

**TRANSMISSÃO DE SINAL DE FALTA DE ÁGUA ENTRE PLANTAS:
EFEITOS SOBRE A TEMPERATURA E A PRESSÃO DE TURGOR FOLIAR**

**GABRIEL RICARDO AGUILERA DE
TOLEDO**

**TRANSMISSÃO DE SINAL DE FALTA DE ÁGUA ENTRE PLANTAS:
EFEITOS SOBRE A TEMPERATURA E A PRESSÃO DE TURGOR FOLIAR**

**GABRIEL RICARDO AGUILERA DE
TOLEDO**

Defesa de dissertação apresentada a Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade do Oeste Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional- Área de Concentração: Ciências Ambientais

Orientador: Dr. Gustavo Maia Souza

581
T649t

Toledo, Gabriel Ricardo Aguilera de.

Transmissão de sinal de falta de água entre plantas: efeitos sobre a temperatura e a pressão de turgor foliar / Gabriel Ricardo Aguilera de Toledo. – Presidente Prudente, 2015.

64 f.: il.

Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional) - Universidade do Oeste Paulista – Unoeste, Presidente Prudente, SP, 2015.

Bibliografia.

Orientador: Gustavo Maia Souza.

1. Comunicação. 2. Plantas. 3. Falta de água. 4. Termografia. 5. Turgor foliar.. I. Título.

GABRIEL RICARDO AGUILERA DE TOLEDO

**TRANSMISSÃO DE SINAL DE FALTA DE ÁGUA ENTRE PLANTAS:
EFEITOS SOBRE A TEMPERATURA E A PRESSÃO DE TURGOR FOLIAR**

Defesa de dissertação apresentada a Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade do Oeste Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional- Área de Concentração: Ciências Ambientais

Presidente Prudente, de de 2015

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Gustavo Maia Souza
Universidade do Oeste Paulista – Unoeste
Presidente Prudente-SP

Prof. Dr. Paulo Antônio da Silva
Universidade do Oeste Paulista – Unoeste
Presidente Prudente-SP

Prof. Dr. Luiz Fernando Rolim de Almeida
Universidade Estadual Paulista – Unesp
Botucatu-SP

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho às árvores centenárias que habitavam a região antes da chegada da “missão civilizatória”. (...) E às ricas histórias que elas não puderam nos contar a tempo sobre o que “viram” acontecer por aqui...

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, ao Universo que, em meio aos seus inúmeros eventos estranhos e caóticos, possibilitou a minha existência. E que por meio de numerosas coincidências parece ter me levado à realização deste trabalho.

Agradeço muito ao meu orientador, tanto pelo auxílio e suporte técnico e científico-intelectual como pela atenção pessoal. O conjunto de tudo isso e muito mais me levou a concluir este estudo, este trabalho, e essa fase da vida e da minha carreira.

Agradeço imensamente aos meus amigos de trabalho e de vida: meus colegas do LIPEUL. Sou grato especialmente ao Rafa, por tudo que fez e também pela forma atenciosa e paciente com que fez seu atendimento aos meus problemas. Também sou grato à Kézia, à Suzana, ao Saraiva, ao Alexandrius, ao Will, à Renatinha, à Inaê, à Dolores, à Carolzinha e ao Daniel, por tudo que fizeram por mim e pela minha pesquisa; das regas aos conselhos, passando pela ajuda com aparelhos e ferramentas...

Agradeço enormemente por ter caído na turma em que caí, e de ter a sorte de poder conhecer pessoas muito boas, competentes, interessadas, vivazes e apaixonadas pelo meio ambiente e engajadas com a melhoria das condições sociais/ambientais da região; grato de poder ter visto a região dar um salto de qualidade em termos de conhecimento, resultante dos trabalhos muito bem feitos meus colegas. Também sou grato por inúmeros outros motivos, relacionados ou não com meu trabalho, e pela amizade feita com a Tamires, a Graza, o Rodrigo, o Anderson, o Ronaldo, a Meire, a Deigilam, o Neto e o Murilo.

Agradeço também a mais duas amigadas feitas no MMADRE, pessoas muito especiais que contribuíram com meu trabalho e minha vida. Grato de poder cursar a disciplina do Dr. Helder (agora meu amigo), juntamente à Leila Esturaro (agora já mestre e amiga).

Agradeço a todo corpo docente do MMADRE, especialmente os professores com quem mais tive contato, que me ajudaram, ou que cursei alguma disciplina. Agradeço em especial ao Dr. Gustavo Maia, Dra. Patrícia Antunes e Dr. Paulo da Silva (principalmente pela orientação, disciplinas e banca); ao Dr. Munir, à Dra. Alba, Dra. Rebeca, Dr. Maurício Waldman, Dr. Helder, Dr. Marcos Boin.

Agradeço muito a Joyce, por ter me socorrida com eficiência e paciência muitas e muitas vezes!

Agradeço a todo pessoal da Unoeste, de todos setores, da limpeza, manutenção, jardinagem e viveiro (que mantém tudo sempre limpo, funcionando e bonito), passando por laboratórios e departamentos (que são bem equipados, disponíveis e bem organizados), até às instâncias mais altas como a reitoria (que não pensa somente no lucro, mas também investe na pesquisa, na qualidade e pessoal e de estrutura física, na inovação e na inserção social).

Agradeço muito a Capes, ao governo federal, e a toda sociedade brasileira que contribuiu para o pagamento de minha bolsa de estudo, juntamente a milhares de outras.

Agradeço demasiadamente à Stoller do Brasil. Agradeço demais porque por meio dos recursos oferecidos ao LIPEUL pude aproveitar para fazer meu trabalho utilizando de materiais de ponta. Outra enorme contribuição da Stoller foi contribuir muito com a apresentação de um trabalho em um congresso internacional em Amsterdã, levando o nome do Brasil e do Pontal do Paranapanema até a Europa. Essa contribuição vai além, vai ao nível pessoal, pois foi uma experiência muito marcante e fértil, que contribui com meu crescimento. Agradeço a empresa também pela confiança e crédito que dá a ciência e à pesquisa de plantas. Por fim, agradeço a Stoller por dar crédito às pesquisas desenvolvidas no LIPEUL, e por financiar estudos com plantas.

Agradecimentos especiais também ao APTA de Presidente Prudente, e ao pessoal que me ajudou, cedendo o microscópio e ensinando a manipular.

Agradeço pelo mesmo motivo (uso do microscópio) ao pessoal do Laboratório de Microbiologia da Unoeste, principalmente o Dr. Fábio.

Agradeço ao Paulo da Unesp- Presidente Prudente por me ajudar na fase final com o tratamento dos dados.

Agradeço bastante ao Dr. Ernane e à Dr^a Carol Silva da USP- Pirassununga (pela ajuda com a análise de dados, e por terem passado a confiança de que o caso de alguns resultados meus dispensava estatística convencional), ao pessoal do Laboratório LAFAC- USP.

Agradeço ao Dr. Rafael Vasconcelos Ribeiro da Unicamp, que me auxiliou de diversas formas quanto ao desenho experimental, análise dos dados, e até por emprestar seus valiosos equipamentos.

Agradeço ao Ronan e Rudy, que muitas vezes contribuíram com discussões sobre minha pesquisa e suas implicações, além de outras contribuições mais “concretas”.

Agradeço muito à minha amiga Selma Fernandes, a quem sempre serei grato, pelo tanto e pela forma como sempre me ajudou. E grato especialmente pela ajuda oferecida durante o período dessa empreitada chamada mestrado.

Agradeço a meus grandes amigos Luis Henrique (Pí), Bartolomeu P. Nascimento (Bartô), Guilherme Antunes e Felipe Sanches (Fepa) pela amizade, que sempre contribui com meu crescimento e pra minha alegria.

Agradeço especialmente ao meu caro amigo, colega de república, colega de trampo e de estudos, meu “brother” Saraiva, que mais do que ninguém esteve junto a mim e ao meu trabalho, ajudando-me me como pode...

Agradeço à minha cara amiga, ex-eterna-professora e inspiradora Sandra Maria (Sandra “Fungi” da UEM). Esse sempre serei grato pela atenção, carinho e amor com que trata de seus alunos e pela braveza em como defende princípios da lógica, da ciência, da Academia, do curso de Biologia da UEM, e o ensino de qualidade.

Finalmente agradeço com tom de honraria aos meus pais, Ricardo e Gabriela, à minha irmã Giovanna, e à minha avó Clélia. Essas são as pessoas da família, as mais próximas geográfica e afetivamente, com quem mantenho o contato constante e de quem retiro força e abrigo, e de quem recebo cuidado necessário para continuar a minha caminhada.

*“Para as plantas, todo o mundo é planta- para nós humanos!”
(Friedrich Nietzsche)*

RESUMO

TRANSMISSÃO DE SINAL DE FALTA DE ÁGUA ENTRE PLANTAS: EFEITOS SOBRE A TEMPERATURA E A PRESSÃO DE TURGOR FOLIAR

É crescente o número de evidências de que plantas antecipam respostas a estresses em consequência da sinalização emitida por plantas vizinhas. Transmitir sinal de falta de água entre plantas é um fator que acrescenta complexidade na dinâmica de populações, comunidades e ecossistemas. Conhecer mais sobre essa capacidade das plantas pode ser útil para agricultura, principalmente sistemas agro-florestais, e para esforços de reflorestamento. Sendo assim, este trabalho foi realizado para tentar encontrar mais evidências da transmissão de sinal de falta de água entre plantas. Para tanto, foram utilizados parâmetros relacionados à abertura estomática (temperatura e turgor foliar) para medir os efeitos de uma planta sob falta de água sobre plantas vizinhas. A abertura estomática, a temperatura e o turgor foliar são parâmetros indicativos do status hídrico. Foram realizados dois experimentos, um medindo a temperatura, outro a pressão de turgor foliar. Foi usado *Glycine max* como modelo experimental. As plântulas foram submetidas à poda, deixando-se apenas duas raízes semelhantes por planta ("split-root"). As mudas foram arranjadas em séries com 4 potes e 3 plantas (cada planta ficou com suas raízes divididas entre dois potes). Para induzir falta de água repentina, foi utilizada solução de manitol (-2 MPa), aplicado no primeiro pote. A temperatura foliar foi monitorada com uma câmera termográfica e o turgor foliar foi monitorado pela sonda magnética de pressão de turgor foliar (ZIM-probe). A análise dos dados foi feita em cima da interpretação dos gráficos. A variação de temperatura foliar aconteceu de forma sincrônica entre as plantas de cada série. A variação do turgor foliar foi totalmente alterada depois do estresse em metade das repetições. Nas séries onde o turgor foi alterado houve sincronia também. As condições ambientais de temperatura do ar, e de umidade relativa do ar, foram monitoradas e não mostram correlação com as variações de temperatura e turgor foliar. A sincronia indica que tenha havido comunicação. É possível que a comunicação de falta de água aumente a estabilidade de populações. Populações mais estáveis podem ter mais chances de deixar mais descendentes para próximas gerações. Assim, é provável que a capacidade de comunicar a falta de água a outras plantas seja uma característica moldada pela seleção natural e distribuída dentre os táxons.

Palavras-chave: Comunicação. Plantas. Falta de água. Termografia. Turgor foliar.

ABSTRACT

Lack of water signaling transmission among plants: effects leaf temperature and on leaf turgor pressure

A growing body of evidence shows that plants anticipate responses of stress as a result of signals transmitted by neighboring plants. Transmit signal of lack of water between plants is a factor that adds complexity in the dynamics of populations, communities and ecosystems. Knowing more about this ability of plants can be useful for agriculture, mainly agro-forestry systems, and for reforestation efforts. By this way, this job was done to try to find more evidences of lack of water signaling transmission. To do this, stomata aperture related parameters (leaf temperature and leaf turgor pressure) were used to find possible effects of plants under lack of water on their neighborhood. Stomatal aperture, leaf temperature and leaf turgor pressure are parameters that indicates plant water status. Two experiments were done, one measured leaf temperature, and other leaf turgor pressure. *Glycine max* was used as experimental model. The seedlings roots were pruned, leaving only two roots similar per plant ("split-root"). The split-root plants were arranged in sets, with 4 pots and 3 plants (with each plant roots was divided into two pots). To induce sudden lack of water, mannitol solution was used (-2MPa), applied in the first pot. Leaf temperature was monitored by thermographic camera, and the leaf turgor was monitored by magnetic probe leaf turgor pressure (ZIM-probe). Data analysis was based on graphic interpretation. Leaf temperature variation was synchronous among plants of each set. The variation of leaf turgor in the day of induction to stress was completely changed from the previous day in half of sets. The sets which turgor variation was changed also showed sync. Environmental conditions, namely air temperature, and air relative humidity, were monitored and showed no correlations with the variation in leaf temperature or leaf turgor pressure. Sync indicates that there was communication. It is possible that lack of water communication among plants increases population stability. Stability in population can increase the fitness. So, it is possible that communication of lack of water among plants is a characteristic that has been shaped by natural selection, and distributed among taxa.

Keywords: Communication. Plant. Lack of water. Thermography. Leaf turgor pressure.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 -	Número de publicações e citações sobre comunicação em plantas	23
FIGURA 2 -	Variação da temperatura do ar ao longo de três dias	29
FIGURA 3 -	Variação de temperatura do ar ao longo de intervalo de tempo utilizado para análises termográficas e da variação de turgor	29
FIGURA 4 -	Variação da umidade do ar ao longo de três dias	30
FIGURA 5 -	Variação de umidade do ar ao longo de intervalo de tempo utilizado para análises termográficas e da variação de turgor	30
FIGURA 6 -	Esquema que representa as unidades experimentais	31
FIGURA 7 -	Fotografia mostrando uma série montada para ATER	32
FIGURA 8 -	Fotografia mostrando 2 séries montadas para ATUR	32
FIGURA 9 -	Fotografia mostrando três plântulas com raízes podadas	33
FIGURA 10 -	Fotografia mostrando uma planta após a poda das raízes	34
FIGURA 11 -	Fotografia do FLIR E5	36
FIGURA 12 -	Sonda magnética de variação de turgor foliar Zim-probe	37
FIGURA 13 -	Fluxograma: dispositivos que compõe o “ZIM-probe”	38
FIGURA 14 -	Fluxograma: os componentes do Zim-probe e a sequência na qual a informação coletada é ordenada	39
FIGURA 15 -	Gráfico- Acompanhamento da variação da temperatura foliar das três plantas de 4 séries	41
FIGURA 16 -	Gráfico do Comportamento da variação de pressão de clipe das três plantas da série A, antes e depois do estresse	42
FIGURA 17 -	Gráfico do comportamento da variação de pressão de clipe das três plantas da série B, antes e depois do estresse	43
FIGURA 18 -	Gráfico do comportamento da variação de pressão de clipe das três plantas da série C, antes e depois do estresse	44
FIGURA 19 -	Gráfico do comportamento da variação de pressão de clipe das três plantas da série D, antes e depois do estresse	45
FIGURA 20 -	Gráfico do comportamento da variação de pressão de clipe das três plantas da série E, antes e depois do estresse	46

- FIGURA 21 - Gráfico do comportamento da variação de pressão de clipe 47
das três plantas da série F, antes e depois do estresse
- FIGURA 22 - Gráfico do detalhamento do comportamento da pressão de 48
clipe das três plantas da série A ao longo de 120 minutos,
imediatamente após da aplicação da solução de manitol
- FIGURA 23 - Gráfico do detalhamento do comportamento da pressão de 49
clipe das três plantas da série A ao longo de 120 minutos, 240
minutos após a aplicação da solução de manitol
- FIGURA 24 - Gráfico do detalhamento do comportamento da pressão de 50
clipe das três plantas da série A ao longo de 120 minutos, 240
minutos após a aplicação da solução de manitol
- FIGURA 25 - Gráfico do detalhamento do comportamento da pressão de 51
clipe das três plantas da série B ao longo de 120 minutos,
imediatamente após da aplicação da solução de manitol
- FIGURA 26 - Gráfico do detalhamento do comportamento da pressão de 52
clipe das três plantas da série C ao longo de 120 minutos,
imediatamente após da aplicação da solução de manitol
- FIGURA 27 - Gráfico do detalhamento do comportamento da pressão de 53
clipe das três plantas da série C ao longo de 120 minutos,
após 240 minutos da aplicação da solução de manitol
- FIGURA 28 - Gráfico do detalhamento do comportamento da pressão de 54
clipe das três plantas da série C ao longo de 120 minutos, 360
minutos após a aplicação da solução de manitol

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1	Plantas, comportamento e a inteligência	18
2.2	Aspectos gerais da comunicação	21
2.2.1	Comunicação em plantas	22
2.2.2	Comunicação em plantas mediada por compostos voláteis: o caso mais entendido	23
2.3	Sistema solo-planta-atmosfera: Indisponibilidade de água para as raízes, respostas estomáticas e a relação com a temperatura e o turgor foliar	24
3	MATERIAIS E MÉTODOS	28
4	RESULTADOS	41
5	DISCUSSÃO	55
6	CONCLUSÃO	59
	REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

A história da humanidade é intrinsecamente atrelada às plantas, isso pode ser evidenciado pela coincidência temporal e espacial do nascimento da agricultura e das primeiras civilizações, que está compreendida entre 12.000 e 10.000 anos atrás e localizado no chamado “Crescente Fértil”. As primeiras plantas domesticadas, nomeadamente o trigo, cevada, aveia, centeio, sorgo, linho, lentilha, ervilha (ZOHARY; HOPF; WEISS, 2012) condicionaram o acontecimento da Revolução Neolítica, que é marcada pelo surgimento das primeiras vilas e cidades, da escrita, de ferramentas sofisticadas, da tecelagem, olaria, metalurgia, da matemática, da técnica, da burocracia, do comércio, da moeda, das primeiras leis e códigos de conduta, de estados, das religiões, das ciências e das artes, dentre outros traços que atualmente caracterizam a nossa espécie e que identificam a civilização ocidental, fazendo distinção das sociedades primitivas de coletores- caçadores que a precederam (CHILDE; GORDON, 1936; ENGELS, 1974).

A humanidade expandiu-se vertiginosamente após a Revolução do Neolítico, expansão essa creditada mais à cultura do que a qualquer mudança biológica ou geoclimática (HAWKS, 2003; KLEIN; EDGAR, 2000). Cultura, para antropologia, designa o modo de vida típico de um grupo de pessoas, fundamentado em comportamentos apreendidos, transmitidos de gerações em gerações por meio da língua e do contato social. O termo tem origem no verbo latino “*colere*”, que significa “cultivar, tomar conta, cuidar” (WALDMAN, 2006). Essa relação expressada na concepção do termo revela a inter-relação entre as plantas e a humanidade, entre o domínio sobre o cultivo delas e a explosão cultural e demográfica ocorrida simultaneamente. Com a evolução da humanidade e sua cultura, compreendida entre o Período Neolítico e o atual, evoluíram também as formas pelas quais os homens interagem com a natureza, destacadamente na forma como ocupam o espaço (WALDMAN, 2006).

