



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
CURSO DE AGRONOMIA

DAVID RIBEIRO LINO

DESENVOLVIMENTO DE PLATAFORMA DE COLETA DE DADOS DE SONDA
TÉRMICA UTILIZANDO O MÉTODO GRANIER

FORTALEZA
2019

DAVID RIBEIRO LINO

**DESENVOLVIMENTO DE PLATAFORMA DE COLETA DE DADOS DE SONDA
TÉRMICA UTILIZANDO O MÉTODO GRANIER**

Monografia apresentada ao Curso de Bacharelado em Agronomia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.

Orientador: Prof. Adunias dos Santos Teixeira, Ph.D.

Coorientador: M.Sc. Amnon Amoglia Rodrigues.

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo autor

L73d Lino, David Ribeiro.
Desenvolvimento de plataforma de coleta de dados de sonda térmica utilizando o método Granier /
David Ribeiro Lino. – 2019.
63 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências
Agrárias, Curso de Agronomia, Fortaleza, 2019.

Orientação: Prof. Adunias dos Santos Teixeira, Ph.D.

Coorientação: M.Sc. Amnon Amoglia Rodrigues.

1. Irrigação. 2. Fluxo de seiva. 3. Transpiração vegetal. I. Título.

CDD 630

DAVID RIBEIRO LINO

**DESENVOLVIMENTO DE PLATAFORMA DE COLETA DE DADOS DE SONDA
TÉRMICA UTILIZANDO O MÉTODO GRANIER**

Monografia apresentada ao Curso de Bacharelado em Agronomia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.

Aprovada em: 17 de junho de 2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Adunias dos Santos Teixeira, Ph.D. (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

M.Sc. Amnon Amoglia Rodrigues (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Francisco José Firmino Canafístula
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Rosilene Oliveira Mesquita
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Fernando e Rita.

À minha noiva, Érica.

À minha filha, Maria Clara.

À minha irmã, Sarah.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sua presença, seu amparo e sua misericórdia em minha vida.

Aos meus amados pais, Fernando dos Santos Lino e Rita Ribeiro Lino; à minha valiosa irmã, Sarah Ribeiro Lino; aos meus queridos tios: Cláudia Vasconcelos, Raimundo Nonato e Solange Vasconcelos e aos meus estimados avós maternos Rosa e Antônio pelo incentivo, apoio, amor, dedicação e por seus entusiasmos em minha carreira acadêmica.

À minha amada noiva, Érica Erlane Ferreira Pinheiro, pelo amor e carinho.

À minha adorável filha, Maria Clara Pinheiro Lino, pelo: amor, brincadeiras, carinhos e afetos compartilhados, que tornaram meus dias mais felizes.

Ao Prof. Adunias dos Santos Teixeira, Ph.D., pela excelente orientação e paciência.

Aos professores participantes da banca examinadora: Dr. Francisco José Firmino Canafístula, Profa. Dra. Rosilene Oliveira Mesquita e M.Sc. Amnon Amoglia Rodrigues pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos professores do Departamento de Engenharia Agrícola, em especial ao Prof. Dr. Alexandro Oliveira da Silva, por seus ensinamentos e contribuições ao meu aprendizado.

À Profa. Dra. Rosemeiry Melo Carvalho, pela amizade que construímos durante os anos de minha graduação.

Aos meus colegas do Laboratório de Eletrônica e Mecânica Agrícola, por contribuírem com meus projetos e pesquisas.

Aos meus queridos: Galileu, Isaac e Laura pela sua lealdade, companheirismo e por me proporcionarem momentos de alegria.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

À Universidade Federal do Ceará, por possibilitar a realização desse trabalho.

“Bem-aventurado o homem que acha sabedoria,
e o homem que adquire conhecimento; porque
é melhor a sua mercadoria do que artigos de
prata, e maior o seu lucro que o ouro mais fino.
Mais preciosa é do que os rubis, e tudo o que
mais possas desejar não se pode comparar a ela.”
Bíblia Sagrada, Provérbios 3:13,15.

“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros
de gigantes.”

Sir Isaac Newton

RESUMO

Na irrigação, para se alcançar alta eficiência de aplicação de água, além de possuir um sistema adequado às condições da cultura, climática e socioambiental, o irrigante deve possuir um bom plano de manejo. Determinar o quando e o quanto irrigar é um fator que vem sendo estudado pela comunidade acadêmica durante as últimas décadas, desenvolvendo novos métodos e equipamentos. Entre os métodos utilizados, a medição da transpiração em plantas para determinar a quantidade de água a ser reposta pela irrigação tem adquirido destaque desde o século XX. O método proposto por Granier (1985) que utiliza sondas de dissipação térmica para mensurar o fluxo de seiva e indiretamente o fluxo transpiratório de plantas, destaca-se por ser de fácil construção e de aplicação. Este trabalho possui como objetivo geral o desenvolvimento de uma plataforma de coleta de dados de sonda térmica e como objetivos específicos pretendeu-se: construir sondas térmicas em uma plataforma para aquisição, armazenamento e transmissão de dados; calcular o índice de fluxo de seiva; avaliar este índice quanto a fatores meteorológicos e fisiológico. As sondas foram constituídas por agulhas hipodérmicas e termopares tipo K no seu interior, e preenchidas com pasta térmica. Na sonda aquecida, um fio de constantan foi utilizado como resistência para promover seu aquecimento. Este aquecimento originou-se de uma potência elétrica constante. O *hardware* foi constituído de um Arduino Mega, circuitos de alimentação de energia 5V e limitador de corrente. O *software* foi desenvolvido no IDE do Arduino. Na avaliação do índice em relação aos fatores meteorológicos, a temperatura do ar influenciou na temperatura das sondas, no entanto, possuiu baixa influência na diferença de temperatura entre as sondas aquecidas e de referência. A chuva ocasionou ruídos nos valores obtidos nas sondas térmicas, devido ao escoamento no caule provocar uma redução na temperatura na sonda aquecida, eliminando o aquecimento. O índice de fluxo de seiva apresentou forte correlação com a radiação global e com a evapotranspiração de referência. Na avaliação do índice em relação ao potencial hídrico foliar, foi constatada uma boa correlação entre as variáveis avaliadas, com maior semelhança no início da manhã (8 h às 10 h) e no final da tarde (16 h às 18 h). Foi possível calcular o índice de fluxo de seiva a partir dos dados oriundos das sondas térmicas e de acordo com os resultados de sua relação com os fatores meteorológicos e fisiológico. É possível concluir que as sondas possuem um alto potencial na utilização como sensor de fluxo de seiva e, conseqüentemente, na estimativa do consumo de água pela planta e de seu estresse hídrico.

Palavras-chave: Irrigação. Fluxo de seiva. Transpiração vegetal.

ABSTRACT

In irrigation, in order to achieve high efficiency of water application, besides having an adequate system the conditions of culture, climatic and socio-environmental, the irrigant must have a good management plan. Determining when and how much to irrigate is a factor that has been studied by the academic community during the last decades, developing new methods and equipment. Among the methods used, the measurement of transpiration in plants to determine the amount of water to be replenished by irrigation has gained prominence since the twentieth century. The method proposed by Granier (1985) that uses thermal dissipation probes to measure the flow of sap and indirectly the transpiration flow of plants, stands out because it is easy to construct and application. This work has as general objective the development of a platform for data collection of thermal probe, as specific objectives: to construct thermal probes in a platform for data acquisition, storage and transmission; calculate the sap flow index; evaluate this index for meteorological and physiological factors. The construction of the probes consisted of hypodermic needles and K-type thermocouples, inside, and filled with thermal paste. In the heated probe, a constantan wire was used as resistance to promote its heating. This heating originated from a constant electrical power. The hardware consisted of an Arduino Mega, 5V power supply circuits and current limiter. The software was developed in the Arduino IDE. In the evaluation of the index in relation to meteorological factors, the air temperature influenced the temperature of the probes, however, had low influence on the difference between the heated and reference probes. The rain caused noise in the values obtained in the thermal probes, due to the flow in the stem cause a reduction in temperature in the heated probe, eliminating the heating. The sap flow index showed a strong correlation between global radiation and reference evapotranspiration. In the evaluation of the index in relation to leaf water potential, a good correlation was found between the variables evaluated, with greater similarity in the early morning (8 am to 10 am) and in the late afternoon (4 pm to 6 pm). It was possible to calculate the sap flow index from the data from the thermal probes and according to the results of its evaluation with the meteorological and physiological factors it is possible to conclude that the probes have a high potential in the use as sap flow sensor and, consequently, in the estimation of water consumption by the plant and its hydric stress.

Keywords: Irrigation. Sap flow. Plant sweating.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Estrutura do tronco de uma árvore.....	18
Figura 2	– Esquema de instalação das sondas alinhadas na árvore (sem escala)	26
Figura 3	– Efeito Seebeck nos fios do termopar.....	27
Figura 4	– Desenho esquemático das sondas. A) sonda superior, com os elementos de aquecimento; B) sonda inferior.....	28
Figura 5	– Diagrama eletrônico da placa de alimentação 5V e 10V para os componentes e Arduino, respectivamente.....	30
Figura 6	– Diagrama eletrônico da fonte de corrente constante.....	31
Figura 7	– Avaliação da placa limitadora de corrente.....	32
Figura 8	– Fluxograma do código utilizado no microcontrolador.....	33
Figura 9	– Procedimento para visualizar e baixar arquivos armazenados no cartãoSD....	34
Figura 10	– Mapa de localização da área de instalação do experimento e de obtenção de dados.....	35
Figura 11	– Instalação das sondas no caule. A) perfuração do caule utilizando uma agulha como broca. B) inserção de pasta térmica no orifício. C) sondas distanciadas a 10 cm entre si. D) isopor para fixar as sondas.....	36
Figura 12	– Sistema de controle e <i>datalogger</i> instalados próximo a planta analisada.....	37
Figura 13	– Isolamento térmico. A) encaixe do isopor. B) fechamento da caixa. C) isolamento com papel alumínio.....	38
Figura 14	– Bomba de Scholander utilizada para aferir o potencial hídrico foliar.....	41
Figura 15	– Comportamentos das temperaturas das sondas, da temperatura do ar e da diferença de temperatura entre as sondas.....	42
Figura 16	– Índice de fluxo de seiva (K) durante os dias 23, 24 e 25 de maio.....	43
Figura 17	– Influência da temperatura do ar nas sondas inseridas no caule.....	44
Figura 18	– Influência da temperatura do ar na diferença de temperatura entre as sondas inseridas no caule.....	45

Figura 19	– Influência da temperatura do ar na temperatura nas sondas. A) sonda de referência vs. temperatura do ar. B) sonda aquecida vs. temperatura do ar.....	46
Figura 20	– Influência da temperatura do ar na diferença de temperatura, no período diurno e noturno.....	47
Figura 21	– Diferença de temperatura, entre a sonda aquecida e sonda de referência, e ocorrência de precipitação durante o período analisado, evidenciando as anormalidades no comportamento dos dados ocasionado pela chuva.....	48
Figura 22	– Decréscimo de temperatura na sonda aquecida ocasionada pela água.....	49
Figura 23	– Influência da radiação global ($W m^{-2}$) no índice de fluxo de seiva (K, adimensional)	51
Figura 24	– Comportamento da radiação solar global e índice K horário.....	52
Figura 25	– Variação horária do índice de fluxo de seiva e da estimacão da evapotranspiracão de referênciã ($mm h^{-1}$)	53
Figura 26	– Relacão da evapotranspiracão de referênciã ($mm h^{-1}$) com o índice de fluxo de seiva (K, adimensional)	54
Figura 27	– Comportamento do índice de fluxo de seiva e potencial hídrico foliar.....	55
Figura 28	– Relacão entre o índice de fluxo de seiva e potencial hídrico foliar.....	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

bit	Binary Digit
CI	Circuito Integrado
CO ₂	Dióxido de Carbono
DPV	Déficit de Pressão de Vapor
DC	Direct Current
ETo	Evapotranspiração de Referência
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura
Fd	Densidade de Fluxo de Seiva
GTN	Gradiente Térmico Natural
IAF	Índice de Área Foliar
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDE	Ambiente de Desenvolvimento Integrado
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
K	Índice de Fluxo de Seiva
LEA	Laboratório de Energia Alternativa
LEMA	Laboratório de Eletrônica e Mecânica Agrícola
RTC	Real Time Clock
SD	Secure Digital
SPI	Serial Peripheral Interface
UFC	Universidade Federal do Ceará

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	A transpiração das plantas	15
<i>2.1.1</i>	<i>Introdução</i>	15
<i>2.1.2</i>	<i>Principais fatores que afetam a transpiração</i>	15
<i>2.1.2.1</i>	<i>Fatores fisiológicos</i>	15
<i>2.1.2.2</i>	<i>Fatores climáticos</i>	16
<i>2.1.2.3</i>	<i>Fatores edáficos</i>	17
<i>2.1.3</i>	<i>Fluxo xilemático</i>	18
2.2	Método de Granier – Sonda de Dissipação Térmica (SDT)	19
<i>2.2.1</i>	<i>Teoria: a termodinâmica no método de dissipação térmica</i>	19
<i>2.2.2</i>	<i>Calibração original realizada por Granier</i>	24
<i>2.2.3</i>	<i>Gradiente térmico natural</i>	25
2.3	Utilização dos conceitos de fisiologia e método Granier	25
3	MATERIAL E MÉTODOS	26
3.1	Princípios do método	26
3.2	Construção das sondas	27
3.3	Determinação do índice de fluxo de seiva	29
3.4	Eletrônica e programação para funcionamento das sondas	29
<i>3.4.1</i>	<i>Hardware utilizado para coleta, armazenamento e aquisição de dados</i>	30
<i>3.4.2</i>	<i>Sistema de aquecimento para sonda superior</i>	31
<i>3.4.3</i>	<i>Desenvolvimento do software para coleta, armazenamento e transmissão de dados</i>	33
<i>3.4.4</i>	<i>Transmissão de dados da plataforma</i>	34
3.5	Descrição da área de instalação do experimento e de obtenção de dados	35
3.6	Instalação da plataforma em campo	36
3.7	Isolamento térmico nas sondas	37
3.8	Estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) por Penman-Monteith	39
3.9	Potencial hídrico foliar	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42

4.1	Dados obtidos nas sondas térmicas e temperatura do ar.....	42
4.2	Influência da temperatura do ar na sonda aquecida e de referência.....	44
4.3	Interferência da chuva na temperatura mensuradas pelas sondas.....	48
4.4	Influência da radiação global no índice de fluxo de seiva.....	50
4.5	Relação entre evapotranspiração de referência (ET_o) e índice de fluxo de seiva.....	53
4.6	Relação entre potencial hídrico foliar e índice de fluxo de seiva.....	55
5	CONCLUSÕES.....	57
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	58
	REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

O crescimento exponencial da população e o aumento da procura por alimentos foram os principais motivos para o impulsionamento da agricultura moderna e o principal desafio é de aumentar a produção sem incremento na área cultivada. Entre os métodos desenvolvidos e aprimorados estão o preparo da terra, a adubação, o uso de defensivos e a irrigação. Este último, torna-se um fator decisivo para o aumento da produção e qualidade do produto.

Historicamente, a prática de irrigar as culturas agrícolas vem sendo utilizada desde as antigas civilizações, principalmente nas regiões secas e banhadas por rios, no Egito com o rio Nilo e na Mesopotâmia com os rios Tigre e Eufrates (RIBEIRO, 1978). Inicialmente, a agricultura desenvolveu-se em regiões onde as condições climáticas eram favoráveis e a quantidade e distribuição de chuva fossem capazes de suprir a demanda das culturas, desta forma a irrigação surge nos períodos mais recentes na história (BRASIL, 2017).

Segundo Delgado-Rojas (2003), a eficiência da aplicação de água não é função apenas de equipamentos modernos, mas de um manejo correto do sistema de irrigação utilizado. Assim, deve-se aplicar um determinado volume com uma frequência adequada para que seja evitado o excesso e ou falta em cada estágio fenológico da planta, garantindo seu ideal desenvolvimento. Em culturas perenes e lenhosas, cujo pomar possui um grande espaçamento entre as árvores, cada indivíduo pode considerar-se “isolado”. Desta forma, o problema é determinar o momento de irrigar e o volume a ser aplicado em cada estágio fenológico.

Para o manejo adequado, é necessário dispor de informações sobre a condição hídrica do solo e da quantidade de água consumida na área cultivada (evapotranspiração). A FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) sugere a equação parametrizada de Penman-Monteith, que ajustada pelo coeficiente da cultura, estima a evapotranspiração da cultura (ALLEN et al., 1998). Este método estima a evapotranspiração através de dados meteorológicos, sendo utilizada também para avaliar outros métodos (SMITH et al., 1991). Segundo Vellame et al. (2009), a transpiração é o principal influenciador da evapotranspiração ao se trabalhar com irrigação localizada.

A estimativa da transpiração, além do manejo da irrigação, é importante para estudos fisiológicos quanto a transferência de água pelo sistema solo-planta-atmosfera. A ciência destes dados pode contribuir para o manejo de espécies arbóreas nativas e exóticas, principalmente em regiões que possuem problemas com a escassez de recursos hídricos.

Segundo Kool et al. (2014), o método mais preciso para determinar a transpiração é a medida do fluxo de seiva. As técnicas desenvolvidas para aferir o fluxo de seiva são divididas em três grupos: balanço de calor, pulso de calor e sonda de dissipação térmica.

De acordo com Vellame (2007), estes métodos permitem estimar a transpiração a partir do fluxo de seiva, sendo uma das suas principais vantagens, o monitoramento em uma escala temporal de curtos intervalos, possibilitando acompanhar o funcionamento hídrico da planta no seu ambiente natural, em condições não perturbadas, durante longos períodos.

A medição da transpiração através da quantificação do fluxo de seiva por sondas que utilizam calor aplicado à planta ainda é um desafio para o manejo de irrigação. Entre os principais fatores limitantes podem-se destacar os equipamentos existentes no mercado, que devido aos seus altos custos e sofisticação ainda são uma barreira a ser vencida. Desta forma, as sondas de dissipação térmica podem ser confeccionadas com materiais fáceis de adquirir e com custo acessível, tanto para usar em pesquisa quanto no manejo de irrigação.

Este trabalho tem como objetivo geral desenvolver uma plataforma com sondas de dissipação térmica, aplicando o método Granier (1985) em culturas que possuam caules lenhosos, a fim de detectar a variação de temperatura entre a sonda aquecida e a sonda de referência, com a finalidade de calcular um índice de fluxo de seiva (adimensional) que possa ser utilizado para acompanhar o fluxo transpiratório durante o período diurno e noturno. Os objetivos específicos são: *i*) construção de sonda aquecida, de sonda de referência e de sonda de temperatura do ar; *ii*) desenvolvimento do *hardware* e do *software* para aquisição e armazenamentos de dados de temperatura das sondas; *iii*) verificar a influência da temperatura do ar e da chuva nos valores observados nas sondas; *iv*) avaliar a relação do índice de fluxo de seiva com fatores meteorológicos (radiação global e evapotranspiração de referência) e fisiológico (potencial hídrico foliar).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A transpiração das plantas

2.1.1 Introdução

O movimento dos estômatos é um dos principais mecanismos que controla as trocas gasosas nos vegetais (GUCCI et al., 1996). Durante o processo de fotossíntese as plantas perdem água para a atmosfera, devido à abertura dos estômatos para fixar dióxido de carbono (CO₂) (TAIZ; ZEIGER, 2004).

De acordo com Marengo e Lopes (2005), as plantas liberam água para a atmosfera na forma de vapor, por meio da transpiração e, raramente e em pouquíssimas quantidades na forma líquida, por meio da gutação. Esta, por sua vez, torna-se uma contribuição insignificante para o balanço hídrico na planta. Portanto, nas plantas, pode-se considerar a transpiração como o único mecanismo envolvido na perda de água para a atmosfera, ocorrendo através dos estômatos.

A água presente no sistema solo-planta-atmosfera tem seu movimento regido por um gradiente de potencial hídrico, do maior para o menor potencial. Segundo Marengo e Lopes (2005), a camada de ar aquecida, presente acima do tecido vegetal, ocasiona perda de água por meio da transpiração, tornando necessário a reposição de água para manter a turgência apropriada nos tecidos.

