

Modulação de irrigação com sonda capacitiva *Hydrascout* em produção de maçã no Sul da França

Lais Cintra Magnavita ^{(1)*}, Antônio Augusto Alves Pereira ⁽²⁾

(1) Acadêmica do curso de Agronomia do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Santa Catarina. Rod. Ademar Gonzaga,1346, Bairro Itacorubi, Caixa Postal 476, CEP 8840-900, Florianópolis-SC, Brasil.

(2) Professor Associado, Depto. de Engenharia Rural, Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Santa Catarina. Rod. Ademar Gonzaga,1346, Bairro Itacorubi, Caixa Postal 476, CEP 8840-900, Florianópolis-SC, Brasil.

*Autor Correspondente - E-mail: laismagnavita@gmail.com

Resumo

A água, vital para agricultura e ecossistemas, enfrenta desafios de disponibilidade irregular, espacial e temporalmente, agravados pelas incertezas climáticas das mudanças globais. Diante disso, a urgência de uma administração eficaz e sistemas eficientes se destacam, especialmente diante da crescente demanda e das limitações de disponibilidade. Dentro deste contexto, este estudo desafia a aplicação de 6,4mm/dia de água na parcela testemunha, com a modulação da parcela teste. A implementação de um sistema de modulação de irrigação foi feita em uma produção comercial de maçãs Marsillargues no sul da França. Utilizando a sonda capacitiva Hydrascout em um sistema de gotejamento, o experimento buscou a redução do consumo de água e energia, propondo uma alternativa flexível às práticas convencionais de irrigação. Os resultados destacaram uma significativa redução de 22% no consumo de água e energia na parcela com modulação em comparação com a testemunha. Além disso, a análise estatística semanal da variável de controle, o diâmetro das maçãs, não evidenciou diferença significativa entre as médias das parcelas. Esses resultados indicam o sucesso do sistema proposto nas condições postas, enfatizando seu potencial para otimizar o uso de recursos hídricos na agricultura, tanto para as demandas atuais quanto para as futuras.

Palavras-chave : irrigação, sonda capacitiva, maçã, economia, umidade do solo.

Abstract

Water, which is vital for agriculture and ecosystems, faces challenges of irregular availability, both spatially and temporally, exacerbated by the climate uncertainties of global change. In view of this, the urgency of effective management and efficient systems stands out, especially facing a growing demand and limited availability. Within this context, this study challenges the application of 6.4mm/day of water in the control plot, with the modulation of the test plot. An irrigation modulation system was implemented in a commercial Marsillargues apple production in the south of France. Using the Hydrascout capacitive probe in a drip system, the experiment sought to reduce water and energy consumption by proposing a flexible alternative to conventional irrigation practices. The results showed a significant 22% reduction in water and energy consumption in the modulated plot compared to the control plot. In addition, the weekly statistical analysis of the control variable, the diameter of the apples, showed no significant difference between the plot averages. These results indicate the success of the proposed system under the given conditions, emphasizing its potential to optimize the use of water resources in agriculture, both for current and future demands.

Key-words : irrigation, capacitive probe, apple, economy, soil humidity.

Introdução

A agricultura, como alicerce da vida humana, repousa intensamente na utilização da água para o desenvolvimento das culturas e a produção de matérias-primas, desempenhando um papel importante na garantia da segurança alimentar e nutricional, sendo igualmente de grande relevância para a economia global e o sustento de agricultores e profissionais correlatos (FAO, 2020).

A agricultura desempenha um papel crucial na utilização de recursos hídricos, absorvendo aproximadamente 70% do total de água doce do planeta (FAO, 2020). No entanto, paradoxalmente, o valor desse recurso essencial frequentemente é subestimado ou negligenciado. No cenário atual, marcado pela crescente imprevisibilidade climática, acentuada escassez de água em diversas regiões e a demanda por um aumento da produtividade agrícola, o valor da água e a importância de uma gestão eficiente dos recursos hídricos e territórios tornam-se questões prementes, não apenas para as gerações futuras, mas para o nosso presente. Nesse contexto, a necessidade de reconhecer a água como um recurso de inestimável valor e implementar estratégias de gestão responsável torna-se imperativo (D'ODORICO et al., 2020; PUY et al., 2021).

Cerca de 20% das terras agrícolas do mundo são irrigadas, o que representa 40% da produção mundial de alimentos (PUY et al., 2021). No panorama brasileiro, segundo a Agência Nacional de Águas e Saneamento (2020), existem atualmente 8,4 milhões de hectares irrigados e projeta-se para o ano de 2050 um aumento de 4,2 milhões de hectares, salientando a importância da gestão da água na agricultura para satisfazer as necessidades de segurança alimentar face ao crescimento demográfico e às alterações climáticas (The State of Food and Agriculture, 2020).

Por conseguinte, é ainda mais importante desenvolver novas estratégias e promover métodos já em vigor, a fim de maximizar a eficácia da gestão dos recursos ambientais (BÖGEL, 2017). A abordagem proposta pela FAO (2020), para melhorar a gestão da hídrica mundialmente centra-se no reforço da governança deste recurso vital. Esta abordagem visa otimizar a utilização dos recursos hídricos limitados, propondo ações em três níveis: técnico e de gestão, institucional e jurídico, e político.