Tal ocupação do espaço, feita durante a enorme expansão da humanidade, transcorrida nos últimos 12 mil anos, foi marcada por transformações completas de paisagens, com destaque para substituição massiva das espécies vegetais de ocorrência natural de cada local pelas de interesse humano. A negligência sobre os serviços ambientais prestados pelas paisagens naturais

levou civilizações inteiras ao colapso. O mal uso do solo e esgotamento de recursos hídricos foram uma das principais causas que levaram civilizações a colapsar (ENGELS, 1974; ELLIS et al., 2010).

Os problemas associados à degradação ambiental, ocasionada pela retirada da vegetação original de um ecossistema, podem ser facilmente encontrados na região do pontal do Paranapanema. A região sofreu, dentro de curto período de tempo (menos de um século), transformações advindas da retirada da exuberante floresta estacional semidecidual existente aqui outrora, que levaram a mudanças microclimáticas dentro de um período de doze anos, segundo relatos dos primeiros colonos (LEITE, 1981). Efeitos da substituição drástica dos ecossistemas da região estão presentes ainda hoje, como os icônicos casos de solos degradados, erosões e córregos assoreados. Um cenário que clama por políticas que visem atender a recuperação desses recursos ambientais, de modo que possibilite a continuidade da existência de seres humanos e da agricultura na região (SUDO, 1980).

Dentro da demanda de recuperação encontra-se, principalmente, a necessidade de restauração ecológica, utilizando-se, prioritariamente, do reflorestamento biodiverso com espécies nativas, principalmente em áreas de proteção permanente - APPs (RODRIGUES; BRANCALION; ISERNHAGEN, 2009). Contudo, os reflorestamentos desse tipo são marcados por altos índices de insucesso que levam ao aumento de custos e inviabilidade de muitas empreitadas (RODRIGUES; BRANCALION; ISERNHAGEN, 2009). Numerosos fatores são apontados como causas do insucesso, um dos principais fatores apontados é a falta de água. Porém alguns motivos possíveis do insucesso podem estar sendo negligenciados. A interação e a comunicação entre plantas podem ser apontados como alguns dos fatores negligenciados na teoria e na prática do reflorestamento. Isso se deve, em parte, à distância entre os conhecimentos em inteligência em plantas e a área florestal, principalmente no Brasil. Já foi demonstrado e discutido, por exemplo, que a transmissão de sinal de falta de água entre plantas possa moldar as relações e o estabelecimento de populações e comunidades (HIMANEN; BLANDE; HOLOPAINEN, 2010; FALIK et al., 2011). Dessa maneira, a comunicação deveria agregar complexidade à teoria e a prática de reflorestamento por ser um fator omnipresente na vida das plantas em comunidades e ecossistemas. No entanto, tal capacidade das plantas é ainda pouco considerada,

tanto na teoria como na prática de reflorestamento biodiverso no Brasil, e possivelmente seja mais um dos motivos associados ao insucesso de muitas tentativas de reflorestamento.

Neste estudo em particular analisamos respostas de plantas à deficiência hídrica, uma vez que se trata do principal fator de limitação do crescimento das plantas. A falta de água afeta processos básicos da planta, como a fotossíntese, transporte de nutrientes, alongamento celular, transpiração e manutenção do turgor celular (LARCHER, 2000). Uma das primeiras reações das plantas à deficiência hídrica é a diminuição da abertura estomática. Essa diminuição da abertura leva ao aumento da temperatura foliar (diminui perda de calor por transpiração) e à alteração da pressão de turgor foliar, com tendência de queda com o passar do tempo (LARCHER, 2000; JALEEL et al., 2009). Isso acontece porque a capacidade de captar águas das raízes diminui. A capacidade de captar água das raízes é condicionada pela quantidade de água disponível no meio em que se encontram, sendo assim, quanto menos água disponível (menor potencial de água) no meio, menor é a capacidade de captação de água das mesmas (LARCHER, 2000).

Investigar sobre a comunicação entre plantas, mais especificamente sobre a transmissão de sinal de falta de água entre plantas, é relevante porque inúmeras implicações de ordem teórica e prática podem advir com os resultados de uma investigação com tal caráter, lançando uma perspectiva sociológica sobre o estudo e cultivo de plantas. Os resultados e os desdobramentos possíveis podem ser utilizados para pesquisa e agricultura praticada na região, para os cultivos com espécies integradas em sistemas agro-florestais, e para os esforços de reflorestamento biodiverso com espécies nativas. Se ocorrer de fato a transmissão de sinal de falta de água entre plantas, é possível que algumas espécies desempenhem melhor essa capacidade. Caso isso ocorra, tais espécies poderiam ser introduzidas em meio aos cultivos com intuito de permitir que plantas vizinhas se tornem mais preparadas para lidar com a limitação de água. Com isso a comunidade vegetal poderia economizar mais água, diminuindo o uso da água e os custos envolvidos com irrigação. Diminuir a necessidade de irrigação poderia levar a um aumento das chances no sucesso de estabelecimento da comunidade em reflorestamentos com áreas grandes, e um custo hídrico menor para os lençóis freáticos, corpos d'água e aquíferos.

O objetivo deste trabalho é testar se plantas transmitem sinal de falta de água de uma para outra. Para tanto, foi investigado a possível influência de plantas induzidas a um estresse hídrico sobre plantas não induzidas. Para isso foi realizado o monitoramento da variação da temperatura foliar e da pressão de turgor foliar. A hipótese é de que plantas transmitem informação significativa de falta de água pelas raízes a plantas vizinhas afetando o status hídrico. A temperatura e a pressão de turgor são correlacionadas ao status hídrico, podendo ser utilizados como parâmetros que podem refletir os efeitos de uma transmissão de informação entre plantas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Plantas, comportamento e a inteligência

A ciência vegetal, durante longo tempo, tratou as plantas como meros mecanismos cujo funcionamento e estrutura poderiam ser determinados por meios empíricos e matemáticos. Consequência das bases epistemológicas desenvolvidas dentro da revolução cultural e científica, compreendida entre os séculos XV e XVIII, essa concepção simplista das plantas se edificou dentro das Ciências Vegetais que nasciam sob o jugo da Física e da Química, e sob os métodos, modelos e concepções sacramentados dentro dessas Ciências. Contudo, a capacidade de explicações deterministas perdeu força frente aos fenômenos complexos (MITCHELL, 2009), principalmente no que tange aos fenômenos biológicos, abrindo o caminho para que se levantasse uma perspectiva sistêmica do estudo científico da natureza, e das plantas, por conseguinte. Assim as plantas passaram a ser entendidas não mais como “relógios” ajustáveis, mas como complexos seres auto-organizados, que detêm capacidade de agir sobre si e sobre o meio, respondendo a este de maneira não determinada (TREWAVAS, 2009).

Dentro desse “novo” contexto surge uma “nova” perspectiva nas Ciências Vegetais, denominada Neurobiologia Vegetal ou Inteligência em Plantas. Destaque para o “novo” pelo fato desta perspectiva não ser realmente nova, isso porque Darwin debruçou-se durante maior parte da sua vida sobre as plantas e seus comportamentos, principalmente sobre os aspectos relacionados aos movimentos que certas plantas apresentavam. O resultado desses estudos é o livro *The Power of Movement of Plants*, onde ele descreve vários fenômenos, chamando a atenção para os fenômenos relacionados ao comportamento de raízes. Ele chegou a afirmar que as pontas das raízes funcionavam como um cérebro difuso, semelhante ao de alguns animais com sistema nervoso não centralizado, lançando sua *root-brain hypothesis* (BALUSKA et al., 2009).

A origem da palavra inteligência é derivada do latim *inter legere*, significando apenas “escolher”. No entanto as definições atuais de dicionários convencionalmente utilizam-se somente de propriedades humanas, traçadas de um ponto de vista antropocêntrico, oferecendo a noção de inteligência como

exclusivamente humana. Isso demonstra a subjetividade do termo, traçada a partir da perspectiva que nós humanos consideramos como importantes (WARWICK, 2001). Outra assunção comum é a de que somente organismos com cérebro podem ter inteligência. Vertosick (2002) descarta tal posição e a descreve como um chauvinismo do cérebro, reforçando a ideia da subjetividade contida na definição de inteligência. No entanto, ao considerar, por exemplo, a complexidade contida no funcionamento de uma única célula bacteriana, qualquer chauvinismo do cérebro torna-se inconsistente e frágil. Isso obriga os interessados pelos fenômenos vitais a expandir os limites conceituais do termo, levando a considerar a inteligência como um aspecto do comportamento adaptativo que não se restringe aos humanos (TREWAVAS, 2005).

Stenhouse (1974), na procura das origens biológicas da inteligência humana, descreveu a inteligência como comportamento adaptativo variável durante o ciclo de vida de um organismo. Mia Molvray complementa e expande a proposta de Stenhouse (CVRCKOVÁ; LIPAVSKÁ; ZARSKÝ, 2009), assumindo que a inteligência em não humanos deva ser identificada pelo comportamento adaptativo variável que resulta em aprendizado, podendo ser aplicado a outros níveis de organização, como populações por exemplo. Ambas são tentativas de definição que servem para discriminar o comportamento inteligente do autonômico, caracterizado por respostas invariáveis, automáticas e pré-programadas. Para o caso das plantas, esse comportamento não autonômico pode ser facilmente identificado pela plasticidade fenotípica, entendida como a mudança do fenótipo na busca de atender às necessidades internas, consoante às variações dadas pelo ambiente (BRADSHAW, 1965; SCHLICHTING; PIGLIUCCI, 1998; SULTAN, 2000). As mudanças que ocorrem no fenótipo de um indivíduo ao longo de seu tempo de vida são a expressão de que plantas não são autômatos (TREWAVAS, 2005).

O comportamento pode ser definido como “respostas de um organismo aos sinais que a ele chega durante seu ciclo de vida” (SILVERTOWN; GORDON, 1989). Em últimas instâncias, todo comportamento tem uma base fisiológica, mediado por reações químicas. Entretanto, o comportamento vegetal não é dado por qualquer reação química, a reação tem que ser uma resposta a um estímulo, com relativa velocidade (KARBAN, 2008). O comportamento vegetal não inclui, por exemplo, mudanças ontogenéticas,

porque essas são programadas para ocorrer durante o curso de desenvolvimento, como o exemplo das mudanças bioquímicas que necessariamente levam a transformação de uma semente em plântula (SILVERTOWN, 1998). Em animais, o comportamento ocorre com a movimentação de músculos, enquanto que nas plantas isso não é possível, justamente porque elas não têm músculos. Todavia isso não impossibilita que elas tenham comportamento. Dessa maneira, animais têm resposta motora, enquanto plantas têm respostas fenotípicas (TREWAVAS, 2000). Ambas são possibilitadas por uma complexa rede de processamento de informações que integra os sinais externos às informações internas para então gerar uma resposta (bioquímicas, em última instância) que aumente o sucesso reprodutivo (*fitness*), a finalidade última de qualquer entidade vital (TREWAVAS, 2009).

Plantas respondem a numerosos fatores abióticos do ambiente como disponibilidade de recursos (luz, água e minerais), umidade, estímulos mecânicos, estrutura do solo, temperatura e gases (TREWAVAS, 2000; TURKINGTON; AARSEN, 1984). Para cada caso, a força, direção, e intensidade de características específicas (como, por exemplo, comprimento de onda da luz) podem ser discriminadas separadamente (BALLARÉ, 1994). Mais complexidade é adicionada em virtude da disponibilidade de recursos flutuarem em termos quantitativos, variando de segundos a meses, em gradientes de intensidades variáveis, ou por um mosaico de enormes diferenças de concentração no solo (BELL; LECHOWICZ, 1994; FARLEY; FITTER, 1999; GRIME 1994; KUPPERS 1994; PEARCY et al. 1994; ROBERTSON; GROSS, 1994). Plantas respondem também a sinais bióticos, reconhecendo e identificando a presença ou ausência e até a mesmo a identidade de plantas vizinhas (TREMMELE; BAZZAZ, 1993) e de outros seres como bactérias, fungos, insetos, pássaros e outros animais, incluindo humanos (TAKABAYASHI; DICKE, 1996; PARE; TUMILISON, 1999; KESSLER; BALDWIN, 2001). A plethora de sinais que as plantas integram para dar uma resposta rejeita qualquer possibilidade das respostas das plantas serem autômatas e pré-programadas, principalmente quando se olha para plantas selvagens em seus ambientes naturais. O número de diferentes situações ambientais que as plantas nessa condição experienciam devem estar próximo ao infinito, desvalidando as recentes tentativas de atribuir alguma pré- programação das respostas das plantas ao código genético (TREWAVAS, 2005).

2.2 Aspectos gerais da comunicação

Comunicação pode ser definida como transmissão de informação significativa de uma fonte emissora para um sistema receptor, mediada por um sinal. No caso da comunicação entre humanos, a mediação se dá mais frequentemente via verbal, escrita, expressão corporal e, mais recentemente, via dispositivos tecnológicos, os ditos meios de comunicação, que abrangem rádio, televisão, internet e telefonia. Entretanto, considerando ainda o caso humano, é possível identificar outros tipos de comunicação. As interleucinas, por exemplo, que são moléculas sintetizadas pelos leucócitos, desempenha um papel fundamental na comunicação entre as diferentes moléculas e células responsáveis pela resposta imunológica através de diferentes tecidos e órgãos do corpo humano. Outros exemplos são o sistema nervoso e o endócrino, que levam diferentes tipos de mensagem através de diferentes meios, ou sinais, e que distribuem e integram informações pelo corpo. Apresentado desse modo, a comunicação pode passar a ser vista como um fenômeno que não se restringe somente aos modos pelos quais os humanos interagem entre si, mas também de como suas partes interagem dentro de si (BALUSKA, MANCUSO, VOLKMAN, 2006).

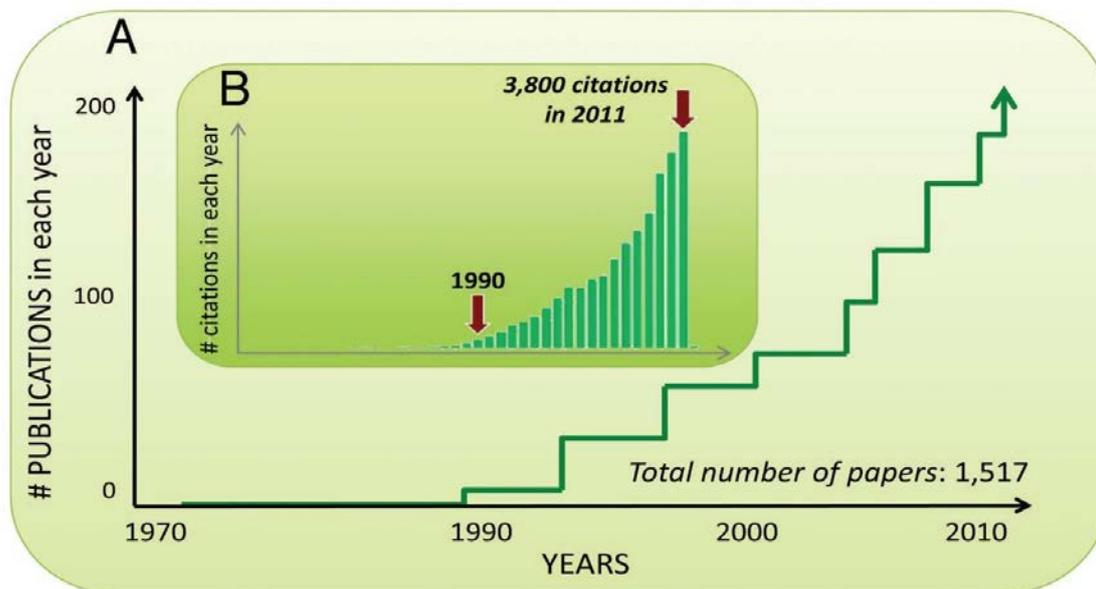
A comunicação, assim como a inteligência, é um fenômeno intimamente relacionado à vida e seus processos; é parte indispensável à manutenção de sistemas dinâmicos complexos auto-organizados, atuando seja em um determinado nível, ou escala organizacional desses sistemas, ou entre os níveis de organização (HIMANEN; BLANDE; HOLOPAINEN, 2010; SOUZA; LUTGGE, 2015). A comunicação é fundamental para a manutenção da estabilidade dos sistemas vivos em todos os níveis, de organelas a ecossistemas. Considerada como algo muito mais abrangente do que ocorre entre seres humanos, a comunicação, no caso das plantas, pode ser apresentada de forma mais detalhada como será feito a seguir.

2.2.1 Comunicação em plantas

A possibilidade da existência de comunicação entre plantas foi cientificamente proposta e testada a mais de trinta anos, com os trabalhos seminais de Baldwin e Schultz (1983) e Rhoades (1983). Eles clamavam que árvores avisavam umas às outras sobre o ataque iminente de insetos. Apesar de publicados em revistas de qualidade, tais trabalhos foram demasiadamente descreditados por ampla parte da comunidade dos cientistas vegetais. Um motivo do descrédito inicial foi a associação entre tais trabalhos e o Best-seller “A Vida Secreta das Plantas” (CHEMOVITZ, 2012). Somado a esse motivo estavam críticas que apontavam para inadequação do controle experimental e para falta de repetição (FOWLER, LAWTON, 1985; KARBAN; BALDWIN, 1997). Isso impulsionou a investigação cada vez maior em termos quantitativos e qualitativos em relação ao fenômeno da comunicação em plantas, o que acabou constituindo-se em um verdadeiro campo de pesquisa dentro da área de investigação denominada “Inteligência Vegetal”, ocupando posição de destaque dentro do mesmo (BALUSKA, MANCUSO, VOLKMAN, 2006; GAGLIANO et al., 2012).

A perspectiva sobre a comunicação em plantas tem sido revolucionada nas últimas três décadas, evidenciado pelo crescimento exponencial do número de publicações na área (FIGURA 1) (GAGLIANO et al., 2012). Tal progresso foi acompanhado por uma maior apreciação da diversidade dos meios pelos quais a comunicação ocorre, trazendo a possibilidade de que novas modalidades de comunicação possam ainda ser descobertas, a exemplo das mais recentes divulgações que demonstram que ocorre comunicação por meio da variação da intensidade de campos magnéticos e por meio de ondas mecânicas (som) (GAGLIANO et al., 2012).

FIGURA 1- Número de publicações e citações sobre comunicação em plantas.



(A) Número de artigos publicados em cada ano sobre o assunto “Comunicação em plantas” de 1970 até hoje (diagrama maior) e (B) taxa de citação para o mesmo assunto e mesmo período (diagrama menor). Ambas as tendências são baseadas somente em publicações pré-revisadas (não inclui livros) indexadas na Rede de Ciência.

