

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E BIOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE COMPUTAÇÃO

MARCELO EDIVAN FREITAS SANTOS
Orientador: Prof. Dr. Pablo Luiz Araújo Munhoz

**USO DE TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO PARA IRRIGAÇÃO DO
CULTIVO DE GRÃOS**

Ouro Preto, MG
2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E BIOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE COMPUTAÇÃO

MARCELO EDIVAN FREITAS SANTOS

USO DE TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO PARA IRRIGAÇÃO DO CULTIVO DE GRÃOS

Monografia apresentada ao Curso de Ciência da Computação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciência da Computação.

Orientador: Prof. Dr. Pablo Luiz Araújo Munhoz

Ouro Preto, MG
2024



FOLHA DE APROVAÇÃO

Marcelo Edivan Freitas Santos

Uso de técnicas de otimização para irrigação do cultivo de grãos

Monografia apresentada ao Curso de Ciência da Computação da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Ciência da Computação

Aprovada em 18 de Outubro de 2024.

Membros da banca

Pablo Luiz Araújo Munhoz (Orientador) - Doutor - Universidade Federal de Ouro Preto
Pedro Henrique Gonzalez Silva (Examinador) - Doutor - Universidade Federal do Rio de Janeiro
Bárbara Letícia Rodrigues Milagres (Examinadora) - Mestranda - PPGCC/DECOM/UFOP

Pablo Luiz Araújo Munhoz, Orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 18/10/2024.



Documento assinado eletronicamente por **Pablo Luiz Araujo Munhoz, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 22/10/2024, às 08:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0795437** e o código CRC **57DC160E**.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus, por me guiar e dar forças em todos os momentos desta caminhada. Sem a Sua graça e sabedoria, não teria chegado até aqui.

À Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), pela oportunidade de aprendizado e crescimento pessoal e profissional. Tenho grande orgulho de fazer dessa instituição que tanto contribui para a formação de cidadãos e profissionais comprometidos. Um agradecimento especial ao meu orientador, Pablo Munhoz, por sua orientação, paciência e incentivo constantes ao longo deste processo. Seu conhecimento e dedicação foram fundamentais para o sucesso desta jornada.

Agradeço, ainda, à minha família, que sempre me apoiou incondicionalmente. Em especial, ao meu irmão Maycon, que esteve ao meu lado durante a construção deste trabalho, ajudando-me em todos os momentos desafiadores. O suporte emocional e encorajamento que recebi de vocês foram fundamentais para que eu persistisse nos momentos desafiadores e alcançasse este objetivo.

E, por fim, agradeço à minha amada esposa Suelen, pelo amor, compreensão e apoio inestimáveis. Você foi meu porto seguro, minha fonte de motivação e força nos momentos mais difíceis. Este trabalho é também uma conquista nossa.

Resumo

A irrigação agrícola desempenha um papel fundamental no fornecimento de água para as culturas, permitindo alta produtividade e qualidade dos produtos agrícolas. No entanto, as práticas de irrigação enfrentam desafios relacionados ao consumo excessivo de água e energia, bem como a eficiência e impacto ambiental. Este trabalho propõe a otimização do manejo da irrigação utilizando técnicas de programação matemática para apoiar a tomada de decisão em sistemas de irrigação por pivô central. O objetivo é minimizar os custos operacionais, garantindo que as plantas recebam a quantidade ideal de água, aumentando assim a eficiência hídrica, mitigando impactos ambientais e maximizando o lucro agrícola. A metodologia envolveu a análise dos componentes diários do balanço hídrico, otimizando o fornecimento de água e determinando o cronograma ideal de operação. O estudo foi realizado utilizando dados geográficos da Fazenda Experimental Santa Paula, em Unaí, MG. Os resultados indicam que a irrigação otimizada reduziu os custos operacionais em cerca de 53,5%, de R\$ 5.941,80 para R\$ 2.767,76, e aumentou a produtividade para 5.790 kg/ha em comparação com 5.676 kg/ha no sistema convencional. Além disso, houve uma pequena redução no volume total de irrigação aplicada, com 232 mm de água usados na irrigação otimizada em comparação com 240 mm nos métodos convencionais. Essa abordagem demonstrou maior eficiência hídrica e redução no estresse hídrico das plantas.

Palavras-chave: Otimização, Programação Inteira Mista, Irrigação por aspersão, Manejo da irrigação, Eficiência hídrica,

Abstract

Agricultural irrigation plays a crucial role in supplying water to crops, enabling high productivity and quality. However, irrigation practices face challenges related to excessive water and energy consumption, efficiency, and environmental impact. This study proposes optimizing irrigation management using mathematical programming techniques to support decision-making in center-pivot irrigation systems. The objective is to minimize operational costs while ensuring that crops receive the optimal amount of water, thereby increasing water efficiency, mitigating environmental impacts, and maximizing agricultural profit. The methodology involved analyzing daily water balance components, optimizing water supply, and determining the ideal operational schedule. The study was conducted using geographic data from the Santa Paula Experimental Farm in Unaí, MG, Brazil. Results indicate that optimized irrigation reduced operational costs by approximately 53.5%, from R\$ 5,941.80 to R\$ 2,767.76, and increased productivity to 5,790 kg/ha compared to 5,676 kg/ha in the conventional system. Additionally, the total volume of water applied was slightly reduced, with 232 mm used in optimized irrigation versus 240 mm in conventional methods. This approach demonstrated improved water efficiency and reduced plant water stress.

Keywords: Optimization, Mixed Integer Programming, Sprinkler irrigation, Irrigation management, Water efficiency.

Lista de Ilustrações

Figura 2.1 – Exemplo dos métodos de irrigação. Fonte: Testezlaf (2017).	6
Figura 2.2 – Esquema pivô central. Fonte: Bernardo <i>et al.</i> (2006).	12
Figura 2.3 – Principais arranjos de aspersores. Fonte: Marchetti (1983).	13

Lista de Tabelas

Tabela 4.1 – Parâmetros de cultivo nas diferentes fases. Fonte: adaptado de Allen <i>et al.</i> (1998).	29
Tabela 4.2 – Faixas de horário e valores de consumo de energia. Fonte: Elaborado pelo autor.	31
Tabela 5.1 – Dados de operação do sistema de irrigação por pivô central.	35
Tabela 5.2 – Resultados comparativos das diferentes abordagens de irrigação.	36
Tabela A.1 – Valores diários calculados para ET_c , precipitação, capacidade de água disponível (CAD) e umidade crítica (θ_{crit}), bem como os valores de irrigação estimados.	45

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DECOM	Departamento de Computação
UFOP	Universidade Federal de Ouro Preto
FESP	Fazenda Experimental Santa Paula
ICA	Instituto de Ciências Agrárias
UFVJM	Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
BHC	Balanço Hídrico Climatológico
ANA	Agência Nacional de Águas
MPA's	Modelos de Produtividade Agrícola
FAO	Food and Agriculture Organization
MIP	Programação Inteira Mista
OPL	Optimization Programming Language

Lista de Símbolos

Δ	Letra grega Maiúscula Delta
γ	Letra grega minúscula gama
θ	Letra grega theta
\forall	Para todo
\in	Pertence
Σ	Somatório

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Justificativa	2
1.2	Objetivos	3
1.2.1	Objetivo geral	3
1.2.2	Objetivos Específicos	3
1.3	Organização do Trabalho	4
2	Revisão Bibliográfica	5
2.1	Fundamentação Teórica	5
2.1.1	Agricultura Irrigada	5
2.1.2	Manejo da irrigação	9
2.1.3	Balanço Hídrico	10
2.1.4	O sistema de Irrigação Pivô Central	12
2.1.5	O modelo AquaCrop	14
2.2	Trabalhos Relacionados	15
2.2.1	Dimensionamento de Sistemas de Irrigação Pivô Central	15
2.2.2	Rotatividade de Culturas	16
2.2.3	Distribuição de Recursos Hídricos	17
3	Problema da Irrigação	20
3.1	Cultura	20
3.1.1	Evapotranspiração de referência	20
3.1.2	Evapotranspiração da Cultura	21
3.1.3	Ciclo de Crescimento da Cultura	22
3.1.4	Fases Fenológicas da Cultura	22
3.1.5	Profundidade efetiva do sistema radicular	22
3.1.6	Fração de água disponível	22
3.2	Solo	22
3.2.1	Umidade na Capacidade de Campo	22
3.2.2	Umidade no Ponto de Murcha Permanente	23
3.2.3	Densidade do solo	23
3.3	Custo elétrico	23
3.3.1	Horário de Ponta	23
3.3.2	Horário Fora de Ponta	24
3.3.3	Horário Reservado	24
3.4	Balanço hídrico sequencial	24
3.4.1	Precipitação	24
3.4.2	Capacidade de água disponível no solo	25

3.4.3	Água facilmente disponível	25
3.4.4	Umidade Crítica	26
3.4.5	Água disponível inicial e Água disponível final	26
3.4.6	Irrigação	26
4	Metodologia	28
4.1	Área de Estudo	29
4.2	Caracterização da Cultura	29
4.2.1	Evapotranspiração da Cultura por Dia do Ciclo	30
4.2.2	Capacidade de Água Disponível no Solo por Dia do Ciclo	30
4.2.3	Água Facilmente Disponível no Solo por Dia do Ciclo	30
4.2.4	Umidade Crítica por Dia do Ciclo	30
4.3	Sistema de irrigação	30
4.3.1	Custo por Percentímetro de Irrigação	31
4.3.2	Lâmina por Percentímetro de Irrigação	31
4.4	Modelo Matemático	31
4.4.1	Dados de Entrada	32
4.4.2	Variáveis de Decisão	32
4.4.3	Função Objetivo	32
4.4.4	Restrições	33
5	Resultados	35
5.1	Modelo de Otimização	35
5.2	Irrigação	35
6	Considerações Finais	37
6.1	Conclusão	37
6.2	Trabalhos Futuros	37
	Referências	39
	 Apêndices	 43
	APÊNDICE A Dados Diários de Irrigação e Parâmetros Climáticos	44

1 Introdução

A agricultura irrigada desempenha um papel vital no suprimento de água às culturas, visando atender às suas necessidades hídricas ao longo do ciclo de crescimento. Essa prática não apenas possibilita altas produtividades, mas também contribui para a obtenção de produtos agrícolas de qualidade. A quantidade de água exigida pelas culturas é influenciada por diversos fatores, como a espécie cultivada, produtividade desejada, local de cultivo, estágio de desenvolvimento da cultura, tipo de solo e época de plantio.

Conforme destacado por [Postel *et al.* \(2000\)](#), a agricultura irrigada representa aproximadamente 40% da produção global, permitindo a produção de até quatro vezes mais em comparação com a agricultura de sequeiro, sem irrigação, em uma mesma área. A importância desse método é destacada por [Sojka, Bjorneberg e Entry \(2002\)](#), que comentam a necessidade de expandir a área de sequeiro em cerca de 250 milhões de hectares para que a produção se iguale a produção proveniente das áreas irrigadas.

No entanto, a prática de irrigação não está isenta de desafios. A agricultura irrigada demanda grandes volumes de água e energia, sendo responsável por até 70% do uso da água em algumas regiões, e atingindo até 90% em países em desenvolvimento tardio, gerando potenciais conflitos internos devido à escassez desse recurso natural ([FOOD, 2008](#)).

No contexto brasileiro, as áreas irrigadas têm um papel crucial em épocas e locais onde as precipitações não são favoráveis, mantendo a umidade do solo e suprimindo as necessidades hídricas das plantas. A prática da irrigação tem se mostrado fundamental para aumentar significativamente a produtividade de diversas culturas, evitando a expansão descontrolada de plantios em áreas com cobertura vegetal natural ([GUIMARAES; LANDAU, 2014](#)).

A região Sudeste do Brasil destaca-se como uma das líderes na prática da irrigação, experimentando um aumento substancial em sua área irrigada ao longo das últimas décadas. [Silva e Freitas \(2023\)](#) revela um crescimento notável na região, tornando-a a maior área irrigada do país, com um aumento de 10% em sua área total de 1996 a 2017.

A irrigação por aspersão, especialmente através de sistemas como pivô central, tem possibilitado a sucessão de até três cultivos irrigados ao longo do ano agrícola em muitas regiões do Brasil ([SILVEIRA, 2011](#)). Essa prática, quando realizada com eficiência, contribui significativamente para o aumento da produtividade, promovendo uma melhor utilização da janela de plantio e reduzindo a dependência do aumento das áreas plantadas para alcançar maiores produções.

Contudo, a eficiência global da irrigação permanece desafiadora. A média mundial situa-se em torno de 37%, indicando uma oportunidade significativa de melhoria. A otimização no

uso da água de irrigação pode não apenas resultar em uma economia considerável de água, mas também em uma redução substancial no consumo de energia associado a essa prática (CHRISTOFIDIS, 2013).

A situação no Brasil reflete a necessidade de aprimoramento, com eficiência de irrigação estimada em apenas 60% (COELHO; FILHO; OLIVEIRA, 2005). Melhorar essa eficiência, mesmo que em pequena escala, pode não só reduzir o consumo de água, mas também mitigar riscos ambientais relacionados à dispersão de fertilizantes e defensivos agrícolas. Além de contribuir para evitar que os sais minerais provenientes da irrigação permaneçam na superfície, à medida que a concentração de água diminui, evitando o acúmulo desses sais e, conseqüentemente, a salinização do solo.

O manejo eficiente da irrigação é uma prática crucial para o desenvolvimento sustentável da agricultura, impactando diretamente na produtividade e rentabilidade das culturas. Coelho, Filho e Oliveira (2005) destacam a importância de aplicar água no momento correto e na quantidade demandada pela cultura, ressaltando que mesmo sistemas de irrigação de alta eficiência podem se mostrar ineficazes se o manejo não for adequado. Este desafio na gestão hídrica agrícola é agravado pela complexa interação entre fatores ambientais, características do solo e especificidades de cada cultura.

O manejo inadequado da irrigação pode resultar em conseqüências desastrosas, como a aplicação insuficiente de água, levando a uma redução na produtividade e na receita proveniente da comercialização da produção. Por outro lado, a aplicação excessiva de água não apenas aumenta os custos operacionais, mas também contribui para a perda significativa de recursos hídricos por percolação, quando a quantidade de água infiltrada no solo se torna maior que a capacidade de absorção deste o excesso de água será drenado para as camadas mais profundas do solo abastecendo os reservatórios subterrâneos, podendo causar danos ambientais, como a contaminação de aquíferos. Adicionalmente, em solos desfavoráveis, o excesso de irrigação pode provocar perdas de produção devido à suscetibilidade das culturas ao acúmulo de água no solo, destacando a necessidade premente de um manejo preciso e eficiente.

