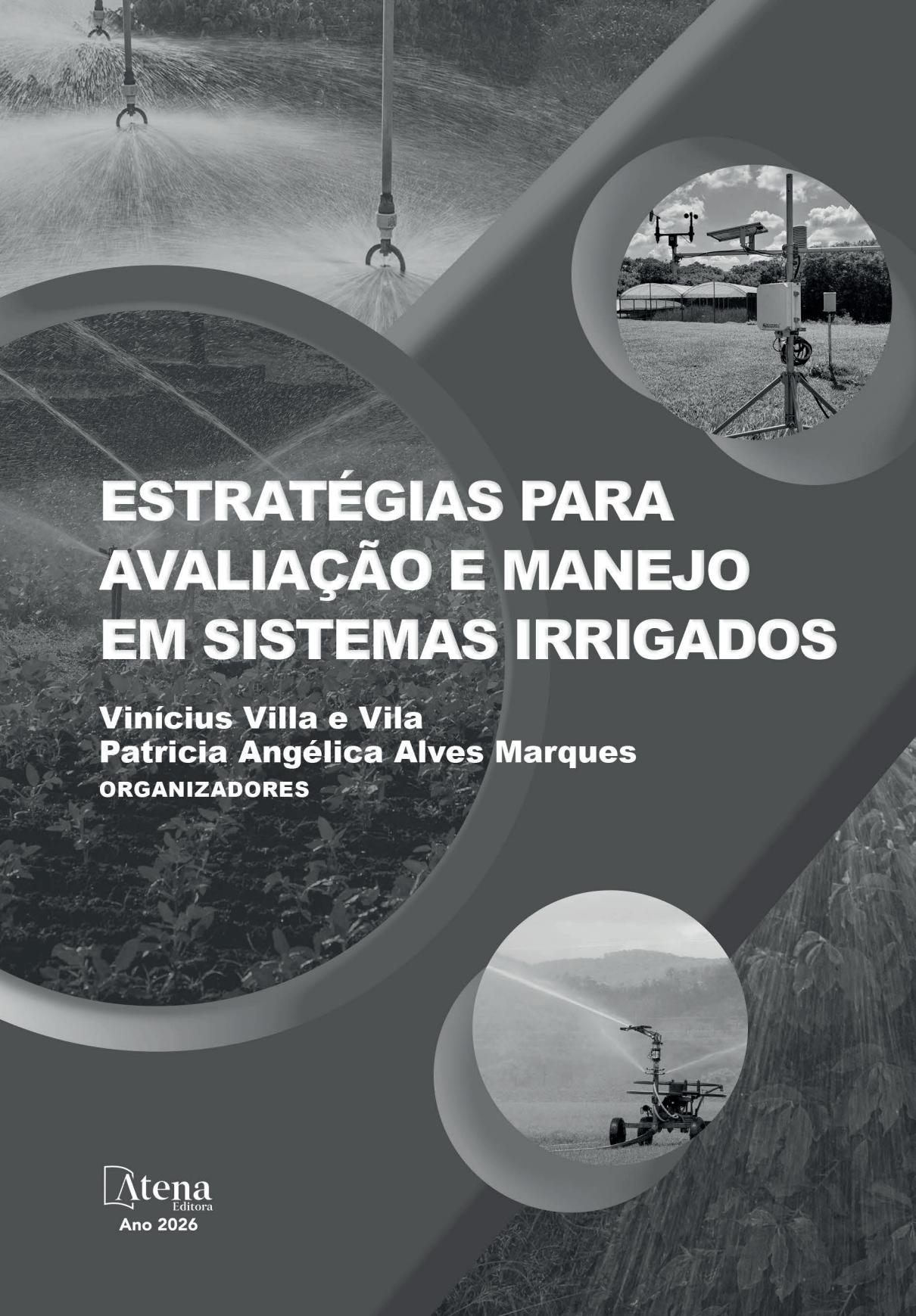


# **ESTRATÉGIAS PARA AVALIAÇÃO E MANEJO EM SISTEMAS IRRIGADOS**

**Vinícius Villa e Vila  
Patricia Angélica Alves Marques  
ORGANIZADORES**



# **ESTRATÉGIAS PARA AVALIAÇÃO E MANEJO EM SISTEMAS IRRIGADOS**

**Vinícius Villa e Vila  
Patricia Angélica Alves Marques  
ORGANIZADORES**



2025 by Atena Editora

Copyright © 2025 Atena Editora

Copyright do texto © 2025, o autor

Copyright da edição © 2025, Atena Editora

Os direitos desta edição foram cedidos à Atena Editora pelo autor.

*Open access publication by Atena Editora*

**Editora chefe**

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Editora executiva**

Natalia Oliveira Scheffer

**Imagens da capa**

iStock

**Edição de arte**

Yago Raphael Massuqueto Rocha



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob a Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

A Atena Editora tem um compromisso sério com a transparência e a qualidade em todo o processo de publicação. Trabalhamos para garantir que tudo seja feito de forma ética, evitando problemas como plágio, manipulação de informações ou qualquer interferência externa que possa comprometer o trabalho.

Se surgir qualquer suspeita de irregularidade, ela será analisada com atenção e tratada com responsabilidade.

O conteúdo do livro, textos, dados e informações, é de responsabilidade total do autor e não representa necessariamente a opinião da Atena Editora. A obra pode ser baixada, compartilhada, adaptada ou reutilizada livremente, desde que o autor e a editora sejam mencionados, conforme a Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

Cada trabalho recebeu a atenção de especialistas antes da publicação. A equipe editorial da Atena avaliou as produções nacionais, e revisores externos analisaram os materiais de autores internacionais.

Todos os textos foram aprovados com base em critérios de imparcialidade e responsabilidade.

# Estratégias para avaliação e manejo em sistemas irrigados

## | Organizadores:

Vinícius Villa e Vila

Patricia Angélica Alves Marques

## | Revisão:

Os autores

## | Diagramação:

Nataly Gayde

## | Capa:

Yago Raphael Massuqueto Rocha

### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

E82 Estratégias para avaliação e manejo em sistemas irrigados / Organizadores Vinícius Villa e Vila, Patricia Angélica Alves Marques. – Ponta Grossa - PR: Atena Editora, 2026.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-258-3936-3

DOI <https://doi.org/10.22533/at.ed.363260502>

1. Agricultura. I. Vila, Vinícius Villa e (Organizador). II. Marques, Patricia Angélica Alves (Organizadora). III. Título.

CDD 630

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

## Atena Editora

📞 +55 (42) 3323-5493

📞 +55 (42) 99955-2866

🌐 [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

✉ [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)

# **CONSELHO EDITORIAL**

## **CONSELHO EDITORIAL**

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Amanda Vasconcelos Guimarães – Universidade Federal de Lavras  
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Ariadna Faria Vieira – Universidade Estadual do Piauí  
Prof. Dr. Arinaldo Pereira da Silva – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará  
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás  
Prof. Dr. Cirênio de Almeida Barbosa – Universidade Federal de Ouro Preto  
Prof. Dr. Cláudio José de Souza – Universidade Federal Fluminense  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Daniela Reis Joaquim de Freitas – Universidade Federal do Piauí  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup>. Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco  
Prof. Dr. Elio Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará  
Prof. Dr. Fabrício Moraes de Almeida – Universidade Federal de Rondônia  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Glécilla Colombelli de Souza Nunes – Universidade Estadual de Maringá  
Prof. Dr. Humberto Costa – Universidade Federal do Paraná  
Prof. Dr. Joachin de Melo Azevedo Sobrinho Neto – Universidade de Pernambuco  
Prof. Dr. João Paulo Roberti Junior – Universidade Federal de Santa Catarina  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Juliana Abonizio – Universidade Federal de Mato Grosso  
Prof. Dr. Julio Cândido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará  
Prof. Dr. Sérgio Nunes de Jesus – Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

# APRESENTAÇÃO

## APRESENTAÇÃO

Este E-book apresenta fundamentos e procedimentos teórico-práticos sobre o manejo da irrigação, enfatizando a importância da água como recurso determinante para a produtividade agrícola e para a sustentabilidade dos sistemas de cultivo. Está estruturado em cinco capítulos: i) infiltração de água no solo utilizando infiltrômetro de anel; ii) principais estratégias de manejo da irrigação; iii) comparação entre dados de campo e de satélite para estimativa da demanda hídrica das culturas; iv) avaliação da uniformidade de aplicação de água em pivô central; e v) qualidade de água para irrigação. A organização temática dos capítulos possibilita uma compreensão dos processos que determinam a disponibilidade de água no solo, bem como das ferramentas utilizadas para seu monitoramento e manejo.

O capítulo 1 aborda os princípios e procedimentos relacionados à infiltração de água no solo, com ênfase na utilização do infiltrômetro de anel como método para quantificar a velocidade de infiltração e a velocidade de infiltração básica. São discutidos os principais fatores que controlam o processo. O capítulo descreve as etapas operacionais para a condução do ensaio e a análise dos dados por meio do modelo utilizado para representar matematicamente a infiltração ao longo do tempo. O capítulo 2 trata das principais estratégias utilizadas no manejo da irrigação, destacando os métodos e critérios empregados para definir o momento adequado de irrigar e a quantidade de água a aplicar. A discussão contempla a integração entre fatores como demanda atmosférica, propriedades do solo, exigências hídricas das culturas e capacidade operacional dos sistemas de irrigação, ressaltando a importância de ferramentas em cada estratégia.

O capítulo 3 aborda a comparação entre dados obtidos em campo e informações derivadas de sensoriamento remoto para a estimativa da demanda hídrica das culturas. São discutidos os métodos tradicionais baseados em medições meteorológicas, sensores de umidade do solo e lisímetros, e paralelamente, apresenta-se o avanço do sensoriamento remoto, capaz de estimar evapotranspiração e consumo hídrico em maiores escalas, com ampla cobertura e menor custo operacional. O capítulo 4 apresenta a avaliação da uniformidade de aplicação de água em sistemas de irrigação por pivô central. São descritos os procedimentos envolvidos na avaliação, incluindo o posicionamento adequado dos coletores, o controle das condições ambientais, a verificação do funcionamento do equipamento e a medição precisa dos

# APRESENTAÇÃO

## APRESENTAÇÃO

volumes aplicados. O capítulo 5 aborda a avaliação da qualidade da água destinada à irrigação, destacando a importância da análise de seus parâmetros físicos, químicos e microbiológicos para garantir a adequação do recurso hídrico ao uso agrícola. São discutidos alguns indicadores e as etapas do processo de avaliação, incluindo procedimentos de coleta, preparação das amostras, utilização de equipamentos analíticos e registro dos resultados.

