. 1 p. 1-5, 2002.

RACHWAL, M. F. G. et al. Influência da luminosidade sobre a produtividade da erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) aos quatro anos e quatro meses de idade sobre Latossolo Vermelho-amarelo Distrófico em São Mateus do Sul, PR: In: CONGRESSO SUL-AMERICANO DA ERVA-MATE, 1.; REUNIÃO TÉCNICA DO CONE SUL SOBRE A CULTURA DA ERVA-MATE, 2., 1998, Curitiba. **Resumos...** Curitiba, 1998. p. 445.

RAKOCEVIC, M.; COSTES, E.; ASSAD, E. D. Structural and physiological sexual dimorphism estimated from three-dimensional virtual trees of yerba-mate (*Ilex paraguariensis*) is modified by cultivation environment. **Annals of Applied Biology**, Cambridge, v. 159, n. 2, p. 178-191, 2011.

RAKOCEVIC, M.; JANSSENS, M.; SCHERER, R. Light Responses and Gender Issues in the Domestication Process of Yerba-Mate, a Subtropical Evergreen. **Nova Science Publishers**, Inc, Hauppauge, NY, p. 63-96, 2012.

RAKOCEVIC, M.; MEDRADO, M. J. S.; LAVORANTI, O. J. Leaf gas exchange differences between males and females of yerba-mate. **Brazilian Archive of Forest Research**, Colombo, n. 55, p. 000-000, maio/ago. 2007.

RAKOCEVIC, M.; SILVA, M. H. M.; ASSAD, E. D.; MEGETO, G. A. S. Reconstrução de maquetes 3D e manipulação da arquitetura de espécies perenes cultivadas no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, p. 1241-1245, 2008.

RAKOCEVIC, M.; STURION, J. A.; MEDRADO, J. S. M.; LAVORANTI, O. J.; MOSELE, S. H.; VALDUGA, A. T. (2005), Ecophysiological and productive properties as tool for breeding of mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.). **Boletim da Pesquisa Florestal**, 51 (in press).

RAVEN, P. H. **Biologia Vegetal**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2007. 853p.

RE, R. et al. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. **Free Radical Biology & Medicine**, v. 26, n. 9-10, p. 1231-1237, 1999.

REISSMANN, C. B.; CARNEIRO, C. Crescimento e composição química de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. hil.), transcorridos oito anos de calagem. **Floresta**. v. 34, n. 3, Curitiba-PR, Set./Dez., 381-386p., 2004.

REISSMANN, C. B.; KOEHLER, C. W.; ROCHA, H. O.; HILDEBRAND, E. E. Níveis foliares e exportação de micronutrientes pela exploração da erva-mate. **Rev. Setor Ciências Agrárias**, Curitiba, v. 9, p. 103-106, 1987.

REISSMANN, C. B.; KOEHLER, C. W.; ROCHA, H. O.; HILDEBRAND, E. E. Avaliação da exportação de macronutrientes pela exportação da erva-mate. In: SEMINÁRIO SOBRE ATUALIDADES E PERSPECTIVAS FLORESTAIS. Silvicultura da erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil). Curitiba, 1985. Curitiba, Embrapa/CNPF, 1985.p. 128-139.

REISSMANN, C. B.; RADOMSKI, M. I.; QUADROS, R. M .B. Chemical composition of *Ilex paraguariensis* St. Hill under different management conditions in seven localities of Parana State. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 42, n. 2, p. 187-194, 1999.

REITZ, R.; KLEIN, R. M.; REIS, A. **Madeiras do Brasil. Santa Catarina**. Florianópolis: Lunardelli, 320p., 1979.

RESENDE, S. A. A.; RESENDE JUNIOR, J. C. Interferência dos ventos no cultivo de plantas: efeitos prejudiciais e práticas preventivas. **Enciclopédia Biosfera** , v. 7, p. 1-6, 2011.

RIGHI, E. Z. et al. Transpiração do tomateiro cultivado em estufa plástica e suas relações com a radiação solar e déficit de saturação do ar. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n. 1, p. 9-18, 2002.