1.1 Justificativa

A tomada de decisão na gestão da irrigação é uma tarefa complexa, influenciada por variações temporais nas condições climáticas e do solo. A dificuldade em avaliar experimentalmente os efeitos individuais de cada fator sobre o desempenho do sistema de irrigação torna a abordagem tradicional limitada. Moreira *et al.* (2013) destacam a necessidade de abraçar abordagens multidisciplinares, integrando aspectos econômicos, administrativos, agrônômicos e de irrigação. Nesse contexto, a aplicação de modelos computacionais emerge como uma ferramenta valiosa, permitindo a análise de diversas estratégias e a seleção da mais adequada para cada situação.

Modelos de programação matemática se destacam como uma ferramenta poderosa para a

gestão otimizada de recursos hídricos na agricultura. Sua aplicação abrange desde a seleção de culturas até a alocação eficiente de insumos, como terra, água e mão de obra, levando em conta as restrições impostas pela disponibilidade desses recursos e pelas demandas do mercado. Em um contexto onde a maximização da produtividade é essencial, esses modelos fornecem uma abordagem estruturada e eficaz para otimizar o uso de recursos escassos.

1.2 Objetivos

Nesta seção, são apresentados os objetivos que guiam a pesquisa. O objetivo geral define a principal meta do estudo, enquanto os objetivos específicos, mais detalhados, descrevem etapas menores que, juntas, conduzem ao alcance do objetivo principal.

1.2.1 Objetivo geral

Este estudo terá como propósito criar, elaborar e implementar modelos de otimização juntamente com técnicas de programação inteira, visando apoiar os produtores na tomada de decisões relacionadas à irrigação em pivôs centrais. A aplicação dos modelos será feita levando em consideração os dados relacionados a Fazenda Experimental Santa Paula (FESP), vinculada ao Instituto de Ciências Agrárias (ICA) da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), situada em Unaí-MG, com as coordenadas geográficas de latitude -16,436109 e longitude -46,897691.

Ao longo do desenvolvimento do modelo, o foco será a minimização dos custos de irrigação, a economia de água, a maximização do lucro da atividade agrícola e a mitigação dos impactos ambientais decorrentes da irrigação. Inicialmente, serão consideradas as restrições relacionadas às características do solo, aos estádios de desenvolvimento das culturas ao longo do ciclo de plantio e às especificações dos pivôs da propriedade.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Reduzir os custos operacionais do sistema de manejo;
2. Garantir que as plantas recebam a quantidade ideal de água, evitando o estresse hídrico;
3. Minimizar o desperdício de água, aplicando apenas o necessário, e contribuir para a conservação dos recursos hídricos;
4. Estimar, com precisão, os valores diários dos componentes do balanço hídrico;
5. Definir o tempo ideal de funcionamento diário de cada pivô, com base na lâmina de irrigação a ser aplicada;

6. Maximizar o lucro da atividade agrícola, ao reduzir os custos operacionais e assegurar que as culturas não sofram estresse hídrico.

1.3 Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. No Capítulo 2, fornece a fundamentação teórica necessária para a compreensão do estudo, além de identificar problemas e analisar abordagens de solução em trabalhos relacionados na literatura. No Capítulo 3, são discutidos os desafios enfrentados na irrigação, incluindo o grande volume de informações a serem consideradas e seus impactos. No Capítulo 4, é detalhada a metodologia adotada para a pesquisa, com foco no modelo de otimização e nos dados utilizados. O Capítulo 5 apresenta e discute os resultados obtidos. Por fim, o Capítulo 6, encerra o trabalho com as conclusões do estudo e sugestões para futuras pesquisas.

2 Revisão Bibliográfica

Nesta revisão, são mapeados as principais tendências, teorias, descobertas e debates que influenciam o contexto atual do campo de estudo em questão. Por meio de uma análise das publicações anteriores, busca-se identificar não apenas lacunas no conhecimento, mas também estabelecer uma base sólida para a pesquisa atual, destacando as contribuições passadas que impactam diretamente este trabalho.

2.1 Fundamentação Teórica

Nesta seção, o objetivo é explorar e sintetizar os principais conceitos, teorias e estruturas que são cruciais para embasar e fundamentar o presente estudo não apenas definindo os elementos essenciais que moldam o entendimento atual do tópico, mas também estabelecendo uma conexão entre teoria e prática.

2.1.1 Agricultura Irrigada

Ao longo da história, a irrigação tem sido descrita como uma técnica que tem por objetivo suprir as necessidades hídricas das plantas, permitindo que expressem todo o seu potencial produtivo (DAKER, 1970). Essa abordagem de fornecer água de forma precisa no momento adequado é crucial para o sucesso da agricultura e ajuda a mitigar os efeitos adversos das variações climáticas.

A irrigação desempenha um papel fundamental na agricultura, proporcionando o fornecimento controlado de água às plantas no momento certo e na quantidade necessária. Essa prática, além de complementar a precipitação natural, pode também enriquecer o solo com elementos fertilizantes, contribuindo para a produtividade e a sobrevivência das culturas (PAZ, 2000).

De acordo com FOOD e FAO (2017) a relevância da irrigação no contexto da viabilidade do setor agrícola em diferentes regiões é incontestável. Mesmo que apenas aproximadamente 20% da área total destinada à agricultura no mundo seja irrigada, essa prática desempenha um papel fundamental já que a agricultura irrigada contribui com notáveis 40% da produção global de alimentos, fibras e culturas bioenergéticas. A produção de alimentos, em particular, é altamente dependente da água, uma vez que a produção de uma única caloria de alimento requer cerca de um litro de água, como destacado em WEEK (2006).

No Brasil, onde as condições climáticas, tipos de solo, culturas e contextos socioeconômicos são variados, o interesse pela irrigação é diversificado. Não existe um sistema de irrigação universalmente ideal, pois diferentes sistemas atendem a diferentes condições e diferentes objetivos. Portanto, a escolha do sistema de irrigação mais adequado requer uma análise minuciosa das

condições locais, levando em consideração a cultura, o solo e a topografia, de modo a identificar as melhores alternativas para a situação específica (ANDRADE; BRITO, 2006). A seleção cuidadosa de sistemas de irrigação desempenha um papel fundamental na otimização da produção agrícola e no uso eficiente dos recursos hídricos, contribuindo assim para o desenvolvimento sustentável da agricultura no Brasil.

Existem fundamentalmente quatro métodos distintos de irrigação: irrigação por superfície, irrigação por aspersão, irrigação localizada e irrigação por subsuperfície. Cada um desses métodos é acompanhado por uma diversidade de sistemas de irrigação, projetados para atender às demandas específicas de diversas variáveis, como características do solo, padrões climáticos, tipos de culturas, disponibilidade de recursos energéticos e considerações socioeconômicas. A existência de uma ampla gama de sistemas de irrigação é, portanto, uma resposta à necessidade de adaptação a cenários diversos e complexos, conforme ilustrado na Figura 2.1 (ANDRADE; BRITO, 2006).

Figura 2.1 – Exemplo dos métodos de irrigação. Fonte: Testezlaf (2017).

(a) Irrigação por superfície



(b) Irrigação por aspersão



(c) Irrigação localizada



(d) Irrigação por subsuperfície



- **Sistemas de irrigação por superfície:** Os sistemas de irrigação por superfície, também conhecidos como irrigação por gravidade, caracterizam-se pela aplicação direta da água

sobre a superfície do solo. A movimentação e infiltração da água são guiadas pelo efeito da gravidade, iniciando-se em uma extremidade da área cultivada e cobrindo gradualmente toda a superfície (Figura 2.1a).

- **Sistemas de irrigação por aspersão:** A irrigação por aspersão destaca-se por replicar de forma eficaz o padrão da chuva. Nesse método, a água é bombeada de fontes diversas, como reservatórios, rios, lagos ou poços subterrâneos, sendo distribuída por uma rede de tubulações. A aspersão ocorre por meio de pequenas gotas, formadas pela passagem da água sob pressão pelos aspersores e pulverizadas no ar, proporcionando uma cobertura uniforme sobre as plantas e o solo (Figura 2.1b).
- **Sistemas de irrigação localizada:** Nos sistemas de irrigação localizada, a água é aplicada de maneira focalizada, concentrando-se em áreas restritas, preferencialmente sob a sombra da copa da cultura ou próxima ao caule. Esse método visa umedecer apenas o volume de solo explorado pelo sistema radicular da planta, utilizando emissores de pequeno diâmetro e baixas pressões para garantir eficiência no uso da água (Figura 2.1c).
- **Sistemas de irrigação por subsuperfície:** Na irrigação por subsuperfície, a água é aplicada abaixo da superfície do solo, diretamente nas raízes das culturas. Esse método capitaliza o fenômeno da ascensão capilar, em que a água se eleva ao longo do perfil do solo devido a diferenças de potencial total (Figura 2.1d).

O sistema de irrigação por aspersão com sistema pivô central se destaca como o método predominante no Brasil, apresentando diversas vantagens, como a capacidade de permitir até três safras irrigadas por ano, uniformidade na distribuição de água e fertilizantes, bem como a redução dos custos de mão de obra, conforme evidenciado em estudos conduzidos por [Castione et al. \(2015\)](#), [Silveira et al. \(2013\)](#) e [Martins et al. \(2016\)](#).

A agricultura irrigada no Brasil, embora frequentemente associado a avanços tecnológicos, apresenta um quadro de práticas inadequadas que resultam em consideráveis desperdícios de água, conforme destacado por [Mantovani, Bernardo e Palaretti \(2006\)](#) e [Marouelli, Silva e SILVA \(2008\)](#). De acordo com [Christofidis \(2013\)](#), estima-se que menos da metade da água captada para fins de irrigação seja efetivamente aproveitada pelas plantas, e em sistemas de irrigação por superfície, as perdas podem ser ainda mais substanciais. Este problema pode ser atribuído a três fatores-chave, como ressaltado por [Mantovani, Bernardo e Palaretti \(2006\)](#): a escassa adoção de critérios técnicos adequados para o manejo da água na maioria das áreas irrigadas, a falta de informações completas e precisas sobre os parâmetros relacionados ao manejo da água, e a utilização de sistemas de irrigação de baixa eficiência na aplicação de água. Portanto, aprimorar a eficiência da irrigação é uma questão premente para otimizar o uso dos recursos hídricos na agricultura brasileira e enfrentar desafios de escassez e sustentabilidade.

Conforme discutido por Marouelli, Silva e SILVA (2008), a prática comum de realizar irrigações excessivas, especialmente em regiões com abundância de água, resulta na exposição das plantas a condições de deficit hídrico, prejudicando o desempenho das culturas. Essa situação ocorre quando os agricultores aplicam volumes de água que excedem a capacidade de retenção do solo e adotam longos intervalos entre as irrigações. Além de suprir as demandas hídricas das plantas, a água desempenha um papel crucial na solubilização e disponibilização de nutrientes no solo. Além disso, como destacado por Lopes, Marouelli e Filho (2006), cultivos sujeitos a condições de excesso ou escassez de água estão mais suscetíveis a doenças e ataques de pragas. Portanto, é evidente, conforme enfatizado por Marouelli, Silva e SILVA (2008), que a adoção de estratégias apropriadas de manejo de irrigação pode aumentar a produtividade da maioria das culturas em uma faixa de 10% a 30% e, simultaneamente, reduzir o consumo de água em até 30%. Isso ressalta a importância de otimizar as práticas de irrigação para melhorar a eficiência na agricultura.

A adoção de métodos de manejo racional da água na irrigação enfrenta desafios significativos, com a baixa frequência e uma alta resistência por parte dos produtores. Como apontado por Marouelli, Silva e SILVA (2008), a baixa taxa de adesão a essas tecnologias pode ser atribuída à percepção dos produtores de que essas abordagens são dispendiosas, complexas e demandam esforços consideráveis, sem oferecer ganhos econômicos que compensem os investimentos. Essa questão transcende questões puramente técnicas, pois está intrinsecamente relacionada a fatores de ordem econômica e social. Portanto, superar as barreiras à adoção de práticas mais eficientes de gestão da água na agricultura requer uma abordagem holística que leve em consideração não apenas aspectos técnicos, mas também considerações financeiras e sociais para promover a sustentabilidade do setor agrícola brasileiro.

Marouelli *et al.* (2011) destacou que a disponibilidade de tecnologia para os irrigantes ainda se encontra limitada, devido a uma combinação de fatores, que incluem a escassez de informações acessíveis e os custos associados aos equipamentos e instrumentos necessários para a gestão adequada da irrigação. Em muitas regiões onde a agricultura irrigada é praticada, a falta de educação e conhecimento técnico por parte dos irrigantes dificulta a adoção de estratégias mínimas de manejo da água. Além disso, a percepção de que a água é um recurso abundante e de baixo custo contribui para a desconexão entre a prática da irrigação e técnicas bem estabelecidas que têm o potencial de aprimorar a produtividade e otimizar o uso da água.

É evidente que o setor agrícola no Brasil desempenha um papel fundamental ao assegurar alimentos de alta qualidade a preços acessíveis para uma população em constante crescimento e com demandas cada vez mais rigorosas. No entanto, é importante ressaltar que essa conquista notável não teria sido alcançada sem os progressos significativos no campo da tecnologia, como observado por Rodrigues *et al.* (2017).

O aumento da população mundial e o conseqüente crescimento na demanda por alimentos são desafios prementes que a humanidade enfrenta. De acordo com as projeções da *Economic*

e *Affairs* (2022) a população mundial ultrapassará 8,5 bilhões de pessoas até 2030, 9,7 bilhões até 2050 e 10,4 bilhões até 2100, o que inevitavelmente impõe uma pressão crescente sobre os recursos alimentares disponíveis.

No âmbito da oferta de alimentos, a situação é complexa, uma vez que existem restrições significativas à produtividade agrícola. Nesse contexto, um estudo feito por *Saath* (2018) analisou como o aumento da demanda global por alimentos no período de 2012 a 2024 afetaria o Brasil, um dos principais atores no mercado global de alimentos. No estudo fica claro que há apenas uma pequena área legalmente disponível para essa finalidade, indicando que a expansão da agricultura para atender à crescente demanda de alimentos no Brasil deve se basear, principalmente, no aumento da produtividade de culturas.

Embora possa haver poucas terras disponíveis para expansão, o aumento da produtividade e a realocação produtiva se revelam como estratégias viáveis para atender às novas demandas alimentares no Brasil. Pequenos ajustes de produtividade em diferentes regiões do país, juntamente com a otimização da utilização das terras já existentes, podem contribuir de maneira significativa para suprir a crescente necessidade de alimentos. Além disso, a substituição de culturas menos eficientes por aquelas que sejam mais produtivas e sustentáveis, aliada a práticas agrícolas inovadoras, desempenha um papel fundamental na busca por soluções para a segurança alimentar em um mundo em constante expansão. Portanto, é evidente que o Brasil e outras nações produtoras de alimentos terão que adotar abordagens inteligentes e sustentáveis para atender às crescentes demandas da população global por comida nos próximos anos.

