INSTITUTO FEDERAL GOIANO – CAMPUS RIO VERDE DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS – AGRONOMIA

FLUXO DE SEIVA E TRANSPIRAÇÃO DE PLANTAS JOVENS DE MOGNO BRASILEIRO (Swietenia macrophylla King) SOB REGIME VARIÁVEL DE ÁGUA NO SOLO

Autor: Alisson Macendo Amaral Orientador: Dr. Frederico Antonio Loureiro Soares

RIO VERDE – GO AGOSTO - 2019

INSTITUTO FEDERAL GOIANO – CAMPUS RIO VERDE DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS – AGRONOMIA

FLUXO DE SEIVA E TRANSPIRAÇÃO DE PLANTAS JOVENS DE MOGNO BRASILEIRO (Swietenia macrophylla King) SOB REGIME VARIÁVEL DE ÁGUA NO SOLO

Autor: Alisson Macendo Amaral Orientador: Dr. Frederico Antonio Loureiro Soares

> Tese apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de DOUTOR Ciências Agrárias – Agronomia, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias -Agronomia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – *Campus* Rio Verde - Área de concentração em Produção Vegetal Sustentável no Cerrado.

RIO VERDE – GO Agosto - 2019

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

AAM485 f	Amaral, Alisson Macendo Fluxo de seiva e transpiração de plantas jovens de mogno brasileiro (Swietenia macrophylla King) sob regime variável de água no solo / Alisson Macendo Amaral;orientador Frederico Antonio Loureiro Soares; co-orientador Marconi Batista Teixeira Rio Verde, 2019. 77 p.
	Tese (Doutorado em Pós-Graduação em Ciências Agrárias - Agronomia) Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2019. 1. Pulso de calor. 2. Reidratação. 3. Difusividade. 4. Confiabilidade. I. Soares, Frederico Antonio Loureiro, orient. II. Teixeira,

Responsável: Johnathan Pereira Alves Diniz - Bibliotecário-Documentalista CRB-1 nº2376

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO – CAMPUS RIO VERDE DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS-AGRONOMIA

FLUXO DE SEIVA E TRANSPIRAÇÃO DE PLANTAS JOVENS DE MOGNO BRASILEIRO (Swietenia macrophylla king) SOB REGIME VARIÁVEL DE ÁGUA NO SOLO

Autor: Alisson Macendo Amaral Orientador: Dr. Frederico Antonio Loureiro Soares

TITULAÇÃO: Doutorado em Ciências Agrárias-Agronomia - Área de Concentração em Produção Vegetal Sustentável no Cerrado

APROVADO em 02 de agosto de 2019.

Prof. Dr. Cícero Teixeira Silva Costa Avaliador externo IFMS – Campus Navirai/MS

Prof. Dr. Charles Barbosa Santos Avaliador externo Universidade de Rio Verde - UNIRV

Prof. Dr. M dor interno IF Goiano - Campus Rio Verde

Dr. Vitor Marques Vidal Avaliador interno IF Goiano – Campus Rio Verde

Prof. Dr. Frederico Antonio Loureiro Soares Presidente da banca IF Goiano – Campus Rio Verde

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, saúde, dons, proteção e ensinamentos essenciais à superação em qualquer caminhada;

A minha mãe Maria do Socorro, ao meu pai Nivaldo e aos meus irmãos Hudson e Cíntia pelo amor, suporte e confiança;

A minha companheira Ângela, cujo amor, admiração e convivência me fizeram mais forte ao longo dos aprendizados acadêmicos e da vida;

Ao meu orientador Frederico Antônio Loureiro Soares e coorientadores Marconi Batista Teixeira e Lucas Melo Vellame, cujas instruções e amizade fizeram de mim um ser humano e profissional melhor;

Ao casal de amigos Lucas e Nita, por me receber em sua residência, pela amizade, suporte e momentos de descontração;

Ao Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde pela oportunidade de cursar o mestrado e doutorado e ao Instituto Federal do Norte de Minas Gerais, pelo incentivo à qualificação docente;

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) por disponibilizar o doutorado através do Instituto Federal Goiano – Campos Rio Verde;

Ao Núcleo de Engenharia de Água e Solo (NEAS) pela oportunidade e colaboração interinstitucional com o IF Goiano – Campus Rio Verde no desenvolvimento da tese;

Ao professor Alisson Jadavi pelas contribuições e discussões construtivas;

Aos colegas do Laboratório de Hidráulica e Irrigação (IFGoiano) e Instrumentação na Agricultura (UFRB) pela amizade e contribuições no desenvolvimento dos trabalhos de pesquisa;

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a construção desse trabalho.

BIOGRAFIA DO AUTOR

Alisson Macendo Amaral é natural de Montes Claros – MG, nascido em 15 de abril de 1983, filho de Nivaldo Macendo Amaral e Maria Socorro Amaral. Concluiu o ensino médio na escola Presidente Olegário Maciel no município de Manga-MG em 2000. No ano de 2003 ingressou no curso de Tecnologia em Irrigação e Drenagem pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Januária, com conclusão em 2006 na mesma instituição, hoje denominado Instituto Federal do Norte de Minas Gerais (IFNMG) – Campus Januária. No período compreendido entre setembro de 2007 a setembro de 2009 atuou no IFNMG – Campus Januária como professor substituto e nesse interstício foi aprovado em concurso público para o cargo de Professor efetivo do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico para o IFNMG – Campus Arinos o qual tomou posse em setembro de 2009 e leciona até o presente momento. Em 2013 ingressou no mestrado acadêmico em Ciências Agrárias-Agronomia, do IFGoiano – Campus Rio Verde, obtendo o título em 2014. Em 2017 ingressou no doutorado acadêmico em Ciências Agrárias-Agronomia, do IFGoiano – Campus Rio Verde, obtendo o título em 2014. Em 2017 ingressou no doutorado acadêmico em Ciências Agrárias-Agronomia, do IFGoiano – Campus Rio Verde, obtendo o título em 2014. Em 2017 ingressou no doutorado acadêmico em Ciências Agrárias-Agronomia, do IFGOiano – Campus Rio Verde, obtendo o título em 2014. Em 2017 ingressou no doutorado acadêmico em Ciências Agrárias-Agronomia, do IFGOiano – Campus Rio Verde, obtendo o título em 2014. Em 2017 ingressou no doutorado acadêmico em Ciências Agrárias-Agronomia, do IFGOiano – Campus Rio Verde, obtendo o título em 2014. Em 2017 ingressou no doutorado acadêmico em Ciências Agrárias-Agronomia, pela mesma instituição, participando de período colaborativo interinstitucional no Núcleo de Engenharia de Água e Solo da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB).

ÍNDICE

	Página
ÍNDICE DE TABELAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIAÇÕES E UNIDADES	ix
RESUMO	ii
ABSTRACT	iv
INTRODUÇÃO	16
1. Mogno brasileiro	16
1.1. Origem, distribuição e importância econômica e ambiental	16
2. Fluxo de seiva	
2.1 Métodos para determinação de fluxo de seiva	19
3. Influência da variação da água no solo em cultivos	
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	
OBJETIVOS	
1. Geral	
2. Específicos	
CAPÍTULO I - FLUXO DE SEIVA E TRANSPIRAÇÃO DE PLANTAS JO MOGNO BRASILEIRO SUBMETIDAS À VARIAÇÃO POTENCIAL DE Á SOLO	VENS DE AGUA NO 30
1. INTRODUÇÃO	
2. MATERIAL E MÉTODOS	
2.1 Área experimental, instrumentação e condições do experimento	
2.2 Modelagem inversa	
2.3 Determinação do fluxo de seiva e transpiração	
2.4 Período de avaliação e análise dos dados	
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	
4. CONCLUSÃO	47

5. AGRADECIMENTOS	
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	
CAPÍTULO II- INCERTEZAS NO FLUXO DE SEIVA DE MOGNO BR ESTIMADO PELO MÉTODO DA RAZÃO DE CALOR	ASILEIRO
1. INTRODUÇÃO	54
2. MATERIAL E MÉTODOS	55
2.1 Área experimental, instrumentação e condições experimentais	55
2.2 Fluxo de seiva por pulso de calor	56
2.3. Comparação da velocidade de pulso de calor (V _h) para diferentes te medição	empos de 58
2.4. Cálculo da incerteza no método de razão de calor	59
2.5 Incerteza na difusividade térmica	60
2.5.1 Incerteza na condutividade térmica	60
2.5.2 Incerteza na capacidade calorífica	61
2.5.3 Incerteza na densidade básica da madeira	61
2.6 Incerteza no fluxo de seiva	
2.6.1 Incerteza na seção condutora	
2.6.2 Incerteza na velocidade de seiva corrigida	
3. Associação entre fluxo de seiva e transpiração	
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	
4. CONCLUSÃO	69
5. AGRADECIMENTOS	69
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	

ÍNDICE DE TABELAS

CAPÍTULO I - Fluxo de seiva e transpiração de plantas jovens de mogno brasileiro submetidas à variação potencial de água no solo

Tabela 1. Parâmetros hidráulicos do Latossolo Amarelo no int lisímetro	Pági erior do	na 36
CAPÍTULO II - Incertezas no fluxo de seiva de mogno brasileiro estimado da razão de calor	o pelo méto	do
	Pagi	na
Tabela 1. Coeficiente de sensibilidade e incertezas das variáveis que infl	uenciam	
no fluxo de seiva de mogno brasileiro determinado pelo método da razão	de calor	
do Durques (2001)	40 00101	
de Burgues (2001)	0	0

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I - Fluxo de seiva e transpiração de plantas jovens de mogno brasileiro submetidas à variação potencial de água no solo

	Página	ι
Figura 1. Sonda de aquecimento (a), termopar do tipo T (b), con instaladas no caule a 10 cm da superfície do solo (c) e lisíme (d)	junto de sondas tro de pesagem 	
Figura 2. Variação do fluxo de seiva em resposta à redução do po no solo no período de hídrica	otencial de água restrição 40	
Figura 3. Variação do fluxo de seiva em resposta à reidratação período de hídrico	da planta após déficit 41	
Figura 4. Reestabelecimento de fluxo de seiva após elevação do cono solo	onteúdo de água 43	
Figura 5. Fluxo de seiva e transpiração de mogno tempo	ao longo do 44	
Figura 6. Diferença entre fluxo de seiva e transpiração acumulad tempo	dos ao longo do 45	
Figura 7. Relação da razão fluxo de seiva e evapotranspiração e p no solo (a) e transpiração e evapotranspiração por potencial de águ todo o período avaliação	otencial de água a no solo (b) em de 	

CAPÍTULO II - Incertezas no fluxo de seiva de mogno brasileiro estimadas pelo método da razão de calor

												Página
Figura 1. relação calor	Variaç ao	ão de t aqu	empera uecedo	atura en r,	m v ₁ após	(sonda s apl	supei licaçi	rior) e ão	v ₂ (so do	nda infer pulso	rior) e (m de 63
Figura 2. medição pulso	Veloci de	dade d 60,	o pulso 80	o de ca e 10	lor p)0	ara dois segundo	dias os	conse após	cutivo a	os nos ter aplicaçã	npos a ío a	de lo 65
Figura 3 pulso de kPa	Relação calor	o entre em mo	transp ogno p	iração bara po	em f otenc	unção de iais de	o flu água	xo de s a no s	seiva olo p	determin róximos	ado p de -1	or 10 67

		Página
Símbolo/Sigla	Significado	Unidade
FS	Fluxo de seiva	$L h^{-1} / L dia^{-1}$
θ	Conteúdo de água no solo	$m^3 m^{-3}$
TDR	Time-Domain-Reflectometry	-
h	Pressão de água no solo	m H ₂ O
Z	Coordenada vertical	m
K(Θ)	Condutividade hidráulica do solo	m h ⁻¹
Ks	Condutividade hidráulica saturada do solo	$m h^{-1}$
SWRC	Curva de retenção de água no solo	-
SWCC	Curva de condutividade de água no solo	-
S_e	Saturação efetiva	$m^3 m^{-3}$
$\Theta_{\rm r}$	Conteúdo de água residual	$m^3 m^{-3}$
$\Theta_{\rm s}$	Conteúdo de água saturado	$m^3 m^{-3}$
α	Parâmetro empírico da SWRC	-
n	Parâmetro empírico da SWRC	-
λ	Parâmetro empírico da SWCC	-
Θ_{TDR}	Conteúdo de água no solo observado na TDR	$m^{3} m^{-3}$
Θ_{EST}	Conteúdo de água no solo estimado	$m^{3} m^{-3}$
β	parâmetros hidráulicos do solo otimizados	-
R ²	Coeficiente de determinação	-
RMSE	Raiz quadrada do erro médio	-
HRM	Método da razão de calor	-
GNT	Gradientes térmicos naturais	-
\mathbf{V}_{h}	Velocidade de seiva	cm h ⁻¹
X2	Espaçamento corrigido da sonda inferior	cm
Ln	Logarítmico Neperiano	-
v_1	Incremento de temperatura na sonda superior	°C
v ₂	Incremento de temperatura na sonda inferior	°C
k	Difusividade térmica	cm ² s ⁻¹

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIAÇÕES E UNIDADES

Vc	Velocidade de seiva corrigida	cm h ⁻¹
$ ho_b$	Densidade básica da madeira	Kg m ⁻³
ρ_s	Densidade da água	Kg m ⁻³
c_{w}	Capacidades caloríficas da matriz da madeira	J Kg ⁻¹ °C ⁻¹
Cs	Capacidades caloríficas da seiva	J Kg ⁻¹ °C ⁻¹
m _c	Conteúdo de água do alburno,	Kg
Kgw	Condutividade térmica da madeira fresca	J m ⁻¹ s ⁻¹ °C ⁻¹
Kw	Condutividade térmica da madeira seca	J m ⁻¹ s ⁻¹ °C ⁻¹
Fv	Fração porosa	
С	Capacidade calorífica da madeira	J Kg ⁻¹ °C ⁻¹
FS>0	Fluxo de seiva ascendente	J Kg-1 °C-1
FS<0	Fluxo de seiva inverso	L h ⁻¹ / L dia ⁻¹
FS=0	Fluxo de seiva nulo	-
Eto	Evapotranspiração de referência	L mm ⁻¹
L	Litros	L
Kg	Quilograma	kg
S _c	Seção condutora da seiva	m²
σ^2	Variância	-
ρ	Coeficiente de correlação	-
xi	Grandeza de entrada para correlação	-
xj	Grandeza de entrada para correlação	-
$\sigma^2(G)$	Variância combinada	-
S	coeficiente de sensibilidade	Adimensional
Δy	Variação na grandeza de saída	-
Yo	Valor inicial da grandeza de saída	-
Δx	Variação na grandeza de entrada	-
Xo	Valor inicial da grandeza de entrada	-
x	Média de valores das grandezas de entrada x a ser correlacionadas	-
ÿ	Média de valores das grandezas de entrada y a ser correlacionadas	-
$\mathbf{I}_{\mathbf{k}}$	Incerteza na difusividade térmica	%
I_{Kgw}	Incerteza na condutividade térmica	%
Ic	Incerteza na capacidade calorífica	%
$\mathbf{I}_{ ho}$	Incerteza na densidade da madeira	%
I _{FS}	Incerteza no fluxo de seiva	%
Isc	Incerteza na seção condutora	%
А	Área da seção condutora	m²
ms	Massa seca	g
m _f	Massa fresca	g
v	Volume	g

DPV

xi

RESUMO

AMARAL, ALISSON MACENDO. Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, agosto de 2019. Fluxo de seiva e transpiração de plantas jovens de mogno brasileiro (*Swietenia macrophylla* King) sob regime variável de água no solo. Orientador: Dr. Frederico Antonio Loureiro Soares. Coorientadores: Dr. Marconi Batista Teixeira e Dr. Lucas Melo Vellame.