Fonte: GAGLIANO, M. et al. (2012).

2.2.2 Comunicação em plantas mediada por compostos voláteis: o caso mais entendido

Por ser a primeira modalidade a ser estudada, a comunicação de sinal de ataque de herbívoros via compostos voláteis foi um dos principais objetos de interesse de cientistas vegetais mundo afora, abrangendo grande parte do volume de publicações sobre o assunto “comunicação”. A contribuição ecológica dos voláteis para interações planta-planta, planta-herbívoro, planta-patógeno e multitróficas, podem ser mutualistas ou não, podendo tanto favorecer como desfavorecer os indivíduos na rede infoquímica. Emitir, perceber, ou ser passivamente afetado por compostos voláteis, pode resultar em custos e/ou benefícios ecológicos e trazer vantagem competitiva na moldagem da dinâmica de populações (HIMANEN; BLANDE; HOLOPAINEN, 2010).

Plantas podem reconhecer a identidade de herbívoros e atrair seus predadores específicos emitindo compostos voláteis pelas folhas na atmosfera (ARIMURA; KOST; BOLAND, 2005). Essa possibilidade, contanto, não é restrita à atmosfera. Raízes de milho, por exemplo, que se encontram sob ataque de

insetos, emitem compostos voláteis que, no meio aéreo do solo, sinalizam aos nematóides específicos que parasitam e matam esses insetos (RASMANN et al., 2005). Por meio da liberação de compostos voláteis, plantas afetadas por patógenos sinalizam às vizinhas o perigo iminente de contaminação, promovendo o aumento da imunidade contra esses patógenos (PARÉ; TUMILSON, 1999; REDDY; GUERRERO, 2004). Algumas plantas conseguem ainda diferenciar o corte na folha feito por um herbívoro de um corte feito por tesoura, emitindo diferentes compostos voláteis para cada situação (REDDY; GUERRERO, 2004; ARIMURA; KOST; BOLAND, 2005). Há exemplos bem conhecidos de interações mediadas por voláteis como α -pineno, β -pineno, canfeno, cânfora, cineol e dipenteno entre plantas arbustivas que resultam na inibição da germinação e do crescimento radicular de plântulas de herbáceas (MULLER; HAINES; MULLER, 1964). Com tudo isso é possível afirmar que os compostos voláteis servem não somente para comunicação, mas também para moldar as relações ecológicas entre espécies dentro de um mesmo nível trófico ou entre espécies de níveis tróficos diferentes afetando ecossistemas inteiros (HIMANEN; BLANDE; HOLOPAINEN, 2010).

2.3 Sistema solo-planta-atmosfera: Indisponibilidade de água para raízes, respostas estomáticas e a relação com a temperatura e o turgor foliar

As plantas se relacionam com o ambiente trocando matéria, energia e informação. Elas podem ser entendidas como um sistema acoplado com dois ambientes, o solo e a atmosfera, sendo por esse motivo considerado como um sistema solo-planta-atmosfera. A água é um fator chave de tal sistema, sendo deslocada de um lugar para o outro por diferença de energia potencial química. Dessa maneira a água se desloca de onde há maior potencial de água (Ψ) para onde o potencial é menor. As condições hídricas do solo e da atmosfera afetam a regulação da abertura estomática que, por sua vez, afeta a fotossíntese, o balanço hídrico e energético. Se a disponibilidade de água das raízes é diminuída rapidamente pela elevação do potencial osmótico, a abertura estomática diminui rapidamente junto com a transpiração, aumentando a temperatura foliar proporcionalmente, enquanto o turgor da folha tende a aumentar no início e a diminuir depois de um tempo maior (LARCHER, 2000).

Os estômatos são estruturas-chave que desempenham a função de regular as trocas gasosas entre a folha e a atmosfera e de controlar a perda de água e calor para atmosfera (COSTA; GRANT; CHAVES, 2013). O poro estomático permite a perda de vapor de água para atmosfera (transpiração) e a entrada de CO₂ atmosférico para a fotossíntese. A abertura estomática é rápida e reversivelmente regulada pelo par de células guarda que delimitam e definem o poro estomático (ostíolo). Um controle fino da abertura do poro é essencial para que a planta não perca água excessivamente e desidrate, e para que ela não se torne “faminta” por CO₂ (CHAVES et al, 2002). Esse controle fino é alcançado por meio de uma extraordinária sensibilidade das células guarda a múltiplos fatores endógenos e ambientais, principalmente o status hídrico da planta, ABA e outros hormônios, luz, umidade, temperatura, concentração de CO₂ (ASSMANN; SHIMAZAKI, 1999). Existem evidências de que o controle da abertura do estômato também aconteça em resposta a ataque de patógenos (ALLÈGRE et al., 2007). De forma geral, a abertura estomática acontece pela entrada de água nas células guarda. A água entra devido à diferença de potencial osmótico entre as células guarda e o ambiente ao entorno, a diferença é aumentada pelo bombeamento de íons para dentro das células- guarda e pelo aumento de açúcares solúveis dentro delas. Já o fechamento, ocorre pela perda de água das células-guarda, gerada pela diminuição do potencial osmótico destas (BUCKLEY, 2005).

Devido à habilidade de processar muitos sinais e por ser vital para as plantas, o controle da abertura estomática pelas células guarda tornou-se um modelo para biologia vegetal estudado desde o final do século XIX (BUCKLEY, 2005; ASSMANN; SHIMAZAKI, 1999). As respostas estomáticas aos fatores ambientais foram tidas, durante longo tempo, como funções lineares de estímulos. Contudo, atualmente, passou-se a ver que tais respostas têm caráter complexo, em que múltiplos fatores atuam no controle, de modo que as respostas dadas sejam as mais relevantes para cada contexto (ALISTAIR; HETHERINGTON; WOODWARD, 2003). O controle da abertura estomática também pode ser considerado como um comportamento altamente plástico do fenótipo (FALIK et al. 2011) que busca lidar adaptar-se a múltiplos fatores ambientais e atender às necessidades internas, que muitas vezes são antagônicas.

Os estômatos não são somente sensíveis a diversos fatores ambientais, eles também podem ser responsabilizados por mudarem as condições do ambiente. Uma das principais alterações ambientais proporcionadas pelos estômatos ocorre pela liberação de vapor de água para atmosfera, que influencia as condições de umidade atmosférica, desde microclimas, da ordem de milímetros, centímetros e metros, à macroclimas continentais e até do planeta inteiro (ALISTAIR; HETHERINGTON; WOODWARD, 2003).

A transpiração via estômato é um processo dependente da temperatura e da umidade relativa do ar que são correlacionadas ao déficit de pressão de vapor (DPV). Contudo, ela só pode ocorrer se houver água disponível para as raízes. Um dos sinais endógenos que controlam o fechamento estomático pela falta de água disponível para as raízes é o ácido abscísico (ABA). O ABA é sintetizado nas células das raízes e translocado até as células guarda pela corrente transpiratória, onde interage com receptores específicos para ABA, que induzem à saída de íons e solutos, juntamente com a água, fazendo com que as células guarda percam turgor e fechem o poro (ASSMANN; SHIMAZAKI, 1999). Com os poros fechados a planta resolve o problema de falta de água das raízes, mas deixa de perder calor e de importar CO₂. Com isso fica com excesso de energia que pode ser liberada somente por radiação (infravermelho e fluorescência). Para lidar com o excesso de energia, a planta acaba tendo que abrir o poro para entrar CO₂ (que é utilizado na fotossíntese que é um processo endotérmico) e para liberar calor com o vapor de água e evitar danos em proteínas e membranas lipoproteicas. A abertura estomática nesse estágio leva a diminuição do status hídrico da planta como um todo, principalmente da folha, fazendo com que a folha perca turgor (ZIMMERMANN et al., 2013). A perda de turgor por sua vez leva ao fechamento estomático novamente e isso, outra vez, leva a um quadro de excesso de energia que pode acarretar em danos irreversíveis em estruturas essenciais (membranas e proteínas), levando a morte celular e danos em tecidos, órgãos e em última instância à morte da planta inteira, caso não seja irrigada (BUCKLEY, 2005).

A temperatura e o turgor foliar podem ser utilizados como parâmetros do status hídrico da planta podendo ser usados como indicadores de estresse hídrico. Tanto a temperatura (COSTA; GRANT; CHAVES, 2013) como o

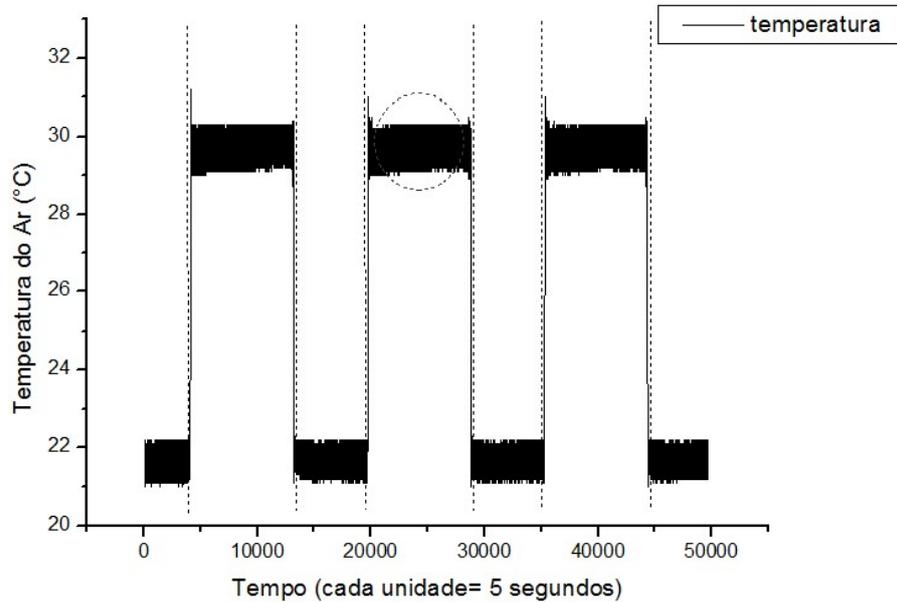
turgor foliar (ZIMMERMANN et al.,2013) podem também ser utilizados como medida indireta da abertura estomática.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Dentro deste estudo foram realizados dois tipos de experimentos, nomeados “Acompanhamento Térmico” (ATER) e “Acompanhamento do Turgor” (ATUR). Tais experimentos foram realizados para verificar se uma planta estressada (estimulada) influencia o comportamento de plantas vizinhas, com as quais mantinham contato pelas raízes. Como a regulação da temperatura e do μ status hídrico, esses parâmetros foram adotados como suficientes para captar uma possível influência de uma planta estimulada (com estresse osmótico) sobre suas vizinhas. O primeiro experimento foi um acompanhamento da temperatura foliar ao longo do tempo. O segundo experimento foi um acompanhamento da variação de turgor foliar ao longo do tempo.

O estudo foi desenvolvido no Laboratório de Inteligência em Plantas e Ecofisiologia “Urich Lüttge”, situado no campus II da Universidade do Oeste Paulista, Unoeste, SP, Brasil. A soja (*Glycine max*) foi adotada como modelo experimental em virtude de seu curto ciclo de vida e por ser uma espécie robusta que permite a manipulação a ser descrita a seguir. Durante toda a fase de crescimento e experimentação as plantas foram cultivadas em uma câmara de crescimento vegetativo do tipo Fitotron (EL011, Eletrolab, São Paulo, Brasil). As condições ambientais do Fitotron foram as seguintes: luminosidade ($600 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$); fotoperíodo (13 horas de luz/ 11 horas de escuro); temperatura de 30°C no período de luz e 22°C no escuro; umidade variando em torno de 40% (luz) e 80% (escuro). A variação padrão da temperatura e umidade do ar no Fitotron durante um período da realização de experimento pode ser observada nas FIGURAS 2 e 3, e 4 e 5, respectivamente. Os dados de temperatura foram registrados pelo próprio sensor de temperatura do Fitotron a cada cinco segundos, enquanto os dados de umidade foram coletados com a um sensor de umidade (Air Relative Humidity Probe, Zim Plant Technology, Berlim, Alemanha) a cada cinco minutos.

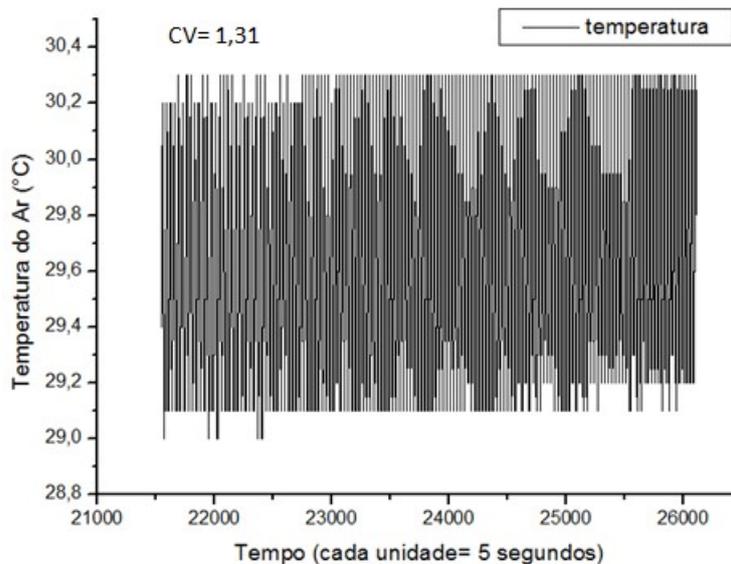
FIGURA 2- Variação da temperatura do ar ao longo de três dias.



Os dados foram coletados a cada 5 segundos pelos sensores de temperatura do Fitotron. Trata-se de uma amostra da variação ocorrida ao longo dos dias de experimentação. O Fitotron foi ajustado para manter a temperatura em 30°C durante o período de luz e 22°C durante o período de escuro. Os picos indicam o período de luz e os vales o de escuro, e as linhas verticais pontilhadas mostram o momento de transição de um período para o outro. O círculo pontilhado localizado no pico do meio é um recorte do período de luz destacado para indicar o comportamento da temperatura no intervalo utilizado para análises termográficas e de variação de turgor. A variação da temperatura dentro desse recorte pode ser vista com mais detalhes na FIGURA 3.

Fonte: O Autor.

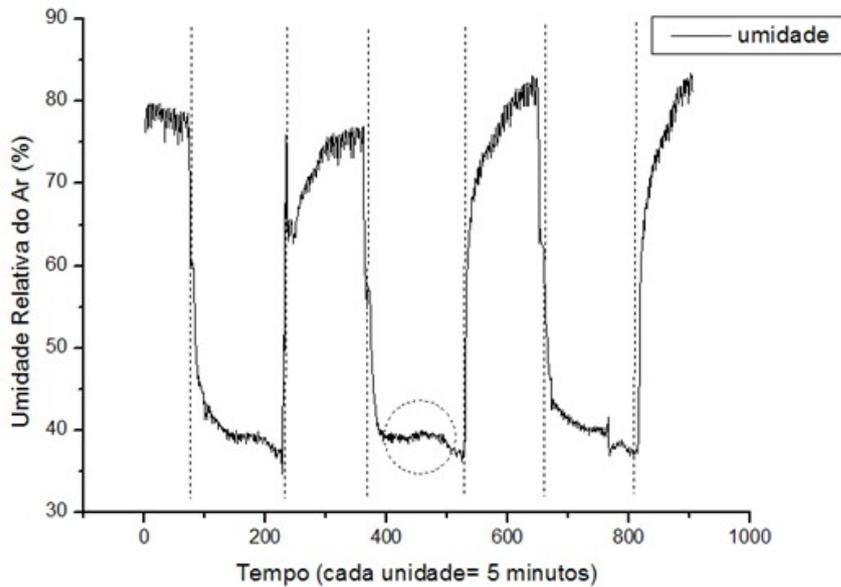
FIGURA 3- Variação de temperatura do ar ao longo de intervalo de tempo utilizado para análises termográficas e da variação de turgor.



Os dados foram coletados a cada 5 segundos pelos sensores do Fitotron. Na parte superior está o coeficiente de variação (CV%) da temperatura durante o tempo.

Fonte: O Autor.

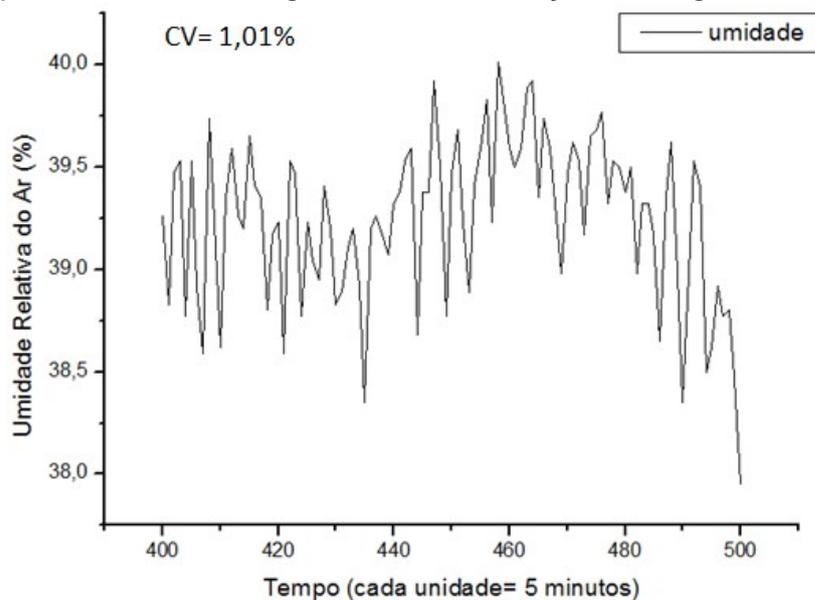
FIGURA 4- Variação da umidade do ar ao longo de três dias.



Os dados foram coletados a cada 5 minutos pelo sensor de umidade Zim-humidity-probe. Trata-se de uma amostra da variação ocorrida ao longo dos dias de experimentação. Os picos indicam o período de escuro e os vales o de luz, e as linhas verticais pontilhadas mostram o momento de transição de um período para o outro. O círculo pontilhado localizado no pico do meio é um recorte do período de luz destacado para indicar o comportamento da umidade no intervalo utilizado para análises termográficas e de variação de turgor. A variação da umidade dentro desse recorte pode ser vista com mais detalhes na FIGURA 5.

Fonte: O Autor.

FIGURA 5: Variação de umidade do ar ao longo de intervalo de tempo utilizado para análises termográficas e da variação de turgor.