Desta forma, a transpiração ocorre quando há diferença entre a concentração de vapor d'água nas superfícies evaporantes e o vapor d'água presente na atmosfera, caracterizado como um processo físico de difusão (LARCHER, 2006).

2.1.2 Principais fatores que afetam a transpiração

2.1.2.1 Fatores fisiológicos

O fechamento dos estômatos e o aumento da aquisição de água através das raízes, são mecanismos que cooperam para a manutenção da turgência, do crescimento e da sobrevivência dos vegetais (NGUGI et al., 2004). Através da regulação da abertura dos estômatos, a planta consegue modular a quantidade de vapor d'água liberada para a atmosfera, em função de sua necessidade de seu balanço hídrico. Deste modo, em locais secos, as plantas

diminuem o grau e tempo de abertura estomática quando o balanço hídrico se torna desfavorável, reduzindo a perda de água nos tecidos (LARCHER, 2006). À vista disso, entender a condutância estomática torna-se imprescindível para prever o uso da água e a fotossíntese líquida (MARRICHI, 2009).

Entre os processos fisiológicos que influenciam a transpiração tem-se também a densidade de área foliar, definida como o total da área do tecido fotossintético por unidade de volume do dossel. Através da integração da densidade de área foliar sobre o peso do dossel, tem-se o conceito de Índice de Área Foliar (IAF). O IAF origina o tamanho da interface entre a planta e a atmosfera, desempenhando uma importante função nas trocas de massa e energia entre o dossel e a atmosfera (NETO, 2007).

2.1.2.2 Fatores climáticos

A transpiração das espécies lenhosas é afetada mais pelas condições atmosféricas do que pela disponibilidade de água no solo (SARMIENTO et al., 1985). A demanda evaporativa do ar, a condutância da copa e a quantidade de água no solo são determinantes na influência das taxas de transpiração. Os fatores ambientais que regem a condutância estomática da copa são: déficit de pressão de vapor (DPV), intensidade de luz e quantidade de água nas folhas (LANDSBERG; GOWER, 1997). É observado em grande parte das espécies vegetais que o aumento no DPV ao redor da planta resulta no fechamento dos estômatos (GUEHL; AUSSÉNAC, 1987). Este controle é de fundamental importância para que as plantas diminuam a perda de água para a atmosfera em condições de uma excessiva demanda evaporante (MIELKE, 1997).

Segundo Pereira et al. (1998), dentre os processos físicos que controlam a evapotranspiração, tem-se a disponibilidade de energia. A disponibilidade de energia é controlada pelo poder refletor da superfície, o albedo e o coeficiente de reflexão. De acordo com Medeiros (2002), a energia que proporciona a vaporização e remoção de vapor de água é oriunda da radiação, configurando-se como um importante fator climático. Esta é determinada em função do local e época do ano, influenciada pelo ângulo (topografia da região) e posição do sol (latitude) em relação à terra.

A temperatura do ar é um elemento indicativo de energia no sistema estudado, tornando-se um importante fator, visto que a radiação absorvida pela atmosfera aumenta a temperatura do ar, interferindo nas condições ambientais, que pode interagir com outras variáveis importantes no processo de transpiração (MEDEIROS, 2002).

O déficit de pressão de vapor (DPV) é calculado pela diferença entre a pressão de vapor saturado e a atual. Ele fornece a informação do quanto será necessário para saturar um determinado volume de ar, sendo assim, um indicativo da demanda evaporativa do ar (MEDEIROS, 2002).

O DPV é uma importante variável climática que impulsiona a transpiração, esta que em altos valores ao longo do dia pode acarretar o fechamento estomático e como consequência a redução do crescimento vegetal (ALMEIDA, 2003). Assim, a condutância estomática e a condutância da copa diminuem com o aumento do DPV, acarretando uma restrição à transpiração (WHITEHEAD; BEADLE, 2004).

A medida em que a diferença de pressão aumenta na interface planta-atmosfera, a taxa de transpiração aumenta. Assim, a transpiração intensifica-se com a diminuição da umidade relativa e com o aumento de temperatura do ar (LARCHER, 2006).

A tendência de a planta entrar em déficit hídrico aumenta em função do aumento do DPV. Visto que valores altos de DPV capturam a água presente nas células dos tecidos vegetais, e conseqüentemente, diminuem o potencial hídrico do sistema celular (LARCHER, 2006).

2.1.2.3 Fatores edáficos

Além dos fatores fisiológicos, que dependem das características adaptativas das plantas, dos fatores climáticos que depende da demanda evaporativa do ar para controle estomático, a quantidade de água no solo e sua capacidade em fornecer água às raízes também determina a taxa de transpiração. Dessa forma, a interface solo e sistema radicular é de extrema importância para o suprimento de água das plantas (TAIZ; ZEIGER, 2004).

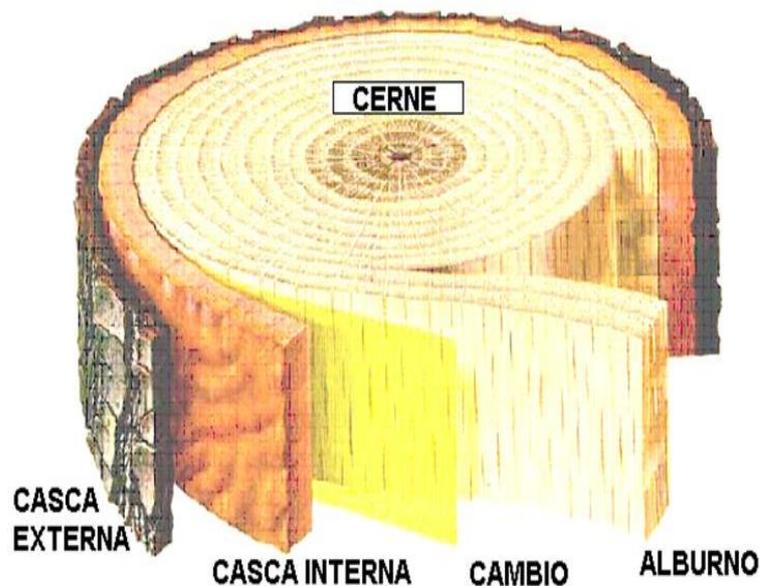
Considerando que o fluxo de água segue no sentido solo-planta-atmosfera, à medida que as plantas absorvem água do solo, o potencial hídrico do solo (conteúdo de água) diminui e sua condutividade hidráulica decresce rapidamente. Portanto, conforme os espaços porosos do solo são preenchidos por ar, o movimento da água até as raízes é dificultado, e a condutividade hidráulica diminui. O potencial hídrico do solo pode tornar-se inferior ao potencial hídrico no ponto de murcha permanente. Neste momento, a planta torna-se incapaz de recuperar a pressão de turgor em seus tecidos, mesmo cessando a perda de água por transpiração. Ainda que haja água no solo, a planta não consegue absorver devido à forte adsorção de água à matriz do solo (TAIZ; ZEIGER, 2004).

2.1.3 Fluxo xilemático

Segundo Larcher (2006), a planta se coloca como um meio de transporte de água do solo para a atmosfera. Dessa forma, tem-se um fluxo de água no interior da planta na direção da atmosfera. Segundo o autor, dentro da planta existem dois tipos de transporte da água. O transporte a curta distância acontece de célula a célula, já o transporta a longas distâncias acontece por meio do xilema, conforme um gradiente de potencial hídrico.

Segundo Menezes et al. (2003), o xilema secundário, encontra-se mais interno, perde gradualmente as funções de condução de água e nutrientes e, com a morte das células do lenho, perde também as funções de reservas. A parte mais externa do lenho que é funcional é denominada albúrnio (Figura 1).

Figura 1 – Estrutura do tronco de uma árvore.



Fonte: Klock (2012).

De acordo Marengo e Lopes (2005), no xilema, o transporte de água acontece desde as raízes, passando pelo caule até as folhas. Segundo os autores, a sua estrutura é composta por três tipos de células: elementos de vaso, fibras e parênquima do xilema. Os elementos de vaso conduzem a água e os nutrientes inorgânicos.

Diversos métodos podem ser aplicados para medir o fluxo de uma planta, atualmente um dos mais utilizados refere-se a sensores que estimam o fluxo de seiva, como no método de Granier (1985).

2.2 Método de Granier – Sonda de Dissipação Térmica (SDT)

O método de dissipação de calor foi proposto por Granier (1985), inicialmente com o objetivo de mensura à transpiração em espécies florestais. O autor relacionou a velocidade de dissipação de calor, pontual no troco, com o fluxo de seiva.

O método exige um pequeno fornecimento de calor de forma constante, inserido através de uma sonda em um ponto do tronco ou ramo. A variação de temperatura em relação a uma sonda de referência, inserida 10 cm abaixo da sonda aquecida, é ocasionada pelo transporte convectivo de calor pela seiva, ou seja, quanto maior o fluxo de seiva, maior a dissipação de calor na sonda aquecida (GRANIER, 1987).

Desta forma, em um período de um dia, a máxima diferença de temperatura significa que o calor não está sendo dissipado com alta rapidez, ou seja, o fluxo é mínimo ou nulo (VELLAME, 2007).

A mínima diferença de temperatura, significa que o calor está sendo dissipado com maior rapidez, ou seja, o fluxo é máximo. Por meio desta, permite-se acompanhar, a uma escala temporal de curtos intervalos, o funcionamento hídrico das plantas no seu meio ambiente natural e em condições não perturbadas, durante períodos prolongados (VELLAME, 2007).

2.2.1 Teoria: a termodinâmica no método de dissipação térmica

A teoria de Granier pode ser explicado com base nos trabalhos de Lu et al. (2004), Coelho et al. (2012), onde os autores expressão os detalhes que correlacionam a energia dissipada com a densidade de fluxo de seiva no tronco de árvores.

Granier (1985) recorreu a dois princípios da termodinâmica: (i) a lei do resfriamento de Newton e (ii) o efeito Joule.

Na convecção forçada o fluxo de calor (Q) entre uma parede aquecida à temperatura (T) e um fluido mais frio (T_f) é determinado a partir da lei de Newton do arrefecimento.

A taxa de transferência de calor Q em interface sólida é diretamente proporcional ao produto da área SA (xilema) dessa interface pela diferença de temperatura ($T - T_f$) entre o fluido e a parede do sólido nele imerso, sendo o coeficiente de película (h) a constante de proporcionalidade (FIGUEIREDO, 2018).

A Equação 1 descreve a transferência de calor de um ponto para o outro através do movimento de fluidos no tempo.

$$\frac{dQ_E}{dt} = hS(T - T_f) \quad (1)$$

Onde,

Q_E = energia térmica (J);

t = intervalo de tempo (s);

h = coeficiente convectivo ($W m^{-2} °C^{-1}$);

S = área da superfície de troca, ou seja, área do xilema (m^2);

T = temperatura da sonda ($°C$);

T_f = temperatura do caule na ausência de aquecimento ($°C$).

Alves et al. (2016), descrevem o Efeito Joule (Equação 2) como sendo a potência dissipada quando um condutor é percorrido por uma corrente elétrica, ocorrendo a transformação de energia elétrica em energia térmica, resultando no aumento de temperatura do condutor.

$$P = R I^2 \quad (2)$$

Onde,

P = potência elétrica dissipada (W);

R = resistência elétrica no componente de aquecimento (Ω);

I = intensidade de corrente elétrica (A).

Segundo Granier (1985), em regime térmico estabelecido entre o elemento de aquecimento e o meio, este composto por madeira e seiva, e para um fluxo constante de seiva, a contribuição de calor por efeito Joule é igual à quantidade de calor dissipada na parede do sensor, conforme a Equação 3.

$$hS(T - T_f) = R I^2 \quad (3)$$

O coeficiente convectivo (h) depende da viscosidade cinemática (ν), da condutibilidade térmica (k) do fluido, do diâmetro da seção de fluxo transversal (D), da massa específica (ρ), da velocidade de fluxo (v) e do calor específico (c_p).

O número de Nusselt (Nu) é o parâmetro adimensional principal, fornecendo o coeficiente convectivo que permite calcular o calor transferido (Equação 4). Este é função do número de Reynolds (Re) e número de Prandtl (Pr).

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (4)$$

Onde,

h = coeficiente convectivo ($W m^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1}$);

D = diâmetro interno do tubo condutor (m);

k = condutibilidade térmica ($W m^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$).

Segundo Netto et al. (1982), o número de Reynolds (Re) é um parâmetro que leva em conta a velocidade entre o fluido que escoar e o material que o envolve e a viscosidade cinemática do fluido (Equação 5).

$$Re = \frac{vD}{\nu} \quad (5)$$

Onde,

v = velocidade média do fluido ($m s^{-1}$);

D = diâmetro interno do tubo condutor (m);

ν = viscosidade cinemática ($m^2 s^{-1}$).

Quando se trata da transferência de calor, o número de Prandtl (Pr) representa o quociente entre a difusividade da quantidade de movimento e a difusividade térmica. Desta forma, controla a espessura relativa das camadas limite de momento e térmica. Quando Pr é pequeno, o calor difunde-se muito facilmente comparado à velocidade da seiva (Equação 6).

$$Pr = \frac{\nu \rho c_p}{k} \quad (6)$$

Onde,

ν = viscosidade cinemática ($m^2 s^{-1}$);

ρ = massa específica do fluido ($kg m^{-3}$);

c_p = calor específico ($W s kg^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$);

k = condutibilidade térmica ($W m^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$).

Desse modo, a relação entre as variáveis aplicadas aos elementos transferidores de calor é demonstrada na Equação 7.

$$Nu = C Re^n Pr^m \quad (7)$$

Onde,

C, n e m são parâmetros empíricos que dependem da geometria do problema e do tipo de escoamento.

A densidade de fluxo de seiva foi relacionada ao coeficiente h na Equação 8, que deriva da Equação 7. Considerando ρ , v , c_p , k e D como parâmetros constantes; fazendo com que a velocidade (Pr) seja igual à densidade do fluxo da seiva – F_d ($m s^{-1}$) e α igual a $C.Pr^m$ e β igual ao coeficiente n da Equação 7. Deste modo α e β são coeficientes dependentes da quantidade de calor aplicado, temos:

$$h = h_0(1 + \alpha F_d^\beta) \quad (8)$$

Onde,

h_0 = coeficiente de troca térmica quando o fluxo é zero, ($F_d = 0$);

F_d = densidade de fluxo de seiva ($m s^{-1}$);

α e β = coeficientes que dependem da quantidade de calor aplicado.

Calculando h_0 a partir da Equação 3, na Equação 8 para $F_d=0$, temos:

$$h = h_0(1 + \alpha F_d^\beta) \rightarrow h = h_0(1 + \alpha 0^\beta) \rightarrow h = h_0$$

Como h_0 ocorre quando $T=T_{max}$, assim da Equação 3, temos:

$$h_0 S = (T_{max} - T_f) = R I^2$$

Isolando h_0 , temos:

$$h_0 = \frac{R I^2}{S(T_{max} - T_f)} \quad (9)$$

Tmax ocorre quando a densidade de fluxo de seiva é zero ($F_d=0$), quando há somente perda de calor condutora.

Quando $F_d \neq 0$ e é constante, pode ser descrito por:

$$F_d = \left[\frac{1}{\alpha} \cdot \frac{h-h_0}{h_0} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (10)$$

Combinando a Equações 3, 8 e 9, temos:

$$F_d = \left[\frac{1}{\alpha} \cdot \frac{(T_{\max} - T_f) - (T - T_f)}{(T - T_f)} \right]^{\frac{1}{\beta}}$$

$$F_d = \left[\frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T}{\Delta T} \right]^{\frac{1}{\beta}}$$

Para

$$K = \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T}{\Delta T}$$

Onde,

K = índice de fluxo (adimensional).

ΔT_{\max} = diferença máxima de temperatura, quando estabilizada, entre as sondas aquecida e não aquecida, considerando o fluxo zero ($F_d=0$);

ΔT = diferença de temperatura entre as sondas aquecida e não aquecida em determinado F_d ;

Logo,

$$F_d = \left[\frac{1}{\alpha} \cdot K \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (11)$$

$$K = \propto F_d^{\beta} \quad (12)$$

O índice K pode ser utilizado para estimar o comportamento da transpiração em um período. Para encontrar as constantes α e β , se faz necessário a calibração do sensor na planta utilizando técnicas lisimétricas, cuja diferença de peso no lisímetro, ocasionada pela transpiração da planta, é correlacionada com a sua transpiração.

2.2.2 Calibração original realizada por Granier

Conforme a Equação 11, é possível calcular a densidade de fluxo de seiva (F_d) e estimar o fluxo de seiva na planta a partir da Equação 13.

$$F = F_d SA \quad (13)$$

Onde,

F = fluxo de seiva ($m^3 s^{-1}$);

F_d = densidade de fluxo de seiva ($m s^{-1}$);

AS = área de condução do xilema (m^2);

A calibração do sensor pode ser efetuada por um sistema de lisimetria. O sensor é instalado no tronco da planta e seus valores são relacionados com os dados de transpiração do lisímetro. Desta forma, é possível determinar os coeficientes α e β (Equação 11) através de uma regressão-linear.

Granier (1985) calibrou o método em laboratório para três espécies de plantas lenhosas: *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, *Pinus nigra* Arnold e *Quercus pedunculata* Ehrh. Posteriormente foi realizado para outras seis espécies.

O autor constatou que para qualquer planta lenhosa com diâmetro de caule superior a 4 cm, poderia ser utilizada, com α e β calibrados conforme a Equação 14 (SMITH; ALLEN, 1996).

$$F = 118,99 \cdot 10^{-6} \cdot K^{1,231} \cdot SA \quad (14)$$

Araújo et al. (2012), estudando a cultura do coqueiro anão-verde, encontram valores para α e β de 122,22 e 1,7151, respectivamente. Cabibel et al. (1991), estudando quatro espécies de plantas e Köstner et al. (1998), com seis espécies de plantas, verificaram relações muito próximas à de Granier. Assim, estes autores recomendam a utilização da equação original de Granier como padrão para qualquer planta lenhosa. Porém, Steppe et al. (2010), descobriram que a calibração original subestimou a densidade do fluxo de seiva em *F. grandifolia* em média 60%. Para garantir a eficiência do método é imprescindível realizar a calibração dos sensores para cada sonda e para a espécie estudada. Assim, recomenda-se a calibração do método para espécies em que nunca foi validado, corroborando a necessidade de trabalhos de calibração para diferentes espécies, em diferentes períodos e localidades climáticas.

2.2.3 Gradiente térmico natural

As principais fontes de erros apontadas na literatura é aquela originária da perturbação térmica externa, que gera gradiente de temperatura ao longo do caule e acaba interferindo diretamente na medida do sensor e, conseqüentemente, na estimativa.

Cabibel et al. (1991), denominam essa perturbação como "gradiente térmico externo". Ferreira e Zitscher (1996), a denominam de "gradiente térmico no tronco", e Lundblad et al. (2001), de "gradiente térmico natural" (GTN). Com a finalidade de padronizar a nomenclatura, no presente trabalho, será empregada essa última denominação.

Granier (1987) observou diferenças entre os valores de fluxo de seiva medidos em três sensores, orientados em lados opostos, com 120 graus em volta do tronco e à altura de 1 m acima do solo. Lundblad et al. (2001), realizando experiências com árvores adultas de grande porte, observaram que há interferências do GTN sobre as estimativas do fluxo de seiva. Ferreira e Zitscher (1996), observaram que estas falhas são acentuadas quando o sensor é instalado muito próximo ao solo. Delgado-Rojas (2003) e Delgado-Rojas et al. (2004), também observaram, em plantas de menor porte como cafeeiro e limoeiro, que o mencionado gradiente apresenta acentuada interferência sobre as estimativas.

O GTN é ocasionado pela radiação e pela temperatura do ar e do solo que atuam no caule, afetando os valores de temperatura obtidos nos sensores, que por consequência, afetam significativamente o fluxo de seiva estimado. Algumas práticas podem reduzir os efeitos do GTN como envolver os sensores com papel alumínio e/ou isopor. Segundo Delgado-Rojas (2003), estes materiais auxiliam na reflexão da energia radiante e minimizam a carga térmica sobre o sensor.

2.3. Utilização dos conceitos de fisiologia e método Granier

Este referencial teórico buscou introduzir conceitos importantes de fisiologia vegetal e do método de dissipação térmica. Desse modo, foi abordado as razões para que a transpiração ocorra e os principais fatores que interferem na mesma. Os princípios da termodinâmica foram necessários para o embasamento teórico do desenvolvimento do método proposto por Granier (1985).