O presente documento centrar-se-á especialmente no aspecto técnico destes níveis de ação, apresentando um experimento que visa a economia de água para irrigação em uma produção de maçã variedade Pink Lady no Sul da França.

Na França, o uso da água reflete uma variedade de prioridades. A agricultura continua sendo o principal consumidor, absorvendo 57% do recurso total. Em seguida, vem seguida por água potável (26%), resfriamento de usinas elétricas (12%) e usos industriais (5%). Entretanto, essa distribuição oculta uma desigualdade geográfica de fornecimento principalmente no oeste e sudoeste da França. Algumas regiões são mais vulneráveis a secas, o que leva a restrições de irrigação para preservar a disponibilidade de água (Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires, 2021).

A transição digital da agricultura está a emergir como uma resposta promissora a alguns dos desafios da gestão hídrica (BÖGEL, 2017). Os avanços tecnológicos oferecem soluções para otimizar a utilização da água, responder à crescente demanda de alimentos ou matérias primas, enfrentando os desafios colocados pela imprevisibilidade climática (LEKSHMI; SINGH; SHOJAEI BAGHINI, 2014).

Cumprindo um papel para o crescimento de plantas, a regulação de ecossistemas é fundamental para a biodiversidade. Acompanhar o fluxo de água no solo contribui para a tomada de decisão mais assertiva em matéria de gestão hídrica (LEKSHMI; SINGH; SHOJAEI BAGHINI, 2014). Não somente com o objetivo de redução do consumo mas também melhor gerir o estresse hídrico intencional, como no caso de videiras (*Vitis vinifera*

L.), em que o estresse controlado causa um aumento nos sólidos solúveis, açúcares e concentração de antocianinas, aumentando assim sua qualidade (ALBRIZIO et al., 2023).

A evolução da agricultura de precisão tem sido marcada por avanços técnicos significativos; no entanto, seu potencial total é amplamente subexplorado no mercado agrícola e em diferentes regiões do mundo (BÖGEL, 2017). O panorama atual é caracterizado por uma dinâmica de rápida inovação tecnológica, oferecendo novas e variadas oportunidades. O surgimento de ferramentas inovadoras de hardware e software, trabalhando em sinergia ou com o apoio de soluções inovadoras de serviços, abre novas perspectivas de inovação no setor agrícola. Essa realidade é ainda mais crucial no contexto da transição digital, em que as empresas aproveitam essas oportunidades para importar inovações para o mercado agrícola (OECD, 2013).

Neste contexto de novas tecnologias para a agricultura, a Hydra Sensor Technologies International France (HSTI-France) desenvolve sondas capacitivas *Hydrascout*, que medem a temperatura e a umidade do solo a diferentes profundidades, auxiliando a tomada de decisões sobre a gestão da água na agricultura.

A quantificação da umidade do solo é particularmente útil para fins hidrológicos, ambientais e, especialmente, agronômicos. Ao longo dos últimos 70 anos, diversas metodologias foram desenvolvidas para realizar essa tarefa (WALKER; WILLGOOSE; KALMA, 2004). Essas metodologias podem ser classificadas em três categorias (LEKSHMI; SINGH; SHOJAEI BAGHINI, 2014):

- **Gravimétrica:** Esta é a abordagem mais simples, com baixo custo, porém trabalhosa e destrutiva. Consiste na coleta de amostras de solo, pesagem, secagem e nova pesagem. A diferença de peso permite deduzir a massa de água contida na amostra.
- **Sonda de nêutrons:** Embora seja precisa e fácil de aplicar, esta metodologia é dispendiosa e altamente regulamentada devido às suas propriedades radioativas.
- **Eletromagnética:** Esta categoria inclui várias metodologias, todas utilizando princípios eletromagnéticos, mas cada uma com uma estratégia de medição diferente, como capacidade, "time domain reflectometry (TDR)" e "frequency domain reflectometry (FDR)".

A sonda *Hydrascout* é capacitiva, estabelecendo uma relação entre a permissividade dielétrica do solo e a sua umidade. Quando uma frequência é emitida, as moléculas no campo gerado tendem a se polarizar. Quanto mais permissivo o meio, maior a polarização e,

consequentemente, maior a quantidade de cargas elétricas que o meio pode armazenar. A água nos poros do solo é um dos principais fatores que alteram a permissividade dielétrica do solo quando exposto a altas frequências. Portanto, medindo a permissividade dielétrica, podemos inferir o volume de água presente (DEAN; BELL; BATY, 1987).

Objetivos

O presente estudo tem como objetivo geral avaliar o desempenho de um sistema de planejamento de irrigação, considerando a integração de diversos fatores, como dados de umidade do solo obtidos por meio de uma sonda, previsões meteorológicas e características específicas do solo e da cultura. A análise desses elementos de forma isolada e em interação visa a alcançar uma gestão eficiente da água e uma redução significativa no consumo de energia elétrica, comparativamente à parcela de controle estabelecida como referência no estudo.