RODRIGUES, H. J. N. et al. Variabilidade sazonal da condutância estomática em um ecossistema de manguezal amazônico e suas relações com variáveis meteorológicas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 2, p. 189-196, 2011.

ROSSA, U. B. **Produtividade e compostos foliares de erva-mate sob efeitos de luminosidade e fertilização**. 2013, 208f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal)– Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

SAIDELLES, F. L. F.; REINERT, D. J.; SALET, R. L. Crescimento inicial de mudas de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) em três classes de solos, na região central do Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 13, n. 2, p. 17-25, 2003.

SCHÖFFEL, E. R.; VOLPE, C. A. **Velocidade relativa do vento em pomar de laranja protegido com quebra-vento de *Pinus sp.* em região tropical**. In: X Reunión Argentina y IV Latinoamericana de Agrometeorología. Mar del Plata: AADA, 2004. Disponível em: <http://agro.unc.edu.ar/~clima/AADA/Congresos/MDQ/56.htm>. Acessado em 20/12/2014.

SENTELHAS, P. C.; PEDRO JUNIOR, M. J.; MARTINS, F. P. Características aerodinâmicas da videira conduzida em espaldeira. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 1, n. 1, p. 25-30, 1993.

SILVA, E. T.; BICCA NETO, H.; FOLTRAN, B. N. Materiais de cobertura na produção de mudas de erva-mate (*Ilex Paraguariensis* St. Hill). **Scientia Agraria**, v. 8, n. 1, p. 103-109, 2007.

SIMEÃO, R. M.; STURION, J. A.; RESENDE, M. D. V.; FERNANDES, J. S. C.; NEIVERTH, D. D.; ULBRICH, A. L. Avaliação genética em erva-mate pelo procedimento BLUP individual multivariado sob interação genótipo x ambiente. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 11, p. 1589-1596, nov. 2002.

SIMON, J.; ANGELOCCI, L. R.; SCARPARE, F. V.; IRIGOYEN, A. I. Sistema de medidas para saldo de radiação em renques de espécies arbóreas: uso em lima ácida. In: **Congresso Brasileiro de Agrometeorologia**, 16, 2009. Belo Horizonte, 2009, 1 CD-ROM.

SINGLETON, V. L.; ROSSI, J. A. Colorimetry of phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. **American Journal of Enology and Viticulture**, Davis, v. 16, n. 3, p. 144-158, 1965.

SMITH, W. K.; VOGELMANN, T. C.; DELUCIA, E. H.; BELL, D. T.; SHEPHERD, K. A. Leaf form and Photosynthesis: do leaf structure and orientation interact to regulate internal light and carbon dioxide? **Bioscience**, Washington, DC, v. 47, n. 11, p. 785-793, 1997.

SPENCE, R. D.; SHARPE, J. H.; POWELL, R. D.; WU, H. Response of guard cells to temperature at different concentrations of carbon dioxide in *Vicia faba* L. **New Phytologist**, v. 97, p. 129-144, 1984.

STÖCKER, C. M.; AZEVEDO, M. L.; SILVA, J. A. Degradação de clorofilas em folhas de couve (*Brassicaoleracea*) armazenadas em temperatura ambiente. **XIX CIC, XII ENPOS, II Amostra Científica**. Universidade Federal de Pelotas-UFPel, 2010.

SUERTEGARAY, C. E. O. **Dinâmica da cultura da ervamate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) em sistemas agroflorestais e monocultivos**. 2002, 49f. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas)-Universidade de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. Porto Alegre: Artmed. 2013. 4. ed. 820p.

TORMEN, M. J. **Economia ervateira brasileira**. In: WINGE, H. et al. Erva-mate: biologia e cultura no Cone-Sul. Porto Alegre: UFRGS, 1995, p.27-40.

VALDUGA E. et al.; FREITAS, R. J. S.; REISSMANN, C. B.; NAKASHIMA, T. **Caracterização química da folha de *Ilex paraguariensis* St. hil. (erva-mate) e de outras espécies utilizadas na adulteração do mate**. Curitiba, v. 15, n. 1, p. 25-36, jan./jun.1997.

VALDUGA, E. **Caracterização química e anatômica da folha de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil) e de espécies utilizadas na adulteração do mate**. 1994. 119f. Dissertação (Mestre em Tecnologia Química), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1994.

