

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISA EM SENSORIAMENTO
REMOTO E METEOROLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

Maurício Soares Ortiz

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA SENSOR DE BAIXO
CUSTO PARA A ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL
EM APOIO AO IMAGEAMENTO POR AERONAVES
REMOTAMENTE PILOTADAS**

Tese de doutorado

Porto Alegre, RS
Agosto de 2019

Maurício Soares Ortiz

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA SENSOR DE BAIXO
CUSTO PARA A ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL
EM APOIO AO IMAGEAMENTO POR AERONAVES
REMOTAMENTE PILOTADAS**

ORIENTADOR:

Prof. Dr. Jorge Ricardo Ducati

COMISSÃO ORIENTADORA:

Prof^a. Dr^a. Denise Cybis Fontana

Prof. Dr. Jean Marcel de Almeida Espinoza

Porto Alegre, RS
Agosto de 2019

Soares Ortiz, Maurício

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA SENSOR DE BAIXO CUSTO
PARA A ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL EM APOIO
AO IMAGEAMENTO POR AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS /
Maurício Soares Ortiz. -- 2019.

79 f.

Orientador: DR. JORGE RICARDO DUCATI.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Centro Estadual de Pesquisas em
Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Programa de
Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Porto Alegre,
BR-RS, 2019.

1. EVAPOTRANSPIRAÇÃO. 2. OPEN SOURCE. 3. ARDUINO.
4. VINHEDOS. 5. TWO SOURCE. I. RICARDO DUCATI, DR.
JORGE, orient. II. Título.

“ Dedico todo o esforço que depositei neste trabalho a minha mãe, Gilda Helena Soares Ortiz, que nos deixou em abril deste ano, mas continuará sendo um exemplo de força e inspiração para minha vida. ”

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Prof. Dr. Jorge Ricardo Ducati por permitir que eu tivesse acesso ao doutorado através de seu aceite e de sua orientação.

Ao Prof. Dr. Jean Marcel de Almeida Espinoza pelas inúmeras contribuições para realização deste trabalho, passando por orientações, revisões de trabalhos e visitas à área de estudo.

À Vinícola da Família Geisse por permitir a realização de um estudo em sua área de cultivo, demonstrando contribuição a comunidade científica.

Ao Prof. Dr. Rodrigo Otávio Câmara Monteiro por ser o intermédio entre o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS) e a vinícola, bem como sua contribuição nas análises dos dados levantados e sua participação na banca avaliadora.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS) por conceder o meu afastamento das atividades docentes para a realização do doutoramento.

À Prof.^a Dr.^a Tatiana Silva da Silva, por aceitar fazer parte da banca avaliadora e contribuir para este trabalho.

Aos professores, funcionários e bolsistas do CEPSRM/PPGSR/UFRGS.

Aos meus familiares pelo carinho, atenção e entendimento dos momentos de minha ausência durante estes anos de doutorado, principalmente a minha esposa e filhos.

RESUMO

A Serra Gaúcha é uma das regiões que mais produz uvas para processamento no Brasil. A região apresenta uma condição topográfica acidentada e irregular e uma formação geológica caracterizada por solos rasos, tornando-se vulnerável a variações no balanço hídrico e no sistema microclimático. No caso de deficiência hídrica durante o período inicial de crescimento da videira e na maturação das bagas, ocorrerá redução no tamanho dos frutos e atraso no seu amadurecimento, afetando a sua coloração e favorecendo a sua queima pela radiação solar. Considerando essas peculiaridades relacionadas ao balanço hídrico, em busca de uma estimativa do componente principal desse balanço, a evapotranspiração, esta tese apresenta o desenvolvimento de um equipamento de baixo custo, em que a estimativa da evapotranspiração foi realizada considerando o balanço de energia. Com o equipamento desenvolvido, foi possível à análise e comparação de dados com estimativas oriundas de outra estação de balanço de energia, bem como, por estimativa proveniente de imageamento por Aeronaves Remotamente Pilotadas – RPA (*Remotely Piloted Aircraft*). Por meio do desenvolvimento do equipamento foi possível analisar a evapotranspiração com resolução espacial reduzida, facilitando o monitoramento em microescala, em virtude dos valores para a montagem do sistema que corresponderem a uma fração da aquisição de uma estação comercial. Os dados obtidos com o equipamento desenvolvido indicaram que o sistema é promissor, principalmente por tratar em termos econômicos de componentes encontrados com facilidade no mercado e com valor de aquisição baixo, quando comparados a componentes instalados nas estações comerciais. A análise técnica dos dados coletados propiciou a interpretação de que o sensor que apresentou melhor concordância com os dados obtidos com a estação comercial obteve como resposta, acima de 90% de acurácia, demonstrando a possibilidade de o equipamento ser expandido para outras culturas, visto que, os dados base para os quais os sensores foram desenvolvidos servem como alimentação para qualquer cultura agrícola.

Palavras-chave: evapotranspiração, estação agrometeorológica, balanço de energia, saldo de radiação, fluxo de calor no solo, Arduino.

ABSTRACT

Serra Gaucha region is one of the regions where it is produced more grapes for processing in Brazil. The region has a rugged and irregular topographic condition and a geological formation characterized by shallow soils, making it vulnerable to variations in water balance and microclimatic system. In case of water deficiency during the initial period of growth of the vine and the ripening of the berries, there will be reduction in fruit size and delay in ripening affecting its coloration and promoting its burning by solar radiation. Considering these peculiarities related to the water balance, in search for an estimate of the main component of this balance, the evapotranspiration, this thesis presents the development of a low cost equipment, in which the evapotranspiration estimation was performed considering the energy balance. With the developed equipment, it was possible to analyze and compare data with estimates coming from another energy balance station, as well as by estimation from RPA (Remotely Piloted Aircraft) imaging. Through the development of the equipment it was possible to analyze evapotranspiration with reduced spatial resolution, facilitating the microscale monitoring, due to the values for the system assembly which correspond to a fraction of the acquisition of a commercial station. The data obtained with the developed equipment indicated that the system is promising, mainly because it deals economically with components easily found in the market and with low acquisition value, when compared to components installed in the commercial stations. The technical analysis of the collected data led to the interpretation that the sensor which presented the best agreement with the data obtained with the commercial station achieved a response above 90% accuracy, demonstrating the possibility of the equipment being expanded to other cultures, since the basic data of which the sensors were developed serve as feedstock for any agricultural crop.

Keywords: evapotranspiration, agrometeorology system, energy balance, radiation balance, soil heat flux, Arduino.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de localização da área de estudo.....	36
Figura 2: Comportamento espectral de determinados alvos	25
Figura 3: Interação da energia eletromagnética em uma interface (NOVO, 2008).	26
Figura 4: Curva de fator de reflectância direcional-hemisférico típica de uma folha verde	29
Figura 5 – Arduino Uno.	48
Figura 6 – Shield para cartão SD.	48
Figura 7 - RTC.....	50
Figura 8 - Sensor LDR.	51
Figura 9 - Sensor de Temperatura DS18B20.....	52
Figura 10 - Sensor de Temperatura e Umidade Relativa.	53
Figura 11 - Sensor Pluviométrico.	55
Figura 12 – Bâscula do sensor pluviométrico.....	55
Figura 13 - Sensor Anemômetro.	56
Figura 14 – Fluxograma síntese.....	37
Figura 15: Passos para obtenção da evapotranspiração via imageamento por RPA.....	40
Figura 17: Sistema proposto	47
Figura 18: Esquemático de sensores para medição de fluxo de calor no solo.	58
Figura 19: Calor sensível da vegetação	60
Figura 20: Fluxo de calor sensível da não-vegetação	61
Figura 21: Fluxo de calor no solo	61

Figura 22: Saldo de radiação	62
Figura 23: Fluxo de calor latente da vegetação.....	62
Figura 24: Evapotranspiração diária estimada para a vegetação.....	63
Figura 26: Fluxograma do programa desenvolvido	66
Figura 27: Sensores para cálculo do fluxo de calor no solo e caixa para armazenamento do micro controlador e do cartão de armazenamento	67
Figura 28: Sistema proposto (anemômetro, pluviômetro, radiação solar, temperatura do ar e umidade relativa do ar).	68
Figura 29: Estimativas de evapotranspiração entre o equipamento desenvolvido e o sistema de referência.	70
Figura 30: Correlação linear entre a estação de referência e o equipamento desenvolvido	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados comparativos de evapotranspiração estimados com o sistema proposta e a estação comercial..... 70

Tabela 2: Valores médios dos equipamentos que compõem o sistema desenvolvido. 73

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Características do Sensor DHT11	54
---	----

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	V
RESUMO.....	VI
ABSTRACT	VII
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	X
LISTA DE QUADROS	XI
CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	14
1.1. Hipótese.....	17
1.2. Objetivos	18
1.2.1. Objetivo Geral	18
1.2.2. Objetivos Específicos	18
CAPÍTULO II – REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1. A cultura da uva voltada à produção de vinho	19
2.2. Evapotranspiração	20
2.2.1. Importância da evapotranspiração para o manejo de irrigação	20
2.2.2. Métodos de medição da evapotranspiração	21
2.2.3. Unidades de medida da evapotranspiração	23
2.3. Sensoriamento remoto da vegetação	24
2.3.1. Interação Energia radiante vs. Alvos	25
2.3.2. Interação Energia radiante vs. Vegetação.	27
2.3.3. Índices de vegetação voltados ao monitoramento da dinâmica hídrica da uva	31
2.4. Eletrônica aberta	32
2.4.1 <i>Open Source Software</i>	33
2.4.2 <i>Open Source Hardware</i>	33
CAPÍTULO III – MATERIAL E MÉTODOS	35
3.1. Área de Estudo	35
3.2. Síntese dos passos metodológicos adotados	37
3.3. Obtenção da evapotranspiração via imageamento por RPA	39
3.3.1. Pré-processamento e organização da base cartográfica	41
3.3.2. Cálculo dos índices de vegetação e da emissividade da superfície	41
3.3.3. Cálculo do saldo de radiação sobre a superfície (Rn)	44
3.3.4. Aplicação do modelo de evapotranspiração com abordagem Two Source (Ortega <i>et al.</i> , 2016)	44
3.4. Desenvolvimento do sistema em arquitetura aberta	45
3.4.1. O Microcontrolador Arduino®.....	47
3.4.2. Armazenamento de Dados.....	48
3.4.3. Alimentação.....	49

3.4.4.	Relógio de Tempo Real.....	49
3.4.5.	Sensor de Luminosidade.....	50
3.4.6.	Sensor de Temperatura.....	51
3.4.7.	Sensor de Umidade.....	53
3.4.8.	Sensor Pluviométrico.....	54
3.4.9.	Sensor de Velocidade do Vento	56
3.5.	Metodologia de Calibração e Aferição dos Sensores	56
CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÃO		59
4.1.	Estimativa da evopotranspiração de vinhedos a partir da aplicação do modelo <i>Two Source</i>	59
4.2.	Sistema sensor proposto	64
4.3.	Instalação, teste e validação do sistema sensor proposto	67
CAPÍTULO V – CONSIDERAÇÕES FINAIS		74
5.1.	Conclusões	74
5.2.	Avanços e limitações encontrados no trabalho	74
5.3.	Sugestões para trabalhos futuros	75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		76

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

O estado do Rio Grande do Sul é tido como o principal produtor de uvas para processamento no Brasil, com uma área cultivada de aproximadamente 50.000 Ha (MELLO, 2016). A viticultura engloba uma significativa parcela de agricultores de base familiar, sendo essa atividade de fundamental importância para a fixação destes no campo (PROTAS *et al.*, 2002). Entretanto, a região da serra gaúcha apresenta uma condição topográfica acidentada e irregular, tornando-se vulnerável a variações microclimáticas.

No caso de deficiência hídrica durante o período inicial de crescimento da videira e na maturação das bagas, ocorrerá redução no tamanho dos frutos e atraso no seu amadurecimento, afetando a sua coloração e favorecendo a sua queima pela radiação solar (NETTO *et al.*, 2000). Em relação aos aspectos hídricos é importante destacar que o excesso, combinado com temperaturas elevadas, torna a cultura da videira muito suscetível a doenças fúngicas e pragas, sendo conveniente que não ocorram precipitações durante todo o período vegetativo (BARDIN *et al.*, 2010). Para evitar os inconvenientes do excesso de precipitação pluvial, em certos casos é preferível que a cultura vegete sob condições de seca, e que as necessidades hídricas sejam satisfeitas mediante irrigação planejada (NETTO *et al.* 2000).

As principais características meteorológicas das videiras estão condicionadas pela radiação solar, temperatura do ar, umidade atmosférica e umidade do solo, que determinam a atividade fotossintética e a evapotranspiração (TEIXEIRA, 2009).

A fotossíntese desejável para a cultura da uva está entre 25°C e 30°C. Em decorrência da fotossíntese ocorrer em temperaturas superiores a 30°C, existe grande probabilidade do peso e do tamanho das uvas ser reduzido, diminuindo significativamente os processos metabólicos para temperaturas próximas de 45°C. No caso de temperaturas inferiores a 20°C, as reações fotossintéticas são menos intensas (COOMBE, 1987).

Quando as videiras são cultivadas com condições térmicas elevadas as concentrações de ácido e de açúcar são aumentadas devido a influência da temperatura do ar sob a fisiologia da videira (KELLER, 2010). Outra característica apresentada por vinhos produzidos nestas condições são teores

de álcool e pH maiores, desfavorecendo a intensidade e qualidade do aroma, cor e longevidade do mesmo (ORDUÑA, 2010). A evapotranspiração é influenciada diretamente pela temperatura do ar, visto que, a atmosfera aquecida nas proximidades da videira, ocasiona a transferência de energia e aumenta os fluxos hídricos. Outra propriedade que afeta a fotossíntese da planta e a evapotranspiração é a radiação solar, fundamental fonte de energia (TEIXEIRA *et al.*, 2007). Por fim, a velocidade do vento no processo de evapotranspiração, porque este processo depende da turbulência do ar, a qual é afetada pela arquitetura das plantas (TEIXEIRA *et al.*, 2008).

Nesse contexto, o conhecimento da meteorologia local em micro-escala sobreposta ao saber local é fundamental para potencializar a produtividade e efetivar metodologias de manejo da uva, principalmente quando há uma demanda crescente por frutas de alta qualidade, o que amplia a necessidade de se diagnosticar e implementar estratégias para o monitoramento destas (FORMOLO *et al.*, 2011).

A possibilidade de utilização de equipamentos eletrônicos com grau de precisão elevados e, as condições de tomada de decisões no que diz respeito ao gerenciamento agrícola demonstram a evolução presente na agricultura, bem como sua modernização. Atualmente, os sistemas microprocessados e microcontrolados estão presentes nos mais diversos instrumentos e sistemas de medição, possibilitando que automatizações e integrações estejam presentes no ambiente agrícola.

Apesar dos diferentes métodos e estratégias elaborados para o monitoramento de parâmetros característicos da evapotranspiração, bem como redução de custos da produção, um monitoramento constante das culturas de uva se faz necessário para uma melhor resposta em termos de controle do sistema hídrico. Nesse sentido insere-se o uso de conjuntos sensores de baixo custo vinculados à microcontroladores, os quais podem ser instalados em diferentes pontos da área de cultivo, sem gerar um impacto econômico significativo sobre a atividade, aumentando a área amostral.

Para a existência de um manejo coerente no que diz respeito à irrigação, técnicas devem ser estudadas e elaboradas para a determinação da quantidade e o momento da aplicação de água. Entretanto, para a aplicação destas técnicas faz-se necessário o conhecimento de fatores como o tipo de solo, clima,

equipamentos utilizados para a irrigação e o tipo de planta a ser irrigada. Os fatores climáticos apresentam relação direta com o consumo de água das plantas e também com a evaporação da água do solo e a transpiração das plantas.

Apesar da grande relevância das variáveis meteorológicas sobre a atividade da viticultura, expondo a necessidade de um monitoramento preciso sobre o comportamento microclimático local, a obtenção de dados em grandes malhas amostrais fica frequentemente prejudicada pelo alto custo dos equipamentos convencionais utilizados. Sob esta perspectiva, a quantidade dos dados climático-meteorológicos obtidos para a região mostra-se reduzida e, assim, limitadora de considerações mais consistentes e detalhadas sobre a dinâmica deste ambiente, fundamental para o sucesso econômico da atividade vitivinícola.

Conforme Carlesso *et al.* (2007), uma estação meteorológica automática, é uma estação composta por sensores isolados que registram continuamente as variáveis meteorológicas (pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar, direção e velocidade do vento, radiação solar, precipitação volumétrica, etc.) que são lidos e anotados por uma unidade de memória. Este tipo de estação meteorológica pode atingir o custo total de mais de U\$10.000,00 (dez mil dólares americanos), no caso de um modelo produzido e comercializado por uma das maiores empresas do ramo, a Campbell, por exemplo. Equipamentos não certificados são encontrados no mercado por valores em torno de R\$3.000,00 (três mil reais), um custo ainda alto para os orçamentos dos cultivadores de uva da Serra Gaúcha, geralmente compostos por minifúndios. O custo do equipamento dificulta a aquisição de várias unidades, o que permitiria um monitoramento com alta resolução espacial.

Nesse sentido, a produção de equipamentos a partir de plataformas open-source (software e hardware), ou seja, livre e de código aberto, permite a montagem de instrumentos com as mesmas características, porém com custo notadamente inferior e com montagem customizada às necessidades do usuário. A montagem de uma estação meteorológica utilizando a plataforma Arduino, juntamente com sensores avulsos não ultrapassa o valor de R\$500,00 (quinhentos reais). Isto possibilita ampliar massivamente a malha amostral com o custo equivalente a uma estação meteorológica automática.

Assim, o desenvolvimento de equipamentos sensores baseados no conceito open-source possibilitará custos operacionais e de instalação menores, bem como um melhor entendimento do processo de aquisição de dados, fundamental para uma análise científica das medidas. Portanto, barreiras decorrentes ao custo de aquisição e custo operacional estão sendo rompidas, aumentando assim a malha amostral de dados.

Desta forma, o presente trabalho apresenta o desenvolvimento e a instalação de conjuntos sensores de baixo custo, baseados em arquitetura aberta, para o monitoramento de variáveis meteorológicas de interesse na determinação da evapotranspiração relativas à cultura da uva. O conjunto sensor desenvolvido permite o monitoramento de diferentes fatores como umidade do solo e umidade relativa do ar, temperatura do ar, precipitação pluviométrica, entre outros parâmetros. O mesmo está fundamentado na plataforma Arduino, a qual é baseada em um open-source hardware capaz de controlar vários dispositivos em um único conjunto.

Os sistemas eletrônicos de sensores remotos desenvolvidos fornecem as variáveis de entrada para a implementação e a validação do modelo de evapotranspiração baseados em imageamento por RPA (Aeronaves Remotamente Pilotadas, do inglês *Remotely Piloted Aircraft System*) para a área de estudo (modelo *Two-Source*), devido sua calibração ter como partida uma estação específica para tal fim.

1.1. Hipótese

A presente Tese assumiu como hipótese principal ser possível a construção de um sistema sensor de baixo custo, de modo a parametrizar com acurácia razoável a evapotranspiração de vinhedos como forma de monitoramento agrometeorológico, com elevadas frequência e resolução espacial, permitindo a aplicação em levantamentos por imageamento por RPA, levando ao manejo hídrico dessas áreas.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

Considerando a importância do monitoramento dos parâmetros físicos ligados à evapotranspiração em vinhedos, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema sensor de baixo custo, em plataforma livre, para o monitoramento agrometeorológico de videiras e fazer seu uso como forma de validação de dados de evapotranspiração obtida via RPA.

1.2.2. Objetivos Específicos

Para tanto, os seguintes objetivos específicos deverão ser alcançados:

- Desenvolver e implementar sensores para cada variável meteorológica de interesse para a estimativa da evapotranspiração baseada no balanço de energia em viticultura (i.e., velocidade do vento, umidade relativa do ar, saldo de radiação, fluxo de calor no solo, temperatura do ar e pluviometria);
- Determinar a evapotranspiração de videiras com o uso de dados-imagem obtidos via RPA a partir da implementação do algoritmo *Two-Source* proposto por Ortega *et al.* (2016) e sua comparação com o uso dos dados obtidos através dos sensores desenvolvidos;
- Validar e documentar o sistema sensor proposto, permitindo a extensão do uso desses como ferramenta pelos agentes locais.