Esperamos que as contribuições reunidas neste E-book auxiliem e despertem o interesse de conhecimento relacionado à agricultura irrigada, especialmente ao manejo da irrigação.

**Organizadores**

# SUMÁRIO

## SUMÁRIO

### **CAPÍTULO 1 ..... 1**

INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO UTILIZANDO INFILTRÔMETRO DE ANEL

**Vinícius Villa e Vila**

**Ana Cláudia Sátiro de Araújo**

**Jessica Sabrina de Castro Couto**

**Tiago Alexandre Rozinholli**

**Fernando Campos Mendonça**

**Marcos Vinicius Folegatti**

**Patricia Angélica Alves Marques**

DOI <https://doi.org/10.22533/at.ed.3632605021>

### **CAPÍTULO 2 ..... 12**

PRINCIPAIS ESTRATÉGIAS DE MANEJO DA IRRIGAÇÃO

**Tiago Alexandre Rozinholli**

**Vinícius Villa e Vila**

**Lucas Santiago Lima**

**Patricia Angélica Alves Marques**

DOI <https://doi.org/10.22533/at.ed.3632605022>

### **CAPÍTULO 3 ..... 24**

COMPARAÇÃO ENTRE DADOS DE CAMPO E DE SATÉLITE PARA ESTIMATIVA DA DEMANDA HÍDRICA DAS CULTURAS

**Lucas Santiago Lima**

**Vinícius Villa e Vila**

**Tiago Alexandre Rozinholli**

**Patricia Angélica Alves Marques**

DOI <https://doi.org/10.22533/at.ed.3632605023>

### **CAPÍTULO 4 ..... 36**

AVALIAÇÃO DA UNIFORMIDADE DE APLICAÇÃO DE ÁGUA EM PIVÔ CENTRAL

**Ana Cláudia Sátiro de Araújo**

**Vinícius Villa e Vila**

**Jessica Sabrina de Castro Couto**

# SUMÁRIO

## SUMÁRIO

**Patricia Angélica Alves Marques**

**Fernando Campos Mendonça**

**Marcos Vinicius Folegatti**

**Sergio Nascimento Duarte**

DOI <https://doi.org/10.22533/at.ed.3632605024>

### **CAPÍTULO 5 ..... 46**

#### QUALIDADE DE ÁGUA PARA IRRIGAÇÃO

**Jessica Sabrina de Castro Couto**

**Vinícius Villa e Vila**

**Ana Cláudia Sátiro de Araújo**

**Patricia Angélica Alves Marques**

**Fernando Campos Mendonça**

**Marcos Vinicius Folegatti**

**Tamara Maria Gomes**

DOI <https://doi.org/10.22533/at.ed.3632605025>

### **ORGANIZADORES ..... 56**



## C A P Í T U L O 1

# INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO UTILIZANDO INFILTRÔMETRO DE ANEL

**Vinícius Villa e Vila**

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGESÁ,  
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/ESALQ, Universidade de São  
Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil

**Ana Cláudia Sátiro de Araújo**

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGESÁ,  
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/ESALQ, Universidade de São  
Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil

**Jessica Sabrina de Castro Couto**

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGESÁ,  
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/ESALQ, Universidade de São  
Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil

**Tiago Alexandre Rozinholli**

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGESÁ,  
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/ESALQ, Universidade de São  
Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil

**Fernando Campos Mendonça**

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGESÁ,  
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/ESALQ, Universidade de São  
Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil

**Marcos Vinicius Folegatti**

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGESÁ,  
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/ESALQ, Universidade de São  
Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil

**Patricia Angélica Alves Marques**

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGESÁ,  
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/ESALQ, Universidade de São  
Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil

**RESUMO:** Através de métodos como o infiltrômetro de anel, é possível determinar parâmetros como a velocidade de infiltração e a velocidade de infiltração básica, que descrevem a dinâmica de entrada da água no solo. A infiltração é influenciada principalmente pela textura, estrutura, porosidade, estabilidade dos agregados, compactação, cobertura vegetal e umidade inicial do solo, fatores que afetam o fluxo de água e a condutividade hidráulica. O procedimento para avaliação inclui escolha e preparo do local, instalação dos anéis concêntricos, abastecimento controlado de água e registro sistemático das leituras. A análise dos dados é realizada por meio do modelo de Kostiakov, que utiliza transformações logarítmicas para ajustar uma equação capaz de representar matematicamente a infiltração acumulada ao longo do tempo. Assim, o estudo da infiltração fornece informações essenciais para o dimensionamento de sistemas de irrigação, manejo da irrigação e a identificação de limitações físicas do solo.

**PALAVRAS-CHAVE:** manejo da irrigação; porosidade do solo; velocidade de infiltração básica.

**ABSTRACT:** Through methods such as the double-ring infiltrometer, it is possible to determine parameters such as the infiltration rate and the basic infiltration rate, which describe the dynamics of water entering the soil. Infiltration is mainly influenced by soil texture, structure, porosity, aggregate stability, compaction, vegetation cover, and initial soil moisture—factors that affect water flow and hydraulic conductivity. The evaluation procedure includes selecting and preparing the site, installing the concentric rings, supplying water in a controlled manner, and systematically recording the measurements. Data analysis is performed using the Kostiakov model, which applies logarithmic transformations to fit an equation capable of mathematically representing cumulative infiltration over time. Thus, the study of infiltration provides essential information for irrigation system design, irrigation management, and the identification of physical limitations within the soil.

**KEYWORDS:** irrigation management; soil porosity; basic infiltration rate

## INTRODUÇÃO

A determinação da infiltração de água no solo é um processo fundamental em estudos hidrológicos, agrícolas e de manejo de recursos hídricos. Ela permite entender como a água penetra da superfície no sentido vertical descendente, para as camadas subsuperficiais do solo, influenciando a disponibilidade de água para as plantas, a recarga de aquíferos e a prevenção de problemas de erosão. Um dos métodos mais utilizados para realizar essa determinação é o uso de infiltrômetros de anel. Além do teste de infiltrômetro de anel, há outros testes, como simuladores de chuva, que também representam a irrigação por aspersão e o infiltrômetro de sulcos que representa a irrigação por sulcos.

Os infiltrômetros de anel são dispositivos simples, projetados para medir a taxa de infiltração de água no solo. Consistem em dois anéis de metal concêntricos podendo ser utilizados para avaliar a capacidade de infiltração do solo em diferentes condições, como em solos de diferentes texturas (areia, argila, silte), em áreas com diferentes coberturas vegetais e em solos sob diferentes graus de compactação. Assim, a determinação da taxa de infiltração é importante para a irrigação principalmente para fazer um correto dimensionamento e manejo do sistema de irrigação adotado.

Com o teste de infiltração de água no solo, obtém-se informações como a velocidade de infiltração (VI) – (mm/h) e a velocidade de infiltração básica (VIB) – (mm/h). A VI é definida como a lâmina de água (volume de água por unidade de área) que atravessa a superfície do solo, por unidade de tempo. No início da infiltração, quando o solo está relativamente seco, a velocidade de infiltração é alta, após algum tempo o gradiente de potencial que era grande, vai reduzindo e a velocidade diminui. À medida que a porosidade do solo vai sendo tomada por água, além do processo de expansão das argilas e contração parcial dos poros, a velocidade de infiltração tende a chegar num ponto que se mantém praticamente constante. E este valor de velocidade, chama-se de VIB.

Logo, a determinação da VIB é única para cada tipo de solo, assim é importante conhecer/determinar este parâmetro para o dimensionamento de projetos de irrigação, bem como de manejo. Este conhecimento permite fazer a correta seleção de emissores no sistema de irrigação, bem como na determinação da vazão e do tempo de irrigação. Assim a água será aplicada a uma taxa inferior ao limite de infiltração, gerando pequenos riscos da água não infiltrar e escoar pelo solo.

## FATORES QUE AFETAM A INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

A infiltração da água no solo é controlada por um conjunto de propriedades físicas, entre as quais a textura, a estrutura, a porosidade e a estabilidade dos agregados exercem papel central. A capacidade de infiltração aumenta com a presença de macroporos, diretamente relacionada ao tamanho das partículas e à organização estrutural do solo. Solos arenosos, com predominância de macroporos, apresentam maiores taxas de infiltração e condutividade hidráulica, enquanto solos argilosos tendem a infiltrar menos. A continuidade e a forma dos poros, bem como a presença de agentes cimentantes (matéria orgânica, óxidos), são determinantes para o movimento da água. Por exemplo, geralmente em solos argilosos a VIB é menor quando comparada a solos arenosos.

A presença de camadas retardadoras no perfil, sejam elas mais argilosas ou mais arenosas, interfere no avanço da frente de umedecimento: camadas de argila reduzem o fluxo por menor condutividade quando saturadas, enquanto camadas

arenosas dificultam o avanço em condições não saturadas. A compactação, comum em áreas manejadas, reduz a porosidade total e principalmente a macroporosidade, diminuindo a infiltração e reduzindo a água disponível às plantas em até 50%. Outro fator relevante é o encrostamento superficial, formado pelo impacto das gotas de chuva que desagregam a superfície, mobilizam partículas finas e obstruem os poros, criando uma camada delgada e adensada que restringe a infiltração, especialmente em solos descobertos.

O tipo de cobertura do solo influencia diretamente o processo: áreas vegetadas mantêm maior macroporosidade, favorecem caminhos preferenciais através das raízes e reduzem o impacto da chuva, resultando em maiores taxas de infiltração. Em solos sem cobertura, reduções de até 85% podem ocorrer em comparação a solos protegidos por palhada. A umidade inicial do solo também condiciona o processo: em solo seco, o alto gradiente de potencial gera elevada infiltração inicial, que diminui conforme o solo se aproxima da saturação.

Além disso, a infiltração está relacionada à capacidade de armazenamento de água, definida entre a Capacidade de Campo (CC) e o Ponto de Murcha Permanente (PMP), limites que determinam a Capacidade de Água Disponível (CAD). Estas propriedades variam com a proporção e a distribuição de macro e microporos, sendo influenciadas pela textura, tipo de argila, densidade, estrutura e teor de matéria orgânica. Assim, os fatores físicos, estruturais e de manejo interagem de forma complexa para determinar a taxa de infiltração e o comportamento hídrico do solo.

## PROCEDIMENTOS

Os materiais necessários para a determinação da infiltração de água no solo com infiltrômetro de anel incluem infiltrômetros de anel, marreta de borracha ou de ferro, cronômetro ou relógio, mangueira ou balde de água, pá ou enxada, régua graduada em milímetros, além de pranchetas com folhas de registro e materiais de anotação como canetas, lápis e borracha. Em que os procedimentos para determinação envolvem cinco principais passo: Escolha do local, preparo do local, montagem do infiltrômetro de anel, aplicação de água e registro de dados (Figura 1).