VIEIRA, A. R. R.; SUERTEGARAY, C. E. de O.; HELDWEIN, A. H.; MARASCHIN, M.; SILVA, A. L. da. Influência do microclima de um sistema agroflorestal na cultura da ervamate (*Ilexparaguariensis* St. Hil). **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 11, n. 1, p. 91-97, 2003.

VIEIRA, M. A.; MARASCHIN, M.; PAGLIOSA, C. M.; PODESTÁ, R.; AMBONI, R. D. M. **Análise de compostos fenólicos, metilxantinas, tanino e atividade antioxidante de resíduo de processamento de erva-mate: uma nova fonte potencial de antioxidantes**. In: International workshop – ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION. Anais. São Paulo: UNIP, 2009, p. 1-11.

VOLPE, C. A.; SCHÖFFEL, E. R. Quebra-vento. In: RUGGIERO, C. **Bananicultura**. Jaboticabal: FUNEP, 2001. p. 217-232.

VUADEN, E. et al. ESTIMATIVA DA BIOMASSA COMERCIAL DE BROTOS DE *Ilex paraguariensis* A. St.-Hil. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 19, n. 3, p. 279-291, jul./set., 2009.

WINGE, H. et al. Apresentação. In: **ERVA-MATE: Biologia e cultura no cone sul**, 1., 1992, Porto Alegre. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. p. 11-13.

WITTMANN, C.; ASCHAN, G.; PFANZ, H. Leaf and twig photosynthesis of young beech (*Fagus sylvatica*) and aspen (*Populus tremula*) trees grown under different light regime. **Basic and Applied Ecology**, Germany, v. 2, p. 145–154, nov., 2001.

WREGE, M. S.; STEINMETZ, S.; REISSER JÚNIOR, C.; ALMEIDA, I. R. de. (Ed.). **Atlas climático da Região Sul do Brasil: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado; Colombo: Embrapa Florestas, 2011. 333 p.

ZAMPIER, A. C. **Avaliação dos níveis de nutrientes, cafeína e taninos após adubação mineral e orgânica, e sua relação com a produtividade na erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.** 2001, 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba/PR, 2001.

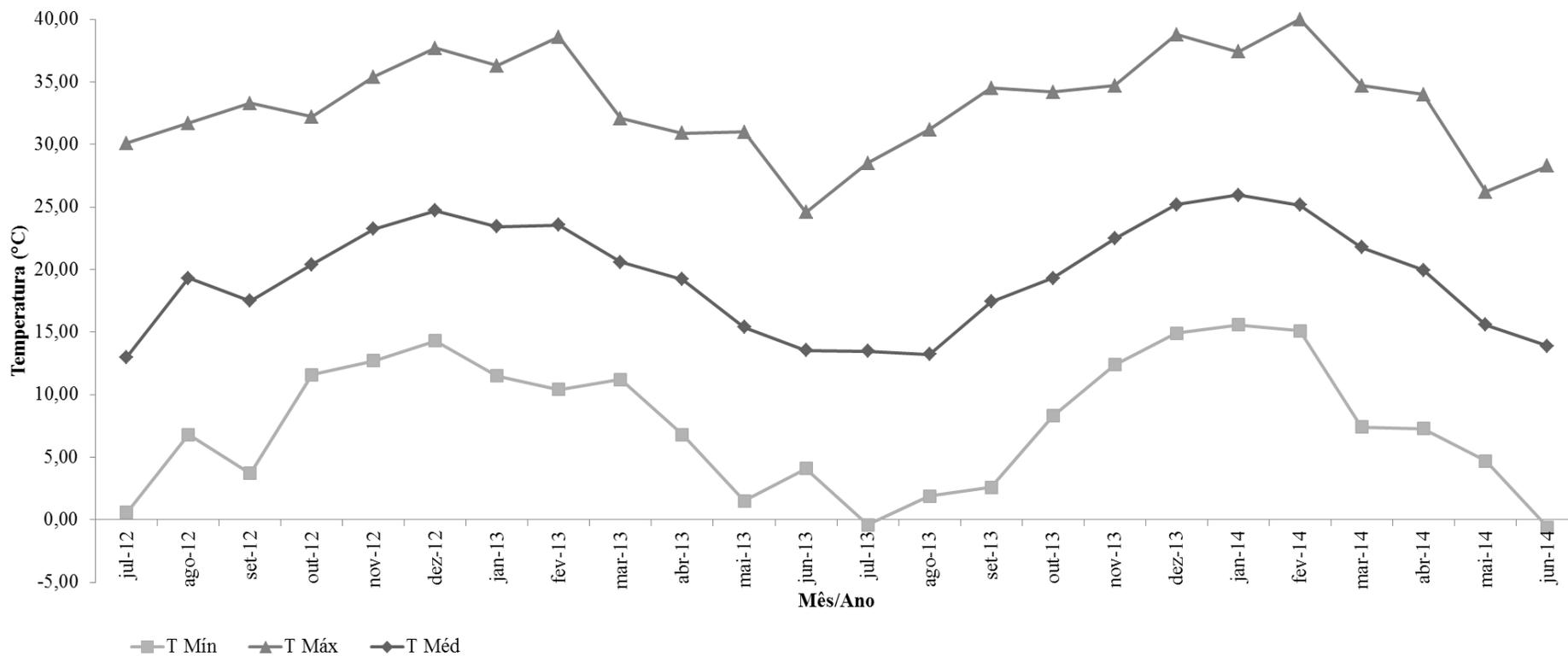
ZANELLA, F. et al. Formação de mudas de maracujazeiro-amarelo com níveis de sombreamento em Ji-Paraná - RO. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 30, n. 5, p. 880-884, 2006.