O mogno brasileiro (Swietenia macrophylla King) é uma espécie florestal de interesse econômico e ambiental, devido a madeira de ótimo acabamento e sua utilização na recuperação e recomposição de ecossistemas, entretanto, o conhecimento de como essa espécie utiliza os recursos hídricos ainda necessita de esclarecimentos. Portanto, no capítulo um, objetivou-se avaliar o comportamento do fluxo de seiva e da transpiração em plantas jovens de mogno brasileiro sob condições variáveis de potencial de água no solo. O estudo foi desenvolvido em ambiente protegido com plantas cultivadas em lisímetros de pesagem, cujo solo em seu interior sofreu variações potenciais entre -10 kPa a -35 kPa em períodos de restrição hídrica, reidratação e irrigação plena. Para quantificar o uso de água no mogno mensurou-se o fluxo de seiva por pulso de calor, a transpiração por lisímetros de pesagem e a demanda evapotranspirométrica por variáveis temporais. Observou-se que o fluxo de seiva e a transpiração são influenciados negativamente pela variação potencial de água no solo. Ocorreu perda de água das folhas para a atmosfera em condições de déficit hídrico, mesmo com ausência de fluxo de seiva ascendente. O fluxo de seiva foi reestabelecido após 4 dias da retomada das irrigações. Objetivou-se, no capítulo dois, contribuir com as incertezas envolvidas na aplicação do método de razão de calor usado na determinação do fluxo de seiva do mogno brasileiro. Para isso, conjuntos de sondas de aquecimento e medição de temperatura foram instalados em

plantas de 18 meses de idade, cultivadas em Latossolo amarelo, sob lisímetro de pesagem e situados em ambiente protegido. A incerteza no fluxo de seiva foi calculada pela combinação entre a incerteza na difusividade térmica (I_k), na seção condutora (I_{Sc}) e na velocidade de seiva corrigida (I_{Vc}). Observou-se que I_k tem maior peso na determinação do fluxo de seiva em mogno brasileiro, quando comparado a I_{Sc} e I_{Vc} . É necessário o ajuste da difusividade térmica durante o ciclo, ou período avaliado, visando melhorar a precisão do método da razão de calor, pois, o fluxo de seiva superestimou em 15,0% a transpiração do mogno brasileiro em condições ótimas de água no solo.

PALAVRAS-CHAVE: Pulso de calor, reidratação, difusividade, confiabilidade.

ABSTRACT

AMARAL, ALISSON MACENDO. Federal Institute Goiano - Campus Rio Verde - GO, august 2019. Sap flow and transpiration of young plants of Brazilian mahogany (*Swietenia macrophylla* King) under variable regime of water in the soil. Advisor: Dr. Frederico Antonio Loureiro Soares. Co-advisors: Dr. Marconi Batista Teixeira and Dr. Lucas Melo Vellame.

Abstract: Brazilian mahogany (Swietenia macrophylla King) is a forest species of economic and environmental interest due to its wood's great finish and its use in recovering and recomposing ecosystems. However, clarification on how this species uses water resources is still necessary. Therefore, in chapter one, the objective was to evaluate sap flow and transpiration behavior in young Brazilian mahogany plants under variable conditions of soil water potential. We conducted the study in a protected environment and cultivated the plants in weighing lysimeters wherein the soil underwent potential variations between -10 kPa and -35 kPa during periods of water restriction, rehydration, and full irrigation. To quantify water use in the mahogany plants, we measured sap flow through heat pulses, transpiration through the weighing lysimeters, and evapotranspiration rate by time variables. We observed that sap flow and transpiration are affected negatively by soil water potential variation. The leaves lost water to the atmosphere under water deficit conditions, even with the absence of upward sap flow. Sap flow was restored four days after irrigation had resumed. In chapter two, the objective was to contribute with the uncertainties (U) involved in the application of the heat ratio method used in the determination of the Brazilian mahogany sap flow. For this, sets of heating probes and temperature measurement were installed in plants of eighteen months of age, cultivated in Yellow Latosol, under weighing lysimeter and located in a protected environment. The uncertainty in the sap flow was calculated by the combination between

the uncertainty in the thermal diffusivity (U_k) , the conductive section (U_{Sc}) and the corrected sap velocity (U_{Vc}) . It was observed that Ik has greater weight in determining the flow of sap in Brazilian mahogany, when compared to U_{Sc} and U_{Vc} . It is necessary to adjust the thermal diffusivity during the cycle, or period evaluated, in order to improve the accuracy of the heat ratio method, because the sap flow overestimated the Brazilian mahogany transpiration in optimal soil water conditions by fifteen percent.

Keywords: Heat pulse, rehydration, diffusivity, reliability.

INTRODUÇÃO

1. Mogno brasileiro 1.1. Origem, distribuição e importância econômica e ambiental

O mogno brasileiro (*Swietenia macrophylla* King) é uma espécie florestal nativa do Brasil, em principal a região amazônica, pertencente ao gênero Swietenia, da família Meliaceae. É uma árvore robusta que domina o dossel da floresta onde possui sua ocorrência. Seu tronco pode atingir 3,5 m de diâmetro, altura total de 70 m, com média entre 30 a 40 metros e a copa pode chegar a 50 m de largura, apresentando raízes tabulares que podem atingir 5 m (Costa et al., 2013; Leão, 2011).

O mogno brasileiro desenvolve-se em circunstâncias naturais e possui expressiva ocorrência na América Central e do Sul, entretanto é muito difundida na Índia Ocidental, Malásia e sul da China (Leão, 2011; Mi et al., 2019).

Dentre os diversos usos da *S. macrophylla* King, destaca-se a madeira, haja visto que é uma das espécies de maior valor comercial madeireiro do mundo (Roweder et al., 2015; Corcioli et al., 2014). Sua madeira é moderadamente pesada, dura, com cerne castanho-amarelado a castanho-escuro, alburno branco-amarelado e textura fina a média, podendo ser utilizada em peças torneadas, objetos de decoração, instrumentos científicos de precisão, instrumentos musicais, esculturas, carpintaria, construção naval, indústria de aviação e indústria farmacêutica (Krisnawati et al., 2011; Hashim et al., 2013; Suliman et al., 2014; Vieira e Weber, 2015; Mukaromah et al., 2017; Goh et al., 2014; Eid et al., 2013).

Devido ao elevado potencial econômico, essa espécie está sujeita a níveis intensos de exploração comercial, mostrando, portanto, um declínio em seu tamanho

populacional e aumento da fragmentação populacional nas áreas de sua distribuição natural (Rodríguez-Morelos et al., 2014), passando a ser cultivado em plantios consorciados, como os sistemas alternativos de produção (agroflorestais) e também homogêneos, sendo a maior limitação ao seu cultivo, a pressão causada pela broca do mogno (*Hypsipyla grandella* Zeller) (Silva Júnior et al., 2015; Costa et al., 2013). Dessa forma, o alto valor comercial e a ampla aceitação no mercado internacional, faz com que a *S. macrophylla* King corra o risco de desaparecer, mesmo com sua utilização em sistemas alternativos de produção para recuperar áreas desmatadas e preservar esta espécie(Viégas et al., 2012).

A associação desses fatores junto ao avanço no desmatamento da Floresta Amazônica, fez com que a convenção sobre o Comércio Internacional de Espécies Silvestres da Fauna e Flora considerassem o mogno brasileiro uma espécie ameaçada de extinção, pois, com essa prática, ocorre a eliminação de plantas matrizes e afeta sua regeneração natural (Costa et al., 2013a), causando sérios problemas ambientais.

Com aprovação da Lei de Florestas Públicas de 2006 (Lei nº 11.284 /2006) e políticas florestais associadas, o governo brasileiro comprometeu-se com o manejo florestal sustentável (Grogan et al., 2014), o que consiste na administração da floresta para a obtenção de benefícios econômicos, sociais e ambientais, respeitando-se os mecanismos de sustentação do ecossistema (Brasil, 2006).

Desde que foram impostas as restrições na exploração madeireira desta árvore em seus habitats nativos, ela foi introduzida em diversos outros países, como os asiáticos, em ambientes de plantação, tornando-o a principal fonte de comércio internacional desses países (Kumar; et al., 2015). Nesse cenário, o desenvolvimento de plantações comerciais sustentáveis, como a *S. macrophylla* King, é essencial para retomar e garantir o fornecimento de madeira sólida de alto valor agregado e licenciada ao Brasil (Silva et al., 2019).

É consensual que o mogno brasileiro pode ser explorado de forma racional, entretanto há a necessidade do conhecimento de mais informações e tecnologias por meio de ações de pesquisa (Viégas et al., 2012), pois, ainda são poucas essas informações, necessárias ao seu manejo (Silva et al., 2019), como, por exemplo as condições edafoclimáticas mais promissoras à sua produção (Negreros-Castillo et al., 2013).

2. Fluxo de seiva

As plantas são eficientes na gestão descentralizada de recursos essenciais, como nutrientes, luz e água, uma vez que prosperam e mantêm a coerência mesmo em organismos muito grandes, requerendo um sistema vascular eficiente e robusto que sustente o crescimento e a comunicação em todo o organismo, para conduzir seiva da raiz até as folhas mais altas de uma árvore (Jensen et al., 2016). Os sistemas vasculares permitem que os organismos distribuam recursos internamente via fluxo de seiva e, assim, superem as limitações de tamanho estabelecidas pelo processo de difusão (Knoblauch et al., 2016).

O fluxo de seiva ao longo do sistema de transporte de água a longas distâncias nas plantas é essencial para manter a conexão hidráulica entre o solo e a atmosfera e, dada a natureza dinâmica desse movimento, entender como uma planta se desenvolve sobre determinados ambientes, pois, o fluxo de seiva é amplamente utilizado para fornecer uma estimativa indireta da transpiração, haja vista o tamanho e a complexidade das espécies, o que dificulta sua medição direta (Steppe et al., 2015; Leo et al., 2014; Zhang et al., 2014; Sun et al., 2012).

Em escalas pequenas de tempo (minutos a horas), o fluxo de seiva pode ser direcionado para processos fisiológicos como o armazenamento de água no tronco ou a fotossíntese em folhas, entretanto, em uma escala diária, aproximadamente 99% são perdidos da planta para a atmosfera circundante como transpiração (Forster, 2017). Como a atividade vegetal afeta fortemente o movimento da água através dos ecossistemas terrestres, a transpiração domina a perda evaporativa que é responsável por 80 a 90% da evaporação terrestre (Juice et al., 2016).

As metodologias de medição do fluxo de seiva são amplamente estudadas pelos pesquisadores, permitindo dados de alta resolução temporal da captação de água através do caule para as folhas (Shahidian et al., 2016).

Além da estimativa da transpiração de dosséis, as medições de fluxo de seiva podem ser usadas, sozinhas ou combinadas a outros métodos, para: determinação de coeficientes de cultivo (Ferreira et al., 2012; Poblete-Echeverría e Farias-Ortega, 2010), como indicativo do status-hídrico de plantas (Cohen et al., 2012; Ballester et al., 2013) e da eficiência do uso da água (Fernandes et al., 2016; ZHang et al., 2015; Bilcke et al., 2020); na caracterização volumétrica de raiz no perfil do solo (Cassiani et al., 2015), na determinação da taxa de assimilação líquida (López et al., 2015; López-bernal et al., 2015), para diferenciar espécies arbóreas difusas e porosas (Bittner et al., 2012), na automatização de sistemas de irrigação (Takeuchi et al., 2018) e ainda permite uma melhor compreensão dos processos envolvidos no sistema solo-planta-atmosfera em condições variáveis de desenvolvimento (Cammalleri et al., 2013; Sánchez-Costa, et al., 2015).

2.1 Métodos para determinação de fluxo de seiva

A medição de fluxo de seiva é um método usado para avaliar o uso da água nas plantas de forma confiável e aplicada rotineiramente em estudos ecofisiológicos de plantas que apresentam caules de madeira, por meio de métodos termométricos, ou seja, instalando sensores no tronco e usando o calor como um marcador para o movimento da seiva no xilema (Forster, 2014; Kume et al., 2011; Rodriguez-Dominguez et al., 2012; Fuchs et al., 2017).

Autores que possuem manuscritos de expressiva relevância como Vandegehuchte e Steppe (2013), categorizam esses métodos em contínuos (quando os métodos usam aquecimento constante) e de pulsos de calor (quando a base do método é o aquecimento intermitente do caule). É apropriado dizer que, basicamente os métodos mais usados são o de compensação ou balanço de calor, os de dissipação térmica, da temperatura máxima e o de razão de calor.

Dependendo do método, os sensores geralmente consistem de dois a quatro sensores que medem variações de temperatura em um ou vários pontos após ou durante a aplicação de calor (uma das agulhas é sempre um aquecedor) e a mudança de temperatura em resposta ao aquecimento é usada para estimar a velocidade de seiva (López-Bernal et al., 2017). Cada método possui vantagens e limitações, entretanto, até hoje nenhuma técnica foi considerada universal (Forster, 2014; Sun et al., 2012).

O método de balanço de calor envolve a solução do balanço de calor sobre uma seção da haste aplicando energia constante ou variável para aquecer continuamente o tecido circundante. O caudal mássico da seiva é então calculado determinando, por diferença de temperatura, a quantidade de calor transportada na seiva móvel. Esse método requer entradas de energia significativas, o que pode ser uma desvantagem em locais remotos (Miner et al., 2017).

No método da temperatura máxima, a determinação da velocidade da seiva é baseada no tempo em que a temperatura medida a uma distância axial a jusante do aquecedor se torna máxima. No entanto, mesmo com a existência de procedimentos de curvas de suavização para esse método, existe a desvantagem de não conseguir distinguir entre baixas ou nulas densidades de fluxo (Vandegehuchte e Steppe, 2013).

Já no método de dissipação térmica, desenvolvido por Granier (1985), a densidade de fluxo é relacionada à dissipação de calor de uma única sonda aquecida e é uma das metodologias mais citadas na literatura (González-Rodríguez et al., 2017; Sérvulo et al., 2017; Shahidian et al., 2016; Vergeynst et al., 2014; Hölttä et al., 2015), contudo possui a desvantagem de necessitar de calibrações específicas para correções da densidade de fluxo.

Por último, o método de razão de calor desenvolvido por Marshal (1958) e modificado por Burgess et al. (2001) possui vantagem em relação à outros métodos, por ser capaz de medir fluxo reverso (negativo), baixo e nulo (zero). Ao invés de medir diretamente o tempo de viagem de um pulso de calor, calcula-se a velocidade de seiva a partir da relação de temperatura de dois sensores equidistantes de um elemento aquecedor, por um determinado período de tempo (Fuchs et al., 2017b). Outra vantagem desse método é o requerimento de menos energia para seu funcionamento e ser a base para modificações e melhorias da metodologia para cálculo de fluxo de seiva por pulso de calor (Looker et al., 2016; Miner et al., 2017; Ren et al., 2017; Wang et al., 2018).

3. Influência da variação da água no solo em cultivos

O crescimento e o desenvolvimento de espécies florestais, assim como o de outras plantas, dependem de diversos fatores ambientais como luz, gás carbônico, sais minerais e, principalmente, água (Corcioli et al., 2016).

A disponibilidade de água influencia expressivamente os processos fisiológicos e metabólicos relacionados ao crescimento e à produtividade das espécies, por ter grande importância na turgescência celular, na biossíntese de carboidratos e no transporte de substâncias (Vidyasagaran et al., 2014), podendo ter efeitos variáveis ou graduais a depender do estádio de desenvolvimento (Fahlgren et al., 2015).

A resposta imediata das plantas expostas ao estresse hídrico é o fechamento estomático, entretanto, esse processo não apenas diminui a perda de água pela

transpiração, mas também reduz a absorção de CO₂ e nutrientes e, portanto, altera as vias metabólicas como a fotossíntese, diminuindo a taxa fotossintética, importante para a produção de foto-assimilados (Basu et al., 2016). A redução da síntese de proteínas no metabolismo causa a interrupção da divisão celular, reduzindo a velocidade do processo mitótico e, assim, a redução do processo de crescimento, particularmente o crescimento em extensão (Campelo et al., 2018).

Em condições de baixa disponibilidade de água no solo pode ocorrer a redução da atividade da ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase oxigenasse (Rubisco), o que compromete a fixação do CO₂ e a regeneração do NADP+ através do ciclo de Calvin. Isso influencia na redução sobre a cadeia de transporte de elétrons nos cloroplastos e, consequentemente, na fuga de elétrons de O₂, resultando na geração de espécies reativas de oxigênio, como o superóxido e peróxido de hidrogênio (H₂O₂). Isso acarreta efeitos, tanto positivos quanto negativos nas plantas, como a regulação do ácido abscísico (ABA), importante hormônio vegetal tradicionalmente associado às respostas ao estresse hídrico (Prinsloo e Nogemane, 2018; Farnese et al., 2016).

Outro aspecto decorrente da disponibilidade hídrica é o desbalanço nutricional da planta, já que o estresse abiótico reduz as taxas de absorção de nutrientes importantes como enxofre, nitrogênio, fósforo e potássio (Ventura et al., 2019).

No entanto, sabe-se que as plantas usam estratégias para lidar com os efeitos da variação do potencial de água no solo, e essas estratégias estão associadas com uma variedade de características adaptativas, também chamada de plasticidade fenotípica, como minimizar a perda de água, maximizar a absorção de água ou manter um grande armazenamento interno de água (Elshibli et al., 2016; Baird et al., 2017).

A adaptabilidade das plantas ao estresse abiótico causado pela variação da disponibilidade hídrica, também pode se dar pelo acúmulo de osmólitos como açúcares, aminoácidos, álcoois e amônias quaternárias, que atuam na redução da atividade da água e redução do potencial osmótico da célula, para manter a turgidez da mesma e manter o crescimento e sobrevivência (Mota e Cano, 2016). Adicionalmente, fito-hormônios como citocinina, ácido giberélico, auxina e etileno, regulam diversos processos que permitem a adaptação da planta ao estresse hídrico (Basu et al., 2016).