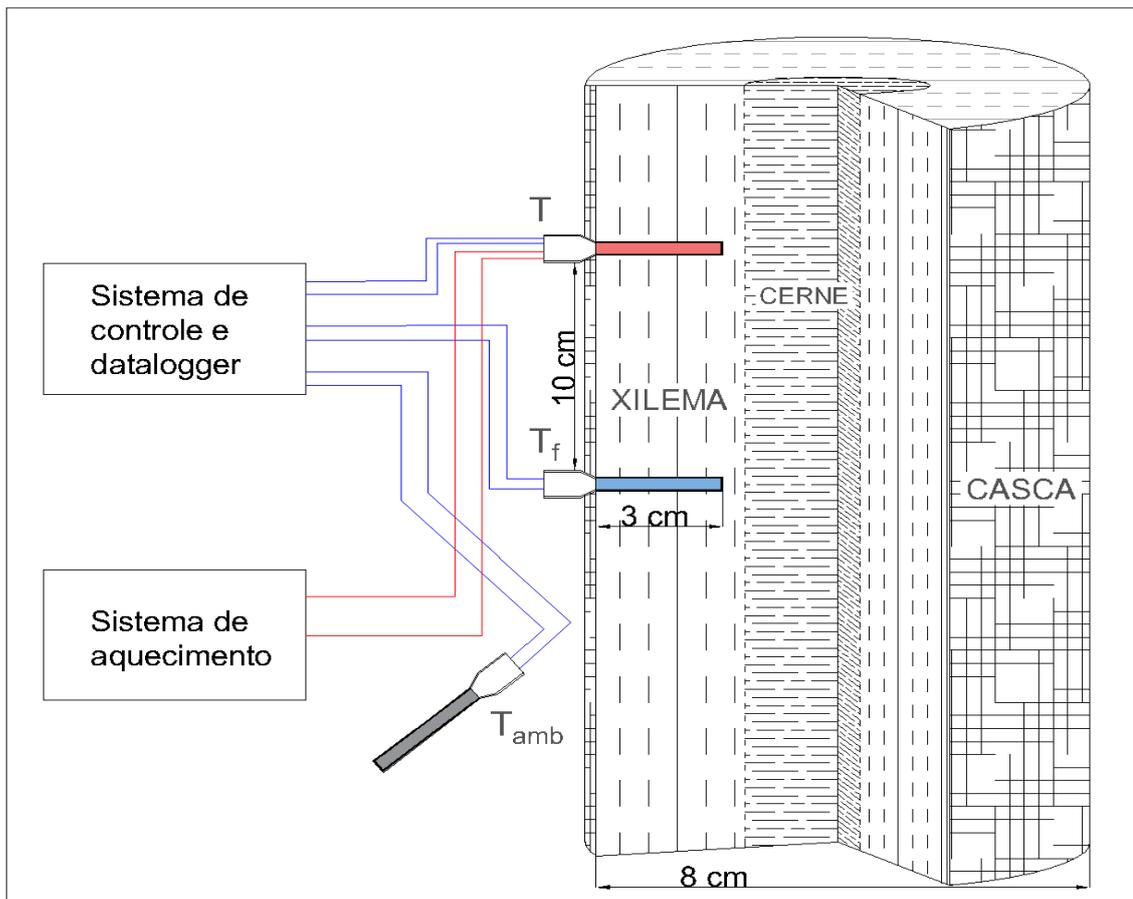
Embasado neste referencial teórico, o presente trabalho tratou da construção de sondas de dissipação térmica e do material necessário para sua aplicação prática, buscando a utilização de materiais de fácil aquisição, tornando a aplicação do método acessível.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Princípios do método

O sistema de medida constitui da inserção perpendicular no caule de duas sondas de 3 cm de comprimento e distanciadas a 10 cm, alinhadas verticalmente. A potência elétrica a ser aplicada na sonda superior recomendada na literatura é de $0,1 \text{ W cm}^{-1}$ de comprimento de sonda. A variação da diferença de temperatura entre a sonda aquecida e a não aquecida é determinado pelo transporte convectivo através da seiva. Portanto, a máxima diferença de temperatura entre as sondas significa que o fluxo é mínimo ou nulo e a mínima diferença significa que o fluxo é máximo (GRANIER, 1987). Na Figura 2, observa-se as duas sondas inseridas no tronco da árvore e uma terceira sonda para verificar a temperatura ambiente e ainda a ligação dos sensores ao sistema de controle e datalogger e a ligação da sonda superior ao sistema de aquecimento.

Figura 2 – Esquema de instalação das sondas alinhadas na árvore (sem escala).



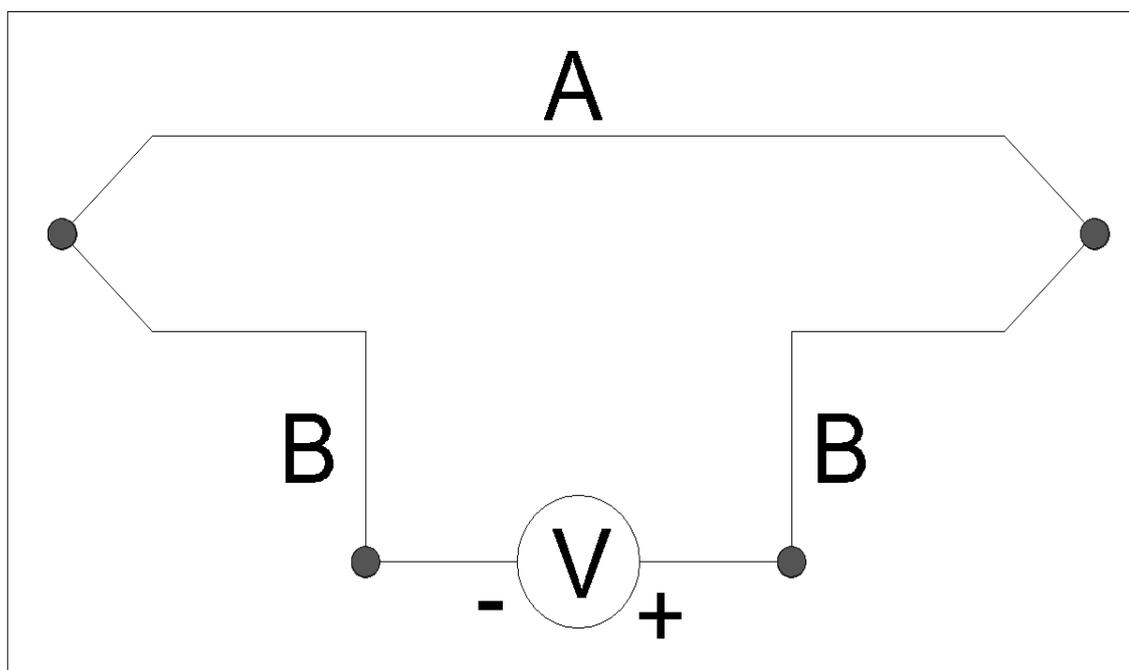
Fonte: adaptado de Delgado-Rojas (2003).

3.2 Construção das sondas

A construção do sensor foi realizada no Laboratório de Eletrônica e Mecânica Agrícola (LEMA), no Departamento de Engenharia Agrícola (DENA) do Centro de Ciências Agrárias (CCA) da Universidade Federal do Ceará (UFC), Campus do Pici.

A determinação da transpiração pode ser mensurada através de técnicas termométricas. Neste trabalho foram utilizados termômetros formados pela junção das extremidades de dois fios metálicos de materiais diferentes. Segundo De Souza (2003), quando os fios são submetidos a uma diferença de temperatura em suas extremidades ocasiona um movimento de elétrons para a região com menor nível de energia e aumenta a concentração de íons positivos na outra região, que faz surgir uma força eletromotriz (f.e.m), cujo valor não excede a ordem de grandeza de milivolts (mV). Este fenômeno é conhecido como Efeito Seebeck ou Efeito termoelétrico, este circuito é conhecido como termopar (Figura 3).

Figura 3 – Efeito Seebeck nos fios do termopar.



Fonte: elaborado pelo autor.

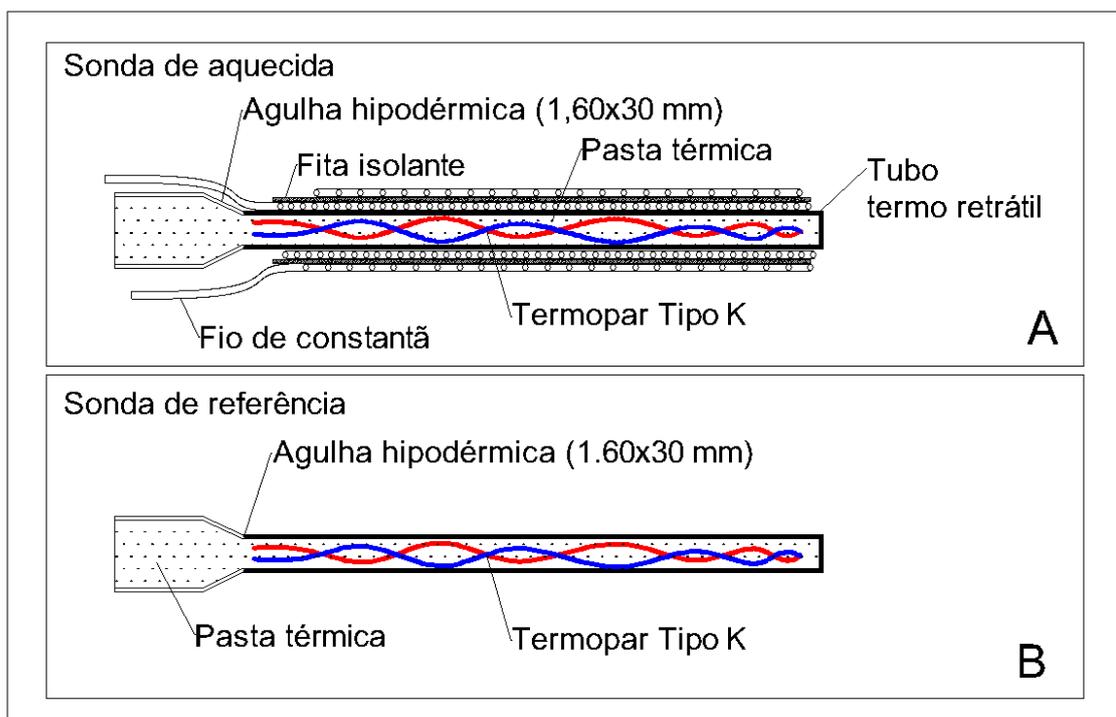
O termopar tipo K é um termopar de uso genérico, composto pela junção de duas ligas metálicas. O termoelemento positivo é constituído por Cromel, liga metálica composta por 90%Ni (Níquel) e 10%Cr (Cromo). O termoelemento negativo é constituído por Alumel, liga metálica composta por 95%Ni (Níquel) e 5%Al (Alumínio).

O sensor foi confeccionado utilizando duas agulhas hipodérmicas (1,60x30 mm) de uso veterinário, com agulha responsável pela sonda aquecida (sonda superior) e a outra agulha responsável pela sonda de referência (sonda inferior). Ambas apresentando no seu interior o sensor termopar do tipo K. As agulhas foram preenchidas com pasta térmica, para uniformizar a transferência de calor no interior da agulha para o termopar.

Na sonda superior (Figura 4A), a agulha foi isolada utilizando um tubo termo retrátil, este isolamento se fez necessário para impedir a passagem de corrente elétrica, oriunda da resistência, para o sensor no interior da agulha. Uma resistência de fio de constantan foi enrolada em formato espiral na parte exterior da agulha, tendo sido esta resistência a responsável pelo aquecimento da sonda. Por fim, foi adicionada uma camada de fita isolante para evitar o contato entre as espiras do fio de resistência. Isto se fez necessário, pois o contato das espiras no fio de constantan ocasionaria um caminho alternativo mais curto para a passagem de elétrons, resultando em uma resistência equivalente menor.

A sonda inferior (Figura 4B), responsável por mensurar a temperatura de referência do caule, foi constituída de uma agulha semelhante à da sonda aquecida, com o sensor termopar no interior da agulha, mas sem os elementos de aquecimento.

Figura 4 – Desenho esquemático das sondas. A) sonda superior, com os elementos de aquecimento; B) sonda inferior.



3.3 Determinação do índice de fluxo de seiva

Conforme a seção 2.2.1, a Equação 11 é utilizada para calcular o fluxo de seiva em árvores. No entanto, é necessária uma calibração da equação para determinar os coeficientes α e β . Ainda é preciso determinar a área de condução efetiva do xilema.

Este estudo não contemplou a determinação destes coeficientes e não determinou a área efetiva de condução do xilema. Porém, o índice K (Equação 15) pode ser utilizado para correlacionar o fluxo com os fatores climáticos (radiação global e evapotranspiração de referência) e fisiológicos (potencial hídrico foliar) sem prejuízos.

Isto é possível, pois, os coeficientes α e β não interferem no comportamento do fluxo de seiva, quando calibrados para determinada espécie vegetal. Os coeficientes alteram somente a escala gráfica dos valores na curva do fluxo de seiva.

$$K = \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T}{\Delta T} \quad (15)$$

Onde,

K = índice de fluxo (adimensional).

ΔT_{\max} = diferença máxima de temperatura, quando estabilizada, entre as sondas aquecida e não aquecida, considerando o fluxo zero ($F_d=0$);

ΔT = diferença de temperatura entre as sondas aquecida e não aquecida em determinado F_d ;

A diferença máxima de temperatura (ΔT_{\max}) foi calculada de 0 h às 23 h 59 min, portanto, podem ocorrer pequenas mudanças no comportamento do índice K na transição de um dia para o outro, devido às mudanças de ΔT_{\max} utilizadas para o cálculo diário.

3.4 Eletrônica e programação para funcionamento das sondas

A eletrônica necessária para o funcionamento das sondas foi dividida em duas partes, a primeira parte é a lógica de coleta, armazenamento e aquisição de dados de temperatura e tempo, a segunda parte é de energização da parte lógica e aquecimento da sonda superior. A programação foi realizada no IDE do Arduino. A linguagem de programação utilizada no Arduino é a linguagem C++ (com pequenas modificações).

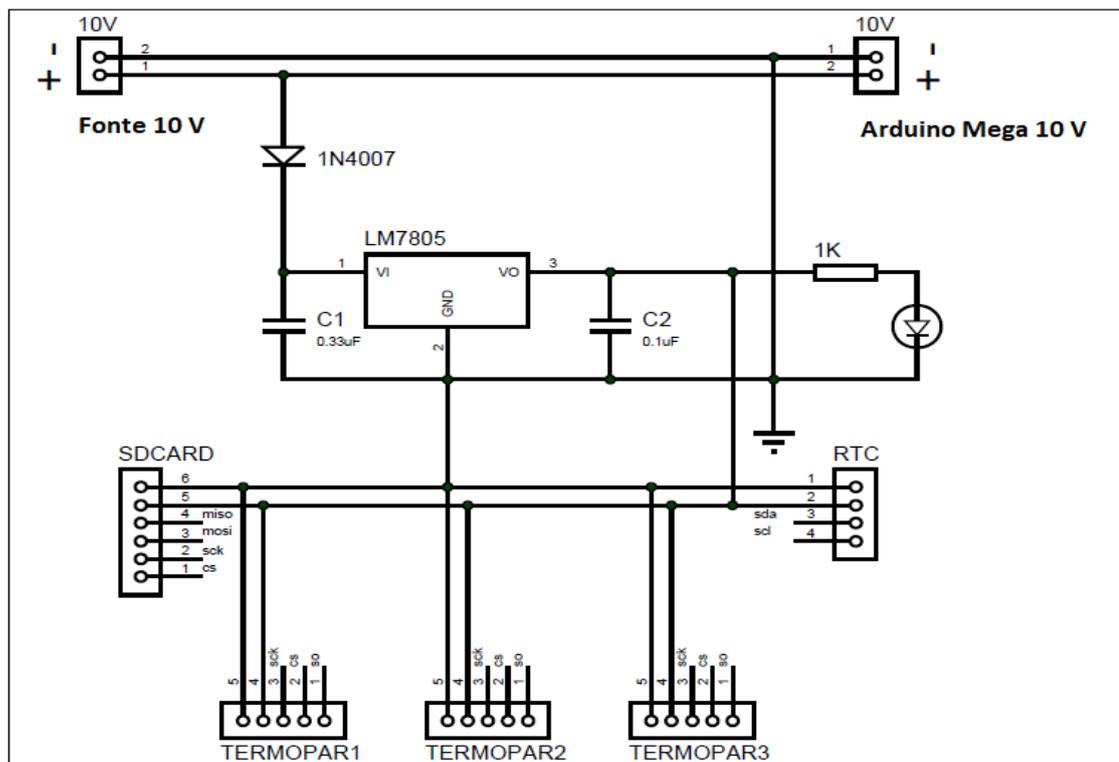
3.4.1 Hardware utilizado para coleta, armazenamento e aquisição de dados

Para a coleta, armazenamento e aquisição de dados foram necessários os seguintes componentes: *i*) um (01) Arduino Mega; *ii*) três (03) max6675; *iii*) um (01) RTC DS1307; *iv*) um (01) módulo cartão micro SD; *v*) um (01) módulo *Bluetooth* HC-05, *vi*) uma (01) fonte de alimentação 10 V/10 A.

A leitura de dados dos termopares foi realizada através do componente max6675. Este realiza a compensação de junção fria e amplifica o sinal de μV para Volts. Os dados são enviados com resolução de 12 bits, compatível com SPI. Este conversor tem uma resolução de temperaturas a $0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ e permite leituras de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $700\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Para energização dos sensores, do RTC (Relógio em Tempo Real) e módulo cartão de memória, foi confeccionado uma placa de circuito eletrônico que recebe 10 V de uma fonte DC e fornece 5 V e 10 V, para energização dos componentes e do Arduino, respectivamente, através do regulador de tensão LM7805. Os pinos de comunicação destes componentes foram jameados ao Arduino Mega (Figura 5).

Figura 5 – Diagrama eletrônico da placa de alimentação 5V e 10V para os componentes e Arduino, respectivamente.



Fonte: elaborado pelo autor.

3.4.2 Sistema de aquecimento para sonda superior

Conforme a seção 3.1, a sonda superior deve ser aquecida a $0,1 \text{ W cm}^{-1}$, desta forma foi necessário confeccionar um regulador de corrente constante, a fim de manter a potência elétrica na sonda aquecida. Como a sonda apresenta um comprimento de 3 cm, a potência necessária para o aquecimento é $0,3 \text{ W}$. A resistência do fio de constantan foi fixado em $4,5 \Omega$, aferida com um multímetro. Através da Equação 2, citada na seção 2.2.1, foi calculado a corrente necessária para o aquecimento da sonda superior. Para obter uma potência de $0,3 \text{ W}$, utilizando uma resistência de $4,5 \Omega$, temos:

$$P = R I^2 \rightarrow I = \sqrt{\frac{0,3}{4,5}} \cong 0,258 \text{ A}$$

Para diminuir o aquecimento no LM317K, foi adicionado um regulador de tensão LM7805, a tensão é regulada de 10 V (M1) para 5 V (M2) no pino VI do LM317k. O CI LM317k, originalmente fabricado para regular tensão, possui uma diferença de potencial de $1,25 \text{ V}$ (M3) entre seus pinos VO e ADJ. Desta forma, aplicando-se a lei de Ohm (Equação 16), é possível calcular a corrente elétrica que passará pelo fio de constantan (R1), calculando a resistência para o resistor R2 (Figura 6).

$$U = R I \quad (16)$$

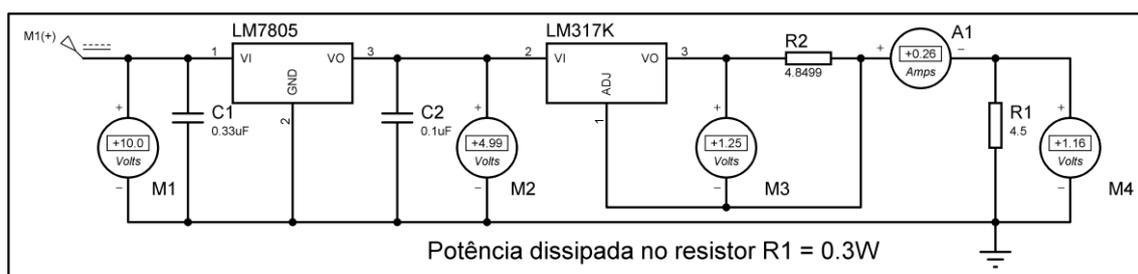
Onde,

U = diferença de potencial elétrico (V);

R = resistência elétrica (Ω);

I = intensidade de corrente elétrica (A);

Figura 6 – Diagrama eletrônico da fonte de corrente constante.