CAPÍTULO II – REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. A cultura da uva voltada à produção de vinho

Esta seção do trabalho apresenta os principais parâmetros para um monitoramento do ambiente vitícola eficiente, elementos responsáveis pelo resultado da colheita e, por consequência, da qualidade do vinho. Conforme Tonietto e Mandelli (2003) as principais variáveis que interferem na atividade das videiras são: temperatura, precipitação, umidade do solo, umidade do ar e velocidade do vento.

Muitos dos danos causados às videiras são provenientes dos ventos, principalmente em plantas jovens e frágeis, no que diz respeito à quebra das mesmas, interferindo assim, na poda e na diminuição de frutos da parreira.

A incidência de luz sobre a planta possui intervenção direta sobre a evolução da videira, visto que, a mesma necessita de elevados índices de luminosidade para uma reputação de boa qualidade, necessitando assim, que a maturação se de em dias mais ensolarados proporcionando melhoria nos teores de açúcares da uva.

A videira sofre distintos efeitos ocasionados pela temperatura do ar devido às distintas fases do ciclo vegetativo ou de repouso das plantas. O ciclo de repouso vegetativo das videiras se dá sobre a estação do inverno, este com considerável importância para a quebra de dormência adequada das gemas, possibilitando assim, o adequado brotamento das videiras. Outro fator importante a ser considerado é a geada que pode vir a derribar os órgãos herbáceos da planta. Em temperaturas mais elevadas, principalmente no verão, a consequência dessas temperaturas pode ser de ocasionar frutos com teores de açúcares mais elevados e com menor acidez e, além disso, em frutos tintos pode ocasionar uma menor intensidade de cor.

Quanto à precipitação, é possível afirmar que se trata de um elemento substancial para o progresso da planta, principalmente no espaço de tempo constituído pela estação climática da primavera. Entretanto, o excesso de chuvas, bem como a umidade relativa do ar podem ocasionar o surgimento de fungos e ainda interferir em partes do ciclo fenológico da videira como, por exemplo, a floração e a frutificação, proporcionando pouca quantidade de frutos

e reduzindo a sua qualidade para a produção de vinhos. Em conjunto com o índice pluviométrico a umidade do solo em níveis superiores ao necessário para a planta pode ocasionar uma alteração negativa do teor de açúcar da fruta (TONIETTO e MANDELLI, 2003).

2.2. Evapotranspiração

A evapotranspiração constitui a sobreposição dos efeitos de evaporação e transpiração presentes em coberturas vegetais. A evaporação é o processo físico pelo qual um líquido como, por exemplo, a água, passa para o estado gasoso à temperatura ambiente. Isso ocorre quando uma molécula do líquido adquire energia cinética superior à energia de ligação desta molécula com as de sua vizinhança, libertando-se. Já a transpiração é a perda da água na forma de vapor. Nas plantas, a transpiração ocorre principalmente nas folhas (PONZONI e SHIMABUKURO, 2007; MARCHIORI, 2006). Esses fenômenos acontecem de forma simultânea (evaporação + transpiração) o que torna muito complexo separá-los, sendo mais correto utilizar o conceito de evapotranspiração (MARCHIORI, 2006).

Portanto, a evapotranspiração pode ser definida como o balanço existente entre a soma da perda de água pela evaporação do solo e pela transpiração da cobertura vegetal. A evapotranspiração é fortemente influenciada por condições meteorológicas, por características da camada de vegetação e das características do solo. Em sequência discutem-se algumas formas de determinação da evapotranspiração.

2.2.1. Importância da evapotranspiração para o manejo de irrigação

Segundo Salassier *et al.* (2006), a irrigação é considerada uma técnica de manejo agrícola que fornece as possibilidades de um aumento de produtividade e redução das perdas ocasionadas por efeitos de estiagem. O manejo da irrigação é um sistema que possibilita o monitoramento e a quantificação do consumo de água conforme a necessidade do cultivo em análise. Portanto, para o agricultor, a implantação de um sistema de irrigação, não garante por si só melhorias

na produção, e sim benefícios associados, como a utilização racional dos recursos hídricos, diminuindo por consequência o consumo de água e de energia. A seguir, são considerados os métodos de medição da evapotranspiração.

2.2.2. Métodos de medição da evapotranspiração

Os principais métodos de medição da evapotranspiração, segundo Varejão-Silva (2000) e Marchiori (2006), estão agrupados em métodos de medição direta e indireta:

(1) Medidas diretas: como forma de realizar medidas diretas da evapotranspiração são utilizadas amostras de solo reconstruídas sobre uma célula de carga, chamados de evapotranspirômetros ou lisímetros de carga, que contêm uma amostra representativa do solo e da comunidade vegetal que se deseja estudar. O lisímetro de carga deve retratar o mais fielmente possível, as condições reais do campo. Existem basicamente dois tipos de lisímetros, os de pesagem e os de não pesagem. Segundo Silva *et al.* (1999), os lisímetros podem ser classificados em categorias como: (A) não pesáveis com lençol freático de nível constante; (B) não pesáveis com drenagem livre; e (C) pesáveis onde a variação de massa do sistema é determinada por um mecanismo de pesagem. Além disso, são classificados quanto ao tipo de perfil (reconstituído ou monolítico) e ao sistema de drenagem (a vácuo e por gravidade).

(2) Medidas indiretas: dentre as medidas indiretas destacam-se o método do balanço de energia e método aerodinâmico. O método do balanço de energia se fundamenta no princípio da conservação de energia aplicado aos diferentes fluxos energéticos que acontecem na superfície fonte. Já o método aerodinâmico é baseado na hipótese de que a transferência turbulenta de massa, de calor e de quantidade de movimento é equivalente à difusão molecular

Dada às dificuldades operacionais das medidas diretas da evapotranspiração, tornou-se necessário o desenvolvimento de métodos que pudessem estimar a transferência de vapor d'água para a atmosfera. Entre os muitos métodos propostos, destaca-se o método de Penman (1948), em função da praticidade e por fornecer resultados bastante adequados de estimativa da evapotranspiração. O método foi desenvolvido a partir de elementos meteorológicos medidos em somente um nível, a superfície. A equação proposta por H. L. Penman (1948) se

baseia na combinação de processos aerodinâmicos e do balanço de energia, sendo expressa pela Equação 1:

$$ET_0 = \frac{[\left(\frac{s}{\gamma}\right).Rn+Ea]}{1+\frac{s}{\gamma}} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde **s** é a tangente à curva de que relaciona pressão de saturação do vapor d'água e temperatura do ar (kPa.oC-1); **g** é o coeficiente psicrométrico (0,0665 kPa.oC-1); **Rn** é o saldo de radiação expresso em termos de evaporação equivalente (mm.dia-1); **Ea** é o termo aerodinâmico.

Além do método de Penman, tem-se sua evolução, conhecida como método de *Penman-Monteith*. No ano 2000, o comitê técnico da *American Society of Civil Engineers* (ASCE) de evapotranspiração na irrigação e hidrologia, padronizou o método ASCE Penman-Monteith com base em uma cultura hipotética, cobrindo toda a superfície do solo, com altura de 12 cm, resistência aerodinâmica da superfície de 70 s m-1 e albedo de 0,23. Esse método foi padronizado em virtude da apresentação de estimativas confiáveis da **Eto** para grama e alfafa, com valores próximos aos medidos com lisímetros (ALLEN, 2000). Para o cálculo da **Eto**, utilizou-se o modelo padrão de Penman-Monteith, conforme descrito na Equação 2.

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(Rn-G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0,34u_2)} \quad (\text{Equação 2})$$

Sendo: **Eto** = evapotranspiração de referência, mm d-1; **Rn** = radiação na superfície terrestre, MJ m-2 d-1; **G** = densidade de fluxo de calor na superfície do solo, MJ.m-2 d-1; **T** = temperatura do ar média diária, °C; **u2** = velocidade do vento média diária, m s-1; **es** = pressão de saturação do vapor média diária, kPa; **ea** = pressão do vapor atual média, kPa; **Δ** = declividade da curva pressão-temperatura, kPa °C-1; **γ** = constante psicométrica, kPa °C-1.

Além dos modelos de estimativa da evapotranspiração de referencia, existem modelos de evapotranspiração destinados a determinação dessa variável a partir de dados-imagem cobrindo o espectro óptico e termal. A exemplo, podemos citar os algoritmos SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithms for*

Land- Allen et al., 2002), METRIC (*Mapping evapotranspiration at high resolution and with internalized calibration* - ALLEN et al., 2007) e o proposto por Ortega (2016), onde esse último foi desenvolvido especialmente para o tratamento de dados provenientes de RPA, destinando-se a determinação da evapotranspiração real em cultivares de uva.

O METRIC foi desenvolvido e destinado à estimativa do balanço de energia e evapotranspiração com procedimentos muito similares ao SEBAL, com algumas particularidades relacionadas à escolha do pixel úmido e ao cálculo da diferença de temperatura nesse pixel. O saldo de radiação à superfície R_n ($W m^{-2}$) foi computado utilizando a seguinte equação do balanço de radiação à superfície (Equação 3).

$$R_n = R_{s\downarrow} - \alpha R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_0)R_{L\downarrow} \quad (\text{Equação 3})$$

Já o modelo *two source*, destinado a culturas como olivares e vinhedos presentes em áreas de solo raso e relevo montanhoso, avança no sentido de valer-se da altíssima resolução das imagens obtidas por RPA a fim de obter os valores isolados dos vinhedos, em exclusão as áreas de solo. Considerando isso, o uso de RPA em pequenas áreas como os vinhedos da Serra Gaúcha, por exemplo, o modelo proposto por Ortega mostra-se promissor, permitindo uma análise diferencial entre solo e plantas.

2.2.3. Unidades de medida da evapotranspiração

A evapotranspiração é normalmente expressa em milímetros (mm) por unidade de tempo, sendo o tempo apresentado em horas, dias meses, anos ou todo o período de crescimento da cultura.

A altura de água pode ser expressa em termos de energia recebida por unidade de área. Essa energia refere-se à quantidade necessária de energia ou calor requerida para evaporar a água, denominada de calor latente de vaporização (L), que é função da temperatura da água. Para evaporar 1,0 mm de água é necessária uma quantidade de energia igual a $2,45 MJ.m^{-2}$. A taxa de evapotranspiração expressa em unidades de $MJ.m^{-2}.dia^{-1}$ é representada pelo fluxo de calor latente (LE).

2.3. Sensoriamento remoto da vegetação

De acordo com Meneses e Almeida (2012) a ideia mais clássica de sensoriamento remoto seria a técnica de obtenção de imagens de objetos na superfície terrestre sem que haja contato físico entre o objeto que captura a informação, ou seja, o sensor, e o objeto que está a ser observado.

Porém uma definição mais científica do processo dado pelos mesmos seria dizer que o sensoriamento remoto é uma ciência que visa o desenvolvimento da obtenção de informações da superfície terrestre por meio da detecção e medição quantitativa das respostas das interações da radiação eletromagnética (REM) com os materiais terrestres. Assim se teria um espaço vazio (vácuo) entre o objeto e o sensor, a possibilidade de a informação ser transportada até o sensor, e a energia eletromagnética, fazendo essa ligação entre o objeto e o sensor, único tipo de energia capaz de se transportar pelo espaço.

Segundo Crosta (1993), em relação ao processamento digital de imagens de sensoriamento remoto, ele teria o papel de fornecer as ferramentas que facilitarão a extração das informações que estão contidas nas imagens, para interpretações futuras. Assim lança-se mão de diversos softwares para que se realize a análise e o processamento de imagens brutas, geradas pelo sensor captor do objeto imageado, produzindo novas imagens com novas informações específicas de acordo com o que se deseja.

As imagens adquiridas através de sensoriamento remoto possuem características diferentes pois dependem dos alvos contidos na cena. A vegetação possui assinaturas espectrais, as quais devem ser entendidas como padrões de reflexão de radiação eletromagnética, em termos de comprimento de onda predominante. A vegetação, preferencialmente sadia, aponta maior resposta espectral na faixa do infravermelho próximo. O reconhecimento desse comportamento da vegetação facilita no processamento dos dados e aplicação dos mesmos (JENSEN, 2009). Um exemplo de comparação entre o comportamento espectral de uma cobertura vegetada em comparação a outras coberturas pode ser avaliada junto a Figura 1.

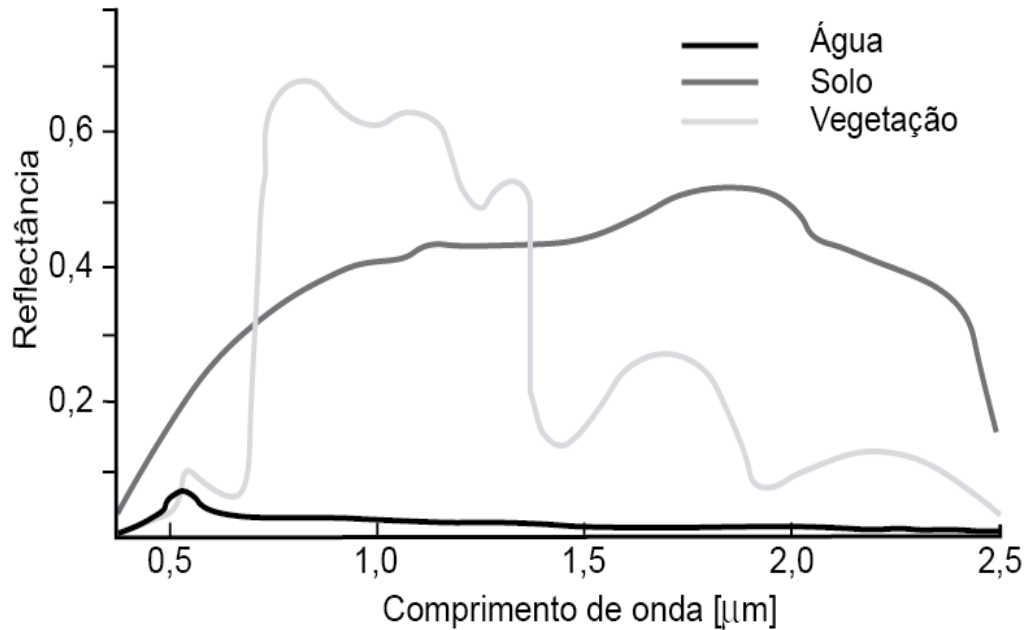


Figura 1: Comportamento espectral de determinados alvos. Florenzano (2002).

Dentro do estudo da vegetação no ramo do sensoriamento remoto estão os índices de vegetação. Tratam-se de determinações de medidas radiométricas que indicam a quantidade de vegetação presente na cena. Temos apresentados como exemplos por Jensen (2009), o índice de umidade por diferença normalizada (NDWI), onde tem como objetivo informar a quantidade de umidade interna presente na vegetação e é muito útil na para agricultura, floresta e hidrologia; Razão simples (SR), que consiste na razão entre a radiância refletida no infravermelho próximo e no vermelho e é capaz de informar a biomassa da vegetação ou o índice de área foliar, e o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), que funciona de forma análoga ao SR, e sua importância consiste em apresentar mudanças sazonais e interanuais no desenvolvimento da vegetação, redução de alguns ruídos presentes nas múltiplas bandas das imagens, entre outros

2.3.1. Interação Energia radiante vs. Alvos

Assim que um determinado fluxo radiante atinge uma superfície, ele sofre três fenômenos: reflexão, transmissão e absorção. Estes fenômenos são dependentes das características físico-químicas do próprio objeto, as quais definem as intensidades de reflexão, transmissão e absorção da REM em cada comprimento de onda incidente no objeto (VENTURIERI, 2007). A Figura 2

demonstra simplificada os efeitos que ocorrem sobre a luz ao atingir a superfície terrestre.

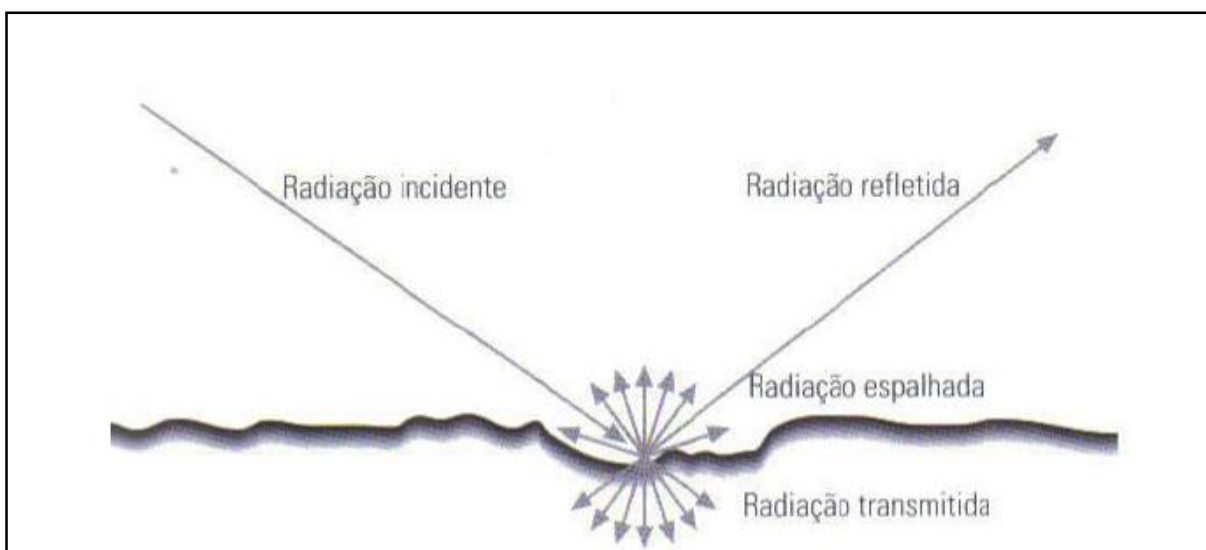


Figura 2: Interação da energia eletromagnética em uma interface (NOVO, 1992).

Venturieri (2007) alega que o fenômeno de reflexão se dá quando a luz, ao atingir uma superfície lisa, é refletida em relação ao ângulo em que a luz atingiu o objeto, já o processo de absorção se dá quando a mesma é absorvida pelo objeto, sendo convertida para a forma de calor, e, por fim, o processo de transmissão, quando a luz atravessa uma superfície ou objeto, podendo ser de 3 formas, direta, difusa ou seletiva.

A transmissão direta é quando a luz não altera sua direção ao atravessar um alvo, a difusa é quando ela se espalha em várias direções diferentes após atravessar um objeto e a seletiva se dá quando uma parte da luz é absorvida enquanto a outra é transmitida (VENTURIERI, 2007).

Segundo Jensen (2009), a radiação eletromagnética é propagada através da atmosfera terrestre quase na velocidade da luz, assim, ela (a atmosfera), pode afetar a velocidade como de propagação, seu comprimento de onda, sua intensidade e até mesmo sua distribuição espectral. Não se pode prosseguir sem citar os principais conceitos que ocorrem com a energia eletromagnética, sendo eles a radiância, irradiância e o fluxo radiante.

Meneses e Almeida (2012) abordam bem este assunto, ao definir a radiância como uma medida feita pelo sensor, da densidade do fluxo radiante que deixa um elemento de área da superfície do terreno, se propagando em

forma de cone. Já a irradiância seria a energia que chega à superfície do terreno, ou seja, aquela energia radiante (energia que se propaga da fonte) que consegue passar por diversos obstáculos, passando pelos efeitos de refração, espalhamento, absorção, e chega ao objeto que deve ser imageado. O fluxo radiante é a taxa no qual a energia radiante é transferida de um ponto ao outro, medida em watts.

Outro processo que pode ocorrer com a energia é o processo de refração, onde, ao encontrar um meio com densidade diferente, podendo-se citar o ar ou a água, a energia eletromagnética muda seu curso de direção. De acordo com Jensen (2011) a refração ocorre porque cada meio possui uma densidade diferente, e a energia eletromagnética possui diferentes velocidades em diferentes meios.