2.1.2 Manejo da irrigação

O manejo da água na agricultura é uma peça fundamental para maximizar a produtividade e a qualidade das colheitas. Decisões relacionadas ao momento de irrigar e à quantidade de água a aplicar desempenham um papel crucial. O objetivo é fornecer água em quantidade adequada para atender às necessidades das plantas, evitando estresse hídrico e minimizando o desperdício de recursos hídricos e a lixiviação de nutrientes. Em condições de campo, a umidade do solo desempenha um papel significativo no desenvolvimento das plantas, e a falta de reposição de água pode resultar em alterações fisiológicas prejudiciais, afetando diretamente a produtividade e a qualidade da produção (*MAROUELLI et al., 2011*).

Ainda segundo *Marouelli et al. (2011)*, o solo não é apenas um reservatório de água, mas também de nutrientes e oxigênio, desempenhando um papel essencial na interação entre plantas e microrganismos. A regulação dos níveis de umidade do solo é fundamental para garantir a absorção eficiente de água e nutrientes pelas plantas, bem como para manter a aeração do solo e promover a atividade microbiana, contribuindo para a saúde geral do ecossistema do solo. Portanto, o manejo adequado da água e a manutenção do equilíbrio de umidade no solo desempenham um papel crítico na agricultura, afetando diretamente a produtividade, a qualidade da produção e a sustentabilidade do ambiente agrícola.

O manejo da irrigação compreende diversos métodos, que podem se basear em indicadores relacionados às plantas, ao solo, ao clima ou na combinação desses fatores (CONCEIÇÃO *et al.*, 2016). No entanto, a abordagem que utiliza indicadores relacionados às plantas é menos adotada devido à sua complexidade. Esses métodos exigem calibrações meticulosas, implicam custos elevados e tendem a ser menos sensíveis às variações no teor de umidade do solo, tornando-se, assim, menos confiáveis para determinar o momento ideal para a irrigação (JONES, 2004).

Por outro lado, o manejo da irrigação que leva em consideração o teor de água no solo e a energia retida nele tem sido uma das estratégias mais amplamente empregadas. Diferentemente dos indicadores relacionados às plantas, os indicadores baseados no solo permitem determinar não apenas o momento apropriado para irrigar, mas também a quantidade de água a ser aplicada em cada ciclo de irrigação (CONCEIÇÃO *et al.*, 2016). No entanto, conforme apontado por Jones (2004), esse método pode enfrentar desafios relacionados à variabilidade espacial do solo, à dificuldade de determinar a distância entre as plantas e os dispositivos de monitoramento, bem como à necessidade de calibração, uma vez que a maioria dos sensores não mede diretamente o teor de umidade do solo.

Conforme apontado por Conceição *et al.* (2016), o método de manejo da irrigação mais amplamente adotado é o baseado em indicadores climáticos. Isso se deve à facilidade de obtenção dos dados necessários, que envolvem informações climáticas e a cultura em questão, bem como à simplicidade de execução.

A demanda de água por uma cultura é, em grande parte, influenciada pelas condições climáticas locais. A evapotranspiração, que envolve a conversão da água no solo e sua subsequente liberação na forma de vapor das superfícies evaporantes, como o solo e as plantas, é um processo crítico nesse contexto. A evapotranspiração é afetada por diversos fatores, incluindo a radiação solar, velocidade do vento, temperatura e umidade do ar. Para otimizar o desenvolvimento das culturas, a quantidade de água fornecida por meio da irrigação deve ser ajustada de forma a atender às necessidades de evapotranspiração. Além disso, o manejo da água pode ser necessário para atender a outras finalidades secundárias, como a lixiviação de excesso de sais para além do sistema radicular das plantas, a aplicação de fertilizantes e produtos químicos, a proteção contra geadas, o resfriamento do solo e das plantas, e a promoção da germinação de sementes (MARTIN; GILLEY, 1993).

2.1.3 Balanço Hídrico

A avaliação do balanço hídrico no solo tem como objetivo principal quantificar as diversas entradas e saídas de água no sistema solo-planta, como descrito por Cintra, Libardi e Saad (2000). As principais fontes de entrada de água no sistema incluem a precipitação pluvial e a irrigação, enquanto as saídas de água do sistema solo/planta compreendem a drenagem interna, também conhecida como percolação profunda, a evapotranspiração da cultura, que engloba as perdas de água por evaporação e transpiração, e o deflúvio superficial. Essa análise visa quantificar o

comportamento da água em um volume específico de solo, levando em consideração a presença das raízes da cultura de interesse e o período de tempo avaliado.

O cálculo do balanço hídrico no solo é derivado da análise dos dados referentes à variação de armazenamento de água no perfil do solo, bem como à precipitação pluviométrica, ao volume de água fornecido através de sistemas de irrigação, à drenagem, à ascensão capilar e à evapotranspiração, como relatado em estudos anteriores (SILVA; COELHO; FILHO, 2015; SILVA *et al.*, 2001).

O planejamento hídrico é amplamente reconhecido como o ponto de partida fundamental para a gestão integrada dos recursos hídricos. Nesse contexto, a execução do Balanço Hídrico Climatológico (BHC) em uma determinada região desempenha um papel crucial ao fornecer uma compreensão profunda das demandas e disponibilidade de água no solo ao longo do tempo (SANTOS; HERNANDEZ; ROSSETTI, 2013). É importante observar que a responsabilidade pela atualização do balanço hídrico nacional, tanto para as bacias hidrográficas quanto para os rios em todo o território do país, recai sobre a Agência Nacional de Águas (ANA), conforme evidenciado em pesquisas anteriores (PINHATI; SOUZA; VILLELA, 2017).

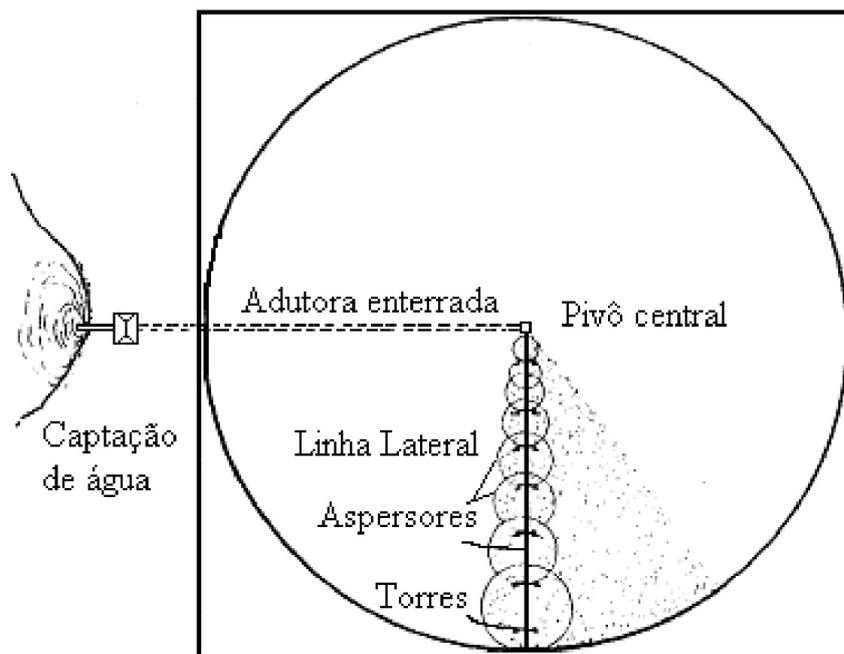
O balanço hídrico, como destacado por Parreira *et al.* (2019), representa um recurso valioso para os agricultores, fornecendo informações essenciais que permitem uma gestão eficaz das culturas. Ele não apenas auxilia na determinação do momento mais adequado para a execução das práticas de manejo da cultura, mas também ajuda na escolha dos sistemas de irrigação ideais para a região em questão. Além disso, desempenha um papel crucial no dimensionamento adequado da lâmina de água a ser aplicada no sistema de irrigação. Assim, o balanço hídrico se revela como uma ferramenta essencial para a otimização da produção agrícola e a utilização eficiente dos recursos hídricos.

Os modelos de balanço hídrico desempenham um papel fundamental ao fornecer as bases necessárias para a avaliação das demandas de irrigação e sua subsequente implementação (PALARETTI; MANTOVANI; SEDIYAMA, 2011). Para calcular o balanço hídrico do solo com base em dados meteorológicos, o método amplamente utilizado é o Penman-Monteith, conforme descrito por Allen *et al.* (1998). Esse método combina a evapotranspiração de referência (ET_o) com o coeficiente de cultura (K_c) para calcular a evapotranspiração da cultura (ET_c). Uma abordagem mais avançada, conhecida como método do K_c dual, foi desenvolvida para proporcionar uma estimativa diária mais assertivas da ET_c. Nesse método, o coeficiente basal da cultura (K_{cb}) é combinado com o coeficiente de evaporação do solo (K_e). Essa abordagem permite uma clara distinção entre a evaporação da água do solo e a transpiração da planta, resultando em estimativas mais precisas e confiáveis.

2.1.4 O sistema de Irrigação Pivô Central

O pivô central é caracterizado por uma única linha lateral equipada com diversos aspersores, que realizam rotações em torno do centro de um círculo, conhecido como pivô, conforme representado na Figura 2.2. Sustentado por treliças e mantido a uma altura específica por torres de sustentação interligadas por juntas flexíveis, esse sistema é dotado de motores elétricos em cada torre, permitindo o acionamento independente. Essa característica confere flexibilidade ao sistema, assegurando o alinhamento preciso da linha lateral, essencial para abranger uma área circular crescente. O suprimento de água ocorre pelo ponto pivô, requerendo uma adutora enterrada para condução até o centro ou a posição da fonte de água diretamente no centro da área irrigada. A capacidade do pivô central pode atingir mais de 120 hectares, entretanto a recomendação é manter a área ideal entre 50 a 70 hectares, mesmo com o custo por unidade de área diminuindo com o aumento da extensão (ANDRADE; BRITO, 2006; BERNARDO *et al.*, 2006; TESTEZLAF, 2017).

Figura 2.2 – Esquema pivô central. Fonte: Bernardo *et al.* (2006).



O conjunto motobomba é composto por uma bomba centrífuga e um motor acionador. Sua função é realizar a captação da água por sucção e impulsioná-la sob pressão até os aspersores, garantindo que alcancem a pressão ideal para um desempenho eficiente. Para assegurar o funcionamento correto de todo o sistema de irrigação, é essencial dimensionar esses conjuntos motobomba, considerando a combinação ideal de rotação entre o motor e a bomba. Essa abordagem, conforme mencionada por Testezlaf (2017), visa proporcionar a vazão e pressão corretas, contribuindo assim para a otimização do processo de irrigação.

O sistema de irrigação é um conjunto de tubulações com diferentes funções, podendo ser dividido em adutora, ramal e linha lateral, dependendo de sua finalidade. A adutora, geralmente a

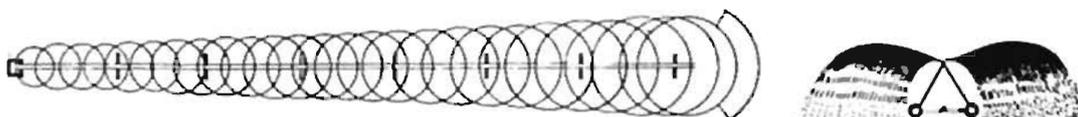
tubulação de maior diâmetro, desempenha o papel de transportar a água do conjunto motobomba até o ponto pivô da área destinada à irrigação, garantindo o abastecimento a todos os emissores. Os ramais, por sua vez, são responsáveis por direcionar a água para os diversos setores a serem irrigados. Por fim a linha lateral é a tubulação que abriga os emissores, como aspersores, gotejadores ou microaspersores, sendo notável por possuir vazão variável (MEDEIROS, 2010).

A vazão da linha lateral do pivô, geralmente feita de tubulação de aço galvanizado, diminui gradativamente à medida que se distancia do centro do pivô-central, sendo influenciada tanto pela distância do aspersor em relação ao ponto pivô quanto pelo comprimento do raio irrigado (SILVA; AZEVEDO, 1998). Quanto ao diâmetro da linha lateral, pode-se adotar um único diâmetro ao longo de toda a extensão ou optar por diâmetros distintos associados em série, sendo esta última configuração mais comum em equipamentos de maior porte, visando minimizar as perdas de água do sistema de irrigação (CARVALHO; OLIVEIRA, 2008).

A operação circular do pivô central demanda uma distribuição equitativa da água, ajustando a vazão dos emissores de forma proporcional conforme a distância ao centro aumenta, o que garante uma aplicação uniforme da lâmina de água em toda a área. Nesse processo, a água é distribuída ao solo com uma baixa precipitação nas proximidades do ponto pivô, elevando-se de maneira progressiva à medida que se aproxima da extremidade do anel circular. Destacam-se três principais arranjos de aspersores mostrados na Figura 2.3 (TESTEZLAF, 2017).

Figura 2.3 – Principais arranjos de aspersores. Fonte: Marchetti (1983).

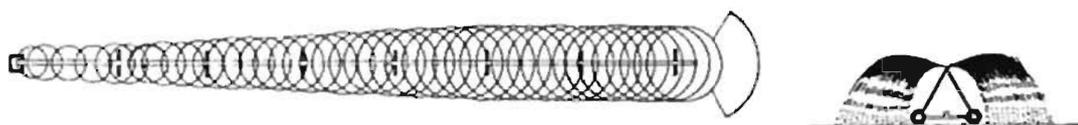
(a) Sistema com espaçamento constante e vazão variada.



(b) Sistema com espaçamento variado e vazão constante.



(c) Sistema combinado.



- **Sistema com espaçamento constante e vazão variada:** Nesse arranjo, os aspersores são espaçados de forma uniforme ao longo da linha lateral, enquanto os diâmetros dos bocais aumentam gradualmente em direção à extremidade externa do pivô (Figura 2.3a).

- **Sistema com espaçamento variado e vazão constante:** Aqui, os aspersores, geralmente de baixa ou média pressão, são instalados com redução progressiva do espaçamento entre eles, partindo do centro do pivô em direção à borda externa (Figura 2.3b).
- **Sistema combinado:** Este sistema incorpora elementos dos dois anteriores. Os aspersores, normalmente de baixa pressão, podem ter espaçamento uniforme ou variável ao longo da tubulação, com um aumento gradual nos diâmetros dos bocais em direção à extremidade externa (Figura 2.3c).