Fonte: elaborado pelo autor.

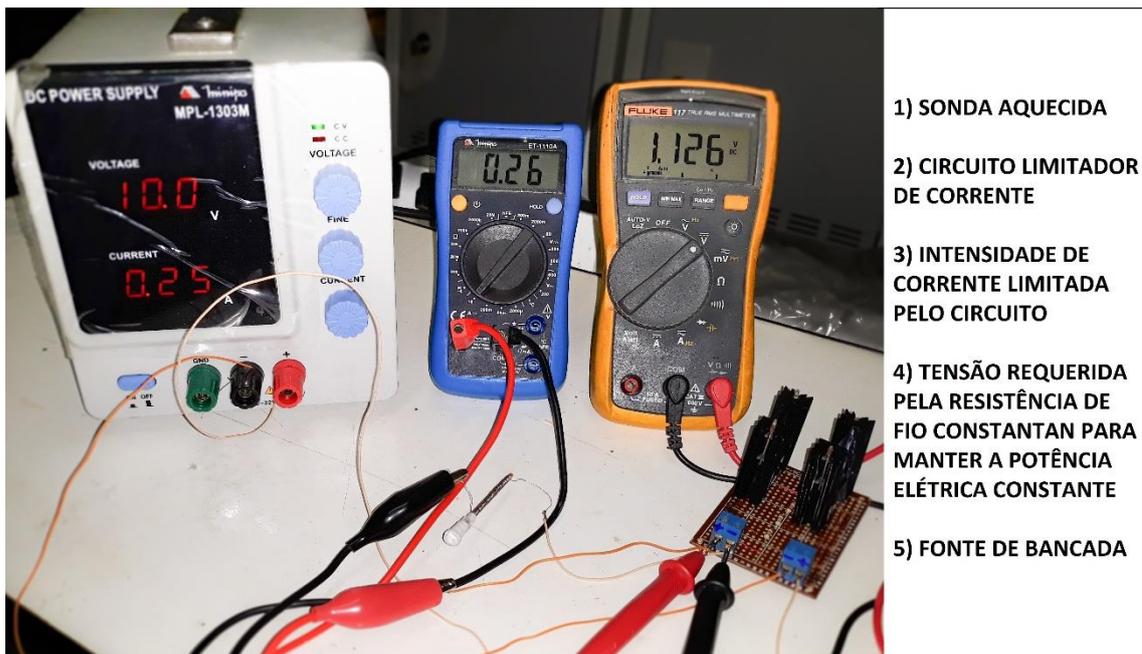
Considerando a diferença de potencial entre os pinos VO e ADJ de 1,25 V e a corrente necessária calculada anteriormente de 0,258 A, temos:

$$R2 = \frac{1,25}{0,258} \cong 4,85 \Omega$$

O circuito foi inicialmente montado e testado em matriz de contato e logo após foi confeccionado em placa universal.

Na Figura 7 é possível observar os testes realizados no sistema. Foi utilizado uma fonte de bancada regulada para fornecer 10 V, esta tensão foi reduzida para 5 V na placa limitadora de corrente.

Figura 7 – Avaliação da placa limitadora de corrente.



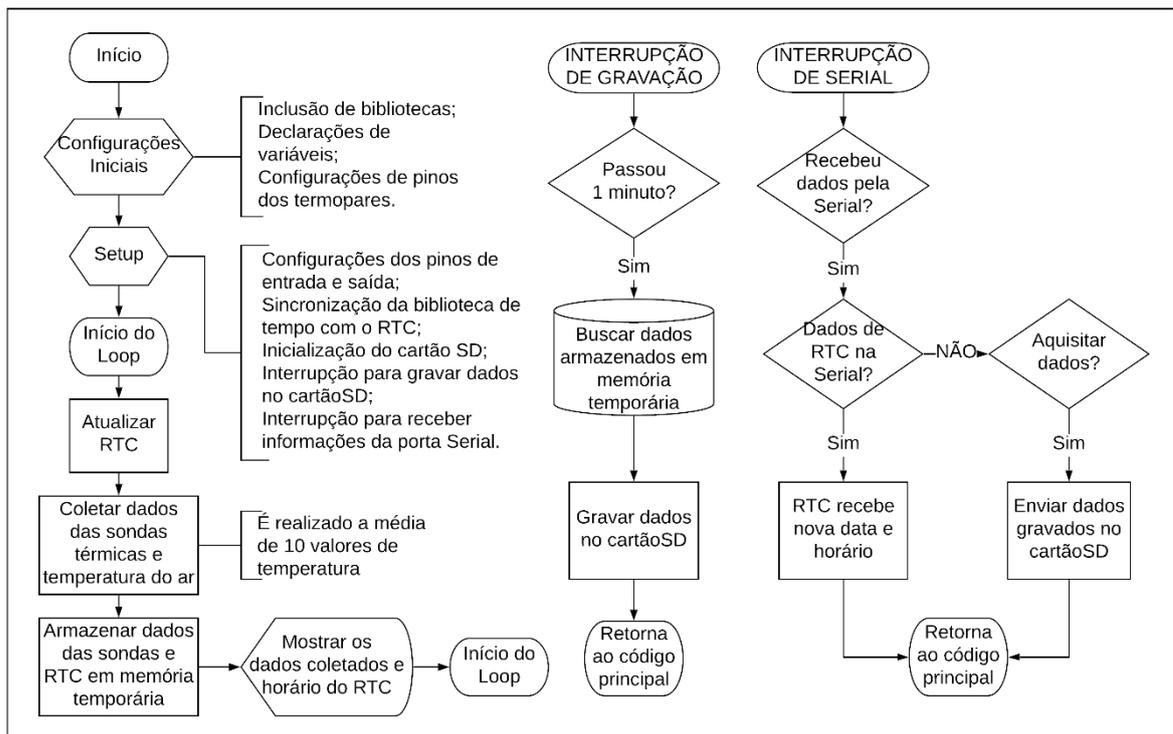
Fonte: elaborado pelo autor.

A tensão requerida pelo sistema foi de 1,126 V (2,9% menor que a projetada). A potência real dissipada foi de 0,2927 W (2,4% menor que a projetada). Estas pequenas diferenças entre os valores projetados e reais ocorreram devido às pequenas diferenças nos componentes, das especificações do fabricante.

3.4.3 Desenvolvimento do software para coleta, armazenamento e transmissão de dados

O código utilizado no Arduino Mega para coletar, armazenar e adquirir dados está descrito no fluxograma da Figura 8. O programa utilizado no Arduino foi dividido em três partes principais: Definições iniciais, Setup e Loop.

Figura 8 – Fluxograma do código utilizado no microcontrolador.



Fonte: elaborado pelo autor.

Nas definições iniciais são incluídas as bibliotecas, as declarações das variáveis globais e as declarações dos pinos de comunicação SPI dos termopares.

O Setup é uma etapa do realizada apenas uma vez; nele estão as configurações: dos pinos de entrada e saída; da sincronização da biblioteca de tempo com o RTC; e da inicialização do cartão SD. Além destas configurações, foram definidas duas funções de interrupção: a primeira verifica se há algum dado recebido na comunicação serial, se este dado for do tipo numérico separado por vírgula no formato ano, mês, dia, hora, minuto, segundo, a data e horário do RTC são modificados, ou se, o dado for do tipo caractere 's' os dados armazenados no cartão de memória são enviadas pela porta serial.

A segunda interrupção é para gravar os dados a cada minuto. Para que isto aconteça, a cada cinco segundos uma variável contadora é acrescentada em uma unidade, quando esta variável é maior ou igual a 12, a função responsável por gravar os dados no cartão de memória é acionada.

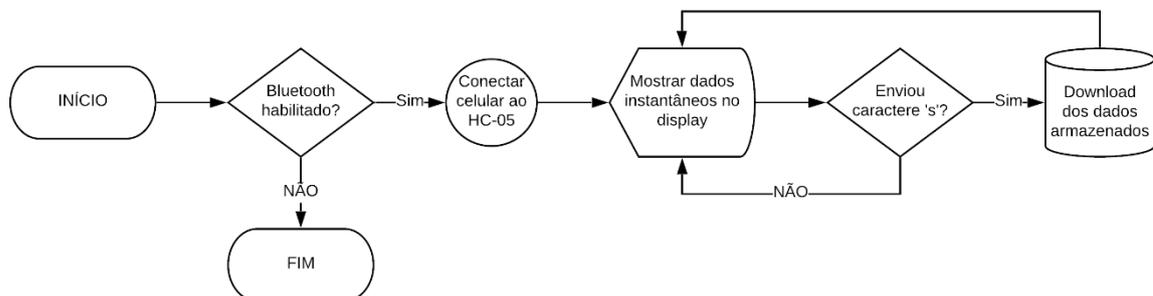
O Loop tem início com a atualização da hora no Arduino pelo RTC, em seguida é chamada a função para coletar os dados dos sensores. Nesta função existem três vetores responsáveis por armazenar dez amostras de cada sensor, com cada amostra coletada em um intervalo de 200 milissegundos. Com estes valores é realizada uma média de dez amostras com a finalidade de diminuir o efeito de ruído no sinal dos termopares. Após a coleta de dados, estes são impressos na porta serial, juntamente com a data e hora, em seguida o Loop volta ao início.

3.4.4 Transmissão de dados da plataforma

Conforme a seção 3.4.3, os dados foram armazenados no cartão de memória em arquivo no formato de texto (.txt). Em que é possível ter duas formas de aquisição de dados: manual e através do *smartphone*. Na forma manual, o cartão de memória é retirado do *datalogger* e os dados são baixados no computador.

A aquisição através do *smartphone* ocorre através de uma conexão via *Bluetooth*. O Arduino utilizado não inclui *Bluetooth* embutido, por isso o módulo HC-05 foi adotado. É uma solução barata e pronta para comunicação sem fio que converte a comunicação serial da placa para ser enviada via *Bluetooth*. O aplicativo BlueTerm (PYSMADE, 2010) foi usado no projeto para receber dados do módulo RTC e sensores de temperatura conectados ao Arduino. O BlueTerm é um aplicativo instalado em um dispositivo Android, usado para simular um console serial com capacidades de comunicação *Bluetooth*. O fluxograma do procedimento para coleta dos dados via conexão *Bluetooth* pode ser observado na Figura 9.

Figura 9 – Procedimento para visualizar e baixar arquivos armazenados no cartãoSD.



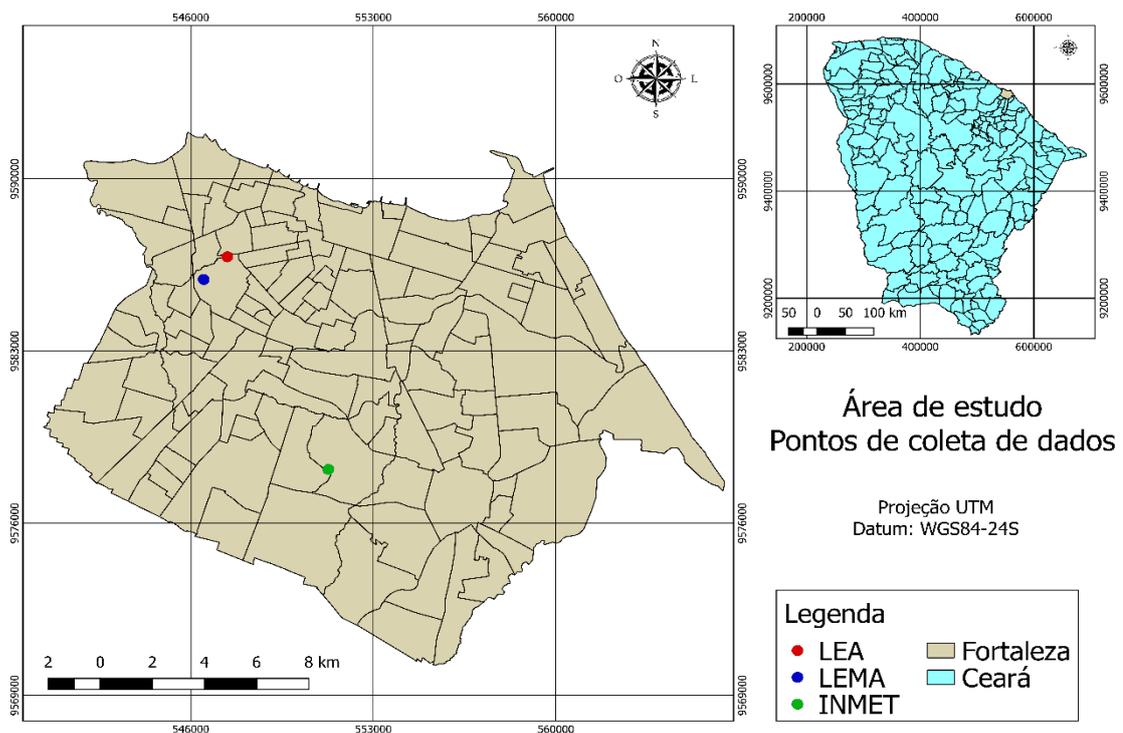
Fonte: elaborado pelo autor.

3.5 Descrição da área de instalação do experimento e de obtenção de dados

A área onde o experimento foi instalado está inserida no município de Fortaleza, CE, que tem as seguintes coordenadas geográficas: latitude: 3° 43' 1" sul; longitude: 38° 32' 34" oeste e altitude: 21 metros (IBGE, 2019). Em Fortaleza predomina o tipo climático Aw, da classificação de Köppen (1918). Na classificação de Thornthwaite (1948), Fortaleza possui tipo climático C2W2A'a'. Caracteriza-se por ser um clima úmido a subúmido, com grande deficiência no inverno, megatérmico, e a concentração dos três meses de verão responsável por 25,4% da evapotranspiração potencial normal. O regime climático apresenta uma pluviometria média anual de 1600 mm; com temperatura média de 27,3 °C e umidade relativa média do ar de 76%.

A Figura 10 apresenta o mapa da cidade de Fortaleza e o ponto azul indica onde o experimento foi instalado, no laboratório de eletrônica e mecânica agrícola (LEMA-UFC). Os dados de radiação solar foram obtidos no laboratório de energia alternativa (LEA-UFC), distante 1,3 km do LEMA. Os dados para estimar a evapotranspiração horária foram obtidos na estação automática do INMET, distante 9,1 km do LEMA.

Figura 10 - Mapa de localização da área de instalação do experimento e de obtenção de dados.



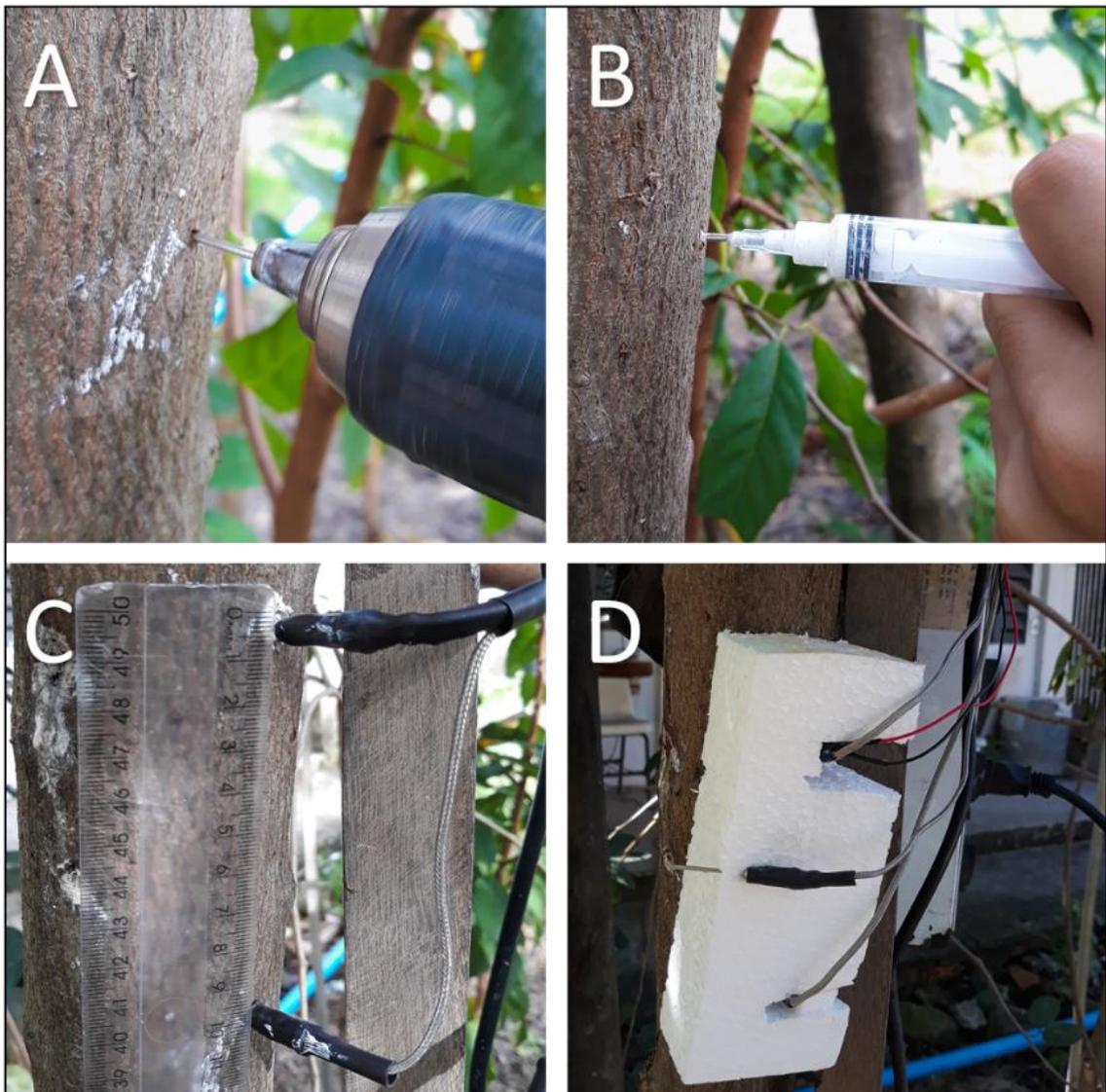
Fonte: elaborado pelo autor/IBGE.

3.6 Instalação da plataforma em campo

A plataforma foi instalada no tronco de um exemplar de *Annona squamosa* Linn, conhecida popularmente como ata, fruta-do-conde ou pinha, a uma altura de 1,5 m. Esta árvore possui idade e altura de aproximadamente 5 anos e 5 metros, respectivamente.

Este exemplar foi escolhido por sua proximidade ao laboratório (LEMA), e por possuir um caule lenhoso com diâmetro de aproximadamente 8 cm, ideal para inserção das sondas. A Figura 11 apresenta o processo de instalação das sondas no caule da planta.

Figura 11 – Instalação das sondas no caule. A) perfuração do caule utilizando uma agulha como broca. B) inserção de pasta térmica no orifício. C) sondas distanciadas a 10 cm entre si. D) isopor para fixar as sondas.