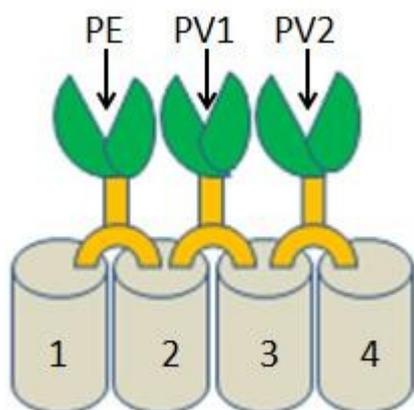


Os dados foram coletados a cada 5 minutos pelo sensor de umidade Zim-humidity-probe. Na parte superior está o coeficiente de variação (CV%) da umidade durante o tempo.

Fonte: O Autor.

A unidade experimental deste trabalho é constituída de 3 plantas com suas raízes divididas entre 4 potes (FIGURA 6). Essa unidade foi nomeada “série”, por se tratar de uma fileira de plantas em série. Cada planta da série recebeu um nome. A primeira planta foi nomeada como “Planta Estimulada” (PE). Essa denominação deve-se ao fato desta planta ser a que teve contato direto de metade de seu sistema radicular com o agente estressante, sofrendo o estímulo. A segunda planta foi nomeada “Planta Vizinha 1” (PV1), a terceira planta da série nomeada por “Planta Vizinha 2” (PV2). Os 4 potes de cada série foram numerados de 1 a 4. O pote 1 é o que recebeu o agente estressante.

FIGURA 6- Esquema que representa as unidades experimentais.



O esquema representa as três plantas com metade de suas raízes divididas entre os potes. Os arcos em amarelo representam as raízes. Os retângulos verticais em amarelo representam os caules. Os semicírculos em verde representam as folhas. Os cilindros em cinza numerados de 1 a 4 representam os potes. PE (Planta Estimulada); PV1 (Planta Vizinha 1); PV2 (Planta Vizinha 2).
Fonte: O Autor.

Para cada um dos dois tipos de experimento (ATER e ATUR) foi necessário utilizar plantas com idades e tamanhos diferentes devido ao tipo de instrumento empregado para cada tipo de análise (FIGURAS 7 e 8). As plantas usadas em ATUR precisavam ser bem desenvolvidas para instalação dos sensores de pressão de turgor. Enquanto as plantas usadas em ATER precisavam ter o mínimo de folhas possível para que não houvesse sombreamento de umas folhas sobre as outras e para com isso deixar toda a superfície foliar de uma planta exposta à luz, ao calor e às lentes da câmera termográfica.

FIGURA 7- Fotografia mostrando uma série montada para ATER.



Nesta imagem estão as 3 plantas divididas entre os 4 potes pronta para realização do experimento.
Fonte: O Autor.

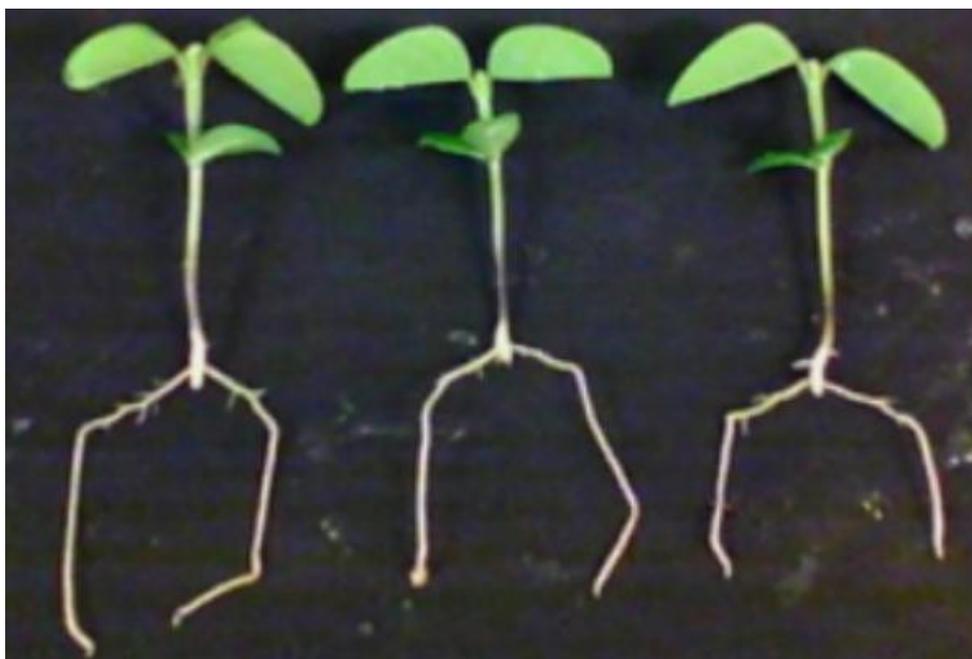
FIGURA 8- Fotografia mostrando 2 séries montadas para ATUR.



Cada uma com as 3 plantas divididas em 4 potes. As séries estavam prestes a ter as sondas Zim-probe instaladas.
Fonte: O Autor.

Para realização de ATER, foram germinadas sementes de *G. max* individualmente em copos de poliestireno expandido (100 mL), contendo vermiculita expandida. Após 10 dias da germinação as plântulas tiveram suas raízes podadas de modo que cada uma ficou com 2 raízes semelhantes em tamanho e aparência (FIGURA 9). As plântulas foram então arranjadas em série, cada uma consistindo de uma fileira com três plantas com as raízes divididas entre quatro copos de isopor (180 mL) contendo água destilada e tampada com círculos de isopor para evitar contato da luz com as raízes (FIGURA 7). As séries foram mantidas por mais dois dias para recuperarem-se do estresse sofrido pela poda das raízes. Foram montadas 17 séries (repetições), numeradas de I a XVII.

.FIGURA 9- Fotografia mostrando três plântulas com raízes podadas.



A imagem mostra 3 plantas com suas raízes podadas, prontas para montar as séries de ATER.
Fonte: O Autor.

Para realização de ATUR, foram colocadas sementes de *G. max* individualmente para germinar em areia em vasos com capacidade de 2 L. Vinte e um dias após a germinação, a raiz principal (pivotante) foi cortada e as plantas replantadas em seus respectivos potes, com areia, e mantidas por mais 15 dias, para estimular a proliferação de raízes laterais. Passados os 15 dias, as plantas foram retiradas dos vasos e as suas raízes foram lavadas. Com as raízes livre de areia, foi realizada a poda do sistema radicular deixando apenas duas raízes de

tamanho e aparência similares (FIGURA10). As plantas foram então arranjadas em série, cada uma contendo três plantas similares e quatro vasos (FIGURA 8). Foram montadas 6 séries (repetições) dessas (A, B, C, D, E, F). Para manter as plantas nas séries foi utilizado um sistema de hidroponia (Floating), utilizando-se de vasos opacos de plástico com capacidade de 3 L contendo solução nutritiva de Hoagland, oxigenados com compressor de aquário (FIGURA 8). As 6 séries permaneceram então por mais 21 dias dentro dessas condições.

FIGURA 10- Fotografia: mostrando uma planta após a poda das raízes.



A imagem mostra uma planta com as raízes podadas, prontas para montar as séries de ATUR.
Fonte: O Autor.

O estímulo osmótico nas plantas foi induzido com uso de manitol. O manitol é um açúcar alcoólico natural comumente utilizado para induzir seca controlada em plantas quando adicionado ao meio onde se encontram as

raízes. Esse açúcar foi utilizado neste trabalho para induzir plantas à indisponibilidade de água por meio da indução da queda do potencial de água gerado pelo aumento do potencial osmótico do meio onde se encontravam as raízes. O manitol causa o aumento do potencial osmótico por ser uma molécula que apresenta alta afinidade com a água e por não atravessar a parede nem a membrana celular das raízes. Neste trabalho foi utilizada solução aquosa de manitol com potencial osmótico de -2 MPa para induzir plantas ao estresse (FALIK et al., 2011). No entanto, para cada tipo de avaliação (ATUR/ATER) foi utilizado um procedimento conforme as especificidades e necessidades de cada experimento.

Em ATER, as séries foram submetidas à indução ao estresse osmótico com solução de manitol, depois de dois dias de montadas. Primeiro, foi preparada a solução de manitol [300 g/L] com potencial osmótico de -4 MPa. Para induzir a planta ao estresse (estimular) foi necessário retirar 90 mL do pote 1 (metade de seu conteúdo de água destilada). Essa retirada foi feita com uma seringa. Logo em seguida à retirada de água, foi colocado, com outra seringa, 90 mL da solução de manitol (-4MPa). Em ATUR, a indução se deu depois de 21 dias de montadas as séries. A solução de manitol de ATUR foi preparada com concentração de 150g/L para chegar a um potencial osmótico de -2MPa. Para induzir a planta ao estresse, primeiramente foi esgotado todo o conteúdo de solução nutritiva do pote 1, com uma mangueira. Logo em seguida o mesmo pote foi preenchido com a solução de manitol com potencial osmótico de -2 MPa.

O instrumento utilizado para monitorar a variação de temperatura da superfície foliar foi uma câmera termográfica por infravermelho FLIR (FLIR E-5, FLIR Systems, Wilsonville, Oregon, USA) (FIGURA 11). Trata-se de uma câmera que tem um dispositivo sensível a comprimentos de onda situados dentro da faixa infravermelho do espectro eletromagnético. Além de imagens térmicas a mesma câmera pode fazer imagens dentro do espectro de luz visível, como qualquer câmera digital. O modelo utilizado apresenta a tecnologia MSX, que possibilita mesclar as imagens dentro das duas faixas do espectro eletromagnético (infravermelho e luz visível). A tecnologia MSX oferece imagens térmicas com maior definição sem perder qualidade de informação. A empresa fabricante disponibiliza um software (FLIR Tools) onde as imagens da câmera podem ser analisadas. A câmera foi ajustada em seu menu, para focar sobre superfícies

distante a 30 cm da lente para obtenções de imagens mais nítidas, de melhor definição, que evitam distorções causadas pelo deslocamento de ar com diferentes temperaturas (COSTA; GRANT; CHAVES, 2013). O tipo imagem escolhida no menu foi o MSX por ser o formato de imagem mais nítida.

FIGURA 11- Fotografia do FLIR E5.



Fonte: O Autor.

A câmera termográfica primeiramente foi fixada sobre uma mesa dentro do Fitotron, de uma maneira que a distância entre a lente e a superfície das folhas das plantas da série foi de 30 cm. Cada série foi colocada sobre uma superfície plana e branca de poliestireno expandido e localizada exatamente no mesmo local, sempre com a planta do meio (PV1) centralizada no meio da imagem, tudo para padronizar as condições de fundo da imagem e dessa forma evitar diferenças entre as repetições. Cada série foi monitorada durante 60

minutos, com imagens feitas a cada 5 minutos; a primeira imagem ($t = 0$ minuto) feita antes da aplicação do manitol, e as outras 11 depois de aplicado.

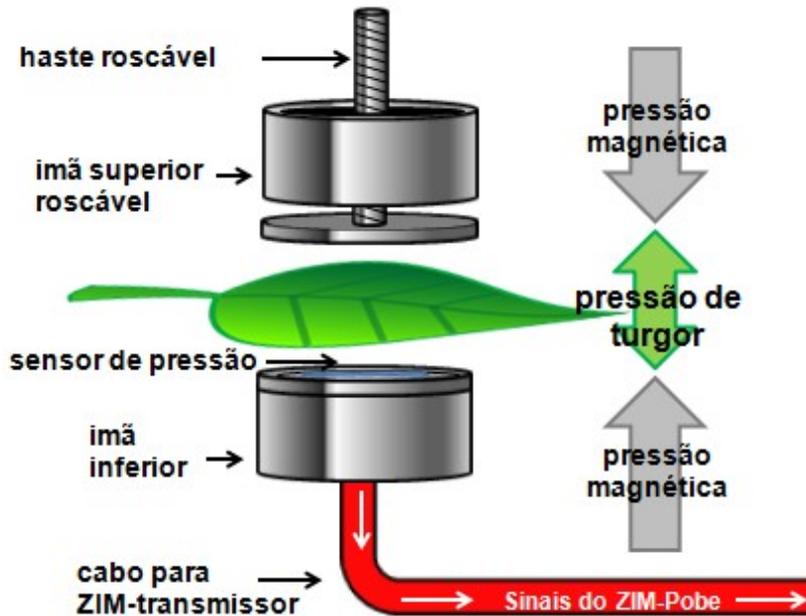
Para monitorar a variação da pressão de turgor foliar foi utilizado as sondas magnéticas de pressão de turgor foliar (Magnetic Leaf Turgor Pressure Probe, Zim Plant Technology, Berlim, Alemanha), também denominado “*Zim-probe*” (FIGURA 12). As sondas são constituídas, basicamente, por dois ímãs tóricos separados e contidos em dois dispositivos metálicos cilíndricos (FIGURA 12), cada um com diferentes funções. Um desses dispositivos contém uma cavidade preenchida com um polímero sensível à variação de pressão magnética com um sensor eletrônico de variação de pressão mergulhado dentro, esse sensor eletrônico tem um fio acoplado responsável por levar a informação sobre a variação de pressão captada por ele até outro dispositivo denominado radiotransmissor (FIGURA 13). O outro dispositivo metálico cilíndrico contém duas partes: uma chapa metálica circular com uma haste que tem uma rosca soldada em cima e o ímã com uma rosca invertida que permite ao mesmo ser ajustado sobre a placa circular conforme necessário e segundo as instruções do fabricante (ZIMMERMANN et al., 2013).

FIGURA 12- Sonda magnética de variação de turgor foliar Zim-probe.



Fonte: O Autor.

FIGURA 13- Fluxograma: dispositivos que compõe o “ZIM-probe”.



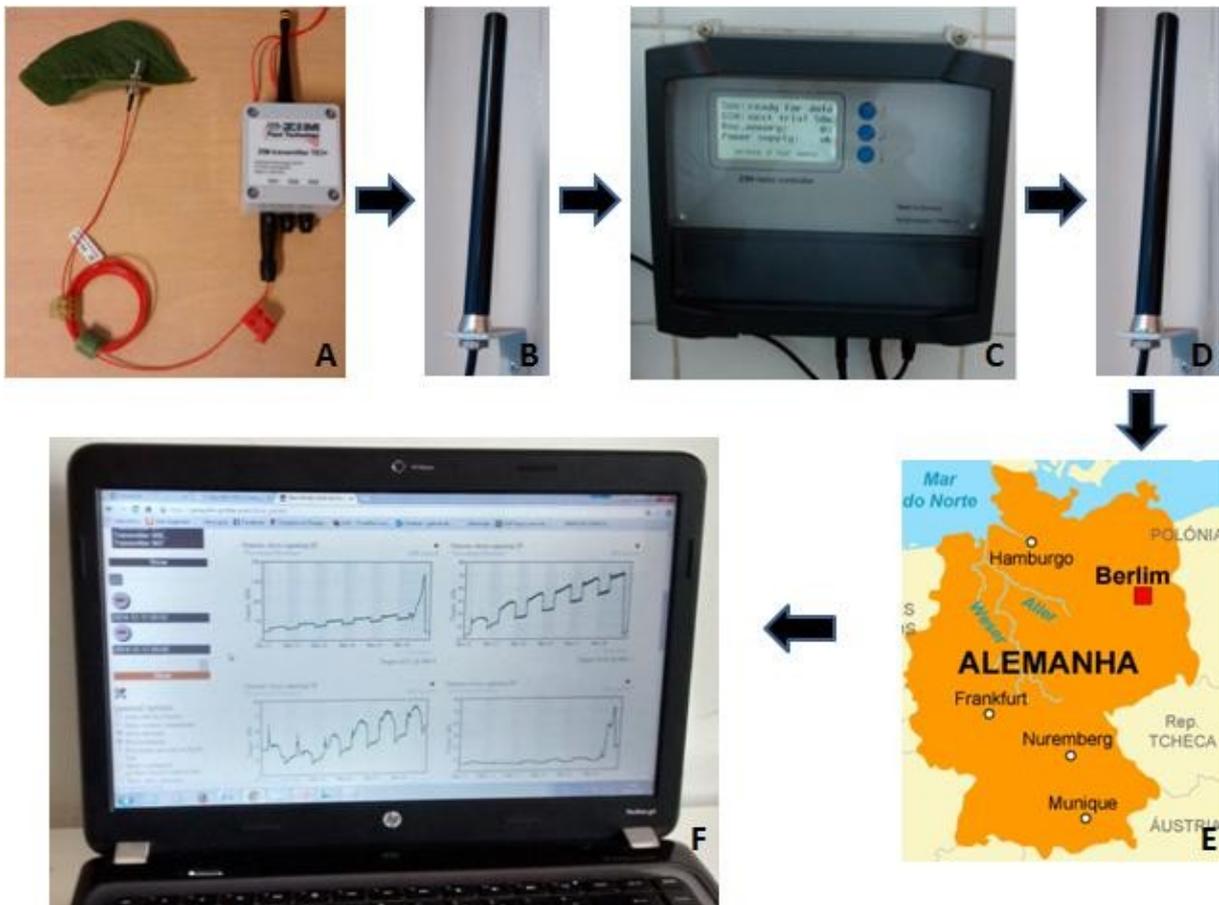
Fonte: ZIMMERMANN et al. (2013) (adaptado).

Os dois dispositivos que constituem as sondas propriamente ditas são instalados nas folhas de modo que essas fiquem dispostas entre os dois (FIGURA 13). Cada ímã tem um campo magnético que exerce uma força magnética constante sobre o outro, essa força é alterada somente pela alteração do turgor da folha situada entre eles. Dessa forma, se a folha ganha água ela afasta os ímãs de uma sonda, diminuindo a pressão exercida pelos campos magnéticos sobre o polímero, que por sua vez diminui a deformação deste e a pressão exercida sobre o sensor contido no mesmo, gerando uma menor “pressão de clipe”. Por outro lado, se a folha perde água, os ímãs se aproximam, deformando mais o polímero, aumentando a pressão sobre o sensor acarretando em maior “pressão de clipe”. Os campos magnéticos exercidos entre os ímãs permitem que os mesmos não tenham contato direto com folha, dessa forma a variação de pressão de turgor foliar pode ser captada de modo não invasivo, refletida na razão inversa da pressão de clipe.

Os dados coletados pelos sensores são transmitidos via telemetria pelo radiotransmissor até um radio-controlador que por sua vez envia a informação via internet wireless de um cartão SIM (GSM) até a central de processamento de dados da empresa situada na Alemanha. A empresa disponibiliza então os dados ou em tempo real, através de um gráfico na página do usuário (FIGURA 14), ou

a qualquer momento por meio da geração de uma planilha contendo todas as medidas coletadas ao longo do tempo. Com isso é possível monitorar a variação da pressão de turgor foliar, gerando uma série temporal de dados passível de análise (ZIMMERMANN et al., 2013). Cada radiotransmissor contém três canais de entrada. Cada entrada denominada como canal 1 (Ch1), canal 2 (Ch2) e canal 3 (Ch3).