Além desses citados, tem-se o processo de espalhamento, que só se difere do processo de refração pelo fato de que a energia eletromagnética espalhada é imprevisível, já a refrata, em tese, é previsível (JENSEN, 2011).

Muito da energia que chega até a Terra acaba sendo absorvida por diversos objetos, sendo eles encontrados no solo ou até mesmo na atmosfera, assim sendo transmitida em forma de calor. Isso acontece quando a energia incidente de mesma frequência que a frequência ressonante de um átomo ou molécula é absorvida, produzindo um estado excitado (JENSEN, 2011).

O processo em que a energia que chega ao alvo é refletida do mesmo é chamada de reflectância, ela é definida segundo Meneses e Almeida (2012) como a razão entre a quantidade de energia radiante, ou seja, a energia que deixa o alvo, pela quantidade de energia irradiante, a energia incidente naquela área, podendo acontecer tanto na atmosfera quanto na superfície terrestre.

2.3.2. Interação Energia radiante vs. Vegetação.

A reflectância da radiação solar pela copa da vegetação envolve as reflectâncias conjunturais de vários fatores, incluindo estrutura da planta, estágio de crescimento, propriedades físicas e químicas de solos na superfície e condições atmosféricas (LIU, 2006).

À interação da energia eletromagnética com a vegetação dá-se uma reflectância muito mais forte nos comprimentos de onda do infravermelho próximo, onde, segundo Ponzoni e Shimabukuro (2010), os processos

fotossintetizantes das vegetações acabam absorvendo muito da luz do visível (RGB), assim, não refletindo muito desse tipo de onda de volta para o sensor.

Logo, ao querer analisar uma cobertura vegetativa, recomenda-se que se realize ou uma composição com o infravermelho, onde por ter uma maior reflectância a vegetação estaria mais destacada, ou realizando um NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada), que é obtido através da divisão entre a banda que possui uma maior reflectância na vegetação, ou seja, o infravermelho próximo, pela banda que possui uma menor reflectância, que é a do vermelho, assim destacando a vegetação no terreno.

A idéia chave no entendimento a interação vegetação-radiação eletromagnética é baseada no princípio da fotossíntese, onde a planta tem interesse em absorver radiação para executar seus processos vitais. Esse processo é regido pelos pigmentos fotossintéticos (i.e., clorofila, chantofila e carotenos) que absorvem a radiação eletromagnética, utilizando a energia absorvida para manutenção da atividade vegetal (PONZONI e SHIMABUKURO, 2009).

Quando uma planta saudável sofre uma diminuição elevada de água, acaba afetando outros fenômenos químicos e físicos da mesma. Quimicamente é de se esperar que a diminuição de quantidade de água resulte na degradação de proteínas e de pigmentos, fotossintetizantes, o que tornará a folha menos adequada para absorção de radiação eletromagnética nessa região espectral, o que resultará no aumento de valores na reflectância direcional-hemisférica.

Na região do infravermelho próximo, é possível observar que com a saída da água do interior das folhas, os valores desse fator aumentaram. Considerando que nessa faixa espectral a forma da curva é explicada pela estrutura interna das folhas, a saída da água devesse promover alguma alteração nessa estrutura. Essa alteração depende de fatores, tais como: densidade das paredes celulares (maior ou menor biomassa), arranjo das células dentro dos tecidos foliares, incluindo também o tempo de manutenção de um determinado teor de umidade (PONZONI e SHIMABUKURO, 2009).

2.3.2.1. Modelos de reflectância da vegetação

Quando estudamos materiais de diferentes composições químicas, eles acabam possuindo absorções e reflectâncias diferentes, em virtude das distintas

composições químicas e das disposições moleculares apresentadas por estes (JENSEN, 2009) resultando nas imagens em diferentes tons de cinza. Como por exemplo, no caso de uma área agrícola, as diferentes coberturas do solo (vegetação, água, solo exposto, etc.) terão formas de refletir e absorver a radiação eletromagnética que são específicas de cada cobertura. Esta forma específica de interagir com a radiação eletromagnética é denominada como comportamento espectral e pode ser utilizada para determinar a presença de alguma destas coberturas em uma certa área de interesse.

A radiação eletromagnética interage com a cobertura vegetal em função da faixa espectral da radiação e das características apresentadas pela planta. A forma padrão de interação entre a radiação eletromagnética e uma planta pode ser dividida em três intervalos espectrais, mostrados na Figura 3.

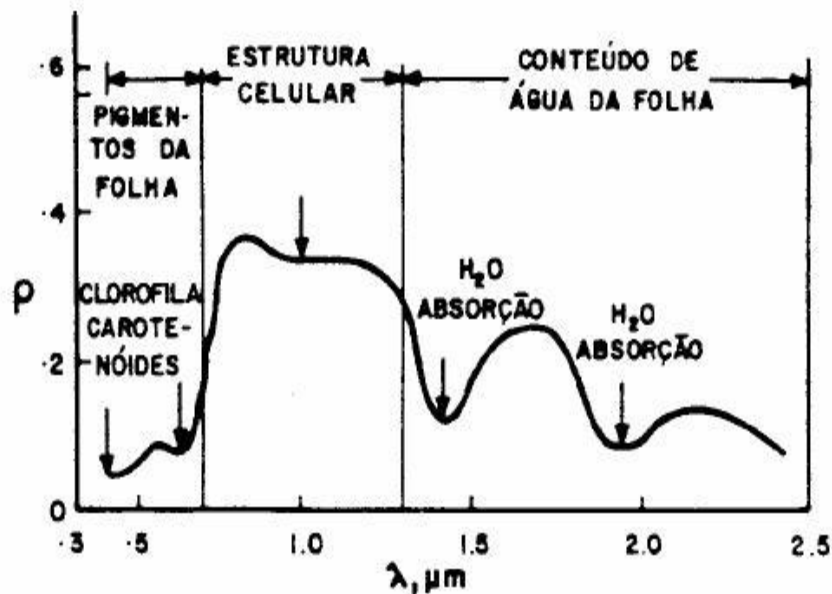


Figura 3: Curva de fator de reflectância direcional-hemisférico típica de uma folha verde. Novo, 1992.

Quando usamos essa ferramenta numa área plantada, podemos descobrir que tipo de produto está sendo plantado no local. A forma como a vegetação responde à radiação está relacionada à faixa de comprimentos de onda da radiação incidente. Para cada região do espectro eletromagnético, tem-se:

a) **Região do Visível:**

A radiação eletromagnética na região do visível possui comprimento de onda na faixa de 0,4 a 0,72 μ m. Nessa região os pigmentos existentes nas folhas da vegetação dominam a Reflectância. Ou seja, são eles que definem a forma da curva dos fatores de Reflectância nessa região espectral. Esses pigmentos geralmente encontrados nos cloroplastos, são: Clorofila (65%), carotenos (6%) e xantofilas (29%). Os valores percentuais destes pigmentos existentes nas folhas podem variar intensamente de espécie para espécie e a partir disso, conseguir diferenciar a espécie de vegetação que esta sendo estudada (PONZONI e SHIMABUKURO, 2009).

b) **Região do Infravermelho Próximo:**

A radiação eletromagnética na região do infravermelho próximo possui comprimento de onda na faixa de 0,72 a 1,10 μ m. Esta região é caracterizada pela baixa absorção da radiação e espalhamento interno na folha. A água absorve pouca radiação nesta região, sendo a reflectância constante.

c) **Região do Infravermelho Médio:**

Nesta região o teor de umidade das folhas é inversamente proporcional a reflectância, sendo que as propriedades visuais da folha estão associadas ao conteúdo de água presente (PONZONI e SHIMABUKURO, 2010). Como consequência disso, a análise desta região do espectro eletromagnético está caracterizada pelo grande conhecimento da eficiência da folha em relação ao nível de umidade.

2.3.2.2. Caracterização espectral da vegetação

O comportamento espectral da vegetação é caracterizado pela distinção entre três regiões no espectro eletromagnético: visível, infravermelho próximo e infravermelho médio. Quando começa o período de crescimento da planta, a reflectância da mesma tende a diminuir no visível e aumentar no infravermelho próximo. Durante sua fase de crescimento a planta possui uma quantidade maior de clorofila responsável pelo aumento de absorção de energia (PONZONI e SHIMABUKURO, 2010). As folhas maduras possuem uma estrutura interna menos compacta, com mesófilo esponjoso, resultando numa maior reflectância.

Na caracterização espectral de objetos na superfície terrestre é preciso utilizar dados orbitais, para que assim seja possível converter os números digitais presentes nas imagens em valores físicos. Com isso, é preciso definir o tipo de imagem (sensor) com qual vai se trabalhar, para alcançar um resultado significativo. Para que isso aconteça, é preciso lembrar que *pixels* maiores tendem a incluir em seu interior maior número de objetos com naturezas espectrais diferentes, o que limita bastante a caracterização (PONZONI e SHIMABUKURO, 2009).

2.3.3. Índices de vegetação voltados ao monitoramento da dinâmica hídrica da uva

Desde a metade do século XX cientistas vêm modelando e extraindo diversos parâmetros biofísicos da vegetação através de técnicas de sensoriamento remoto. Grande parte destes esforços tem sido direcionados para determinar índices de vegetação. Esses Índices de vegetação (ou índices físicos de vegetação) são medidas radiométricas adimensionais que se relacionam a características físicas da vegetação presentes nos dados coletados via SR.

Assim, os índices de vegetação realçam as características de interesse (i.e., biomassa, área foliar, estresse hídrico, entre outras) e através da correlação entre estes Índices de vegetação e medidas físicas de interesse, é possível se estimar de forma indireta a presença de vegetação, a concentração de nitrogênio, a umidade, por exemplo.

No que tange o monitoramento da cultura da uva via sensoriamento remoto e os modelos de evapotranspiração apresentados, todos utilizam índices de vegetação como forma de estimar a área coberta pela cultura, a emissividade desses alvos, bem como a rugosidade média apresentada, necessária para a determinação de variáveis agrometeorológicas, como o arrasto aerodinâmico presente.

Dentre esses índices de vegetação adotados, citamos o NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada), o SAVI (Índice de Vegetação Ajustado aos efeitos do Solo) e o IAF (Índice de Área Foliar). Cada um desses índices parte da premissa da alta resposta de reflexão para a vegetação nas faixas do infravermelho próximo e a alta absorção na faixa de comprimento de onda no intervalo do visível vermelho.

O NDVI teve como primeiro relato de uso em 1974 por Rouse *et al.* Com a formulação proposta por Kriegler *et al.* em 1969 como forma de identificação automática de vegetação em dados de imageamento digital. O NDVI tem seus valores relacionados à quantidade de biomassa refletora de radiação em um certo pixel.

O NDVI é importante porque mudanças sazonais e interanuais no desenvolvimento e na atividade da vegetação podem ser monitoradas através da variação de seus valores (i.e., ciclos fenológicos). Por ser um índice de razão d e bandas, ocorre a promoção da redução de formas de ruído multiplicativo (i.e., diferenças de iluminação solar, sombras de nuvens, atenuações atmosféricas, variações topográficas, etc.). O NDVI é muito sensível a variações de substrato sob o dossel (i.e., solos visíveis sob o dossel), fazendo com que os valores de NDVI sejam particularmente altos com substratos mais escuros (JENSEN, 2009).

Como uma tentativa de melhorar as estimativas da cobertura vegetal obtidas via NDVI, Huete (1988) propôs de forma empírica o índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI, do inglês *soil-adjusted vegetation index*) O índice é uma busca minimizar as influências do brilho do solo a partir de índices de vegetação envolvendo os comprimentos de onda do vermelho e do infravermelho próximo (NIR).

A partir do SAVI é possível estimar a área de cobertura das folhas de um dossel a partir do índice de vegetação IAF (Índice de área foliar). O IAF, definido como sendo a razão entre a área foliar de toda a vegetação por unidade de área utilizada por essa vegetação, é calculado pela equação empírica de Allen *et al.* (2002).

Esses índices permitem estimar a extensão e as características básicas da cobertura vegetal de interesse. Com essa informação, modelos de evapotranspiração buscam estimar parâmetros mais complexos como a emissividade da superfície e o calor específico dessas coberturas.

2.4. Eletrônica aberta

O termo “eletrônica aberta” existe a muito tempo, entretanto, o real significado deste, nos últimos tempos tem sido apreciado devido aos impulsos oferecidos pelas placas e plataformas de desenvolvimento a um custo

relativamente baixo, que adentraram ao mercado. Atualmente, *Open Source* é o termo utilizado para a denominação de código aberto. Quanto a maioria dos trabalhos contendo essa questão, trata-se da agregação de *Open Source Software* (software de código aberto) e *Open Source Hardware* (hardware de código aberto).

2.4.1 Open Source Software

Os softwares de código aberto, mais conhecidos como programas ou software livres), são aqueles programas que podem ser utilizados de maneira livre, sem pagar pelo uso ou qualquer obtenção do mesmo, ou seja, irrestrita utilização. Exemplos deste tipo de códigos são o Linux e o Android, ambos permitem o aperfeiçoamento, correção de problemas e mesmo, criação de aplicativos para seu melhor desempenho. Em 1985, Stallman definiu que seria considerado um software livre se os usuários tivessem as seguintes liberdades:

- 1) A liberdade de executar o programa, para qualquer propósito.
- 2) A liberdade de modificar o programa para adaptá-lo às suas necessidades (para tornar essa liberdade efetiva na prática, é necessário ter acesso ao código fonte, já que fazer alterações em um programa sem ter o código fonte é muito difícil).
- 3) A liberdade de redistribuir cópias gratuitamente ou mediante pagamento.
- 4) A liberdade de distribuir versões modificadas do programa para que a comunidade possa se beneficiar de suas melhorias.

A principal vantagem é a independência do usuário quanto a um exclusivo fornecedor, trazendo principalmente vantagem financeira por não necessitar de pagamento para atualizações ou versões de software, que geralmente ocorre com softwares fechados (WEBER, 2004). Como desvantagem, pode-se citar o fato da ausência de garantias quando na ocorrência de um similar no mercado, visto que, a maioria das licenças existentes para softwares livres, eximem o autor de responsabilidades.

2.4.2 Open Source Hardware

Um hardware de código aberto, é todo projeto livre (circuito, montagem, sistema, produto) que pode ser utilizado sem necessidade de pagamentos

autorais ou à empresa fabricante dos componentes. Conforme a documentação apresentada pela *Open Source Hardware Association* (OSHWA) diz que Open Source Hardware é um termo para artefatos tangíveis (máquinas, equipamentos ou outros objetos), cujo projeto foi disponibilizado ao público de modo que qualquer pessoa possa construir, modificar, distribuir e utilizar estes (OSHWA, 2013).

Entretanto, para utilizar um hardware, um sistema físico, existe a necessidade do investimento na placa de desenvolvimento e componentes que serão utilizados para as montagens.

CAPÍTULO III – MATERIAL E MÉTODOS

A execução dessa pesquisa foi dividida em três etapas metodológicas principais: (1) levantamento por imageamento multiespectral e termal de uma área de um vinhedo de controle (i.e., vinícola Geisse) com uso de um RPA para obtenção de da evapotranspiração do vinhedo com uso do modelo Two Source, (2) Projeto e montagem de um sistema sensor baseado no saldo de radiação para determinação da evapotranspiração do vinhedo de controle e (3) instalação em campo e validação do sistema sensor proposto a partir da comparação entre os dados obtidos por esse sistema e um sistema sensor de referência. Cada uma das etapas e materiais utilizados estão descritos em sequência.

3.1. Área de Estudo

A área de estudo foi definida no município de Pinto Bandeira, localizado na Serra Gaúcha, compreendendo parte dos vinhedos da vinícola Geisse (Figura 4). Essa escolha se deve ao fato de o município concentrar grande parte da cadeia produtiva da uva na província do Rio Grande do Sul, além da cidade de Bento Gonçalves, sede do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul - IFRS, estar próximo, o que possibilitou acordos científicos para aquisição de dados e acompanhamento experimental. Para os objetivos da pesquisa, a área correspondente à Vinícola (29 ° 08'48 "de latitude sul e 51 ° 25'33" de longitude oeste - UTM Projection, WGS84 datum, Zona 22S) foi utilizada para coleta e validação de dados.

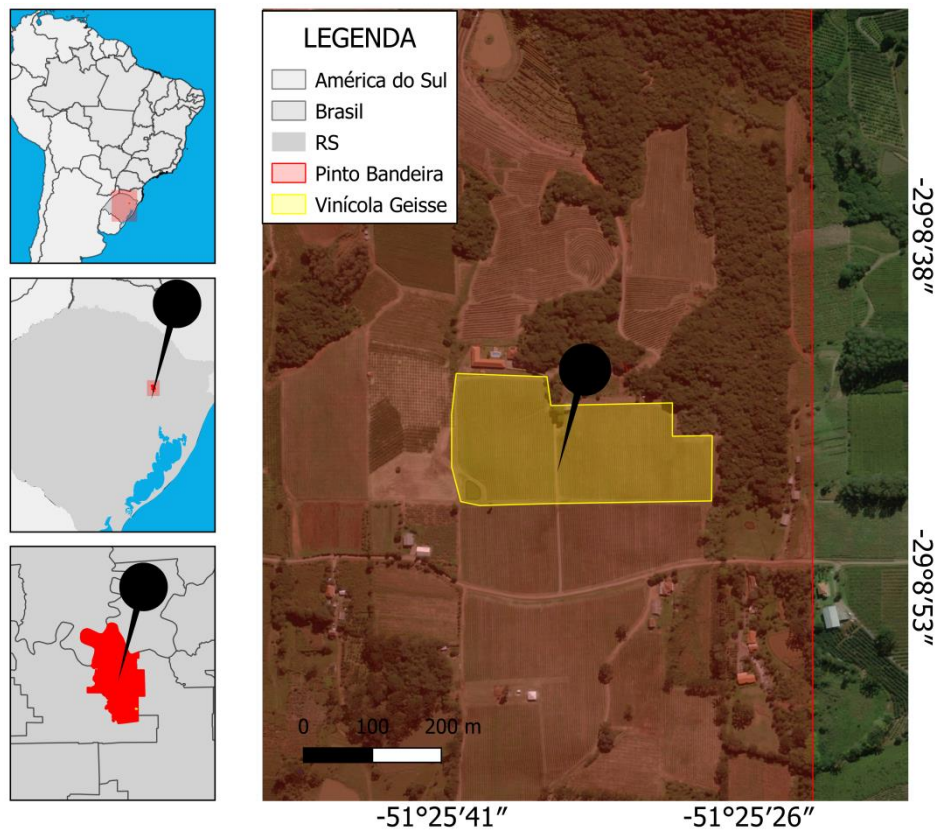


Figura 4: Mapa de localização da área de estudo.

A área de desenvolvimento desse estudo, foi selecionada em virtude da importância econômico-social da vitivinicultura para o Estado do RS, bem como pelo fato da área de vinhedos na serra gaúcha estarem sujeitas, esporadicamente, a variações significativas no balanço hídrico, seja o excesso ou a falta de água, o que reduz a produtividade e a qualidade das uvas produzidas.

De maneira resumida, a região da Serra Gaúcha possui um clima subtropical úmido, caracterizado por invernos frios e verões amenos (ROSSATTO, 2011). Reduziu a intervenção dos sistemas polares e dos sistemas marinhos tropicais associados aos efeitos alívio / altitude. A região revela abundância de chuvas médias anuais entre 1700-2000mm, temperatura média durante o ano entre 14° e 23°C, com meses frios variando entre 8° e 14°C e meses quentes entre 17° e 23°C (tipo Cfb, conforme classificação Köppen). Segundo Tonietto e Carbonneau (1999), a Serra Gaúcha apresenta um clima particular na viticultura mundial, devido ao seu clima úmido, clima temperado quente e noites temperadas.

A composição geológica local é dada pela Formação Serra Geral, sendo composta por basaltos, riolitos e ríolitos, formando solos rasos e pedregosos (NARDY *et al.*, 2002). O relevo local apresenta-se desde sRPAe ondulado até montanhoso com altitudes variando de 300 a 800 m acima do nível do mar. A geomorfologia é na forma de patamares e com vales encaixados (FALCADE e MANDELLI, 1999). O clima local tem precipitação de aproximadamente 1750 mm.ano-1, temperatura média de 17,2°C (FALCADE e MANDELLI, 1999).