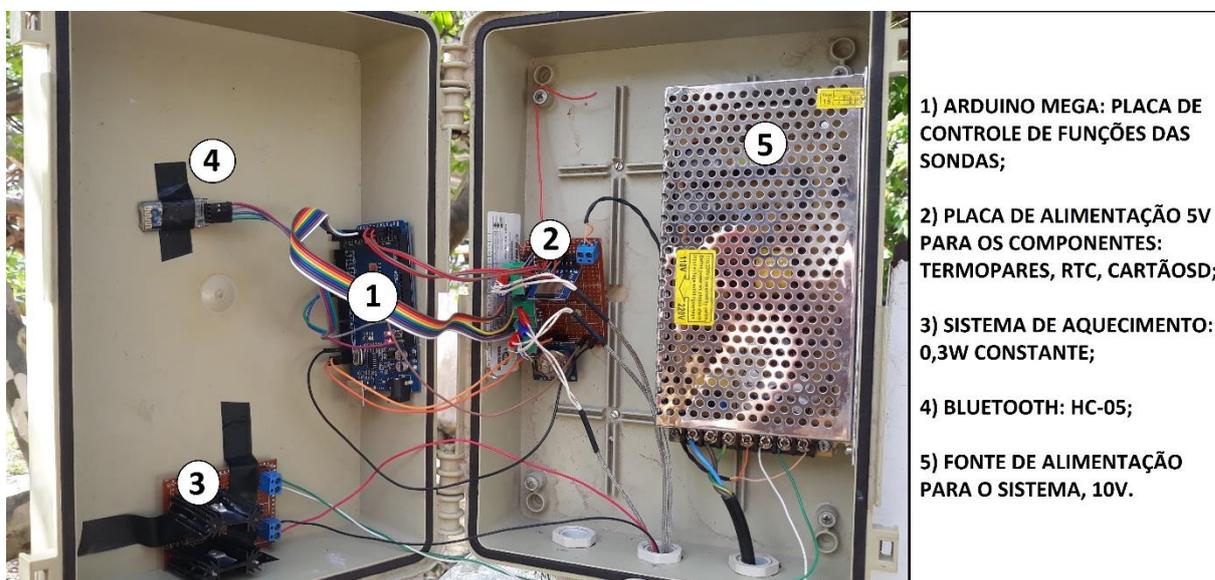


Fonte: elaborado pelo autor.

Os orifícios, em que as sondas foram inseridas, foram abertos utilizando uma furadeira elétrica. Para o orifício da sonda aquecida foi utilizado uma broca com 4 mm de diâmetro, para a sonda de referência foi utilizado como broca uma agulha semelhante a utilizada a construção da sonda (Figura 11A). Com o auxílio de uma seringa foi inserido nos orifícios a pasta térmica, para melhorar o contato e a transferência de energia entre a planta e as sondas (Figura 11B). As sondas foram instaladas com uma distância de 10 cm entre elas (Figura 11C) e colocado uma placa de isopor para melhor fixar as sondas no caule (Figura 11D).

Os sistemas de controle e *datalogger* foram instalados ao lado da planta, em caixa plástica. Na Figura 12, pode ser visualizado no item (1) o Arduino Mega; responsável por controlar as funções dos componentes eletrônicos, a partir do *software* desenvolvido (Figura 8). No item (2), está a placa de alimentação 5 V; desenvolvida com a finalidade de maximizar a utilização dos pinos do Arduino Mega (Figura 5). No item (3), está a placa responsável pelo sistema de aquecimento constante (Figura 6). No item (4), está o *Bluetooth* HC-05; utilizado para transmitir os dados via *smartphone*. No item (5), está a fonte de alimentação de todo o sistema utilizado, fornecendo 10 V e até 10 A.

Figura 12 – Sistema de controle e *datalogger* instalados próximo a planta analisada.



Fonte: elaborado pelo autor.

3.7 Isolamento térmico nas sondas

A Figura 13 apresenta o processo de isolamento térmico nas sondas. Necessário para diminuir a influência da radiação solar e variações bruscas da temperatura ambiente.

Figura 13 – Isolamento térmico. A) encaixe do isopor. B) fechamento da caixa. C) isolamento com papel alumínio.



Fonte: elaborado pelo autor.

Uma caixa de isopor foi cortada de forma a encaixar no caule (Figura 13A) e para fechar a caixa foi utilizado uma tampa feita com folha de isopor (Figura 13B); este isolamento mantém a temperatura dentro da caixa mais estável se comparado ao ambiente externo à caixa.

Para reduzir o efeito da radiação, a caixa de isopor foi envolvida em papel alumínio (Figura 13C), para impedir que grande parte do calor chegue, por radiação, do ambiente até o interior da caixa, diminuindo o efeito do gradiente térmico natural.

O isolamento envolveu, além das sondas inseridas no caule, a sonda responsável por medir a temperatura do ar. Este procedimento contribui para a estabilidade na medição da temperatura, evitando as mudanças por rajadas de vento ou incidência de radiação solar.

3.8 Estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) por Penman-Monteith

O modelo matemático completo de Penman-Monteith para estimativa das necessidades hídricas das plantas pode ser encontrado em Allen et al. (1998), sendo a equação básica da evapotranspiração de referência horária (ET_o) dada por:

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{37}{T_{hr} + 273} u_2 (e^o(T_{hr}) - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (17)$$

Onde,

ET_o = evapotranspiração de referência (mm h⁻¹);

R_n = radiação líquida na superfície da grama (MJ m⁻² h⁻¹);

G = densidade do fluxo de calor no solo (MJ m⁻² h⁻¹);

T_{hr} = temperatura horária média (°C);

Δ = inclinação da curva da pressão de vapor versus temperatura a T_{hr} (kPa °C⁻¹);

γ = constante psicrométrica (kPa °C⁻¹);

e^o(T_{hr}) = pressão de vapor de saturação à temperatura do ar T_{hr} (kPa);

e_a = pressão de vapor real média horária (kPa);

u₂ = velocidade média do vento a cada hora (m s⁻¹).

Os elementos climáticos para estimativa dos parâmetros da equação de Penman-Monteith, podem ser calculados a partir de um conjunto de dados contendo temperatura máxima e mínima, pressão de vapor real ou atual, radiação líquida e velocidade do vento. Os dados foram obtidos da estação meteorológica do INMET, localizada em Fortaleza-CE (Figura 10). Com este conjunto de dados torna-se possível estimar as diversas variáveis, conforme as equações a seguir:

A constante psicrométrica é dada pela Equação 18, cuja variável meteorológica é pressão atmosférica, esta informação encontra-se disponível na base de dados do INMET.

$$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda} = 0,665 \times 10^{-3} P_{atm} \quad (18)$$

Onde,

P_{atm} = pressão atmosférica (kPa);

λ = calor latente de vaporização (2,45 MJ kg⁻¹);

c_p = calor específico a pressão constante ($1,013 \times 10^{-3} \text{ MJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$);
 ε = relação peso molecular do vapor de água / ar seco (0,662).

A pressão de vapor de saturação à temperatura do ar (Equação 19), a inclinação da curva da pressão de vapor versus temperatura (Equação 20), e a pressão de vapor real média horária (Equação 21) são calculadas a partir da temperatura média horária.

$$e^o(T_{hr}) = 0,6108 \exp \left[\frac{17,27 T_{hr}}{T_{hr} + 237,3} \right] \quad (19)$$

$$\Delta = \frac{4098 e^o(T_{hr})}{(T_{hr} + 237,3)^2} \quad (20)$$

$$e_a = e^o(T_{hr}) \frac{UR_{hr}}{100} \quad (21)$$

Onde,

e_a = pressão de vapor real média horária (kPa);

exp = base do logaritmo natural elevado à potência (número de Euler).

UR_{hr} = umidade relativa horária do ar (%).

A radiação líquida (R_n) é obtida diretamente do banco de dados do INMET. Contudo a densidade do fluxo de calor no solo (G), para cálculos de hora em hora (ou intervalos mais curtos), sob uma cobertura densa de grama não se correlaciona bem com temperatura do ar, conforme indicam Allen et al. (1998), no boletim 56 da FAO.

Para períodos por hora ou mais curtos G pode ser aproximado durante períodos de luz do dia como:

$$G = 0,1 R_n \quad (22)$$

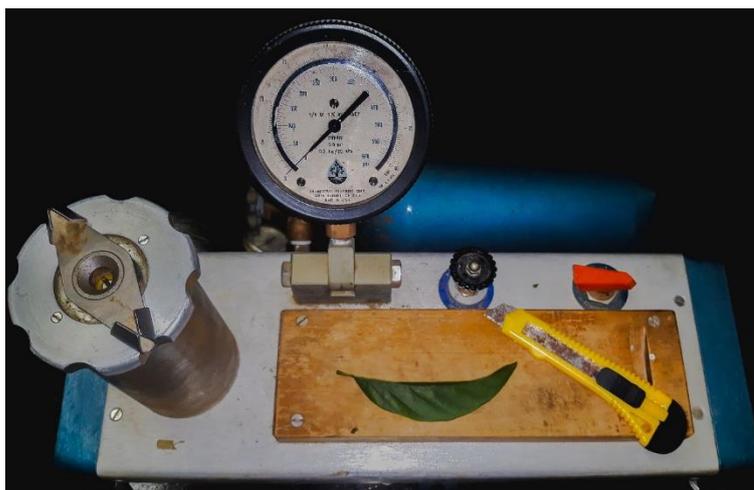
e durante períodos noturnos como:

$$G = 0,5 R_n \quad (23)$$

3.9 Potencial hídrico foliar

Para a determinação do potencial hídrico foliar utilizou-se uma bomba de pressão do tipo Scholander (Figura 14). Este instrumento pode medir o potencial de água dos tecidos da planta.

Figura 14 – Bomba de Scholander utilizada para aferir o potencial hídrico foliar.



Fonte: elaborado pelo autor.

As folhas foram cortadas na inserção do pecíolo com o ramo, colocadas rapidamente dentro da câmara selada, e em seguida o registro foi aberto e o gás pressurizado lentamente na câmara. No momento que a água sai do pecíolo da folha, o registro é fechado e verifica-se a pressão na qual a água estava retida nos tecidos foliares, sendo essa pressão correspondente ao potencial hídrico da planta no momento da leitura.

Por conta da necessidade de um alto número de amostras e a limitação do gás nitrogênio para realizar a aferição, foi utilizado apenas uma folha como amostra. Os critérios para a escolha das folhas foram: sanidade, integridade, folhas do mesmo tamanho.

Foram realizadas medidas a cada meia hora durante o início do dia (6 h às 10 h) e ao entardecer (16 h às 18 h), pois, nesse período as mudanças no potencial hídrico são mais acentuadas. No período de 10 h às 16 h foram realizadas aferições a cada hora.

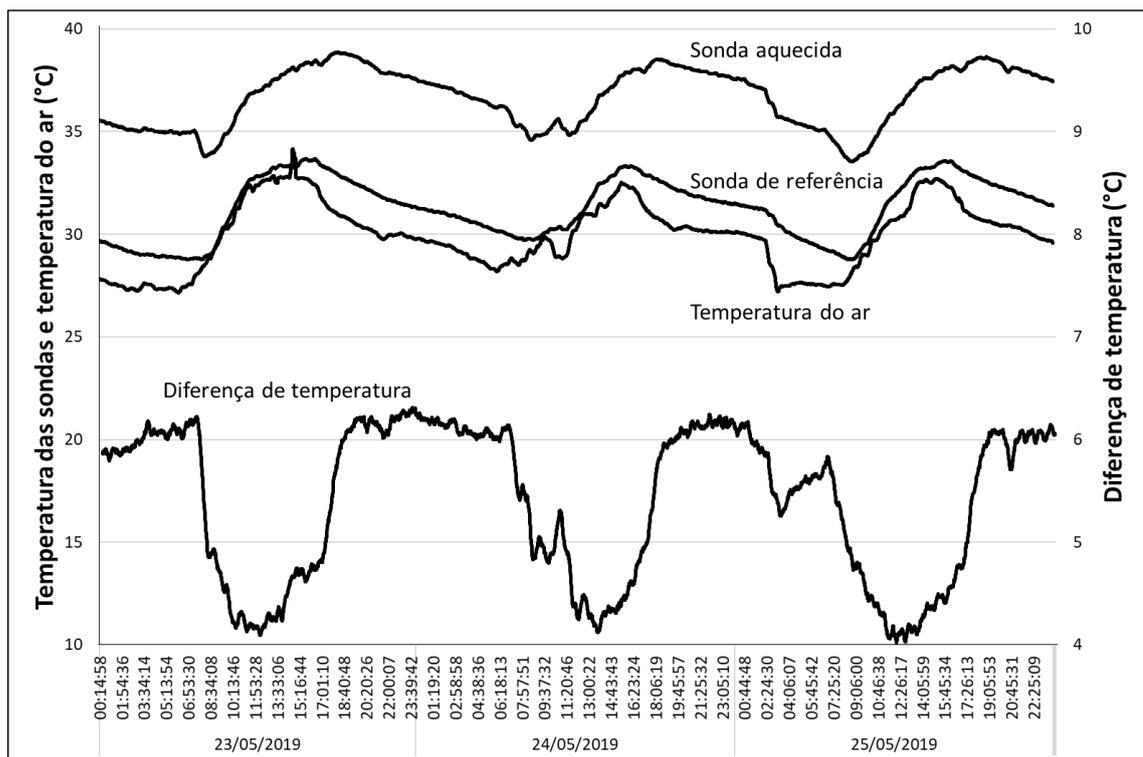
Durante o dia o potencial hídrico na folha está sob influência da transpiração. Deste modo o intuito de verificar o efeito da transpiração no potencial hídrico foliar foi de correlacionar com o índice de fluxo de seiva. Esta correlação é importante para constatar que a variação no índice está sendo ocasionada pelo fluxo de seiva, pois, o potencial hídrico foliar é uma variável intrínseca da planta estudada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Dados obtidos nas sondas térmicas e temperatura do ar

Na Figura 15, estão apresentados os comportamentos das curvas obtidos através dos valores de temperaturas nas sondas. É possível observar a curva de temperatura na sonda aquecida, na sonda de referência, no sensor de temperatura do ar e da diferença de temperatura entre a sonda aquecida e sonda de referência, no período de 23 a 25 de maio de 2019. Para construção do gráfico, foi realizado uma média móvel de 15 valores de temperatura nas sondas (equivalente a 15 min), a fim de diminuir o ruído ocasionado pela própria variação nos sensores.

Figura 15 - Comportamentos das temperaturas das sondas, da temperatura do ar e da diferença de temperatura entre as sondas.



Fonte: elaborado pelo autor.

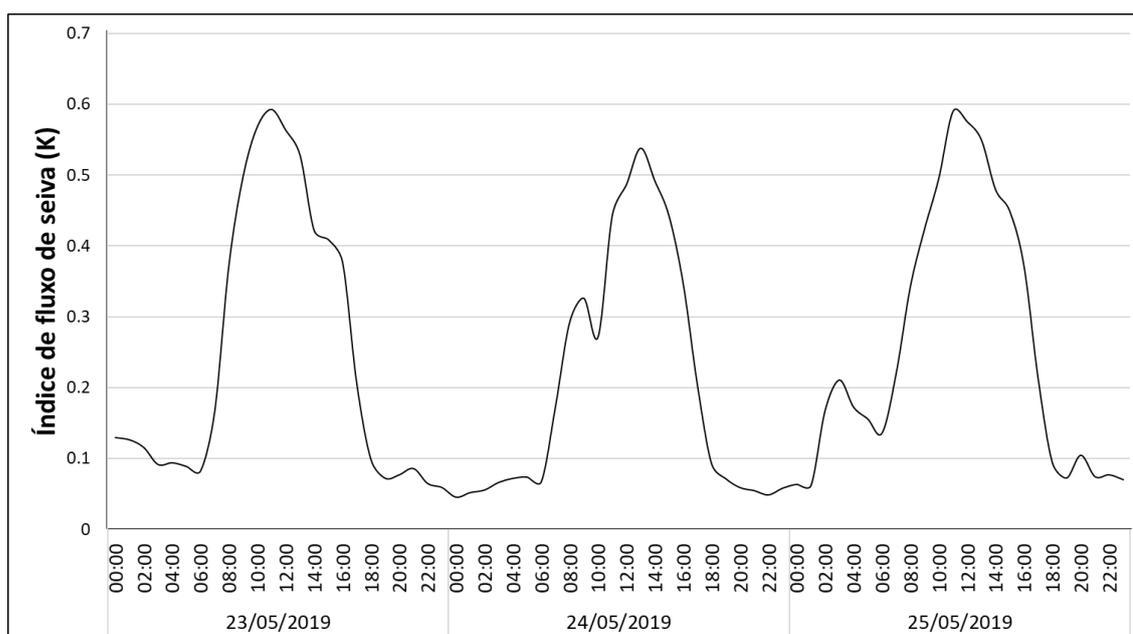
O comportamento da temperatura nas sondas é semelhante ao da temperatura do ar, ou seja, quando a temperatura do ar aumenta, a temperatura nas sondas também aumenta, o mesmo comportamento acontece quando a temperatura do ar diminui. É possível observar que a temperatura na sonda aquecida é sempre superior às outras temperaturas, devido a potência elétrica que está sendo dissipada na agulha.

Embora os valores de temperatura na sonda de referência e ar sejam próximos, a curva dos valores na sonda de referência apresentou valores superiores à temperatura do ar. No dia 23 às 14 h e 51 min a temperatura do ar foi maior do que a temperatura na sonda de referência, isto pode ter acontecido devido a um erro no sensor de temperatura.

Foram observadas as maiores diferenças de temperatura entre a sonda aquecida e sonda de referência no período noturno e as menores no período diurno (Figura 15). As máximas foram de 6,32 °C, 5,50 °C e 6,17 °C nos dias 23, 24 e 25, respectivamente. Pimentel et al. (2010), trabalhando com cafeeiro em Planalto de Garanhuns, na mesorregião do Agreste Pernambucano, encontraram diferença máxima de 2,4 °C e Karasawa (2006) avaliando a cultivar Obatã IAC 1669-20 com 3 anos, em Piracicaba, obteve diferença de até 10 °C entre sensores.

O índice de fluxo de seiva (Figura 16) foi calculado através da Equação 15. No dia 23, o índice apresentou valores crescentes a partir das 6 h, com seu valor máximo de 0,592 às 11 h e decresceu até o fim do dia. No dia 24, semelhante ao dia anterior, o índice apresentou valores crescentes a partir das 6 h, no entanto, o valor máximo foi de 0,538 às 13 h e decresceu até o fim do dia, e nesse mesmo dia foi verificado um vale às 10 h. Durante a madrugada do dia 25, foi verificado um pico às 4 h e o seu valor máximo foi de 0,575 às 12 h. O vale no dia 24 e o pico na madrugada do dia 25 será explicado na seção 4.3.

Figura 16 – Índice de fluxo de seiva (K) durante os dias 23, 24 e 25 de maio.



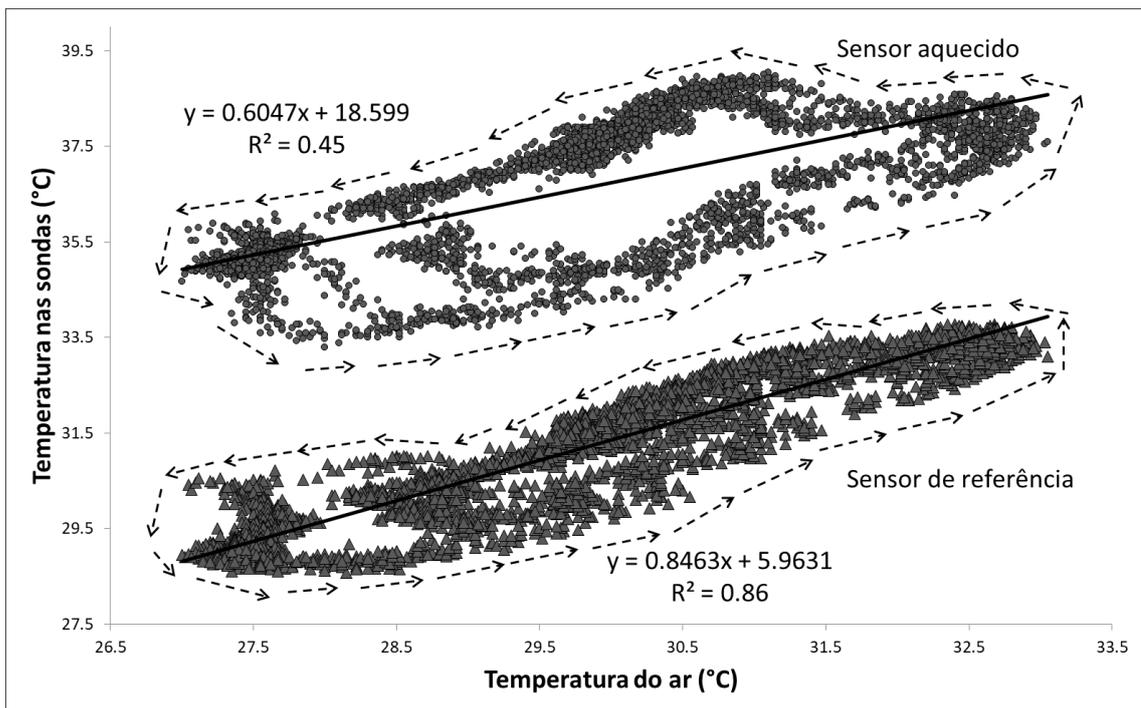
Fonte: elaborado pelo autor.