Entender os mecanismos de plasticidade através dos quais as plantas se comportam a condições ambientais diversas é um dos principais objetivos das investigações do comportamento morfofisiológico das plantas (Baird et al., 2017).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. Lei n. 11.284, de 02 de mar. de 2006. Gestão de florestas públicas para a produção sustentável, Brasília, Distrito Federal. 2006.

BAIRD, A. S. et al. Comparative leaf growth strategies in response to low-water and lowlight availability: Variation in leaf physiology underlies variation in leaf mass per area in Populus tremuloides. **Tree Physiology**, v. 37, n. 9, p. 1140–1150, 2017.

BALLESTER, C. et al. Can heat-pulse sap flow measurements be used as continuous water stress indicators of citrus trees? **Irrigation Science**, v. 31, p. 1053–1063, 2013.

BASU, S. et al. Plant adaptation to drought stress. **F1000Research**, v. 5, n. 0, p. 1554, 2016.

BILCKE, N. VAN DEN et al. Sap flow and water use in African baobab (Adansonia digitata L .) seedlings in response to drought stress. **South African Journal of Botany**, v. 88, n. 2013, p. 438–446, 2020.

BITTNER, S. et al. Functional – structural water flow model reveals differences between diffuse- and ring-porous tree species. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 158–159, p. 80–89, 2012.

BURGESS, S. et al. An improved heat pulse method to measure low and resever rates of sap flow in woody plants. **Tree Physiology**, v. 21, n. April, p. 589–598, 2001.

CAMMALLERI, C. et al. Combined use of eddy covariance and sap flow techniques for partition of ET fluxes and water stress assessment in an irrigated olive orchard. **Agricultural Water Management**, v. 120, p. 89–97, 2013.

CAMPELO, D. D. H. et al. Características Morfofisiológicas Foliares E Estado Nutricional De Seis Espécies Lenhosas Em Função Da Disponibilidade De Água No Solo. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 3, p. 924, 2018.

CASSIANI, G. et al. Monitoring and modelling of soil – plant interactions : the joint use of ERT, sap flow and eddy covariance data to characterize the volume of an orange tree root zone. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 19, p. 2213–2225, 2015.

COHEN, Y. et al. Use of aerial thermal imaging to estimate water status of palm trees.

Precision Agric, v. 13, p. 123–140, 2012.

CORCIOLI, G.; BORGES, J. D.; DE JESUS, R. P. Deficiência de macro e micronutrientes em mudas maduras de Khaya ivorensis estudadas em viveiro. **Cerne**, v. 22, n. 1, p. 121–128, 2016.

CORCIOLI, G.; BORGES, J. D.; JESUS, R. P. DE. Sintomas de deficiência nutricional de macronutrientes em mudas de Khaya ivorensis cultivadas em solução nutritiva. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, n. 78, 2014.

COSTA, M. S. et al. Crescimento Do Mogno Em Sistema Silvipastoril Growth of Mahogany in Silvopastoral System. **Revista Agroecossistemas**, v. 5, n. 2, p. 53–57, 2013.

EID, A. M. M.; ELMARZUGI, N. A.; EL-ENSHASY, H. A. A review on the phytopharmacological effect of Swietenia macrophylla. **International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences**, v. 5, n. SUPPL 3, p. 47–53, 2013.

ELSHIBLI, S.; ELSHIBLI, E. M.; KORPELAINEN, H. Growth and photosynthetic CO2 responses of date palm plants to water availability. **Emirates Journal of Food and Agriculture**, v. 28, n. 1, p. 58–65, 2016.

FAHLGREN, N. et al. A versatile phenotyping system and analytics platform reveals diverse temporal responses to water availability in Setaria. **Molecular Plant**, v. 8, n. 10, p. 1520–1535, 2015.

FARNESE, F. S. et al. When Bad Guys Become Good Ones: The Key Role of Reactive Oxygen Species and Nitric Oxide in the Plant Responses to Abiotic Stress. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, n. April, p. 1–15, 2016.

FERNANDES, T. J. G. et al. Simultaneous assessment, through sap flow and stable isotopes, of water use efficiency (WUE) in thinned pines shows improvement in growth, tree-climate sensitivity and WUE, but not in WUEi. Forest Ecology and Management, v. 361, p. 298–308, 2016.

FERREIRA, M. I. et al. Crop and stress coefficients in rainfed and deficit irrigation vineyards using sap flow techniques. **Irrigation Science**, v. 30, n. 5, p. 433–447, 2012.

FORSTER, M. How Reliable Are Heat Pulse Velocity Methods for Estimating Tree Transpiration? **Forests**, v. 8, n. 9, p. 350, 2017.

FORSTER, M. A. How significant is nocturnal sap flow? **Tree Physiology**, v. 34, n. 7, p. 757–765, 2014.

FUCHS, S. et al. Calibration and comparison of thermal dissipation, heat ratio and heat field deformation sap flow probes for diffuse-porous trees. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 244–245, n. December 2016, p. 151–161, 2017a.

FUCHS, S. et al. Calibration and comparison of thermal dissipation, heat ratio and heat field deformation sap flow probes for diffuse-porous trees. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 244–245, n. April, p. 151–161, 2017b.

GOH, B. H. et al. Swietenia macrophylla King induces mitochondrial-mediated apoptosis through p53 upregulation in HCT116 colorectal carcinoma cells. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 153, n. 2, p. 375–385, 2014.

GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ, Á. M. et al. Seasonal cycles of sap flow and stem radius variation of Spartocytisus supranubius in the alpine zone of Tenerife, Canary Islands. **Alpine Botany**, v. 127, n. 2, p. 97–108, 2017.

GROGAN, J. et al. Big-leaf mahogany Swietenia macrophylla population dynamics and implications for sustainable management. **Journal of Applied Ecology**, v. 51, n. 3, p. 664–674, 2014.

HASHIM, M. A. et al. Anti-hyperglycaemic activity of swietenia macrophylla king (meliaceae) seed extracts in normoglycaemic rats undergoing glucose tolerance tests. **Chinese Medicine (United Kingdom)**, v. 8, n. 1, p. 1–8, 2013.

HÖLTTÄ, T. et al. An analysis of Granier sap flow method, its sensitivity to heat storage and a new approach to improve its time dynamics. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 211–212, p. 2–12, 2015.

JENSEN, K. H. . et al. Sap flow and sugar transport in plants. American Physical Society, v. 88, n. September, p. 1–63, 2016.

JUICE, S. M. et al. Ecosystem warming increases sap flow rates of northern red oak trees. **Ecosphere**, v. 7, n. 3, p. 1–17, 2016.

KNOBLAUCH, M. et al. " nch hypothesis of long Testing the Mu distance phloem transport in plants. **eLIFE**, v. 5, p. 1–16, 2016.

KRISNAWATI, H.; KALLIO, M.; KANNINEN, M. Swietenia macrophylla King: Ecology, silviculture and productivity. p. 14, 2011.

KUMAR, V.; AJEESH, R.; JIJEESH, C. M. Chemical seed pre-treatments for better germination and seedling growth. **Journal of Environmental and Biology Science**, v. 29, n. 2, p. 367–372, 2015.

KUME, T. et al. Spatial variation in sap flow velocity in semiarid region trees : its impact on stand-scale transpiration estimates. **Hydrol. Process**, v. 6, n. 8, p. 1161–1168, 2011.

LEÃO, N. V. M. Colheita de Sementes e Produção de Mudas de Espécies Florestais Nativas. **Embrapa Amazônia Oriental**, p. 1–52, 2011.

LEO, M. et al. Evaluating the effect of plant water availability on inner alpine coniferous trees based on sap flow measurements. **European Journal of Forest Research**, v. 133, n. 4, p. 691–698, 2014.

LOOKER, N. et al. Agricultural and Forest Meteorology Contribution of sapwood traits to uncertainty in conifer sap flow as estimated with the heat-ratio method. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 223, p. 60–71, 2016.

LÓPEZ-BERNAL, Á. et al. Using sap flow measurements to estimate net assimilation in olive trees under different irrigation regimes. **Irrigation Science**, v. 33, n. 5, p. 357–366, 2015.

LÓPEZ-BERNAL, Á.; TESTI, L.; VILLALOBOS, F. J. A single-probe heat pulse method for estimating sap velocity in trees. **The New phytologist**, v. 216, n. 1, p. 321–329, 2017.

MARSHAL, D. C. MEASUREMENT OF SAP FLOW IN CONIFERS BY HEAT TRANSPORT. v. 33, n. 6, p. 385–396, 1958.

MI, C.-N. et al. Polyacetylenes from the Roots of Swietenia macrophylla King. **Molecules**, v. 24, n. 7, p. 1291, 2019.

MINER, G. L.; HAM, J. M.; KLUITENBERG, G. J. A heat-pulse method for measuring sap flow in corn and sunflower using 3D-printed sensor bodies and low-cost electronics. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 246, n. May, p. 86–97, 2017.

MOTA, C. S.; OLIVA CANO, M. A. Respostas fisiológicas de plantas jovens de

macaúba a condições de seca cíclica. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 87, p. 225, 2016.

MUKAROMAH, A. S.; PURWESTRI, Y. A.; FUJII, Y. Determination of Allelopathic Potential in Mahogany (Swietenia macrophylla King) Leaf Litter Using Sandwich Method. **Indonesian Journal of Biotechnology**, v. 21, n. 2, p. 93, 2017.

NEGREROS-CASTILLO, P.; MIZE, C. W. Soil-site preferences for mahogany (Swietenia macrophylla King) in the Yucatan Peninsula. **New Forests**, v. 44, n. 1, p. 85–99, 2013.

POBLETE-ECHEVERRÍA, C. A. .; FARIAS-ORTEGA, S. O. Evaluation of single and dual crop coefficients over a drip-irrigated Merlot vineyard (Vitis vinifera L.) using combined measurements of sap flow sensors and an eddy covariance system. Australian Journal of Grape and Wine Research, v. 19, p. 249–260, 2010.

PRINSLOO, G.; NOGEMANE, N. The effects of season and water availability on chemical composition, secondary metabolites and biological activity in plants. **Phytochemistry Reviews**, v. 17, n. 4, p. 889–902, 2018.

REN, R. et al. The effects of probe misalignment on sap flux density measurements and in situ probe spacing correction methods. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 232, p. 176–185, 2017.

RODRIGUEZ-DOMINGUEZ, C. M. et al. Concomitant measurements of stem sap flow and leaf turgor pressure in olive trees using the leaf patch clamp pressure probe. **Agricultural Water Management**, v. 114, p. 50–58, 2012.

RODRÍGUEZ-MORELOS, V. H. et al. Arbuscular mycorrhizal fungi associated with the rhizosphere of seedlings and mature trees of Swietenia macrophylla (Magnoliophyta: Meliaceae) in Los Tuxtlas, Veracruz, Mexico. **Revista Chilena de Historia Natural**, v. 87, n. 1, p. 1–10, 2014.

ROWEDER, C.; SOUZA, M. DE; BISPO, J. Produção de mudas de mogno sob diferentes substratos e níveis de luminosidade. v. 02, n. 3, p. 91–97, 2015.

SÁNCHEZ-COSTA, E.; POYATOS, R.; SABATÉ, S. Contrasting growth and water use strategies in four co-occurring Mediterranean tree species revealed by concurrent measurements of sap flow and stem diameter variations. **Agricultural and Forest**

Meteorology, v. 207, p. 24–37, 2015.

SÉRVULO, A. C. O. et al. African Mahogany transpiration with Granier method and water table lysimeter. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 5, p. 322–326, 2017.

SHAHIDIAN, S. et al. Leaf water potential and sap flow as indicators of water stress in Crimson 'seedless' grapevines under different irrigation strategies. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 28, n. 2, p. 221–239, 2016.

SILVA, J. G. M. et al. Qualidade da madeira de mogno brasileiro plantado para a produção de serrados Wood quality of Brazilian mahogany planted for lumber production. **Scientia Forestalis**, v. 47, n. 121, p. 1–12, 2019.

SILVA JUNIOR, M. L. DA et al. Crescimento de mogno-brasileiro e resistência a Hypsipyla grandella em função do cálcio e do boro. **Revista Árvore**, v. 38, n. 6, p. 1085–1094, 2015.

STEPPE, K. et al. Sap flow as a key trait in the understanding of plant hydraulic functioning. **Tree Physiology**, v. 35, n. 4, p. 341–345, 2015.

SULIMAN, B. Fatty acid composition and antibacterial activity of Swietenia Macrophylla king seed oil. African Journal of Plant Science, v. 7, n. 7, p. 300–303, 2014.

SUN, H.; AUBREY, D. P.; TESKEY, R. O. A simple calibration improved the accuracy of the thermal dissipation technique for sap flow measurements in juvenile trees of six species. **Trees - Structure and Function**, v. 26, n. 2, p. 631–640, 2012.

TAKEUCHI, S. et al. Sap flow in mango and guava seedlings irrigated with treated waste water in Jericho City, Palestine. **Acta Horticulturae**, n. 1222, p. 121–126, 2018.

VANDEGEHUCHTE, M. W.; STEPPE, K. Sap- fl ux density measurement methods : working principles and applicability. **Functional Plant Biology**, p. 213–223, 2013.

VENTURA, R. B.; SOTO, V. M.; OTINIANO, A. J. Efeito do déficit hídrico e do aumento de temperatura sobre variáveis produtivas fisiológicas e bioquímicas do "cacau" Theobroma cacao L. **Arnaldoa**, v. 26, n. 1, p. 287–296, 2019.

VERGEYNST, L. L. et al. Changes in stem water content influence sap flux density

measurements with thermal dissipation probes. Trees, v. 28, p. 949–955, 2014.

VIDYASAGARAN, K.; AJEESH, R.; KUMAR, V. Use of Municipal Garbage for the Production of Quality Swietenia macrophylla King (Mahogany) Seedlings. **Nature Environment and Pollution Technology**, v. 13, n. 4, p. 707–712, 2014.

VIÉGAS, I. DE J. M. et al. Visual symptoms and growth parameters linked to deficiency of macronutrients in young Swietenia macrophylla plants. Journal of Food, Agriculture and Environment, v. 10, n. 1, p. 937–940, 2012.

VIEIRA, C. R.; WEBER, O. L. DOS S. Avaliação De Substratos Na Produção De Mudas De Mogno. **Revista Uniara**, v. 18, n. 2, p. 153–166, 2015.

WANG, S. et al. New design of external heat-ratio method for measuring low and reverse rates of sap flow in thin stems. **Forest Ecology and Management**, v. 419–420, n. 26, p. 10–16, 2018.

ZHANG, J. et al. Radial variations in xylem sap flow and their effect on whole- tree water use estimates. **Hydrological Processes**, v. 5002, n. March, p. 4993–5002, 2015.

ZHANG, Z. et al. A comparison of methods for determining field evapotranspiration : photosynthesis system , sap flow , and eddy covariance. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 18, p. 1053–1072, 2014.

OBJETIVOS

1. Geral

Avaliar como a variação do conteúdo de água no solo influencia o fluxo de seiva e a transpiração de plantas jovens de mogno brasileiro e identificar as fontes de incerteza envolvidas no método da razão de calor em ótimas condições de umidade.

2. Específicos

Determinar o fluxo de seiva em condições de deficiência hídrica, reposição hídrica e irrigação plena;

Determinar o potencial total de água no solo que influencia negativamente o fluxo de seiva e a transpiração;

Correlacionar as variáveis fisiológicas fluxo de seiva e transpiração em ótimas condições de umidade;

Identificar quais as fontes de incerteza no método de razão de calor e qual destas têm maior peso no fluxo de seiva;

Determinar as equações de incerteza para o método da razão de calor.

CAPÍTULO I - FLUXO DE SEIVA E TRANSPIRAÇÃO DE PLANTAS JOVENS DE MOGNO BRASILEIRO SUBMETIDAS À VARIAÇÃO POTENCIAL DE ÁGUA NO SOLO

(Normas de acordo com a revista Agricultural and Forest Meteorology)

Resumo: O mogno brasileiro (*Swietenia macrophylla* King) é uma espécie florestal de grande interesse econômico e ambiental, devido a madeira de ótimo acabamento e sua utilização na recuperação e recomposição de ecossistemas, entretanto, o conhecimento de como essa espécie utiliza os recursos hídricos ainda necessita de esclarecimentos. Diante disso, objetivou-se avaliar o comportamento do fluxo de seiva e da transpiração em plantas jovens de mogno brasileiro sob condições variáveis de potencial de água no solo. O estudo foi desenvolvido em ambiente protegido com plantas cultivadas em lisímetros de pesagem, cujo solo em seu interior sofreu variações potenciais de água entre -10 kPa a -35 kPa em períodos de restrição hídrica, reidratação e irrigação plena. Para quantificar o uso de água no mogno mensurou-se o fluxo de seiva por pulso de calor, a transpiração por lisímetros de pesagem e a demanda evapotranspirométrica por variáveis temporais. Observou-se que o fluxo de seiva e a transpiração são influenciados negativamente pela variação potencial de água no solo. Ocorreu perda de água das folhas para atmosfera em condições de déficit hídrico, mesmo com ausência de fluxo de seiva ascendente. O fluxo de seiva foi reestabelecido após 4 dias da retomada das irrigações.