- I. **Escolha do local:** Um local representativo e homogêneo é selecionado para a realização das medições. A escolha do local deve levar em consideração as características do solo, da vegetação e do relevo.
- II. **Preparação do solo:** O solo ao redor do local escolhido é preparado, limpando a área que será instalada os anéis, removendo a vegetação presente. É importante garantir que não haja compactação excessiva ao redor do anel.

- III. Montagem do infiltrômetro de anel:** O infiltrômetro de anel é inserido no solo de forma que a parte superior do anel fique nivelada com a superfície do solo. Qualquer vazamento ao redor do anel deve ser evitado. Os anéis possuem diâmetro de 50 e 15 cm (sendo o menor dentro do maior), ambos com aproximadamente 30 cm de altura, devem ser cravados no solo a aproximadamente 10 cm de profundidade. Após isso, deve-se fazer a impermeabilização do interior dos anéis, evitando que a água infiltre antes do início do ensaio, lembrando ainda de se fixar uma régua na parede do anel interno para a conferência de nível.
- IV. Aplicação de água:** Inicia-se o abastecimento de água do cilindro externo e interno (ainda com a proteção), ressaltando que a finalidade do cilindro externo é de criar um ambiente padrão para a infiltração do anel interno, reduzindo assim sua infiltração lateral. A água é aplicada no interior do anel de forma controlada, geralmente com um dispositivo que permite um fluxo constante. Com o auxílio de um cronômetro, inicia-se a contagem de tempo, no mesmo momento em que se retira o material que impermeabiliza o fundo do cilindro interno, lembrando-se de realizar a leitura do nível da água na régua.
- V. Registro de dados:** Durante o processo de infiltração, o tempo necessário para que a água penetre completamente no solo é registrado, juntamente com a quantidade de água aplicada. Esses dados serão usados para calcular a velocidade infiltração, que é calculada dividindo a quantidade de água aplicada pelo tempo necessário para a infiltração. Recomenda-se que as leituras sejam realizadas nos intervalos apresentados no quadro a seguir, entretanto, caso a velocidade de infiltração seja muito alta ou baixa, novos valores de tempo podem ser utilizados, desde que eles sejam anotados no Quadro de dados do ensaio (Quadro 1).



Figura 1. Representação do teste de infiltração de água no solo utilizando anéis concêntricos. Fonte: Jesuz e Ferreira, 2022.

Quadro 1. Quadro exemplo para registro dos dados a campo.

Tempo acumulado (min)	Horas	Intervalo de tempo (min)	Leitura da régua		Infiltração acumulada (cm)
			Instantânea	Diferença	
0					
1					
3					
5					
10					
15					
25					
35					
50					
65					
95					
125					
155					

Deve-se lembrar de realizar a correção para os momentos em que a água no reservatório for reposta. As leituras devem ocorrer até que a velocidade de infiltração converja para um valor constante e que ele se repita por ao menos três vezes consecutivas.

## ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

Após realizar o teste de infiltração em campo e registrar os valores de tempo e infiltração acumulada, inicia-se o processo de determinação da equação que descreve o comportamento da água entrando no solo. Esse procedimento utiliza o modelo potencial de Kostiakov, que relaciona a infiltração acumulada ao tempo por meio de uma equação empírica.

O primeiro passo consiste em organizar todos os valores medidos em uma tabela contendo o tempo e a infiltração acumulada. Em seguida, para cada observação (exceto o tempo zero), é necessário calcular os valores do logaritmo do tempo e do logaritmo da infiltração. Esses valores são importantes porque a equação de Kostiakov, originalmente expressa em forma potencial, é convertida para forma linear por meio de logaritmos, permitindo que se aplique uma regressão linear simples.

Assim, cria-se um quadro com as seguintes colunas: tempo, infiltração acumulada, logaritmo do tempo, logaritmo da infiltração, o produto entre esses dois logaritmos e, por fim, o quadrado do logaritmo do tempo (Quadro 2), representados pelas letras X e Y, respectivamente. Depois que o quadro é preenchido com todas as observações, são calculados os somatórios e médias das colunas de logaritmo do tempo, logaritmo da infiltração, produto entre logaritmos e quadrado do logaritmo do tempo.

Quadro 2. Quadro exemplo para o cálculo dos parâmetros X, Y, X\*Y e X<sup>2</sup>.

Tempo acumulado - T (min)	Infiltração acumulada - I (cm)	X = Log T	Y = Log I	X * Y	X <sup>2</sup>
0					
1					
3					
5					
10					
15					
25					
35					
50					
65					
95					
125					
155					
Somatório					
Média					

Com esses somatórios e médias de X, Y, X\*Y e X<sup>2</sup>, aplica-se o método dos mínimos quadrados para ajustar a linha que melhor representa a relação entre o tempo e a infiltração em escala logarítmica. A partir desse ajuste, obtém-se os valores dos coeficientes da equação, que correspondem ao parâmetro "n ou B" (que indica a inclinação da reta na escala logarítmica) e ao parâmetro "A", que é convertido posteriormente para o valor de "K", o outro coeficiente da equação de infiltração.

$$\begin{array}{c}
 I = K \cdot T^n \quad \text{Modelo potencial} \\
 \log I = \log K + n \cdot \log T \quad \text{Modelo linear} \\
 \underbrace{\log I}_{Y} = \underbrace{\log K}_{A} + \underbrace{n \cdot \log T}_{B \cdot X}
 \end{array}$$

O coeficiente angular (B) e a interseção (A) da reta são dados por:

$$\boxed{B = n}$$

$$n = \frac{\sum xy - \frac{\sum x \sum y}{N}}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{N}}$$

$$\boxed{A = \bar{Y} - B \bar{X}}$$

$$\boxed{\begin{aligned} \log K &= A \\ K &= \text{ant log } A = 10^A \end{aligned}}$$

Após determinar esses parâmetros, a equação final do modelo de Kostiakov é construída (Equação 1). Essa equação representa a relação entre a infiltração acumulada e o tempo para o solo analisado, descrevendo o comportamento da água infiltrando ao longo do tempo. Com ela, é possível traçar a curva de infiltração acumulada e comparar diferentes solos, tratamentos ou condições de manejo. A representação gráfica da infiltração é apresentada na Figura 2.

$$I(\text{mm}) = 10 \cdot K \cdot T^n$$

Equação 1

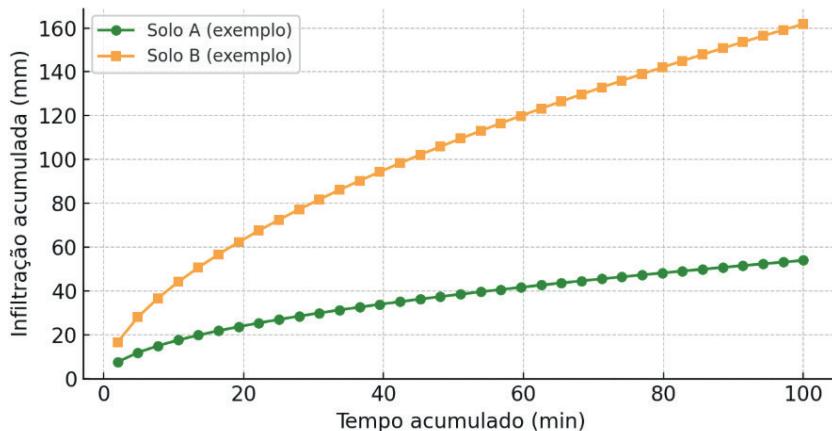


Figura 2. Representação da curva de infiltração de água no solo para dois tipos de solo. Solo A: Argiloso; Solo B: Arenoso.

Depois de obtida a equação de infiltração, o próximo passo é determinar a VI, que representa a taxa com que a água penetra no solo em cada instante. Essa velocidade não é constante; ela começa alta no início do teste e vai diminuindo à medida que o tempo passa, até se aproximar da VIB. A VI é determinada considerando a relação matemática entre a infiltração acumulada e o tempo, e pode ser estimada com base na variação da infiltração ao longo dos intervalos de tempo analisados (Equação 2). A representação gráfica da velocidade de infiltração é apresentada na Figura 3.

$$VI(\text{mm/h}) = 10 \cdot n \cdot 60 \cdot K \cdot T^{n-1}$$

Equação 2

Quando três leituras consecutivas de 30 minutos apresentarem valores muito semelhantes, considera-se que o solo atingiu sua condição de infiltração estável, encerrando-se o teste. A quantidade de água infiltrada nesse período é então convertida para valores horários para expressar a VIB. EX: ocorrendo uma leitura média de 1,3 cm em 30 minutos, a VIB desse solo será de 26 mm/h. Esse valor final

é fundamental para estudos de irrigação e manejo, pois indica a capacidade real do solo de absorver água em regime permanente, sendo útil para o dimensionamento de sistemas, avaliação de impactos e diagnóstico de condições estruturais do solo.

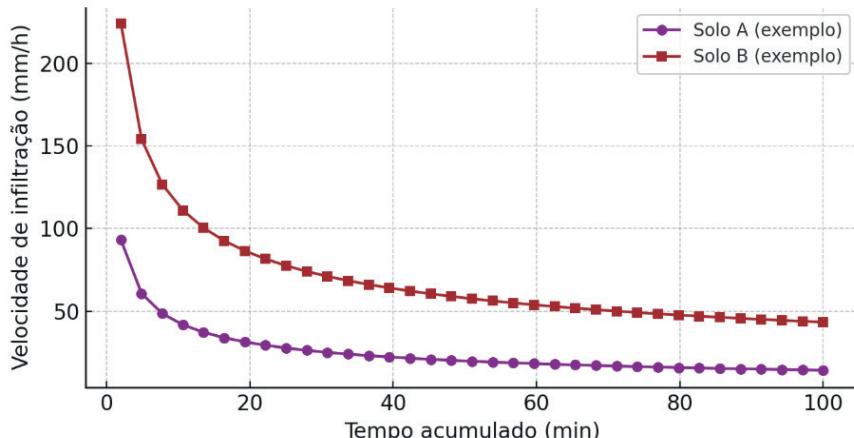


Figura 3. Representação da curva de velocidade de infiltração de água no solo para dois tipos de solo. Solo A: Argiloso; Solo B: Arenoso

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A avaliação de infiltração de água no solo constitui uma ferramenta essencial para compreender o comportamento físico, hidráulico e estrutural dos diferentes perfis de solo, fornecendo subsídios fundamentais para o dimensionamento de sistemas e o manejo adequado da irrigação. A determinação da infiltração acumulada, da velocidade de infiltração e da velocidade de infiltração básica permite identificar limitações físicas, como compactação, baixa porosidade ou restrições estruturais que comprometem a redistribuição da água no perfil, bem como auxiliar na correta seleção dos emissores dos sistemas de irrigação. Além disso, o uso de modelos como o de Kostiakov oferece maior precisão na caracterização da dinâmica da água no solo, contribuindo para diagnósticos mais consistentes e para a adoção de práticas que promovam maior eficiência hídrica.