A eficiência do deslocamento da linha lateral de um pivô-central é determinada pela gestão da velocidade na última torre, controlada por um temporizador na caixa de comando central. Esse temporizador regula o tempo de acionamento e parada do motor da última torre, expressando-os em percentagens da máxima velocidade. Quando o tempo de parada é igual ao tempo de movimento, a regulação corresponde a 50% da velocidade máxima estabelecida pelo percentímetro do temporizador. A 100% de velocidade, o motor da última torre permanece em movimento constante. Com base nessas informações e nas características construtivas do pivô central, torna-se viável calcular a velocidade da linha lateral e, conseqüentemente, estimar o tempo necessário para que o pivô-central complete um giro. Além disso, por meio do controle de velocidade e da lâmina de água, é possível determinar e gerenciar os diversos volumes de água que serão aplicados ao solo (SILVA; AZEVEDO, 1998).

2.1.5 O modelo AquaCrop

Nos últimos anos, os modelos de cultura ou modelos de produtividade agrícola (MPA's) tornaram-se fundamentais na previsão da produtividade agrícola, proporcionando uma visão simplificada das respostas das culturas às variáveis ambientais. Desde a década de 1950, esses modelos têm evoluído para se tornarem peças-chave em programas de monitoramento agrícola em todo o mundo, contribuindo significativamente para avaliações do potencial de produção em diferentes condições meteorológicas e enfocando a segurança alimentar (BAIER, 1979; MARTINS *et al.*, 2015).

O AquaCrop, um software desenvolvido pela Food and Agriculture Organization (FAO), foi concebido como uma ferramenta abrangente e precisa, visando auxiliar consultores, gestores de recursos hídricos, agrônomos e gerentes de fazenda na formulação de estratégias para aumentar a produtividade agrícola, tanto em sistemas de sequeiro quanto irrigados (RAES *et al.*, 2009). O modelo foi construído a partir do estudo e simplificação das complexas relações que regem os processos e fluxos de massa e energia no sistema solo-planta-atmosfera. Sua principal vantagem reside na necessidade de um menor número de variáveis, facilitando significativamente sua aplicação (RAES *et al.*, 2009; STEDUTO *et al.*, 2009).

O AquaCrop opera estimando a produtividade a partir da biomassa produzida pela planta, utilizando um fator de conversão denominado “índice de colheita”. Essa biomassa é derivada da

transpiração real da cultura, combinada com um parâmetro de produção por área e a demanda hídrica, conhecida como “parâmetro de produção por água” (VANUYTRECHT *et al.*, 2014).

Os dados de entrada no modelo incluem fatores de cultura, informações climáticas, características do solo e práticas de manejo. Com esses dados, o modelo gera arquivos que fornecem informações cruciais sobre o crescimento e produtividade da cultura, balanço e conteúdo de água no solo, demanda evaporativa, concentração de dióxido de carbono e recomendações de irrigação (RAES *et al.*, 2009).

O estudo realizado por Piekarski *et al.* (2016) destacou a eficácia do AquaCrop na simulação da produtividade da soja em diferentes municípios, alcançando aproximadamente 92% de desempenho satisfatório em experimentos conduzidos em diferentes tipos de solo. O modelo mostrou-se particularmente eficiente em solos do tipo Latossolo Vermelho distrófico típico, de textura argilo-arenosa.

Já o estudo conduzido por Pinheiro *et al.* (2022) evidencia a eficácia do modelo AquaCrop na predição da produção de forrageiras e arranjos produtivos para o semiárido brasileiro. Os resultados obtidos proporcionam uma base sólida para a indicação de arranjos produtivos mais eficientes e contribuem significativamente para o desenvolvimento do calendário agrícola, planejamento e tomada de decisões. Adicionalmente, o trabalho de Conceição *et al.* (2016) corrobora a confiabilidade do modelo AquaCrop, classificando seu desempenho de “bom” a “excelente” em suas aplicações.

2.2 Trabalhos Relacionados

A seguir são apresentadas contribuições relevantes de pesquisas anteriores. Ao fazer isso, o propósito é estabelecer um terreno sólido para a justificação e a originalidade do presente trabalho, bem como identificar as principais tendências, controvérsias e lacunas existentes na literatura.

2.2.1 Dimensionamento de Sistemas de Irrigação Pivô Central

O estudo conduzido por Medeiros (2010) concentrou-se na otimização de sistemas de irrigação pivô central, abordando uma ampla gama de variáveis a fim de aprimorar sua eficiência energética e econômica. Os pesquisadores examinaram combinações de tubulações para adutora e linha lateral, selecionaram conjuntos motobomba mais eficientes, compararam motores padrão e de alto rendimento e exploraram o uso de inversores de frequência. Dois sistemas de irrigação pivô central foram otimizados: um sistema existente e um novo projeto planejado para atender a uma lâmina d’água específica. A análise econômica abordou várias variáveis, incluindo o diâmetro das tubulações, a rotação do conjunto motobomba, o uso de motores eficientes e inversores de frequência. Os resultados indicaram uma economia substancial de energia elétrica, chegando a 25% com a escolha do diâmetro econômico para ambos os sistemas. A incorporação de inversores

de frequência gerou economias de 9,23% e 10,6% para o sistema existente e o novo sistema de irrigação pivô central, respectivamente. A análise do retorno do investimento demonstrou viabilidade, principalmente a longo prazo, com taxas de retorno anual de 6,52% para o sistema existente e 9,48% para o novo sistema. Contudo, em um contexto de taxa básica de juros de 12,25% ao ano, a atratividade do investimento se torna mais evidente a longo prazo. Esses resultados destacam um considerável potencial de economia de energia elétrica e reforçam a viabilidade econômica do investimento em sistemas de irrigação pivô central mais eficientes. O cálculo simplificado utilizado na pesquisa torna mais acessível e eficiente a avaliação do potencial de economia de energia elétrica nesses sistemas.

2.2.2 Rotatividade de Culturas

A otimização também desempenha um papel importante na decisão de quais culturas plantar e quando fazê-lo. A rotação de culturas é essencial para manter a fertilidade do solo e prevenir a erosão, mas a seleção adequada de culturas e o planejamento de seu ciclo de crescimento são tarefas complexas. A otimização pode ajudar os agricultores a tomar decisões informadas, levando em consideração fatores como o uso eficiente da água, a demanda de nutrientes e a maximização dos rendimentos.

O estudo de Brito *et al.* (2018) concentrou-se na otimização do uso da água para irrigação, visando aumentar a produtividade agrícola de forma sustentável ao maximizar o lucro e minimizar o consumo de água nas culturas. Utilizado Programação Linear, especificamente a metodologia SIMPLEX, a pesquisa avaliou a irrigação em uma propriedade com outorga no reservatório de Araçagi, Paraíba, Brasil. Os resultados destacaram que a mudança estratégica para o cultivo de abacaxi em uma área de 2,074 hectares e cana-de-açúcar em 1,926 hectares, ao invés de culturas tradicionalmente cultivadas pelo produtor como milho, feijão e batata-doce, poderia gerar um lucro anual máximo de R\$ 199.091,70. A abordagem otimizada de irrigação resultou em uma significativa economia de 70,78% no consumo de água, representando 72.881,17m³ do volume de água outorgado. Além disso, a disponibilidade hídrica excedeu a demanda, sugerindo oportunidades para expandir a produção ou reduzir o fornecimento de água. Os resultados sublinharam a importância da gestão eficiente dos recursos hídricos na agricultura e a necessidade de uma avaliação cuidadosa do processo de outorga para garantir a segurança hídrica futura.

A pesquisa realizada por Santos *et al.* (2009) teve como objetivo a aplicação de um modelo de programação linear com o intuito de aprimorar o uso da água no Projeto de Irrigação Baixo Acaraú, localizado no estado do Ceará. O enfoque deste modelo consistiu em propor alternativas às culturas estabelecidas e às áreas de cultivo de 8,0 hectares. O principal critério de otimização foi a maximização da renda líquida dos pequenos produtores, considerando as restrições impostas pela disponibilidade de água, terra e mercado. As conclusões obtidas a partir das análises realizadas revelam que a disponibilidade de água estimada para o projeto não se mostrou limitante para a utilização da terra na maioria dos planos de cultivo examinados, com

exceção de situações em que a restrição de água atingia 60% da disponibilidade. Além disso, a combinação de cultivos que incluiu gravioleira e meloeiro se destacou como a mais lucrativa, com uma renda líquida de R\$5.250,00 por hectare por ano, com cada cultura ocupando metade da área do lote. Por fim, a substituição do cultivo de gravioleira resultou em uma redução anual de 5,87% na renda líquida, enquanto a substituição de ambos gravioleira e meloeiro acarretou uma redução mais significativa, de 33,8%. Estas descobertas têm implicações importantes para a gestão eficiente dos recursos hídricos e a tomada de decisões no Projeto de Irrigação Baixo Acaraú.

2.2.3 Distribuição de Recursos Hídricos

A otimização desempenha um papel fundamental na alocação de recursos hídricos. Com a escassez de água sendo uma preocupação crescente, a distribuição eficiente dos recursos hídricos disponíveis é crucial.

O trabalho elaborado por Pilar (1998) tem como foco principal a formulação, desenvolvimento e aplicação de modelos de planejamento de sistemas de recursos hídricos, com um enfoque específico na bacia do rio Paracatu, um afluente do rio São Francisco, onde questões de grande importância prática se manifestam. Dentro desse contexto, além da necessidade de expandir a irrigação, há a demanda por atender às necessidades da população, garantir suprimento de água para o gado e manter uma vazão ecológica constante no rio. Adicionalmente, o estudo explora a otimização das decisões relacionadas à operação das áreas de irrigação já existentes. Para abordar esses desafios complexos, a metodologia da programação linear foi adotada como ferramenta de planejamento, sendo aplicada tanto em cenários determinísticos quanto diante de um "futuro desconhecido". Os modelos desenvolvidos foram implementados e otimizados para um horizonte de análise de 30 anos, considerando a longa escala de tempo necessária para projetos desse porte. Diferentes períodos de análise dentro de uma série de 55 anos de dados disponíveis foram contemplados. Os valores de uso consuntivo de água foram cuidadosamente estabelecidos em 60% para irrigação, 100% para dessedentação do gado e 20% para atender às demandas da população. Segundo o autor os resultados destacam a eficácia e eficiência da programação linear na resolução de problemas desse porte, consolidando-a como uma ferramenta valiosa para fornecer alternativas sólidas e embasadas para os tomadores de decisões envolvidos na gestão de recursos hídricos.

Paz *et al.* (2002) aborda a análise da redução da receita líquida decorrente de práticas ineficientes de irrigação, com foco na influência da uniformidade na distribuição de água na determinação da lâmina ideal para otimização econômica da receita. Além disso, buscou antecipar estratégias de operação otimizada para sistemas de irrigação por aspersão. Os resultados demonstraram que a lâmina de água ótima para a maximização da receita líquida cresce à medida que o valor do produto irrigado aumenta. Maiores lâminas estão associadas a custos mais baixos da água, o que reduz a quantidade necessária para otimizar a receita líquida, especialmente em

regiões onde o custo da água é elevado. O estudo também evidenciou que, em culturas de alto valor econômico, a lâmina ótima econômica de irrigação é menos sensível às variações nos custos da água. A minimização das perdas econômicas, visando à maximização da receita líquida, está fortemente relacionada à uniformidade na distribuição de água, ao preço do produto agrícola e aos custos associados à irrigação. Sistemas de irrigação que não asseguram uma distribuição uniforme da água não são a escolha mais adequada quando se almeja o máximo retorno econômico. A operação eficiente dos sistemas de irrigação, baseada em estratégias de otimização econômica para a maximização da receita líquida, desempenha um papel fundamental na obtenção de níveis adequados de eficiência na aplicação de água, armazenamento eficaz e na correta irrigação das áreas cultivadas. A uniformidade da distribuição de água, o custo da água e o valor dos produtos cultivados emergem como fatores críticos na otimização de sistemas de irrigação, sobretudo quando o objetivo primordial é maximizar a receita líquida, ao mesmo tempo em que se busca a preservação dos recursos hídricos.

No artigo de [Carvalho *et al.* \(2009\)](#), é apresentado o modelo IrrigaLS, desenvolvido com o objetivo de analisar a alocação de água para irrigação. Esse modelo incorpora variáveis de decisão relacionadas aos volumes de água armazenados no solo e em reservatórios superficiais, utilizando uma abordagem de rede de fluxo para avaliar a alocação hídrica. O IrrigaLS faz parte da plataforma AcquaNet, que é um sistema de suporte à decisão para recursos hídricos. Os resultados das avaliações indicam que o IrrigaLS é uma ferramenta eficaz na simulação de sistemas complexos de recursos hídricos, especialmente em cenários com múltiplos usos da água. Ele é capaz de calcular com precisão as necessidades hídricas das culturas e garantir o fornecimento mínimo de água para as plantações, especialmente durante períodos de seca. O programa incorpora a precipitação no balanço hídrico do solo e permite a variação dos volumes-alvo para armazenamento de água no solo, considerando a sensibilidade das culturas ao déficit hídrico. Essa abordagem integrada, que considera as interações entre água, solo, clima e planta, contribui para uma melhor eficiência no uso da água e uma estimativa mais precisa da produção agrícola.

O estudo proposto por [Figueiredo *et al.* \(2007\)](#) aborda um dos desafios cruciais no cultivo do feijão no Brasil, que é a gestão eficiente da água devido à notória sensibilidade da cultura ao déficit hídrico e ao excesso de água. O foco da pesquisa foi a identificação da quantidade ótima de água a ser aplicada na irrigação do feijão, considerando diferentes cenários que combinam a receita líquida esperada com o nível de risco associado. Os resultados obtidos permitiram a construção de um gráfico que revelou uma relação complexa entre a lâmina d'água aplicada e a receita líquida esperada, bem como o risco envolvido. Observou-se que, à medida que a lâmina de água aumenta durante o ciclo da cultura, tanto a receita líquida esperada quanto o risco também aumentam, atingindo um ponto de máximo em torno de 580 mm de água aplicada. A partir desse ponto, tanto a receita quanto o risco começam a declinar. Portanto, esse estudo oferece valiosas orientações aos produtores, permitindo-lhes tomar decisões informadas sobre a quantidade de água a ser utilizada na irrigação do feijão, com base em considerações de produtividade, receita

líquida e risco, possibilitando uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos e maximizando o retorno econômico da cultura.

A aplicação eficaz da otimização na agricultura irrigada tem enfrentado diversos desafios. Além das características únicas de cada propriedade agrícola, a abordagem convencional de otimização baseada em blocos de tempo tem demonstrado limitações substanciais. Estabelecer o quanto irrigar mensalmente, por exemplo, não proporciona orientações práticas diárias para os agricultores, que necessitam de informações mais precisas e contextualizadas. A falta de sincronia entre os resultados da pesquisa acadêmica e a realidade da prática agrícola torna essencial a busca por abordagens mais realistas e personalizadas, que considerem as necessidades individuais das culturas e das fazendas, bem como a conscientização dos agricultores sobre os benefícios tangíveis da otimização em suas operações diárias.