Palavras-Chave: Swietenia macrophylla King, pulso de calor, reidratação.

SAP FLOW AND TRANSPIRATION OF YOUNG BRAZILIAN MAHOGANY PLANTS SUBJECT TO SOIL WATER POTENTIAL VARIATION

Abstract: Brazilian mahogany (*Swietenia macrophylla* King) is a forest species of economic and environmental interest due to its wood's great finish and its use in recovering and recomposing ecosystems. However, clarification on how this species uses water resources is still necessary. This study proposes to evaluate sap flow and transpiration behavior in young Brazilian mahogany plants under variable conditions of soil water potential. We conducted the study in a protected environment and cultivated the plants in weighing lysimeters wherein the soil underwent potential variations between -10 kPa and -35 kPa during periods of water restriction, rehydration, and full irrigation. To quantify water use in the mahogany plants, we measured sap flow through heat pulses, transpiration through the weighing lysimeters, and evapotranspiration rate by time variables. We observed that sap flow and transpiration are affected negatively by soil water potential variation. The leaves lost water to the atmosphere under water deficit conditions, even with the absence of upward sap flow. Sap flow was restored four days after irrigation had resumed.

Keywords: Swietenia macrophylla King, heat pulse, rehydration.

1. INTRODUÇÃO

O mogno brasileiro (*Swietenia macrophylla* King) é uma espécie nativa do Brasil, pertencente à família Meliaceae, tendo em média 40 m de altura e 2 m de diâmetro (Leão, 2011). Sua madeira tem grande importância econômica devido a sua durabilidade e ótimo acabamento, muito usada na fabricação de móveis de luxo, artigos de decoração, instrumentos músicais e de precisão (Fernandes et al., 2017; Krisnawati et al., 2011). No Brasil, sua exploração econômica foi reduzida devido à pressão da broca do mogno (*Hypsipyla grandella* Zeller) sendo mais usada na recuperação de áreas degradadas e na recomposição de ecossistemas em função do rápido crescimento apical e homogeneidade (Rocha et al., 2016; Teixeira et al., 2013).

O manejo sustentável dos ecossistemas e dos recursos hídricos devem ser precedidos pela avaliação do uso da água pela planta e do entendimento sobre suas respostas fisiológicas a regimes hídricos diversos, bem como os fatores que governam tais mecanismos, e a chave para isso é o conhecimento da transpiração da planta (De Paula et al., 2013; Shen et al., 2015). Medições de fluxo de seiva são usadas como uma aproximação da transpiração, uma vez que, em pequenas escalas como minutos a horas, o fluxo de seiva pode ser direcionado para processos como armazenamento de água no tronco ou fotossíntese em folhas; entretanto, em escala diária, aproximadamente 99,0% são perdidos da planta por transpiração (Forster, 2017).

Existem diversos métodos que correlacionam a transpiração com o fluxo de seiva e têm sido usados nas pesquisas que concernem ao uso de água pelas plantas, como o de dissipação térmica (Hölttä et al., 2015; Sérvulo et al., 2017), equilíbrio de calor (Hoelscher et al., 2018; Zhao & Zhao, 2015) e o de velocidade de pulso de calor, a exemplo o de razão de calor desenvolvido por Burgess et al. (2001), que possui a vantagem, em relação a outros métodos, de permitir a medição de fluxos baixos (lentos) e reversos (negativo) (Fuchs et al., 2017; Miner et al., 2017).

Todavia, os métodos de determinação de fluxo de seiva possuem restrições

metodológicas distintas, estando sujeitos a problemas como o contato incompleto da sonda com o caule, gradientes naturais de temperatura (GNT), parâmetros específicos para espécies, incerteza nas estimativas de fluxo de linha de base, efeitos de ferimento e desvio de sensor (Vandegehuchte & Steppe, 2013) o que leva a necessidade de estudos mais aprofundados sobre a viabilidade da utilização desses métodos em espécies sob condições adversas de desenvolvimento, como a variação potencial de água no solo.

Sabe-se que o potencial de água no solo influência direta ou indiretamente os fatores que governam o movimento de água na planta, como o armazenamento, o fluxo de seiva e as trocas gasosas, constituindo-se em um importante parâmetro para o entendimento da relação água-solo-planta-atmosfera e como as espécies lidam com a dinâmica da água no meio (Evett et al., 2012; Klein et al., 2014; Verhoef & Egea, 2014).

Diante do exposto, objetivou-se avaliar o comportamento do fluxo de seiva e da transpiração em plantas jovens de mogno brasileiro sob condições variáveis de potencial de água no solo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área experimental, instrumentação e condições do experimento

O estudo foi desenvolvido em ambiente protegido situado em área experimental pertencente à Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), Cruz das Almas – BA (39°06' W; 12°48' S). Foram estudadas plantas jovens de mogno brasileiro com 18 meses de idade cultivadas em 4 lisímetros de pesagem. Os lisímetros foram compostos por tanques de 0,5 m³ de capacidade, dispostos sobre plataformas de pesagem com célula de carga, modelo AL90901T - Alfa Instrumentos (1000 kg x 0,1kg). Na base dos tanques foram instalados sistemas de drenagem constituídos por camadas de 10 cm de brita nº 01; 1 cm de areia lavada; e, tela do tipo sombrite entre os elementos filtrantes. Sobre o sistema de drenagem acomodou-se um Latossolo Amarelo de textura franco-argilosa, destorroado e seco ao ar.

As variáveis climáticas mensuradas foram a temperatura do ar (°C) e umidade relativa do ar (%) por um termohigrômetro modelo HC2S3 da Campbell Scientific® e a radiação (MJ m⁻²) por um piranômetro modelo LP 02 da fabricante Hukseflux®.
As irrigações foram realizadas por meio de gotejadores autocompensantes utilizando microtubos como extensores da linha de derivação, pressurizados por conjunto motor-bomba.

2.2 Modelagem inversa

O potencial de água no solo foi determinado por modelagem inversa e, para isso, a massa total do conjunto lisimétrico (tanque, dreno e solo-seco) foi determinada antes da primeira aplicação de água via irrigação, pois, valores de conteúdo de água no solo (Θ) do interior do lisímetro foram obtidos pela diferença entre a massa seca e úmida do solo registradas pelas variações de massa obtidas no lisímetro.

Os valores de Θ foram convertidos em valores de potencial de água no solo. Para tanto, os parâmetros hidráulicos do solo, i.e (isto é), curva de retenção de água no solo e condutividade hidráulica saturada, foram obtidos via modelagem inversa. Na aplicação da modelagem inversa, procedeu-se com a saturação do solo de um lisímetro de pesagem sem planta, preenchido com o mesmo solo utilizado nos lisímetros de cultivo. Após a saturação e com o dreno fechado, o solo passou a secar sob efeito apenas de evaporação, por período de 26 dias. As variações do conteúdo de água no solo (Θ) foram mensuradas utilizando 4 sondas de Time-Domain-Reflectometry (TDR) instaladas a 0,10, 0,20, 0,30 e 0,40m de profundidade no solo do lisímetro de pesagem. As variações de evaporação foram obtidas por meio das variações de massa registradas no lisímetro de pesagem. Os dados de Θ e evaporação foram medidos em intervalos de 1 hora.

Os dados horários de Θ e evaporação foram inseridos no software HYDRUS – 1D, version 4.16.0110 (Simunek et al., 2013). Por meio do uso do HYDRUS – 1D resolveuse a eq. 1 de (Richards, 1931) para estimativa do fluxo de água no solo:

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \left(\frac{\partial h(\theta)}{\partial z} - 1 \right) \right] \tag{1}$$

em que h é a pressão de água no solo (m H₂O), Θ é o conteúdo de água no solo (m³ m⁻³), t é o tempo (h), z é a coordenada vertical (m) e K(Θ) representa a função condutividade hidráulica do solo (m h⁻¹).

O modelo de Mualem-van Genuchten (Mualem, 1976; Van Genuchten, 1980) foi utilizado para descrever a curva de retenção de água no solo (SWRC) e a curva de condutividade de água no solo (SWCC).

A SWRC é descrita pela eq. 2 e SWCC descrita pela eq. 3:

$$\begin{cases} \theta(h) = \theta_s & h \ge 0\\ \theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[\frac{1}{1 + |\alpha h|^n} \right]^{\left(1 - \frac{1}{n}\right)} & h < 0 \end{cases}$$
(2)

$$K(\theta) = K_{S} S_{e}^{\lambda} \left[1 - \left(1 - S_{e} \frac{n}{n-1} \right)^{1 - \frac{1}{n}} \right]^{2}$$
(3)

Em que: S_e é a saturação efetiva, definida como S_e = $(\Theta - \Theta_r)/(\Theta_s - \Theta_r)$; $\Theta_r e \Theta_s o$ conteúdo de água residual e saturado (m³ m⁻³), respectivamente; h é pressão (m H₂O), K(Θ) e Ks a condutividade hidráulica do solo e condutividade hidráulica saturada do solo (m h⁻¹), α (m⁻¹), n e λ são parâmetros empíricos.

No HYDRUS-1D os parâmetros hidráulicos do solo (α , n, λ e Ks) foram determinados pela minimização das diferenças de Θ observados (obtida por TDR) e simulados no espaço-tempo. Assim, o total das diferenças obtidas entre valores de Θ observados e simulados foi expresso por uma função objetiva, Φ , definida como:

$$\Phi(\theta,\beta) = \sum_{j=1}^{m} \sum_{i=1}^{nj} \left[\theta_{TDR,j}(z_i,t_i) - \theta_{PRED,j}(z_i,t_i,\beta) \right]^2$$
(4)

em que, o lado direito da igualdade da eq. 4 representa o resíduo entre o conteúdo de água no solo observado na TDR (Θ_{TDR}) no tempo *ti* para *j*_{th} medidas em *z_i*, e os correspondentes valores de conteúdo de água no solo estimados (Θ_{EST}) utilizando os parâmetros hidráulicos do solo otimizados em β (i.e., Θ_r , Θ_s , α , n, Ks e λ); *m* é o número de diferentes locais de medidas de Θ ; e *n* o número de medidas realizadas em um *m*. A minimização da função objetiva Φ é realizada utilizando o método de minimização não-linear de Levenberg-Marquardt. Os indicadores estatísticos resultantes da minimização da eq. 4 para obtenção de Θ_r , Θ_s , α , n, K_s e λ (eqs. 2 e 3) encontram-se dispostos na Tabela 1.

θs	$\Theta_{\rm r}$	α	n	λ	Ks	D ²	DMCE
$m^3 m^{-3}$		m^{-1}			$m h^{-1}$	K	RMSE
0,472	0,022	5,5	1,52	0,008	3 x 10 ⁻³	0,93	0,006

Tabela 1. Parâmetros hidráulicos do Latossolo Amarelo no interior do lisímetro.

 Θ_s conteúdo de água saturado, Θ_r – conteúdo de água residual, n e λ - parâmetros empíricos de ajuste, Ks – condutividade hidráulica saturada, R² - Coeficiente de determinação, *RMSE* – *Raiz quadrada do erro médio*.

Com os parâmetros da Tabela 1, estimou-se diariamente valores médios de pressão da água no solo com base em valores de Θ obtidos pelas variações de massa no lisímetro.

2.3 Determinação do fluxo de seiva e transpiração

Para determinação do fluxo de seiva (FS) utilizou-se o pulso de calor pelo método da razão de calor (HRM) proposto por (Marshal, 1958) e modificado por (Burgess et al., 2001), conforme descrito por Davis et al. (2012) e Skelton et al.(2013). Para isso, sondas foram construídas com comprimento de 20 mm e diâmetro igual a 1,2 mm, utilizando agulha hipodérmica de uso farmacêutico. Em cada planta foram inseridas um conjunto de 2 sondas para medição da temperatura de seiva (termopar) e 1 aquecedor para gerar o pulso de calor.

As sondas termopares do tipo T (cobre-constantan) foram construídos com fios de 0,13 mm de diâmetro (Omega Engineering Inc.) e posicionado na porção média do interior da agulha, posteriormente isolados com resina epóxi. Na sonda de aquecimento, fio de Constantan foi enrolado na parte externa da agulha, de forma que seu comprimento permitia uma resistência de 60 Ω . As sondas termopares foram instaladas equidistantes a 0,6 cm do aquecedor e envolvidas por papel laminado em forma de "saia", afim de reduzir os efeitos dos gradientes térmicos naturais (GNT) nas medições.

Os detalhes das sondas construídas e dos lisímetros usados no experimento estão exemplificados na figura 1.



Figura 1. Sonda de aquecimento (a), termopar do tipo T (b), conjunto de sondas instaladas no caule a 10 cm da superfície do solo (c) e lisímetro de pesagem (d).

Todos os instrumentos foram interligados a um *datalogger* modelo CR1000 da Campbell Scientific®, previamente programado para excitar os aquecedores com tensão de 12V, gerando uma potência dissipada de 2,4 W quando aquecida. O tempo do pulso aplicado era de 10 s em intervalos de 10 min entre os pulsos. As variações de temperatura medidas nas sondas termopar, para um tempo de medição de 80 s após a aplicação do pulso de calor, foram armazenados em intervalos de 10 minutos no datalogger. Testes preliminares foram realizados objetivando ajustar o tempo dos pulsos, o intervalo entre pulsos e o tempo de medição dos incrementos de temperatura nas sondas superior e inferior após a aplicação dos pulsos (dados não divulgados).

A velocidade de seiva (V_h) foi calculada pela eq. 5 e o espaçamento corrigido da sonda inferior ao aquecedor (x_2) por meio da eq. 6, em condição de fluxo nulo $(V_h = 0)$. A condição de fluxo nulo foi imposta seccionando o caule acima e abaixo do conjunto de sondas após o período de avaliação e a razão $ln\left(\frac{v_1}{v_2}\right)$ foi usada para corrigir (x_2) (Vandegehuchte & Steppe, 2013; Forster, 2014).

$$V_h = \frac{4kt\ln(v_1/v_2) - (x_2^2) + (x_1^2)}{2t(x_1 - x_2)} \,3600 \tag{5}$$

$$x_2 = \sqrt{4kt \ln(v_1/v_2) + (x_1^2)}$$
(6)

em que V_h é a velocidade do pulso de calor, em cm h^{-1} ; k a difusividade térmica, em cm² s⁻¹; t é o tempo de medição do pulso de calor, em s; v₁ e v₂ são os incrementos de

temperatura após o pulso de calor nas sondas superior e inferior, em °C, respectivamente; e x_1 e x_2 são as distância das sondas superior e inferior à posição do aquecedor, em cm.

A velocidade do pulso de calor (V_h) foi corrigida (V_c) pela eq. 7, assumindo o coeficiente linear (β) encontrado por Burgess et al. (2001) para espaçamentos de sonda iguais a 0,6 cm e diâmetro de ferida de 0,17 cm.

$$V_c = \beta V_h \tag{7}$$

A velocidade do pulso de calor foi convertida em velocidade de seiva (V_s) considerando as propriedades térmicas da madeira e o conteúdo de seiva do caule (eq. 8).

$$V_{\rm s} = \frac{V_c \,\rho_{b\,(c_{\rm W+}\,m_c c_{\rm s})}}{\rho_{\rm s} c_{\rm s}} \tag{8}$$

em que ρ_b é a densidade básica da madeira, em Kg m⁻³; ρ_s a densidade da água (1000 Kg m⁻³); c_w e c_s são as capacidades caloríficas da matriz da madeira e da seiva a 20 °C, respectivamente iguais a 1200 J Kg⁻¹ °C⁻¹ e 4182 J Kg⁻¹ °C⁻¹ e m_c equivale ao conteúdo de água do alburno, em Kg.

Para a determinação de $\rho_b e m_c o$ procedimento adotado foi a retirada de discos de 2 cm de espessura no caule, acima da posição das sondas, seguido de pesagem em balança analítica com precisão de 0,01g e secagem a 75 °C em estufa com ventilação forçada de ar por um período de 72 horas (Costa et al., 2016). A ρ_b é a razão entre a massa seca e o volume da amostra (determinado pelo princípio de Arquimedes) e m_c corresponde à razão da diferença entre a massa úmida e seca, relativas ao peso seco da amostra.