## REFERÊNCIAS

- Jesuz, C. R., Ferreira, M. E. 2022. Australian Journal of Crop Science. Estimating water infiltration rate in oxisols under pasture and agriculture management in the Brazilian Savanna with support of a Drone-RGB onboard sensor. 16, 233-243.

Bernardo, S.; Soares, A.A; Mantovani, E.C. 2006. Manual de Irrigação. Ed. Universidade Federal de Viçosa. 8 ed. 625p.

Brandão, V.S; Pruski, F. F.; Silva, D. D. 2003. Infiltração da água no solo, Ed. Universidade Federal de Viçosa 2 ed. 98p.

Folegatti, M. V. 2002. Manejo da Água em Sistemas Agrícolas. Apostila LER. 120p.

Reichardt, K. 1990 A água em sistemas agrícolas. Editora Manole Ltda, São Paulo. 188p.



## C A P Í T U L O 2

# PRINCIPAIS ESTRATÉGIAS DE MANEJO DA IRRIGAÇÃO

**Tiago Alexandre Rozinholli**

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGES, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/ESALQ, Universidade de São Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil.

**Vinícius Villa e Vila**

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGES, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/ESALQ, Universidade de São Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil.

**Lucas Santiago Lima**

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGES, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/ESALQ, Universidade de São Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil.

**Patricia Angélica Alves Marques**

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGES, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/ESALQ, Universidade de São Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil.

**RESUMO:** A adoção de práticas corretas de manejo da irrigação contribui para reduzir riscos climáticos, otimizar a reposição hídrica, evitar desperdícios e assegurar condições favoráveis ao crescimento das plantas ao longo de todo o ciclo produtivo. A determinação do momento de irrigar e da quantidade de água a aplicar depende da integração entre fatores como demanda atmosférica, características do solo, exigências da cultura e capacidade do sistema de irrigação. Ferramentas como a evapotranspiração, tensiometria, sensores de umidade, balanço hídrico e monitoramento de variáveis climáticas fornecem informações essenciais para essas decisões. Em cada categoria, existem equipamentos que variam quanto a precisão, praticidade e custo. Quando baseado em solo, o manejo da irrigação busca monitorar o conteúdo real de água, enquanto o manejo via clima busca calcular a evapotranspiração da cultura. Métodos baseados exclusivamente em

planta são os menos comuns na produção agrícola comercial, por exigir alta tecnicidade e equipamentos custosos. O manejo adequado possibilita reduzir perdas por evaporação e percolação profunda, minimizar estresse hídrico, preservar a produtividade e promover sustentabilidade ambiental.

**PALAVRAS-CHAVE:** eficiência hídrica; estresse hídrico; evapotranspiração.

**ABSTRACT:** The adoption of proper irrigation management practices helps reduce climatic risks, optimize water replenishment, avoid waste, and ensure favorable conditions for plant growth throughout the entire production cycle. Determining when to irrigate and how much water to apply depends on the integration of factors such as atmospheric demand, soil characteristics, crop requirements, and the capacity of the irrigation system. Tools such as evapotranspiration, tensiometry, moisture sensors, water balance, and climate monitoring provide essential information for these decisions. Within each category, there are instruments that vary in precision, practicality, and cost. When based on soil, irrigation management focuses on monitoring the actual water content, whereas climate-based management seeks to calculate crop evapotranspiration. Methods based solely on plant indicators are less common in commercial agriculture due to their high technical requirements and costly equipment. Proper irrigation management reduces losses from evaporation and deep percolation, minimizes water stress, preserves productivity, and promotes environmental sustainability.

**KEYWORDS:** water efficiency; water stress; evapotranspiration.

## INTRODUÇÃO

A agricultura irrigada ocupa um papel essencial no cenário produtivo mundial, contribuindo significativamente para o aumento da oferta de alimentos, a estabilidade dos sistemas agrícolas e a redução dos riscos associados à variabilidade climática. Entretanto, irrigar não significa apenas aplicar água: significa aplicar a quantidade certa, no momento adequado, com a frequência correta e de forma compatível com as condições ambientais, do solo e da planta. O manejo da irrigação é fundamental para elevar a produtividade das culturas cultivadas, permitindo maior intensificação da agricultura e contribuindo para a segurança alimentar global. Contudo, existe uma preocupação geral com o cenário de mudanças climáticas levando ao agravamento da escassez de água em cenários futuros. Nesse contexto, o manejo da irrigação surge como um conjunto de práticas científicas e técnicas que permitem ao produtor tomar decisões assertivas sobre quando e quanto irrigar (Bernardo et al., 2019).

No passado, a irrigação era baseada em percepções empíricas, geralmente associadas à aparência visual das plantas ou à frequência fixa de irrigação. Hoje, dispõe-se de diferentes técnicas que permitem otimizar o uso da água, sendo o

manejo da irrigação estruturado em três grandes estratégias: em solo, clima e planta (Zhao et al., 2023). A operação de manejo da irrigação baseada em solo usualmente utiliza metodologias para a mensuração da umidade do solo. Por outro lado, as técnicas de irrigação guiadas por clima frequentemente recorrem ao uso dos dados climáticos associados a fórmulas para a obtenção da evapotranspiração da cultura e do balanço hídrico climatológico. Os métodos de manejo baseados em planta, que interpreta respostas fisiológicas e biofísicas das culturas como indicadores diretos de estresse hídrico são menos comuns, pois muitas destas abordagens requerem equipamentos caros ou operações trabalhosas com elevada tecnicidade para a determinação do estresse hídrico. No entanto, algumas das metodologias baseadas em planta possuem a vantagem de avaliarem o estresse hídrico em tempo real e com precisão satisfatória (Levin e Nackley, 2021).

Cada uma dessas estratégias possui fundamentos, equipamentos, vantagens, limitações e formas específicas de implementação. Todas as estratégias evidenciam a necessidade de ferramentas que permitam reduzir desperdícios, melhorar a sustentabilidade dos sistemas irrigados e aumentar a produtividade da água, isto é, produzir mais com menos. Além de reduzir custos de produção e evitar perdas por estresse hídrico ou encharcamento, o manejo adequado evita problemas secundários como salinização, lixiviação de nutrientes, compactação do solo e redução da eficiência dos sistemas de irrigação. No entanto, apesar dos avanços tecnológicos, desafios importantes persistem. Pequenos e médios produtores ainda enfrentam limitações no acesso a equipamentos, assistência técnica e capacitação; muitos sistemas irrigados operam com baixa eficiência e utilizam calendários fixos de irrigação. Por esse motivo, torna-se indispensável a popularização dessas estratégias em diferentes escalas produtivas, garantindo que produtores de todos os níveis tenham acesso aos conhecimentos das estratégias, ferramentas para implementar um manejo de irrigação mais eficiente, econômico e sustentável adaptado a sua realidade.

## MANEJO DA IRRIGAÇÃO VIA SOLO

O manejo via solo baseia-se na avaliação direta da água presente no perfil do solo, seja medindo seu conteúdo volumétrico ou sua tensão matricial. O cálculo da reposição hídrica por meio de metodologias baseadas em solo utiliza sensores para a mensuração da umidade do solo, compreendendo uma variedade de equipamentos, desde os mais simples e de baixo custo até aos mais tecnológicos e caros. No entanto, a finalidade destes equipamentos é similar, em que se busca monitorar o potencial de água no solo ou o conteúdo real de água no solo (Bwambale et al., 2022).

Entre os sensores estão os equipamentos de capacidade (FDR), reflectometria no domínio do tempo (TDR), sensores dielétricos, blocos porosos, tensiômetros e medidores de resistência. Cada sensor possui faixa de atuação específica, profundidade recomendada e resposta diferenciada conforme o tipo de solo. A instalação dos equipamentos deve ser feita com extremo cuidado, garantindo contato íntimo entre o sensor e o solo. Para culturas perenes, os sensores são colocados nas principais zonas de absorção radicular; para culturas anuais, instalam-se a profundidades correspondentes aos estágios iniciais, intermediários e finais do ciclo. A coleta de dados pode ocorrer de forma manual, com leituras diretas no visor dos sensores, ou automaticamente, por meio de *dataloggers* que enviam as informações para sistema remoto. A Figura 1 apresenta alguns exemplos de sensores utilizados no manejo via solo.

Os sensores mais simples e comuns são os tensiômetros, dispositivos longos e com uma cápsula porosa na extremidade. Como o nome sugere, são capazes de mensurar grandezas relacionadas à tensão com que as plantas exercem para absorver a água disponível no solo. Diante disso, nas últimas décadas houve o desenvolvimento de novas tecnologias que se baseiam nas propriedades eletromagnéticas do solo para a obtenção da umidade. O TDR consiste em uma sonda que envia um pulso elétrico, calculando as propriedades dielétricas do solo de acordo com o tempo de reflexão do pulso ao ponto de emissão. Como as propriedades dielétricas do solo podem variar de acordo com a quantidade de água, o dispositivo é capaz de estabelecer uma relação direta entre umidade do solo e o tempo de reflexão do impulso. O FDR, por sua vez, é uma sonda de proporções semelhantes ao TDR. Também mensura a umidade do solo de acordo com suas propriedades dielétricas, mas por meio da emissão de uma onda eletromagnética em diferentes frequências. Quanto maior a quantidade de água, menor a frequência detectada pelo sensor, estimando assim a umidade do solo.

Além da comparação com limites críticos como capacidade de campo, ponto de murcha permanente e ponto de reposição, o manejo via solo permite ainda que o produtor avalie a dinâmica da água ao longo do perfil, identificando camadas com maior retenção, zonas com drenagem excessiva ou regiões onde as raízes não estão explorando adequadamente o solo. Sensores instalados em múltiplas profundidades possibilitam compreender o avanço da frente de molhamento após a irrigação e monitorar a distribuição vertical da umidade, garantindo que a água aplicada realmente alcance a zona radicular ativa. Da mesma forma, ao registrar leituras ao longo do tempo, é possível estimar a frequência ideal de irrigação, definir lâminas mais precisas, evitar percolação profunda e reduzir perdas por evaporação superficial.