3 Problema da Irrigação

Para garantir uma irrigação eficiente, é necessário coletar e considerar um grande conjunto de dados relacionados à cultura, clima, solo e custos operacionais ao longo de todo o ciclo da cultura. Essas informações são essenciais para o planejamento da irrigação, assegurando que as plantas recebam os nutrientes necessários para seu desenvolvimento saudável.

A seguir, são apresentados os principais parâmetros utilizados no manejo da irrigação.

3.1 Cultura

Os dados da cultura fornecem as bases para entender as necessidades hídricas específicas de cada planta e permitir que a irrigação seja ajustada conforme as fases de desenvolvimento e as características da cultura.

3.1.1 Evapotranspiração de referência

A evapotranspiração de referência (ET_o) é a quantidade de água transferida para a atmosfera por meio de evaporação e transpiração em condições ideais, ou seja, quando o solo possui água suficiente e uma cultura rasteira está em pleno desenvolvimento. O método recomendado pela FAO para seu cálculo é o de Penman-Monteith (ALLEN *et al.*, 1998), que considera diversos fatores como a radiação solar, temperatura, umidade e vento, aproximando-se dos resultados obtidos por lisímetros, instrumentos que medem diretamente a evapotranspiração. A formulação deste método, detalhada no Boletim 56 da FAO (1998), utiliza a seguinte equação para o cálculo da ET_o :

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \left(\frac{900}{T+273} \right) u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (3.1)$$

onde:

- ET_o – evapotranspiração de referência (mm dia^{-1});
- R_n – radiação líquida na superfície das culturas ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$);
- G – fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$);
- T – temperatura média diária do ar a 2 m de altura ($^{\circ}\text{C}$);
- u_2 – velocidade do vento a 2 m de altura (m s^{-1});
- e_s – pressão de saturação de vapor (kPa);

- e_a – pressão de vapor atual (kPa);
- $(e_s - e_a)$ – déficit de saturação de vapor (kPa);
- Δ – inclinação da curva da pressão de vapor versus temperatura (kPa °C⁻¹);
- γ – constante psicrométrica (kPa °C⁻¹).

Calcular a ET_o usando o método de Penman-Monteith é um processo que leva em conta várias variáveis climáticas. Essas variáveis estão interligadas, o que significa que uma mudança em uma delas pode afetar as demais. Por exemplo, se a temperatura sobe, a taxa de evaporação também tende a aumentar. No entanto, esse aumento pode ser influenciado pela umidade do ar e pela velocidade do vento.

A precisão do cálculo da ET_o depende da qualidade e disponibilidade dos dados climáticos. Em muitas áreas, pode ser difícil coletar essas informações, e a falta de dados pode levar a estimativas imprecisas. Além disso, confiar apenas em dados históricos pode ser problemático, especialmente em regiões onde o clima muda rapidamente.

O método Penman-Monteith envolve equações complexas que podem ser desafiadoras de aplicar sem o auxílio de software ou ferramentas de cálculo. Também é necessário realizar esses cálculos regularmente, como diariamente ou mensalmente, para acompanhar a ET_o ao longo do tempo. Isso pode complicar ainda mais o processo, especialmente em regiões com climas variados.

3.1.2 Evapotranspiração da Cultura

A Evapotranspiração da Cultura (ET_c) representa a quantidade total de água utilizada pela cultura, resultante dos processos de evaporação e transpiração ao longo de um determinado período. A ET_c é calculada multiplicando a evapotranspiração de referência (ET_o) por um coeficiente específico da cultura (K_c), que varia conforme o tipo de cultura, sua fase fenológica e a condição hídrica. De forma simplificada, a equação que expressa a ET_c é dada por:

$$ET_c = ET_o \times K_c \quad (3.2)$$

onde:

- ET_c – evapotranspiração da cultura (mm d⁻¹),
- ET_o – evapotranspiração de referência (mm d⁻¹),
- K_c – coeficiente da cultura.

3.1.3 Ciclo de Crescimento da Cultura

O Ciclo (C) da cultura corresponde ao intervalo, em dias, que abrange todo o ciclo de vida da cultura, desde a sementeira até a colheita. Isso influencia o planejamento da irrigação ao longo da estação de crescimento.

3.1.4 Fases Fenológicas da Cultura

As diferentes etapas de desenvolvimento da planta, como germinação, crescimento vegetativo, floração, frutificação e maturação. Cada fase tem uma demanda hídrica específica e a irrigação deve ser ajustada para atender às necessidades de cada etapa.

3.1.5 Profundidade efetiva do sistema radicular

A Profundidade efetiva do sistema radicular (Z_r) representa a profundidade máxima do solo onde se concentra a maior parte do sistema radicular ativo de uma planta. Geralmente, considera-se que cerca de 70% a 90% das raízes ativas estão dentro dessa profundidade. Embora algumas raízes possam se estender além de Z_r , sua contribuição para a absorção de água e nutrientes é menor.

À medida que a planta cresce, a Z_r também aumenta. Durante os estádios iniciais de crescimento, as raízes são mais rasas, enquanto em estádios mais avançados, as raízes tendem a explorar camadas mais profundas do solo.

3.1.6 Fração de água disponível

A fração de água disponível (f) é expressa como uma porcentagem (%) da água disponível no solo entre a umidade na capacidade de campo (U_{cc}) e a umidade no ponto de murcha permanente (U_{pmp}), que as plantas podem utilizar de maneira eficiente em cada fase fenológica da cultura. Essa fração indica a quantidade de água no solo que pode ser extraída pelas plantas antes que a transpiração seja limitada pela falta de água, levando a um início de estresse hídrico.

3.2 Solo

Na irrigação, os dados relacionados ao solo influenciam a retenção de água e a eficiência do sistema radicular em absorver nutrientes.

3.2.1 Umidade na Capacidade de Campo

A umidade do solo na capacidade de campo (U_{cc}) refere-se à quantidade máxima de água que o solo pode reter após o excesso de água ser drenado por gravidade. Indica o ponto em que o

solo contém a quantidade máxima de água disponível para as plantas, sem que haja água livre que possa ser drenada.

3.2.2 Umidade no Ponto de Murcha Permanente

O ponto de murcha permanente (U_{pmp}) é a quantidade mínima de água no solo em que as plantas ainda conseguem absorvê-la. Abaixo desse ponto as plantas não conseguem mais extrair água suficiente para manter seu turgor, resultando na murcha. Nesse estado, a tensão com que a água está retida no solo é tão alta que as raízes das plantas não conseguem absorvê-la, mesmo que ainda haja umidade residual no solo. Se o solo permanecer nesse estado por um período prolongado, a planta pode sofrer danos irreversíveis.

3.2.3 Densidade do solo

A densidade do solo (d_g) é outro fator importante a ser considerado na irrigação, pois ela influencia diretamente a capacidade do solo de armazenar água e a facilidade com que as raízes das plantas podem penetrar o solo.

3.3 Custo elétrico

Em grandes sistemas como o pivô central, é importante considerar os custos associados ao consumo de energia elétrica, que podem variar significativamente dependendo do horário em que a irrigação é realizada. Para otimizar esses custos, é importante compreender os conceitos de horário de ponta, horário fora de ponta e horário reservado, e como eles impactam os custos operacionais da irrigação.

3.3.1 Horário de Ponta

O horário de ponta (h_p) é o período do dia em que a demanda por energia elétrica é mais alta. Geralmente, esse período ocorre no início da noite, quando as pessoas estão em casa e o consumo de energia aumenta significativamente. Em muitos locais, o horário de ponta dura cerca de 3 horas por dia, geralmente entre 18h e 21h, mas esse período pode variar dependendo da concessionária de energia e da região. Durante o horário de ponta, a tarifa de energia elétrica é significativamente mais alta. Isso se deve ao maior custo de geração e distribuição de energia nesse período, causado pela alta demanda. Por essa razão, operar sistemas de irrigação durante o horário de ponta pode inviável e é geralmente evitado pelos agricultores.

Devido ao alto custo associado ao consumo de energia elétrica durante o horário de ponta, os pivôs centrais são geralmente projetados para operar por no máximo 21 horas por dia. Esse planejamento permite que o funcionamento seja interrompido durante o horário de ponta, quando as tarifas são mais altas.

3.3.2 Horário Fora de Ponta

O horário fora de ponta (h_{fp}) abrange todos os períodos do dia em que a demanda por energia elétrica é mais baixa, excluindo o horário de ponta, o que inclui a maior parte do dia e da noite. Esse período abrange as horas que não fazem parte do período de ponta, o que geralmente significa a madrugada, a manhã, a tarde e parte da noite. A tarifa de energia elétrica é mais baixa nesse horário, pois a demanda por energia é menor, tornando a operação de sistemas de irrigação mais econômica. Por isso, os agricultores costumam programar a irrigação para ocorrer predominantemente nesse período.

3.3.3 Horário Reservado

O horário reservado (h_r) é um período específico, previamente negociado com a concessionária de energia, no qual o consumidor tem uma reserva de capacidade de energia elétrica garantida para suas operações, como a irrigação. Geralmente, esse período dura cerca de 8 horas e se inicia logo após o término do horário de ponta. É uma opção para grandes consumidores de energia, como os que utilizam pivôs centrais, que precisam de uma demanda constante e previsível de eletricidade. A tarifa aplicada no horário reservado pode ser diferente das tarifas de ponta e fora de ponta, e depende do contrato estabelecido. Em geral, essa tarifa é projetada para ser mais competitiva, especialmente se a demanda do consumidor for significativa e constante

3.4 Balanço hídrico sequencial

O balanço hídrico sequencial é utilizado para monitorar e calcular o armazenamento e o movimento da água no solo ao longo do tempo, com base em entradas e saídas de água, visando determinar o estado hídrico do solo de forma contínua, considerando os fatores como precipitação, evapotranspiração, irrigação e todas as variáveis que afetam a disponibilidade de água no solo.

O balanço hídrico sequencial é realizado diariamente ou em intervalos regulares, acumulando os efeitos de entradas e saídas de água ao longo de um período. A sequência desses cálculos permite ajustar a irrigação ou prever períodos de déficit ou excesso de água.

3.4.1 Precipitação

Precipitação (P) é a quantidade de água que cai sobre uma área geográfica. Ela é geralmente medida em milímetros (mm) e indica o volume de água que se acumularia em uma superfície plana e horizontal por unidade de área durante um determinado período, como um dia, mês ou ano. Dessa forma, se a precipitação em um dia for de 10 mm, isso significa que a camada de água formada sobre uma superfície plana teria 10 mm de altura.

3.4.2 Capacidade de água disponível no solo

A Capacidade de Água Disponível (CAD) do solo é a quantidade total de água disponível que o solo consegue reter até uma profundidade. Essa profundidade corresponde ao sistema radicular efetivo (camada de solo onde se concentram a maioria das raízes absorventes). Por esse motivo, se as raízes crescem conseqüentemente a CAD aumenta também. Assim a CAD representa o intervalo de umidade disponível para as raízes das plantas. A CAD pode ser calculada a partir da seguinte equação:

$$CAD = \left(\frac{U_{cc} - U_{pmp}}{100} \right) \times dg \times Z_r \quad (3.3)$$

onde:

- CAD – capacidade de água disponível no solo (mm);
- U_{cc} – umidade do solo na capacidade de campo (%);
- U_{pmp} – umidade do solo no ponto de murcha permanente (%);
- dg – densidade do solo (g cm^{-3});
- Z_r – profundidade específica do sistema radicular (mm).

3.4.3 Água facilmente disponível

A fração de água no solo que pode ser retirada facilmente pelas raízes é chamada de Água Facilmente Disponível (AFD). Quando a AFD se esgota, a planta necessita realizar um maior esforço para conseguir extrair água, gerando um estresse. Como a AFD é uma fração da CAD, ela irá aumentar conforme a CAD aumenta. A equação que expressa a AFD é dada por:

$$AFD = CAD \times f \quad (3.4)$$

onde:

- AFD – água facilmente disponível (mm);
- CAD – capacidade de água disponível no solo (mm);
- f – fração de água disponível da cultura.

3.4.4 Umidade Crítica

Quando a água facilmente disponível se esgota atinge-se a Umidade Crítica (θ_{crit}), que é o limite que deve-se iniciar as irrigações sem que as plantas passem por um estresse hídrico. Portanto, para se obter economia de água o ideal é sempre realizar a reposição de água no solo antes que a AFD se esgote. A Umidade Crítica pode ser calculada pela equação:

$$\theta_{crit} = CAD - AFD \quad (3.5)$$

3.4.5 Água disponível inicial e Água disponível final

Após o levantamento das informações e a determinação dos parâmetros ET_o , ET_c , CAD, AFD e θ_{crit} é necessário definir a Água Disponível inicial (AD_i) e a Água Disponível final (AD_f). A AD_i corresponde ao valor da água disponível ao final do período anterior (AD_{fa}) ou à CAD para o primeiro dia do ciclo, e, portanto, não deve exceder o valor máximo da CAD, obtido conforme a Equação 3.3. Por sua vez, a AD_f é calculada utilizando a Equação 3.6, dada por:

$$AD_f = AD_i + (P + I - ET_c) \quad (3.6)$$

em que:

- AD_f – água disponível final no período (mm);
- AD_i – água disponível inicial no período (mm);
- P – precipitação no período (mm);
- I – irrigação do período (mm); e
- ET_c – evapotranspiração da cultura no período (mm).

3.4.6 Irrigação

Irrigação (I) é o processo de fornecimento artificial de água às plantas para promover seu crescimento e desenvolvimento. Para assegurar uma irrigação eficaz, é essencial evitar que a umidade do solo correspondente à Água Disponível Final (AD_f) se aproxime ou atinja a umidade crítica, que indica uma condição crítica de escassez de água. Sempre que a umidade do solo atingir esse nível crítico, é necessário realizar uma irrigação para restaurar a umidade adequada.

Entretanto há ainda inúmeros desafios, tanto técnicos quanto econômicos e ambientais, ao se definir a irrigação para uma cultura. Dentre eles, a coleta e análise de um grande volume de dados sobre clima, solo, cultura e custos operacionais são, muitas das vezes, complexas e de difícil acesso. A variação espacial e temporal dessas informações exige um planejamento

detalhado para ajustar as quantidades de água de acordo com as necessidades hídricas específicas das plantas e as condições meteorológicas. Além disso, o consumo de energia elétrica para o funcionamento de sistemas de irrigação, como os pivôs centrais, impõe desafios adicionais, uma vez que o custo da energia pode variar significativamente durante o dia.