Mais especificamente, a atividade aqui descrita fez parte de um dos objetivos desenvolvidos ao curso de um estágio realizado durante o programa de intercâmbio BRAFAGRI, financiado pela CAPES. O estágio teve duração de 6 meses, entre março e setembro de 2023 na empresa HSTI -France, situado em Aix-en-Provence, na França. Dessa forma, este estudo visa implementar um sistema que possa ser gerido à distância, utilizando os dados coletados pela sonda como suporte para a tomada de decisões. O enfoque central é otimizar o consumo de água e reduzir as horas de bombeamento, contribuindo de maneira expressiva para a promoção da gestão sustentável da irrigação na agricultura. Além disso, o monitoramento das curvas de umidade não apenas auxilia na decisão da quantidade de água a ser aplicada, mas também orienta a definição dos horários e intervalos entre cada irrigação, proporcionando um manejo mais preciso e eficaz dos recursos hídricos. Essa abordagem integrada busca não apenas otimizar o uso da água, mas também promover práticas agrícolas mais sustentáveis e adaptáveis.

Material e Métodos

A fim de compreender melhor com um caso prático como o seu produto, a sonda *Hydrascout*, pode auxiliar a tomada de decisão para irrigação, este experimento foi realizado juntamente com o instituto de pesquisa SUDEXPE. A SUDEXPE é um instituto de pesquisa aplicado focado na fruticultura mediterrânea, localizado na cidade de Marsillargues no sul da França.

A implementação iniciou-se no dia 30 de março 2023, já o início da pilotagem da irrigação que durou 53 dias, ocorreu entre 24 de julho 2023 à 15 de setembro 2023, tal atraso

deveu-se à problemas técnicos. A propriedade agrícola se localizava na cidade de Marsillargue no sul mediterrâneo francês, possuindo um clima csa segundo a classificação de Köppen (ARNFIELD, 2023). Possui verões secos e quentes com temperaturas acima de 22°C, média anual de temperatura de 15°C e acúmulo anual de precipitação em torno de 620 mm (METEO FRANCE, 2023), distribuídas no outono, inverno e primavera.

O experimento foi realizado em uma propriedade agrícola em produção, proporcionada pelo agricultor que cedeu duas parcelas para a realização dos testes, essa parceria foi estabelecida por meio da colaboração com a SUDEXPE. A propriedade, situada em um contexto real, permitiu uma aplicação prática das técnicas propostas, proporcionando resultados mais significativos e aplicáveis ao cenário agrícola. Essa parceria fortalece a conexão entre a pesquisa científica e a prática agrícola, destacando a relevância da colaboração para impulsionar avanços sustentáveis no setor agrícola.

A sonda utilizada no experimento é uma sonda de perfil, o que significa que, conforme mostrado na Figura 1, ela é instalada verticalmente e mede a umidade e a temperatura em cada nível onde há sensores, revelando assim um perfil de umidade em diferentes profundidades. Cada sensor tem um campo de influência de 1.309 cm³, segundo Iturria, et al. (2019), possui a maior abrangência comparado com os outros produtos semelhantes disponíveis no mercado.

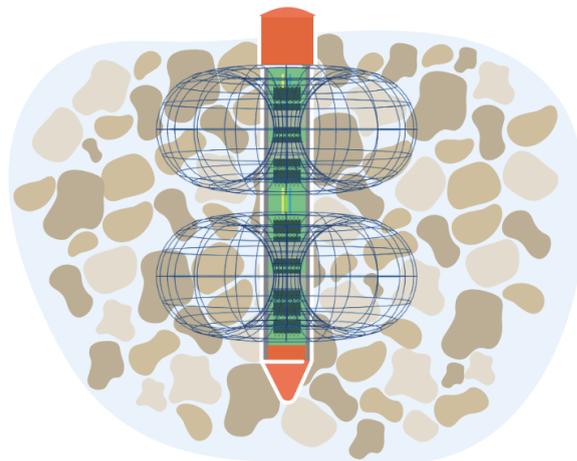


Figura 1. Desenho esquemático do campo eletromagnético gerado pela sonda *Hydrascout*. (Fonte: Autora)

O desenho experimental adotado neste estudo envolveu a alocação de duas parcelas de macieiras uma ao lado da outra, como mostra a Figura 2. Sendo uma designada como testemunha, possuindo 3 hectares e orientação norte-sul, e a outra como a parcela de teste,

ocupando uma área de 1 hectare e orientação leste-oeste. A escolha da proximidade entre essas parcelas buscou minimizar a heterogeneidade do ambiente, compartilhando características edafoclimáticas semelhantes, com o solo predominantemente classificado como franco limoso segundo a classificação textural da USDA (2017). Conforme a análise mais recente disponibilizada pelo agricultor, feita em janeiro de 2022, os resultados revelam uma composição que inclui 1,8% de matéria orgânica, 23,5% de argila, 58,4% de silte e 8,1% de areia no local.

Essas especificações partilhadas buscam assegurar que os resultados obtidos possam ser atribuídos às variações nas práticas de irrigação propostas, mantendo constantes outros fatores relacionados ao manejo da cultura e à variedade da maçã utilizada.