O manejo via solo também contribui para o entendimento de propriedades importantes, como a taxa de infiltração e a capacidade de armazenamento hídrico,

que variam significativamente entre diferentes tipos de solo e podem ser alteradas ao longo das safras devido a práticas de preparo, compactação ou acúmulo de matéria orgânica. Apesar de suas vantagens, o método exige atenção do usuário, pois sensores mal instalados, com má conexão ao solo ou instalados em locais não representativos da área podem gerar leituras incorretas. Assim, o sucesso dessa estratégia depende tanto do correto posicionamento e funcionamento dos sensores quanto da interpretação técnica dos dados, reforçando a necessidade de capacitação do produtor e acompanhamento contínuo das condições do solo.



Figura 1. Equipamentos utilizados no manejo da irrigação via solo. A: Tensiômetros; B: watermark; C: FDR. Fonte: Irriga Global, 2021.

## MANEJO DA IRRIGAÇÃO VIA CLIMA

O manejo da irrigação baseado no clima fundamenta-se no princípio de que a demanda hídrica de uma cultura pode ser estimada a partir das condições atmosféricas. O elemento central dessa estratégia é o cálculo da Evapotranspiração de Referência (ET<sub>0</sub>), que representa a perda de água por evaporação do solo e transpiração de uma vegetação padrão bem irrigada.

Existem duas formas principais de estimar a ET<sub>0</sub>: por meio de estações meteorológicas, que coletam continuamente variáveis climáticas, sendo considerado mais robusto, e por meio do Tanque Classe A, um método mais simples (Figura 2).

O Tanque Classe A, consiste em um reservatório circular de aproximadamente 1,21 m de diâmetro e 25 cm de altura, preenchido com água e instalado sobre uma base nivelada, cercado por um quebra-vento a uma distância padronizada. A evaporação diária da água é medida por meio de uma régua de precisão, e os valores

obtidos são convertidos em ETo utilizando um coeficiente de correção denominado coeficiente do tanque ( $K_p$ ), que varia de acordo com as condições de instalação, velocidade do vento e ambiente ao redor. Embora menos preciso do que métodos baseados em equações meteorológicas completas, o Tanque Classe A oferece resultados acessíveis, sendo empregado em propriedades agrícolas, especialmente onde não há estações meteorológicas disponíveis.

O cálculo da ETc por meio do Tanque Classe A envolve três etapas principais: medir a evaporação diária do tanque, converter essa evaporação em ETo utilizando o coeficiente do tanque ( $K_p$ ) e, finalmente, multiplicar a ETo pelo coeficiente de cultura ( $K_c$ ) para obter a evapotranspiração da cultura. O procedimento inicia-se com a leitura diária da lâmina evaporada no Tanque Classe A, realizada por uma régua limnimétrica instalada sobre o tanque. Essa leitura indica em milímetros a quantidade de água evaporada durante o período. Para transformar o valor observado na evaporação do tanque (Epan) na evapotranspiração de referência (ETo), é necessário aplicar o coeficiente do tanque ( $K_p$ ), que varia geralmente entre 0,35 e 0,85, dependendo das condições de instalação, velocidade do vento, sombreamento e albedo da superfície ao redor (Equação 1). Ressalta-se que existem várias metodologias para o cálculo de  $K_p$ , mas estudos sugerem que um  $K_p$  fixo de 0,7 aparenta ser uma opção prática e com desempenho satisfatório (Cunha et al., 2013; Sentelhas e Folegatti, 2003). Como diferentes culturas apresentam diferentes características fisiológicas e distintas taxas de consumo hídrico ao longo do ciclo, é preciso ajustar a ETo por meio do  $K_c$  (Equação 2), para a obtenção da Evapotranspiração da Cultura (ETc).

$$ETo = Epan \cdot K_p$$

Equação 1

$$ETc = ETo \cdot K_c$$

Equação 2

As estações meteorológicas constituem o método mais utilizado, pois medem variáveis como temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar, velocidade do vento e pressão atmosférica. Esses dados são utilizados em equações para o cálculo da ETo, como a de Penman-Monteith FAO-56, considerada referência mundial. A instalação das estações deve seguir critérios técnicos, posicionando os sensores em áreas abertas, afastadas de obstáculos que alterem o fluxo de vento ou a incidência solar, e em superfícies representativas da região. A partir da ETo, assim como utilizando o tanque classe A, determina-se a ETc, utilizando-se valores de  $K_c$  específicos para cada espécie e estágio fenológico (Equação 2). Dessa forma, a ETc expressa a quantidade de água efetivamente utilizada pela cultura em determinado período, permitindo ao produtor estimar a lâmina diária ou semanal que deverá ser reposta via irrigação. A partir desse valor, é possível ajustar o manejo considerando

a eficiência do sistema de irrigação, a profundidade efetiva das raízes, a precipitação útil e os limites de armazenamento do solo.

A ET<sub>o</sub> pode ser estimada por diferentes equações desenvolvidas ao longo do tempo por diversos autores, cada uma baseada em fundamentos físicos, empíricos ou combinados. Embora atualmente o método padrão recomendado internacionalmente seja o Penman-Monteith FAO-56 (Allen et al., 1998). Cada método exige um conjunto específico de variáveis climáticas, o que influencia tanto sua precisão quanto sua aplicabilidade prática em campo. O método Penman-Monteith FAO-56 é considerado o mais robusto e completo, pois integra variáveis energéticas e aerodinâmicas. Para seu cálculo, são necessários dados de radiação solar, temperatura do ar (máxima e mínima), velocidade do vento, umidade relativa e pressão atmosférica (Equação 3). Por combinar aspectos físicos do balanço de energia com características da difusão do vapor d'água, esse método é o mais preciso, porém também o que exige maior número de sensores.

$$ET_o = \frac{0,408 s(Rn - G) + \gamma \frac{900 U_2 (e_s - e_a)}{T + 273}}{s + \gamma(1 + 0,34 U_2)}$$
Equação 3

em que ET<sub>o</sub> é a evapotranspiração de referência, Rn é a radiação líquida total diária ( $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$ ); G é o fluxo de calor no solo ( $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$ ); γ = é a constante psicrométrica ( $kPa\ ^\circ C^{-1}$ ); T é a temperatura média do ar ( $^\circ C$ ); s é a velocidade do vento a 2m de altura ( $m\ s^{-1}$ ); e<sub>s</sub> é a pressão de saturação de vapor (kPa); e<sub>a</sub> é a pressão parcial de vapor (kPa); e<sub>s</sub>-e<sub>a</sub> é a declividade da curva de pressão de vapor na temperatura do ar ( $kPa\ ^\circ C^{-1}$ ).

Outro método é o de Hargreaves-Samani, desenvolvido como alternativa prática em condições em que apenas dados de temperatura estão disponíveis. Nessa equação, a ET<sub>o</sub> é estimada com base na temperatura média diária, temperatura máxima, temperatura mínima e na radiação extraterrestre calculada em função da posição geográfica. Trata-se de um método empírico, simples e bastante útil em regiões com escassez de informações meteorológicas completas.

O método Priestley-Taylor é outro importante modelo, aplicável especialmente em regiões úmidas ou onde a limitação de dados impede o uso de equações mais complexas. Ele utiliza como principais variáveis a radiação líquida e a temperatura do ar, ajustando a evapotranspiração por meio de um coeficiente empírico. Por depender menos de informações aerodinâmicas, torna-se particularmente útil em superfícies uniformes e com boa disponibilidade hídrica. O método Blaney-Criddle, também empírico, baseia-se na temperatura média diária e na porcentagem de horas de luz do dia ao longo do mês. Sua aplicação é recomendada somente em

condições climáticas específicas, geralmente em zonas temperadas, sendo menos indicado em regiões tropicais com variabilidade climática acentuada.



Figura 2. Exemplo de uma estação meteorológica e de tanque classe A utilizado na determinação do ET<sub>o</sub>.

A seguir é apresentado um exemplo do método via clima através do balanço hídrico. Este método combina o processo de cálculo da evapotranspiração com as propriedades hídricas do solo. Primeiramente, calcula-se a capacidade de água disponível (CAD) nos solo e a disponibilidade real de água (DRA), a partir da multiplicação com o fator de disponibilidade hídrica da cultura (Equações 4 e 5).

$$\text{CAD} = \frac{(\text{Ucc} - \text{Upmp})}{10} \cdot \text{ds} \cdot \text{z}$$

Equação 4

$$\text{DRA} = \text{CAD} \cdot \text{f}$$

Equação 5

em que Ucc é a umidade da capacidade de campo (%); Upmp é a umidade do ponto de murcha permanente (%); ds é a densidade do solo (g/cm<sup>3</sup>); z é a profundidade radicular da cultura (cm), f é o coeficiente adimensional de disponibilidade hídrica, variando de 0 a 1 e que pode ser obtido na literatura específico para cada cultura.

O Quadro 1 apresenta um exemplo de cronograma de irrigação de acordo com o balanço hídrico baseado em dados climáticos.

Quadro 1. Exemplo do manejo da irrigação utilizando o balanço hídrico, considerando um solo com DRA = 39 mm

Dia	ETc (mm)	Chuva (mm)	Irrigação (mm)	DRA inicial (mm)	DRA final (mm)
1	5	0	0	39	34
2	6	0	0	34	28
3	5	0	0	28	23
4	4	0	0	23	19
5	4.5	0	0	19	14.5
6	6	0	0	14.5	8.5
7	5.5	0	30.5	39	33.5
8	5.5	0	0	33.5	28
9	5.5	45	0	39	33.5
10	6	0	0	33.5	27.5

## MANEJO DA IRRIGAÇÃO VIA PLANTA

O manejo da irrigação baseado na planta assume que a própria planta é o melhor indicador de sua condição hídrica. Em vez de medir a demanda atmosférica ou o conteúdo de água no solo, esse método monitora respostas fisiológicas e morfológicas da planta que indicam estresse hídrico, permitindo ajustes rápidos e altamente precisos na irrigação. Essa estratégia se apoia em parâmetros como potencial hídrico foliar, temperatura da folha, taxa de crescimento, condutância estomática, variáveis espectrais e sinais biofísicos detectados por sensores ópticos e térmicos.

As metodologias para a determinação do estresse hídrico baseado em planta são os menos usuais na produção agrícola, sendo mais restrito ao campo da pesquisa até o presente momento. Isto se deve ao fato de que estas metodologias frequentemente requerem equipamentos de custo exacerbado ou procedimentos que exigem alta tecnicidade. O manejo via planta pode ser realizado por meio de instrumentos mais avançados, como câmeras térmicas, sensores infravermelhos, medidores portáteis de potencial hídrico (câmara de Scholander), fluorômetros, clorofilômetros, entre outros. A instalação e operação variam conforme o equipamento.