FIGURA 14- Fluxograma: os componentes do Zim-probe e a sequência na qual a informação coletada é ordenada.



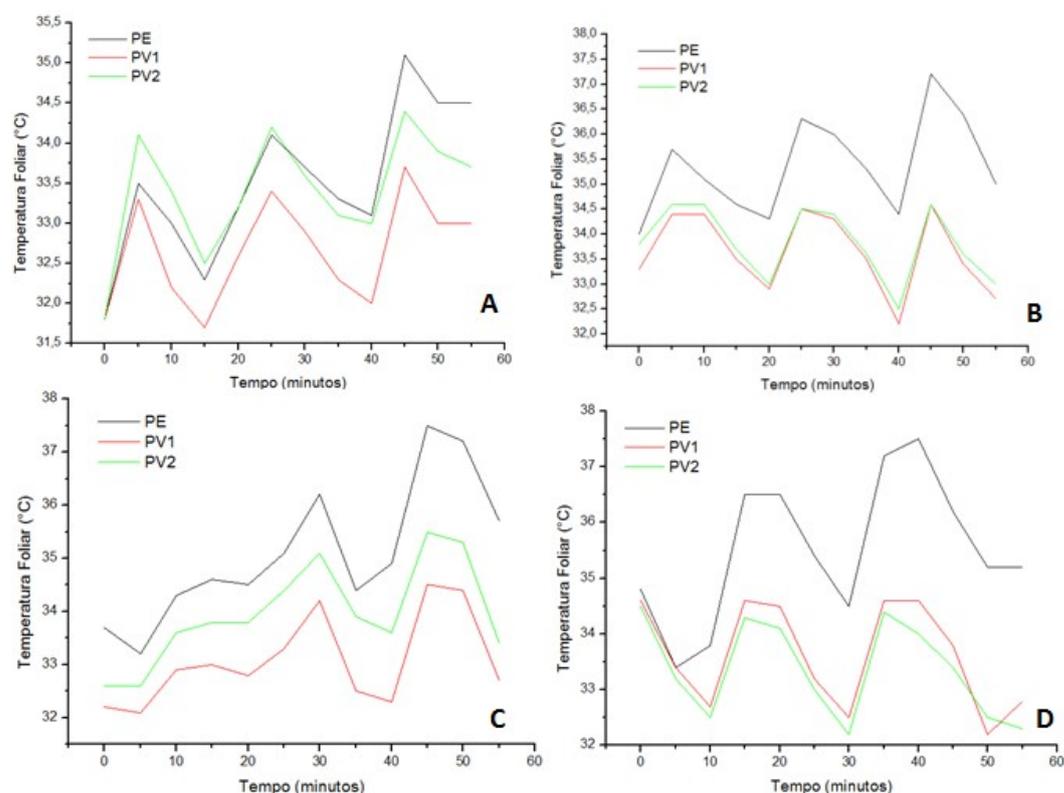
A (um radiotransmissor com um cabo de um Zim-probe instalado no canal 1 e os outros dois canais de entrada livres ao lado. Na terminação do cabo está uma folha destacada com a sonda propriamente dita acoplada para demonstração); **B** (antena que recebe as informações do radiotransmissor); **C** (radiocontrolador que recebe as informações coletadas pela antena de B); **D** (antena que envia as informações do radiocontrolador para a central de processamento de dados na Alemanha); **E** (mapa político da Alemanha para representar o local da central de dados); **F** (notebook mostrando os gráficos disponibilizados em tempo real na página do usuário).
Fonte: O Autor.

Cada radiotransmissor monitorou cada uma das 6 séries por meio das suas três sondas. Cada sonda foi acoplada ao folíolo central do quinto trifólio totalmente expandido de cada uma das plantas de cada série. A instalação das sondas foi feita depois de 17 dias de cultivo em série em hidroponia seguindo uma ordem lógica em que a sonda do canal 1 de cada radiotransmissor ficou acoplado à uma folha da primeira planta de cada série (PE), enquanto a do canal 2 foi instalado na segunda planta (PV1) de cada série e a do canal 3 na terceira planta (PV2). Após 4 dias instalados nas folhas, foi realizada a indução ao estresse hídrico. O intervalo em que os sensores captam informação pode ser ajustado na página do usuário (yara.zimplanttechnology/zim-probe-users). Neste trabalho, os sensores foram ajustados para coletar dados a cada 5 minutos, o que permite um monitoramento realizado em curtos intervalos de tempo.

4 RESULTADOS

Os resultados das avaliações de acompanhamento da temperatura foliar realizado para cada uma das 17 séries do experimento ATER estão sumarizados na FIGURA 15, que mostra a variação da temperatura de 4 das 17 séries analisadas. Cada medida foi feita sobre uma mesma área da superfície de uma folha de cada planta de cada série. As medidas ocorreram ao longo de uma hora, realizadas em intervalos de 5 minutos. Foram escolhidos apenas 4 gráficos porque esses evidenciam, de forma resumida, o comportamento apresentado pelas 17 séries. Nos gráficos é possível ver uma tendência de a temperatura das folhas das plantas de cada série em variar sincronicamente a partir do estímulo dado na PE (FIGURA 15). A amplitude de variação das oscilações de temperatura é maior do que a variação da temperatura do ar do Fitotron.

FIGURA 15 - Gráfico- Acompanhamento da variação da temperatura foliar das três plantas de 4 séries.

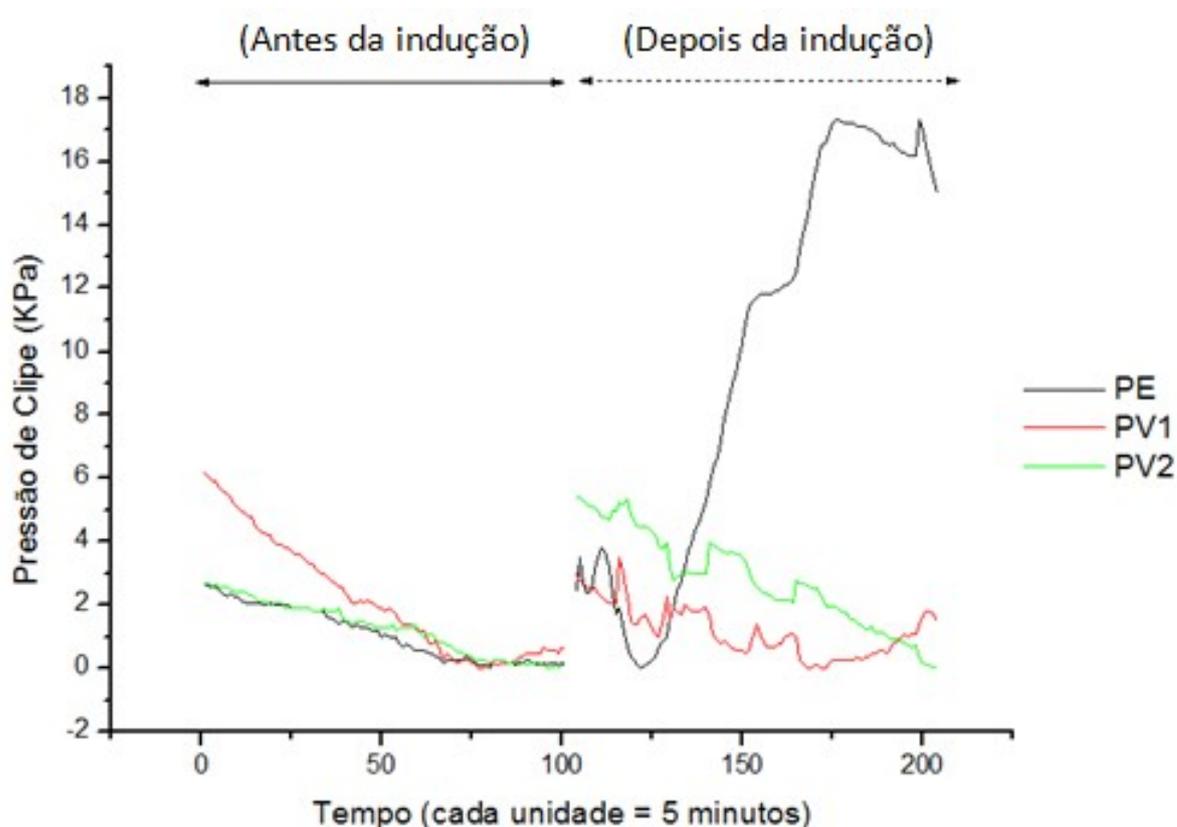


O acompanhamento foi feito ao longo de uma hora. As medidas foram feitas a cada 5 minutos. A primeira medida (0 minuto) foi feita imediatamente antes da indução ao estresse osmótico pela aplicação da solução de manitol. PE (Planta Estimulada); PV1 (Planta Vizinha 1); PV2 (Planta Vizinha 2).

Fonte: O Autor.

A dinâmica da variação da pressão de turgor foliar pode ser vista graficamente, refletida na razão inversa da variação de pressão de clipe de cada planta, de cada série, ao longo dos intervalos de tempo amostrados antes e depois da indução ao estresse (FIGURAS 16 à 21). As Figuras 16, 17 e 18 (séries A, B e C) mostram que houve diferença no comportamento da variação de pressão de turgor foliar de PV1 e PV2 entre antes e depois da indução ao estresse. As Figuras 19, 20 e 21 (séries D, E e F) mostram que não houve diferença no comportamento da variação de pressão de turgor de PV1 e PV2, entre antes e depois do estresse.

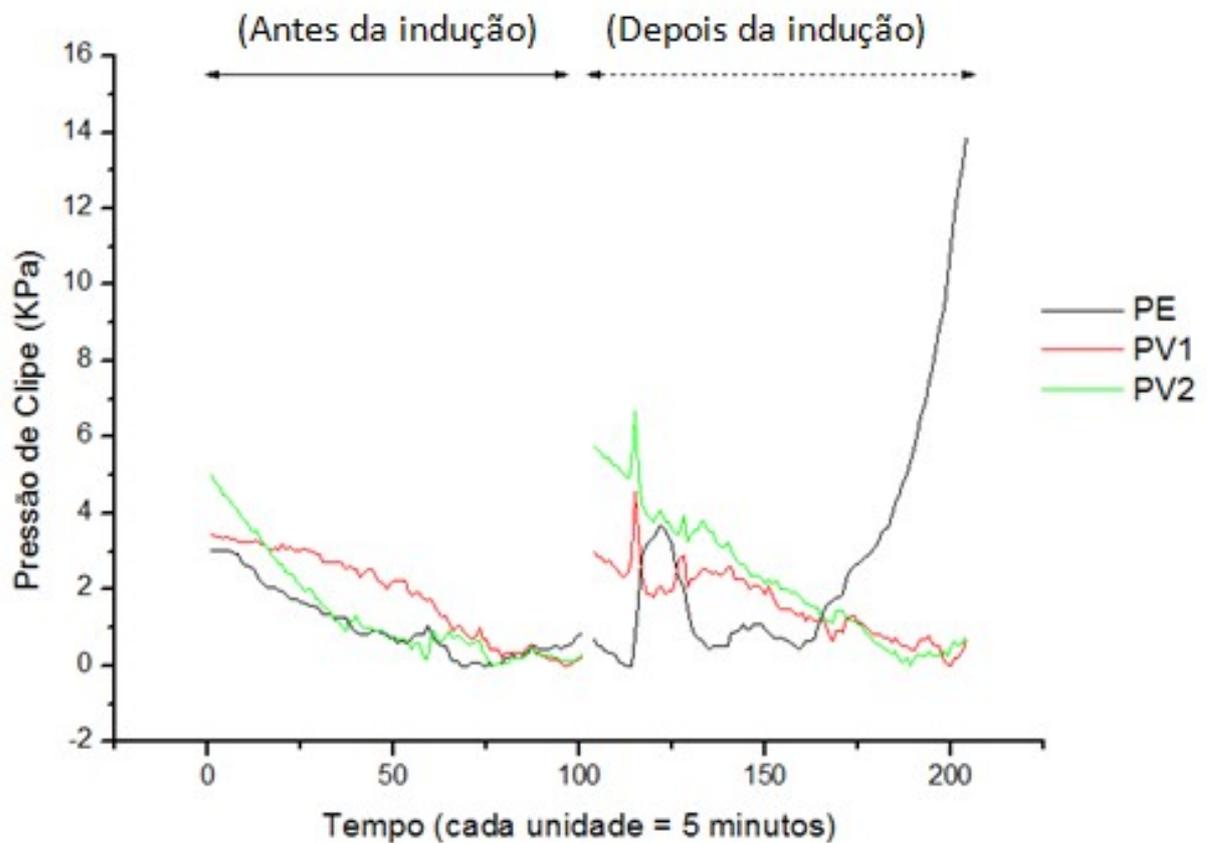
FIGURA 16- Gráfico do Comportamento da variação de pressão de clipe das três plantas da série A, antes e depois do estresse.



Os dados foram coletados pelas sondas magnéticas de pressão de turgor ZIM-probe. Cada sonda foi instalada dias antes em uma folha de cada uma das três plantas dias antes da indução ao estresse, onde permaneceram até o fim do experimento. Os dados foram coletados a cada 5 minutos totalizando 100 pontos amostrados antes e depois da indução ao estresse. Planta estimulada (PE); Planta vizinha1(PV1); Planta Vizinha 2 (PV2).

Fonte: O Autor.

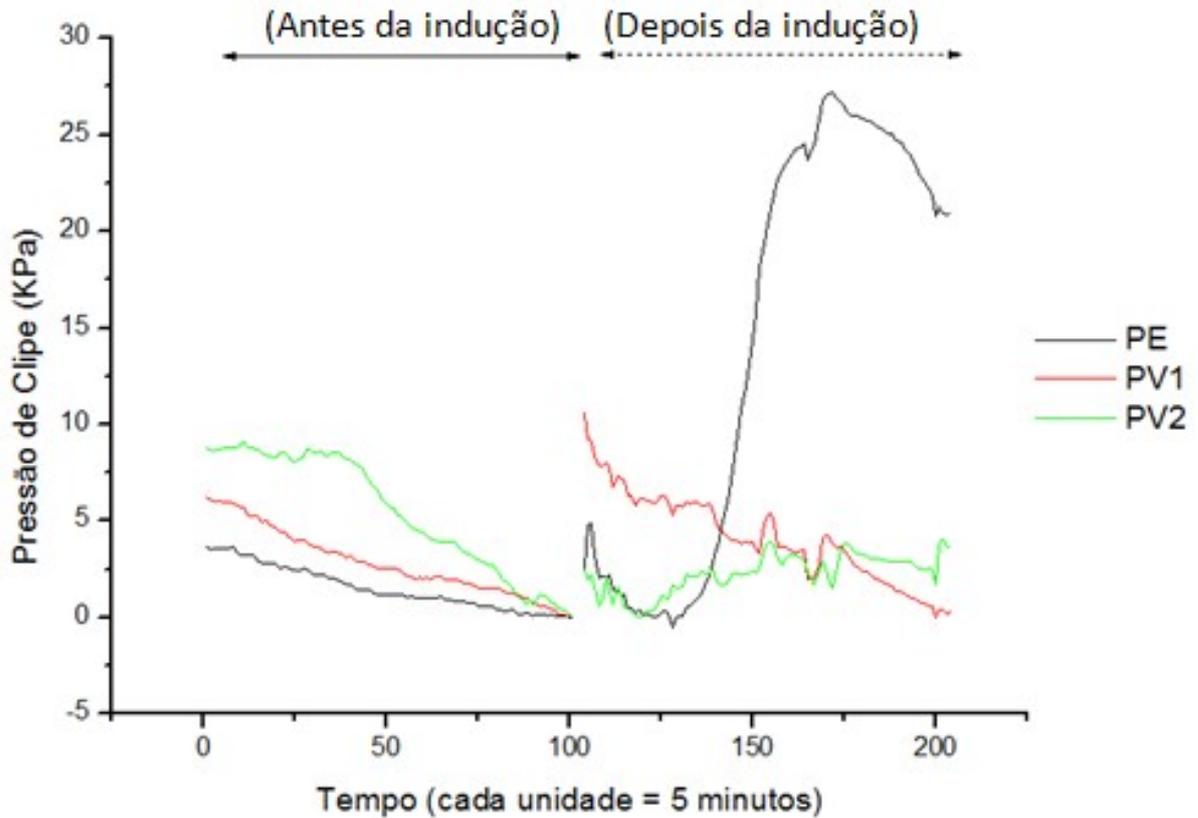
FIGURA 17- Gráfico do comportamento da variação de pressão de clipe das três plantas da série B, antes e depois do estresse.



Os dados foram coletados pelas sondas magnéticas de pressão de turgor ZIM-probe. Cada sonda foi instalada dias antes em uma folha de cada uma das três plantas dias antes da indução ao estresse, onde permaneceram até o fim do experimento. Os dados foram coletados a cada 5 minutos totalizando 100 pontos amostrados antes e depois da indução ao estresse. Planta estimulada (PE); Planta vizinha1(PV1); Planta Vizinha 2 (PV2).

Fonte: O Autor.