Em função da diversidade litológica, de orientação e do relevo, os solos identificados apresentam variações em suas propriedades morfológicas, físicas e químicas. Na área de estudo, predominam solos com contato lítico a profundidades entre 50 e 100 cm, sendo de menor ocorrência solos mais profundos, o que caracteriza um solo com pequena capacidade de armazenamento hídrico.

3.2. Síntese dos passos metodológicos adotados

A síntese da metodologia dessa pesquisa está descrita na Figura 5 conforme apresentado. Esse fluxograma está dividido em três partes que correspondem as parcelas principais da prática dessa pesquisa.

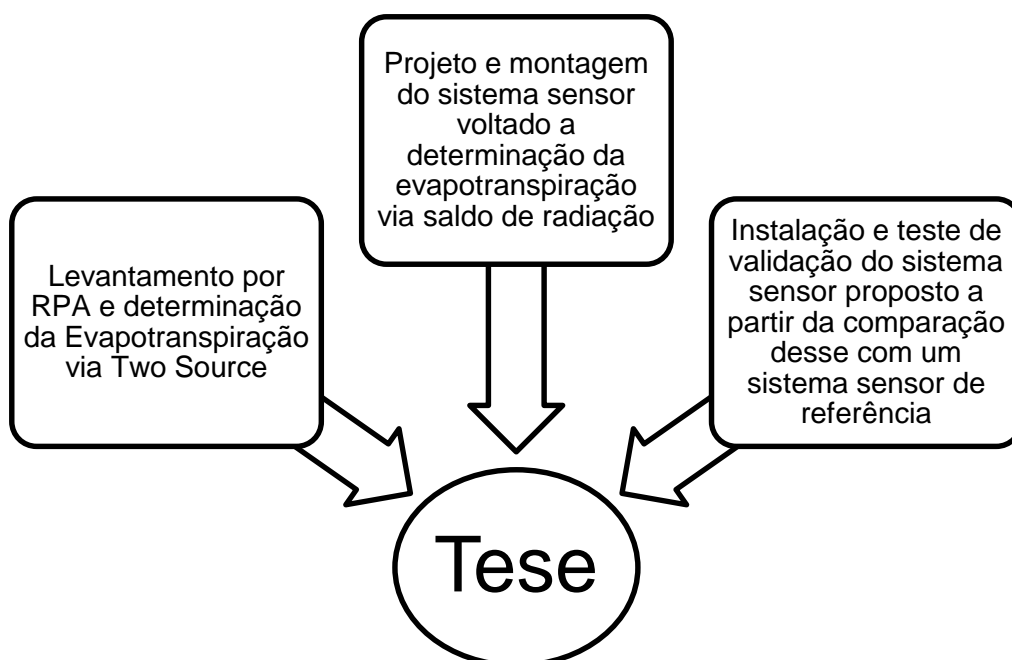


Figura 5 – Fluxograma síntese.

A Figura 5 de acordo com o informado apresenta em uma de suas linhas de trabalho a parte condizente com a construção do sistema de medição proposto. O sistema proposto possui como início a descrição das variáveis necessárias para a determinação da evapotranspiração (i.e., dados de radiação, iluminação, precipitação, temperatura, umidade e vento). Após, a escolha dos sensores que estão presentes no sistema se fez necessária, buscando atributos como, por exemplo, a estabilidade das medições e os custos de aquisição. A próxima seção expõe os sensores selecionados e suas principais características.

Prosseguindo, a construção do protótipo e os testes iniciais em laboratório ocorreram, buscando os ajustes e informações iniciais de funcionamento do sistema. Entretanto, os dados reais da medição foram conhecidos quando a estação proposta foi instalada em campo, juntamente com um sistema de referência. Estes sistemas foram inseridos no mesmo local e os dados coletados possuem a mesma resolução temporal, sendo assim, o cruzamento estatístico entre os dados obtidos pela estação desenvolvida e pelo sistema de referência, foram apurados e compatibilizados. Além disso, a fins de comparação e validação das medições realizadas pelos sensores utilizados, foi determinada a análise de correlação linear entre os dados agro-meteorológicos de controle e aqueles obtidos via o uso do sistema desenvolvido, com fins de determinar a confiabilidade e a aplicabilidade dos sensores desenvolvidos.

Esta validação dos dados entre as estações, somente possibilitou que o sistema proposto seja disposto com uma malha amostral condizente com a segunda vertente do trabalho. Ou seja, como o vôo do RPA apresentou como característica a busca pelo mapeamento de uma área de considerável resolução espacial, o sistema proposto foi inserido nesta resolução.

Portanto, dados vetoriais em formato *shape* obtidos através do site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e o vôo na busca das informações necessárias para o cálculo da evapotranspiração para uma determinada área de interesse, considerando o modelo proposto por Ortega *et al.* (2016).

A análise possui resolução temporal necessária para resguardar as variações anuais e fenológicas da cultura da uva. Sendo assim, a evapotranspiração (E_T), o saldo de radiação (R_n), o fluxo de calor sensível (H), o fluxo de calor no solo (G) e o fluxo de calor latente (L_e) foram observados em

cada vôo do RPA.

Os dados de SR foram interpretados através do uso de indicadores estatísticos como o teste não-paramétrico de correlação linear simples que visou determinar e avaliar a consistência do sistema sensor proposto em comparação ao sistema comercial em uso.

3.3. Obtenção da evapotranspiração via imageamento por RPA

O imageamento por RPA foi empregado com fins de obtenção de dados cobrindo as faixas espectrais do visível (comprimentos de onda correspondentes ao vermelho, ao verde e ao azul), do infravermelho próximo e do infravermelho termal. Para tanto, foi utilizado o RPA de asas (propriedade do IFRS), tendo acoplado a si duas câmeras: (1) câmera marca Nikon, modelo COOLPIX A, cobrindo as faixas espectrais do visível e do infravermelho próximo e (2) dados do sensor TIRS-LANDSAT 8, cobrindo a faixa espectral do termal.

Os dados obtidos via RPA foram utilizados para implementação adaptada do modelo de evapotranspiração de microescala espacial com diferenciação das áreas de solo e vegetação, proposto por Ortega *et al.* (2016). Para tanto, foram seguidos os passos metodológicos descritos na Figura 6.

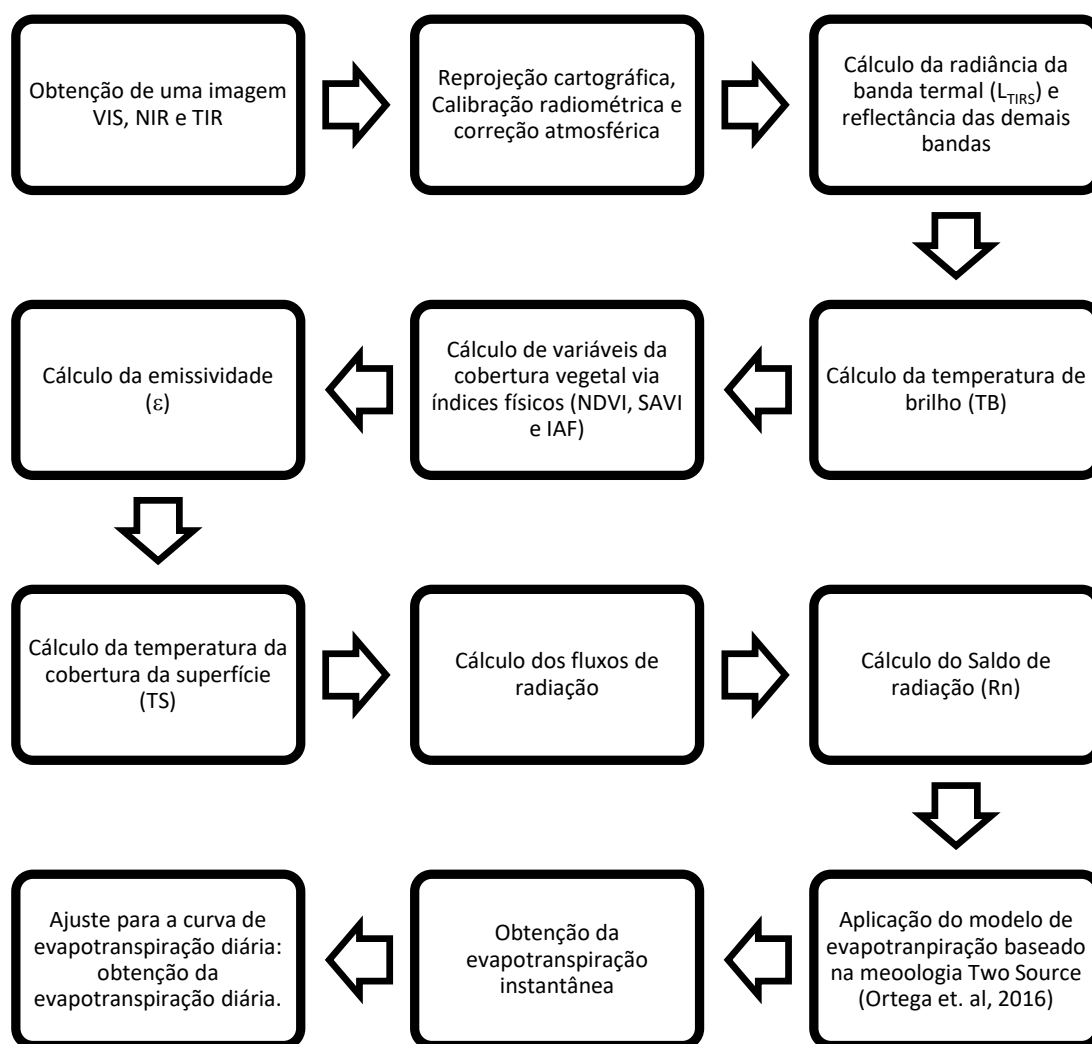


Figura 6: Passos para obtenção da evapotranspiração via imageamento por RPA.

Essa etapa metodológica foi implementada a partir do *software* QGIS, por se tratar de um *software* livre e de interface amigável, além de possuir a facilidade de ferramentas para a manipulação de dados-imagem em formato *Raster* (calculadora *raster*). Como resultados dessa etapa, foram obtidas imagens digitais representando a evapotranspiração da área de interesse, bem como as demais variáveis geradas durante o processo, como os fluxos de radiação, o albedo, os índices de vegetação, a emissividade da superfície, o fluxo de calor sensível (H), o fluxo de calor no solo (G), o saldo de radiação (Rn), o fluxo de calor latente (LE), a evapotranspiração para a vegetação e a evapotranspiração para a vegetação. Cada um dos passos empregados está melhor detalhado em sequência.

3.3.1. Pré-processamento e organização da base cartográfica

A etapa de pré-processamento e organização da base cartográfica consistirá na transformação dos dados obtidos através do imageamento por RPA, de números digitais para valor de radiância espectral e/ou reflectância. Para tanto, foram utilizados os dados de ganho e *offset* contidos nos arquivos auxiliares dos dado-imagem e dados de descrição dos sensores empregados, permitindo a conversão dos valores dos arquivos de números digitais para radiância a partir da Equação 4:

$$L_{(\lambda)} = a \cdot B_{(\lambda)} + b_{(\lambda)} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde, $L_{(\lambda)}$ é a radiância da banda de intervalo de comprimentos de onda (λ) , a e b são o **ganho** e **offset**, respectivamente e, $B_{(\lambda)}$ é a banda original do sensor, armazenada no momento da coleta em números digitais (NDs). A partir da imagem convertida para radiância espectral e dos dados de iluminação do momento da coleta (e.g., ângulo de elevação solar, hora do dia, latitude, abertura angular do sensor, entre outros), executa-se a conversão dos valores de radiância para valores de reflectância, no caso das bandas de reflexão. Já para as bandas termais, converte-se a radiância coletada em valores de temperatura de brilho, ou seja, a temperatura esperada para um corpo negro que emita esse fluxo radiante medido.

Além das conversões radiométricas iniciais, a etapa de pré-processamento executa a compatibilização entre os sistemas de representação cartográfica adotados pelas distintas bases de dados. No presente trabalho, foi adotado como padrão o sistema de projeção cartográfica UTM – *Universal Transversa de Mercator*, com *datum* de referência SIRGAS_2000, sendo esse o padrão proposto pelo IBGE desde 2006. Assim, os dados coletados via RPA, sendo nativos ao sistema de projeção cartográfica UTM, *datum* de referência WGS_1984, foram reprojctados. Para tal, foi utilizado o software QGIS em suas ferramentas específicas a esse fim.

3.3.2. Cálculo dos índices de vegetação e da emissividade da superfície

Um índice de vegetação é um número adimensional, estimado a partir dos valores de radiância ou reflectância de distintas bandas espectrais de um sensor

imageador, diretamente relacionado a alguma propriedade da vegetação (e.g., cobertura, presença, vigor vegetativo, atividade fotossintética, área foliar, entre outras). O NDVI (índice de vegetação por diferença normalizada) é um índice de vegetação baseado em uma razão entre os valores de resposta (valores de radiância ou reflectância) para as bandas espectrais do vermelho e do infravermelho próximo, tendo sido inicialmente descrito por Birth e McVey (1968). Ele fornece relevantes informações sobre a biomassa da vegetação, sendo sensível a variações de biomassa das coberturas vegetais, podendo ser utilizado no realce da presença de vegetação. Esse índice considera a propriedade física da vegetação sadia em refletir fortemente radiações com comprimentos de onda na faixa do infravermelho próximo (IVP), enquanto absorverem quase a totalidade das radiações eletromagnéticas na faixa do visível para fins de fotossíntese (Shimabokuro, 2006).

O NDVI é determinado dividido-se, para um mesmo dado-imagem, o valor da diferença de radiâncias ou reflectâncias (obtido pela reflexão difusa) na faixa do IVP e na faixa do visível (Vermelho) pela soma das radiâncias ou reflectâncias (obtido pela reflexão difusa) na faixa do IVP e na faixa do visível (Vermelho).

Este índice tem seus valores relacionados à quantidade de biomassa refletora de radiação em um certo pixel. O NDVI é importante porque mudanças sazonais e interanuais no desenvolvimento e na atividade da vegetação podem ser monitoradas (i.e., ciclos fenológicos), enquanto a razão entre bandas reduz muitas formas de ruído multiplicativo (i.e., diferenças de iluminação solar, sombras de nuvens, atenuações atmosféricas, variações topográficas, etc.). A ressalva fica no fato do NDVI ser muito sensível a variações de substrato sob o dossel (i.e., solos visíveis sob o dossel). Os valores de NDVI são particularmente altos com substratos mais escuros, o que conotaria maior absorção por parte da vegetação presente, o que nem sempre é verdade.

Matematicamente, o NDVI pode ser calculado pela Equação 5:

$$NDVI = \frac{IVP - VIS}{IVP + VIS} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde, IVP e VIS indicam os valores de radiância ou reflectância espectral para um certo pixel para as bandas do infravermelho próximo e do visível (vermelho), respectivamente.

Os valores de NDVI permitem inferir a natureza da cobertura dominante em um dado pixel. Isso permite que se estime a capacidade que um dado pixel tem de emitir radiação, quando comparado a um corpo ideal (corpo negro), a mesma temperatura – sua emissividade. Para a estimativa de emissividade da superfície, o método de Griend e Owe (1993), que utiliza uma correlação empírica entre emissividade e NDVI foi o adotado. A estimativa de emissividade média é expressa em função do NDVI pelo algoritmo:

Para NDVI ≤ 0,24, considerado como solo nu, e = 0,94;

Para NDVI > 0,24, e = 1,0094 + 0,10824 log (NDVI)

Buscando ajustar as influências do substrato sobre as estimativas da cobertura vegetal, foi calculado o SAVI (Índice de Vegetação Ajustado para os Efeitos do Solo), adotado como parte dos algoritmos de estimativa da evapotranspiração. O SAVI pode ser calculado pela Equação 6.

$$SAVI = \frac{[(1+L).(IVP - VIS)]}{[L + IVP + VIS]} \quad (\text{Equação 6})$$

Onde IVP representa o valor de um dado pixel na faixa espectral do infravermelho próximo, VIS indica o valor desse pixel para a faixa espectral do visível (geralmente adotado como o vermelho) e L é uma constante, cujo valor mais frequentemente usado é 0,5 (Accioly *et al.*, 2002; Boegh *et al.*, 2002; Silva *et al.*, 2005). L relaciona a extinção diferencial do fluxo radiante a partir do dossel em direção ao substrato.

Além do NDVI e do SAVI, também foi calculado o IAF (Índice de Área Foliar). O IAF, definido como sendo a razão entre a área foliar de toda a vegetação por unidade de área utilizada por essa vegetação, foi calculado pela equação empírica de Allen *et al.* (2002). O IAF é utilizado como dado para o algoritmo de evapotranspiração, dado pela Equação 7.

$$IAF = - \frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (\text{Equação 7})$$

3.3.3. Cálculo do saldo de radiação sobre a superfície (Rn)

Para a determinação dos fluxos de radiação, resultando no saldo de radiação sobre a superfície, devemos calcular os fluxos de radiação incidente e emitida pela superfície, expressos pela Equação 8.

$$Rn = R_{s\downarrow} - \alpha R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_0)R_{L\downarrow} \quad (\text{Equação 8})$$

Onde, Rn é o saldo de radiação, $R_{s\downarrow}$ representa o fluxo de radiação solar incidente na faixa de ondas curtas sobre a superfície, $\alpha R_{s\downarrow}$ representa a radiação solar na faixa de ondas curtas refletida pela superfície em direção ao ambiente, $R_{L\downarrow}$ indica a radiação de ondas longas incidente sobre a superfície proveniente da atmosfera vizinha, $R_{L\uparrow}$ indica a radiação de ondas longas emitida pelos materiais que compõem a superfície e o termo $(1 - \epsilon_0)R_{L\downarrow}$ representa a radiação de ondas longas que incide na superfície e é refletida de volta sem ser absorvida. Esse equacionamento despreza as trocas de calor via contato e convecção, assumindo a irradiação como a principal forma de transporte de energia térmica.

3.3.4. Aplicação do modelo de evapotranspiração com abordagem Two Source (Ortega et al., 2016)

Vários algoritmos baseados em balanço de energia para estimativa da evapotranspiração (RSEB - *Remote Sensing Energy Balance*) variam em complexidade e nas simplificações de parametrização para a estimativa da evapotranspiração. O ponto comum entre todos esses algoritmos RSEB é obter o fluxo de calor latente (LE) a partir do saldo de radiação (Rn), do fluxo de calor sensível (H) e do fluxo de calor do solo (G), o que pode ser expresso pela Equação 9.

$$LE = Rn - H - G = ET_a \frac{\lambda \rho_w}{3600} \quad (\text{Equação 9})$$

Onde LE é o fluxo de calor latente, Rn é o saldo de radiação, G é o fluxo de calor no solo, H é o fluxo de calor sensível, λ é o calor latente de vaporização da água, ρ_w é a densidade de água e a constante 3600 converte a unidade de segundos para horas. Os valores de LE, Rn, G e H são estimados no momento da coleta pelo sensor.

O método *Two Source* proposto por Ortega *et. al* (2016) avança ao diferenciar os saldos de radiação para o solo e a cobertura vegetal de interesse, expressos por R_{nc} e R_{ns} . Esses representam os valores dos saldos de radiação para as contribuições do dossel e solo. Os valores instantâneos para R_{nc} e R_{ns} são calculados estabelecendo um equilíbrio entre a radiação de ondas longas e ondas curtas, separadamente, para a superfície do solo e o dossel, expressos pelas equações 10 e 11.

$$R_{nc} = (1 - \alpha_c) R_{se} + L_{in} - L_{outc} - (1 - \epsilon_c) L_{in} \quad (\text{Equação 10})$$

$$R_{ns} = (1 - \alpha_s) R_{se} + L_{in} - L_{outs} - (1 - \epsilon_s) L_{in} \quad (\text{Equação 11})$$

Onde R_{se} é o saldo de radiação de ondas curtas de entrada instantânea, R_{ns} e R_{nc} são albedos do solo e do dossel, respectivamente; L_{in} é a radiação de onda longa recebida instantaneamente; L_{outc} e L_{outs} são as radiações de ondas longas instantâneas saindo do solo e do dossel, respectivamente; ϵ_c e ϵ_s são as emissividades térmicas da superfície do solo e do dossel, respectivamente.