ZANON, A. **Produção de sementes de erva-mate**. Curitiba: EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Florestas, Circular técnica, 16, 7p., 1988.

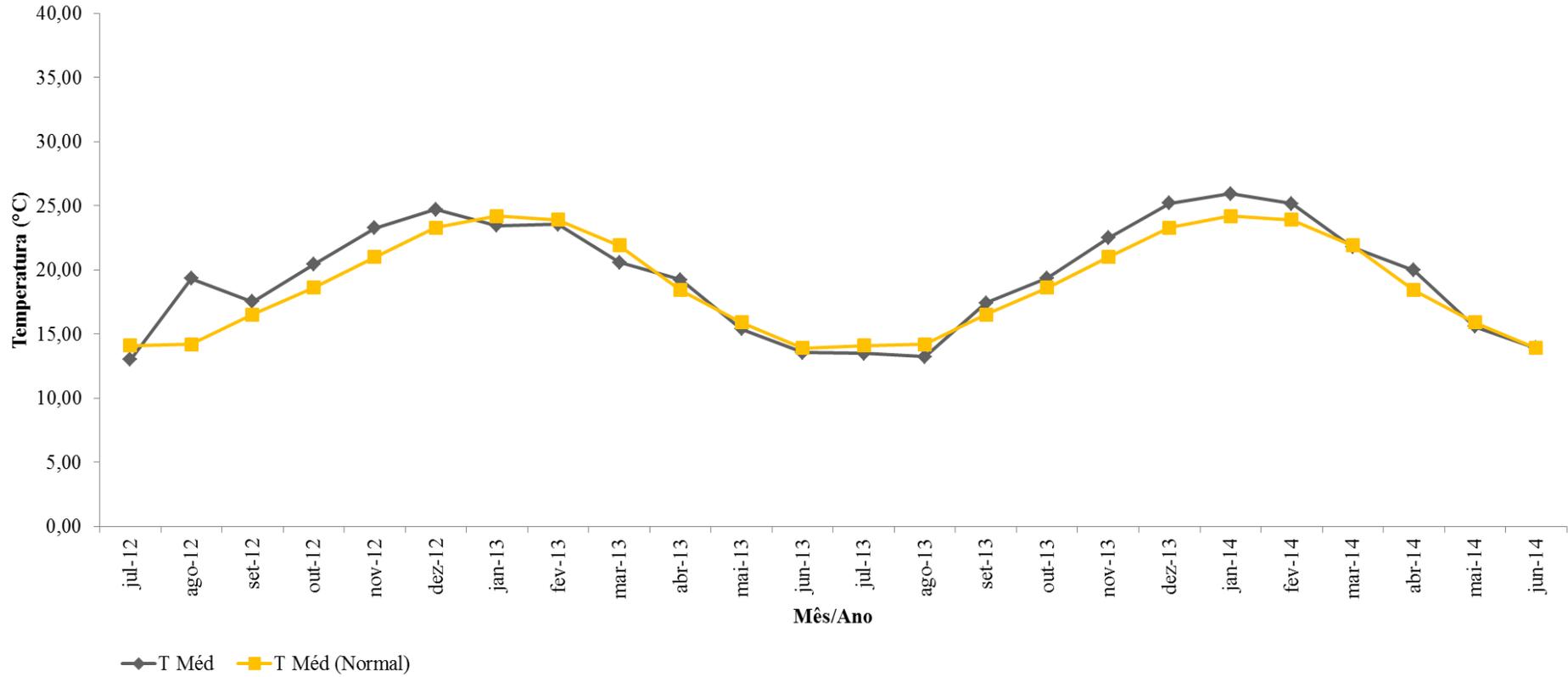
ZHISHEN, J.; MENGCHENG, T. E.; JIANMING, W. The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. **Food Chemistry**, v. 64, p. 555-559, 1999.