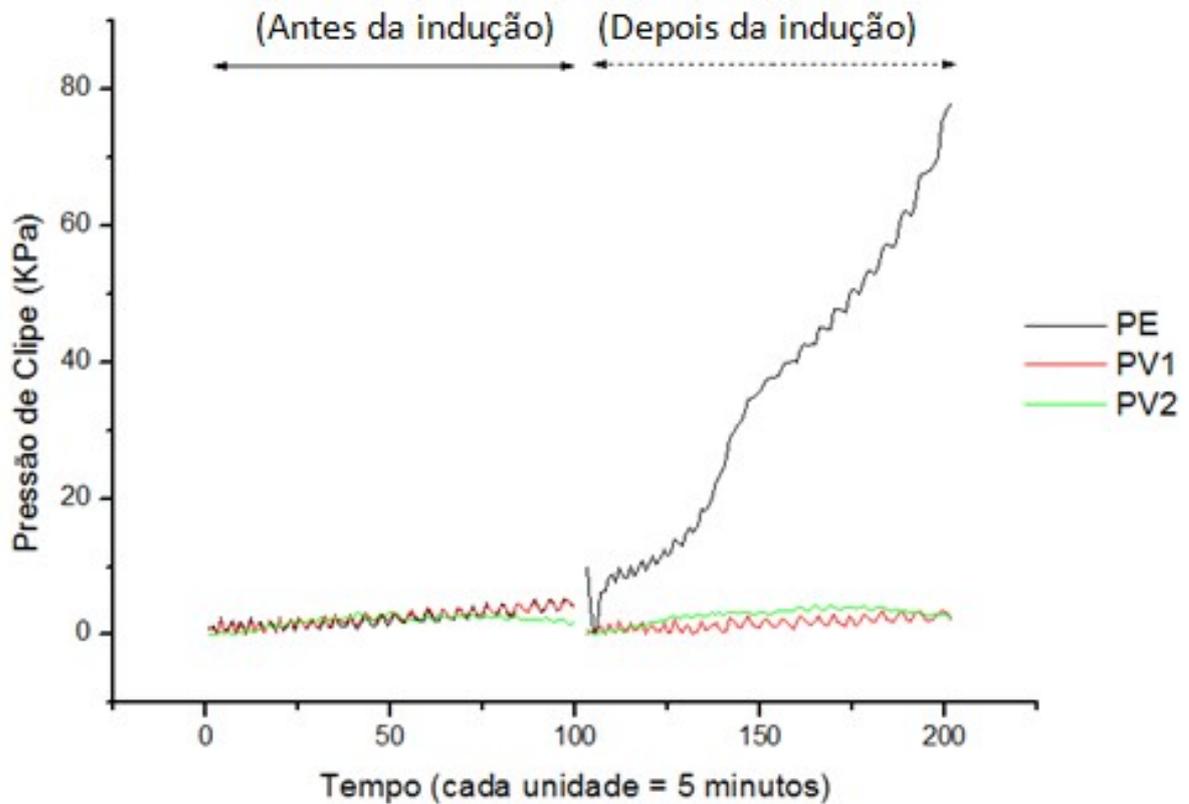
FIGURA 18- Gráfico do comportamento da variação de pressão de clipe das três plantas da série C, antes e depois do estresse.



Os dados foram coletados pelas sondas magnéticas de pressão de turgor ZIM-probe. Cada sonda foi instalada dias antes em uma folha de cada uma das três plantas dias antes da indução ao estresse, onde permaneceram até o fim do experimento. Os dados foram coletados a cada 5 minutos totalizando 100 pontos amostrados antes e depois da indução ao estresse. Planta estimulada (PE); Planta vizinha1(PV1); Planta Vizinha 2 (PV2).

Fonte: O Autor.

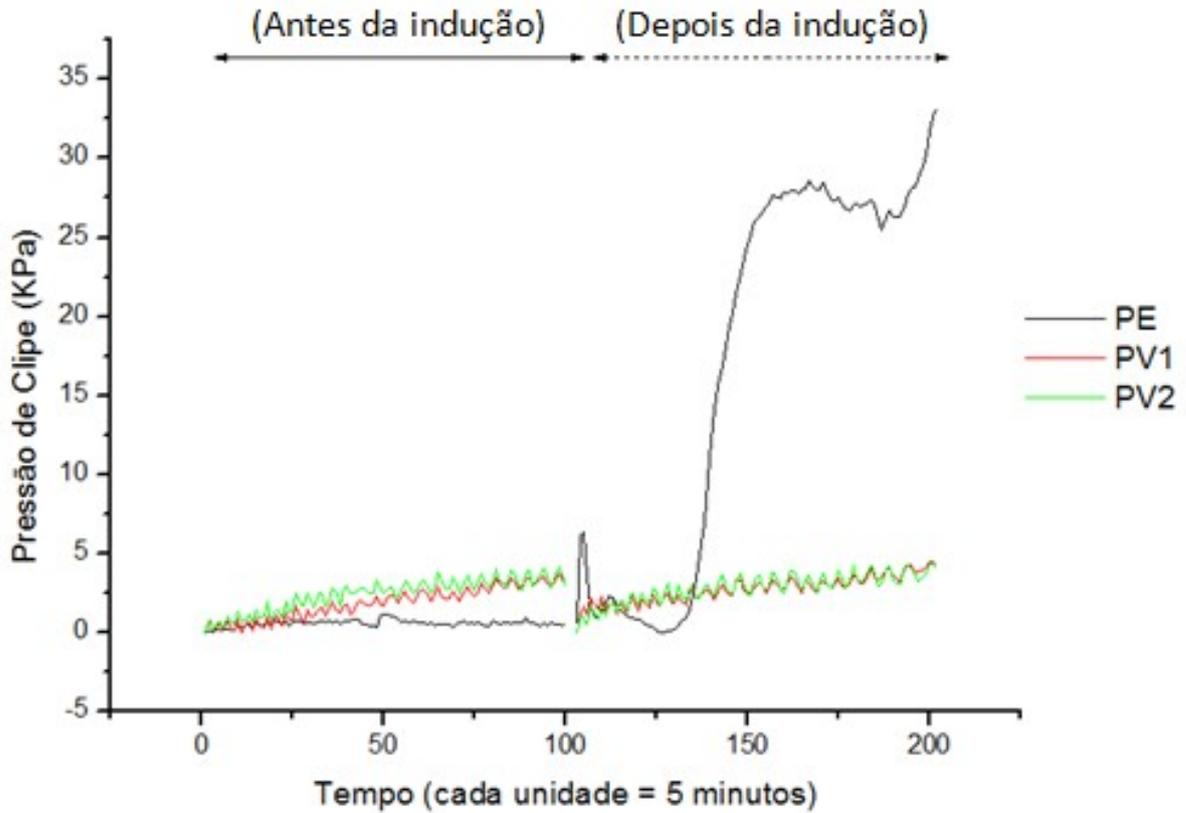
FIGURA 19- Gráfico do comportamento da variação de pressão de clipe das três plantas da série D, antes e depois do estresse.



Os dados foram coletados pelas sondas magnéticas de pressão de turgor ZIM-probe. Cada sonda foi instalada dias antes em uma folha de cada uma das três plantas dias antes da indução ao estresse, onde permaneceram até o fim do experimento. Os dados foram coletados a cada 5 minutos totalizando 100 pontos amostrados antes e depois da indução ao estresse. Planta estimulada (PE); Planta vizinha1(PV1); Planta Vizinha 2 (PV2).

Fonte: O Autor.

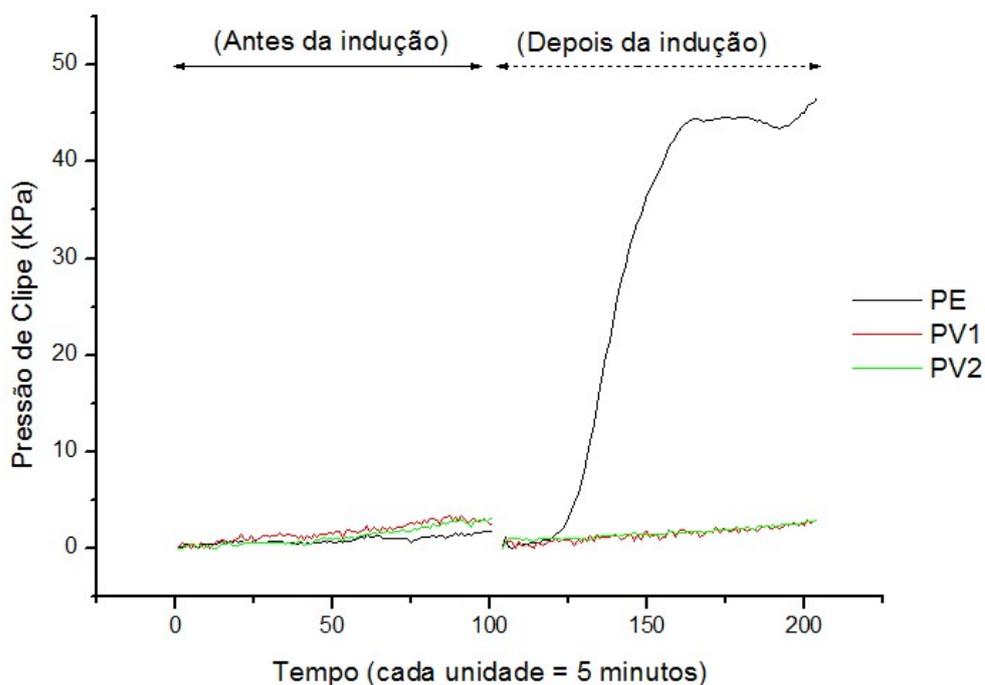
FIGURA 20- Gráfico do comportamento da variação de pressão de clipe das três plantas da série E, antes e depois do estresse.



Os dados foram coletados pelas sondas magnéticas de pressão de turgor ZIM-probe. Cada sonda foi instalada dias antes em uma folha de cada uma das três plantas dias antes da indução ao estresse, onde permaneceram até o fim do experimento. Os dados foram coletados a cada 5 minutos totalizando 100 pontos amostrados antes e depois da indução ao estresse. Planta estimulada (PE); Planta vizinha1(PV1); Planta Vizinha 2 (PV2).

Fonte: O Autor.

FIGURA 21- Gráfico do comportamento da variação de pressão de clipe das três plantas da série F, antes e depois do estresse.

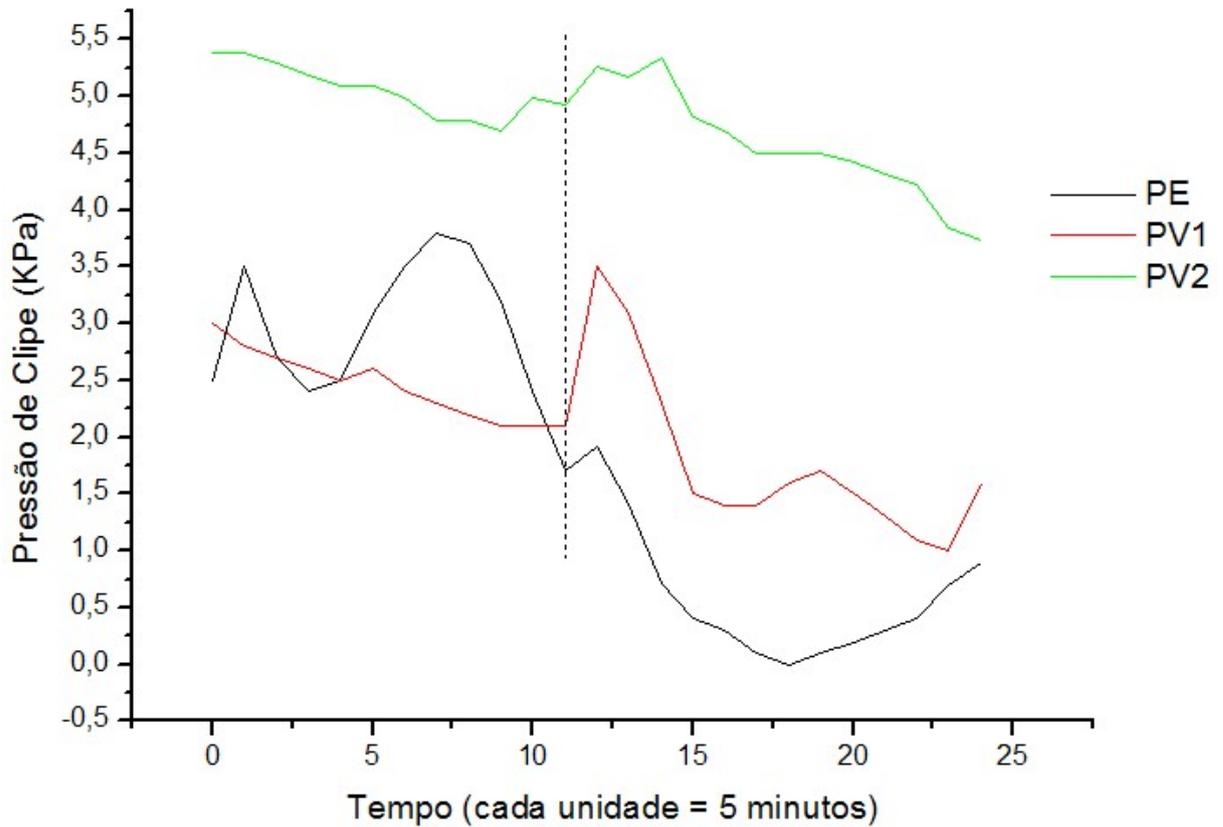


Os dados foram coletados pelas sondas magnéticas de pressão de turgor ZIM-probe. Cada sonda foi instalada dias antes em uma folha de cada uma das três plantas dias antes da indução ao estresse, onde permaneceram até o fim do experimento. Os dados foram coletados a cada 5 minutos totalizando 100 pontos amostrados antes e depois da indução ao estresse. Planta estimulada (PE); Planta vizinha1 (PV1); Planta Vizinha 2 (PV2).

Fonte: O Autor.

Dentro do comportamento de variação de pressão ocorrido ao longo do tempo amostrado depois da indução ao estresse das séries A, B e C existem momentos especiais que mostram uma alteração sincrônica da variação da pressão de turgor entre PE, PV1 e PV2, ou somente entre PV1 e PV2 (FIGURAS 22 à 28).

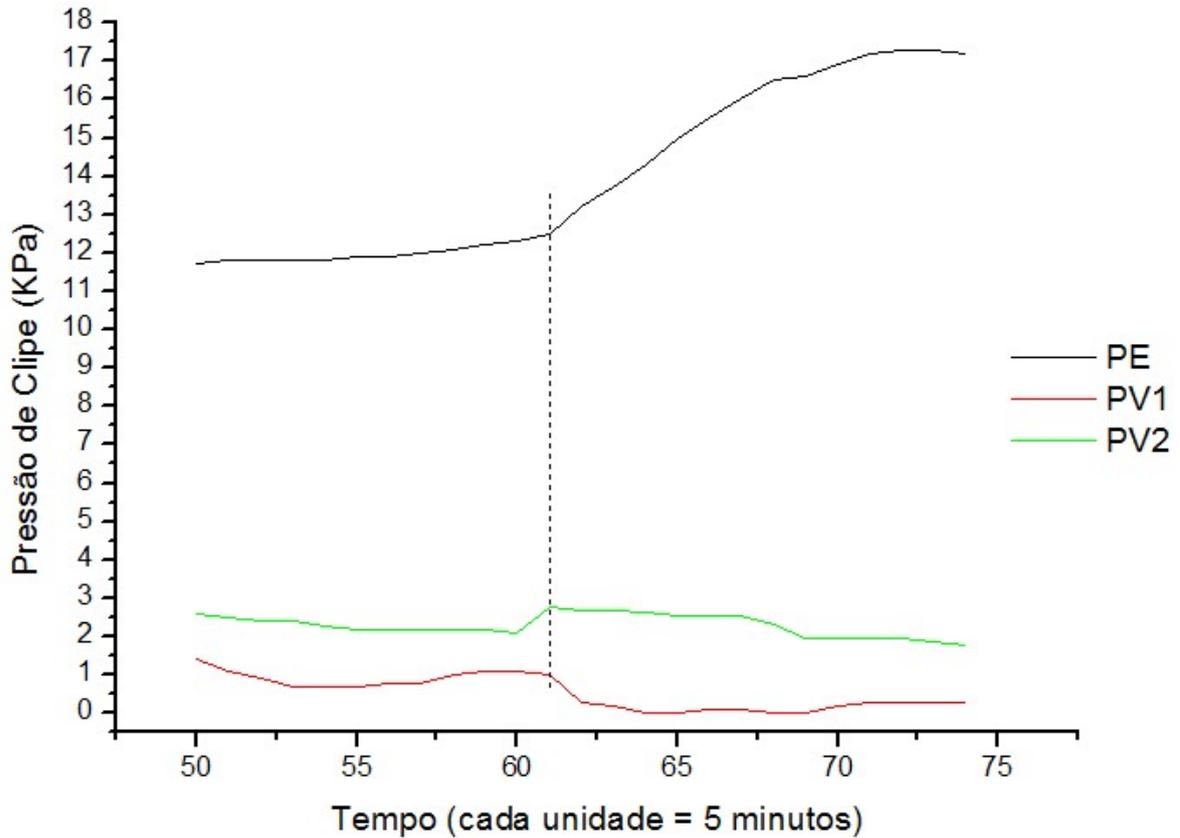
FIGURA 22- Gráfico do detalhamento do comportamento da pressão de clipe das três plantas da série A ao longo de 120 minutos, imediatamente após da aplicação da solução de manitol.



A linha pontilhada indica o momento inicial de um aparente comportamento sincronizado da variação da pressão de turgor entre as três plantas. PE (Planta Estimulada); PV1 (Planta Vizinha 1); PV2 (Planta Vizinha 2).

Fonte: O Autor.

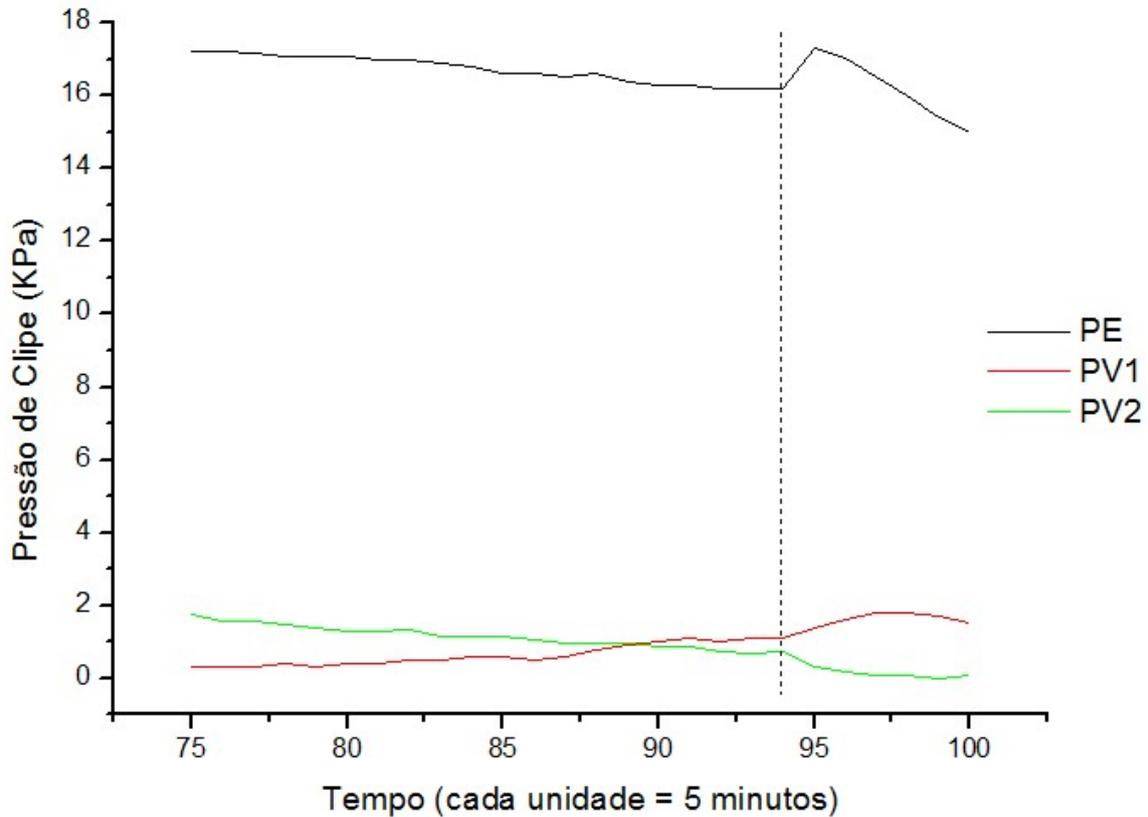
FIGURA 23- Gráfico do detalhamento do comportamento da pressão de clipe das três plantas da série A ao longo de 120 minutos, 240 minutos após a aplicação da solução de manitol.