Com essas considerações, foram obtidas os valores de evapotranspiração diária e instantânea a partir de imageamento por RPA, onde teremos a determinação dos fluxos de radiação e do saldo de radiação em cada parcela da área de interesse (vegetação e solo). Esses valores de evapotranspiração obtidos pelo modelo *Two Source* foram ajustados estatisticamente a partir de dados de campo obtidos por sensores lisímetros desenvolvidos nesse trabalho seguindo o descrito no item 3.2 e distribuídos ao longo de toda a área em um espaçamento máximo de 100 m.

3.4. Desenvolvimento do sistema em arquitetura aberta

O trabalho apresenta a seguir os principais fundamentos de monitoramento de dados agrometeorológicos aplicados à viticultura, segue apresentando os conceitos da plataforma utilizada para o desenvolvimento do mesmo, a Plataforma Arduino, e os sensores utilizados para implementação do trabalho, descrevendo ainda o sistema desenvolvido e a metodologia para a validação dos dados e, por fim, apresentando resultados, conclusões e

propostas para trabalhos futuros.

Os materiais e os métodos empregados para a estimativa da evapotranspiração estão apresentados na Figura 7.

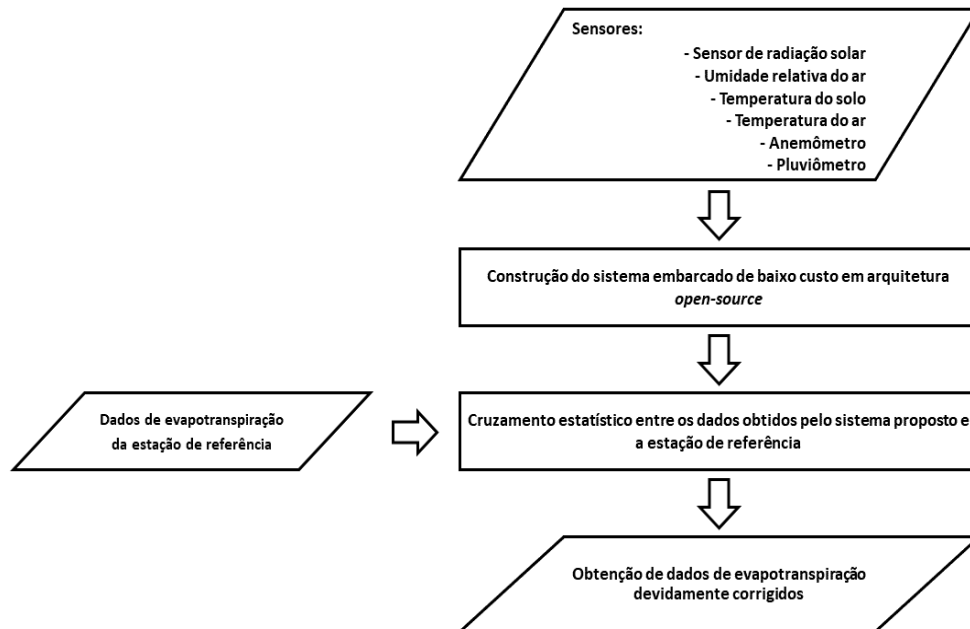


Figura 7: Metodologia para obtenção da estimativa da evapotranspiração com o sistema proposto.

A implementação do sistema possuiu como início a descrição das variáveis necessárias para a determinação da evapotranspiração (i.e., dados de radiação, iluminação, precipitação, temperatura do ar e do solo, umidade relativa do ar e do solo e velocidade do vento). Conhecendo as variáveis a serem monitoradas, encaminhou-se para a escolha dos sensores, buscando atributos como, por exemplo, a estabilidade das medições e os custos de aquisição.

A construção do sistema e os testes iniciais em laboratório foram feitas buscando os ajustes e informações iniciais de funcionamento do equipamento. Entretanto, os dados reais da medição somente foram conhecidos quando a estação proposta foi instalada em campo, juntamente com uma estação de referência (estação automática comercial). Estas estações foram instaladas no mesmo local e os dados coletados por ambas têm a mesma resolução temporal, possibilitando o cruzamento estatístico e a compatibilização entre os dados obtidos pela estação proposta e pela estação comercial.

Os principais elementos formadores do sistema estão apresentados na Figura 8.

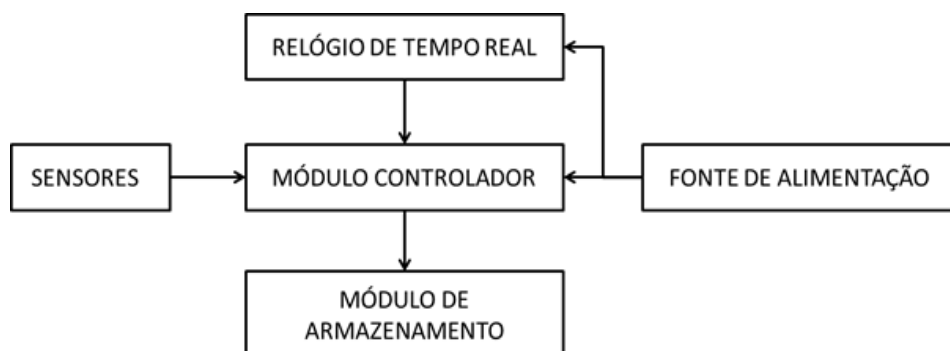


Figura 8: Sistema proposto

A seguir são apresentadas informações quanto ao relógio de tempo real, módulo controlador, fonte de alimentação e sensores considerados para a medida das variáveis para a estimativa da evapotranspiração.

3.4.1. O Microcontrolador Arduino®

A proposta do trabalho está baseada em um sistema de baixo custo, sendo assim, a escolha do Arduino como hardware de controle e o software de desenvolvimento do mesmo, IDE (*Integrated Development Environment*). O Arduino é um sistema livre que possui um microcontrolador, com entradas e saídas encastoadas em uma única placa, utilizando como base a linguagem C para a programação e desenvolvimento de softwares para a placa.

O microcontrolador, que existe em várias formas, com diversos tamanhos e configurações de placas, disponível livremente que qualquer pessoa, com os conhecimentos necessários pode montar e trabalhar. Estes microcontroladores da série Atmel da AVR (ARDUINO, 2019) são muito populares com baixo consumo de energia, o que é um fator crítico na escolha de um microcontrolador para sistemas de sensoriamento, visto que o elevado consumo de energia diminui a autonomia do sistema.

O ATmega328 é o microcontrolador da placa do Arduino UNO (Figura 9) e foi selecionado no presente trabalho por conta de seu baixo custo, facilidade de aquisição no mercado nacional e, sobretudo, porque nesse momento inicial 32KB de memória *flash* (memória de somente leitura que pode ser programada

e apagada eletricamente) são o suficiente para as aplicações descritas na proposta.

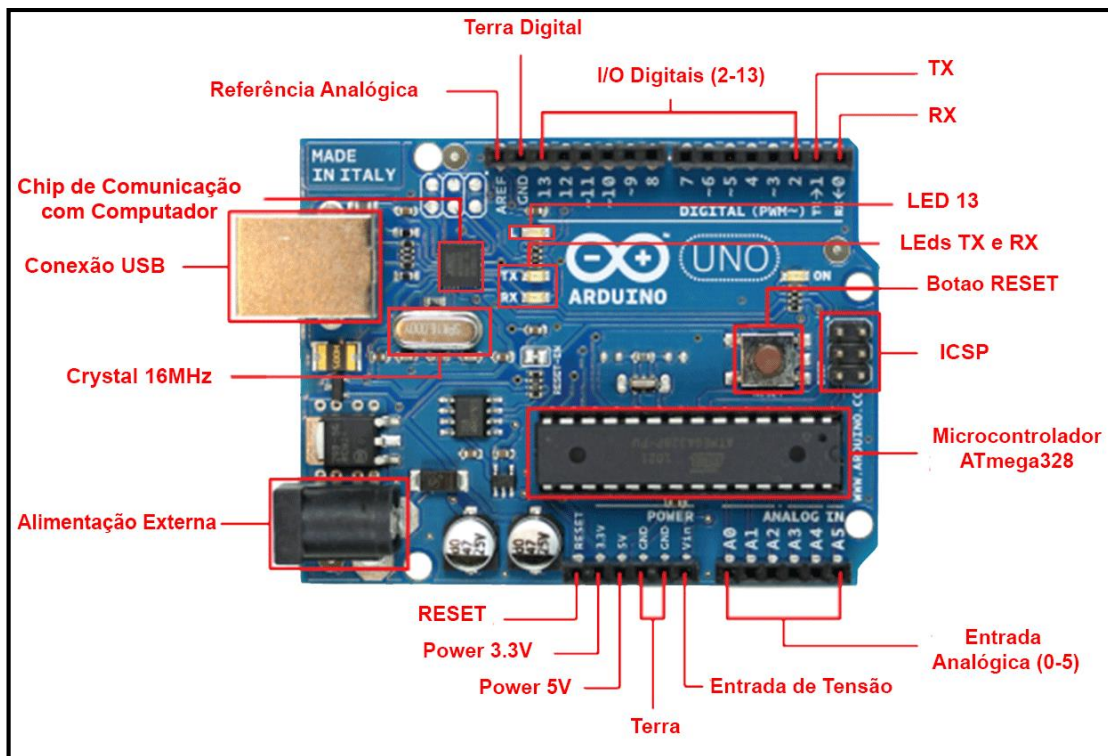


Figura 9 – Arduino Uno. Adaptado de Arduino,(2016).

3.4.2. Armazenamento de Dados

Considerando que a memória de armazenamento de dados do Arduino é bastante limitada, adotou-se a opção de usar cartões de memória como alternativa para armazenar os dados monitorados. Além de grande capacidade de armazenamento, apresenta custo relativamente baixo, vindo ao encontro das premissas do trabalho proposto. A 10 apresenta um *shield* para cartão SD; *shield* é o nome dado às placas de expansão de hardware que encaixam na placa Arduino principal, através dos *shields* uma placa Arduino pode ser melhorada.



Figura 10 – Shield para cartão SD. Adaptado de Arduino,(2019).

3.4.3. Alimentação

A alimentação do sistema em teste pode ser realizada por um dispositivo eletrônico que faz a conversão de uma tensão alternada da rede (110/220V) para tensão contínua como, por exemplo, em uma fonte ATX de computador que transforma a tensão AC (corrente alternada) para 3 valores de tensão CC (corrente contínua), sendo elas 12Vcc, 5Vcc e também 3,3Vcc. Para efetuar essa transformação ela dispõe de um circuito eletrônico que faz a retificação da tensão de entrada, e a filtragem e regulação da tensão de saída.

Outro exemplo de aplicação muito bem empregado para este trabalho e, vem ao encontro das premissas do trabalho é a utilização de carregadores antigos de celulares, estes geralmente são *bi-volt* e podem receber em sua entrada as tensões de 110V ou 220V e, liberam em sua saída uma tensão em torno de 5V, dependendo da marca e modelo.

Entretanto, como se trata de um rede de sensores sem fios a utilização da alimentação até o momento se deu através de baterias convencionais de 9V. Contudo, visto que as análises do trabalho estão embasadas na autonomia do sistema, pretende-se a implantação de painéis solares, em conjunto com sistemas eletrônicos de controle de carga e descarga, para carregamento de baterias.

3.4.4. Relógio de Tempo Real

Um relógio de tempo real (RTC ou *Real Time Clock*, em inglês) é um relógio computacional (geralmente sob a forma de um circuito integrado) que mantém o controle do tempo/calendário. O RTC está presente na grande maioria de equipamentos e aplicações que necessitam de características específicas, no que diz respeito ao controle de tempo.

Embora o controle do tempo possa ser feito sem um RTC, sua utilização acrescenta vantagens devido ao fato de necessitar de pouca energia para seu funcionamento, propiciando ao sistema principal condições de se dedicar a tarefas mais importantes, é um método reconhecido como preciso e trabalha com fonte de energia do sistema (a mesma do microcontrolador) ou com energia alternativa própria (bateria), permanecendo em funcionamento mesmo na falta de energia da fonte principal do sistema.

Com o intuito de fornecer à aplicação as informações de data e hora do instante em que foram realizadas as leituras dos sensores, utilizou-se um RTC modelo DS1307. Este relógio apresenta uma comunicação serial com o protocolo I²C (MAXIM, 2015).

O DS1307 ainda possui uma memória de 56 bytes e consome cerca de 500nA, além de comutar para a alimentação secundária no caso de falta de energia, devido a um sensor interno que realiza exclusivamente esta função (MAXIM, 2015) . A alimentação secundária é realizada através de uma bateria código CR2032 de 3,5V geralmente de íon-lítio de 35mAh e, sua utilização no sistema é indispensável. Como o consumo de energia do DS1307 é baixo, a duração da bateria de alimentação secundária pode chegar a 8 anos, considerando constante o consumo de 35mAh. A Figura 11 apresenta o RTC utilizado no trabalho.



Figura 11 - RTC. Maxim, (2015).

3.4.5. Sensor de Luminosidade

O LDR (*Light Dependent Resistor*) apresentado na Figura 12 é um componente fotoresistor que apresenta uma variação de resistência elétrica quando uma variação de luminosidade incide sobre este. Possui em sua composição o sulfeto de cádmio (CdS), um material com característica semicondutora que tem como atributo principal a diminuição de sua resistência por consequência do aumento de luminosidade incidente (THOMAZINI, 2005).

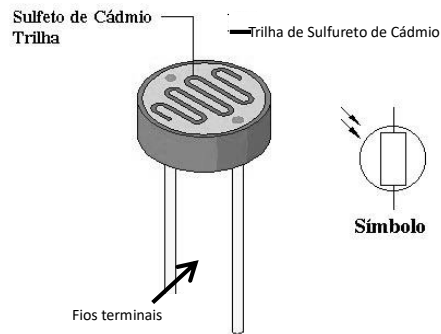


Figura 12 - Sensor LDR. Doctrronics, (2017).

3.4.6. Sensor de Temperatura

O sensor utilizado para a medição de temperatura é um sensor digital DS18B20 (MAXIM, 2018) que possui um controle de sua resolução entre 9 e 12 bits, com isso ocorre um aumento ou diminuição de sua precisão e, conforme o aumento do número de bits utilizado maior foi o tempo de processamento do controlador devido ao aumento do número de conversões necessárias. Possui ainda a função de alarme através de configurações realizadas por um usuário para níveis máximos e mínimos de temperatura.

A Figura 13 apresenta o sensor DS18B20 em diferentes encapsulamentos (muitas vezes chamados de invólucros). A primeira parte da imagem remete a um sensor DS18B20 com encapsulamento do tipo TO-92 (encapsulamento mais utilizado para o sensor) e a segunda parte mostra o encapsulamento para ambientes externos e que possui também a característica de ser a prova d'água.

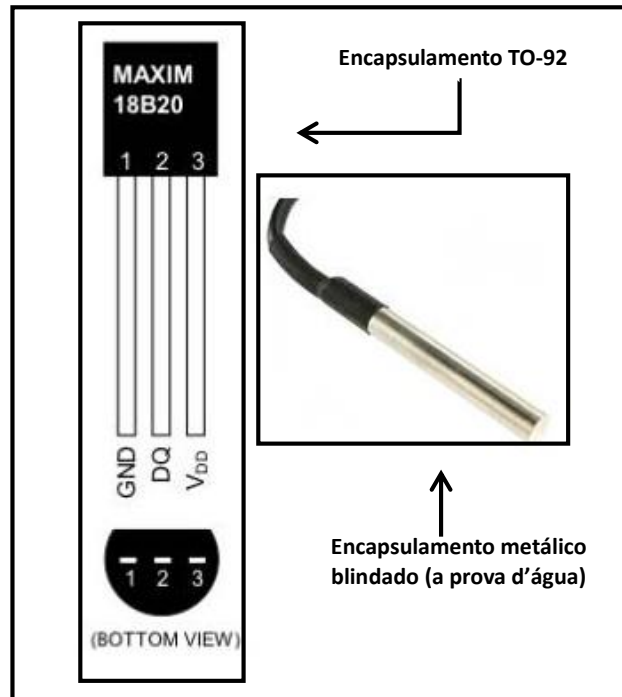


Figura 13 - Sensor de Temperatura DS18B20. Maxim, (2018).

Sua comunicação com o controlador é do tipo *One-Wire* (um fio) que apresenta como característica a comunicação através de uma única linha de dados. É um protocolo de comunicação que basicamente consiste barramento de dados formado por dois fios e ligados aos sensores, sendo um dos fios o de *ground* (terra) e outro é utilizado para alimentação e dados simultaneamente (MICROCHIP, 2008).

Os componentes que utilizam o protocolo *One-Wire* são elementos que necessitam de uma corrente de alimentação muito reduzida, possibilitando assim utilizar o próprio barramento de dados como alimentação para seu funcionamento.

Este protocolo pode ser utilizado para uma sequência de sensores devido à característica de comunicação entre os componentes sensores e o controlador ser do tipo mestre/escravo. O controlador mestre realiza a identificação dos endereços de cada sensor no barramento, é uma identificação única e de fábrica, apresenta um código de 64 bits gravado em uma pequena memória ROM (*Read Only Memory*). Um protocolo *One-Wire* permite que até 127 elementos estejam conectados ao mesmo barramento (MICROCHIP, 2008).

3.4.7. Sensor de Umidade

Para a medição de umidade foi escolhido o sensor DHT11 que apresenta dois sensores no mesmo encapsulamento (temperatura e umidade).

A parte de temperatura é realizada com um termistor NTC (*Negative Temperature Coefficient*) que apresenta um coeficiente de variação de resistência com a temperatura negativa, ou seja, a resistência diminui com o aumento da temperatura. A medição de umidade é realizada através de um elemento resistivo. Possui como característica a diminuição da resistência interna com o aumento da umidade (D-ROBOTICS, 2010).

Estes sensores estão ligados a um conversor analógico-digital AD e à leitura dos valores pode ser realizada através de um canal de comunicação serial dedicado (*One-Wire*), devido ao fato do DHT11 possuir internamente um microcontrolador de 8 bits.

A Figura 14 apresenta um sensor DHT11 com seu esquema de ligação usual, onde o resistor de 10k Ω é utilizado para calibragem do componente.

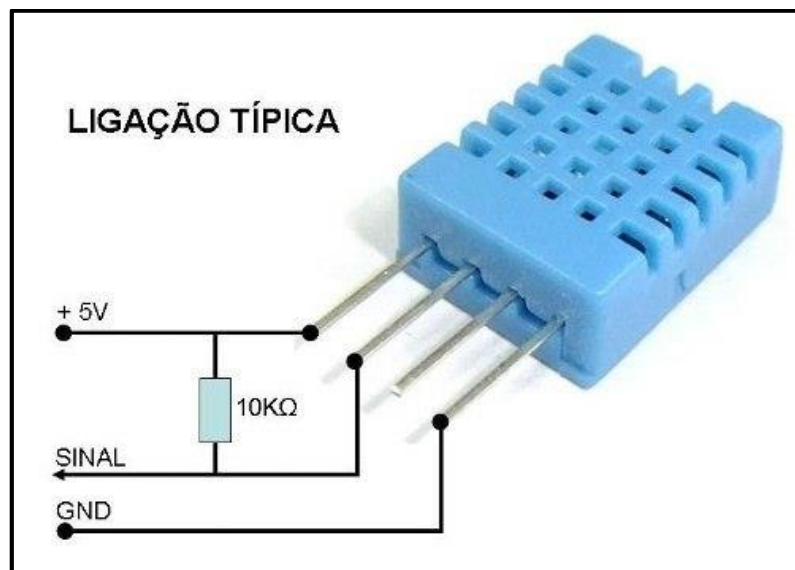


Figura 14 - Sensor de Temperatura e Umidade Relativa. D-Robotics, (2010).

O Quadro 1 apresenta as características principais do sensor DHT11 que foram consideradas para sua escolha.