APÊNDICES

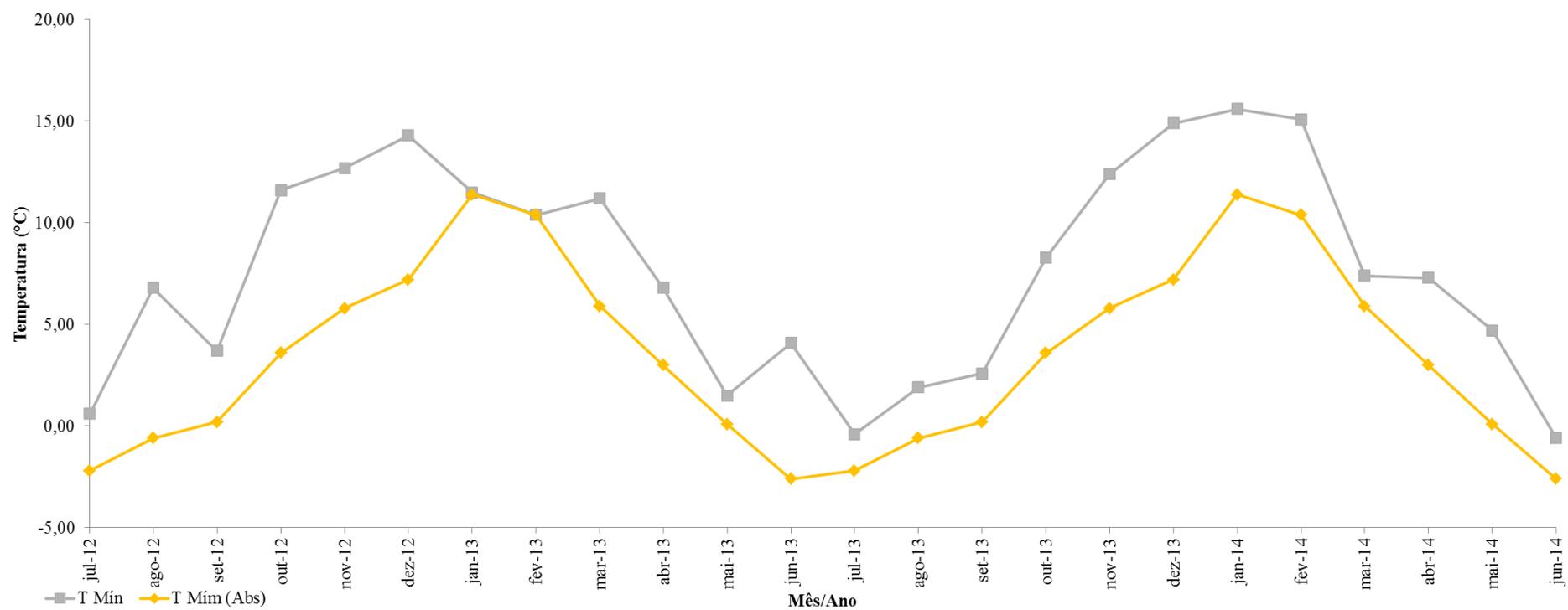
APÊNDICE A – Temperaturas médias (T_{méd}, °C), máximas absolutas (T_{máx}, °C) e mínimas absolutas mensais (T_{mín}, °C) no período dos experimentos de julho de 2012 a junho de 2014. Dados da estação meteorológica automática de Santa Maria (8°DISME/INMET). Santa Maria/RS, 2015.