A linha pontilhada indica um momento de um aparente comportamento sincronizado da variação da pressão de turgor entre as três plantas. PE (Planta Estimulada); PV1 (Planta Vizinha 1); PV2 (Planta Vizinha 2).

Fonte: O Autor.

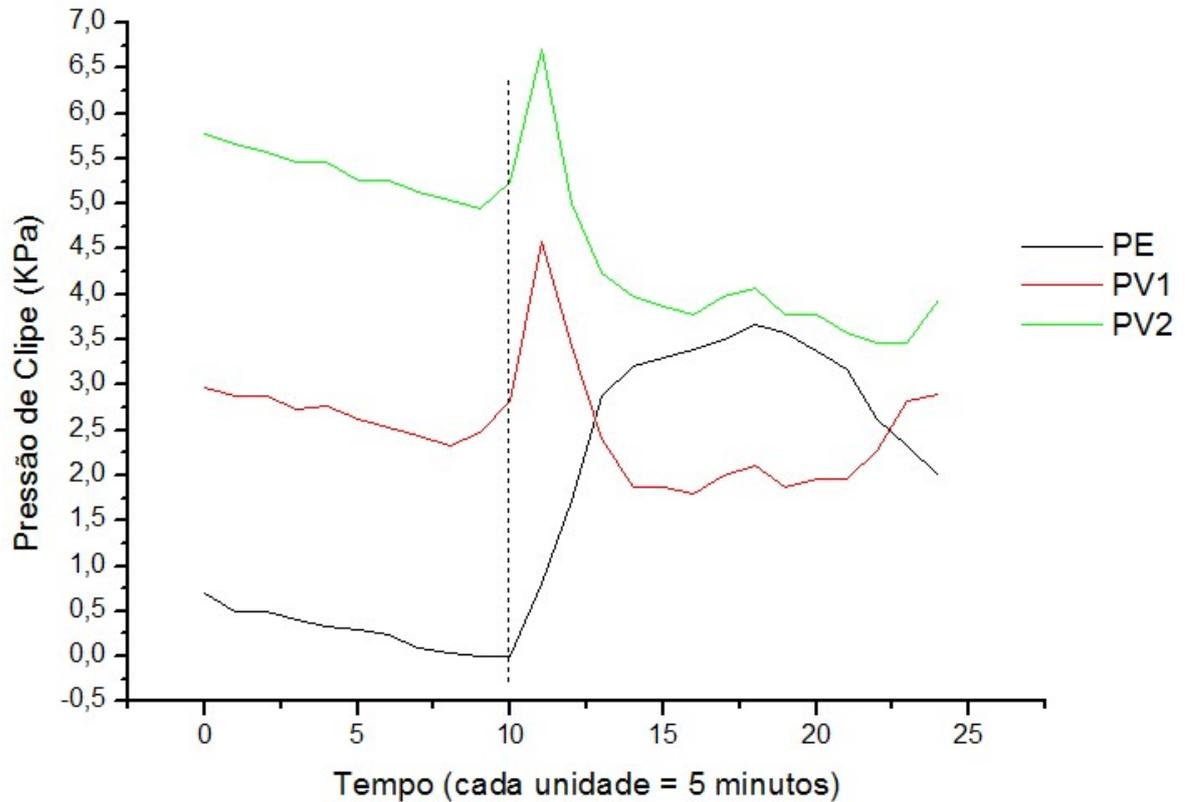
FIGURA 24- Gráfico do detalhamento do comportamento da pressão de clipe das três plantas da série A ao longo de 120 minutos, 240 minutos após a aplicação da solução de manitol.



A linha pontilhada indica um momento de um aparente comportamento sincronizado da variação da pressão de turgor entre as três plantas. PE (Planta Estimulada); PV1 (Planta Vizinha 1); PV2 (Planta Vizinha 2).

Fonte: O Autor.

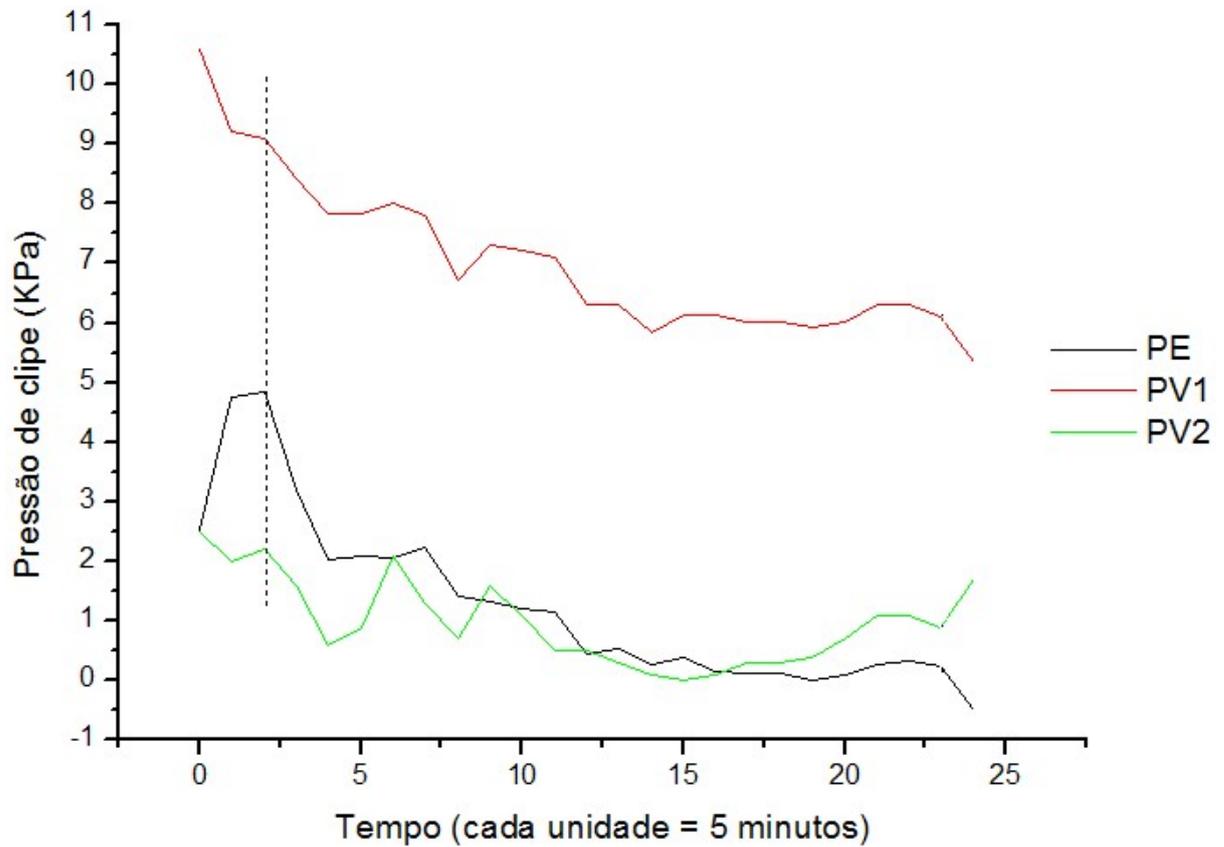
FIGURA 25- Gráfico do detalhamento do comportamento da pressão de clipe das três plantas da série B ao longo de 120 minutos, imediatamente após da aplicação da solução de manitol.



A linha pontilhada indica um momento de um aparente comportamento sincronizado da variação da pressão de turgor entre as três plantas. PE (Planta Estimulada); PV1 (Planta Vizinha 1); PV2 (Planta Vizinha 2).

Fonte: O Autor.

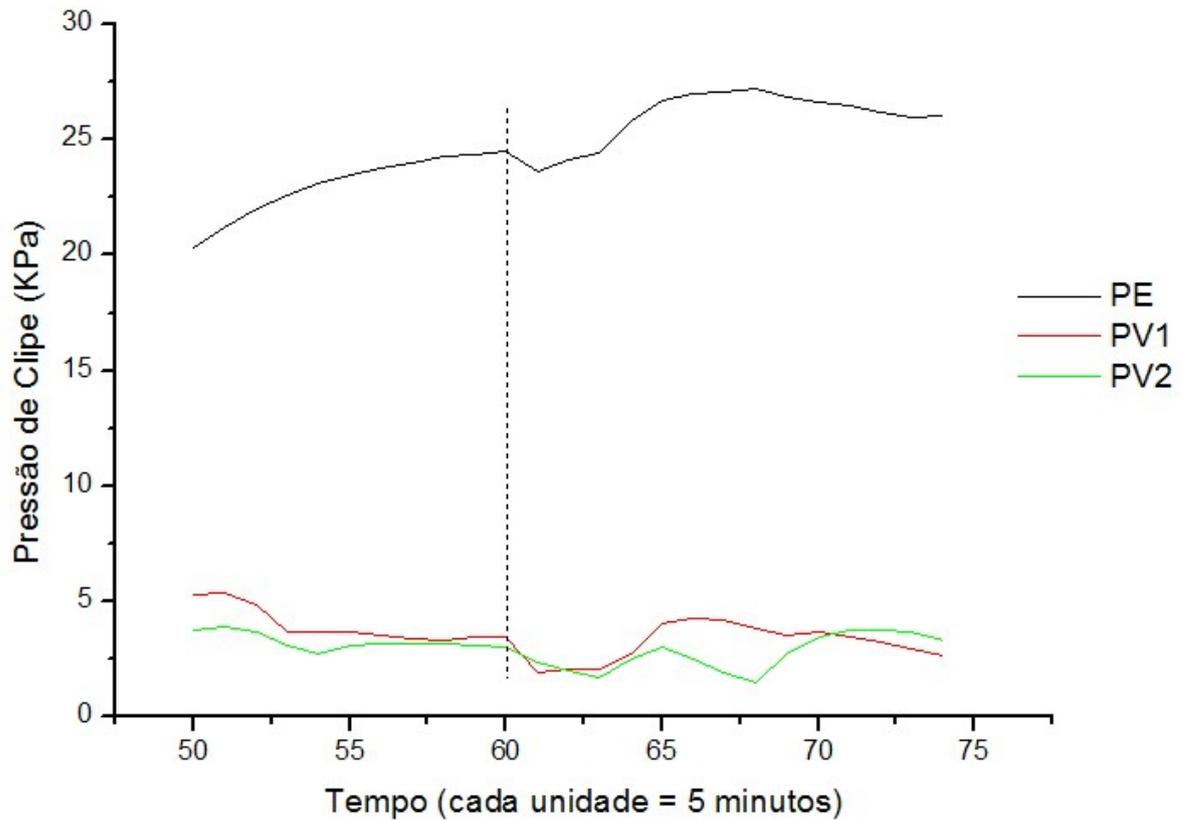
FIGURA 26- Gráfico do detalhamento do comportamento da pressão de clipe das três plantas da série C ao longo de 120 minutos, imediatamente após da aplicação da solução de manitol.



A linha pontilhada indica um momento de um aparente comportamento sincronizado da variação da pressão de turgor entre as três plantas. PE (Planta Estimulada); PV1 (Planta Vizinha 1); PV2 (Planta Vizinha 2).

Fonte: O Autor.

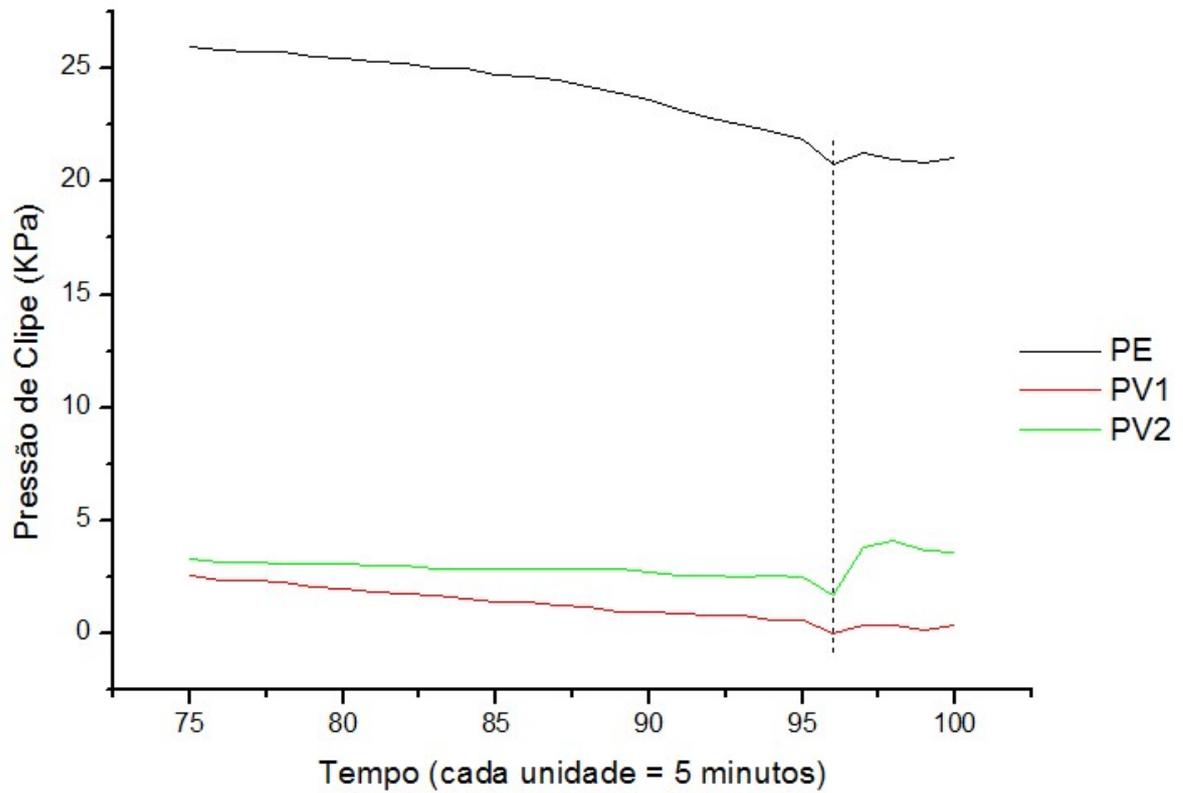
FIGURA 27- Gráfico do detalhamento do comportamento da pressão de clipe das três plantas da série C ao longo de 120 minutos, após 240 minutos da aplicação da solução de manitol.



A linha pontilhada indica um momento de um aparente comportamento sincronizado da variação da pressão de turgor entre as três plantas. PE (Planta Estimulada); PV1 (Planta Vizinha 1); PV2 (Planta Vizinha 2).

Fonte: O Autor.

FIGURA 28- Gráfico do detalhamento do comportamento da pressão de clipe das três plantas da série C ao longo de 120 minutos, 360 minutos após a aplicação da solução de manitol.



A linha pontilhada indica um momento de um aparente comportamento sincronizado da variação da pressão de turgor entre as três plantas. PE (Planta Estimulada); PV1 (Planta Vizinha 1); PV2 (Planta Vizinha 2).

Fonte: O Autor.

5 DISCUSSÃO

Dado que as condições ambientais que afetam o controle da abertura estomática eram estáveis dentro do Fitotron, é possível afirmar que as variações da temperatura foliar foram uma resposta ao estímulo da PE. Algum tipo de comunicação deve ter ocorrido entre PE, PV1 e PV2 para que a variação da temperatura fosse afetada da maneira como foi (variando mais do que a variação ambiental). Essa afirmação pode ser reforçada por um fato mais interessante, que é a tendência de tal variação ocorrer em sincronia entre as três plantas de cada série (FIGURA 15). Por variação sincrônica, ou em sincronia, é considerado o comportamento que PE, PV1 e PV2 apresentaram conjuntamente em elevar e diminuir a temperatura foliar. A sincronia é importante porque é um fenômeno biológico amplamente distribuído na natureza, e que pressupõe a comunicação (STROGATZ, 2003). Este fenômeno é classicamente reconhecido, por exemplo, em comportamento de cardumes, manadas, bandos, etc.; mas também é reconhecido entre populações de plantas que florescem em conjunto (KUDO, 2014). Um dos pressupostos necessários para que haja sincronia é o comportamento dinâmico oscilatório (STROGATZ, 2003). Os estômatos, que controlam a transpiração e a temperatura da folha, funcionam em conjunto (“patches”), onde pode ser observado a sincronia na dinâmica de abertura e fechamento dos poros (CARDON; MOTT; BERRY, 1994; FERRAZ; SOUZA; PRADO, 2009).

Os resultados de ATER podem ter ocorrido em função de uma ação sincrônica (combinada) entre os estômatos das 3 plantas. Agir em conjunto, de forma combinada, é vantajoso para o grupo, ou pelo menos para a maioria dos indivíduos, porque eleva as chances da espécie continuar através da próxima geração. No caso de plantas que sincronizam o florescimento, por exemplo, as chances de haver polinização entre indivíduos diferentes são aumentadas e com isso é aumentado também a variedade genética da geração porvir, o que garante melhores chances de continuidade da espécie (KUDO, 2014).

O controle da abertura estomática combinado entre plantas pode gerar condições microclimáticas que otimizem o controle da transpiração. Isso porque quando os estômatos de plantas diferentes abrem ao mesmo tempo, eles liberam vapor d’água em conjunto que cria um microclima mais úmido e com

menor déficit de pressão de vapor (VPD). Um menor VPD proporciona uma taxa menor de perda de água pela folha para atmosfera, o que leva a uma economia do recurso hídrico para cada indivíduo e para a população que o compartilha. Isso faz mais sentido no caso de plantas novas e pequenas, porque elas não sombreiam o solo abaixo delas nem sobrepõem as folhas umas sobre as outras, o que leva a maiores taxas de evaporação e de transpiração (ALISTAIR; HETHERINGTON; WOODWARD, 2003). Dessa forma, a sincronia da abertura estomática poderia reduzir a perda de água (compartilhada pela população) e isso poderia levar a maiores chances de estabelecimento de uma população. Com uma população estabelecida e madura, as chances de ocorrer fecundação cruzada seriam aumentadas juntamente com as chances de sucesso da próxima geração. A sincronia, em biologia, é associada a comportamentos reprodutivos (STROGATZ, 2003). A abertura estomática não é diretamente ligada à reprodução, no entanto, ela pode refletir na reprodução dentro da perspectiva tratada acima. É possível considerar o conjunto formado pelas três plantas como um sistema integrado, cuja condição de sistema seria mantida por meio da troca de informação. Do ponto de vista biológico, formar sistemas organizados acima do nível de indivíduos pode ser vantajoso por poder aumentar a estabilidade, a plasticidade e a robustez do sistema como um todo (SOUZA; LUTTGE, 2015), o que mais uma vez poderia elevar as chances de sobrevivência de um maior número de indivíduos e, por conseguinte, da espécie.