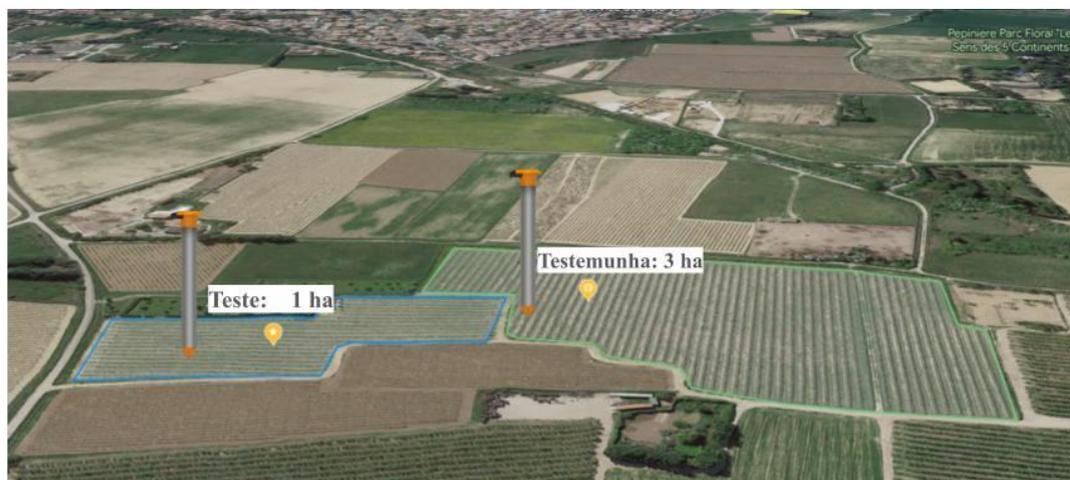


Figura 2. As duas parcelas do experimento, em azul a parcela onde a irrigação foi modulada e em verde a parcela testemunha (Fonte: Google Earth).

Ambas as áreas de teste apresentavam a mesma variedade de maçãs, Pink Lady, com plantio realizado em um espaçamento de 1,25 m entre as plantas e 4 m entre as linhas. O sistema de irrigação adotado consistia em gotejadores suspensos a aproximadamente 50 cm do solo, devido a intervenções de roçagem mecânica, distribuídos em um espaçamento de 50 cm entre eles e com um fluxo de água de 1,6 L/h.

Para monitorar de maneira precisa e contínua a umidade do solo em ambas as parcelas, foi instalada uma sonda *Hydrascout* de 1 metro de profundidade, com 4 captores a 10 cm, 20 cm, 60 cm e 100 cm, medindo a umidade e temperatura a cada nível. Possuindo resolução de 0,1%, precisão de $\pm 3\%$ e 1.309 cm^3 de volume do solo explorado. Essas sondas desempenharam um papel crucial na obtenção de dados precisos que serviram como base para a avaliação da eficácia do sistema de modulação da irrigação.

Além disso, como variável de controle, o crescimento em diâmetro de 30 maçãs etiquetadas foi mensurado semanalmente em cada parcela. A escolha dessa variável fundamenta-se em sua relevância, especialmente ao considerarmos o estágio fenológico da cultura, que se encontrava no período de enchimento do fruto, um período de elevada sensibilidade ao estresse hídrico (EBEL; PROEBSTING; EVANS, 1995). Essa abordagem permitiu uma avaliação direta e comparativa do impacto do sistema de irrigação modulado sobre o desenvolvimento das maçãs, destacando-se como um indicador crucial para a eficácia do sistema implementado, garantindo que a redução do consumo de água e eletricidade não afetassem a produtividade e qualidade do fruto.

Para monitorar o experimento, foi instalado um ambiente que permitisse o seu acompanhamento à distância, pois o experimento foi aplicado em uma cidade, mas a responsável pela a pilotagem de irrigação, estava em outra cidade. Algumas visitas foram feitas, mas por questões de logística, para pequenos problemas técnicos e acompanhamento das variáveis de controle, o estagiário da SUDEXPE facilitava estas tarefas. Portanto, para coordenar à distância, três ações fundamentais foram identificadas como requisitos: coleta de dados, registro e transmissão desses dados. Para isso, a utilização de um data logger, conectividade à rede (Wi-Fi/3G) e uma interface de visualização dos dados eram essenciais.

O sistema implementado, consiste em um datalogger, responsável estabelecer a conexão com a rede Wi-Fi e enviar os dados para o servidor da plataforma *Wisecrop*, acoplado com uma bateria de lítio como fonte de energia. O esquema desse sistema é apresentado na figura 3 abaixo. Este sistema é composto por diversos componentes: o roteador Wi-Fi TP-Link, o gateway Lora e Wi-Fi, fornecendo a conexão a rede; o controlador de irrigação à distância *MySolem*; a sonda *Hydrascout*, que se conecta ao datalogger, e por fim, a plataforma de visualização e o servidor *Wisecrop*.

Essa configuração proporciona um ambiente de controle à distância, permitindo a integração de dados em tempo real e o ajuste na irrigação. Contribuindo não apenas para a eficiência do uso da água, mas também para o aprimoramento da gestão agrícola, impulsionando a sustentabilidade e a produtividade no setor agrônomico, proporcionando mais conforto com o controle à distância.