4.2 Influência da temperatura do ar na sonda aquecida e de referência

Vellame et al. (2011), verificaram uma forte correlação entre a temperatura do ar e as estimativas de gradiente térmico natural, concluindo que a temperatura do ar a 2 m de altura pode ser utilizada para correções desse gradiente. Para verificar a influência da temperatura do ar nas sondas inseridas no caule, foi realizado uma correlação entre os dados no período de 3 dias.

A influência da temperatura do ar nas sondas pode ser verificada na Figura 17. O coeficiente de determinação (R^2) para a temperatura na sonda aquecida e sonda de referência foi de 0,45 e 0,86 respectivamente. Apesar de a baixa correlação na sonda aquecida e alta correlação na sonda de referência, foi verificado um comportamento de histerese nos dados de ambas as sondas.

Figura 17 – Influência da temperatura do ar nas sondas inseridas no caule.

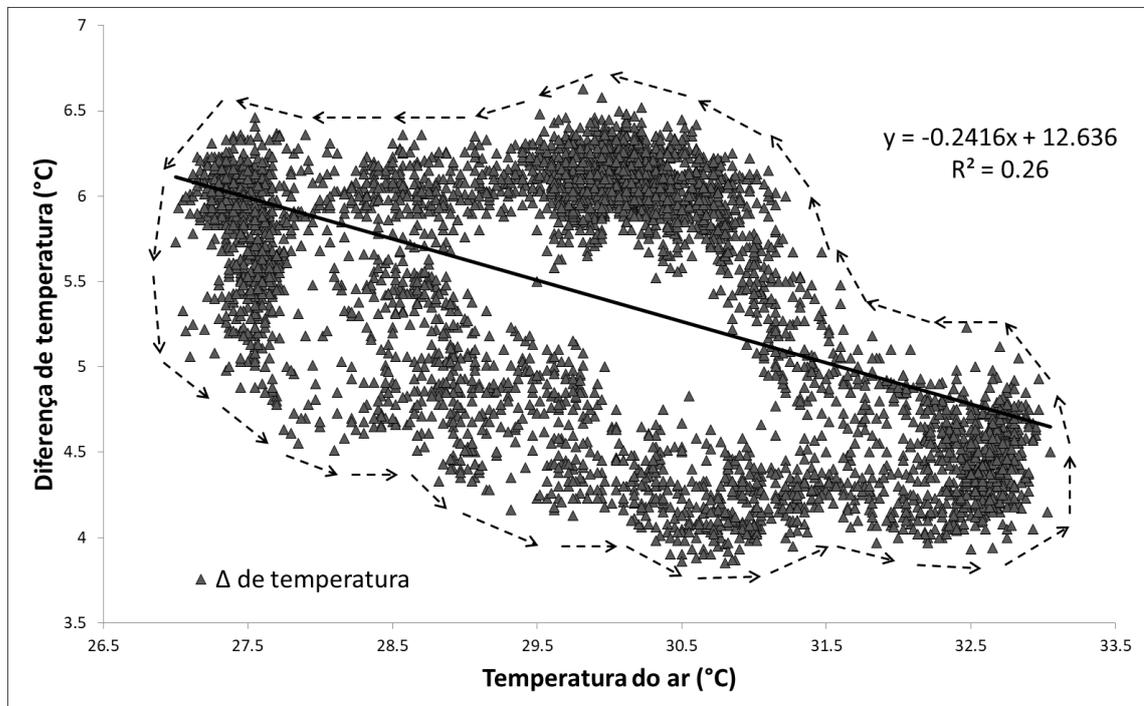


Fonte: elaborado pelo autor.

A histerese foi mais evidente na sonda aquecida sendo possível verificar que os dados apresentam uma tendência acima da reta e outra tendência abaixo da reta. Na sonda de referência, de forma sutil, também é possível visualizar um adensamento de pontos acima da linha de tendência e outro abaixo da mesma linha.

Na sonda aquecida, a histerese se torna mais evidente, pois nela está sendo aplicada uma potência elétrica constante. No momento do aquecimento, a curva gerada pelo aumento de temperatura apresenta um comportamento diferente da curva gerada pelo resfriamento da sonda. Na sonda de referência este fenômeno não é tão evidente, pois nela não está sendo aplicada potência elétrica. Nas figuras 17 e 18, através das setas, acompanha-se o trajeto de aquecimento e resfriamento nas sondas e da diferença de temperatura, ocasionada pela histerese presente no sistema.

Figura 18 - Influência da temperatura do ar na diferença de temperatura entre as sondas inseridas no caule.



Fonte: elaborado pelo autor.

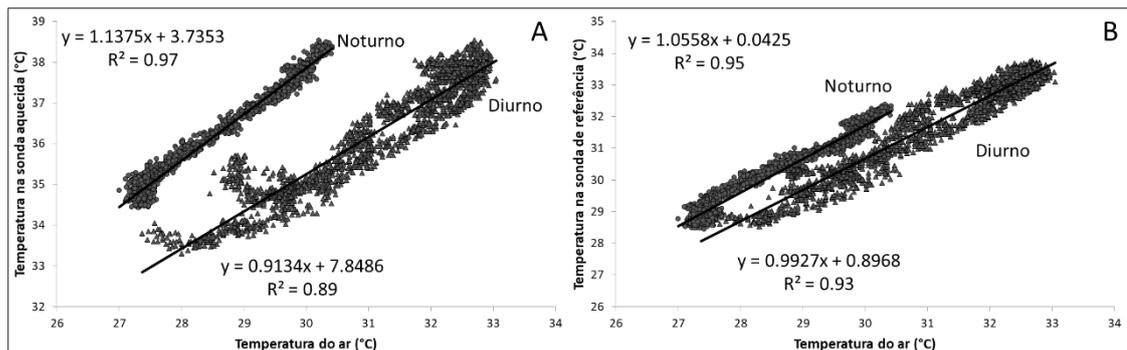
Quando avaliada a influência da temperatura do ar na diferença de temperatura nas sondas, também foi observado a presença de histerese (Figura 18). O coeficiente de determinação (R^2) foi de apenas 0,26. A linha de tendência que apresentou melhor ajuste foi uma reta, ainda que seja visível a formação de duas parábolas, côncava acima da reta e convexa abaixo da reta.

Para avaliar a influência da temperatura do ar nas sondas com a máxima redução do efeito de histerese, adotaram-se os seguintes procedimentos: os dados de três dias foram divididos entre o período diurno (8 h às 16 h) e noturno (20 h às 4 h), eliminando 2 h antes e depois do amanhecer e do anoitecer. O motivo para escolha desses horários foi buscar a maior

uniformidade dos dados, pois, nas horas excluídas a temperatura nas sondas são alteradas rapidamente pelo fluxo de seiva, que aumenta rapidamente nas primeiras horas do dia e decresce também rapidamente nas últimas horas do dia e início da noite. Assim, buscou-se avaliar somente o efeito da temperatura do ar, sem mudanças bruscas na variação do fluxo de seiva.

Ao analisar os coeficientes de determinação (R^2) na análise de regressão entre a temperatura do ar e temperatura na sonda aquecida, foi constatado uma leve redução no período diurno em comparação com o período noturno (Figura 19A). Os coeficientes foram 0,89 e 0,97 respectivamente. Apesar dessa pequena redução, ainda há uma forte correlação entre as temperaturas do ar e sonda aquecida nos dois períodos analisados.

Figura 19 – Influência da temperatura do ar na temperatura nas sondas. A) sonda de referência vs. temperatura do ar. B) sonda aquecida vs. temperatura do ar.



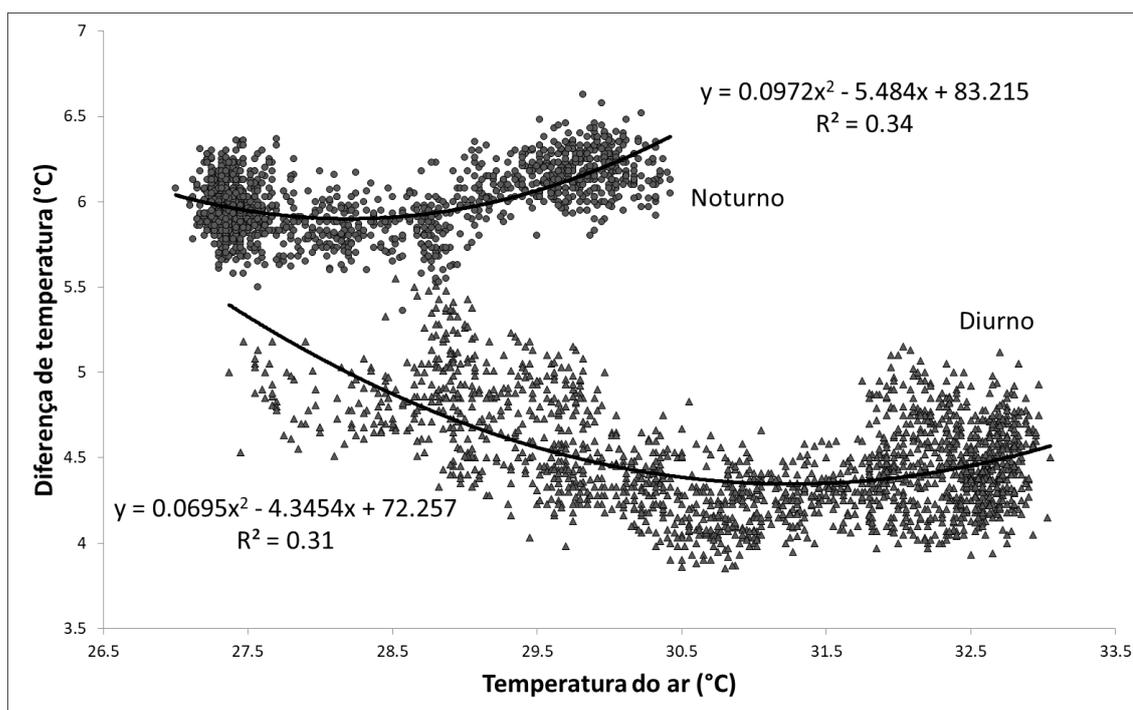
Fonte: elaborado pelo autor.

Os coeficientes de determinação (R^2) na análise de regressão entre temperatura do ar e temperatura na sonda de referência no período diurno e noturno (Figura 19B) foram de 0,93 e 0,95, respectivamente, que caracteriza um alto índice, indicando que a temperatura do ar possui forte influência sobre a temperatura no interior do caule da planta analisada.

Comparando o comportamento dos dados na Figura 17 com os da Figura 19, é possível perceber que as duas retas geradas na Figura 19 são oriundas das tendências de dados acima e abaixo da reta estimada na Figura 17. Na Figura (19A), é notável a ausência de dados no período noturno para intervalo acima de 31°C do eixo horizontal, os dados ausentes correspondem àqueles retirados para realizar esta correlação sem influência da histerese. Na Figura 19B, a percepção da ausência dos dados retirados é mais sutil.

A influência da temperatura do ar na diferença de temperatura, durante o mesmo período analisado, categorizadas entre período diurno (8 h às 16 h) e noturno (20 h às 4 h), pode ser observada na Figura 20.

Figura 20 – Influência da temperatura do ar na diferença de temperatura, no período diurno e noturno.



Fonte: elaborado pelo autor.

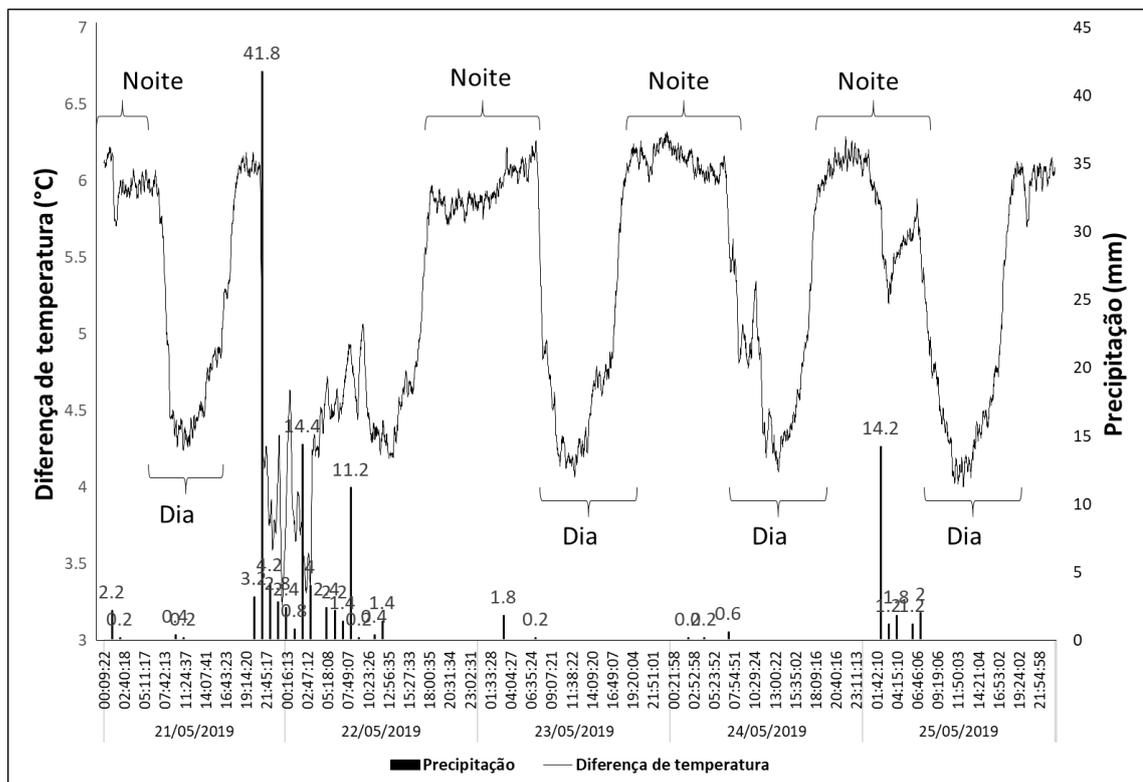
Embora os coeficientes de determinação (R^2), obtidos entre a temperatura nas sondas térmicas com a temperatura do ar, tenham sido altos, a correlação entre a diferença de temperatura nas sondas térmicas e a temperatura do ar foi baixa. No período diurno e noturno, os coeficientes foram 0,31 e 0,34, respectivamente. Estes coeficientes indicam que há pouca interferência da temperatura do ar nas variações de temperaturas das sondas. Diferente das curvas observadas na Figura 19, que possui curvas lineares, a curva que melhor explica o comportamento dos dados é uma parábola convexa.

Os coeficientes de determinação para as temperaturas da sonda aquecida e referência vs. temperatura do ar, organizadas em períodos diurno e noturno (Figura 19), apresentaram valores superiores aos coeficientes obtidos sob efeito da histerese (Figura 17). Apesar de o coeficiente da diferença de temperatura vs. temperatura do ar, organizada em períodos (Figura 20), também tenha alcançado um valor superior ao calculado com histerese (Figura 18), seu valor ainda é considerado baixo.

4.3 Interferência da chuva na temperatura mensuradas pelas sondas

Durante o andamento da coleta de dados, foi observado um comportamento anormal na temperatura das sondas durante o período em que ocorreram precipitações. Na Figura 21, encontra-se no eixo vertical primário (a esquerda) a diferença de temperatura (°C) entre a sonda aquecida e sonda de referência, no eixo vertical secundário (a direita) tem-se a precipitação (mm). No eixo horizontal, encontra-se o período analisado (data e hora) que correspondeu das 0h do dia 21/05/2019 às 22 h do 25/05/2019.

Figura 21 – Diferença de temperatura, entre a sonda aquecida e sonda de referência, e ocorrência de precipitação durante o período analisado, evidenciando as anormalidades no comportamento dos dados ocasionado pela chuva.



Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 21 apresenta os turnos dia e noite bem definidos, isto ocorreu devido ao delta de temperatura que apresentou valores maiores durante a noite do que durante o dia. No entanto, podem-se destacar, na Figura 21, três períodos no qual na noite o delta de temperatura reduziu-se, ocasionando anomalias no comportamento da diferença de temperatura.

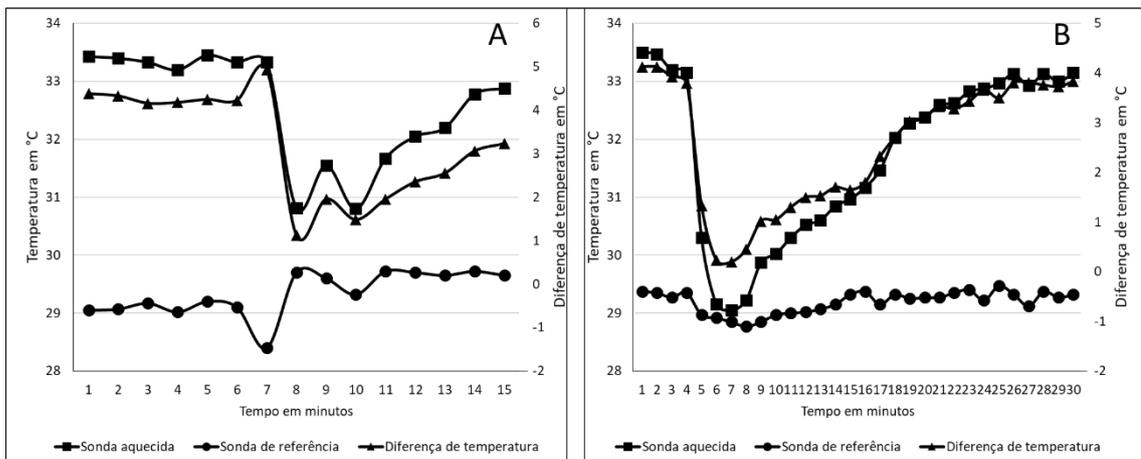
A primeira anomalia foi observada entre 1 h e 2 h na madrugada do dia 21, no qual a diferença de temperatura passou de 6 °C para 5,7 °C, sendo que no mesmo período ocorreu uma precipitação de 2,4 mm.

A segunda anomalia foi observada no entorno das 20 h do dia 21 e 13 h do dia 22. Nesse intervalo de tempo ocorreu uma chuva de 92,8 mm (soma das precipitações horárias). A redução máxima na diferença de temperatura ocorreu entre as 20 h e 3 h, entre os dias 21 e 22, em que o delta de temperatura passou de 6 °C para até 3,2 °C, coincidindo com a maior precipitação horária (41,8 mm) que ocorreu durante esta segunda anomalia. Neste evento foi constatada a interferência da chuva na variação de temperatura das sondas.

A terceira anomalia foi observada entre as 2 h e 7 h do dia 25, em que a diferença de temperatura foi de 6 °C para 5,2 °C. Neste período choveu 18,4 mm e a precipitação máxima (14,2 mm) ocorreu às 2 h, coincidindo com o ponto de maior redução na diferença de temperatura. Outras chuvas menores ocorreram durante o período analisado, no entanto, não foi possível a detecção de anomalias nesses eventos de menores intensidades de precipitação.

Artificialmente foi simulada uma chuva para escoar água pelo caule, a fim de constatar este fenômeno (Figura 22A). Aos 7 min o caule foi molhado, provocando a passagem de água pelos sensores de forma intencional. A temperatura na sonda de referência não foi alterada, embora aos 7 min e aos 8 min tenha sido observado pequenas oscilações nos valores. Porém, a temperatura na sonda aquecida foi de 33,33 °C (diferença igual a 4,93 °C) para 30,82 °C (diferença igual a 1,12 °C). Em termos de diferença de temperatura, essa redução foi de 3,81 °C, uma redução considerada alta para essa escala no qual o dado está inserido.

Figura 22 - Decréscimo de temperatura na sonda aquecida ocasionada pela água.



Fonte: elaborado pelo autor.