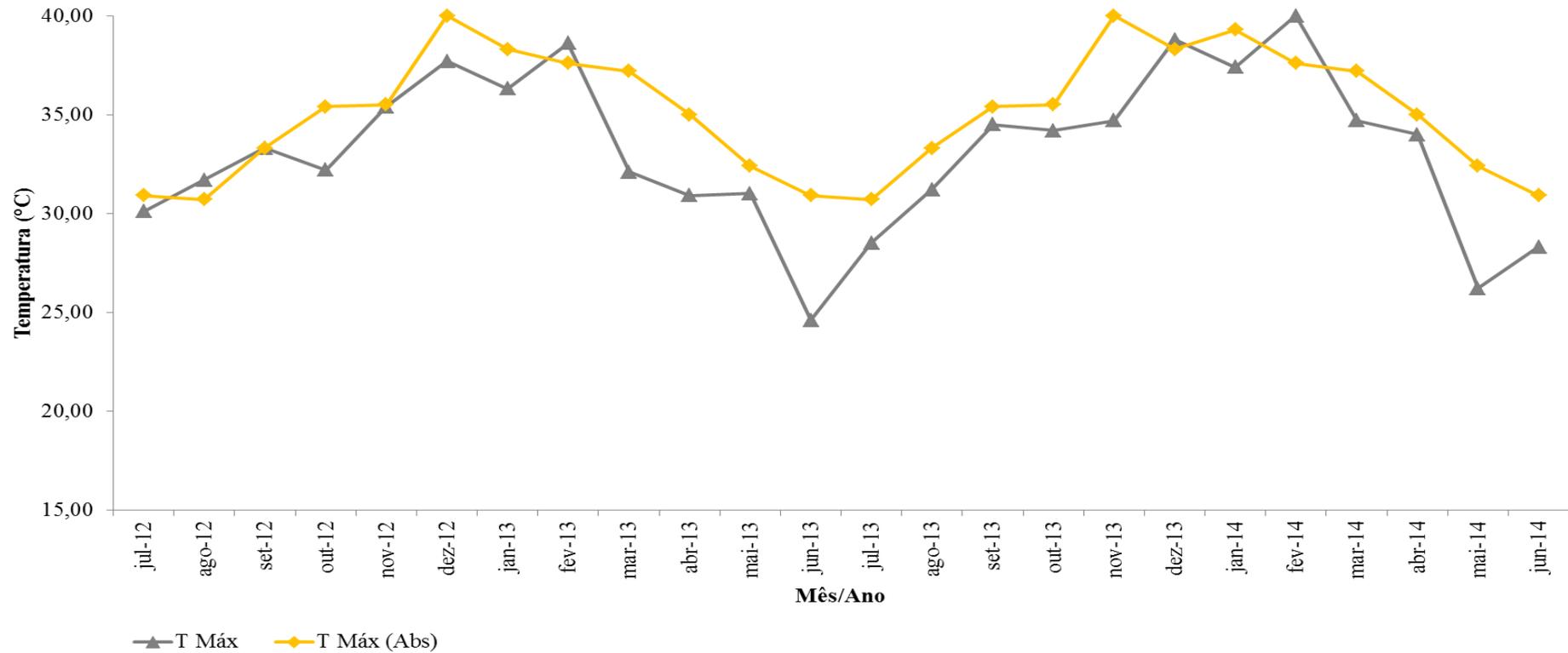
APÊNDICE B – Temperaturas médias mensais (Tmed, ° C) do período de julho de 2012 a junho de 2014 e temperaturas médias mensais normais (Tmed Normal, período de 1961-1990). Dados da estação meteorológica automática de Santa Maria (8°DISME/INMET). Santa Maria/RS, 2015.