As séries A, B e C (FIGURAS 16, 17, 18) apresentaram um comportamento diferente das séries D, E e F (FIGURAS 19, 20, 21). Enquanto em A, B e C ocorreu uma dinâmica de variação de turgor diferente entre antes e depois do estresse, em D, E e F não. A diferença da dinâmica de PV1 e PV2, antes e depois do estresse (A, B, C), só pode ter ocorrido em função da aplicação do manitol em PE, dado que foi a única alteração dada ao sistema. Tal diferença consiste, basicamente, de um aumento na amplitude da variação de pressão de turgor (FIGURAS 16, 17, 18). Plantas sob estresse osmótico deixam de captar água pelas raízes, isso leva à perda de turgor foliar (ZIMMERMANN et al., 2013). A queda da pressão de turgor das PE foi uma queda típica, já caracterizada em outras espécies (ZIMMERMANN et al., 2013). Essa queda mostra que a solução de manitol com potencial de água de -2 MPa foi suficiente para tirar a planta de

seu equilíbrio dinâmico (homeostase), caracterizando um estresse (SOUZA; LÜTGGE, 2015; ZIMMERMANN et al., 2013, LARCHER, 2000).

Falik et al. (2011) mostraram que plantas de ervilha induzidas ao estresse hídrico transmitiram algum sinal de alerta de falta de água para plantas vizinhas causando a diminuição da abertura estomática das plantas que não receberam o estresse hídrico. O fechamento estomático leva ao aumento da pressão de turgor foliar devido à maior dificuldade da água sair de dentro da folha. As plantas que não receberam estresse das três séries A, B e C (FIGURAS 16, 17 e 18) tiveram uma tendência de ganho de turgor que pode ser atribuído ao fechamento estomático (ZIMMERMANN et al., 2011). Esse comportamento pode ser comparado com o comportamento de ervilhas demonstradas por Falik et al. (2011). Com isso é possível atribuir a variação de turgor foliar das plantas vizinhas à estressada a algum tipo de transmissão de sinal. Esse possível sinal levou as plantas a anteciparem uma situação de falta de água e fechar os estômatos (aumentando o turgor foliar), possivelmente para conservar a água para circunstâncias futuras de falta da mesma (FALIK et al., 2011; 2012). Em D, E e F, os resultados não foram os mesmos, e possivelmente não tenha ocorrido nenhuma transmissão de sinal (FIGURAS 19, 20, 21).

Além do aumento da amplitude da variação da pressão de clipe em relação ao dia anterior ao estresse, outro acontecimento chama atenção, a sincronia. A possível sincronia ocorrida parece ter iniciado por volta dos 50 minutos depois da indução para séries A e B (FIGURAS 22 e 25) e por volta dos 10 minutos depois da indução para a série C (FIGURA 26). Em tais momentos as 3 plantas de cada série variaram o turgor simultaneamente em fase, perdendo turgor em A e B (FIGURAS 22 e 25) e ganhando em C (FIGURA 26). Depois do início da possível sincronia em fase na variação de turgor da série A, houve dois momentos em que a variação do turgor parece ter sincronizado fora de fase (FIGURAS 23 e 24). Depois do início da possível sincronia em fase da série C, houve dois momentos em que a variação de turgor parece ter sincronizado outra vez em fase (FIGURAS 27 e 28).

Falik et al. (2011) mostrou que plantas de *Pisum sativum* induzidas ao estresse osmótico transmitem algum tipo de sinal para suas vizinhas que leva a uma diminuição da abertura estomática de todas as plantas da série aos 60 minutos depois da indução. Os resultados de ATER e ATUR apontam para uma

mudança da dinâmica estomática, não somente mudança que resultou no fechamento. Em Falik et al. (2011), foram medidos somente 3 pontos (0, 15 e 60 minutos) ao longo de 60 minutos em contraposição às 12 medidas de ATER (ao longo de 60 minutos) e às 100 de ATUR (ao longo de 500 minutos). Diferenças das condições ambientais, do material biológico, das condições de tratamento e de avaliação também devem ter influenciado na diferença entre os resultados de Falik et al. (2011) e os do presente trabalho. No entanto ambos apontam que a comunicação de sinal de falta de água gerada por um estresse osmótico pode ser transmitida entre plantas interconectadas por meio de suas raízes.

6 CONCLUSÃO

Plantas de soja podem transmitir sinal de estresse osmótico para plantas de soja vizinhas que mantêm contato por meio das raízes. O resultado da transmissão do sinal de estresse (quando ocorre) é refletido na dinâmica estomática. A evidência mais explícita de que o sinal foi transmitido e de que ele atua nos estômatos é a da variação sincrônica e em fase da temperatura foliar entre as 3 plantas de cada série de ATER. A mudança de comportamento do turgor foliar em metade das repetições de ATUR, depois da indução ao estresse, reforça que quando ocorre, a transmissão de sinal de falta de água afeta a dinâmica estomática de plantas vizinhas à planta estimulada.

REFERÊNCIAS

- ALISTAIR, M.; HETHERINGTON, F.; WOODWARD, I. The role of stomata in sensing and driving environmental change. **Nature**, v. 424, p. 901-908, 2003.
- ALLÈGRE, M. et al. Somatal deregulation in plasmopara viticola-infected grapevines leaves. **New Phytologist**, v. 173, p. 832-840, 2007.
- ARIMUNURA, G. I.; KOST, C.; BOLAND, W. Herbivore-induced indirect plant defense. **Biochimica et Biophysica Acta- Lipida et Lipid Metabolism**, v. 1734, p. 91-111, 2005.
- ASSMANN, S. M.; SHIMAZAKI, K. I. The multisensory guard cell. Stomatal responses to blue light and abscisic acid. **Plant Physiology**, v. 119, p. 809-815, 1999.
- BALDWIN, I. T.; SCHULTZ, J. C. Rapid damage-induced changes in tree leaf chemistry; evidence for inter plant communication. **Science**, v. 221, p. 277-279, 1983.
- BALLARÉ, C. L. Light gaps: sensing the light opportunities in highly dynamic canopy environments. In: CALDWELL, M. M.; PEARCY, R. W. **Physiological Ecology- Exploitation of Environmental Heterogeneity by Plants: Ecophysiological processes Above and Below Ground**. 1. ed. San Diego-CA., USA: Academic Press, 1994. p. 73-111.
- BALUSKA, F. et al. The 'root-brain' hypothesis of Charles and Francis Darwin Revival after more than 125 years. **Plant Signaling & Behavior**. v. 4, p. 1121-1127, 2009.
- BALUSKA, F. et al. Preface. In: BALUSKA, F.; MANCUSO, S.; VOLKMANN, D. **Communication in plants: neuronal aspects of plant life**. 1 ed. Berlin, Germany: Springer, 2006. p. V-VIII.
- BALUSKA, F.; MANCUSO, S.; VOLKMANN, D. **Communication in plants: neuronal aspects of plant life**. Ed. Springer: New York, 2006. p. V-VII.
- BRADSHAW, A. D. Evolutionary significance of phenotypic plasticity in plants. **Advances in Genetics**, v. 13, p. 115-155, 1965.
- BUCKLEY, T. N. The control of stomata by water balance. **New Phytologist**, v. 168, p. 275-292, 2005.
- CARDON, Z. G.; MOTT, K. A.; BERRY, J. A. Dynamics of patchy stomatal movements, and their contribution to steady-state and oscillating stomatal conductance calculated using gas-exchange techniques. **Plant, Cell & Environment**, v. 17, p. 995-1007, 1994.

CHAMOVITZ, D.. **What a plant knows**: a field guide to the senses. 1 ed. New York: Scientific American ; Farrar, Straus and Giroux, 2012. p. 4-5, 35-45.

CHAVES, M. M. et al. How plants cope with water stress in the field: photosynthesis and growth. **Annals of Botany**, v. 89, p. 907-916, 2002.

COSTA, J. M.; GRANT, O. M., CHAVES, M. M. Thermography to explore plant-environment interactions. **Journal of Experimental Botany**, 2013.

CHILDE, V. G. **Man makes himself**. 1 ed. London: Watts, 1936.

CVRCKOVÁ, F.; LIPAVSKÁ, H.; ZARSKÝ, V. Plant intelligence: why, why not or where? **Plant signaling and behavior**, v. 4, p. 394-399, 2009.

ELLIS, E. C. et al. Anthropogenic transformation of the biomes, 1700 to 2000. **Global Ecology and Biogeography**, v. 19, p. 589- 606, 2010.

ENGELS, F. **Dialética da natureza**. Tradução, Joaquim José Moura Ramos e Eduardo Lúcio Nogueira. 1 ed. Brasil: M. Fontes, 1974. p. 11-33, 171-186 .

FALIK, O. et al. Rumor has it...: relay communication of stress cues in plants. **Plos One**, v. 6, n.11, e23625, 2011.

FALIK, O. et al. Plant responsiveness to root–root communication of stress cues. **Annals of Botany**, v. 110, p. 271-280, 2012.

FARLEY, R. A. ; FITTER, A. H. Temporal and spatial variation in soil resources in a deciduous woodland. **Journal of Ecology**, v. 87, p. 688–696, 1999.

FOWLER, S. V.; LAWTON, J. H. Rapidly induced defenses and talking trees: the devil's advocate position. **The American Naturalist**, v. 126, n.2, p. 181-195, 1985.

GAGLIANO, M. et al. Acoustic and magnetic communication in plants: is it possible? **Plant Signaling & Behavior**, v. 7, n. 10, p. 1346-1348, 2012.

GRIME, J. P. The role of plasticity in exploiting environmental heterogeneity. In: CALDWELL, M. M.; PEARCY, R. W. **Exploitation of Environmental Heterogeneity**. 1 ed. New York: Academic Press, [1994?]. p. 1–19.

HAWKS, J. The dawn of human culture by Richard Klein and Blake Edgar. **Human Nature Review**, v. 3, p. 229-232, 2003.

HIMANEN, S. J.; BLANDE, J. D.; HOLOPAINEN, J. K. Plant-emitted semi-volatiles shape the infochemical environment and herbivore resistance of heterospecific neighbors. **Plant Signaling & Behavior**, v. 5, n. 10, p. 1234-1236, 2012.

JALEEL, C. A. et al. Drought stress in plants: a review on morphological characteristics and pigments composition. **International Journal of Agriculture & Biology**, v. 11, p. 100-105, 2009.

KARBAN, R. Plant behavior and communication. **Ecology Letters**, v. 11, p. 727–739, 2008.

KARBAN, R.; BALDWIN, I. T. **Induced responses to herbivory**. 1 ed. Londres: Ed. The University of Chicago Press, 1997.

KESSLER, A.; BALDWIN I. T. Defensive function of herbivore-induced plant volatile emissions in nature. **Science**, v. 291. p. 2141-2144, 2001.

KLEIN, R. G. Archeology and the evolution of human behavior. **Evolutionary Anthropology: Issues News and Reviews**, v. 9, n. 1, p. 17- 36, 2000.

KUDO, G. Vulnerability of phenological synchrony between plants and pollinators in an alpine ecosystem. **Ecological Research**, v. 29, p. 571-581, 2014.

KUPPERS, M. Canopy gaps: competitive light interception and economic space filling. In: CALDWELL, M. M.; PEARCY, R. W. **Exploitation of environmental heterogeneity by plants: ecophysiological processes above and below ground**. 1 ed. New York: Academic Press, 1994. v. 3, p. 44.

LARCHER, W. **Ecofisiologia Vegetal**. Traduzido por C. H. B. A. Prado. São Carlos: RiMa Artes e Textos, 2000.

LECHOWICZ, M. J.; BELL, G. The flip side: manifestations of how plants perceive patchiness at different scales. In: CALDWELL, M. M.; PEARCY, R. W. **Exploitation of Environmental Heterogeneity by Plants: Ecophysiological Processes Above and Below Ground**. 1 ed. New York: Academic Press, 1994. p. 391-414.

LEITE, J. F. **A ocupação do Pontal do Paranapanema**. 1981. 256 f. Tese (Livre Docência) - Instituto de Planejamento e Estudos Ambientais da Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, SP.

MITCHEL, M. **Complexity a guided tour**. New York: Oxford University Press, 2009, 49 p.

NEILL, S. et al. Nitric oxide, stomatal closure, and abiotic stress. *Journal of Experimental Botany*, v. 59, p. 165–176, 2008.

NINKOVIC, V.; GLINWOOD, R.; PETTERSSON, J. Communication between plants by volatiles: the role of allelobiosis. In: **Communication in plants: neuronal aspects of plant life**. 1 ed. Berlin, Germany: Springer, 2006. p. 421-434.

MULLER, C. H.; HAINES, B. L.; MULLER, W. H. Volatile growth inhibitors produced by aromatic shrubs. **Science**, v. 143, p. 471- 473, 1964.

PARÉ, P. W.; TUMILISON, J. H. Plant volatiles as a defense against insect herbivores. **Plant Physiology**, v. 121, p. 323-331, 1999.

- PEARCY, R. W. et al. Photosynthetic utilisation of sunflecks: a temporally patchy resource on a time scale of seconds to minutes. In: CALDWELL, M. M.; PEARCY, R. W. **Exploitation of Environmental Heterogeneity by Plants: Ecophysiological Processes Above and Below Ground**. 1 ed. New York: Academic Press, 1994. p. 175–209.
- FERRAZ, M. C.; SOUZA, G. M.; PRADO, C. P. C. A model for patchy stomatal conductance in homobaric leaves. **Journal of Computational Interdisciplinary Sciences**, v. 2. p. 83-88, 2009.
- RASMANN, S. et al. Recruitment of entomopathogenic nematodes by insect-damaged maize roots. **Nature**, v. 434. p. 732-737, 2005.
- REDDY, G. V. P.; GUERRERO, A. Interactions of insect pheromones and plant semiochemicals. **Trends Plant Science**, v. 9, p. 253–261, 2004.
- RHOADES, D. F. Herbivore population dynamics and plant chemistry. In: DENNO, R. F.; McCLURE, M. S. **Variable Plant and Herbivores in Natural and Managed Systems**. 1 ed. New York: Academic Press, 1983. p. 155–220.
- ROBERTSON, G. P. ; GROSS, K. L. Assessing the heterogeneity of below ground resources: quantifying pattern and scale. In: CALDWELL, M. M.; PEARCY, R. W. **Exploitation of Environmental Heterogeneity by Plants: Ecophysiological Processes Above and Below Ground**. 1 ed. New York: Academic Press, 1994. p. 237–253.
- RODRIGUES, R. R.; BRANCALION, P. H. S.; ISERNHAGEN, I. **Pacto pela restauração da mata atlântica: referencial dos conceitos e ações de restauração florestal**. 1 ed. Piracicaba: EDUSP, 2009.
- SCHLICHTING, C. D.; PIGLIUCCI, M. **Phenotypic evolution: a reaction norm perspective**. Sunderland: Sinauer Associates, [1998?].
- SILVERTOWN, J.; GORDON, D., M. A framework for plant behavior. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 20, p. 349-366, 1989.
- SILVERTOWN, J. Plant phenotypic plasticity and non-cognitive behaviour. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 13, p. 255–256, 1998.
- SOUZA, G. M.; LUTGGE, U. Stability as a phenomenon emergent from plasticity–complexity–diversity in eco-physiology. **Progress in Botany**, v. 76, p. 211- 239, 2015.
- STENHOUSE, D. **The evolution of intelligence: a general theory and some of its implications**. London: Allen and Unwin, 1974.
- STROGATZ, S. **SYNC: the emergin science of spontaneous order**. New York: Hyperion, 2003. p. 40-70.

SUDO, H. **Bacia do Santo Anastácio**: estudo geomorfológico. 1980. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Geografia Física, do Departamento de Geografia da Faculdade de Filosofia Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo.

SULTAN, S. Phenotypic plasticity for plant development. **Trends in Plant Science**, v. 5, p. 537–542, 2000.

TAKABAYASHI, J.; DICKE, M. Plant–carnivore mutualism through herbivore-induced carnivore attractants. **Trends in Plant Science**, v. 1, p. 109–113, 1996.

TREMMELE, D. C.; BAZZAZ, F. A. How Canopy Architecture Affects Target Plant Performance. **Ecology**, p. 2114-2124, 1993.

TREWAVAS, A. Green plants as intelligent organisms. **Trends in Plant Science**, v. 10, p. 414–419, 2005.

TREWAVAS, A. Cap. 1: The Green Plant as an Intelligent Organism. In: BALUSKA, F.; MANCUSO, S.; VOLKMANN, D. **Communication in plants**: neuronal aspects of plant life. 1 ed. Berlin, Germany: Springer, 2006. p. 1-18.

TREWAVAS, A. J. Signal perception and transduction. In: BUCHANAN, B. B. B.; GRUISSEM, W.; JONES, R. L. **Biochemistry and Molecular Biology of Plants**. Rockville: American Society of Plant Physiologists, 2000. p. 930–988,

TREWAVAS, A. What is plant behavior? **Plant, Cell and Environment**, v. 32, p. 606–616, 2009.

TURKINGTON, R.; AARSEN, L. W. Local scale differentiation as a result of competitive interactions. In: DIRZO, R.; SARUKHAN, J. **Perspectives on plant population ecology**. Massachusetts: Sinauer Associates, 1984. p. 107–128 T.

VERTOSICK, F. T. **The genius within**: discovering the intelligence of every living thing. 1 ed. New York: Harcourt, 2002.

WALDMAN, M. **Meio ambiente e antropologia**. 1. ed. São Paulo: Ed. Senac, 2006. p. 14, 18.

WARWICK, K. **The quest for intelligence**. 1 ed. London: Judy Piatkus, 2001.

WITZANY, G. Plant Communication from a biosemiotic perspective. **Plant Signaling & Behavior**, v. 4, p. 169-178, 2006.

ZIMMERMANN, U. A non-invasive plant-based probe for continuous monitoring of water stress in real time: a new tool for irrigation scheduling and deeper insight into drought and salinity stress physiology. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 25, n.1, p. 2-11, 2013.

ZOHARY, D.; HOPF, M.; WEISS, E. **Domestication of plants in old world**. 4 ed. New York: Oxford Press, 2012. p. 1-6.