Quadro 1: Características do Sensor DHT11

Descrição	Umidade	Temperatura
Tensão de alimentação	3 a 5,5VDC (5VDC recomendado)	
Saída do Sinal	digital de 1 fio	
Faixa de medição	20 - 90%	0 - 50°C
Precisão	±4%RH (Max ± 5%RH)	±2°C
Resolução	1%	0,1°C
Estabilidade a longo prazo	±0,5%RH/ano	----

Fonte: Adaptado de D-Robotics, (2010)

Os dados apresentados evidenciam a limitação de utilizar este sensor para medir temperatura, pois, ao realizarem medições entre 0° e 50°C, inviabilizam medições negativas, o que pode ocorrer na área de estudo.

3.4.8. Sensor Pluviométrico

Devido às características e consequências em decorrência da chuva, tanto para a sociedade como para a aplicação em questão (agricultura), tem-se a necessidade de conhecer os valores de precipitação para um melhor aproveitamento dos recursos hídricos. Entre as variáveis meteorológicas, a precipitação apresenta alta variabilidade temporal e espacial, dificultando sua previsão (PINHEIRO *et al.*, 2009).

Para a medição da precipitação são considerados os pluviômetros como principais elementos, sendo assim, estes apresentam dimensões reduzidas e geralmente são acoplados a sistemas de aquisição de dados para o registro das informações.

Os dados pluviométricos são expressos em mm (milímetros), considerando a representação de uma lâmina de água de chuva, distribuída de modo uniforme em 1m² (um metro quadrado) de superfície durante a chuva. Portanto, 1mm de chuva equivale a 1l (um litro) de água por m².

Existem diversos tipos de pluviômetros, entre os quais pode-se citar como principais os basculantes e o do tipo cunha. A grande maioria das estações meteorológicas utilizam o sistema basculante para a totalização dos índices pluviométricos.

A Figura 15 apresenta o modelo utilizado no trabalho em questão, trata-se de um pluviômetro basculante que possui como princípio de funcionamento uma gangorra.



Figura 15 - Sensor Pluviométrico.

O princípio do funcionamento da balsa (Figura 166) deste sensor se dá quando existe a ocorrência de gotas da chuva no cone externo do sensor, ao caírem pelo cone, às gotas foram depositadas em uma das câmaras da balsa que deve ficar posicionada na parte inferior do cone. Quando a câmara acumula um determinado volume de água, a balsa movimenta-se sobre seu eixo vertical, possibilitando que a segunda câmara de recebimento de água se posicione na parte inferior do cone, realizando este movimento sucessivamente. Na parte inferior da balsa, existe um sensor eletromagnético que percebe a aproximação da balsa quando preenchida e movimentada, registrando assim o volume da balsa em um sistema de armazenamento de dados.

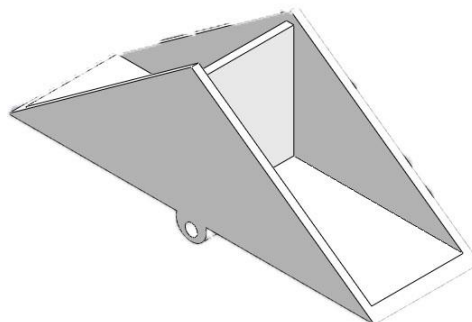


Figura 16 – Balsa do sensor pluviométrico.

3.4.9. Sensor de Velocidade do Vento

O sensor de velocidade do vento ou anemômetro (Figura 177) é o instrumento responsável por medir o vento, e as configurações mais usuais são: anemômetros de hélice, de conchas e sônicos.

Geralmente, o instrumento encontrado em estações meteorológicas é constituído por pás, em forma de conchas ou hélices, que giram em torno de um eixo vertical. A velocidade é computada através de um tacômetro que pode ser do tipo mecânico, ótico ou elétrico. Possuem como princípio de funcionamento a geração de um pulso elétrico a cada volta completa, onde, ao possuir o conhecimento sobre o número de pulsos obtidos em uma determinada unidade de tempo, é possível o calcula da velocidade do vento.

Devido a sua característica de constante funcionamento necessitam de manutenção permanente, ocasionada pelos elementos móveis necessários para a rotação do sensor.



Figura 17 - Sensor Anemômetro.

3.5. Metodologia de Calibração e Aferição dos Sensores

Para a aferição dos sensores, exceto o saldo de radiação (LDR), foram realizados testes em laboratório adotando regressões lineares simples, e tendo como elemento referencial, sensores comerciais equivalentes ou instrumentos calibradores industriais. Entretanto, para o cálculo do saldo de radiação e do fluxo de calor no solo, foi necessário um tratamento dos dados coletados pelos sensores.

- Tratamento dos Dados para o Saldo de Radiação

O saldo de radiação (R_n) representa a quantidade de energia disponível aos processos físicos e biológicos que ocorrem na superfície da terra,

possuindo como definição o balanço de radiação de todos os fluxos de radiação que chegam e saem de uma superfície (WELIGEPOLAGE, 2005). O saldo de radiação (R_n) na superfície terrestre, pode ser expresso em termos de seus componentes, conforme Allen *et al* (2007) como:

$$R_n = R_C^\downarrow - R_C^\uparrow + R_L^\downarrow - R_L^\uparrow \quad (\text{Equação 12})$$

Sendo: R_C^\downarrow e R_C^\uparrow as densidades de radiação de onda curta incidente na superfície e emitida da superfície ($W\ m^{-2}$), respectivamente e, R_L^\downarrow e R_L^\uparrow as densidades de fluxo de radiação de onda longa incidente e emitida ($W\ m^{-2}$), respectivamente.

Para o cálculo do saldo de radiação foram utilizados sensores do tipo LDR, estes, de acordo com a intensidade de energia que captam em sua face, modificam sua resistência, conforme apresentado no item 2.1.5; essa resistência é convertida para $W\ m^{-2}$ utilizando os resultados obtidos com o piranômetro da estação comercial instalada próximo. Para isso, foi realizada uma compatibilização dos dados entre ambos os sensores através de uma regressão não linear de base logarítmica. Esse procedimento foi necessário devido a não linearidade do sensor LDR.

Tratamento dos Dados para o Fluxo de Calor no Solo

O fluxo de calor no solo (G) é um dos elementos necessários para o cálculo da evapotranspiração, sendo assim, os processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem no solo, estão diretamente influenciados por este.

Para o cálculo do fluxo de calor no solo utilizou-se a lei da condução térmica, também conhecida como lei de FOURIER (1822), lei que estabelece que o fluxo de calor através de um material é proporcional à temperatura.

Essa lei pode ser expressa por, Eq. 13:

$$\Phi = K \cdot A \cdot \frac{dT_s}{dz} \quad (\text{Equação 13})$$

Onde: Φ é o fluxo de calor ($W\ m^{-2}$), A é área através da qual se estuda a variação do fluxo, dT_s é a diferença de temperatura entre dois níveis ($^{\circ}C$), dz

diferença de nível entre as medições de temperatura (distância entre os sensores) e K que corresponde a condutividade térmica do material.

Sendo assim, procedeu-se com o cálculo do fluxo de calor em 3 níveis distintos, com um mesmo material distanciados em 15 cm, 30 cm e 45 cm da superfície, conforme Figura 18.

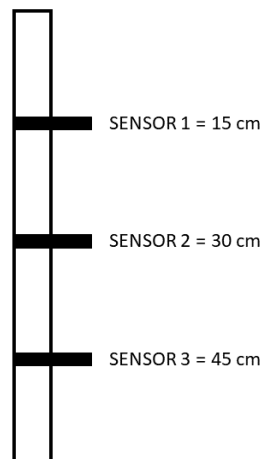


Figura 18: Esquemático de sensores para medição de fluxo de calor no solo

Portanto, com a disposição dos sensores, em concordância com o apresentado na Figura 12, foram calculados os fluxos entre cada dois sensores, denominados de fluxos de calor $G_{15/30}$, $G_{30/45}$ e $G_{15/45}$. Por fim, foi calculado o fluxo de calor no solo G_{solo} , conforme segue na Equação 14:

$$G_{solo} = \frac{G_{15/30} + G_{30/45} + G_{15/45}}{3} \quad (\text{Equação 14})$$

O sistema sensor proposto se baseia no conceito do balanço de energia, contendo sensores voltados a determinar (de forma indireta) os fluxos de calor no solo (G), o fluxo de calor sensível (H) e o saldo de radiação (R_n). A partir dessas variáveis mensuradas in loco, foi determinado o valor do fluxo de calor latente (LE). A partir do fluxo de radiação (LE) foi estimado o valor da evapotranspiração instantânea, podendo ser essa convertida para valores diários a partir da integração dos valores instantâneos.

CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Estimativa da evapotranspiração de vinhedos a partir da aplicação do modelo *Two Source*

Com a finalidade de estimar a evapotranspiração de um vinhedo de controle, foram realizados levantamentos de campo junto a área da vinícola Geisse no município de Pinto Bandeira/RS, usando um RPA da marca AIBOTIX®, transportando uma câmera cobrindo as bandas espectrais do visível e do infravermelho próximo. Os vôos foram realizados de tal forma que os parâmetros de altura e IFOV produziram uma resolução espacial média de 1,2 cm.

Essas cenas foram ortorretificadas e mosaicadas usando o software AgiSoft PhotoScan®. Posteriormente, com as informações complementares coletadas em simultâneo ao vôo (i.e., elevação solar, elevação do terreno, irradiância espectral solar, entre outras), foram realizadas a calibração das imagens e sua conversão em refletância de superfície. As imagens de levantamento aéreo por RPA foram usadas na implementação do algoritmo de estimativa de evapotranspiração para o vinhedo de interesse baseado em saldo de radiação proposto por Ortega *et al* (2006), definido como algoritmo de duas fontes (*Two Source*).

Essas imagens formaram a fonte de dados de alimentação do algoritmo de evapotranspiração, resultando na produção de balanço de energia, onde se estima o saldo de radiação (R_n), o fluxo de calor no solo (G), o fluxo de calor sensível (H) e o fluxo de calor latente (λET) para áreas vegetadas e áreas não vegetadas (cada um deles compõe uma das fontes) como o proposto por Ortega *et al* (2006), presente na Equação 9.

O valor instantâneo de ET, convertido para a média da hora centralizada no momento da coleta pelo RPA, foi obtido de acordo com a equação 15:

$$ET_{inst} = 3600 \frac{\lambda ET}{\lambda} \text{ (mmh}^{-1}\text{)} \quad \text{(Equação 15)}$$

Onde ET_{inst} é o valor instantâneo do ET, 3600 é o tempo de conversão de segundos para horas, ET é o gráfico de fluxo de calor latente instantâneo e é o calor latente λ da vaporização da água ($2,45 \times 10^6 \text{ Jkg}^{-1}$). Como resultado, foram obtidas imagens representando cada uma dessas variáveis (Fig. 19, Fig. 20, Fig. 21, Fig. 22, Fig. 23 e Fig. 24).