A difusividade térmica (k) foi calculada pela eq. 9 após a determinação dos parâmetros necessários, i.e, condutividade térmica da madeira fresca (K_{gw}) (eq. 10), condutividade térmica da madeira seca (K_w) (eq. 11), fração porosa (F_v) e a capacidade calorífica da madeira (c) pelas eqs. 12 e 13, respectivamente.

$$k = \frac{K_{gw}}{\rho c} 10000 \tag{9}$$

em que K_{gw} é condutividade térmica da madeira fresca, em J m⁻¹ s⁻¹ °C⁻¹; ρ equivale à densidade da madeira fresca, em Kg m⁻³ e c a capacidade calorífica da madeira fresca, em

$$K_{gw} = K_s \, m_c \, \frac{\rho_b}{\rho_s} + K_w (1 - m_c \, \frac{\rho_b}{\rho_s}) \tag{10}$$

$$K_w = 0,04182(21,0-20,0F_v) \tag{11}$$

$$F_{\nu} = 1 - \left(\frac{\rho_b 0.6536 + m_c}{1000}\right) \tag{12}$$

$$c = (\frac{w_d c_w + c_s (w_f - w_d)}{w_f})$$
(13)

em que K_s é condutividade térmica da água (5,984 x 10^{-1 J} m⁻¹ s⁻¹ °C⁻¹); K_w a condutividade térmica da madeira seca, em J m⁻¹ s⁻¹ °C⁻¹; F_v é igual a fração porosa da madeira, adimensional e w_d e w_f são, respectivamente, o peso seco e fresco da amostra, Kg. Por fim, o fluxo de seiva foi calculado pelo produto da velocidade de seiva (eq. 8) e a área da seção condutora, determinada com auxílio do software Image Pro Plus ®. para integralização matemática de imagens das amostras das seções condutoras.

A transpiração do mogno foi quantificada por meio das variações de massa no lisímetro. Para isso, os lisímetros foram cobertos com lona plástica para evitar variações de massa oriundas do processo de evaporação

2.4 Período de avaliação e análise dos dados

As avaliações ocorreram entre os dias 13/07/2018 e 04/08/2018 e as plantas foram submetidas à condições variáveis de potencial de água no solo, caracterizados como: (1) período de restrição hídrica (13/07 a 23/07), em que a irrigação foi suspensa para provocar variações negativas-contínuas do potencial de água no solo até que cessasse o fluxo de seiva ascendente; (2) período de reidratação (23/07 a 30/07), em que a irrigação foi retomada e o potencial de água no solo foi elevado para próximo ao limite teórico da capacidade de campo (- 10 kPa) e (3) período de irrigação plena (30/07 a 04/08) onde realizou-se irrigações diárias, com potencial de água no solo variando em torno de -10 e -15 kPa.

Para melhor entendimento dos dados coletados foram gerados gráficos que expressam as variações do potencial de água no solo e fluxo de seiva, para cada período de avaliação; as curvas de fluxo de seiva ascendente (FS>0), fluxo de seiva inverso (FS<0) e transpiração durante o período de estudo; a diferença entre fluxo de seiva e transpiração acumulados ao longo do tempo; as regressões lineares segmentadas que correlacionam o fluxo de seiva e transpiração normalizados pela evapotranspiração de referência (Eto) com o potencial de água no solo. Para a normalização do fluxo de seiva e da transpiração a Eto foi calculada pelo método de Penman-Monteith, seguindo instruções contidas no Boletim FAO 56 para condições de ambiente protegido e dados faltantes (Allen, 2006).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No período de restrição hídrica, o fluxo de seiva diminuiu progressivamente em resposta à redução contínua do potencial de água no solo (Figura 2).



Figura 2. Variação do fluxo de seiva em resposta à redução do potencial de água no solo no período de restrição hídrica.

Observou-se a existência de fluxo de seiva negativo (reverso) em todo o período, sendo mais pronunciado a partir do dia 16/07 quando o potencial de água no solo passou a ser inferior a -32 kPa, resultando em fluxo ascendente praticamente nulo abaixo deste valor. Os resultados apresentados mostram que a umidade do solo governou a variação do fluxo de seiva em mogno africano.

Quando a disponibilidade de água é limitada, as plantas são confrontadas pelo alto potencial osmótico circundante, levando à perda de turgor inicial no sistema radicular devido à combinação de sinalização e ajustamento (Koevoets et al., 2016). Apenas a redução do conteúdo de água no solo é suficiente para afetar a absorção de água pelas raízes e desencadear respostas fisiológicas, como a redução das taxas de seiva e condutância estomática, afim de conservar água e evitar potenciais de água críticos que resultariam em falha hidráulica, como a cavitação e posterior embolia, além da regulação negativa do fluxo de seiva (Brinkmann et al., 2016; Tombesi et al., 2018; Xia et al., 2017).

No dia 23/07 o potencial de água no solo foi elevado de -35 kPa para próximo de -15 kPa e mantido até o término do estudo. Observou-se, na primeira noite do período de reidratação, a maior intensidade de fluxo reverso de todo período estudado (Figura 3).



Figura 3. Variação do fluxo de seiva em resposta à reidratação da planta após período de déficit hídrico.

Isso ocorre devido à variação da disponibilidade de água no solo, cujo aumento possibilitou, primeiramente, a reidratação do sistema radicular e depois a parte aérea da planta, pois, observou-se a ocorrência apenas de fluxo ascendente à noite entre os dias 26 a 28/07. Também foi observado que após a elevação do potencial de água no solo houve abscisão das folhas mais velhas, resultado de uma estratégia fisiológica do mogno visando manter processos essenciais, como a manutenção da turgescência de folhas novas e a recarga hídrica do caule.

Respostas fisiológicas e genéticas demonstram que a reação inicial de plantas à seca decorre do papel de sinais elétricos e/ou hidráulicos emitidos das raízes para as folhas, resultando no aumento do potencial hídrico local e aumento de tensão nos vasos do xilema, que será retransmitido para a parte aérea (Brunner, 2015). O aumento da condutividade hidráulica de raízes de Argania spinosa sob restrição hídrica e após curto período de reidratação, foi relatado por (Chakhchar et al., 2018), demonstrando-se tratar de uma resposta fisiológica da raiz como estratégia de recuperação à seca. O estado fenológico e a idade de folhas também foram considerados fatores bióticos determinantes na abscisão foliar e na variação do fluxo de seiva em Ouercus variabilis em estudo reportado por Zhu et al. (2017), além disso, o pecíolo foliar funciona como um fusível hidráulico e é indicado como o órgão que define a tensão máxima suportada por uma planta em condições de estresse hídrico (Tombesi et al., 2018). Em plantas de oliveira sob déficit hídrico, a regulação negativa da condutância estomática das folhas favoreceram o funcionamento hidráulico do caule (Torres-Ruiz et al., 2015). Esses achados reforçam os resultados apresentados de que o mogno modulou a direção do fluxo de seiva e a perda de folhas para favorecer a dinâmica hídrica entre os componentes raiz e parte aérea (caule e folhas).

Com a elevação do potencial de água no solo houve o reestabelecimento de fluxo de seiva, acendente e reverso, decorridos 4 dias após a irrigação (30/07 a 04/08) (Figura 4). Em estudo conduzido anteriormente por Albuquerque et al. (2013), objetivando avaliar a capacidade de recuperação do status hídrico foliar e trocas gasosas em *Khaya ivorensis* sob 14 dias de restrição hídrica, estes veriricaram o total reestabelecimento do status hídrico em 3 dias após a retomada das irrigações.

É importante salientar que a ocorrência dos fluxos ascendentes noturnos em dias subsequentes indicara o período de reestabelecimento do fluxo de seiva no mogno após o evento de seca. A ocorrência de fluxos noturnos em todas as espécies e na maioria das noites, é comum e necessária ao funcionamento hidráulico da planta, afetando o equilíbrio na relação entre o potencial hídrico solo-planta na antemanhã, com consequências para as metodologias de campo que medem o estresse hídrico em plantas (Forster, 2014). Dessa forma, a quantificação de fluxo reverso (FS<0) a partir do dia 30/07 mostra a normalização do fluxo de seiva no mogno após a reidratação.



Figura 4. Reestabelecimento de fluxo de seiva após elevação do conteúdo de água no solo.

O fluxo de seiva positivo (FS>0), o fluxo de seiva negativo (FS<0) e a transpiração durante todo o período observado (figura 5). Nota-se a ocorrência de transpiração mesmo com fluxo de seiva positivo próximo de zero no período de restrição hídrica e esse comportamento é possível devido à perda de água dos tecidos foliares para a atmosfera sem que ocorra reidratação advinda do caule por fluxo de seiva por se tratar de planta de porte alto. Estudos mais refinados mostram que baixos conteúdos de água no solo geram uma disfunção hidráulica e mudança no status hídrico da planta, ou seja, a disfunção hidráulica do xilema impulsiona o declínio hidráulico de folha inteira, com consequente desidratação ou ponto de perda de turgescência (John; Henry, 2018; Trueba et al., 2019; Zhu et al., 2018).



Figura 5. Fluxo de seiva e transpiração de mogno ao longo do tempo.

Após a irrigação ocorrida no dia 23/07 o fluxo de seiva ascendente aproximou-se dos valores de transpiração, superando-o posteriormente, entretanto, devido à ocorrência de abscisão foliar entre os dias 25 a 27/07 não se pode associar o FS>0 com a transpiração, apenas evidenciar que este foi em média 2,0 L dia⁻¹, enquanto que FS<0 esteve próximo de zero. Além da abscisão foliar, o crescimento de folhas novas influenciou nas variações de massa no lisímetro usadas para quantificar a transpiração.

A partir do dia 31/07, no período de irrigação plena, observou-se uma boa associação entre FS > 0 e a transpiração devido a manutenção do potencial de água no solo próximo à capacidade de campo. Esses resultados são importantes, pois mostram que dados de fluxo de seiva devem ser usados com cautela quando for associá-lo com transpiração, uma vez que a variação do potencial de água no solo é responsável por alterações fisiológicas diversas nas plantas.

Analisando a curva diária da diferença entre fluxo de seiva e transpiração (figura 6), vê-se que, em condições de restrição hídrica o fluxo de seiva no mogno é menor do que a transpiração, com uma variação máxima de -2,0 L. No período de irrigação plena o

fluxo de seiva também foi menor do que transpiração entre os dias 31/07 a 02/08, em média a -0,5 L dia⁻¹, e a partir dessa data a diferença foi próxima de zero. Essa variação é atribuída à diferença inerente nos processos fisiológicos (fluxo de seiva e transpiração) nas condições do experimento, haja visto a variabilidade temporal entre ambos, a variabilidade potencial de água no solo e das propriedades térmicas da madeira que tendem a variar com o potencial de água no solo.



Figura 6. Diferença entre fluxo de seiva e transpiração acumulados ao longo do tempo

O método da razão de calor possui uma abordagem sólida em relação à física da dissipação de calor, mas sugerem estimar a difusividade térmica a nível de árvore para melhorar a variabilidade do método (Fuchs et al., 2017), além disso, estudos que empregam o método HRM considerando a difusividade térmica (k) padrão de Marshal (2,5x10⁻³ cm² s⁻¹) ou estimam essa variável ao final do experimento, podem incorrer em sub ou superestimação dos valores de transpiração, constituindo um erro de método (Forster, 2017). No presente estudo verificou-se a necessidade de mais pesquisas objetivando ajustar as propriedades térmicas de *Swietenia macrophylla* King para cada condição de variação de potencial de água no solo.

A influência do potencial de água no solo nos componentes fluxo de seiva e transpiração, normalizados pela evapotranspiração de referência, é mostrada na figura 7.



Figura 7. Relação da razão fluxo de seiva e evapotranspiração e potencial de água no solo (a) e transpiração e evapotranspiração por potencial de água no solo (b) em todo o período de avaliação.

Em ambos os processos fisiológicos observou-se variações para potenciais abaixo de um limite crítico de -27,8 kPa, de aproximadamente 15% no fluxo de seiva e 5,4% na transpiração para cada incremento de potencial de água no solo. Entre o limite crítico de -27,8 kPa até -32,2 kPa o fluxo de seiva corresponde, em média a 0,678 L mm⁻¹ de Eto e a transpiração à 0,551 L mm⁻¹ de Eto. O potencial de água no solo o qual o fluxo de seiva do mogno brasileiro passa a ser reverso (FS<0) corresponde àquele menor que -32,2 kPa.

Ainda é incipiente o conhecimento sobre tecnologias de plantio e monitoramento de espécies florestais como o mogno brasileiro e, esse limite crítico de potencial de água no solo pode auxiliar pesquisadores e produtores nas estratégias de inserção dessa espécie na recuperação de áreas degradadas, no cultivo em regiões com deficiência hídrica, em sistemas agrosilvopastoris e na produção de mudas, pois consiste em um parâmetro importante para a quantificação da demanda no balanço hídrico.

4. CONCLUSÃO

O fluxo de seiva e a transpiração em mogno brasileiro são influenciados pela variação de água no solo, principalmente abaixo de um limite crítico de -27,8 kPa até - 32,2 kPa, quando o fluxo é nulo;

Nas variações próximas aos -35 kPa, ocorreu transpiração no mogno brasileiro mesmo com ausência de fluxo de seiva ascendente, devido à perda de água dos tecidos foliares para a atmosfera.

O mogno brasileiro reestabeleceu o fluxo de seiva após 4 dias da elevação do potencial de água no solo para próximo da capacidade de campo.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), ao Instituto Federal Goiano (IF Goiano) e à Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB) pelo auxílio financeiro ao presente projeto de pesquisa.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albuquerque, M.P.F. de, Moraes, F.K.C., Santos, R.I.N., Castro, G.L.S. de, Ramos, E.M.L.S., Pinheiro, H.A., 2013. Ecofisiologia de plantas jovens de mogno-africano submetidas a deficit hídrico e reidratação. Pesqui. Agropecu. Bras. 48, 9–16. https://doi.org/10.1590/S0100-204X2013000100002
- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D; Smith, M., 2006. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage, Paper 56.

- Brinkmann, N., Eugster, W., Zweifel, R., Buchmann, N., Kahmen, A., 2016. Temperate tree species show identical response in tree water de fi cit but di ff erent sensitivities in sap fl ow to summer soil drying 1508–1519. https://doi.org/10.1093/treephys/tpw062
- Brunner, I., 2015. How tree roots respond to drought 6, 1–16. https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00547
- Burgess, S., Adams, M.A., Turner, N.C., Beverly, C.R., Ong, C.K., Khan, A.A.H., T.M.Bleby, 2001. An improved heat pulse method to measure low and resever rates of sap flow in woody plants. Tree Physiol. 21, 589–598.
- Chakhchar, A., Chaguer, N., Ferradous, A., Modafar, C. El, 2018. Root system response in Argania spinosa plants under drought stress and Root system response in Argania spinosa plants under drought stress and recovery. Plant Signal. Behav. 13, 1–5. https://doi.org/10.1080/15592324.2018.1489669
- Da Rocha, K.J., Caldeira, S.F., Brondani, G.E., 2016. Development of Swietenia macrophylla King in escape areas. Sci. For. Sci. 44, 281–291. https://doi.org/10.18671/scifor.v44n110.01
- Davis, T.W., Kuo, C.-M., Liang, X., Yu, P.-S., 2012. Sap Flow Sensors: Construction, Quality Control and Comparison. Sensors 12, 954–971. https://doi.org/10.3390/s120100954
- De Paula, M.T.; Santos Filho, B.G.; Cordeiro, Y.E.M.; Conde ; Neves, P. A. P. F. G., 2013. Ecofisiologia do mogno brasileiro (*Swietenia macrophylla* King) em sistemas agroflorestais no município de Santa Bárbara-PA. Enciclopedia Biosfera, 9, 813-824.
- Evett, S.R., Schwartz, R.C., Casanova, J.J., Heng, L.K., 2012. Soil water sensing for water balance, ET and WUE. Agric. Water Manag. 104, 1–9. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.12.002
- Fernandes, A.M. V., Gama, J.R. V., Rode, R., Melo, L. de O., 2017. Equações volumétricas para Carapa guianensis Aubl. e Swietenia macrophylla King em sistema silvipastoril na Amazônia. Nativa 5, 73–77. https://doi.org/10.5935/2318-7670.v05n01a12
- Forster, M., 2017. How Reliable Are Heat Pulse Velocity Methods for Estimating Tree Transpiration? Forests 8, 350. https://doi.org/10.3390/f8090350
- Forster, M.A., 2014. How significant is nocturnal sap flow? Tree Physiol. 34, 757–765. https://doi.org/10.1093/treephys/tpu051