Outro desafio enfrentado na irrigação é a incerteza associada ao balanço hídrico sequencial, mesmo após a coleta e análise detalhada dos dados. Fatores como a variação climática tornam o cálculo do balanço hídrico menos preciso do que o ideal. Embora o balanço hídrico sequencial forneça uma estimativa útil da disponibilidade de água no solo e das necessidades da cultura, ele não consegue captar todas as variações dinâmicas que ocorrem no campo. Dessa forma, a decisão final sobre a lâmina de irrigação a ser aplicada ainda depende da experiência do irrigante, que deve ajustar a irrigação em tempo real com base nas condições observadas. O balanço hídrico, portanto, funciona como uma ferramenta de apoio à tomada de decisão, mas não substitui a necessidade de monitoramento contínuo e ajustes manuais.

4 Metodologia

A metodologia adotada para este trabalho compreende diversas etapas fundamentais. Inicialmente, foi feita a definição do problema, onde foram levantados os objetivos, métricas de sucesso, restrições e recursos disponíveis. Em seguida, foram coletados, analisados e processados os dados necessários para a construção do modelo matemático. A partir daí, o problema foi formulado em termos matemáticos, definindo-se as variáveis e o tipo de modelo matemático para a resolução utilizando o IBM CPLEX.

O IBM CPLEX Studio IDE é um ambiente integrado de desenvolvimento projetado para a modelagem e resolução de problemas de otimização complexos, como programação linear, programação inteira, programação inteira mista (MIP), programação por restrições e otimização quadrática. Esse ambiente facilita a construção eficiente de modelos matemáticos, com suporte a linguagens como OPL (Optimization Programming Language) e Python, além de oferecer integração com bibliotecas de análise de dados. Amplamente utilizado em setores que demandam soluções de otimização, como logística, finanças, manufatura e agricultura, o CPLEX se destaca pela eficiência em resolver problemas em grande escala, contribuindo para a maximização da performance e a minimização de custos operacionais, por exemplo.

Durante a construção deste trabalho, foram identificadas várias dificuldades, como o grande volume de dados e equações necessários para montar um balanço hídrico sequencial, além de desafios na coleta de dados meteorológicos, que podem ser adquiridos por meio de aplicativos, softwares ou estações meteorológicas, públicas ou privadas.

A fim de ajustar os parâmetros de irrigação, além das configurações do sistema, foram levados em consideração dados meteorológicos, informações diárias de chuva, condições climáticas locais, dados da cultura escolhida e informações sobre o solo na formulação matemática do problema. Assim foi possível desenvolver um modelo que leva em consideração os dados coletados e os objetivos estabelecidos para determinar a lâmina de água ideal e o horário de funcionamento diário de cada pivô, contribuindo para uma gestão eficiente e sustentável da irrigação e buscando uma redução no custo energético necessário para realizar a irrigação da cultura.

O resultado obtido foi avaliado através do modelo AquaCrop, utilizado para mensurar a produtividade das culturas em condições de irrigação variadas. O estudo analisará o *tradeoff* entre o nível de irrigação aplicado e a produção agrícola, levando em consideração o custo operacional do sistema de manejo.

4.1 Área de Estudo

A área de estudo selecionada para a simulação foi a Fazenda Experimental Santa Paula (FESP), pertencente ao Instituto de Ciências Agrárias (ICA) da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM). Situada no município de Unaí, Minas Gerais, nas coordenadas geográficas 16,436109° de latitude sul e 46,897691° de longitude oeste, a FESP é dedicada ao desenvolvimento de pesquisas agrícolas. A região, com clima tropical, proporciona condições ideais para estudos voltados à irrigação e manejo hídrico, sendo um cenário relevante para a implementação de práticas agrícolas sustentáveis. O solo da área de estudo é classificado como típico dos Latossolos Vermelho-Amarelos, comuns no Cerrado, apresentando boa drenagem e alta capacidade de retenção de água. Especificamente, suas características físico-hídricas incluem uma umidade na capacidade de campo de 25% (base de massa), uma umidade no ponto de murcha permanente de 12,9% (base de massa) e uma densidade de 1,32 g/cm³.

4.2 Caracterização da Cultura

É fundamental apresentar informações detalhadas sobre a cultura, incluindo os estágios fenológicos, sua respectiva duração em dias, a profundidade das raízes, o coeficiente de cultura (K_c) e a fração de água disponível (f). Neste estudo, optou-se pela cultura da soja, uma das mais relevantes e amplamente cultivadas no Brasil. As características fenológicas e hídricas da soja, que são essenciais para a modelagem e gestão da irrigação, estão descritas na tabela a seguir.

Fases Fenológicas	Duração (dias)	K_c	Z_r (mm)	f
Estabelecimento	15	0,40	150	0,5
Desenvolvimento vegetativo	25	0,80	300	0,5
Floração e frutificação	50	1,15	500	0,5
Maturação	25	0,50	600	0,5

Tabela 4.1 – Parâmetros de cultivo nas diferentes fases. Fonte: adaptado de Allen *et al.* (1998).

O valor da fração de água disponível (f) foi considerado fixo durante todo o período de cultivo. Os valores do coeficiente de cultura (K_c) e da profundidade das raízes (Z_r) representam os máximos alcançados em cada estágio de desenvolvimento, com a exceção da fase de maturação, que apresenta os valores mínimos.

Foi considerado um ciclo de plantio com duração de 115 dias, denominado *Ciclo* = {01/10/2023, . . . , 23/01/2024}, onde o dia 01 de outubro corresponde ao plantio e o dia 23 de janeiro é o dia anterior à colheita. Os valores diários da evapotranspiração de referência (ET_0) e da precipitação (P) foram obtidos a partir do site do Instituto Nacional de Meteorologia¹, preenchendo os campos de data inicial, data final, estação meteorológica e tipo de solo, para gerar o Balanço Hídrico Sequencial.

¹ <<https://sisdagro.inmet.gov.br/sisdagro/app/monitoramento/bhs>>

4.2.1 Evapotranspiração da Cultura por Dia do Ciclo

A evapotranspiração da cultura por dia do ciclo, $etc_c \forall c \in Ciclo$, foi obtida ao multiplicar o valor da evapotranspiração de referência (ET_0) para cada dia do ciclo pelo coeficiente de cultura (K_c) correspondente à fase fenológica da cultura naquele dia.

4.2.2 Capacidade de Água Disponível no Solo por Dia do Ciclo

A capacidade de água disponível (CAD) no solo por dia do ciclo da cultura, $cad_c \forall c \in Ciclo$, foi calculada utilizando a equação 3.3, onde o valor da profundidade do sistema radicular (Z_r) é ajustado conforme a fase fenológica da cultura no dia especificado.

4.2.3 Água Facilmente Disponível no Solo por Dia do Ciclo

De maneira similar, a água facilmente disponível (AFD) no solo por dia do ciclo da cultura, $afd_c \forall c \in Ciclo$, foi determinada usando a equação 3.4. Neste caso, a CAD do dia é utilizada, e o valor da fração de água disponível (f) é ajustado de acordo com a fase fenológica da cultura no dia em questão.

4.2.4 Umidade Crítica por Dia do Ciclo

Por fim a umidade crítica (θ_{crit}) por dia do ciclo, $uc_c \forall c \in Ciclo$, foi calculada subtraindo-se a AFD da CAD, ambos calculados para o dia específico do ciclo.

4.3 Sistema de irrigação

O método de irrigação por aspersão com sistema pivô central foi escolhido devido à sua predominância no cenário brasileiro. Além disso, o município de Unaí-MG, onde a pesquisa está sendo conduzida, foi listado por [Guimaraes e Landau \(2014\)](#) como um dos municípios com a maior extensão de área irrigada por pivôs centrais, contando com 604 desses dispositivos cobrindo uma área de 56.983 hectares irrigados.

Neste trabalho, foi considerado um equipamento de irrigação do tipo pivô central, cobrindo uma área de 20,82 hectares, com uma lâmina de aplicação de 12 mm em 21 horas, potência de 30 cv e velocidade de deslocamento de 266 m/h a 100% da velocidade de operação.

Inicialmente, a água será considerada como um recurso disponível para toda a irrigação, com o pivô de irrigação possuindo uma lâmina de água padrão variando em proporções de velocidade de rotação, denominados percentímetros, que representam diferentes volumes de água a serem aplicados ao solo.

Para otimizar o funcionamento do sistema de irrigação, foram escolhidas percentímetros (Perc) de irrigação que permitem o equipamento operar exclusivamente durante os horários de

tarifa reduzida, ou seja, ao longo das 21 horas que correspondem ao horário reservado e ao horário fora de ponta, evitando a operação no horário de ponta durante todo o ciclo da soja. A tabela 4.2 abaixo apresenta as faixas de horários, classificadas de acordo com os valores específicos de consumo de energia por hora.

Horário	Tarifa	Valor (R\$ / kW/h)
21:00 até 06:00	Horário reservado	0,31
06:00 até 18:00	Horário fora de ponta	0,84
18:00 até 21:00	Horário de ponta	3,12

Tabela 4.2 – Faixas de horário e valores de consumo de energia. Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores das tarifas refletem os custos médios de consumo de cada bandeira da CEMIG², a concessionária responsável pela geração, transmissão e distribuição de energia elétrica no estado de Minas Gerais.

4.3.1 Custo por Percentímetro de Irrigação

O custo, em reais (R\$), $custo_p \forall p \in Perc$, associado ao uso do pivô central para cada percentímetro de irrigação foi calculado multiplicando o tempo de funcionamento por percentímetro do pivô pelo custo de operação por hora, o qual é obtido ao multiplicar a potência do equipamento, em kW/h, pelo custo do kW/h. É importante notar que, se o tempo de funcionamento ultrapassar o horário reservado, o custo do kW/h aumenta, atingindo seu valor máximo ao completar 21 horas.

4.3.2 Lâmina por Percentímetro de Irrigação

A lâmina de irrigação, em milímetros (mm), $lam_p \forall p \in Perc$, é controlada pelo tempo de rotação do equipamento. Para calcular a lâmina de irrigação por percentímetro, é necessário primeiro determinar a lâmina total do pivô por hora (obtida a partir da lâmina correspondente a um funcionamento de 21 horas). Em seguida, essa lâmina horária deve ser multiplicada pelo tempo de operação do percentímetro selecionado. É importante ressaltar que somente os percentímetros com um tempo de giro inferior a 21 horas serão considerados.

4.4 Modelo Matemático

A partir dos dados pré-processados, foi desenvolvido um modelo de programação inteira mista (MIP) para otimização do uso da irrigação em um ciclo agrícola. O modelo busca minimizar os custos associados à utilização dos diferentes percentímetros, ao mesmo tempo em que garante que a quantidade de água disponível no solo atenda às necessidades da cultura em todas as fases de seu desenvolvimento, respeitando os limites críticos de disponibilidade de água.

² <<https://www.cemig.com.br/atendimento/valores-de-tarifas-e-servicos/>>

4.4.1 Dados de Entrada

Os principais parâmetros utilizados no modelo são:

- $Ciclo$: conjunto de dias do ciclo da cultura, definido pelo número total de dias em que ocorre o cultivo.
- $Perc$: conjunto de percentímetros disponíveis para realizar a irrigação.
- $custo_p$: custo, em R\$, relacionado ao uso do percentímetro $p \in Perc$, representando os custos variáveis de operação e manutenção do sistema de irrigação.
- lam_p : lâmina de irrigação, em mm, fornecida pelo percentímetro $p \in Perc$ a cada aplicação.
- $prec_c$: precipitação esperada no dia $c \in Ciclo$, em mm, representando a contribuição de chuva natural para a disponibilidade hídrica no solo.
- etc_c : evapotranspiração da cultura no dia $c \in Ciclo$, em mm, indicando a quantidade de água perdida e que deve ser repostada via irrigação ou precipitação.
- cad_c : capacidade de água disponível (CAD) no solo em mm, do dia $c \in Ciclo$ e que representa o volume máximo de água que o solo pode reter sem perder por percolação.
- uc_c : limite crítico de água no solo em mm para o dia $c \in Ciclo$, abaixo do qual a cultura começa a sofrer estresse hídrico.

4.4.2 Variáveis de Decisão

As variáveis de decisão do modelo são listadas a seguir:

- x_{pc} : variável binária que assume valor 1 se o percentímetro $p \in Perc$ for utilizado no dia $c \in Ciclo$, e 0 caso contrário. Esta variável representa a escolha do nível de irrigação aplicada a cada dia.
- adf_c : quantidade de água disponível no solo ao final do dia $c \in Ciclo$, em mm.
- adi_c : quantidade de água disponível no solo no início do dia $c \in Ciclo$, em mm, que será utilizada para calcular a necessidade de irrigação adicional.

4.4.3 Função Objetivo

O objetivo do modelo é minimizar o custo total de irrigação ao longo do ciclo da cultura. A função objetivo é dada por:

$$\text{Min} \sum_{p \in \text{Perc}} \sum_{c \in \text{Ciclo}} \text{custo}_p x_{pc} \quad (4.1)$$

Essa função representa o custo total associado à escolha de cada percentímetro p em cada dia c , somando os custos ao longo de todo o ciclo.

4.4.4 Restrições

O modelo deve respeitar várias restrições para garantir que as condições adequadas para o crescimento da cultura sejam atendidas:

- **Restrição de seleção de percentímetro:** Apenas um percentímetro pode ser escolhido por dia para realizar a irrigação.

$$\sum_{p \in P} x_{pc} = 1 \quad \forall c \in \text{Ciclo} \quad (4.2)$$

- **Água disponível no solo no primeiro dia:** A quantidade de água disponível no início do primeiro dia é igual à capacidade de água disponível no solo (CAD) no primeiro dia.

$$adi_1 = cad_1 \quad (4.3)$$

- **Água disponível ao início dos demais dias:** A quantidade de água disponível no solo no início de cada dia, a partir do segundo, é igual à quantidade de água disponível ao final do dia anterior.

$$adi_c = adf_{c-1} \quad \forall c \in \text{Ciclo} : c > 1 \quad (4.4)$$

- **Água disponível ao final do dia:** A água disponível no solo ao final de cada dia é dada pela quantidade de água disponível no início do dia, descontada pela evapotranspiração, somada à precipitação, e à quantidade de água aplicada pela irrigação escolhida.

$$adf_c = adi_c - etc_c + prec_c + \sum_{p \in \text{Perc}} lam_p x_{pc} \quad \forall c \in \text{Ciclo} \quad (4.5)$$

- **Respeito ao limite crítico:** A quantidade de água disponível no solo ao final de cada dia deve ser maior ou igual ao limite crítico para garantir que a cultura não sofra estresse hídrico.

$$adf_c \geq uc_c \quad \forall c \in \text{Ciclo} \quad (4.6)$$

- **Domínios das variáveis:** As variáveis de decisão devem satisfazer os seguintes domínios:

$$x_{pc} \in \{0, 1\} \quad \forall p \in Perc, c \in Ciclo \quad (4.7)$$

$$adi_c \geq 0 \quad \forall c \in Ciclo \quad (4.8)$$

$$adf_c \geq 0 \quad \forall c \in Ciclo \quad (4.9)$$

Após a construção e validação do modelo de otimização, a solução foi obtida utilizando o CPLEX. Os dados previamente processados foram inseridos como entrada no modelo, e os resultados obtidos foram validados por meio de comparações com métodos tradicionais de cálculo do balanço hídrico sequencial, realizados com o suporte da ferramenta AquaCrop. Essa comparação permitiu avaliar a precisão e a eficiência do modelo proposto em relação às abordagens convencionais, destacando suas vantagens e desvantagens no gerenciamento de recursos hídricos para a irrigação agrícola.