Figura 3. Esquema do ecossistema (Fonte: Autora)

No desenvolvimento deste experimento, a modulação da irrigação foi realizada mediante o acompanhamento diário das curvas de umidade, conforme ilustrado na Figura 4 abaixo, sendo acessados por meio da web plataforma Wisecrop. Esses dados permitiram não apenas a observação da variação temporal da umidade do solo, mas também a análise da resposta do solo a cada evento de irrigação ou chuva, contribuindo para a adaptação do tempo de rega. No entanto, é importante ressaltar que alguns intervalos de dados foram perdidos devido a problemas técnicos, como cortes de cabos por roçadeiras e questões com o datalogger.

Considerando que a área experimental era uma propriedade produtiva ativa, a redução da irrigação foi implementada de maneira cautelosa e gradual. Diversos desafios, como a falta de experiência direta com sistemas de irrigação e a distância que limitava um acompanhamento mais próximo e interações frequentes com o agricultor, foram enfrentados. Essas circunstâncias influenciaram as estratégias adotadas, destacando a necessidade de uma abordagem prudente diante das condições reais do ambiente produtivo.

Curvas de umidade

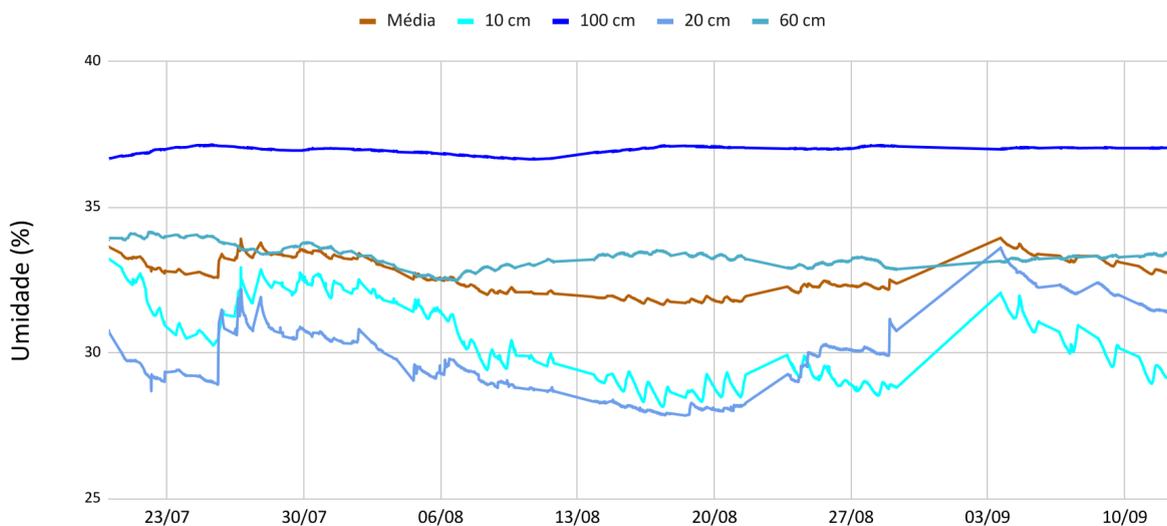


Figura 4. Dinâmica Temporal da Umidade do Solo em Diferentes Profundidades.

Durante o experimento, as medidas eram realizadas a cada 15 minutos e enviadas ao servidor a cada hora, as fotos da Figura 5 abaixo, mostram a instalação da sonda e do datalogger, responsável pelo envio dos dados. Em algumas instâncias, algumas dessas medidas foram perdidas, mas essas perdas não tiveram um impacto significativo, pois os dados anteriores e posteriores ainda forneciam um bom panorama da umidade do solo. No entanto, a perda de dados entre 29 de agosto e 3 de setembro prejudicou a análise, já que seria interessante observar o comportamento do solo após um forte evento de chuva, proporcionando percepções interessantes sobre a saturação e infiltração do solo nessas condições.

Para determinar os estados de saturação e secura do solo, foram aplicados limites distintos. O ponto de murcha permanente foi adotado como o limite inferior, representando o estado em que a planta já não consegue extrair mais água do solo. Como limite superior, foi estabelecido a capacidade de campo, que é o teor de umidade do solo retido após a drenagem do excesso de água livre por gravidade, é o ponto no qual o solo atinge sua máxima capacidade de retenção de água após ter sido saturado (FAO, 1998). Esses limites são definidos com base na classe textural do solo, neste caso, silte argiloso, com limites inferiores e superiores estabelecidos em 13% e 33%, respectivamente (FAO, 1998).

Além disso, considerou-se o nível de 2/3 da reserva útil do solo como reserva facilmente utilizável, indicando o ponto inicial para identificar o início do estresse hídrico (DELAUNOIS, 2014). Essa abordagem acrescenta um componente prático à interpretação das curvas de umidade permitindo uma compreensão mais contextualizada do comportamento do solo em termos de disponibilidade de água para as plantas.



Figura 5. À esquerda a sonda instalada na parcela de maçã, à direita o momento de configuração do datalogger. (Fonte: Autora)

Resultados e Discussão

A tomada de decisão baseou-se no monitoramento de um conjunto de variáveis. Incluindo as curvas de umidade e temperatura, que são coletadas por meio de sondas estrategicamente posicionadas. Além disso, incorporamos dados meteorológicos oriundos do órgão público meteorológico francês a Meteo France. Os elementos foram: a probabilidade de chuva, a temperatura relativa, velocidade do vento e a evapotranspiração calculada pelo método Penman-Monteith FAO, que desempenham um papel fundamental na determinação das necessidades hídricas das plantas.