Na Figura (22B), foi realizado um segundo teste e novamente a temperatura na sonda de referência se manteve constante, enquanto na sonda aquecida houve brusca redução. Diferente do primeiro teste, não houve oscilação de temperatura na sonda fria. A temperatura na sonda quente estava em 33,5 °C, antes da adição de água, e foi reduzida para 29 °C ocasionando uma redução de 4,5 °C e um delta de temperatura de 0,2 °C, em apenas 5 min. Pode-se considerar que a água eliminou o efeito do aquecimento na sonda durante este período. A temperatura na sonda aquecida foi restabelecida aos 18 min após atingir seu valor mínimo, totalizando 23 min de dados alterados em função da adição de água.

A princípio foi levantado a hipótese de que as anomalias estariam ocorrendo devido à resposta de algum fator fisiológico da planta à mudança das condições climáticas. No entanto, com base nas observações da Figura 22, foi constatado que a água da chuva ao escorrer pelo segmento de caule, na qual as sondas estavam instaladas, estava ocasionando este problema.

Foi descartada a hipótese da resposta fisiológica e levantadas outras duas hipóteses de resposta física. A primeira considera que a água, ao passar pela sonda aquecida, resfria a temperatura da sonda. A segunda considera que o efeito da água, além de contribuir para o resfriamento da sonda, também fecha contato entre as espiras da resistência envolvida na agulha. Através da condução de elétrons por um caminho mais curto, isso faz com que a resistência equivalente seja proporcional ao comprimento de fio de constantan quando em contato com ele mesmo. A resistência equivalente resultaria em um valor pequeno ou próximo a zero.

Ambas as hipóteses apresentam como resultado a eliminação do efeito da resistência no aquecimento da sonda, fazendo com que a temperatura na sonda aquecida fosse igual à temperatura na sonda de referência, como observado na Figura 22.

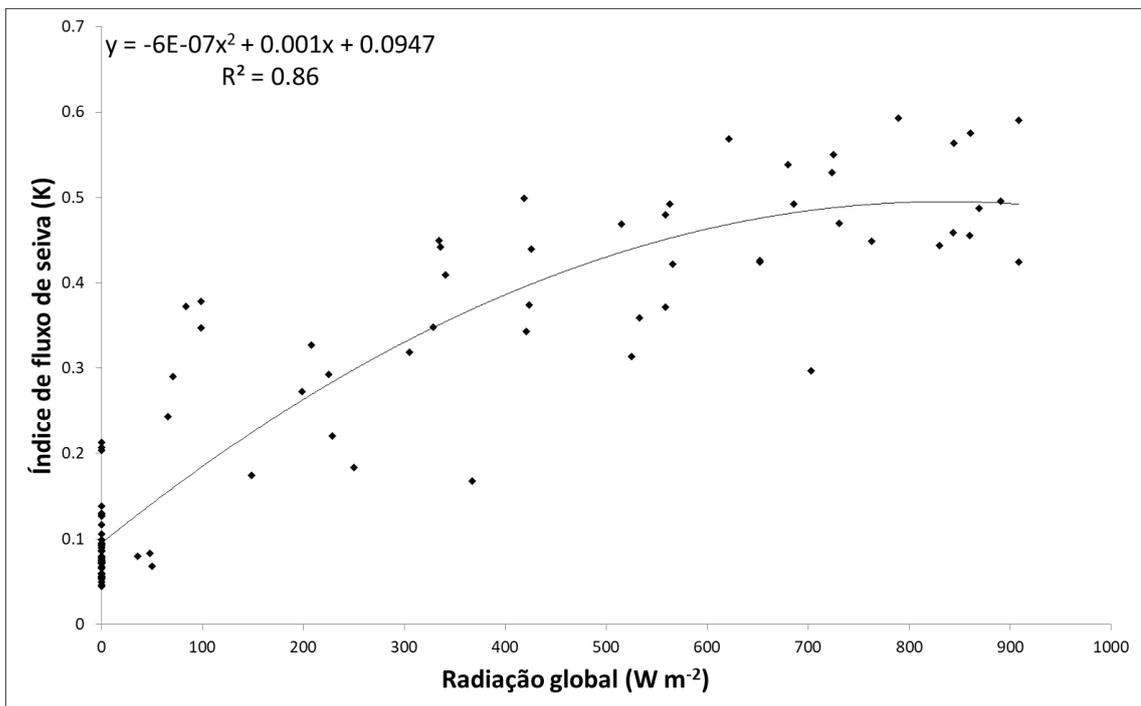
4.4 Influência da radiação global no índice de fluxo de seiva

O fluxo de seiva não é dependente somente da quantidade de água armazenada no solo, sendo influenciado também por fatores meteorológicos como temperatura do ar, déficit de pressão de vapor e radiação solar global. Desta forma, o fluxo de seiva reage diferentemente com as mudanças nesses fatores meteorológicos e na quantidade de água no solo (FENG et al., 2017).

A Figura 23, mostra a relação entre os valores do índice de fluxo de seiva (K) com os valores de radiação solar global durante cinco dias. É importante ressaltar que a planta (*Annona squamosa*), onde as sondas estavam instaladas, possui raízes profundas e que durante os cinco dias a planta possivelmente não passou por déficit hídrico devido às chuvas que

ocorreram. O coeficiente de determinação (R^2) na análise de regressão entre Radiação global e índice K sem correção de GTN, durante o período analisado, foi de 0,86, demonstrando uma forte influência da radiação global no índice K. Vellame (2011) encontrou valores de coeficientes de determinação (R^2) entre o fluxo de seiva e radiação global igual a 0,779, para fluxo de seiva com correções de GNT e 0,756 para fluxo de seiva não corrigidos pelo GTN.

Figura 23 – Influência da radiação global ($W m^{-2}$) no índice de fluxo de seiva (K, adimensional).

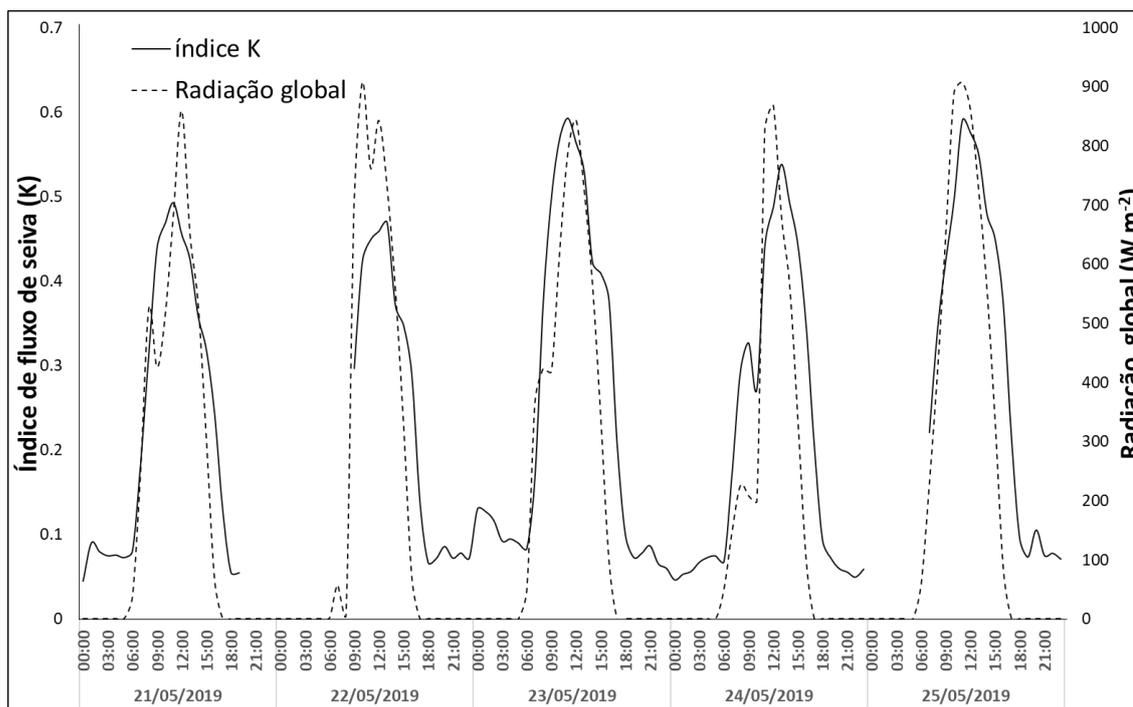


Fonte: elaborado pelo autor.

Segundo Medeiros (2002), a radiação fornece energia para vaporização e remoção de água na folha, configurando-se assim como a principal força motriz para transferir a água armazenada no solo, através da planta.

A Figura 24 apresenta o comportamento do índice K e da radiação solar global no período de 21 a 25 de maio de 2019. Na curva que representa o comportamento do índice K, foram retirados os dados que correspondem aos intervalos de 20 h às 8 h entre os dias 21 e 22 e de 0 h às 6 h do dia 25. Nesse período ocorreram precipitações que ocasionaram ruídos nos dados.

Figura 24 – Comportamento da radiação solar global e índice K horário.



Fonte: elaborado pelo autor.

O comportamento da curva de índice K é muito semelhante ao comportamento da radiação global nas primeiras e últimas horas do dia. No início do dia, quando a demanda evaporativa aumenta em termos de saldo de radiação e das diferenças entre a pressão de vapor nas folhas e no ar, a planta responde aumentando a transpiração. O comportamento oposto é observado ao final do dia.

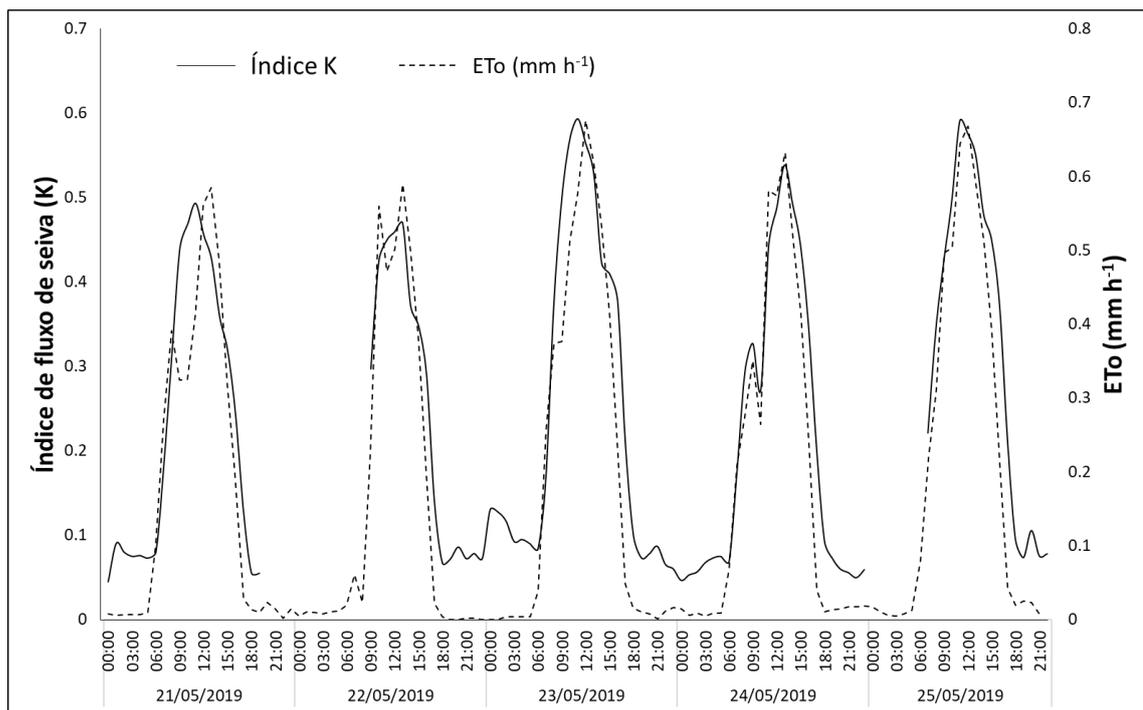
Um ponto a se destacar na Figura 24 encontra-se no dia 24 às 10 h, especialmente nesse momento a radiação global apresentou uma redução, devida a nebulosidade que aconteceu naquele período, o índice K apresentou o mesmo comportamento de redução, indicando que o fluxo de seiva pode ter apresentado uma pequena redução.

Alguns autores observaram uma defasagem do fluxo de seiva em relação à radiação solar em condições de sombreamento ao estudar o curso do fluxo de seiva com outras culturas (Delgado-Rojas et al., 2007; Fraga Junior, 2017; Clearwater et al., 1999; Zhang et al., 2011; Wullschleger et al., 1998; Reis et al., 2009; Vellame et al., 2009) e indicam que nas primeiras horas da manhã ocorre transpiração da água armazenada nos tecidos vegetais, aumentando o gradiente de potencial de água no interior da planta, o que provoca fluxo de seiva. Ao fim do dia, quando a transpiração e a radiação solar tendem a cessar, ainda há fluxo de seiva no caule até que haja reposição de água perdida durante o dia nos tecidos vegetais.

4.5 Relação entre evapotranspiração de referência (ETo) e índice de fluxo de seiva

A Figura 25 apresenta o comportamento dos valores de índice de fluxo (K) e evapotranspiração de referência (ETo) estimada para Fortaleza, CE. Foi verificado que a variação no comportamento do índice K acompanhou, de forma similar, a variação na ETo. Granier (1985), Delgado-Rojas et al. (2007) e Silva (2008) encontraram em seus resultados uma defasagem temporal com relação à taxa de evapotranspiração de referência. Na Figura 25 esta defasagem, embora existente, é pouco perceptível, isso pode ter ocorrido devido a distância entre a planta analisada e a estação meteorológica do INMET. Segundo Silva (2003), tal defasagem é esperada, pois, de fato, a taxa de fluxo de seiva não acompanha, no tempo real, exatamente a demanda atmosférica, devido à resistência hidráulica encontrada nas plantas.

Figura 25 – Variação horária do índice de fluxo de seiva e da estimativa da evapotranspiração de referência (mm h^{-1}).



Fonte: elaborado pelo autor.

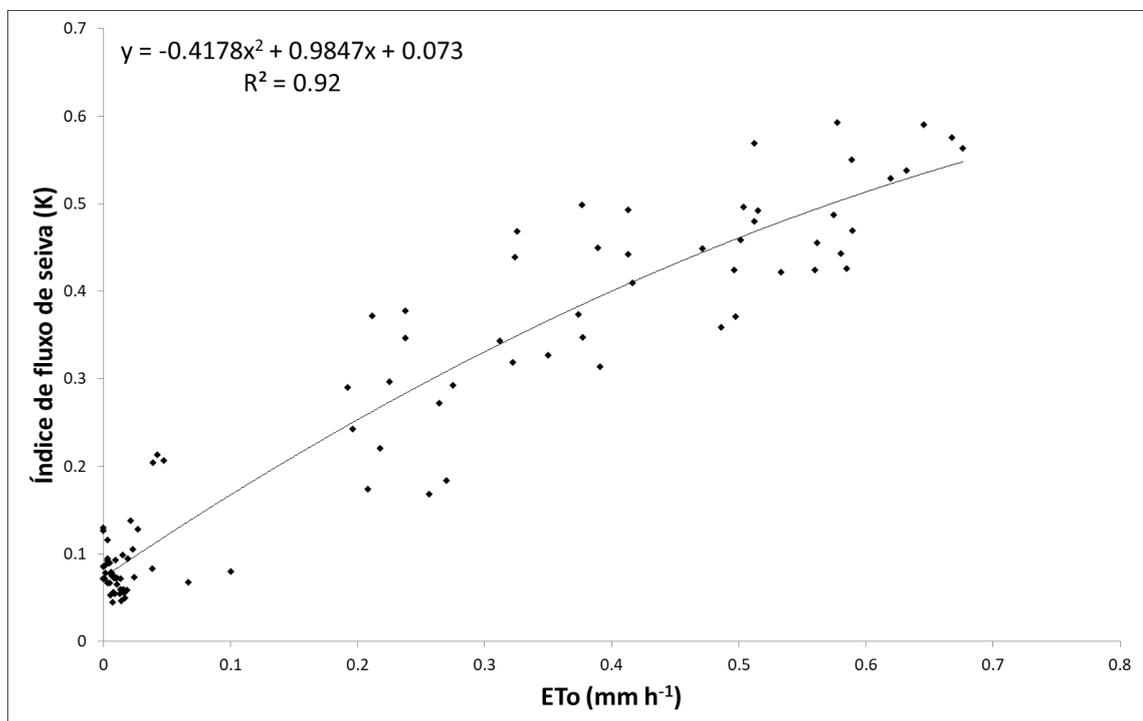
Os dias 23, 24 e 25 apresentaram o comportamento dos valores de índice K mais semelhantes com os valores de ETo. Embora nos dias 21 e 22 as semelhanças também sejam altas, ocorreram eventos de precipitação que podem ter contribuído para as pequenas defasagens observadas nesse período. Semelhante ao que foi observado na seção 4.4, no dia 24 às 10 h, as sondas foram sensíveis para detectar uma redução da ETo durante este intervalo.

Durante a madrugada é possível perceber mudanças na curva do índice K, entre 23 h e 0h, isto é esperado devido ao ΔT_{max} às 0h ser referente ao novo dia. Antes disso é referente ao dia anterior, podendo haver essas pequenas descontinuidades na mudança dos dias.

Ainda em relação a seção 4.4, nos dias 21 e 22 foram observados uma maior defasagem entre a radiação global e o índice K (Figura 24), enquanto na Figura 25, esta distância é reduzida minimamente, fazendo com que a curva de valores do índice K e ETo obtenham aproximadamente a mesma amplitude.

A correlação entre as estimavas de índice de fluxo de seiva medida pelas sondas de dissipação térmica e a evapotranspiração (ETo) pode ser verificada com a relação entre os seus respectivos valores médios horários. A relação foi significativa a 1% de probabilidade com coeficientes de determinação (R^2) iguais a 0,92 (Figura 26). Silva (2008), usando sondas de dissipação térmica, encontrou valores de $R^2=0,82$ e $R^2=0,86$ para dois sensores instalados em exemplares de café arábica.

Figura 26 – Relação da evapotranspiração de referência (mm h^{-1}) com o índice de fluxo de seiva (K, adimensional).



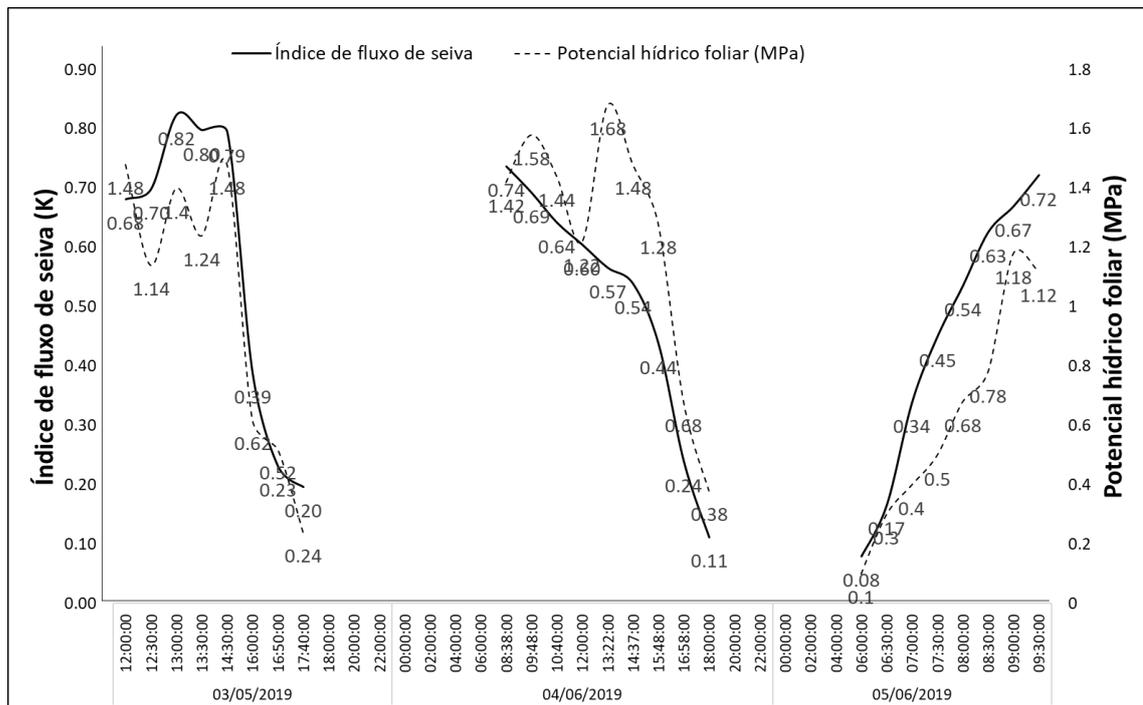
Fonte: elaborado pelo autor.