5 Resultados

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação do modelo de otimização para o manejo da irrigação, bem como uma discussão sobre a eficiência hídrica, os custos operacionais e a produtividade da cultura para os diferentes tipos de irrigação.

5.1 Modelo de Otimização

O modelo de otimização desenvolvido neste trabalho independe do tipo de sistema de irrigação em análise. Para garantir que a entrada do modelo permaneça consistente, é necessário apenas ajustar o pré-processamento dos dados para o sistema de irrigação a ser considerado. O sistema de irrigação por pivô central foi escolhido devido à sua alta taxa de utilização, ao elevado custo de aplicação e operação, e à significativa taxa de desperdício associada a esse tipo de sistema.

5.2 Irrigação

Devido ao uso do AquaCrop para avaliar os resultados, foi necessário considerar apenas lâminas de irrigação que resultassem em valores inteiros de aplicação de água, pois o AquaCrop arredonda os valores de irrigação que são fornecidos manualmente. Assim, com base no sistema de irrigação por pivô central e nos custos de consumo elétrico considerados neste trabalho, as lâminas, juntamente com seus respectivos custos de utilização e tempos de operação, são apresentadas na Tabela 5.1 a seguir.

Percentímetro do Pivô	Volta (horas)	Lâmina (mm)	Custo (R\$)
100%	5:15	3	35,79
75%	7:00	4	47,72
60%	8:45	5	68,54
50%	10:30	6	101,19
43%	12:15	7	133,84
37%	14:00	8	166,49
33%	15:45	9	199,14
30%	17:30	10	231,79
28%	19:15	11	264,44
25%	21:00	12	297,09
0%	0:00	0	0,00

Tabela 5.1 – Dados de operação do sistema de irrigação por pivô central.

Os valores diários calculados para ET_c , precipitação, capacidade de água disponível (CAD) e umidade crítica (θ_{crit}) estão disponíveis no Apêndice A deste trabalho. Também estão in-

cluídos os valores diários de irrigação estimados pelo AquaCrop, pelo balanço hídrico sequencial — geralmente utilizado por engenheiros agrônomos — e pelo modelo de otimização.

A seguir, na Tabela 5.2, são apresentados de forma resumida os resultados alcançados por este estudo:

Métricas Irrig.	AquaCrop	Irrig. Convencional	Irrig. Otimizada
Número de eventos	20	20	60
Irrigação total (mm)	240	240	232
Produtividade estimada (kg/ha)	5707	5676	5790
Custo total (R\$)	5941,8	5941,80	2767,76

Tabela 5.2 – Resultados comparativos das diferentes abordagens de irrigação.

Os dados apresentados indicam que a irrigação otimizada resultou em uma redução significativa nos custos totais e em um aumento na produtividade estimada. A comparação entre a irrigação convencional e a otimizada revela uma diminuição de aproximadamente 53,5% nos custos ao adotar o modelo de otimização, demonstrando a eficácia do uso de técnicas de programação matemática na gestão da irrigação.

Além disso, constatou-se uma melhoria na eficiência hídrica com a aplicação do modelo otimizado. A comparação entre a irrigação convencional e a otimizada sugere que, na irrigação convencional, as necessidades hídricas das culturas não foram completamente atendidas, o que provavelmente resultou em estresse hídrico. Em contrapartida, a irrigação otimizada assegurou que a água disponível se mantivesse dentro dos limites críticos, minimizando o estresse hídrico.

O custo total da irrigação otimizada foi reduzido para R\$ 2.767,76, em comparação com R\$ 5.941,80 nas abordagens tradicionais. Essa redução pode ser atribuída à programação do sistema de irrigação durante horários de menor custo energético, o que otimizou o uso da água e a eficiência do sistema. Entretanto, a irrigação otimizada requer aplicações mais frequentes, o que pode ser um desafio para propriedades que não dispõem de mão de obra suficiente para operar o pivô de forma contínua.

Embora irrigações mais frequentes possam representar um desafio para algumas fazendas, essa característica não deve ser vista como negativa. Irrigações mais frequentes ajudam a reduzir o estresse das plantas em situações extremas, como quando há danos ao sistema de irrigação. Em áreas onde a irrigação é menos frequente, a demora na reposição da água do solo pode resultar em consequências mais severas para as culturas.

Por fim, ao considerar a produtividade das culturas, a irrigação otimizada também apresentou um desempenho superior, atingindo 5.790 kg/ha, em comparação com os 5.676 kg/ha obtidos por meio da irrigação convencional. Essa melhoria pode ser atribuída à aplicação precisa de água, que foi ajustada às necessidades específicas das culturas em diferentes fases de crescimento.

6 Considerações Finais

Neste capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho desenvolvido, bem como direcionamentos para trabalhos futuros visando aproximar ainda mais a metodologia desenvolvida para problemas reais enfrentados pelos agricultores.

6.1 Conclusão

O manejo inadequado da irrigação pode acarretar em consequências que levam tanto à redução da produtividade, por insuficiência de água, quanto ao aumento dos custos operacionais e desperdício de recursos, decorrente do excesso de irrigação. Ambos os cenários contribuem diretamente para a diminuição da receita. A programação matemática emerge como uma ferramenta promissora para a gestão otimizada dos recursos hídricos na agricultura, visando a maximização da produtividade e a minimização dos custos e desperdícios.

Entretanto a maioria das abordagens convencionais de otimização aplicadas ao manejo determinam a quantidade necessária de irrigação para atender à demanda hídrica expressa em blocos de tempo, não oferecendo orientações diárias aos agricultores, que necessitam de informações mais detalhadas e contextualizadas. Dessa forma, o valor ótimo de irrigação mensal, por exemplo, não fornece instruções sobre a quantidade diária a ser irrigada.

Este estudo teve por finalidade desenvolver, elaborar e implementar modelos de otimização, utilizando técnicas de programação matemática, para apoiar os produtores na tomada de decisão relacionada à irrigação em pivôs centrais. Foram considerados dados meteorológicos, informações diárias de chuva, condições climáticas locais, dados da cultura escolhida e informações sobre o solo na formulação matemática do problema. É importante ressaltar que a água foi considerada como um recurso disponível para toda a irrigação, uma vez que sua disponibilidade não é o foco deste estudo, mas sim o momento ideal para a irrigação.

Os resultados demonstram que a otimização da irrigação por meio de modelos matemáticos, como o implementado com o IBM CPLEX, oferece uma solução viável para os desafios enfrentados na agricultura irrigada. A combinação de dados meteorológicos, condições do solo e necessidades hídricas da cultura permite uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos, promovendo tanto a sustentabilidade quanto a produtividade agrícola.

6.2 Trabalhos Futuros

Considerando as observações, limitações, hipóteses e resultados apresentados ao longo deste trabalho, algumas direções para melhorias e aprofundamentos futuros são apresentadas a

seguir.

Em primeiro lugar, a implementação de uma maior diversidade de estratégias de irrigação. Por exemplo, a possibilidade de adotar a estratégia de lâmina fixa e período variável, onde a lâmina de irrigação é constante ao longo do ciclo, mas os intervalos entre as irrigações variam; ou ainda a estratégia de lâmina variável e período fixo, em que os intervalos de irrigação são predeterminados e a lâmina aplicada varia. A inclusão de mais estratégias como essas permitirá uma análise mais detalhada da eficiência hídrica em diferentes cenários de manejo, oferecendo maior flexibilidade na adaptação a condições específicas de irrigação.

Além disso, a exploração do uso de pivôs conjugados e múltiplos pivôs, com o objetivo de otimizar a cobertura de áreas maiores. Nesses casos, a utilização de pivôs de maior porte ou de múltiplas unidades pode aumentar significativamente a eficiência no uso dos recursos hídricos e garantir uma cobertura mais completa das áreas irrigadas.

Outro ponto relevante é a inclusão de restrições relacionadas ao consumo elétrico. Muitas fazendas enfrentam limitações na disponibilidade de energia elétrica, o que inviabiliza a operação simultânea de um grande número de pivôs. Da mesma forma, a disponibilidade de água deve ser considerada, especialmente para fazendas que captam água diretamente de fontes naturais e que precisam respeitar limites legais de captação. Incorporar essas restrições ao modelo de irrigação permitirá soluções mais realistas, alinhadas às condições econômicas e ambientais das operações agrícolas.

Adicionalmente, o desenvolvimento de um software de suporte à tomada de decisão para o manejo de irrigação auxiliaria os agricultores a determinar o momento e a quantidade ideal de irrigação, considerando os dias anteriores e projetando as necessidades futuras com base em dados meteorológicos e de disponibilidade hídrica. A implementação de uma ferramenta como essa promoveria um uso mais eficiente de água e energia, facilitando o planejamento das atividades de irrigação com maior precisão e sustentabilidade.

Referências

- ALLEN, R. G. *et al.* Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-fao irrigation and drainage paper 56. **Fao, Rome**, v. 300, n. 9, p. D05109, 1998.
- ANDRADE, C.; BRITO, R. Métodos de irrigação e quimigação. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2006., 2006.
- BAIER, W. Note on the terminology of crop—weather models. **Agricultural Meteorology**, Elsevier, v. 20, n. 2, p. 137–145, 1979.
- BERNARDO, S. *et al.* **Manual de irrigação**. [S.l.]: UFV Viçosa, 2006. v. 625.
- BRITO, V. da C. *et al.* Otimização do uso dos recursos hídricos na irrigação: estudo de caso no açude aracagi-paraíba. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 9, n. 7, p. 52–61, 2018.
- CARVALHO, J. de A.; OLIVEIRA, L. F. C. de. **Instalação de bombeamento para irrigação: hidráulica e consumo de energia**. [S.l.]: Editora UFLA, 2008.
- CARVALHO, M. A. d. *et al.* Sistema de suporte à decisão para alocação de água em projetos de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, SciELO Brasil, v. 13, p. 10–17, 2009.
- CASTIONE, G. A. F. *et al.* Variabilidade espacial da textura do solo em área irrigada por pivô central em diferentes posições na paisagem. **Revista Agro@ mbiente on-Line**, v. 9, n. 3, p. 219–226, 2015.
- CHRISTOFIDIS, D. Água, irrigação e agropecuária sustentável. **Revista de Política Agrícola**, v. 22, n. 1, p. 115–127, 2013.
- CINTRA, F. L. D.; LIBARDI, P. L.; SAAD, A. M. Balanço hídrico no solo para porta-enchertos de citros em ecossistema de tabuleiro costeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, SciELO Brasil, v. 4, p. 23–28, 2000.
- COELHO, E. F.; FILHO, M. A. C.; OLIVEIRA, S. d. Agricultura irrigada: eficiência de irrigação e de uso de água. **Bahia Agrícola**, v. 7, n. 1, p. 57–60, 2005.
- CONCEIÇÃO, C. G. d. *et al.* Análise do crescimento e produtividade econômica do feijoeiro irrigado na região de alegre, rs. Universidade Federal de Santa Maria, 2016.
- DAKER, A. **A água na agricultura: irrigação e drenagem**. Livraria Freitas Bastos, 1970. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=mB2xzAEACAAJ>>.
- ECONOMIC, U. N. D. of; AFFAIRS, S. World population prospects 2022: Summary of results. **UN DESA/POP/2022/TR/NO. 3**, 2022.
- FIGUEIREDO, M. G. d. *et al.* Lâmina ótima de irrigação para o feijoeiro considerando restrição de terra e aversão ao risco. **Acta Scientiarum. Agronomy**, SciELO Brasil, v. 29, p. 593–598, 2007.

FOOD; FAO, A. O. O. T. U. N. Agricultura irrigada sustentável no brasil: Identificação de áreas prioritárias. 2017.

FOOD, V. Agriculture organization.(fao)(2007). **Report on: Improving the nutritional quality of street foods to better meet the micronutrient needs of schoolchildren in urban areas**, p. 14–17, 2008.

GUIMARAES, D.; LANDAU, E. Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no brasil em 2013. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2014., 2014.

JONES, H. G. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. **Journal of experimental botany**, Oxford University Press, v. 55, n. 407, p. 2427–2436, 2004.

LOPES, C.; MAROUELLI, W.; FILHO, A. C. Associação da irrigação com doenças de hortaliças. **Revisão Anual de Patologia de Plantas**, v. 14, p. 151–179, 2006.

MANTOVANI, E.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. Irrigação: princípios e práticas. **Viçosa: UFV**, 2006.

MARCHETTI, D. Irrigação por pivô central. Brasília, DF: EMBRAPA-ATA, 1983., 1983.

MAROUELLI, W. A. *et al.* Manejo da água de irrigação. **SOUSA, VF; MAROUELLI, WA; COELHO, EF; PINTO, JM**, p. 157–232, 2011.

MAROUELLI, W. A.; SILVA, W. d. C.; SILVA, H. da. **Irrigação por aspersão em hortaliças: qualidade da água, aspectos do sistema e método prático de manejo**. [S.l.]: Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008., 2008.

MARTIN, D.; GILLEY, J. Irrigation water requirements. chapter 2, part 623. **National Engrg. Handbook, USDA, Soil Conservation Service**, v. 284, 1993.

MARTINS, J. D. *et al.* Levantamento da área irrigada por pivô central no estado do rio grande do sul. **Irriga**, v. 21, n. 2, p. 300–300, 2016.

MARTINS, M. *et al.* Calibração do modelo aquacrop para estimativa de rendimento de milho no semiárido do brasil. In: **Embrapa Milho e Sorgo-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: congresso brasileiro de agrometeorologia. UFLA**. [S.l.: s.n.], 2015.

MEDEIROS, A. d. M. **Otimização de sistema de irrigação por aspersão pivô central. 2010. 131 f.** Tese (Doutorado) — Tese (Doutorado em Agronomia: Solo e Água)-Escola de Agronomia e Engenharia . . . , 2010.

MOREIRA, J. *et al.* Planejamento de irrigação em pivô central por meio de modelos matemáticos. **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Bento Gonçalves, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Proceedings**, 2013.