A Figura 6 apresenta um gráfico que exibe os alguns dos dados meteorológicos mencionados, permitindo uma visualização clara das tendências ao longo do tempo. O gráfico inclui informações da evapotranspiração cultural (ETc) e a quantidade de chuvas, elementos cruciais para o entendimento do impacto das condições ambientais na gestão da irrigação. Este conjunto abrangente de informações é essencial para otimizar a eficiência da irrigação e garantir o desenvolvimento saudável das culturas.

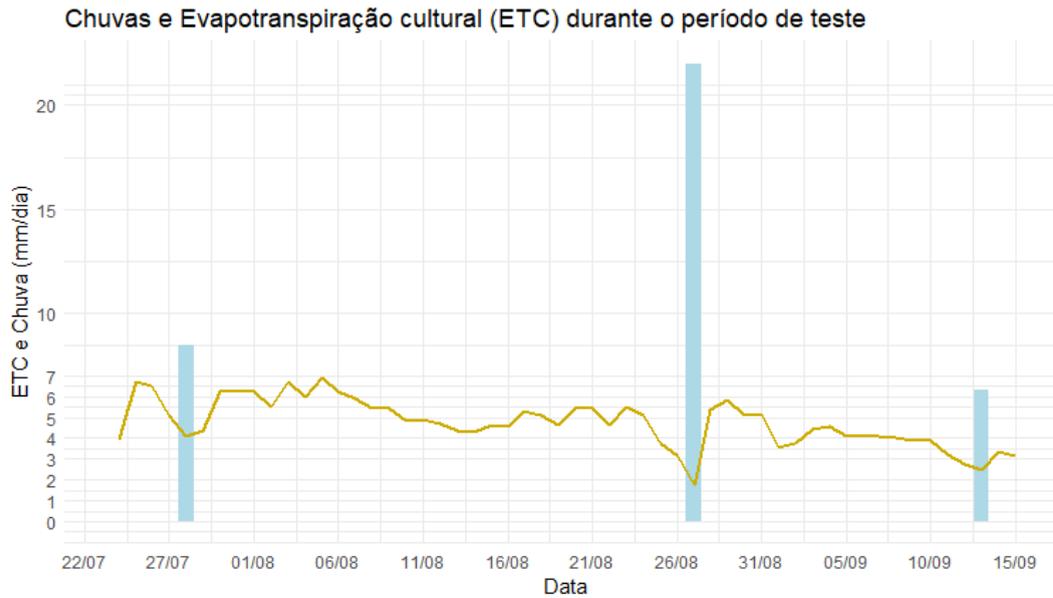


Figura 6. A linha apresenta a evapotranspiração cultural calculada a partir da equação de Penman-Monteith e 0,8 de coeficiente cultural K_c , enquanto as barras representam as chuvas registradas para este período.

O gráfico apresentado na Figura 7 delinea a modulação da irrigação ao longo do período do projeto, comparando a estratégia aplicada na parcela teste com a prática convencional mantida na parcela testemunha. Na parcela teste, a irrigação foi dinamicamente ajustada com base nas leituras da sonda *Hydrascout*, adaptando-se às necessidades de umidade do solo, ao contrário da irrigação constante na parcela testemunha de 6,4 mm/dia, que seguia o calendário padrão baseado no estado fenológico da maçã e em médias históricas mensais de evapotranspiração. Os diversos ajustes feitos possibilitaram não apenas a diminuição do volume de irrigação, mas também seu aumento estratégico durante períodos de calor intenso. Notavelmente, permitiram até mesmo a interrupção total da irrigação quando ocorreu uma precipitação intensa no final do mês de agosto.

Além dos valores brutos das curvas de umidade, que representam o status instantâneo do nível de água no solo, o monitoramento do fluxo de água revelou-se uma observação crucial para compreender o comportamento do solo diante da entrada de água no sistema. Com medições a cada 15 minutos e conhecimento dos horários de cada ciclo de irrigação, observar o impacto de cada ciclo em momentos específicos foi essencial para ajustar não apenas a quantidade de água aplicada, mas também os horários de aplicação. Por exemplo, ao perceber que a irrigação nos horários mais quentes do dia não resultava em mudanças nos níveis abaixo de 60 cm, a reprogramação foi realizada, aplicando a redução especificamente nesses horários.

A diferença é evidenciada não apenas pela adaptação dinâmica na parcela teste em comparação com a prática fixa na testemunha, mas também pela redução significativa de 22% no consumo de água e energia durante o período analisado, totalizando uma economia de 764.000 L de água e 95 horas de tempo de irrigação. Este resultado destaca não só a eficácia da modulação proposta, mas também seus impactos positivos em termos de sustentabilidade, eficiência hídrica e energética no contexto da produção agrícola.



Figura 7. Acompanhamento da irrigação em milímetros por dia nas duas parcelas.

A Tabela 1 exibe as médias do diâmetro das maçãs para cada dia de controle, apresentando resultados das 30 maçãs etiquetadas por tratamento. Além das médias, os desvios padrão associados a cada conjunto de amostras destacam variação presente nos resultados.