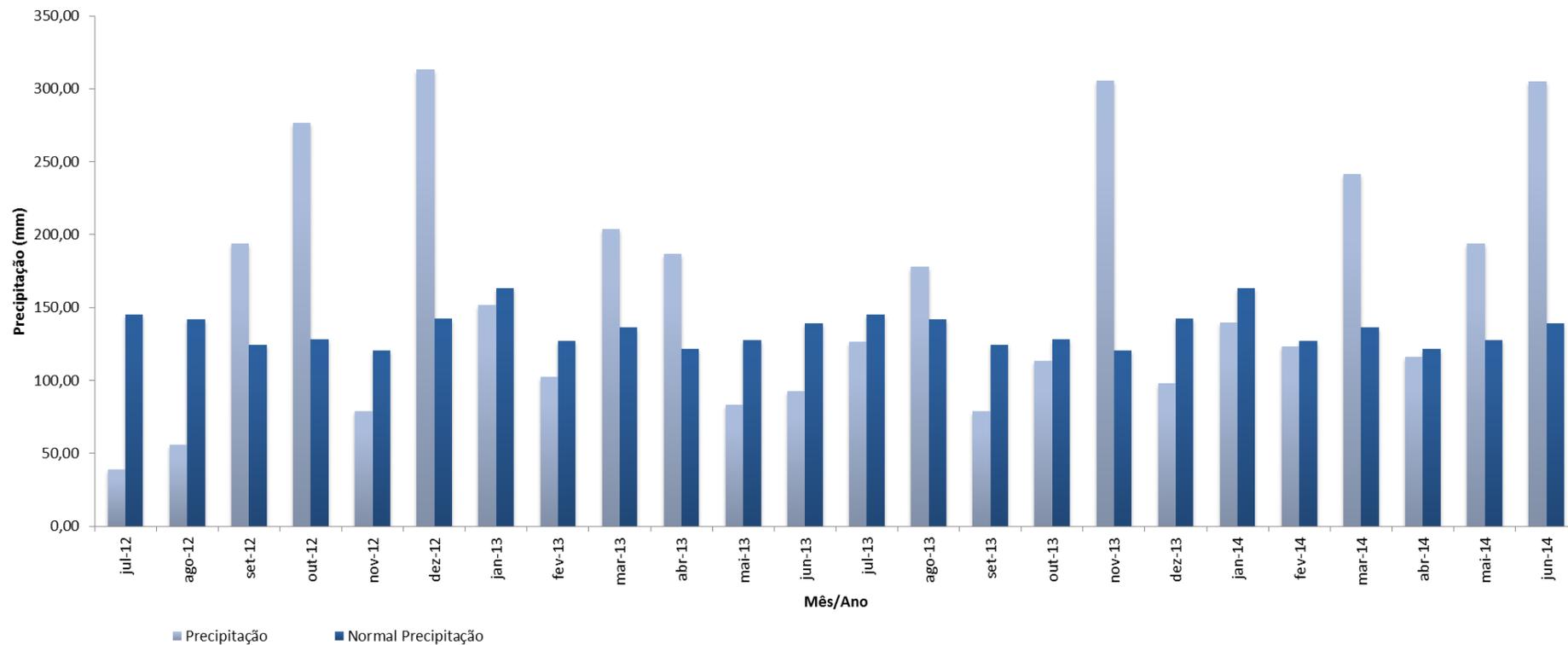
APÊNDICE C – Temperaturas mínimas absolutas mensais do período de julho de 2012 a junho de 2014 e mínimas absolutas mensais normais (1961-1990). Dados da estação meteorológica automática de Santa Maria (8°DISME/INMET). Santa Maria/RS, 2015.