A alternativa mais acessível é o cálculo do conteúdo de água relativo (Relative Water Content, RWC) nas folhas (Equação 6), descrito por Barrs e Weatherley (1962). Todavia, a obtenção do RWC é demorada considerando o contexto do manejo da irrigação, sendo mais utilizada em pesquisas que buscam avaliar o conteúdo hídrico no tecido vegetal no decorrer do tempo.

$$RWC(\%) = \frac{FW - DW}{TW - DW} \cdot 100$$

Equação 6

em que FW refere-se ao peso da folha fresca; DW é o peso da folha seca após 24 horas em estufa a 105 °C; TW é o peso da folha túrgida, 24 horas após submersão em água destilada.

A câmara de Scholander (Figura 3) é um equipamento utilizado para medir o potencial hídrico da planta, permitindo avaliar de forma direta o nível de estresse hídrico. Seu funcionamento baseia-se no equilíbrio entre a pressão negativa existente dentro dos tecidos vegetais e uma pressão positiva aplicada externamente. Para realizar a medição, remove-se um pedaço da planta, geralmente um pedaço de folha com pecíolo ou apenas o pecíolo, preferencialmente no período mais representativo do estresse hídrico, como antes do amanhecer (potencial hídrico base). O pecíolo é inserido dentro da câmara, deixando sua extremidade cortada para fora, enquanto o restante da folha fica totalmente vedado no interior do equipamento. Quando a câmara é pressurizada, o operador aumenta gradualmente a pressão interna até o momento em que se observa o surgimento de um pequeno filme de água na extremidade exposta do pecíolo. Essa ocorrência indica que a pressão aplicada externamente igualou a força de sucção exercida pelos tecidos da planta, permitindo assim a leitura do potencial hídrico



Figura 3. Câmera de Scholander utilizada para a determinação do potencial hídrico foliar.

A obtenção dos dados envolve medições realizadas em horários específicos, especialmente em períodos de maior demanda evaporativa, pois é nesses momentos que o estresse hídrico se manifesta com maior clareza. Os sensores compararam a temperatura ou o comportamento fisiológico da planta com referências pré-

estabelecidas, como índices térmicos de estresse (CWSI), curvas de potencial hídrico e variações espetrais. Com base nesses indicadores, o produtor pode determinar se a planta está utilizando mais água que o solo pode fornecer, se há restrição hídrica e qual é o momento ideal para irrigar. Embora seja uma estratégia extremamente sensível e precisa, sua limitação está no custo de alguns equipamentos e na necessidade de interpretação técnica dos resultados. Entretanto, com a popularização de sensores portáteis e drones, o manejo via planta tem se tornado cada vez mais acessível, consolidando-se como uma abordagem moderna, eficiente e focada no bem-estar fisiológico da cultura. Contudo, é um equipamento de alto custo, além de ser um processo destrutivo e muito trabalhoso.

Com a finalidade de evitar a destruição das amostras e desenvolver um processo mais prático e rápido utilizando metodologias baseadas em planta, técnicas recentes utilizando sensoriamento remoto com câmeras termais e sensores infravermelho estão sendo desenvolvidas, sendo projetos promissores uma vez que possuem a capacidade de determinar o estresse hídrico das plantas em tempo real, com o manejo da irrigação exercido de forma mais precisa.

## PERSPECTIVAS FUTURAS

O futuro do manejo da irrigação aparenta se tornar cada vez mais tecnológico e otimizado, principalmente no contexto da Inteligência Artificial e suas subáreas, como o Aprendizado de Máquina. Neste sentido, existem avanços recentes na criação de sistemas de suporte de decisão que utilizam modelos matemáticos que descrevem o desenvolvimento da cultura e a disponibilidade de água do solo com o intuito de prever a lâmina do manejo da irrigação (Mokhtar et al., 2023).

Estudos recentes com sistemas de irrigação inteligentes utilizando a internet das coisas (Internet of Things, IoT) possuem o potencial de transformar o uso da água na agricultura, promovendo um manejo hídrico mais eficiente, redução no consumo de água, maior produtividade e menor impacto ambiental (Obaideen et al., 2022). Prevê-se que modelos de visão computacional permitirão que câmeras termais e sensores infravermelho poderão ser acoplados em Veículos Aéreos não Tripulados (VANT's) para fornecer a necessidade hídrica de plantas em tempo real.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A integração de métodos de monitoramento, como estimativas de evapotranspiração, avaliação da umidade ou tensão no solo e indicadores fisiológicos das plantas, permite decisões mais precisas no manejo da irrigação, contribuindo para sistemas produtivos mais resilientes diante da variabilidade climática e da crescente pressão sobre os recursos hídricos. A adoção dessas práticas em diferentes realidades agrícolas e sua ampla disseminação entre produtores de todos os níveis

reforçam o papel da irrigação bem manejada na construção de uma agricultura sustentável e eficiente.

## REFERÊNCIAS

Barrs, H. D., Weatherley, P. E. A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves. *Australian journal of biological sciences*, 15, 413-428, 1962.

Bernardo, S; Mantovani, E.C; Silva, D.D; Soares, A.A. *Manual de Irrigação*. Viçosa: Editora UFV, 2019.

Bwambale, E., Abagal, F. K., Anornu, G. K. Smart irrigation monitoring and control strategies for improving water use efficiency in precision agriculture: A review. *Agricultural Water Management*, 260, 107324, 2022.

Irriga Global, Sensores de umidade do solo: irrigação eficiente e segurança no campo, 2021. Disponível em: <https://irrigaglobal.com/sensores-de-umidade-do-solo-irrigacao-eficiente-e-seguranca-no-campo/>.

Levin, A., Nackley, L. Principles and practices of plant-based irrigation management. *HortTechnology*, 31, 650-660, 2021.

Mokhtar, A. et al. Prediction of irrigation water requirements for green beans-based machine learning algorithm models in arid region. *Water resources management*, 37, 1557-1580, 2023.

Obaideen, K. et al. An overview of smart irrigation systems using IoT. *Energy Nexus*, 7, 100124, 2022.

Sentelhas, P. C., Folegatti, M. V. Class A pan coefficients ( $K_p$ ) to estimate daily reference evapotranspiration (ET<sub>0</sub>). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 7, 111-115, 2003.

Zhao, H. et al. A review of scientific irrigation scheduling methods. In: 2023 11th International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics). IEEE, 2023.



## C A P Í T U L O 3

# COMPARAÇÃO ENTRE DADOS DE CAMPO E DE SATÉLITE PARA ESTIMATIVA DA DEMANDA HÍDRICA DAS CULTURAS

**Lucas Santiago Lima**

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGES, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/ESALQ, Universidade de São Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil

**Vinícius Villa e Vila**

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGES, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/ESALQ, Universidade de São Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil

**Tiago Alexandre Rozinholl**

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGES, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/ESALQ, Universidade de São Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil

**Patricia Angélica Alves Marques**

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGES, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/ESALQ, Universidade de São Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil

**RESUMO:** A estimativa da demanda hídrica das culturas é um componente essencial para a eficiência do manejo da irrigação, principalmente em contextos de escassez hídrica e necessidade de otimização do uso da água. Tradicionalmente, essa estimativa é realizada a partir de medições em campo, como dados meteorológicos, sensores de umidade do solo e lisímetros, que fornecem alta precisão pontual, porém limitada em escala espacial. Nas últimas décadas, o sensoriamento remoto ganhou protagonismo como fonte de informação para estimar evapotranspiração e consumo hídrico das culturas, permitindo análises em escalas maiores, maior frequência temporal e menor custo operacional. Apesar desses avanços, ainda existe uma lacuna relacionada à comparação objetiva entre esses dois tipos de dados, como de campo e satélite, especialmente no contexto da tomada de decisão para irrigação. Portanto, é necessário entender as vantagens, limitações e complementaridades de ambas as

abordagens, os principais métodos de estimativa da demanda hídrica utilizados atualmente, e como sua integração pode aprimorar a eficiência da irrigação em diferentes sistemas agrícolas.

**PALAVRAS-CHAVE:** dados meteorológicos; evapotranspiração; sensoriamento remoto.

**ABSTRACT:** The estimation of crop water demand is an essential component for efficient irrigation management, particularly in contexts of water scarcity and the need to optimize water use. Traditionally, this estimation is based on field measurements such as meteorological data, soil moisture sensors, and lysimeters, which provide high point-level accuracy but are limited in spatial scale. In recent decades, remote sensing has gained prominence as a source of information for estimating evapotranspiration and crop water consumption, enabling analyses at larger scales, with higher temporal frequency and lower operational cost. Despite these advances, there is still a gap related to the objective comparison between these two types of data, field-based and satellite-based, especially in the context of irrigation decision-making. Therefore, it is necessary to understand the advantages, limitations, and complementarities of both approaches, the main methods currently used to estimate crop water demand, and how their integration can enhance irrigation efficiency in different agricultural systems.

**KEYWORDS:** meteorological data; evapotranspiration; remote sensing.

## INTRODUÇÃO

O manejo eficiente da irrigação é um dos maiores desafios da agricultura, sobretudo diante do aumento da demanda por alimentos, das mudanças climáticas e da crescente pressão sobre os recursos hídricos. Em muitos sistemas agrícolas, o consumo de água destinado à irrigação supera 70% do uso total (Howell, 2001), e estimativas imprecisas da demanda hídrica podem resultar em desperdício, menor produtividade e impactos ambientais significativos. Por isso, compreender quanto e quando aplicar água no sistema produtivo é uma necessidade para alcançar eficiência, sustentabilidade e segurança hídrica.

A demanda hídrica das culturas está diretamente relacionada aos processos de evapotranspiração, que representam a soma da transpiração das plantas e da evaporação da superfície do solo. Estimativas desses processos permitem o correto dimensionamento dos sistemas em função das lâminas de irrigação, e ajustem estratégias de manejo em diferentes etapas fenológicas. Estimar a evapotranspiração envolve variáveis meteorológicas, características da cultura, condições do solo e interações dinâmicas entre planta e atmosfera. Nesse contexto, surgem duas grandes abordagens de obtenção dos dados: métodos baseados em campo e métodos baseados em sensoriamento remoto.