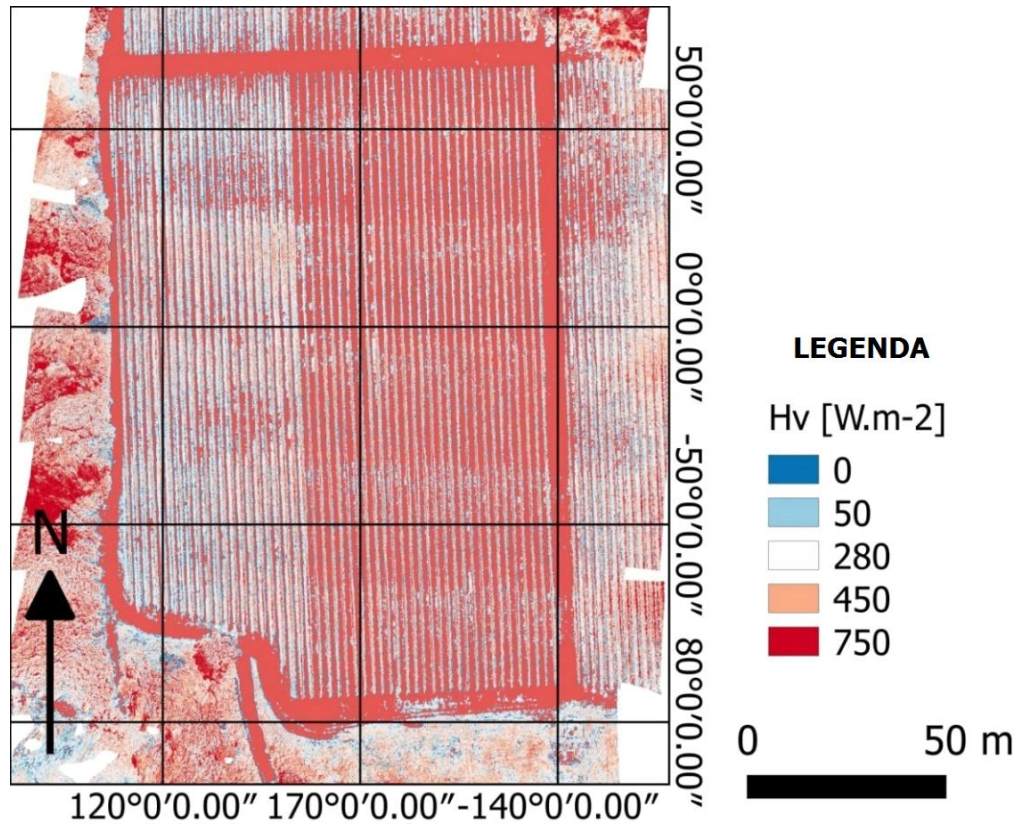


Figura 19: Calor sensível da vegetação

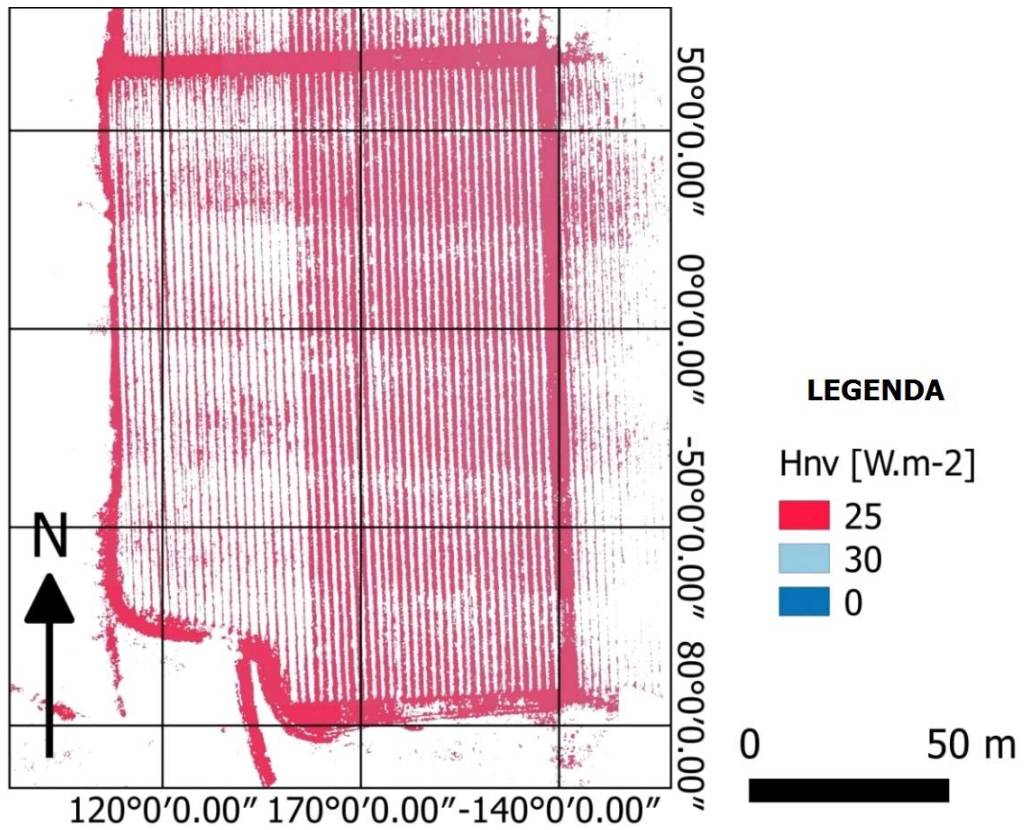


Figura 20: Fluxo de calor sensível da não-vegetação

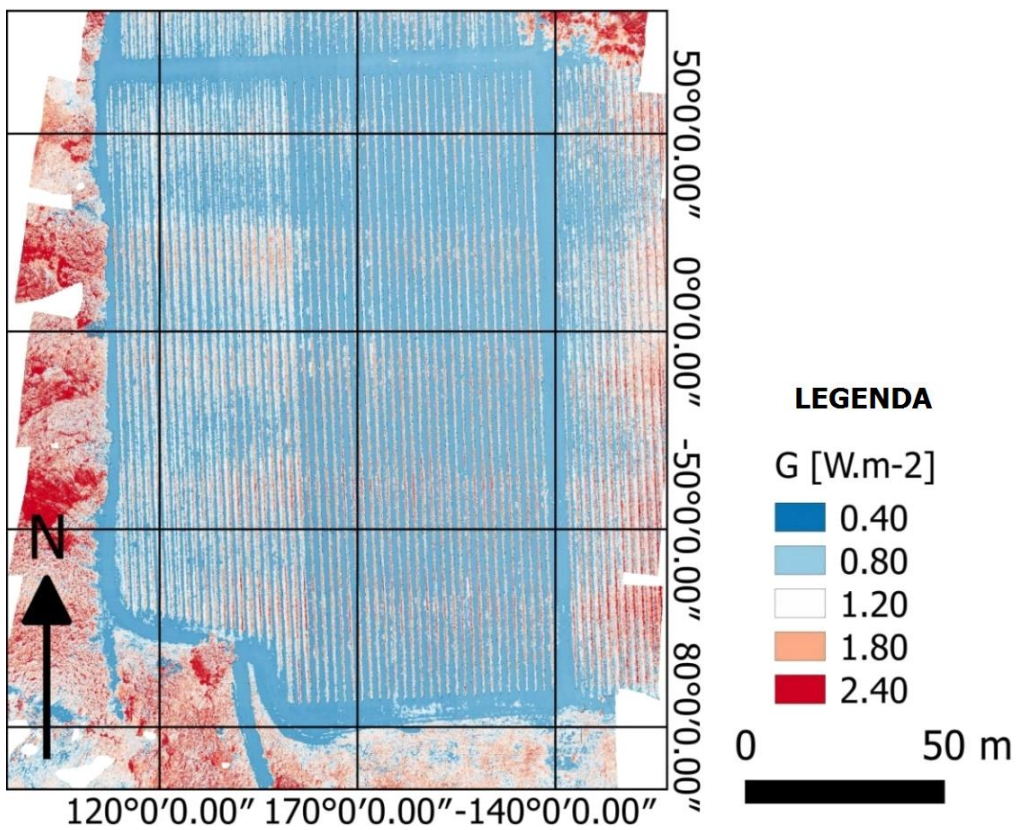


Figura 21: Fluxo de calor no solo

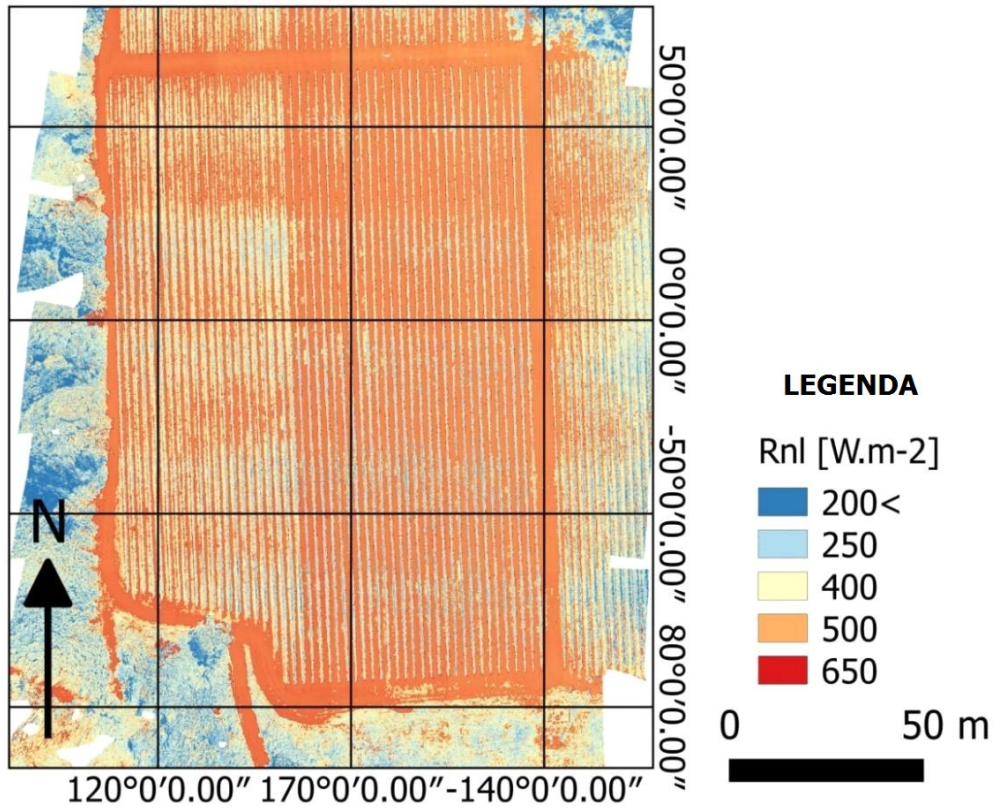


Figura 22: Saldo de radiação

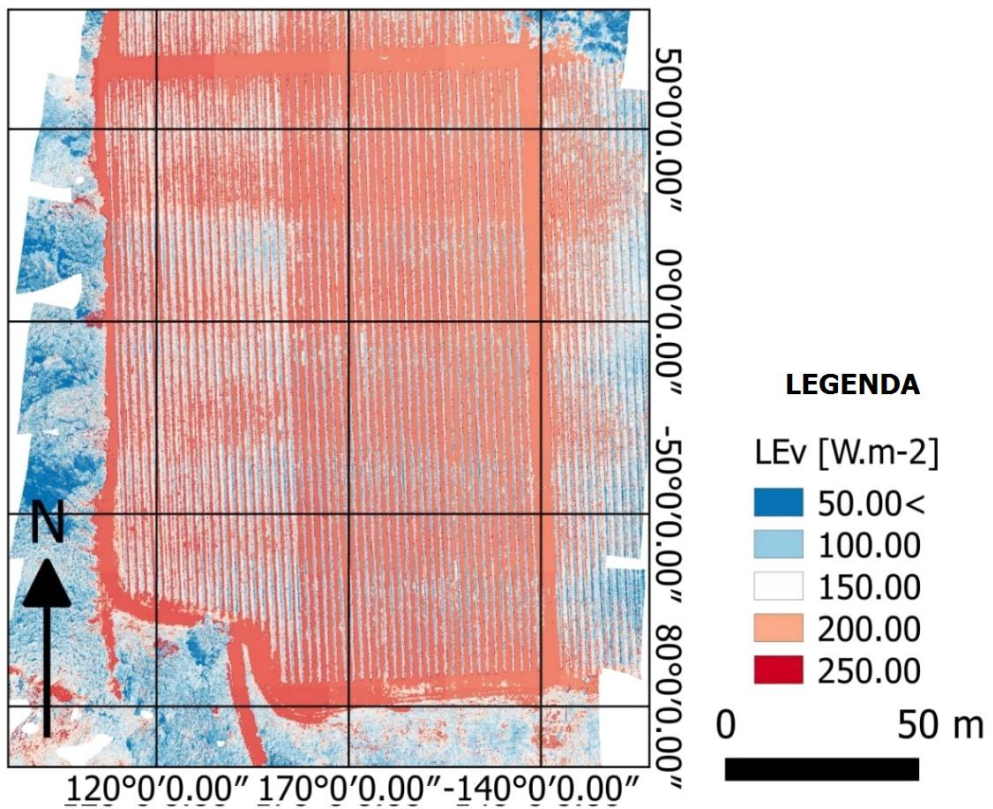


Figura 23: Fluxo de calor latente da vegetação

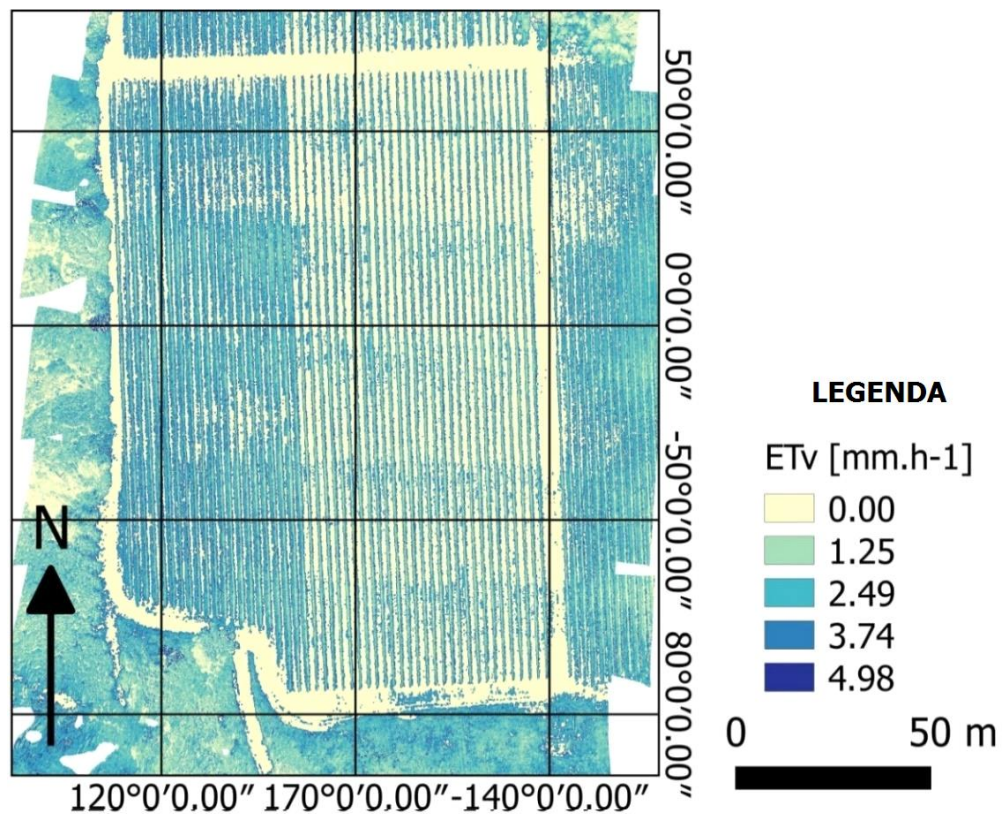


Figura 24: Evapotranspiração diária estimada para a vegetação

Os valores preliminares determinaram oscilações espaciais do balanço hídrico, concordando com o descrito pelos dados registrados pelo equipamento oficial para área. Análises estatísticas e comparações maiores são necessárias e foram realizadas com o tratamento de novos dados que foram coletados continuamente para os anos seguintes.

Como forma de avaliar os resultados, os dados estimados foram comparados com os dados de evapotranspiração (ET diário) calculados pelo método do saldo de radiação, utilizando dados da estação meteorológica próxima à área experimental para os meses de janeiro e fevereiro/2017, correspondente ao período das pesquisas apresentada

Essas questões podem ser superadas com o uso de RPA, que possuem uma resolução muito melhor (espacial e temporal), permitindo uma melhor estimativa das necessidades de água de uma cultura, por exemplo. (Ortega *et al*, 2016), usando o RPA para estimar o balanço energético em pomares de oliveira irrigados por gotejamento, também descobriu que câmeras multiespectrais e térmicas em RPA podem fornecer ferramentas para avaliar os

efeitos da variabilidade espacial dos componentes do balanço energético em pomares heterogêneos, como vinhedos, que possuem diferentes densidades de plantas e coberturas fracionárias.

O presente trabalho listou um exemplo prático para a estimativa da evapotranspiração através do balanço hídrico para a região da Vinícola, na cidade de Pinto Bandeira, na Serra Gaúcha. A extração das informações necessárias para o balanço hídrico, utilizando o modelo *Two Source*, mostrou que a análise diferenciada da cobertura do solo de forma independente, para solo exposto e áreas cultivadas, avança em trazer melhores resultados sobre a meta de interesse.

4.2. Sistema sensor proposto

Para realizar a conexão dos sensores utilizados com a plataforma Arduino® foi realizado um esquemático para simplificar e documentar o desenvolvimento das atividades, apresentado na Figura 25. Essa mesma modelagem do sistema serviu para testes de códigos e simulações computacionais.

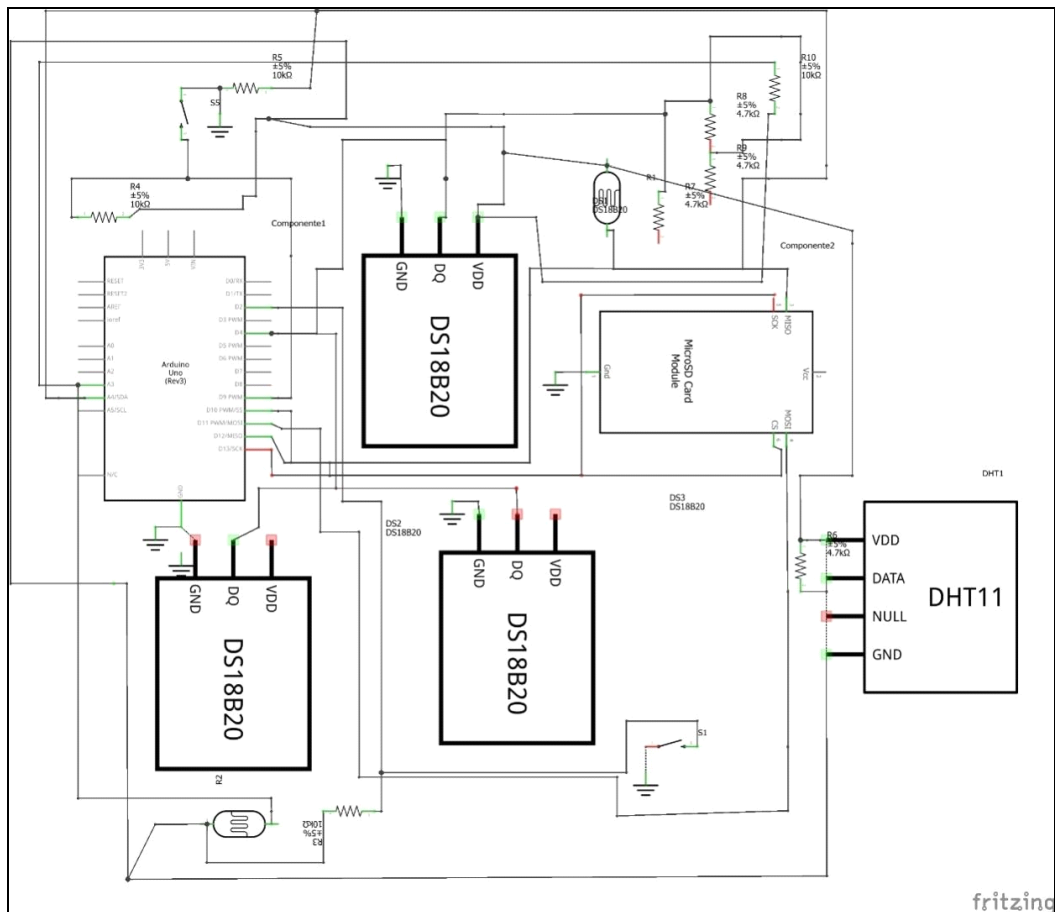


Figura 25: Esquemático do sistema proposto

Para realizar a programação no software do Arduino, foi realizado um fluxograma de processo para nortear o encadeamento das informações. Na Figura 26 está apresentado o fluxograma que orientou a programação.

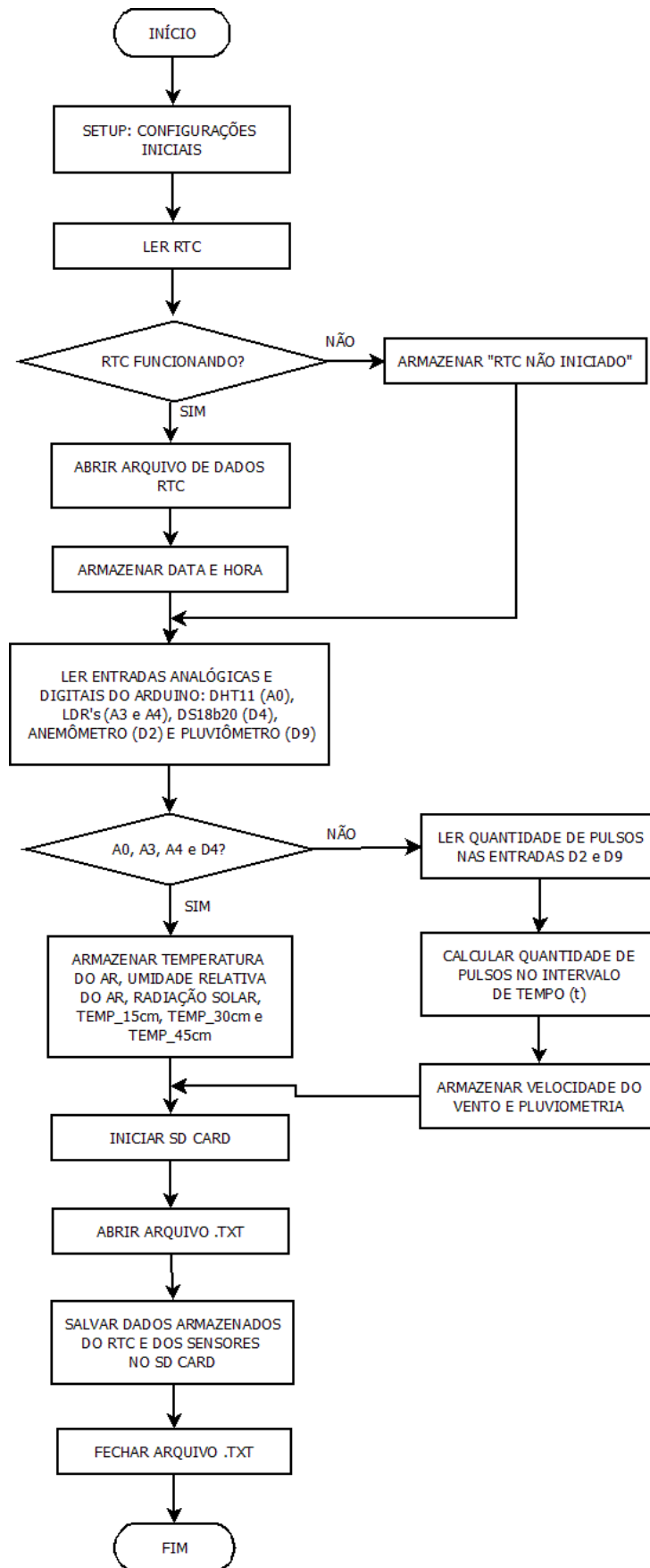


Figura 26: Fluxograma do programa desenvolvido

4.3. Instalação, teste e validação do sistema sensor proposto

Para instalação e teste do sistema sensor proposto, escolheu-se a colocação do esmo lado a lado a um sistema sensor de referência, posto entre as linhas das videiras, junto ao vinhedo de estudo. Nesse ponto, foi escavada uma trincheira de 60cm de profundidade, onde foi instalada a barra metálica que contém o sensor de fluxo de calor no solo (Figura 27). A parte aérea do sistema sensor possui, visíveis da esquerda para a direita junto a Figura 28, anemômetro, pluviômetro, sensores de temperatura e umidade do ar e sensor de saldo de radiação.



Figura 27: Sensores para cálculo do fluxo de calor no solo e caixa para armazenamento do micro controlador e do cartão de armazenamento



Figura 28: Sistema proposto (anemômetro, pluviômetro, radiação solar, temperatura do ar e umidade relativa do ar).

Esse sistema sensor executou medidas em intervalos de três segundos, registrando esses dados em um cartão de memória em um arquivo digital em formato texto, padrão ASCII.

Portanto, em consonância com o disposto, o sistema foi baseado no conceito do balanço de energia, contendo sensores voltados a determinar (de forma indireta) os fluxos de calor no solo (G), o saldo de radiação (R_n), e o cálculo do fluxo de calor sensível (H), adotando-se a densidade do ar, o calor específico do ar, que são constantes de calibração, e, associadas a diferença de temperatura e a temperatura da superfície (K), Eq. 16.

$$H = \rho \cdot c_p \cdot \frac{(a+b \cdot T_s)}{r_{ah}} \quad (\text{Equação 16})$$

Sendo: ρ - a densidade do ar ($1,15 \text{ kgm}^{-3}$); c_p - o calor específico do ar ($1004 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$); a e b - constantes de calibração da diferença de temperatura; T_s - é a temperatura da superfície (K) e; r_{ah} - é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor (sm^{-1}).

A partir dessas variáveis mensuradas in loco, é determinado o valor do fluxo de calor latente (LE), Eq. 17.

$$LE = Rn - G - H \quad (\text{Equação 17})$$

Conhecido o fluxo de calor latente (LE) é possível estimar o valor da evapotranspiração real horária, podendo ser essa convertida para valores diários a partir da integração dos valores instantâneos (Allen et al., 2007), Eq. 18.

$$ET_h = 3600 \cdot \frac{LE}{\lambda} \quad (\text{Equação 18})$$

Em que: λ - é o calor latente de vaporização da água (J kg⁻¹).

Para a determinação da evapotranspiração de uma cultura (ET_c) é necessário conhecer o coeficiente da cultura (K_c) e a evapotranspiração de referência (ET_o). Visto que, a ET_c é dada pela Equação 19:

$$ET_c = ET_o \cdot K_c \quad (\text{Equação 19})$$

A ET_o possui diversos métodos de estimação, como apresentado por Allen, et al (2005). O K_c é um coeficiente relacionado a variedade, ao local, as condições de manejo e ao estágio de desenvolvimento da planta.

O ensaio de calibração da célula do sistema sensor mostrou correlação significativa ($R^2 > 96,21\%$) entre as variações de evapotranspiração registradas por esse em comparação ao sistema de referência (Figura 29). A Figura 29 mostra, ainda, que houve baixa dispersão entre os valores de evapotranspiração estimados pelo sistema de referência e pelo sistema proposto, indicando pequenos desvios (<0,006mm.dia⁻¹), o que confirma aplicabilidade prática do sistema sensor.

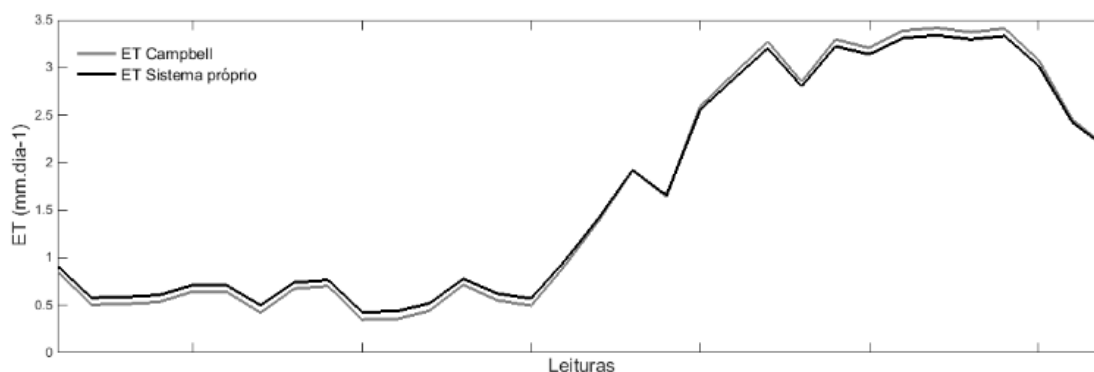


Figura 29: Estimativas de evapotranspiração entre o equipamento proposto e o sistema de referência.