- Fuchs, S., Leuschner, C., Link, R., Coners, H., Schuldt, B., 2017. Calibration and comparison of thermal dissipation, heat ratio and heat field deformation sap flow probes for diffuse-porous trees. Agric. For. Meteorol. 244–245, 151–161. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.04.003
- Hoelscher, M.T., Kern, M.A., Wessolek, G., Nehls, T., 2018. A new consistent sap flow baseline-correction approach for the stem heat balance method using nocturnal water vapour pressure deficits and its application in the measurements of urban climbing plant transpiration. Agric. For. Meteorol. 248, 169–176. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.09.014
- Hölttä, T., Linkosalo, T., Riikonen, A., Sevanto, S., Nikinmaa, E., 2015. An analysis of Granier sap flow method, its sensitivity to heat storage and a new approach to improve its time dynamics. Agric. For. Meteorol. 211–212, 2–12. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.05.005
- John, G.P., Henry, C., 2018. Leaf rehydration capacity : Associations with other indices of drought tolerance and environment 2638–2653. https://doi.org/10.1111/pce.13390
- Klein, T., Rotenberg, E., Cohen-Hilaleh, E., Raz-Yaseef, N., Tatarinov, F., Preisler, Y., Ogée, J., Cohen, S., Yakir, D., 2014. Quantifying transpirable soil water and its relations to tree water use dynamics in a water-limited pine forest. Ecohydrology 7, 409–419. https://doi.org/10.1002/eco.1360
- Koevoets, I.T., Venema, J.H., Elzenga, J.T.M., Testerink, C., 2016. Roots Withstanding their Environment : Exploiting Root System Architecture Responses to Abiotic Stress to Improve Crop Tolerance 7, 1–19. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01335
- Krisnawati, H., Kallio, M., Kanninen, M., 2011. Swietenia macrophylla King: Ecology, silviculture and productivity 14. https://doi.org/10.5502/ijw.v6i1.487
- Leão, N.V.M., 2011. Colheita de Sementes e Produção de Mudas de Espécies Florestais Nativas. Embrapa Amaz. Orient. 1–52. https://doi.org/1517-2201
- Marshal, D.C., 1958. Measurement of sap flow in conifers by heat transport, 33, 385–396.
- Miner, G.L., Ham, J.M., Kluitenberg, G.J., 2017. A heat-pulse method for measuring sap flow in corn and sunflower using 3D-printed sensor bodies and low-cost electronics. Agric. For. Meteorol. 246, 86–97. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.06.012

Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated

porous media. Water Resources Reserarch, 12, 513–522. https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513

- Richards, L.A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. J. Appl. Phys. 1, 318–333. https://doi.org/10.1063/1.1745010
- Sérvulo, A.C.O., Vellame, L.M., Casaroli, D., Alves Júnior, J., Souza, P.H. de, Sérvulo, A.C.O., Vellame, L.M., Casaroli, D., Alves Júnior, J., Souza, P.H. de, 2017. African Mahogany transpiration with Granier method and water table lysimeter. Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient. 21, 322–326. https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n5p322-326
- Shen, Q., Gao, G., Fu, B., Lü, Y., 2015. Sap flow and water use sources of shelter-belt trees in an arid inland river basin of Northwest China. Ecohydrology 8, 1446–1458. https://doi.org/10.1002/eco.1593
- Simunek, J.; Sejna, M.; Saito, H.; Sakai, M.; Van Genuchten, M., 2013. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movementeries 3, Department of Environmental Sciences, University of California, Riverside, California, USA, p. 343.
- Skelton, R.P., West, A.G., Dawson, T.E., Leonard, J.M., 2013. External heat-pulse method allows comparative sapflow measurements in diverse functional types in a Mediterranean-type shrubland in South Africa. Funct. Plant Biol. 40, 1076–1087. https://doi.org/10.1071/FP12379
- Teixeira, W.F., Fagan, E.B., Silva, J.O., Silva, P.G. da, Silva, F.H., Sousa, M.C., Canedo,
 S. de C., 2013. Nitrate reductase activity and growth of Swietenia macrophylla King
 under shading effect. Floresta e Ambient. 20, 91–98.
 https://doi.org/10.4322/floram.2012.068
- Tombesi, S., Frioni, T., Poni, S., Palliotti, A., 2018. E ff ect of water stress "memory" on plant behavior during subsequent drought stress. Environ. Exp. Bot. 150, 106– 114. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.03.009
- Torres-Ruiz, J.M., Diaz-Espejo, A., Perez-Martin, A., Hernandez-Santana, V., 2015. Role of hydraulic and chemical signals in leaves, stems and roots in the stomatal behaviour of olive trees under water stress and recovery conditions. Tree Physiol. 35, 415–424. https://doi.org/10.1093/treephys/tpu055
- Trueba, S., Pan, R., Scoffoni, C., John, G.P., Davis, S.D., 2019. Thresholds for leaf damage due to dehydration : declines of hydraulic function , stomatal conductance and cellular integrity precede those for photochemistry.

https://doi.org/10.1111/nph.15779

- Vandegehuchte, M.W., Steppe, K., 2013. Sap- fl ux density measurement methods: working principles and applicability. Functional Plant Biol. 213–223. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1071/FP12233
- Van Genuchten, M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, 44, 892– 898. http://10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x
- Verhoef, A., Egea, G., 2014. Modeling plant transpiration under limited soil water: Comparison of different plant and soil hydraulic parameterizations and preliminary implications for their use in land surface models. Agric. For. Meteorol. 191, 22–32. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.02.009
- Xia, J.B., Zhao, Z.G., Sun, J.K., Liu, J.T., Zhao, Y.Y., 2017. Response of stem sap flow and leaf photosynthesis in Tamarix chinensis to soil moisture in the Yellow River Delta, China 55, 368–377. https://doi.org/10.1007/s11099-016-0651-6
- Zhao, L., Zhao, W., 2015. Canopy transpiration obtained from leaf transpiration, sap flow and FAO-56 dual crop coefficient method. Hydrol. Process. 29, 2983–2993. https://doi.org/10.1002/hyp.10417
- Zhu, L., Hu, Y., Zhao, X., Zeng, X., Zhao, P., Zhang, Z., Ju, Y., 2017. The impact of drought on sap flow of cooccurring Liquidambar formosana Hance and Quercus variabilis Blume in a temperate 1–9. https://doi.org/10.1002/eco.1828
- Zhu, S., Chen, Y., Ye, Q., He, P., Liu, H., Li, R., Fu, P., Jiang, G., Cao, K., 2018. Leaf turgor loss point is correlated with drought tolerance and leaf carbon economics traits 658–663. https://doi.org/10.1093/treephys/tpy013

CAPÍTULO II- INCERTEZAS NO FLUXO DE SEIVA DE MOGNO BRASILEIRO ESTIMADO PELO MÉTODO DA RAZÃO DE CALOR

(Normas de acordo com a revista Floresta e Ambiente)

Resumo: O mogno brasileiro é uma espécie arbórea tropical, muito importante econômica e ecologicamente, cujos parâmetros ecofisiológicos, como o fluxo de seiva, melhoram o entendimento sobre a espécie. Objetivou-se contribuir com as incertezas envolvidas na aplicação do método de razão de calor usado na determinação do fluxo de seiva do mogno brasileiro. Para isso, conjuntos de sondas de aquecimento e medição de temperatura foram instalados em plantas de 18 meses de idade, cultivadas em Latossolo amarelo, sob lisímetro de pesagem e situados em ambiente protegido. A incerteza no fluxo de seiva foi calculada pela incerteza combinada entre a incerteza na difusividade térmica (I_k), a incerteza da seção condutora (I_{Sc}) e na incerteza da velocidade de seiva corrigida (Iv_c). Observou-se que I_k tem maior peso na determinação do fluxo de seiva em mogno brasileiro, quando comparado a I_{Sc} e Iv_c. É necessário o ajuste da difusividade térmica durante o ciclo, ou período avaliado, visando melhorar a precisão do método da razão de calor, pois, o fluxo de seiva superestimou em 15% a transpiração do mogno brasileiro em condições ótimas de potencial de água no solo.

Palavras – chave: pulso de calor, difusividade, precisão.

SAP FLOW UNCERTAINTIES IN THE BRAZILIAN MAHOGANY ESTIMATED BY OF THE HEAT RATIO METHOD

Resumo: Brazilian mahogany is a tropical arboreal species, very important economically and ecologically, whose ecophysiological parameters, such as sap flow, improve the understanding of the specie. This manuscript aims to contribute with the uncertainties (U) involved in the application of the heat ratio method used in the determination of the Brazilian mahogany sap flow. For this, sets of heating probes and temperature measurement were installed in plants of eighteen months of age, cultivated in Yellow Latosol, under weighing lysimeter and located in a protected environment. The uncertainty in the sap flow was calculated by the combination between the uncertainty in the thermal diffusivity (U_k), the conductive section (U_{Sc}) and the corrected sap velocity (U_{Vc}). It was observed that Ik has greater weight in determining the flow of sap in Brazilian mahogany, when compared to U_{Sc} and U_{Vc} . It is necessary to adjust the thermal diffusivity during the cycle, or period evaluated, in order to improve the accuracy of the heat ratio method, because the sap flow overestimated the Brazilian mahogany transpiration in optimal soil water conditions by fifteen percent.

Keywords: heat pulse, diffusivity, reliability.

1. INTRODUÇÃO

Swietenia macrophylla King, também conhecida por mogno brasileiro, é uma espécie arbórea tropical da família das meliáceas, perene, de folha caduca, nativa do Brasil, com expressiva ocorrência nas Américas Central e Sul e muito difundida na Índia Ocidental, Malásia e sul da China (Leão, 2011; Mi et al., 2019). Possui diversas aplicações potenciais, como mobiliário e marcenaria; proteção de encostas, adubo composto, antimicrobiano, antiinflamatório, antioxidante, antimutagênico e fitorremediação de metais pesados (Mukaromah et al., 2017). Além disso, é uma espécie importante no planejamento do manejo florestal, sendo uma das espécies arbóreas mais exploradas no Brasil (Correia et al., 2018).

Parâmetros que relacionam o status hídrico da planta com o ambiente e, que visam melhorar o entendimento sobre a espécie, ainda incipientes, haja visto sua gama de aplicações. Dentre eles, parâmetros ecofisiológicos como o fluxo de seiva, muito usado como aproximação da transpiração (Forster, 2017), são ferramentas valiosas para a compreensão dos complexos processos entre as funções fisiológicas inter-relacionadas (Larekeng et al., 2019) que dependem diretamente do teor de água da planta.

As árvores são capazes de contrabalancear seu status hídrico retirando água de locais de armazenamento como o alburno, as paredes celulares, os vasos inativos, mesofilo e tecidos do câmbio, floema e parênquima (González-Rodríguez et al., 2017), ou seja, modulando as taxas de fluxo de seiva.

Métodos de determinação de fluxo de seiva, como o da razão de calor desenvolvido por Burgess et al. (2001), são amplamente discutidos, aplicados e citados na literatura que concernem ao uso de água pela planta e em comparação a outros métodos de determinação (Eller et al., 2011; Forster, 2019, 2014; Fuchs et al., 2017b; Green and Romero, 2012), por isso, a confiabilidade do método é de expressiva importância para estimar o quão significativas são as incertezas no fluxo de seiva (Flo et al., 2019; Green

and Romero, 2012), principalmente quando associados à transpiração; e nos parâmetros usados na sua determinação (Looker et al., 2016; Peters et al., 2018).

O resultado de uma medição deve ser acompanhado das incerteza envolvidas, pois, seja em um sistema de medição ou método (Amaral et al., 2018) e, na literatura, poucos são os resultados que reportam as incertezas envolvidas nos métodos de pulso de calor e espécies onde eles são aplicados, como nos trabalhos conduzidos por Flo et al., (2019); Forster (2019); Fuchs et al. (2017); Hernandez-Santana et al. (2015); Looker et al. (2016) e Miner et al. (2017).

Pelo exposto, objetivou-se contribuir com o conhecimento sobre as incertezas envolvidas na aplicação do método de razão de calor aplicado na determinação do fluxo de seiva em mogno brasileiro, submetido a condições ótimas de potencial de água no solo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área experimental, instrumentação e condições experimentais

O estudo foi desenvolvido em ambiente protegido situado em área experimental pertencente à Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), Cruz das Almas – BA (39°06' W; 12°48' S). Foram estudadas plantas jovens de mogno brasileiro com 18 meses de idade cultivadas em lisímetros de pesagem. Os lisímetros foram compostos por tanques de 0,5 m³ dispostos sobre plataformas de pesagem com célula de carga, modelo AL90901T - Alfa Instrumentos (1000 kg x 0,1kg). Na base dos tanques foram instalados sistemas de drenagem constituídos por camadas de 10 cm de brita n° 01; 1 cm de areia lavada; e, tela do tipo sombrite entre os elementos filtrantes. Sobre o sistema de drenagem acomodou-se um Latossolo Amarelo de textura franco-argilosa, destorroado e seco ao ar.

As irrigações foram realizadas por meio de gotejadores autocompensantes utilizando microtubos como extensores da linha de derivação e pressurizados por um conjunto motor-bomba. As variações de massa no conjunto lisimétrico foram convertidas em potencial de água no solo por modelagem inversa, utilizando valores de conteúdo de água no solo Θ obtidas por sondas TDR (Time-Domain-Reflectometry) e otimizando os parâmetros da curva de retenção de água no solo e da curva de condutividade hidráulica do solo seguindo a metodologia proposta por Mualem-van Genuchten (Mualem, 1976;

Van Genuchten, 1980) por meio do software HYDRUS – 1D, version 4.16.0110 (Simunek et al., 2013).

2.2 Fluxo de seiva por pulso de calor

Para determinação do fluxo de seiva (FS) utilizou-se o pulso de calor pelo método da razão de calor proposto por Marshal (1958) e modificado por Burgess et al., (2001). Para isso, sondas foram construídas com comprimento de 20 mm e diâmetro igual a 1,2 mm, utilizando agulha hipodérmica de uso farmacêutico. Em cada planta foram inseridas um conjunto de 2 sondas para medição da temperatura de seiva (termopar) e 1 aquecedor para gerar o pulso de calor.

Na primeira, termopares do tipo T (cobre-constantan) foram construídos com fios de 0,13 mm de diâmetro (Omega Engineering Inc.) e posicionado na porção média do interior da agulha, posteriormente isolados com resina epóxi. Na sonda de aquecimento, fio de constantan foi enrolado na parte externa da agulha, de forma que seu comprimento permitia uma resistência de 60 Ω . As sondas termopares foram instaladas equidistantes a 0,6 cm do aquecedor e envolvidas por papel laminado em forma de "saia", afim de reduzir os efeitos dos gradientes térmicos naturais nas medições.

Todas as sondas foram interligadas a um datalogger modelo CR1000 da Campbell Scientific®, previamente programado para excitar os aquecedores com tensão de 12V, gerando uma potência dissipada de 2,4 W quando aquecida. O tempo de cada pulso aplicado era de 10 s em intervalos de 10 min entre cada pulso.

A velocidade de seiva (V_h) foi calculada pela equação (eq.) 1 e o espaçamento corrigido da sonda inferior ao aquecedor (x_2) por meio da eq. 2, em condição de fluxo nulo $(V_h=0)$. A condição de fluxo nulo foi imposta seccionando o caule acima e abaixo do conjunto de sondas após o período de avaliação e a razão $ln\left(\frac{v_1}{v_2}\right)$ foi usada para corrigir (x_2) , uma vez que não ocorriam fluxos ascendentes (F>0) e reversos (F<0) nessa condição (Vandegehuchte e Steppe, 2013; Forster, 2014).

$$V_h = \frac{4kt\ln(v_1/v_2) - (x_2^2) + (x_1^2)}{2t(x_1 - x_2)} \,3600\tag{1}$$

$$x_2 = \sqrt{4kt \ln(\nu_1/\nu_2) + (x_1^2)}$$
(2)

em que V_h é a velocidade do pulso de calor, em cm h⁻¹; k a difusividade térmica, em cm² s⁻¹; t é o tempo de medição do pulso de calor, em s; v₁ e v₂ são os incrementos de temperatura após o pulso de calor nas sondas superior e inferior, em °C, respectivamente; e x₁ e x₂ são as distância das sondas superior e inferior à posição do aquecedor, em cm.

A velocidade do pulso de calor (V_h) foi corrigida (V_c) pela eq. 3, assumindo o coeficiente linear (β) encontrado por Burgess et al. (2001) para espaçamentos de sonda iguais a 0,6 cm e diâmetro de ferida de 0,17 cm.

$$V_c = \beta V_h \tag{3}$$

A velocidade do pulso de calor foi convertida em velocidade de seiva (V_s) considerando as propriedades térmicas da madeira e o conteúdo de seiva do caule (eq. 4).

$$V_{s} = \frac{V_{c} \rho_{b} (c_{w} + m_{c} c_{s})}{\rho_{s} c_{s}}$$
(4)

em que ρ_b é a densidade básica da madeira, em Kg m⁻³; ρ_s a densidade da água (1000 Kg m⁻³); c_w e c_s são as capacidades caloríficas da matriz da madeira e da seiva a 20 °C, respectivamente iguais a 1200 J Kg⁻¹ °C⁻¹ e 4182 J Kg⁻¹ °C⁻¹ e m_c equivale ao conteúdo de água do alburno, em Kg.