Partindo dos dados coletados do diâmetro e com o auxílio do software R Studio, foi feito o teste de normalidade, o qual constatou-se que os dados não seguem uma distribuição normal. Portanto, o teste t de Student não é aplicável, uma vez que não atende aos pressupostos para testes paramétricos. Em vez disso, optou-se pelo teste de Wilcoxon, uma abordagem não paramétrica, com um nível de confiança de 95%. O teste de Wilcoxon rank sum foi aplicado aos conjuntos de dados, resultando em um p-valor de 0.177. Este resultado indica que não há evidências suficientes para rejeitar a hipótese nula de que não há diferença significativa entre o diâmetro das maçãs ao longo do experimento. Em outras palavras, não podemos afirmar que há uma mudança estatisticamente significativa entre os tratamentos testados. Portanto, conclui-se que a redução de 22% não alterou o crescimento dos frutos no sistema e local testado.

Os resultados obtidos ao longo do período de monitoramento do diâmetro das maçãs nas parcelas testemunha e parcela teste, apresentaram um crescimento contínuo, porém mais acentuado no início para ambos tratamentos. As médias registradas em ambas as parcelas ao longo das datas de coleta são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 01. Análise Semanal das Médias do Calibre de Frutos

		27/07	03/08	09/08	16/08	23/08	30/08	06/09	13/09	19/09
Testemunha	Média (cm)	58,9	62,0	64,1	66,1	67,9	69,1	70,1	71,3	72,5
	Desvio padrão	3,52	3,53	3,14	2,89	3,58	4,01	4,41	4,24	4,19
Teste	Média (cm)	57,4	60,8	62,9	65,2	67,3	68,6	69,7	70,9	72,4
	Desvio padrão	3,54	3,39	3,04	2,51	3,06	3,26	3,58	3,50	3,64

Esses resultados sugerem que, apesar das modulações na irrigação realizadas na parcela teste, não foi observada uma influência estatisticamente significativa no crescimento do diâmetro das maçãs em comparação com a parcela testemunha.

Apresentado no boxplot da Figura 8, as amostras semanais do crescimento apresentaram uma relativa variação, havendo também alguns outliers. Porém, é esperado uma certa variação se tratando na natureza do experimento, sendo o maior desvio padrão as quatro últimas medidas da parcela testemunha com valores acima de ± 4 cm.

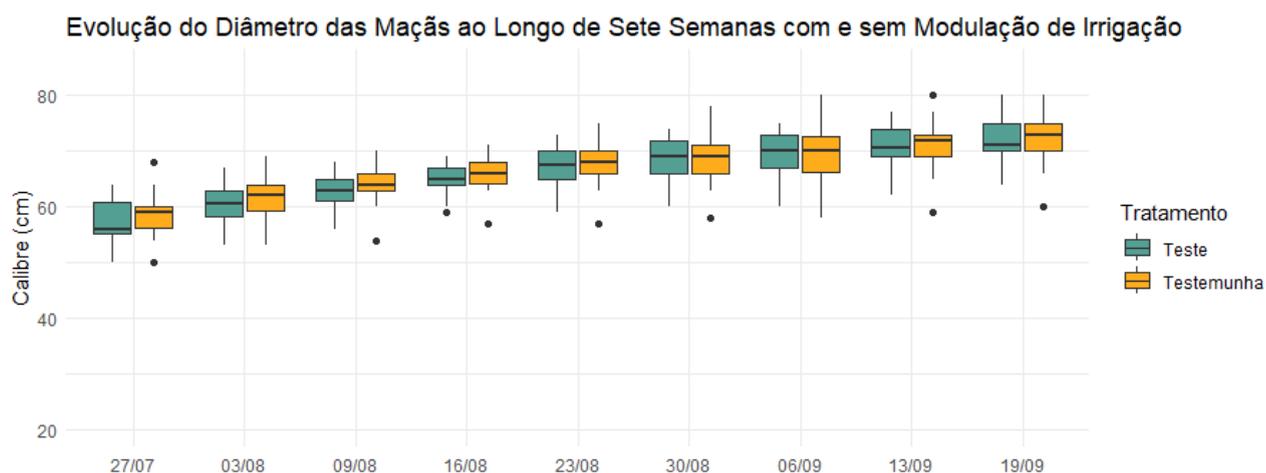


Figura 8. Variação Semanal no Diâmetro das Maçãs: Comparação entre Parcela Testemunha e Parcela com Modulação de Irrigação

A partir da análise da Figura 8, percebe-se uma semelhança na variação de cada amostragem entre os tratamentos, levando então a considerar que o erro associado é partilhado entre os tratamentos, conferindo uma maior compreensão da origem do erro.

Portanto, é importante observar que a economia alcançada está intrinsecamente ligada ao contexto específico do sistema de irrigação, às condições climáticas locais e à disponibilidade de água. Como ressalva, deve-se salientar que a replicação deste experimento em diferentes ambientes rurais pode ser viável, porém sujeita a variações significativas dependendo do sistema de irrigação adotado, características físico-hídricas do solo, do tipo de cultura presente e da experiência do gestor agrícola, técnico ou engenheiro responsável. A diversidade inerente ao meio rural exige uma abordagem adaptativa, destacando a importância da personalização e do conhecimento local para otimizar os resultados obtidos com essa inovadora estratégia de gestão da irrigação.