Os métodos tradicionais, baseados em medições em campo, incluem o uso de estações meteorológicas, lisímetros, sensores de umidade do solo e cálculos derivados da equação de Penman-Monteith (Allen et al. 1998). Esses métodos possuem precisão e detalhamento temporal, permitindo ajustes no manejo da irrigação. Contudo, apresentam limitações importantes, como representatividade espacial reduzida, custo de instalação e manutenção, e dependência de infraestrutura e calibração contínua. Em propriedades agrícolas heterogêneas, ou em regiões onde o acesso a equipamentos é limitado, a aplicação exclusiva desses métodos pode resultar em estimativas pouco representativas para toda a área irrigada.

Por outro lado, o advento do sensoriamento remoto oferece uma visão espacial ampla e contínua do território agrícola. Imagens de satélites como Landsat, Sentinel-2 e MODIS permitem estimar variáveis biofísicas essenciais, como índice de vegetação (NDVI), albedo, temperatura de superfície e radiação disponível. Combinando essas informações a modelos específicos, como SEBAL, METRIC e SAFER, é possível derivar estimativas de evapotranspiração real com boa acurácia. A principal vantagem dos dados de satélite está na capacidade de capturar variações espaciais da cultura e do ambiente, permitindo ao produtor identificar zonas de manejo, áreas com déficit hídrico e padrões de consumo ao longo do tempo.

Apesar do grande avanço tecnológico, ainda existem desafios relacionados à resolução espacial e temporal das imagens, cobertura de nuvens, necessidade de calibração com dados locais, além da dependência de modelos matemáticos complexos. Essas questões fazem com que a comparação direta entre dados de campo e dados de satélite seja não apenas relevante, mas necessária. Isso porque, na prática, a tomada de decisão em irrigação não pode depender exclusivamente de um tipo de informação: ambos apresentam forças e limitações, e sua combinação pode resultar em estimativas mais precisas, robustas e operacionalmente eficientes.

## FUNDAMENTOS DA DEMANDA HÍDRICA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO

A demanda hídrica de uma cultura é determinada principalmente pelos processos de evapotranspiração, que representam o consumo real de água pela planta e sua transferência para a atmosfera. A evapotranspiração integra dois mecanismos complementares: evaporação, correspondente à perda de água do solo e de superfícies úmidas; e transpiração, associada ao metabolismo vegetal e ao funcionamento estomático. Compreender esses processos é essencial para o planejamento do manejo da irrigação, uma vez que a lâmina aplicada deve repor a água consumida para evitar estresse hídrico e garantir o desempenho produtivo.

Um dos parâmetros-chave nesse contexto é o coeficiente de cultura ( $K_c$ ), que incorpora características fisiológicas, morfológicas e de cobertura da planta, permitindo ajustar a Evapotranspiração de Referência ( $ETo$ ) ao comportamento real do cultivo. Assim, culturas com maior índice de área foliar, maior atividade estomática ou maior metabolismo tendem a apresentar  $K_c$  mais elevados.

O método padrão recomendado pela *Food and Agriculture Organization* (FAO) para estimar a  $ETo$  é o modelo FAO-56 Penman–Monteith, amplamente utilizado tanto em medições de campo quanto em sistemas automatizados de irrigação e modelos de satélite. A equação integra parâmetros meteorológicos fundamentais, como: radiação solar líquida, velocidade do vento, temperatura do ar, pressão de vapor e umidade relativa, combinando termos aerodinâmicos e energéticos que expressam o balanço de energia entre a superfície vegetada e a atmosfera. Apesar de sua reconhecida precisão, sua aplicação prática depende de medições meteorológicas confiáveis, que nem sempre estão disponíveis em regiões agrícolas de pequeno ou médio porte.

Os fatores que influenciam a demanda hídrica como a evapotranspiração são ambientais, agronômicos e fisiológicos. Atmosfera: temperatura do ar, déficit de pressão de vapor, radiação solar e vento têm influência direta sobre os fluxos de calor e perda de água; Solo: umidade disponível, textura, estrutura e cobertura do solo interferem tanto na evaporação quanto na capacidade da planta em extrair água; Planta: área foliar, arquitetura, estágio fenológico e saúde fisiológica são determinantes para a transpiração; Manejo agrícola: práticas como fertirrigação, densidade de plantio, cobertura morta e controle de plantas daninhas alteram o microclima e o balanço hídrico.

A interação desses fatores torna a estimativa da demanda hídrica um processo complexo, exigindo métodos confiáveis e adaptáveis às condições reais de campo. Nesse sentido, tanto os métodos tradicionais de campo quanto os métodos derivados de imagens de satélite buscam capturar essa variabilidade, cada um com suas respectivas vantagens operacionais.

## MÉTODOS BASEADOS EM DADOS DE CAMPO

Os métodos de estimativa da demanda hídrica baseados em dados de campo representam a abordagem mais tradicional e, em muitos casos, a mais precisa para o manejo da irrigação. Eles se apoiam em medições diretas ou indiretas de variáveis meteorológicas, hídricas e fisiológicas, fornecendo informações detalhadas e com alta resolução temporal. No entanto, apesar da confiabilidade, esses métodos geralmente são limitados em representatividade espacial, exigindo equipamentos específicos, manutenção constante e conhecimento técnico especializado.

As estações meteorológicas automáticas são a principal fonte de dados para o cálculo da ET<sub>0</sub>. Elas fornecem medições contínuas de temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar, velocidade do vento e pressão atmosférica, variáveis fundamentais para aplicação da equação de Penman–Monteith. Sua principal vantagem é a precisão temporal, com dados gerados em intervalos que variam de minutos a horas. Ainda assim, a capacidade dessas estações de representar áreas extensas é limitada. Um único ponto de medição não captura variações microclimáticas presentes em áreas agrícolas heterogêneas, como diferenças de altitude, tipo de solo, sombreamento ou padrões de vento. Assim, extrapolar seus dados para grandes propriedades pode introduzir incertezas consideráveis.

Os lisímetros são considerados o método padrão para medir evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>). Trata-se de equipamentos que isolam um volume de solo e plantas, monitorando diretamente a perda de água por meio de pesagem ou balanço hídrico. Existem dois tipos principais: lisímetros de pesagem, que medem diretamente as variações de massa associadas à evapotranspiração; lisímetros de drenagem, que estimam ET<sub>c</sub> a partir da água infiltrada e da água armazenada no solo (Howell et al. 2015). A precisão desses equipamentos permite calibrações refinadas de K<sub>c</sub>, tornando-os essenciais para pesquisas agronômicas. Entretanto, seu custo elevado, a complexidade de instalação e a baixa representatividade espacial limitam sua aplicação em propriedades comerciais.

Outra alternativa utilizada para manejo de irrigação é o uso de sensores de umidade do solo, como tensiômetros, TDR (*Time Domain Reflectometry*), FDR (*Frequency Domain Reflectometry*) e sensores capacitivos. Esses dispositivos permitem monitorar a água disponível na zona radicular, indicando o momento ideal para irrigação e evitando tanto o estresse hídrico quanto o excesso de água. Tais sensores de solo são especialmente úteis em sistemas de irrigação por gotejamento, onde a distribuição de água é localizada. Entretanto, sua representatividade espacial também é limitada, exigindo instalação em múltiplos pontos para capturar a variabilidade de propriedades físicas e conteúdo de água no solo.

Além dos métodos anteriores, alguns sistemas avançados utilizam fluxos turbulentos e balanço de energia para medir diretamente o fluxo de calor latente (LE), relacionado à evapotranspiração. Torres de fluxo (eddy covariance) e sistemas Bowen ratio são exemplos que fornecem estimativas contínuas e detalhadas da troca de vapor d'água entre superfície e atmosfera. Esses métodos são robustos para pesquisas e calibrações, mas possuem custo elevado, dependem de manutenção frequente e não são viáveis para aplicações rotineiras em propriedades comerciais.

A Tabela 1 apresenta uma comparação entre as vantagens e limitações dos métodos de campo para a obtenção da Evapotranspiração.

Tabela 1 - Vantagens e limitações dos métodos de campo.

Vantagens	Desvantagens
Alta precisão e confiabilidade	Baixa representatividade espacial
Excelente resolução temporal	Alto custo de instalação e manutenção
Adequados para calibração de modelos e validação de dados de satélite	Sensibilidade a falhas e necessidade de calibração
Fundamento físico bem compreendido	Dificuldade de aplicação em áreas extensas ou de acesso remoto

## MÉTODOS BASEADOS EM DADOS DE SATÉLITE

O uso de sensoriamento remoto para estimar a demanda hídrica das culturas trás a possibilidade de obter informações espaciais e temporais sobre vegetação, solo e atmosfera permite estimar a evapotranspiração em escalas que antes eram impossíveis com métodos tradicionais. Nesse contexto, satélites como Landsat, Sentinel-2, MODIS e VIIRS oferecem variáveis biofísicas essenciais que, quando combinadas a modelos físicos e empíricos, tornam-se ferramentas poderosas para gestão da água na agricultura irrigada.

O sensoriamento remoto fornece informações principalmente a partir da reflectância espectral e da temperatura de superfície, sendo inestimável para o monitoramento de mudanças de curto e longo prazo das atividades humanas (Schowengerdt, 2007). A evapotranspiração de uma cultura está diretamente relacionada à energia utilizada pela planta para converter água líquida em vapor, processo que deixa marcas espectrais e térmicas detectáveis por sensores orbitais.

Os principais tipos de dados utilizados incluem:

- I. Bandas ópticas (visível e infravermelho próximo): associadas ao vigor vegetativo, índice de área foliar e cobertura do dossel;
- II. Infravermelho de ondas curtas (SWIR): sensível ao conteúdo hídrico da vegetação e ao estresse hídrico;
- III. Termal (TIR): usada para estimar temperatura da superfície, relacionada diretamente à transpiração e ao balanço de energia;
- IV. Radar (SAR): menos dependente de condições atmosféricas, útil para propriedades físicas do solo e estrutura da vegetação;

Essa combinação de dados possibilita estimar componentes do balanço de energia e, consequentemente, a evapotranspiração. Diversos modelos foram desenvolvidos para estimar evapotranspiração a partir de imagens de satélite. O SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*), é um modelo baseado no balanço de energia na superfície, considera radiação líquida, fluxo de calor no solo

e fluxo de calor sensível (Gonçalves et al. 2022). A evapotranspiração é derivada como o fechamento do balanço, tendo como pontos fortes: robustez física e boa acurácia, e limitações: calibragem necessária e dependência da banda termal. O METRIC (*Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration*), variante do SEBAL com calibração interna utilizando dados de estações meteorológicas locais, tem como pontos fortes: excelente precisão para estudos agrícolas e calibração interna usando *pixels* das imagens, e limitações: necessidade de dados de campo para ajustar o modelo (Tasumi, 2019).