Para a determinação de ρ_b e m_c o procedimento adotado foi a retirada de discos de 2 cm de espessura no caule, acima da posição das sondas, seguido de pesagem em balança analítica com precisão de 0,01g e secagem a 75 °C em estufa com ventilação forçada de ar por um período de 72 horas (Costa et al., 2016). A ρ_b é razão entre a massa seca e o volume da amostra (determinado pelo princípio de Arquimedes) e m_c corresponde à razão da diferença entre a massa úmida e seca, relativas ao peso seco da amostra.

A difusividade térmica (k) foi calculada pela eq. 5 após a determinação dos parâmetros necessários, isto é (i.e), condutividade térmica da madeira fresca (K_{gw}) (eq. 6), condutividade térmica da madeira seca (K_w) (eq. 7), fração porosa (F_v) e a capacidade calorífica da madeira (c) pelas eqs. 8 e 9, respectivamente.

$$k = \frac{K_{gw}}{\rho c} 10000 \tag{5}$$

em que K_{gw} é condutividade térmica da madeira fresca, em J m⁻¹ s⁻¹ °C⁻¹; ρ equivale à densidade da madeira fresca, em Kg m⁻³ e c a capacidade calorífica da madeira fresca, em J Kg⁻¹ °C⁻¹.

$$K_{gw} = K_s \, m_c \, \frac{\rho_b}{\rho_s} + K_w (1 - m_c \, \frac{\rho_b}{\rho_s}) \tag{6}$$

$$K_w = 0,04182(21,0-20,0F_v) \tag{7}$$

$$F_{\nu} = 1 - \left(\frac{\rho_b 0,6536 + m_c}{1000}\right) \tag{8}$$

$$c = \left(\frac{w_d c_w + c_s (w_f - w_d)}{w_f}\right) \tag{9}$$

em que K_s é condutividade térmica da água (5,984 x 10^{-1 J} m⁻¹ s⁻¹ °C⁻¹); K_w a condutividade térmica da madeira seca, em J m⁻¹ s⁻¹ °C⁻¹; F_v é igual a fração porosa da madeira, adimensional e w_d e w_f são, respectivamente, o peso seco e fresco da amostra, Kg. Por fim, o fluxo de seiva foi calculado pelo produto da velocidade de seiva (eq. 4) e a área da seção condutora, determinada com auxílio de imagens das amostras das seções condutoras integralizadas pelo software Image Pro Plus ®.

A transpiração do mogno foi quantificada por meio das variações de massa no lisímetro. Para isso, os lisímetros foram cobertos com lona plástica para evitar variações de massa oriundas do processo de evaporação. As células de carga dos lisímetros de pesagem também foram conectadas ao datalogger e as médias foram armazenadas continuamente em intervalos de uma hora.

2.3. Comparação da velocidade de pulso de calor $\left(V_{h}\right)$ para diferentes tempos de medição

O método do pulso de calor de Marshal (1958) modificado por Burgess et al. (2001) assume que a medição dos incrementos de temperaturas nas sondas termopares assume uma linearidade a partir de 60 s até 100 s após a aplicação do pulso de calor. Considerando que a velocidade do pulso de calor (Vh) depende desses incrementos, da difusividade e da posição corrigida da sonda inferior ao aquecedor, aplicou-se o teste estatístico de Friedman e Nemenyi para verificar se houveram diferenças significativas entre Vh medidas nos tempos de 60, 80 e 100 s após a aplicação do pulso para dias consecutivos.

Para isso, o teste estatístico foi implementado por rotina criada no software R, usando a IDE RStudio e o software Microsoft Excel para digitalização e classificação dos dados de V_h nos diferentes tempos de medição.

2.4. Cálculo da incerteza no método de razão de calor

No método de pulso de calor pela razão de calor de Burgess et al. (2001) vê-se que as variáveis determinantes e que influenciam na medição do fluxo de seiva são a difusividade térmica (k), a seção condutora da seiva (S_c) e a velocidade de seiva corrigida (V_c), logo, é apropriado dizer que a incerteza da medição no fluxo de seiva por esse método seria a incerteza combinada das incertezas dessas variáveis.

Quando as grandezas de entrada são correlacionadas, a expressão apropriada para a variância combinada associada com o resultado de uma medição é dada pela eq. 10, conforme descrito por Inmetro (2008) e utilizado em trabalhos como os conduzidos por Amaral et al. (2018) e Chen et al. (2018).

$$\sigma^{2}(G) = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial_{f}}{\partial_{x_{i}}} \right) \sigma^{2}(x_{i}) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} \frac{\partial_{f}}{\partial_{x_{i}}} \frac{\partial_{f}}{\partial_{x_{j}}} \sigma(x_{i}) \sigma(x_{j}) \rho(x_{i}, x_{j})$$
(10)

em que: G = f (x1, x2, x3, ..., xn); σ^2 = variância; e $\rho(xi, xj)$ = coeficiente de correlação entre as grandezas de entrada xi e xj.

Para resolver a equação acima é necessário conhecer o "peso" ou a sensibilidade que cada variável de entrada tem sobre a variável de saída e o grau de correlação entre as variáveis de entrada. Para isso, os pesos foram determinados pelo coeficiente de sensibilidade (S) expresso por meio da eq. 11 e o coeficiente de correlação (ρ) pelo método de correlação linear de Pearson, já que as variáveis de entrada são quantitativas (eq.12) (Inmetro, 2008).

$$S = \frac{\Delta_Y/_{Y_o}}{\Delta_X/_{X_o}}$$
(11)

em que: S = Coeficiente de sensibilidade; Δ_Y = Variação na grandeza de saída; Y_o = Valor inicial da grandeza de saída; Δ_x = Variação na grandeza de entrada; e X_o = Valor inicial da grandeza de entrada.

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x}) (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2\right] \left[\sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2\right]}}$$
(12)

em que: ρ = Coeficiente de correlação linear; x_i e y_i = grandezas de entrada a ser correlacionadas; \bar{x} e \bar{y} = média de conjunto de valores das grandezas de entrada a ser correlacionadas.

2.5 Incerteza na difusividade térmica

A difusividade térmica (k) é o parâmetro que expressa a facilidade com que o caule ganha ou perde calor e influencia diretamente na quantificação do fluxo de seiva. Pelo método de Burgess et al. (2001), vê-se que os parâmetros que alteram a mensuração de k são a condutividade térmica (Kgw), a capacidade calorífica (c) e a densidade da madeira (ρ). Nesse caso, em que as incertezas são independentes, a incerteza em k é expressa pela incerteza combinada de Kgw, $c e \rho$, expressa pela eq. 13.

$$I_k = \sqrt{I_{Kgw}^2 + I_c^2 + I_{\rho}^2}$$
(13)

em que: I_k = Incerteza na difusividade térmica; I_{Kgw} = Incerteza na condutividade térmica; I_c = Incerteza na capacidade calorífica e I_{ρ} = Incerteza na densidade da madeira.

2.5.1 Incerteza na condutividade térmica

A incerteza da condutividade térmica (I_{kgw}) constitui-se da incerteza propagada dos mensurandos: massa seca (m_s), massa fresca (m_f), volume (v) e conteúdo de água do

alburno (m_c) que contribuem em I_{kgw} de forma independente (m_s, m_f, v, m_c) e dependente $\rho(m_s, m_c)$; $\rho(m_f, m_c)$. Sendo assim, pode-se quantificar I_{kgw} pela eq. 14. As variâncias consideradas foram de 0,288% (m_s e m_f) e 2,887% (v) correspondentes as incertezas da balança e proveta, respectivamente, calculadas por 0,5 * $d/\sqrt{3}$ onde d é a menor unidade medida no equipamento; e 35% para m_c, conforme Severo (2007).

 $I_{Kgw} = \sqrt{s_{ms}^2 \cdot I_{ms}^2 + s_{mf}^2 \cdot I_{mf}^2 + c_v^2 \cdot I_v^2 + c_{mc}^2 \cdot I_{mc}^2 + 2 \cdot s_{ms} \cdot s_{mc} \cdot I_{ms} \cdot I_{mc} + 2 \cdot s_{mf} \cdot s_{mc} \cdot I_{mf} \cdot I_{mc}}$ (14)

2.5.2 Incerteza na capacidade calorífica

Na determinação da capacidade calorífica (c) as grandezas de entrada são a massa seca (m_s) e fresca(m_f) da madeira e as capacidades caloríficas da madeira (c_w) e da seiva (c_s). Considerando a influência de forma independente de m_s , m_f , c_w e c_s e dependente correlacionada de cw e cs, a incerteza na capacidade calorífica (c) pode ser expressa pela eq. 15. Nesse caso, as variâncias consideradas foram 0,288% (m_s e m_f) conforme descritas no item 2.5.1; 0,956% (c_w) e 22,73% (c_s) conforme capacidades caloríficas determinadas por (Becker; Edwards, 1999) para amplitude térmica de 0 a 50°C em caules de espécies árboreas.

$$I_{c} = \sqrt{s_{ms}^{2} \cdot l_{ms}^{2} + s_{mf}^{2} \cdot l_{mf}^{2} + s_{cw}^{2} \cdot l_{cw}^{2} + s_{cs}^{2} \cdot l_{cs}^{2} + 2 \cdot s_{cw} \cdot s_{cs} \cdot l_{cw} \cdot l_{cs}}$$
(15)

2.5.3 Incerteza na densidade básica da madeira

Sabendo que na determinação da densidade básica da madeira, as incertezas dos mensurandos massa fresca (mf) e volume (v) contribuem apenas de forma independente com a incerteza da densidade básica da madeira (I ρ), esta pode ser calculada pela eq. 16. As variâncias usadas foram 0,288% (m_f) e 2,887% (v) (ver item 2.5.1).

$$I_{\rho} = \sqrt{s_{mf}^2 \cdot l_{mf}^2 + s_{v}^2 \cdot l_{v}^2}$$
(16)

2.6 Incerteza no fluxo de seiva

É conveniente considerar que a incerteza no fluxo de seiva (I_{FS}) é a combinação entre a incerteza na difusividade térmica (I_k) propagada e as incertezas na seção condutora (I_{sc}) e velocidade de seiva corrigida (V_c) (eq. 17).

$$I_{FS} = \sqrt{I_K^2 + I_{Sc}^2 + I_{Vc}^2}$$
(17)

2.6.1 Incerteza na seção condutora

A contribuição da I_{sc} na I_{FS} depende apenas da área da seção condutora (A) de forma isolada (eq. 18). A variância utilizada foi de 0,385% que corresponde a um crescimento de diâmetro de 0,0116 cm dia⁻¹ em mogno africano irrigado (Alves Júnior et al., 2016).

$$I_{sc} = \sqrt{I_A^2} \tag{18}$$

2.6.2 Incerteza na velocidade de seiva corrigida

A incerteza na velocidade de seiva corrigida (I_{vc}) é influenciada pela incerteza do coeficiente β usado na correção da posição da sonda inferior (x_2) e dependente do espaçamento entre as sondas e do diâmetro de ferida. Logo, I_{vc} pode ser calculado pela eq. 19. A variância usada em I_{vc} foi de 3,05x10⁻¹⁰ % que corresponde a variação nos desvios entre valores mensurados e simulados de velocidade de seiva (V_h), considerando β igual a 1,7023 ($R^2 = 0,9993$) para um espaçamento de 0,6 cm entre sondas e 0,17 cm de diâmetro de ferida.

$$I_{Vc} = \sqrt{c_{\beta}^2 \cdot l_{\beta}^2} \tag{19}$$

3. Associação entre fluxo de seiva e transpiração

O fluxo de seiva calculado pelo método de Burgess et al. (|2001) e a transpiração determinada pela variação de massa no lisímetro de pesagem, em condições de potencial de água no solo de -10 kPa (potencial teórico da capacidade de campo), foram associadas por regressão linear, afim de verificar a relação existente entre essas variáveis fisiológicas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os incrementos de temperatura após pulsos de calor, mensurados pelas sondas superior (v_1) e inferior (v_2) à posição do aquecedor são vistos na figura 1. Observou-se que os incrementos em v_1 são maiores que v_2 , em condições de fluxo ascendente, devido ao transporte de calor ocorrer por condução e convecção na sonda superior e apenas por condução na sonda inferior. Para os pulsos obtidos, a variação máxima de temperatura foi de 2,8°.



Figura 1. Variação de temperatura em v_1 (sonda superior) e v_2 (sonda inferior) em relação ao aquecedor, após aplicação do pulso de calor.

Percebe-se, também, que nos instantes iniciais após aplicação do pulso de calor, os aumentos das razões dos incrementos de temperatura são abruptos e depois ocorrem decréscimos de forma gradual até estabilização, que ocorreu após 600 s (10 minutos) após aplicação dos pulsos. O tempo e intervalo usados por Fuchs et al. (2017) foram semelhantes ao presente estudo, entretanto, os mesmos ajustaram a potência dissipada para 25 Joules (2,5 W) em cinco espécies arbóreas com alburno difuso-poroso, de forma que o aumento de temperatura nas sondas variassem entre 0,7 a 1,5 °C recomendados para evitar danos adicionais ao tecido próximo das sondas. Já Bayona-Rodriguez e Romero (2016) ajustaram a potência do aquecedor para 35 Joules em *Elaeis guineensis* Jacq.; Forster (2019) produziram 4 a 4,9 W (40 a 49 J) em *Tecoma capensis* (Thunb.) Lindl.; e em *Vitex lucens* a potência dissipada foi de 50 J (Green and Romero, 2012).

No presente trabalho, apesar da variação máxima ter ultrapassado o limite recomendado de variação de temperatura (2,8 °C), não se observou efeito de injúrias em *Swietenia macrophylla* King devido a potência gerada no aquecedor ter sido de 2,4 W.

Diversos trabalhos que utilizaram o método proposto por Burgess et al. (2001) configuraram o sistema de aquecimento para trabalhar com duração e intervalo entre pulsos diferentes, a exemplo, aqueles conduzidos por Bretfeld et al. (2018); Eller et al. (2018) (3 s e 30 min); Morton et al. (2016) (2-4s e 15min); Salomón et al. (2017) (10 s e 15 min) e Wang et al.(2018) (5 s e 30 min). De qualquer forma, é recomendável que o tempo, a duração e a potência dos pulsos sejam ajustadas para cada espécie, de forma que os dados coletados sejam confiáveis para serem usados na quantificação do fluxo de seiva.

As velocidades dos pulsos de calor (V_h) para dois dias consecutivos para os tempos de 60, 80 e 100 s são visualizadas na figura 2. Observa-se semelhança entre as curvas de V_h em todos os tempos, principalmente no período noturno, onde o fluxo de seiva é considerado nulo ou muito baixo devido ao baixo transporte convectivo e reduzido déficit de pressão de vapor (DPV). Por meio do teste de comparações múltiplas de Friedman e Nemenyi, constatou-se que não houveram diferenças estatísticas significativas entre V_h nos tempos de medição ora citados. Para Burgess et al. (2001) as medidas de V_h a partir do tempo de 60 s assumem proporções lineares, resultando em taxas das razões $\frac{v_1}{v_2}$ insignificantes até os 100 s. Entretanto, Fuchs et al. (2017) e Wang et al. (2018) demonstram ser possível utilizar a média de 40 medições realizadas entre os tempos de 60 a 100 s.



Figura 2. Velocidade do pulso de calor para dois dias consecutivos nos tempos de medição de 60, 80 e 100 segundos após a aplicação do pulso.

Nas condições do presente estudo, verificou-se que V_h pode ser calculado para qualquer tempo (60, 80 ou 100 s), sendo recomendado tempo médio de 80 s após o pulso de calor para mensurar os incrementos necessários aos cálculos de fluxo de seiva de *Swietenia macrophylla* King.

A tabela 1 demonstra os coeficientes de sensibilidade das variáveis que influenciaram mais expressivamente a quantificação da difusividade térmica (k) e consequentemente do fluxo de seiva (FS). Verificou-se que, as variáveis que reportam maiores incertezas na determinação de k são, por ordem, a condutividade térmica da madeira fresca (K_{gw}) (I = 12,8%), a capacidade calorífica (c) (I = 6,16%) e a densidade da madeira (ρ_b) (I = 5,72%). A difusividade térmica é um parâmetro importante nos cálculos da velocidade do pulso de calor e incertezas em seu cálculo surgem normalmente da variação no teor de umidade do alburno e da densidade da madeira seca, o que significa que ele deve ser cuidadosamente medido (Forster, 2019).