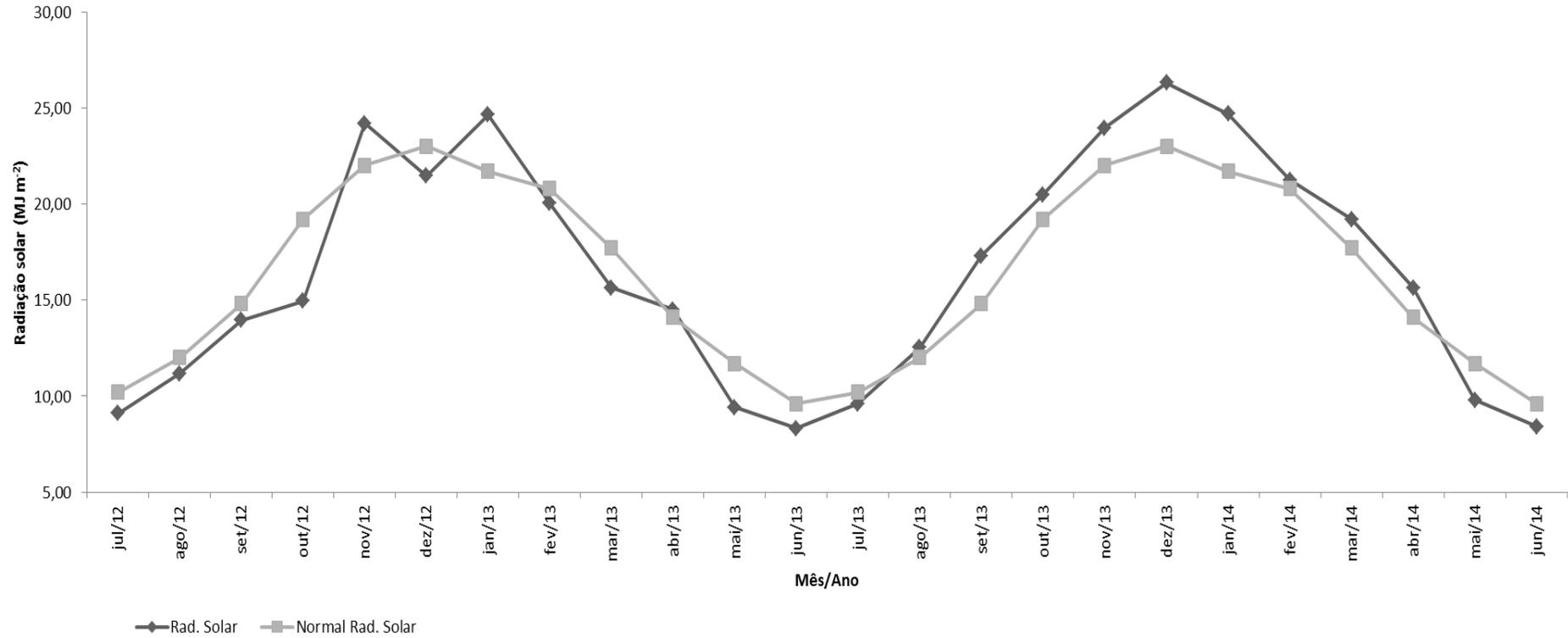
APÊNDICE D – Temperaturas máximas absolutas mensais do período de julho de 2012 a junho de 2014 e máximas absolutas mensais normais (1961-1990). Dados da estação meteorológica automática de Santa Maria (8°DISME/INMET). Santa Maria/RS, 2015.



APÊNDICE E – Precipitação acumulada mensal no período de julho de 2012 a junho de 2014 (coluna clara) e normal mensal de precipitação de 1961-1990 (coluna escura). Dados da estação meteorológica automática de Santa Maria (8°DISME/INMET), instalada a cerca de 100 m das áreas experimentais. Santa Maria/RS, 2015.



APÊNDICE F – Radiação solar global incidente média diária (R_n – MJ m^{-2}) no período de julho de 2012 a junho de 2014 e normais mensais de radiação solar de 1975-2005 (WREGGE, 2011). Dados da estação meteorológica automática de Santa Maria (8°DISME/INMET). Santa Maria/RS, 2015.



APÊNDICE G – Radiação solar global incidente média diária (R_n – MJ m^{-2}) no período de julho de 2012 a junho de 2014 e níveis de sombreamento 18, 35 e 50% das telas plásticas de sombreamento e P.S (pleno sol).