PALARETTI, L. F.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C. Caracterização e diagnóstico de sistemas de irrigação e práticas de manejo de água na citricultura do norte do estado de são paulo. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 28, n. 2, p. 531–551, 2011.

PARREIRA, A. *et al.* Water balance climatological to the county of rio verde, goiás. **Científic@ Multidisciplinary Journal**, v. 6, n. 1, p. 16–33, 2019.

PAZ, R. E. F. T. . F. C. M. Vital Pedro da S. Recursos hídricos, agricultura irrigada e meio ambiente. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 2000.

- PAZ, V. P. d. S. *et al.* Otimização do uso da água em sistemas de irrigação por aspersão optimization of water use in sprinkler irrigation systems. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, Universidade Federal de Campina Grande, 2002.
- PIEKARSKI, K. *et al.* Simulação da produtividade da soja em três tipos de solo com o modelo aquacrop. In: **Convibra Online Conference Agronomy**. [S.l.: s.n.], 2016. v. 4, p. 189–198.
- PILAR, J. V. Otimização de um sistema de recursos hídricos sem regularização: caso analisado: bacia do rio paracatu. 1998.
- PINHATI, F. S. C.; SOUZA, S. d.; VILLELA, W. Avaliação de um cenário de ampliação da irrigação na bacia do rio são marcos por meio de geoprocessamento e desenvolvimento de ferramenta computacional para cálculo do balanço hídrico na escala de ottobacias. **XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, p. 1–8, 2017.
- PINHEIRO, A. G. *et al.* Simulação de sistemas agrícolas com uso do modelo aquacrop parametrizado para culturas forrageiras em ambiente semiárido. Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2022.
- POSTEL, S. *et al.* Redesigning irrigated agriculture. In: AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **National irrigation symposium. Proceedings of the 4th Decennial Symposium, Phoenix, Arizona, USA, November 14-16, 2000**. [S.l.], 2000. p. 1–12.
- RAES, D. *et al.* Aquacrop-the fao crop model to simulate yield response to water. **FAO Land and Water Division, FAO, Rome, Citeseer**, 2009.
- RODRIGUES, L. N. *et al.* Agricultura irrigada: desafios e oportunidades para o desenvolvimento sustentável. Brasília, DF: INOVAGRI, 2017., 2017.
- SAATH, A. L. F. Kleverton Clovis de O. Crescimento da demanda mundial de alimentos e restrições do fator terra no brasil. **RESR, Piracicaba-SP**, v. 56, 2018.
- SANTOS, G. O.; HERNANDEZ, F. B. T.; ROSSETTI, J. C. Balanço hídrico como ferramenta ao planejamento agropecuário para a região de marinópolis, noroeste do estado de são paulo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada-RBAI**, v. 4, n. 3, 2013.
- SANTOS, M. A. L. dos *et al.* Modelo de programação linear para otimização econômica do projeto de irrigação baixo acarau-ce. **Revista Caatinga**, v. 22, n. 1, 2009.
- SILVA, A. J. P. d.; COELHO, E. F.; FILHO, M. A. C. Water extraction variability in the banana root zone affects the reliability of water balance. **Scientia Agricola**, SciELO Brasil, v. 72, p. 1–10, 2015.
- SILVA, E. da; AZEVEDO, J. de. Dimensionamento da lateral de irrigação do pivo-central. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1998., 1998.
- SILVA, I.; FREITAS, L. A agricultura irrigada no brasil: Uma comparação entre os dados do censo agropecuário de 1996/1995, 2006 e 2017.(agronomia). **Repositório Institucional**, v. 2, n. 1, 2023.
- SILVA, V. d. P. da *et al.* Estimativa da evapotranspiração da mangueira com base no balanço hídrico do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, SciELO Brasil, v. 5, p. 456–462, 2001.

SILVEIRA, J. d. C. A importância da agricultura irrigada na sub-bacia tambaú/verde, região nordeste paulista. **Pesquisa & Tecnologia**, v. 8, n. 2, 2011.

SILVEIRA, J. M. de C. *et al.* Identificação de áreas irrigadas por pivô central na sub-bacia tambaú-verde utilizando imagens ccd/cbers. **Irriga**, v. 18, n. 4, p. 721–729, 2013.

SOJKA, R. E.; BJORNEBERG, D. L.; ENTRY, J. Irrigation: An historical perspective. **Encyclopedia of soil science**, Marcel Dekker, Inc. New York, NY, USA, v. 1, n. 1070, p. 745–749, 2002.

STEDUTO, P. *et al.* Aquacrop—the fao crop model to simulate yield response to water: I. concepts and underlying principles. **Agronomy Journal**, Wiley Online Library, v. 101, n. 3, p. 426–437, 2009.

TESTEZLAF, R. Irrigação: métodos, sistemas e aplicações. Faculdade de Engenharia Agrícola Unicamp-FEAGRI, 2017.

VANUYTRECHT, E. *et al.* Aquacrop: Fao’s crop water productivity and yield response model. **Environmental Modelling & Software**, Elsevier, v. 62, p. 351–360, 2014.

WEEK, W. W. Insights from the comprehensive assessment of water management in agriculture. **Proceedings of the 2006 World Water Week**, 2006.

Apêndices

APÊNDICE A – Dados Diários de Irrigação e Parâmetros Climáticos

A seguir, a Tabela A.1 apresenta os valores diários calculados para a evapotranspiração de referência (ET_c), precipitação (P), capacidade de água disponível (CAD) e umidade crítica (θ_{crit}). Além disso, estão incluídos os valores diários de irrigação, que incluem: Irri. Conv. (obtido de forma convencional), Irri. Aqc. (obtido através do AquaCrop) e Irri. Opt. (resultado do modelo de otimização).

Tabela A.1 – Valores diários calculados para ET_c , precipitação, capacidade de água disponível (CAD) e umidade crítica (θ_{crit}), bem como os valores de irrigação estimados.

Data	ET_c (mm)	Precipitação (mm)	CAD (mm)	UC (mm)	Irrig. Conv. (mm)	Irrig. Aqc. (mm)	Irrig. Opt. (mm)
01/10/2023	4,10	0,00	16,00	8,00	0,00	0,00	0,00
02/10/2023	2,50	13,80	16,00	8,00	0,00	0,00	0,00
03/10/2023	3,70	0,00	18,70	9,35	0,00	0,00	0,00
04/10/2023	3,80	0,00	23,10	11,55	0,00	0,00	4,00
05/10/2023	2,80	0,00	26,80	13,40	0,00	0,00	0,00
06/10/2023	3,30	0,80	30,10	15,05	0,00	0,00	0,00
07/10/2023	3,20	6,80	33,10	16,55	0,00	0,00	0,00
08/10/2023	3,70	0,00	36,00	18,00	0,00	0,00	3,00
09/10/2023	3,10	1,30	38,60	19,30	0,00	0,00	4,00
10/10/2023	2,60	0,20	41,20	20,60	0,00	0,00	4,00
11/10/2023	3,00	0,00	43,70	21,85	0,00	0,00	3,00
12/10/2023	6,30	0,00	46,00	23,00	12,00	12,00	4,00
13/10/2023	5,60	0,00	48,30	24,15	0,00	0,00	4,00
14/10/2023	3,70	0,00	50,50	25,25	0,00	0,00	4,00
15/10/2023	4,50	0,00	52,70	26,35	0,00	0,00	4,00
16/10/2023	3,30	0,00	54,80	27,40	12,00	12,00	4,00
17/10/2023	6,90	0,00	56,80	28,40	0,00	12,00	4,00
18/10/2023	6,70	0,00	58,90	29,45	12,00	0,00	4,00
19/10/2023	5,60	0,00	60,80	30,40	0,00	0,00	4,00
20/10/2023	4,70	0,00	62,80	31,40	12,00	12,00	4,00
21/10/2023	3,80	8,60	64,60	32,30	0,00	0,00	4,00

Data	ET_c (mm)	Precipitação (mm)	CAD (mm)	θ_{crit} (mm)	Irrig. Conv. (mm)	Irrig. Aqc. (mm)	Irrig. Opt. (mm)
22/10/2023	5,70	0,00	66,50	33,25	0,00	0,00	4,00
23/10/2023	7,20	0,00	68,30	34,15	0,00	0,00	4,00
24/10/2023	6,00	0,00	70,10	35,05	12,00	12,00	4,00
25/10/2023	6,60	0,20	71,80	35,90	0,00	0,00	4,00
26/10/2023	3,60	2,80	73,60	36,80	0,00	0,00	4,00
27/10/2023	3,50	0,00	75,30	37,65	0,00	0,00	4,00
28/10/2023	4,00	0,00	77,00	38,50	0,00	0,00	4,00
29/10/2023	5,40	5,50	78,80	39,40	0,00	0,00	4,00
30/10/2023	7,50	0,00	80,40	40,20	12,00	12,00	4,00
31/10/2023	6,30	0,00	82,10	41,05	0,00	12,00	4,00
01/11/2023	4,40	4,00	83,60	41,80	0,00	0,00	4,00
02/11/2023	6,90	0,50	85,20	42,60	12,00	0,00	3,00
03/11/2023	3,00	7,00	86,90	43,45	0,00	0,00	4,00
04/11/2023	2,60	0,00	88,40	44,20	0,00	0,00	4,00
05/11/2023	4,30	2,00	89,90	44,95	0,00	0,00	4,00
06/11/2023	3,80	0,00	91,50	45,75	0,00	0,00	3,00
07/11/2023	4,40	0,00	93,00	46,50	0,00	0,00	4,00
08/11/2023	5,50	0,00	94,50	47,25	12,00	0,00	4,00
09/11/2023	5,50	0,00	96,00	48,00	0,00	12,00	4,00
10/11/2023	6,00	0,00	96,00	48,00	0,00	0,00	4,00
11/11/2023	6,60	0,00	96,00	48,00	12,00	12,00	4,00
12/11/2023	7,20	0,00	96,00	48,00	12,00	12,00	4,00
13/11/2023	8,00	0,00	96,00	48,00	0,00	0,00	4,00
14/11/2023	6,60	0,00	96,00	48,00	12,00	12,00	4,00

Data	ET_c (mm)	Precipitação (mm)	CAD (mm)	θ_{crit} (mm)	Irrig. Conv. (mm)	Irrig. Aqc. (mm)	Irrig. Opt. (mm)
15/11/2023	8,10	0,00	96,00	48,00	12,00	12,00	4,00
16/11/2023	8,90	0,00	96,00	48,00	0,00	12,00	4,00
17/11/2023	7,70	0,00	96,00	48,00	12,00	12,00	4,00
18/11/2023	5,10	0,60	96,00	48,00	0,00	0,00	4,00
19/11/2023	5,00	0,00	96,00	48,00	12,00	0,00	4,00
20/11/2023	1,90	1,80	96,00	48,00	0,00	0,00	4,00
21/11/2023	3,90	0,80	96,00	48,00	0,00	0,00	4,00
22/11/2023	2,20	8,60	96,00	48,00	0,00	0,00	4,00
23/11/2023	4,30	0,00	96,00	48,00	0,00	0,00	4,00
24/11/2023	6,40	0,10	96,00	48,00	0,00	0,00	4,00
25/11/2023	5,40	2,80	96,00	48,00	12,00	12,00	0,00
26/11/2023	5,60	0,00	96,00	48,00	0,00	0,00	4,00
27/11/2023	4,80	8,10	96,00	48,00	0,00	0,00	3,00
28/11/2023	5,80	0,00	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00
29/11/2023	4,80	0,00	96,00	48,00	12,00	12,00	4,00
30/11/2023	4,80	0,00	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00
01/12/2023	3,10	5,40	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00
02/12/2023	5,60	0,00	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00
03/12/2023	5,40	6,20	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00
04/12/2023	3,70	4,00	96,00	48,00	0,00	0,00	4,00
05/12/2023	3,90	2,90	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00
06/12/2023	4,20	14,40	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00
07/12/2023	5,80	0,00	96,00	48,00	0,00	0,00	4,00
08/12/2023	5,20	0,00	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00

Data	ET_c (mm)	Precipitação (mm)	CAD (mm)	θ_{crit} (mm)	Irrig. Conv. (mm)	Irrig. Aqc. (mm)	Irrig. Opt. (mm)
09/12/2023	6,50	0,00	96,00	48,00	12,00	12,00	3,00
10/12/2023	5,10	20,20	96,00	48,00	0,00	0,00	3,00
11/12/2023	5,60	0,00	96,00	48,00	0,00	0,00	3,00
12/12/2023	2,70	1,60	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00
13/12/2023	5,70	0,00	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00
14/12/2023	6,90	1,20	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00
15/12/2023	5,70	0,00	96,00	48,00	12,00	12,00	0,00
16/12/2023	7,30	0,00	96,00	48,00	0,00	0,00	4,00
17/12/2023	7,20	0,00	96,00	48,00	12,00	12,00	0,00
18/12/2023	6,30	0,00	96,00	48,00	0,00	12,00	4,00
19/12/2023	4,90	0,40	96,00	48,00	12,00	0,00	4,00
20/12/2023	3,20	1,60	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00
21/12/2023	2,70	9,40	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00
22/12/2023	1,90	4,10	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00
23/12/2023	2,30	7,60	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00
24/12/2023	2,10	35,80	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00
25/12/2023	2,10	5,70	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00
26/12/2023	3,90	0,40	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00
27/12/2023	3,30	0,80	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00
28/12/2023	3,70	0,00	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00
29/12/2023	4,10	0,00	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00
30/12/2023	4,90	1,50	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00
31/12/2023	3,40	1,00	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00
01/01/2024	1,80	7,80	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00

Data	ET_c (mm)	Precipitação (mm)	CAD (mm)	θ_{crit} (mm)	Irrig. Conv. (mm)	Irrig. Aqc. (mm)	Irrig. Opt. (mm)
02/01/2024	1,00	120,20	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00
03/01/2024	1,20	25,00	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00
04/01/2024	2,20	4,50	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00
05/01/2024	1,70	1,80	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00
06/01/2024	2,80	20,40	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00
07/01/2024	3,30	0,00	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00
08/01/2024	1,30	3,00	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00
09/01/2024	1,40	24,60	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00
10/01/2024	2,00	10,60	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00
11/01/2024	3,20	4,80	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00
12/01/2024	2,80	5,50	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00
13/01/2024	1,80	14,60	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00
14/01/2024	3,00	1,00	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00
15/01/2024	1,80	18,40	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00
16/01/2024	2,30	4,90	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00
17/01/2024	2,50	0,00	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00
18/01/2024	3,10	1,60	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00
19/01/2024	3,20	0,30	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00
20/01/2024	2,90	0,00	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00
21/01/2024	3,40	0,10	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00
22/01/2024	1,90	2,40	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00
23/01/2024	1,40	2,60	96,00	48,00	0,00	0,00	0,00