Variável -	Massa		Cw	Cs	ma	Volume	Área	ß	Incerteza	
	seca	fresca	- **	- 3	c		alburno	Р		
	Coeficiente de sensibilidade (S)									
С	1,599	-0,586	0,238	0,762	-	-	-	-	6,16 na <i>k</i>	
ρ_b	-	1,000	-	-	-	-0,990	-	-	5,72 na <i>k</i>	
K_{gw}	-0,560	1,257	-	-	0,359	0,301	-	-	12,80 na <i>k</i>	
Sc	-	-	-	-	-	-	1,000	-	0,13 no FS	
V_{c}	-	-	-	-	-	-	-	1,000	3,0x10 ⁻¹⁰ no FS	
k									15,31	
FS									15,32	

Tabela 1. Coeficiente de sensibilidade e incertezas das variáveis que influenciaram no fluxo de seiva de mogno brasileiro determinado pelo método da razão de calor de Burgues (2001).

c - capacidade calorífica; K_{gw} - condutividade térmica; ρ_b - densidade básica da madeira; S_c - Seção condutora; V_c - Velocidade de seiva corrigida, c_w - capacidade calorífica da matriz da madeira; c_s - capacidade calorífica da seiva; m_c - conteúdo de água do alburno.

Como *k* expressa, em uma definição resumida, a facilidade com que o calor se movimenta no caule da planta pelos processos de convecção e condução, é coerente entender que K_{gw} expressa a maior incerteza na medição de *k*. Observou-se, também, que K_{gw} e ρ_b são mais sensíveis à variação da massa fresca, enquanto que a capacidade calorífica tem maior sensibilidade à variação da massa seca que os demais componentes, ou seja, o conteúdo de água é expressivo em K_{gw} e ρ_b por se tratar de variáveis importantes do status hídrico da planta, enquanto que c é proporcional à massa seca do caule. Em trabalho conduzido por Vergeynst et al. (2014) estes verificaram que a densidade e a difusividade térmica de *Platanus occidentalis* L. aumentam com conteúdo de água e que a capacidade calorífica é mais fortemente influenciada quando este conteúdo é baixo, similar ao observado nesse estudo.

A difusividade térmica é um parâmetro crucial para determinar a densidade do fluxo de seiva, pois, ela é diretamente e linearmente proporcional à densidade de fluxo de seiva, então, qualquer erro levará a um erro igual na densidade de fluxo de seiva e, portanto, no fluxo de seiva calculado quando utilizado o método de razão de calor (Vandegehuchte; Steppe, 2012a).

Apesar da seção condutora (S_c) e da velocidade de seiva corrigida (V_c) serem sensíveis a área do alburno e ao coeficiente β , respectivamente, haja visto o coeficiente de sensibilidade (S =1,0), observou-se que as incertezas dessas variáveis na determinação do fluxo de seiva (FS) são pequenas devido às variâncias usadas (ver item 2.5.1 e 2.5.2).

Considerando as incertezas no FS e K, é possível verificar que esta corresponde a 99,9% da incerteza do fluxo de seiva, uma vez que os parâmetros mais expressivos são a massa fresca e a massa seca da seção condutora onde são instalados o conjunto de sondas.

Foram relacionadas por regressão linear, a transpiração e o fluxo de seiva, em condições ótimas de potencial de água o solo (-10 kPa) (figura 3). Observa-se um bom ajuste do modelo escolhido ($R^2 = 0,872$) com uma variação aproximada de 15% entre ambos os processos fisiológicos, para as condições de contorno do experimento. Essa variação é semelhante a incerteza na determinação do FS (Tabela 1), o que mostra que, a diferença do ajuste observado entre a transpiração e o fluxo de seiva se deve, quase que em sua totalidade, à determinação da difusividade térmica do mogno nas condições do experimento.



Figura 3. Relação entre transpiração em função do fluxo de seiva determinado por pulso de calor em mogno para potenciais de água no solo próximos de -10 kPa.

No presente estudo, *k* foi determinado em condições de fluxo nulo, seccionando o caule acima e abaixo do conjunto de sondas e usado para todo o período de avaliação, o que pode ter conferido aos resultados a diferença acima observada, uma vez que, o status hídrico da planta influencia diretamente a dissipação do calor gerado pelos pulsos e consequentemente o fluxo e a transpiração. Para Eliades et al. (2018) é comum na literatura pertinente ao uso do método de razão de calor que os autores utilizem um *k* proposto inicialmente por Marshal (1958) de 2,5 x 10^{-3} cm² s⁻¹, como em (Zhao et al., 2017), ou determina-lo em condições de fluxo nulo com secção de haste (Forster, 2017) ou, também, em condições onde não há força motriz biofísica (baixo déficit de pressão de vapor) (Yu et al., 2018), entretanto, k pode variar significativamente do valor padrão e durante todo o período de medição, consequentemente, os erros de cálculo K podem levar a erros nos cálculos velocidade de seiva e, subsequentemente, a uma super ou subestimação da transpiração (Forster, 2017).

Apesar de Burgess et al. (2001) sugerir que adotar um k padrão inicial não transmitiria grandes erros à estimativa de transpiração, Looker et al. (2016) verificaram que essa afirmativa só é válida para condições onde o conteúdo de água do alburno é baixo, ou seja, em condições variáveis de $m_c e \rho_b$ ocorre superestimação do fluxo de seiva e aumento na incerteza, induzindo erros maiores que 10% no fluxo de seiva.

Uma abordagem de Vandegehuchte e Steppe (2012) sugere uma correção para *k* e esses autores afirmam que a metodologia atual do método de razão de calor aplicada para determinar K pode levar a super ou subestimações de até 10% no fluxo de seiva, pois mudanças no conteúdo relativo de água não são consideradas. Entretanto, vê-se que, para considerar a variação do conteúdo de água durante todo período avaliado, amostras destrutivas devem ser retiradas para ajustar a difusividade, podendo comprometer a estrutura do caule das plantas. Nos casos em que é difícil, se não impossível, realizar calibrações específicas de espécies, a falta de calibração do método não deve levar à rejeição do manuscrito, desde que o erro resultante não domine a história contada (Steppe et al., 2015).

Em toda literatura sobre métodos de medição de fluxo de seiva baseado em pulso de calor, parece haver uma inconsistência quando se refere a correções ou ajustes na difusividade térmica do alburno. Apesar da evidência clara de que o alburno é um material anisotrópico os métodos existentes de fluxo de seiva baseado em pulso de calor ainda são teoricamente corretos e produzem valores reais de k devido à sua dependência de derivações da equação analítica para aplicação de uma fonte instantânea de calor ao longo

do eixo z em um meio isotrópico, como proposto por Marshal (1958) (Vandegehuchte and Steppe, 2012b)

Sendo assim, pelos resultados observados, verificou-se a necessidade de determinar ou ajustar K para condições adversas de potencial de água no solo e em escalas temporais menores, como dias por exemplo, afim de diminuir as incertezas na determinação do fluxo de seiva já que, métodos de pulso são menos susceptíveis a falta de calibrações específicas e aos gradientes térmicos naturais (Vandegehuchte e Steppe, 2013; Fuchs et al., 2017).

4. CONCLUSÃO

A incerteza na determinação da difusividade térmica tem maior peso na incerteza da determinação do fluxo de seiva em mogno brasileiro;

O fluxo de seiva superestimou em 15% a transpiração do mogno brasileiro em ótimas condições de potencial de água o solo, cuja diferença é atribuída a incerteza do método da razão de calor;

São necessários mais estudos visando ajustar a difusividade térmica do mogno brasileiro durante o ciclo ou período avaliado.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicações (MCTIC), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) e ao IF Goiano – Campus Rio Verde, pelo apoio financeiro e estrutural a esta pesquisa.
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alves Júnior, J., Barbosa, L.H.A., Casaroli, D., Evangelista, A.W.P., Costa, F.R., 2016. Crescimento de mogno africano submetido a diferentes níveis de irrigação por microaspersão. Irriga 21, 466–480.

Amaral, A.M., Cabral Filho, F.R., Vellame, L.M., Teixeira, M.B., Soares, F.A.L., Santos,
L.N.S. do., 2018. Uncertainty of weight measuring systems applied to weighing
lysimeters. Comput. Electron. Agric. 145, 208–216.
https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.12.033

Bayona-rodr, C.J., Romero, M., 2016. Estimation of transpiration in oil palm (Elaeis guineensis Jacq .) with the heat ratio method Estimación de la transpiración en palma de aceite (Elaeis guineensis Jacq .) por el método del radio de calor 34, 172–178. https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v34n2.55649

Becker, P., Edwards, W.R.N., 1999. Corrected heat capacity of wood for sap flow calculations. Tree Physiol. 19, 767–768. https://doi.org/10.1093/treephys/19.11.767

Bretfeld, M., Ewers, B.E., Hall, J.S., 2018. Plant water use responses along secondary forest succession ~ o drought in Panama during the 2015 – 2016 El Ni n 2, 885–899. https://doi.org/10.1111/nph.15071

Burgess, S., Adams, M.A., Turner, N.C., Beverly, C.R., Ong, C.K., Khan, A.A.H., T.M.Bleby, 2001. An improved heat pulse method to measure low and resever rates of sap flow in woody plants. Tree Physiol. 21, 589–598.

Chen, L., Chen, J., Chen, C., 2018. Effect of Environmental Measurement Uncertainty on Prediction of Evapotranspiration 1–13. https://doi.org/10.3390/atmos9100400

Correia, R.G., Martins, W.B.R., Oliveira, F. de A., Dionisio, L.F.S., Neves, R.L.P., Batista, T.F.V., 2018. Production and decomposition of litter in different mahogany (Swietenia macrophylla King) cropping systems. Rev. Ciência da Madeira - RCM 9, 103–110. https://doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v9n2p103-110

Eliades, M., Bruggeman, A., Djuma, H., Lubczynski, M.W., 2018. Tree Water Dynamics in a Semi-Arid , Pinus. Water 10, 1–21. https://doi.org/10.3390/w10081039

Eller, C.B., Bittencourt, P.R.L., Oliveira, R.S., 2018. Using sap flow to measure whole-

tree hydraulic conductance loss in response to drought. Acta Hortic. 1222, 75–84. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1222.11

Eller, C.B., Pereira, C.G., Oliveira, R.S., Downey, A., Burgess, S., 2011. Differences in Quality Between Old and New HRM Instruments Differences in Quality Between Old and New HRM Instruments 1–4.

Flo, V., Martinez-vilalta, J., Steppe, K., Schuldt, B., Poyatos, R., 2019. Agricultural and Forest Meteorology A synthesis of bias and uncertainty in sap flow methods. Agric. For. Meteorol. 271, 362–374. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.03.012

Forster, M., 2017. How Reliable Are Heat Pulse Velocity Methods for Estimating Tree Transpiration? Forests 8, 350. https://doi.org/10.3390/f8090350

Forster, M.A., 2019. The Dual Method Approach (DMA) resolves measurement range limitations of heat pulse velocity sap flow sensors. Forests 10, 8–10. https://doi.org/10.3390/f10010046

Forster, M.A., 2014. How significant is nocturnal sap flow? Tree Physiol. 34, 757–765. https://doi.org/10.1093/treephys/tpu051

Fuchs, S., Leuschner, C., Link, R., Coners, H., Schuldt, B., 2017. Calibration and comparison of thermal dissipation, heat ratio and heat field deformation sap flow probes for diffuse-porous trees. Agric. For. Meteorol. 244–245, 151–161. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.04.003

González-Rodríguez, Á.M., Brito, P., Lorenzo, J.R., Gruber, A., Oberhuber, W., Wieser, G., 2017. Seasonal cycles of sap flow and stem radius variation of Spartocytisus supranubius in the alpine zone of Tenerife, Canary Islands. Alp. Bot. 127, 97–108. https://doi.org/10.1007/s00035-017-0189-7

Green, S.R., Romero, R., 2012. Can we improve heat-pulse to measure low and reverse flows. Acta Hortic. 951, 19–30.

Hernandez-santana, V., Hernandez-hernandez, A., Vadeboncoeur, M.A., Asbjornsen, H., 2015. Scaling from single-point sap velocity measurements to stand transpiration in a multispecies deciduous forest : uncertainty sources , stand structure effect , and future scenarios 1497, 1489–1497.

Inmetro, 2008. A Estimativa da Incerteza de Medição Pelos Métodos do ISO GUM 95 e

de Simulação de Monte Carlo.

Larekeng, S.H., Restu, M., Arsyad, M.A., Mutia, 2019. Observation of morphological and physiological characteristics on Abangares Mahogany (Swietenia macrophylla King .) In South Sulawesi . IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 270, 012022. https://doi.org/10.1088/1755-1315/270/1/012022

Leão, N.V.M., 2011. Colheita de Sementes e Produção de Mudas de Espécies Florestais Nativas. Embrapa Amaz. Orient. 1–52. https://doi.org/1517-2201

Looker, N., Martin, J., Jencso, K., Hu, J., 2016. Agricultural and Forest Meteorology Contribution of sapwood traits to uncertainty in conifer sap flow as estimated with the heat-ratio method. Agric. For. Meteorol. 223, 60–71. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.03.014

Marshal, D.C., 1958. MEASUREMENT OF SAP FLOW IN CONIFERS BY HEAT TRANSPORT 33, 385–396.

Mi, C.-N., Wang, H., Chen, H.-Q., Cai, C.-H., Li, S.-P., Mei, W.-L., Dai, H.-F., 2019. Polyacetylenes from the Roots of Swietenia macrophylla King. Molecules 24, 1291. https://doi.org/10.3390/molecules24071291

Miner, G.L., Ham, J.M., Kluitenberg, G.J., 2017. A heat-pulse method for measuring sap flow in corn and sunflower using 3D-printed sensor bodies and low-cost electronics. Agric. For. Meteorol. 246, 86–97. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.06.012

Morton, D., Ghayvat, H., Mukhopadhyay, S.C., Green, S., 2016. Sensors and instrumentation to measure Sap flow in small stem plants. 2016 IEEE Int. Instrum. Meas. Technol. Conf. Proc. 169–209. https://doi.org/https://doi.org/10.1109/I2MTC.2016.7520519

Mukaromah, A.S., Purwestri, Y.A., Fujii, Y., 2017. Determination of Allelopathic Potential in Mahogany (Swietenia macrophylla King) Leaf Litter Using Sandwich Method. Indones. J. Biotechnol. 21, 93. https://doi.org/10.22146/ijbiotech.16456

Peters, R.L., Fonti, P., Frank, D.C., Poyatos, R., Pappas, C., Kahmen, A., Carraro, V., Prendin, A.L., Baltzer, J.L., Baron-gafford, G.A., Heinrich, I., Minor, R.L., Sonnentag, O., Matheny, A.M., Wightman, M.G., Steppe, K., 2018. Quantification of uncertainties in conifer sap flow measured with the thermal dissipation method 1283–1299. https://doi.org/10.1111/nph.15241

Salomón, R.L., Schepper, V. De, Carabaña, M. V., Gil, L., Steppe, K., 2017. Daytime depression in temperature-normalised stem CO 2 efflux in young poplar trees is dominated by low turgor pressure rather than by internal transport of respired CO 2. New Phytol. 217, 586–598. https://doi.org/10.1111/nph.14831

SIMUNEK, J.; SEJNA, M.; SAITO, H.; SAKAI, M., V.G., 2013. Version 4.17 June 2013.

Steppe, K., Vandegehuchte, M.W., Tognetti, R., Mencuccini, M., 2015. Sap flow as a key trait in the understanding of plant hydraulic functioning. Tree Physiol. 35, 341–345. https://doi.org/10.1093/treephys/tpv033

Vandegehuchte, M.W., Steppe, K., 2013. Sap- fl ux density measurement methods: working principles and applicability. Functional Plant Biol. 213–223. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1071/FP12233

Vandegehuchte, M.W., Steppe, K., 2012. Use of the correct heat conduction – convection equation as basis for heat-pulse sap flow methods in anisotropic wood 63, 2833–2839. https://doi.org/10.1093/jxb/ers041

Vandegehuchte, M.W., Steppe, K., Phillips, N., 2012. Improving sap flux density measurements by correctly determining thermal diffusivity, differentiating between bound and unbound water. Tree Physiol. 32, 930–942. https://doi.org/10.1093/treephys/tps034

Vergeynst, L.L., Vandegehuchte, M.W., Mcguire, M.A., Teskey, R.O., Steppe, K., 2014. Changes in stem water content influence sap flux density measurements with thermal dissipation probes. Trees 28, 949–955. https://doi.org/10.1007/s00468-014-0989-y

Wang, S., Fan, J., Ge, J., Wang, Q., Yong, C., You, W., 2018. New design of external heat-ratio method for measuring low and reverse rates of sap flow in thin stems. For. Ecol. Manage. 419–420, 10–16. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.03.020

Yu, T., Feng, Q., Si, J., Mitchell, P.J., Forster, M.A., Zhang, X., Zhao, C., 2018. Depressed hydraulic redistribution of roots more by stem refilling than by nocturnal transpiration for Populus euphratica Oliv . in situ measurement 2607–2616. https://doi.org/10.1002/ece3.3875

Zhao, C.Y., Si, J.H., Feng, Q., Yu, T.F., Li, P. Du, 2017. Comparative study of daytime

and nighttime sap flow of Populus euphratica. Plant Growth Regul. 82, 353–362. https://doi.org/10.1007/s10725-017-0263-6