A precisão apresentada para determinação dos valores de evapotranspiração foi comprovada pelos baixos valores de erro absoluto, que variaram entre 0,07 e 0,042 mm.dia-1, conforme Tabela 1. A comparação de similaridade dos coeficientes entre as curvas de cada sistema sensor (referência e sistema proposto) não mostrou diferenças estatisticamente significativas pelo teste t ($\alpha \leq 0,001$), porém a regressão obtida para representar a comparação dos dados de estimativas de evapotranspiração, apresentaram inconsistências maiores para os valores de umidade e saturação de vapor.

Tabela 1: Dados comparativos de evapotranspiração estimados com o sistema proposta e a estação comercial

Data	ET Campbell (mm.dia-1)	ET Sistema Proposto (mm.dia-1)
24/7/2019 - 04h00min	0,857	0,941
24/7/2019 - 04h30min	0,505	0,618
24/7/2019 - 05h00min	0,514	0,620
24/7/2019 - 05h30min	0,535	0,628
24/7/2019 - 06h00min	0,645	0,708
24/7/2019 - 06h30min	0,642	0,688
24/7/2019 - 07h00min	0,423	0,480
24/7/2019 - 07h30min	0,675	0,688
24/7/2019 - 08h00min	0,702	0,700
24/7/2019 - 08h30min	0,349	0,371
24/7/2019 - 09h00min	0,353	0,369
24/7/2019 - 09h30min	0,444	0,464
24/7/2019 - 10h00min	0,715	0,726
24/7/2019 - 10h30min	0,552	0,591

24/7/2019 - 11h00min	0,496	0,548
24/7/2019 - 11h30min	0,917	0,932
24/7/2019 - 12h00min	1,391	1,369
24/7/2019 - 12h30min	1,922	1,872
24/7/2019 - 13h00min	1,642	1,637
24/7/2019 - 13h30min	2,592	2,510
24/7/2019 - 14h00min	2,938	2,835
24/7/2019 - 14h30min	3,274	3,160
24/7/2019 - 15h00min	2,853	2,803
24/7/2019 - 15h30min	3,296	3,221
24/7/2019 - 16h00min	3,207	3,155
24/7/2019 - 16h30min	3,388	3,335
24/7/2019 - 17h00min	3,419	3,366
24/7/2019 - 17h30min	3,372	3,335
24/7/2019 - 18h00min	3,411	3,395
24/7/2019 - 18h30min	3,082	3,100
24/7/2019 - 19h00min	2,454	2,544
24/7/2019 - 19h30min	2,170	2,294
Médias =>	1,679	1,688

Para demonstrar a capacidade do sistema sensor descrito neste trabalho em monitorar componentes do balanço hídrico apresentam-se, na Figura 30, a variação diária e as taxas horárias da evapotranspiração correspondentes, para cada um dos sistemas (referência e implementado). Neste período, a evapotranspiração de referência calculada pelo método de Penman e Monteith usando-se dados medidos na estação de balanço de energia adotada como referência foi de 3,2 mm.dia-1, enquanto o sistema proposto gerou uma estimativa de 3,1 mm.dia-1.

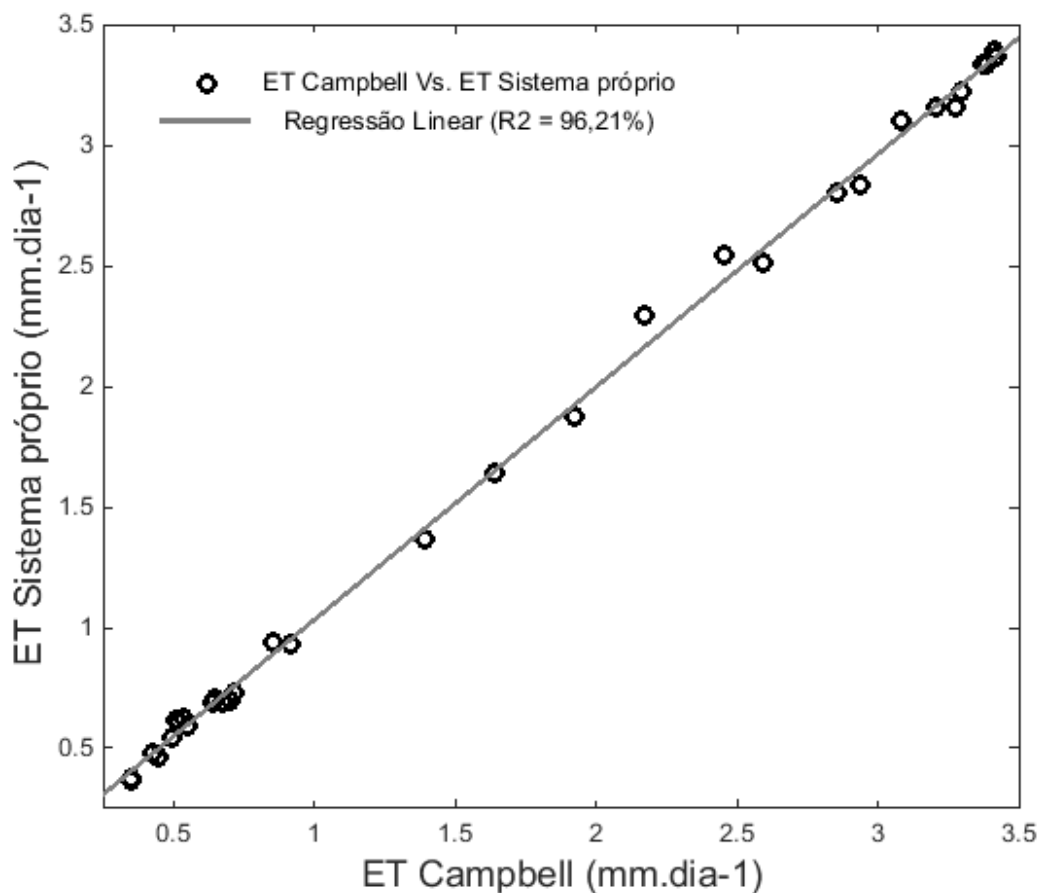


Figura 30: Correlação linear entre a estação de referência e o equipamento desenvolvido.

O sistema sensor testado apresentou componentes robustos e duráveis, gerando um sistema de estimativa de evapotranspiração de elevada acurácia. A tomada automatizada e o armazenamento de leituras dos componentes do balanço de energia facilitam a operação contínua do sistema, tornando-os adequados, tanto para medições durante longos períodos como para determinações da variação da evapotranspiração ao longo de um dia ou de uma safra como um todo. A grande coincidência estatística entre o equipamento de referência e o sistema proposto expõe a viabilidade do uso de soluções de baixo custo (Tabela 2) para o monitoramento de variáveis do balanço hídrico de culturas.

Tabela 2: Valores médios dos equipamentos que compõem o sistema desenvolvido.

Descrição	Quantidade	Valor Unitário	Valor Total
Arduino UNO	1	R\$ 55,00	R\$ 55,00
Shield cartão de memória e cartão	1	R\$ 25,00	R\$ 25,00
Relógio de tempo real	1	R\$ 10,00	R\$ 10,00
Sensor de luminosidade	2	R\$ 3,50	R\$ 7,00
Sensor de temperatura	4	R\$ 17,00	R\$ 68,00
Sensor de umidade	1	R\$ 15,00	R\$ 15,00
Sensor pluviométrico	1	R\$ 150,00	R\$ 150,00
Sensor de velocidade do vento	1	R\$ 150,00	R\$ 150,00
Fonte de alimentação	1	R\$ 10,00	R\$ 10,00
Valor Total do Equipamento Desenvolvido			R\$ 490,00

CAPÍTULO V – CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Conclusões

Este trabalho teve como objetivo principal o desenvolvimento de um equipamento de baixo custo, em que a estimativa da evapotranspiração foi realizada considerando o balanço de energia. Com o equipamento desenvolvido foi possível a análise e comparação de dados com estimativas oriundas de outra estação, bem como, por estimativa proveniente de imageamento por RPA.

Por meio do desenvolvimento do equipamento é possível analisar a evapotranspiração com resolução espacial reduzida, facilitando o monitoramento em microescala, em virtude dos valores para a montagem do sistema corresponderem a uma fração da aquisição de uma estação comercial.

Com os dados obtidos foi possível constatar que o equipamento é promissor, principalmente por tratar em termos econômicos de componentes encontrados com facilidade no mercado e com valor de aquisição baixo, quando comparados a componentes instalados nas estações comerciais.

Quanto a análise técnica dos dados coletados, o sensor que apresentou menor concordância com os dados obtidos com a estação comercial, obteve como resposta, acima de 90% de acurácia. Isso demonstra a possibilidade de o equipamento ser expandido para outras culturas, visto que, os dados base servem como alimentação para qualquer modelo.

Por fim, é necessário ratificar que o equipamento desenvolvido teve um custo relativamente baixo, inferior a R\$500,00 (quinhentos reais), ratificando as premissas do trabalho.

5.2. Avanços e limitações encontrados no trabalho

O custo do Projeto, mesmo sendo reduzido quando comparado a uma estação comercial, ainda pode ser relevante para utilização por pequenos produtores, em especial pelo fato do equipamento ser um protótipo. A fabricação do equipamento em escala, ou seja, com um grande número de unidades, pode ser feita com o uso de uma impressora 3D, que possibilitaria a impressão dos abrigos meteorológicos e dos sensores mecânicos (anemômetro

e pluviômetro) com baixíssimo custo.

Outro ponto de limitação no trabalho foi referente ao consumo de energia do sistema, dado que a programação realizada grava os dados coletados a cada 5 s, o que faz com que o sistema fique constantemente ligado e consumindo energia. Para otimização do sistema, deveria ser realizada uma programação em que os dados fossem salvos a cada 30 min, hibernando o sistema entre os períodos de leituras dos sensores.

5.3. Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros e melhoria do equipamento desenvolvido, sugere-se a inserção de uma rede de comunicação wireless para comunicação da estação. Isto possibilitaria que a necessidade de visitas ao equipamento para a busca dos dados (gravados em cartão de memória) fosse extinta. Considerando a conexão entre a estação e um dispositivo (computador de mesa ou *smartphone*) em funcionamento, seria possível a inserção de um sistema supervisor, apresentando em tempo real as informações coletadas pelo equipamento.

Outro ponto importante seria a fonte de alimentação do sistema ser alterada de bateria para um sistema a energia solar, posto isto, um sistema para conversão e armazenagem da energia deveria ser desenvolvido, captando a energia solar através de painéis solares e realizando a conversão para armazenamento da mesma em baterias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G., TASUMI, M., TREZZA, R., SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) advanced training and users manual – Idaho implementation, Idaho University, Idaho, USA. 2002

ALLEN, R.G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC) – Model. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, p. 380-394, 2007.

ARDUINO. HomePage. Disponível em: <<http://arduino.cc/>>. Acesso em: 6 jul. 2019.

BARDIN, L.; PEDRO JUNIRO, M. J.; MORAES, J. F. L. Risco climático de ocorrência de doenças fúngicas na videira Niágara Rosada na região do pólo turístico do circuito das frutas do Estado de São Paulo. Bragantia, Campinas, v.69, n.4, p.1019-1026, 2010.

BOEGH, E.; SOEGAARD, H.; THOMSEM, A. Evaluating evapotranspiration rates and surface conditions using Landsat TM to estimate atmospheric resistance and surface resistance. Remote Sensing of Environmental. v.79, p.329-343, 2002

CARLESSO, R.; PETRY, M. T.; ROSA, G. M.; HELDWEIN, A. B. Usos e benefícios da coleta automática de dados meteorológicos na agricultura. Santa Maria: UFSM, 2007.

COOMBE, B. G. Influence of temperature on composition and quality of grapes. Acta Horticulturae, v.206, p.23-35, 1987.

CROSTA, A. Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto. Campinas, Unicamp/SP, 1993.

DOCTRONICS. LDR - voltage dividers, 2017. Disponível em: <<http://www.doctronics.co.uk/voltage.htm>>. Acesso em: 06 dez. 2017.

D-ROBOTICS. DHT11 – Humidity & Temperature Sensor, 2010. Disponível em: <<http://www.micro4you.com/files/sensor/DHT11.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2017.

FALCADE, I. e MANDELLI, F. Vale dos Vinhedos: caracterização geográfica da região. Caxias do Sul: EDUCS, 1999.

FLORENZANO, T.G. Imagens de Satélite para Estudos Ambientais. São Paulo: Oficina de textos 2002, p.97.

FORMOLO, R.; RUFATO, L.; BOTTON, M.; MACHOTA Jr., R. Diagnóstico da área cultivada com uva fina de mesa (*Vitis vinifera*) sob cobertura plástica e do manejo de pragas. Revista Brasileira de Fruticultura, Jaboticabal, v. 33, n. 1, p. 103-110, 2011.

FOURIER, J.B.J. 1822. Théorie analytique de la chaleur. Paris, Chez Firmin Didot, Père et Fils, 670 p.

Huete A. R. A. Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). Remote Sensing of Environment 1988. 25:295-309

JENSEN, J. R. Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres: tradução José Carlos Neves Epiphanyo et al. São José dos campos: Parêntese, 2009.

KELLER, M. Managing grapevines to optimize fruit development in a challenging environment: A climate change primer for viticulturists. Australian Journal of Grape and Wine Research, v.16, p.56-69, 2010.

KÖPPEN, W. *Climatologia*; com un estudio de los climas de la tierra. México: Fondo de Cultura Economica, 1948. 478 p

LIU, W. T. H.. Aplicações de sensoriamento remoto. Campo Grande: Ed. UNIDERP, 2006

MARCHIORI, L. A. da C.. Avaliação da estimativa da evapotranspiração obtida através do modelo BRAMS visando o uso em modelo de estimativa de rendimento da soja no Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto 85p.. 2006.

MAXIM, I. DS1307 - 64 x 8, Serial, I2C Real-Time Clock, 2015. Disponível em: <<http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS1307.pdf>>. Acesso em: 15 abr. 2018.

MAXIM, I. DS18B20 programmable resolution 1-wire digital thermometer, 2018. Disponível em: <<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>>. Acesso em: 15 jun. 2019.

MELLO, L. M. R. Vitivinicultura brasileira: panorama 2010. Disponível em: <<http://www.cnpuv.embrapa.br/publica/artigos/prodvit2010.pdf>>. Acesso em: 04 out. 2016.

MENESES, P; ALMEIDA, T. Introdução ao processamento de imagem de sensoriamento remoto. CNPQ, 2012.

MICROCHIP. 1-Wire communication with PIC microcontroller, 2008. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/01199a.pdf>>. Acesso em: 1 nov. 2018.

MOREIRA, M, A. Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação. São José dos Campos - SP. INPE, 2001.

NARDY, A. J. R.; BETANCOURT, R. H. S.; VERDUGO, D. R. H.; OLIVEIRA, M. A. F.; MACHADO, F. B. Geologia e estratigrafia da Formação Serra Geral. Geociências, São Paulo, v.21, n.1/2, p.15-32, 2002.

NETTO, J. A.; AZEVEDO, P. V.; SILVA, B. B.; SOARES, J. M.; TEIXEIRA, A. H. C. Exigências hídricas da videira na Região do Submédio São Francisco. Pesquisa agropecuária brasileira, Brasília - DF agosto, 2000. v.35, n.8, p.1559-1566.

NOVO, E. M. L. M. Sensoriamento remoto: Princípios e aplicações. São Paulo: Blucher, 2008.

NOVO, E. M.. Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações. 2 ed. São Paulo, Brasil, Edgard Blucher. 1992

Open Source Hardware Association (OSHW). Best Practices for Open-Source Hardware 1.0. Disponível em: <https://www.oshwa.org/sharing-best-practices/>.

ORDUNÃ, R. M. de. Climate change associated effects on grape and wine quality and production. Food Research International, Davis, USA: Acta Horticulturae, v.43, p.1844- 1845, 2010.

ORTEGA-FARIAS, S.; ORTEGA-SALAZAR, S.; POBLETE, T.; KILIC, A.; ALLEN, R.; POBLETE-ECHEVERRÍA, C.; AHUMADA-ORELLANA, L.; ZUÑIGA, M.; SEPÚLVEDA, D. Estimation of Energy Balance Components over a Drip-Irrigated Olive Orchard Using Thermal and Multispectral Cameras Placed on a Helicopter-Based Unmanned Aerial Vehicle (UAV). *Remote Sens.* 2016, 8, 638.

PENMAN, H.L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proceeding Royal Society, London, v.193, p.120-143. 1948.

PINHEIRO, L. C.; DEREZYNSKY, C.P.; HORA, A. F. Utilização do pluviômetro PET como sistema de alerta de chuvas intensa. In: V SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE DEFESA CIVIL, 2009, São Paulo. Anais eletrônicos... São Paulo, DEFENCIL, 2009. Disponível em: <<http://www.ceped.ufsc.br/wp-content/uploads/2009/01/Artigo-51.pdf> >Acesso em: 20 maio 2019.

PONZONI, F; SHIMABUKURO, Y. Sensoriamento remoto no estudo da vegetação. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2010.

PROTAS, J. F. da S.; CAMARGO, U. A.; MELLO, L. M. R. de. A vitivinicultura brasileira: realidade e perspectivas. In: SIMPÓSIO MINEIRO DE VITICULTURA E ENOLOGIA, 1., 2002, Andradas. Viticultura e Enologia: atualizando conceitos. Caldas: Epamig, 2002. p. 17-32.

ROSSATO, M.S. The Climates of Rio Grande do Sul: variability, trends and typology. Doctoral thesis. UFRGS: Porto Alegre, 2011. 240p.

SILVA, B. B. da, BEZERRA, M. V. C.. Determinação dos fluxos de calor sensível e latente na superfície utilizando imagens TM - Landsat 5. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Piracicaba, v. 14, n. 2, p. 174-186, 2006.

SILVA, B.B. da; LOPES, G.M.; AZEVEDO, P.V. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5 - TM. Revista Brasileira de Meteorologia, v.20, n.2, p.243-252, 2005.

TEIXEIRA, A. H. de C. Water productivity assessments from field to large scale: a case study in the Brazilian semi-arid region. Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2009, 226p.

TEIXEIRA, A. H. de C.; BASTIAANSEN, W. G. M.; AHMAD, M. D.; BOS, M. G.

Analysis of energy fluxes and vegetation-atmosphere parameters in irrigated and natural ecosystems of semi-arid Brazil. *Journal of Hydrology*, v.362, p.110-127, 2008.

TEIXEIRA, A. H. de C.; BASTIAANSSEN, W. G. M.; BASSOI, L. H. Crop water parameters of irrigated wine and table grapes to support water productivity analysis in Sao Francisco River basin, Brazil. *Agricultural Water Management*, v.94, p.31-42, 2007.

THOMAZINI, D; ALBUQUERQUE, P. U. B. *Sensores Industriais – Fundamentos e Aplicações*. 5ª ed. São Paulo: Érica, 2005. 222p.

TONIETTO, J.; CARBONNEAU, A. World-wide analysis of the climate of wine-growing regions and their influence on the typicality of wines: the position of Brazilian viticulture compared to 100 regions in 30 countries. In: *BRAZILIAN CONGRESS ON VITICULTURE AND ENOLOGY*, 9., 1999, Bento Gonçalves. *Annals*. Bento Gonçalves: Embrapa Grape and Wine, 1999b. p.75-90.

TONIETTO, J.; MANDELLI, F. *Clima. Regiões vitivinícolas Brasileiras*. In: *Uvas para processamento*. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2003. 134p. (Frutas do Brasil, 34).

VAREJÃO-SILVA, M. A. *Meteorologia e Climatologia*. 2. ed. Brasília: Pax Gráfica e Editora Ltda., 532 p. 2001.

VENTURIERI, A. *Curso de introdução às técnicas de sensoriamento remoto*. UFPA. Belem, 2007. Disponível em: <www.ufpa.br/epdir/images/docs/paper64.pdf>. Acessado em 15/06/2016.]

WEBER, S. *The Success of Open Source*. Harvard University Press, Cambridge, 2004.

WELIGEPOLAGE, K. Estimation of spatial and temporal distribution of evapotranspiration bay satellite remote sensing – A case study in Hupselse Beek, The Netherlands, p.114, 2005.