Conclusão

Em conclusão, este estudo revela uma perspectiva promissora para a redução significativa no consumo de água por meio da implementação de sensores de umidade, como a sonda *Hydrascout*. A capacidade dessa tecnologia de proporcionar uma visão detalhada e instantânea da umidade do solo, juntamente com a resposta do solo a eventos de irrigação, destaca-se como uma ferramenta para superar as limitações associadas aos protocolos fixos de irrigação baseados em calendários predefinidos. No entanto, é imperativo ressaltar que a eficácia dessa abordagem requer um entendimento aprofundado para interpretar adequadamente as curvas de umidade e integrar essas informações com outras variáveis, incluindo o tipo e fase da cultura, características do solo e condições meteorológicas.

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO (ED.). **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada**. 2. ed. Brasília, DF: Ana, 2020.

ALBRIZIO, R. et al. Water stress, yield, and grape quality in a hilly rainfed “Aglianico” vineyard grown in two different soils along a slope. **Agricultural Water Management**, v. 279, p. 108183, 1 abr. 2023.

ALLEN, R. G.; FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED

NATIONS (EDS.). **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.

ARNFIELD, J. A. **Koppen climate classification | Definition, System, & Map |**

Britannica. Disponível em:

<<https://www.britannica.com/science/Koppen-climate-classification>>. Acesso em: 8 nov. 2023.

BÖGEL, G. Competing in a smart world: The need for digital agriculture. Em: ILLÉS, B. C. et al. (Eds.). **Management and Organization: Concepts, Tools and Applications**. [s.l.] Pearson, 2017. p. 11–28.

Competing in a smart world: The need for digital agriculture. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/318893017_Competing_in_a_smart_world_The_need_for_digital_agriculture>. Acesso em: 8 nov. 2023.

DEAN, T. J.; BELL, J. P.; BATY, A. J. B. Soil moisture measurement by an improved capacitance technique, Part I. Sensor design and performance. **Journal of Hydrology**, v. 93, n. 1, p. 67–78, 15 ago. 1987.

DELAUNOIS, A. **Caractérisation de la réserve en eau des sols à partir des sondages pédologiques à la tarière**. Tarn, 2014. Disponível em:

<https://tarn.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Occitanie/074_Inst-Tarn/4-AGRO ENVIRONNEMENT/Eau_OU_Irrigation/sondage_tariere_complet.pdf>.

D'ODORICO, P. et al. The global value of water in agriculture. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 117, n. 36, p. 21985–21993, 8 set. 2020.

EBEL, R. C.; PROEBSTING, E. L.; EVANS, R. G. Deficit Irrigation to Control Vegetative Growth in Apple and Monitoring Fruit Growth to Schedule Irrigation. **HortScience**, v. 30, n. 6, p. 1229–1232, out. 1995.

FAO. **Climate Info Tool: CropWAT**. Disponível em:

<<https://aquastat.fao.org/climate-information-tool/>>. Acesso em: 13 nov. 2023.

ITURRIA, I. et al. **Evaluación de sondas capacitivas comerciales y bajo coste para estimar la humedad**. 1 jan. 2019.

LEKSHMI, S.; SINGH, D. N.; SHOJAEI BAGHINI, M. A critical review of soil moisture

measurement. **Measurement**, v. 54, p. 92–105, 1 ago. 2014.

METEO FRANCE. **Fiche Climatologique**. [s.l.: s.n.]. Disponível em:

<https://donneespubliques.meteofrance.fr/FichesClim/FICHECLIM_34151005.pdf>. Acesso em: 2 nov. 2023.

MFAN'FIKILE TFWALA, C.; VAN RENSBURG, L.; BELLO, Z. Laboratory vs. Field Calibration of HydraSCOUT Probes for Soil Water Measurement. **Pedosphere**, p. 132–136, 2019.

MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET DE LA COHÉSION DES TERRITOIRES. **Données et études statistiques pour le changement climatique, l'énergie, l'environnement, le logement, et les transports**. Disponível em:

<<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr>>. Acesso em: 7 out. 2023.

OECD. **Agricultural Innovation Systems: A Framework for Analysing the Role of the Government**. [s.l.] OECD, 2013.

PUY, A. et al. Irrigated areas drive irrigation water withdrawals. **Nature Communications**, v. 12, n. 1, p. 4525, 26 jul. 2021.

Rstudio. , [s.d.]. Disponível em: <<https://posit.co/download/rstudio-desktop/>>

SMITH, M.; FAO (EDS.). **CROPWAT**: a computer program for irrigation planning and management. Rome: FAO, 1992.

The State of Food and Agriculture 2020: Overcoming water challenges in agriculture. Rome, Italy: FAO, 2020.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Soil Survey Manual**. 18. ed. USDA, 2018.

WALKER, J. P.; WILLGOOSE, G. R.; KALMA, J. D. In situ measurement of soil moisture: a comparison of techniques. **Journal of Hydrology**, v. 293, n. 1, p. 85–99, 1 jun. 2004.

Water and agriculture - OECD. Disponível em:

<<https://www.oecd.org/agriculture/topics/water-and-agriculture/>>. Acesso em: 7 nov. 2023.