Silva (2003) constatou que, em cafeeiro, foi possível obter boa correlação (0,94) entre o fluxo de seiva xilemática e a evapotranspiração de referência. LU et al. (2002), obtiveram em bananeira, um $R^2=0,90$ entre fluxo de seiva e evapotranspiração de referência.

4.6 Relação entre potencial hídrico foliar e índice de fluxo de seiva

A Figura 27 apresenta o comportamento dos valores de índice de fluxo de seiva e o valor, em módulo, do potencial hídrico foliar (MPa). Os dados no dia 3 e 4 de junho tem início às 12 h e 9 h, respectivamente, e ambos terminam às 18 h. Os dados no dia 5 de junho têm início às 6 h e terminam às 10 h.

Figura 27 – Comportamento do índice de fluxo de seiva e potencial hídrico foliar.



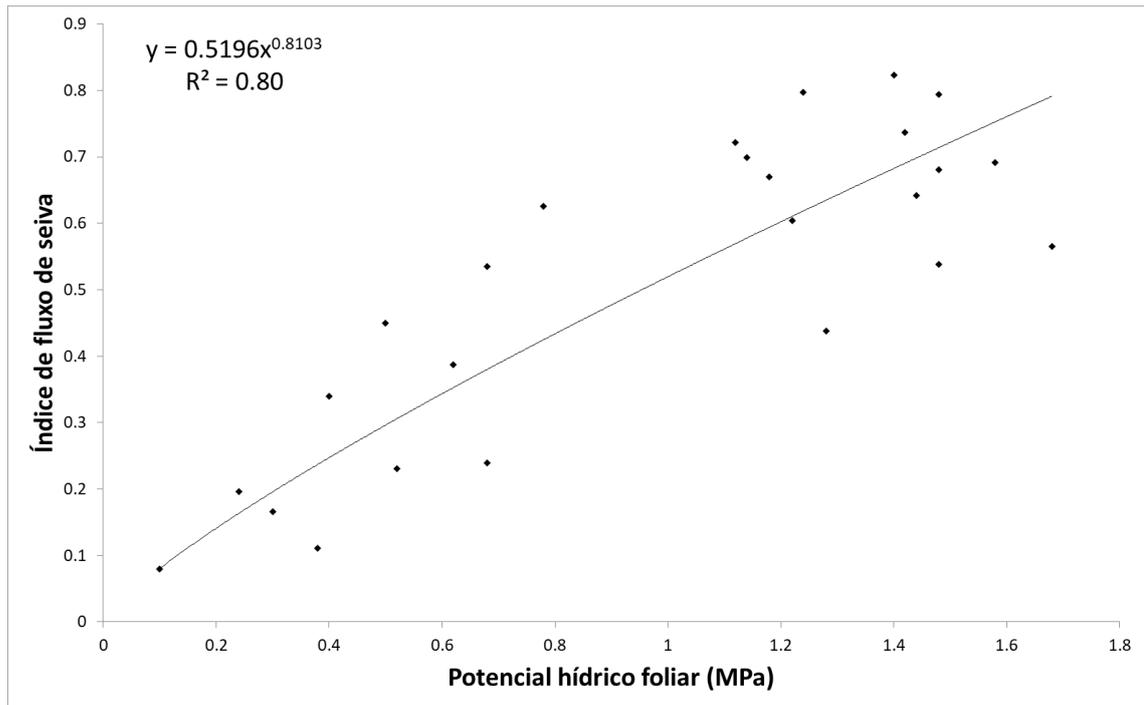
Fonte: elaborado pelo autor.

É possível observar que no início do dia e ao entardecer os valores apresentam maiores semelhanças, no entanto, nas horas mais quentes entre 10 h e 16 h os valores apresentam divergências. No dia 3, o potencial hídrico foliar reduziu a -1,48 MPa às 12 h e às 14 h 30 min, o valor máximo foi de -0,24 MPa às 18 h. No dia 4, o valor mínimo foi de -1,68 MPa às 13h e o valor máximo foi de -0,38 MPa às 18h. No dia 5, o valor mínimo foi -1,18 MPa às 9 h 30 min e o valor máximo foi -0,1 MPa às 6 h, nesse dia foram feitas aferições somente até às 10 h.

Ao amanhecer, no dia 5, o potencial hídrico foliar foi -0,1 MPa, superior aos valores obtidos ao final dos dias anterior. Sugerindo que a planta repõe água após o anoitecer. Naves-Barbiero (2000) encontrou resultados semelhantes, no entanto, mais repetições são necessárias para afirmar este comportamento para este experimento.

A correlação entre o índice de fluxo de seiva medida pelas sondas de dissipação térmica e potencial hídrico foliar pode ser verificada com a relação entre os seus respectivos valores médios horários. A relação foi significativa a 1% de probabilidade com coeficientes de determinação (R^2) iguais a 0,80 (Figura 28).

Figura 28 – Relação entre o índice de fluxo de seiva e potencial hídrico foliar.



Fonte: elaborado pelo autor.

Vale esclarecer que nesse trabalho, apesar de denotar coerências nos resultados, teve duas principais limitações: não foi realizada a calibração da sonda térmica, por isso não foram determinados os coeficientes α e β , necessários para equação de estimativa do fluxo de seiva (Equação 11) e a falta da determinação da área condutora da seiva.

No entanto, observando os resultados nas seções 4.4, 4.5 e 4.6, é demonstrado que, solucionando essas duas limitações, o método pode ser utilizado confiavelmente. Pois, a resposta à demanda atmosférica e a concordância dos valores independentes dos sensores na árvore indicam que o índice de fluxo pode ser utilizado como um indicador do comportamento hídrico em plantas.

5 CONCLUSÕES

- I. Foi possível realizar a construção das sondas de dissipação térmicas e sonda de temperatura do ar;
- II. O *hardware* e *software* desenvolvido foi capaz de coletar, armazenar e transmitir os dados das sondas de dissipação térmicas e sonda de temperatura do ar com excelente performance;
- III. A partir de dados dos sensores térmicos, foi possível identificar a variação de temperatura entre a sonda aquecida e de referência e, através desses dados, estimar o índice de fluxo de seiva.
- IV. A temperatura do ar exerce pouca influência na diferença de temperatura das sondas e, por consequência, no índice de fluxo de seiva.
- V. A água ao escoar através das sondas, elimina o efeito de aquecimento na sonda superior, ocasionando em diferenças de temperatura pequena e impossibilitando a obtenção do índice de fluxo de seiva.
- VI. A relação do índice de fluxo de seiva com a radiação global, a evapotranspiração de referência e o potencial hídrico foliar possuem uma alta correlação.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Desta forma, para melhorar a precisão do método e estimar o fluxo de seiva, as sugestões para trabalhos posteriores, são:

- I. Melhorar o design da sonda de dissipação térmica, com a finalidade de aumentar a sensibilidade às variações de temperatura no caule;
- II. Utilizar sonda não aquecida para determinar o gradiente térmico natural e fazer as cabíveis correções no índice de fluxo de seiva;
- III. Desenvolver um método para eliminar o efeito da água, ao escoar pelas sondas.
- IV. Determinar a área efetiva da secção de condução de seiva no xilema, para estimar o fluxo de seiva;
- V. Construir um equipamento para a calibração de sonda de dissipação térmica, segundo o esquema apresentado por Delgado-Rojas (2003);
- VI. Utilizar lisímetro de pesagem, para calibração de sonda de dissipação térmica na planta.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998.
- ALVES, T. B. C.; ALVES, G. H.; RIBEIRO, H. B.; MARTINS NETO, L. Verificação Termográfica da Distribuição da Corrente Elétrica no Linor de um Motor Linear. In: XIV CEEL - Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica. **Anais...** Universidade Federal de Uberlândia - UFU Uberlândia, Minas Gerais, 2016.
- ARAÚJO, M. C.; ESTEVES, B. S.; DE SOUSA, E. F. Método de dissipação térmica para determinação do fluxo de seiva em coqueiro anão-verde. **Bragantia**, Campinas, v. 71, n. 4, p. 558-562, 2012.
- BRASIL. Agência Nacional de Águas. **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada**. Brasília: ANA, 2017.
- CLEARWATER, M. J.; MEINZER, F. C.; ANDRADE, J. L.; GOLDSTEIN, G.; HOLBROOK, N. M. The potential errors in measurement of non-uniform sap flow using heat dissipation probes. **Tree Physiology**, Victoria, v. 19, n° 10, p. 681–687, 1999.
- CABIBEL, B.; DO, F.; HOROYAN, J. Mesures thermiques des flux de sève dans les troncs et les racines et fonctionnement hydrique des arbres. I. Analyse théorique des erreurs sur la mesure des flux et validation des mesures en présence de gradients thermiques extérieurs. **Agronomie**, Paris, v. 11, n. 8, p. 669-678, 1991.
- COELHO, R. D.; VELLAME, L. M.; FRAGA JÚNIOR, E. F. Estimation of transpiration of the 'Valencia' orange young plant using thermal dissipation probe method. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n° 3, p. 573-581, 2012.
- DE SOUZA, R. F. Caracterização do efeito seebeck em junções heterogêneas de óxido de cobre. Encontro Internacional de Produção Científica–VIII EPCC, **Anais...** Cesumar, Maringá-Paraná-Brasil, 2013.
- DELGADO-ROJAS, J. S. 2003. **Avaliação do uso do fluxo de seiva e da variação do diâmetro do caule e de ramos na determinação das condições hídricas de citrus, como base para o manejo de irrigação**. (Tese de doutorado). Piracicaba: USP/ESALQ, 2003. 110p.
- DELGADO-ROJAS, J.S.; KARASAWA, S.; ANGELOCCI, L.R. Determinación de la transpiración del café (*Coffea arabica* L.) através del método de sonda de disipación térmica. In: REUNIÓN ARGENTINA, 5., LATINOAMERICANA DE AGROMETEOROLOGIA, 9., 2004, La Plata. **Anais...** Buenos Aires: Asociación Argentina de Agrometeorología, 2004.
- DELGADO-ROJAS, J. S.; ANGELOCCI, L. R.; FOLEGATTI, M. V.; COELHO FILHO, M. A. Desempenho da sonda de dissipação térmica na medida da transpiração de plantas jovens de Lima Ácida. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n° 2, p. 404- 413, 2007.
- FENG, Y.; CUI, N.; DU, T.; GONG, D.; HU, X.; ZHAO, L. Response of sap flux and evapotranspiration to deficit irrigation of greenhouse pear-jujube trees in semi-arid northwest China. **Agricultural Water Management**, v. 194, p. 1-12, 2017.

FERREIRA, M. I; ZITSCHER, H. Measurements performed with Granier method in short trunks near the soil. In. Workshop on Measuring Sap Flow in Intact Plant, Barcelona, **Annals...** 3 p, 1996.

FIGUEIREDO, J. V. 2018. **Iniciação do Escoamento em Microbacia Hidrográfica e Relações Hídricas no Sistema Solo-Planta-Atmosfera no Bioma Caatinga.** (Tese de Doutorado). Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

FRAGA JUNIOR, L. S. 2017. **Relações hídricas do cacauzeiro:** efeito da área foliar, potencial da água do solo e condições de sombreamento. (Dissertação de Mestrado). Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2019.

GRANIER, A. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. **Annales des Sciences Forestières**, v. 42, n° 2, p. 193-200, 1985.

_____. Mesure du flux de sève brute dans le tronc du douglas par une nouvelle méthode thermique. **Annales des Sciences Forestières**, v. 44, n° 1, p. 1-14, 1987.

GUCCI, R.; MASSAI, R.; XILOYANNIS, C.; FLORE, J. A The effect of drought and vapour pressure deficit on gas exchange of young kiwifruit (*Actinidia deliciosa* var. *deliciosa*) vines. **Annals of Botany**, Oxford, v. 77, p. 605-613, 1996.

GUEHL, J.; AUSSÉNAC, G. Photosynthesis decrease and stomatal control of gas exchange in *Abies alba* Mill. In response to vapour pressure difference. **Plant Physiology**, Rockville, v. 83, p. 316-322, 1987.

IBGE. **Banco de Dados Agregados.** Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/>> Acesso em: 7 jun. 2019.

KARASAWA, S. 2006. **Evapotranspiração de cafezal semi-adensado irrigado por gotejamento e sua relação com a evapotranspiração de referência.** (Tese de Doutorado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

KOPPEN, W. Klassifikation der Klima nach Temperatur, Niederschlag und Jahreslauf. **Petermanns Mitt**, v. 64, 1918.

KOOL, D.; AGAM, N.; LAZAROVITCH, N.; HEITMAN, J. L.; SAUER, T. J.; BEN-GAL, A. A review of approaches for evapotranspiration partitioning. **Agricultural and forest meteorology**, v. 184, p. 56-70, 2014.

KÖSTNER, B.; GRANIER, A.; CERMÁK, J. Sapflow measurements in forest stands: methods and uncertainties. In: **Annales des sciences forestières**. EDP Sciences, v. 55, p. 13-27, 1998.

LANDSBERG, J. J.; GOWER, S. T. **Applications of physiological ecology to forest management.** San Diego: Academic Press, 1997.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal.** São Carlos: RiMa, 2006.

LU, P.; URBAN, L.; ZHAO, P. Granier’s thermal dissipation probe (TDP) method for

measuring sap flow in trees: theory and practice. *Acta Bot. Sin.* 46, p. 631-646. 2004.

LU, P.; WOO, K. C.; LIU, Z. T. Estimation of whole-plant transpiration of bananas using sap flow measurements. *Journal of Experimental Botany*, Oxford, v. 53, p.1771-1779, 2002.

LUNDBLAD, M.; LAGERGREN, F.; LINDROTH, A. Evaluation of heat balance and heat dissipation methods for sapflow measurements in pine and spruce. *Annals of Forest Science*, Bethesda, v.58, n.6, p.625-38, 2001.

MARENCO, R. A.; LOPES, N. F. **Fisiologia vegetal: fotossíntese, respiração, relações hídricas e nutrição mineral.** Viçosa: Artmed, 2005.

MARRICHI, A. H. C. 2009. **Caracterização da capacidade fotossintética e da condutância estomática em sete clones comerciais de *Eucalyptus* e seus padrões de resposta ao déficit de pressão de vapor.** (Dissertação de Mestrado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

MEDEIROS, A. T. 2002. **Estimativa da evapotranspiração de referência a partir da equação de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas, em Paraipaba, CE.** (Tese de Doutorado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

MIELKE, M. S. 1997. **Regulação fisiológica e ambiental das trocas gasosas num plantio clonal de híbridos de *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden.** (Tese de Doutorado). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1997.

MENEZES, N. L.; SILVA, D. C.; ARRUDA, R. C. O.; CARDOSO, V. A.; MELO-DE-PINNA, G. F.; YOSHITAKE, A. M. A. F., CASTRO, N. M.; SCATENA, V. L.; DIAS, E. S.; CATTAL, M. B. A new interpretation of primary thickening in monocotyledons: meristematic endodermis and pericycle. Proceedings of the Monocots III and Grasses IV Conference. *Annals... California*. 2003.

NAVES-BARBIERO, C. C.; FRANCO, A. C.; BUCCI, S. J.; GOLDSTEIN, G. Fluxo de seiva e condutância estomática de duas espécies lenhosas sempre-verdes no campo sujo e cerrado. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal*, v. 12, nº 2, p. 119-134, 2000.

NETO, C. J. G. 2007. **Calibração do uso de fotos hemisféricas, do LAI – 2000 e do Ceptômetro para a estimativa do índice de área foliar em plantações de eucalipto.** (Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Florestal). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

NETTO, Azevedo; Y FERNÁNDEZ, Miguel Fernández. **Manual de hidráulica.** São Paulo: Edgard Blücher, 1982

NGUGI, M. R.; HUNT, D. D.; DOLEY, D.; RYAN, P.; DART, P. Selection of species and provenances for low-rainfall areas: physiological responses of *Eucalyptus cloeziana* and *Eucalyptus argophloia* to seasonal conditions in subtropical Queensland. *Florest Ecology and Management*, Amsterdam, v. 193, p. 141-156, 2004.

PEREIRA, A. R.; PEREIRA, F. A. C.; MAGGIOTTO, S. R.; VILLA NOVA, N. A.;

FOLLEGATTI, M. V. Penman-Monteith reference evapotranspiration in a tropical climate. **Conference on Agricultural and Florest Meteorology**, Albuquerque, v. 23, p. 2-12, 1998.

PIMENTEL, J. S.; SILVA, T. J. A.; BORGES JR., J. C. F.; FOLEGATTI, M. V.; MONTENEGRO, A. A. A. Estimativa da transpiração em cafeeiros utilizando-se sensores de dissipação térmica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, nº 2, p.187-195, 2010.

PYMASDE. **BlueTerm**. 2010.

REIS, F. O.; CAMPOSTRINI, E.; SOUSA, E. F. Fluxo de seiva xilemática em mamoeiro 'Golden' cultivado por microaspersão sobre copa: relações com as variáveis ambientais. **Bragantia**, Campinas, v. 68, nº 2, p.285-294, 2009.

RIBEIRO, D. O processo civilizatório-Etapas da evolução sócio-cultural [1972]. **Estudos de antropologia da civilização**. São Paulo: Editora Vozes/Círculo do Livro, 1978.

SARMIENTO, G.; GOLDSTEIN, G.; MEINZER, F. Adaptative strategies of woody species in neotropical savanas. **Biological Review**, v. 60, p. 315-355, 1985.

SILVA, M. G. 2008. **Desenvolvimento de sensor de fluxo de seiva e de coeficiente indicador de estresse hídrico para plantas de cafeeiro arábica**. (Tese de Doutorado). Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2008.

_____. 2008. **Densidade de fluxo de seiva e relações hídricas do café (Coffea arabica L.), para a região de Varre-Sai, RJ**. (Dissertação de Mestrado). Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2003.

SMITH, D. M.; ALLEN, S. J. Measurement of sap flow in plants stems. **Journal of Experimental Botany**, v. 47, nº 305, p. 1833-1844, 1996.

SMITH, M.; ALLEN, R. G.; MONTEITH, J. L.; PERRIER, A.; PEREIRA, L.; SEGEREN, A. **Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements**. Rome: FAO, 1991.

STEPPE, K.; DE PAUW, D. J. W., DOODY, T. M., TESKEY, R. O. A comparison of sap flux density using thermal dissipation, heat pulse velocity and heat field deformation methods, **Agric. For. Meteorol**, v. 150, p. 1046-1056, 2010.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2004.

THORNTHWAITE, C. W. **An approach toward a rational classification of climate**. LWV, 1948.

VELLAME, L. M. **Transpiração em plantas de laranja e manga utilizando sonda de dissipação térmica e balanço de calor**. Cruz das Almas: CCAAB/UFRB, 2007.

VELLAME, L. M.; COELHO FILHO, M. A.; PAZ, V. P. S. Transpiração em mangueira pelo método Granier. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, nº 5, p. 516-523, 2009.

VELLAME, L. M.; COELHO FILHO, M. A.; PAZ, V. P. S.; COELHO, E. F. Gradientes térmicos naturais na estimativa do fluxo de seiva pelo método Granier. **Revista Caatinga**, v. 24, p.116-122, 2011.

WHITEHEAD, D.; BEADLE, C. L. Physiological regulation of productivity and water use in *Eucalyptus*: a review. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, p. 113-140, 2004.

WULLSCHLEGER, S. D.; CHILDS, K.W.; KING, A.W.; HANSON, P. J. A model of heat transfer in sapwood and implications for sap flux density measurements using thermal dissipation probes. **Tree Physiology**. v. 31, p. 669-679, 2011.

ZHANG, Y.; KANG, S.; WARD, E. J.; DING, R.; ZHANG, X.; ZHENG, R. Evapotranspiration components determined by sap flow and microlysimetry techniques of a vineyard in northwest China: Dynamics and influential factors. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 98, p.1.207-1.214, 2011.