Na Figura 1 é apresentada de forma sintetizada o fluxo de trabalho para estimar a evapotranspiração utilizando o METRIC, o processo inicial com a entrada de dados meteorológicos e de sensoriamento remoto, que passam por um controle de qualidade antes de serem utilizados, na sequência o modelo gera estimativas preliminares da evapotranspiração, baseada no balanço de energia da superfície, assim, após esta fazer o modelo produz a evapotranspiração que é então comparada com estimativas independentes.

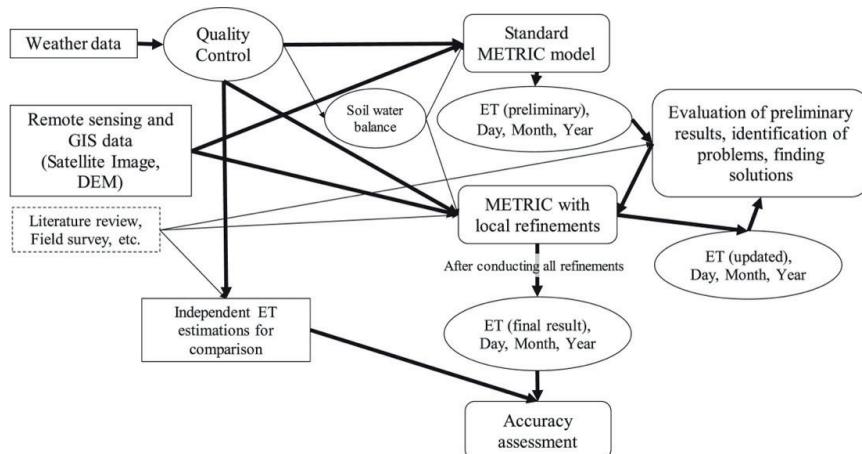


Figura 1. Fluxograma da computação da evapotranspiração pelo modelo METRIC. Fonte: Tasumi (2019).

O SAFER (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*) é um modelo mais simples que usa relações empíricas entre radiação, NDVI e temperatura para calcular a ET, surgiu com uma abordagem para superar limitações dos métodos tradicionais. Pontos fortes: menor número de parâmetros; adequado para aplicações operacionais, quanto as limitações: menor precisão em condições atmosféricas complexas (Farias et al., 2024).

Produtos MODIS e VIIRS, incluem estimativas diárias ou de 8 dias de ET, com resoluções de 250 a 1.000 m. Pontos fortes: alta frequência temporal, e as limitações: resolução inadequada para talhões pequenos. Esses modelos variam em complexidade, resolução e demanda computacional, permitindo que produtores e gestores escolham a solução mais adequada à escala de manejo.

Com o avanço das ferramentas digitais, plataformas como Google Earth Engine, MapBiomas Água, OpenET, WaPOR e BDC (Brasil Data Cube) (MapBiomas 2025, Gorelick et al. 2017, Ferreira et al. 2020, Attalah et al. 2025) democratizaram o acesso a dados e modelos de evapotranspiração. Muitas dessas plataformas permitem: acesso gratuito à séries temporais de ET, análise espacial por talhão, integração com dados de clima, solo e vegetação, combinações de múltiplos satélites. Essa evolução tecnológica facilita sua adoção no campo e amplia a capacidade de análise, especialmente para médias e grandes propriedades, o seu uso para o manejo da irrigação ainda possui grandes desafios muito por conta das desvantagens que o uso de imagens de satélite possui (Tabela 2).

Tabela 2. Vantagens e limitações dos métodos de satélite.

Vantagens	Desvantagens
Alta representatividade espacial	Dependência de condições atmosféricas (nuvens)
Detecção de variabilidade intra-talhão	Necessidade de validação com dados locais
Menor custo operacional	Resoluções nem sempre compatíveis com sistemas pequenos
Acesso a dados históricos e séries longas	Atraso temporal entre aquisição e disponibilização das imagens
Cobertura de grandes áreas	Complexidade computacional em alguns modelos

## COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE CAMPO E DADOS DE SATÉLITE PARA A TOMADA DE DECISÃO NA IRRIGAÇÃO

A escolha entre métodos de campo e métodos baseados em sensoriamento remoto não é trivial e depende de múltiplos fatores, como escala de análise, disponibilidade de equipamentos, custo, precisão desejada e tipo de sistema irrigado. Para que a tomada de decisão seja eficiente e sustentável, é necessário compreender como cada abordagem se comporta em diferentes cenários agrícolas.

Os métodos de campo, especialmente lisímetros e sensores de solo, oferecem a maior precisão pontual disponível, sendo fundamentais para calibração de coeficientes de cultura ( $K_c$ ) e validação de modelos. A equação de Penman–Monteith

aplicada com dados meteorológicos de qualidade também apresenta excelente confiabilidade. No entanto, essa precisão é local e em áreas com alta variabilidade espacial, solos heterogêneos ou diferenças microclimáticas, um conjunto limitado de sensores pode não representar adequadamente toda a área irrigada.

Os métodos de satélite, por outro lado, apresentam precisão moderada a alta dependendo do modelo, mas sua principal vantagem é a representatividade espacial. Mesmo que a estimativa pontual seja menos precisa que um lisímetro, o satélite captura a variabilidade real da área, permitindo identificar zonas de manejo e padrões de estresse hídrico que métodos de campo jamais detectariam sozinhos.

Sensores de campo são extremamente limitados em escala: um sensor representa uma área muito pequena, exigindo múltiplas unidades para cobrir um talhão. Essa limitação se torna crítica em propriedades médias e grandes. O sensoriamento remoto supera plenamente essa barreira, permitindo análises em: talhões individuais, fazendas, perímetros irrigados e até bacias hidrográficas. Além disso, sua capacidade de oferecer séries históricas facilita a análise de tendências, planejamento de safra e diagnóstico de ineficiências no uso da água.

Métodos de campo geralmente possuem custos iniciais elevados e manutenção contínua: calibração, troca de sensores, danos climáticos, energia e telecomunicação. Sensoriamento remoto, especialmente de plataformas públicas (Sentinel, Landsat, MODIS), possui custo zero de aquisição de dados e custo operacional reduzido. Plataformas como Google Earth Engine eliminam a necessidade de infraestrutura própria. Por outro lado, métodos de satélite de alta resolução (Planet, WorldView, SkySat) podem ser caros, representando limitações para pequenos produtores. Métodos de campo exigem expertise para instalação, calibração e interpretação das medições. São suscetíveis a falhas técnicas e variabilidade local excessiva.

Dados de satélite, apesar de inicialmente complexos, têm se tornado cada vez mais acessíveis graças a plataformas operacionais que já fornecem mapas prontos de evapotranspiração. Assim, do ponto de vista prático, o sensoriamento remoto tende a superar as limitações operacionais para sistemas maiores, enquanto sensores de campo continuam essenciais para ajustes finos e calibração. Em vez de pensar em substituição, o caminho natural e mais eficiente é a integração entre ambas as abordagens: os dados de campo corrigem, calibram e validam os modelos de satélite; os dados de satélite ampliam espacialmente a informação e revelam padrões invisíveis aos sensores locais. Essa integração permite uma abordagem híbrida, chamada irrigação inteligente, em que: a decisão “quando irrigar” é refinada por sensores de solo e dados meteorológicos e a decisão “onde irrigar mais ou menos” é fundamentada em mapas de ET e índices de vegetação. Sistemas modernos de manejo já incorporam essa lógica, combinando dados orbitais, sensores IoT e modelos climáticos, elevando a eficiência do uso da água e reduzindo custos operacionais.

## APLICAÇÕES PRÁTICAS NO MANEJO DA IRRIGAÇÃO

A integração entre dados de campo e dados de satélite tem se consolidado como uma das estratégias mais eficientes para otimizar o manejo da irrigação. A seguir, são apresentadas aplicações práticas que demonstram como esses métodos podem ser utilizados de forma complementar em diferentes sistemas agrícolas. Em propriedades com estações meteorológicas e sensores de solo, a lâmina de irrigação é tradicionalmente calculada a partir da evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>) e do coeficiente de cultura (K<sub>c</sub>). Entretanto, essa abordagem não reflete necessariamente o consumo real da cultura em toda a área.

Ao incorporar mapas de evapotranspiração real (ET<sub>a</sub>) derivados de satélite, o produtor pode identificar áreas sub ou super irrigadas, ajustar a quantidade de água aplicada em zonas específicas, comparar o consumo hídrico de diferentes talhões e verificar se a ET<sub>a</sub> está compatível com o desenvolvimento da cultura. Essa abordagem reduz desperdícios e aumenta a precisão do manejo, especialmente em pivôs centrais e irrigação localizada. Os índices de vegetação (como NDVI, NDRE e EVI) e a temperatura de superfície (LST) são indicadores eficientes do estado hídrico das plantas. Eles permitem detectar estresse antes mesmo de sintomas visuais ocorrerem.

Na prática, isso possibilita: I. Identificação precoce de falhas de irrigação, entupimento de gotejadores e problemas no sistema; II. Identificação de manchas de solo com menor retenção hídrica; III. Criação de zonas de manejo hídrico para irrigação variável. A agricultura de precisão utiliza amplamente esses produtos, gerando mapas que orientam intervenções específicas e reduzem custos operacionais. Em perímetros irrigados, bacias agrícolas ou regiões mais secas com múltiplos produtores, o sensoriamento remoto se torna essencial para monitorar o consumo hídrico total da região tanto para estações chuvosas quanto as secas (Lima, 2024), avaliar a eficiência da irrigação coletiva, mapear áreas com uso crítico de água e auxiliar órgãos gestores na alocação da água. Esses produtos têm sido aplicados em estudos de balanço hídrico regional e em programas governamentais para monitoramento da escassez.

Ao combinar dados de campo (pressão, vazão, uniformidade de aplicação) com mapas de ET<sub>a</sub>, torna-se possível avaliar a eficiência real do sistema. Uma área onde a ET<sub>a</sub> está consistentemente abaixo do esperado pode indicar baixa uniformidade de aplicação, subdimensionamento de emissores, falhas mecânicas ou hidráulicas, limitações do solo. Essa análise integrada permite intervenções mais precisas, priorizando as áreas críticas e evitando gastos desnecessários. Imagens de satélite disponibilizam séries temporais que permitem acompanhar o comportamento da evapotranspiração ao longo de anos. Isso possibilita avaliar impactos de práticas agrícolas, estimar produtividade por consumo hídrico, realizar auditorias hídricas

e definir estratégias de irrigação para safras futuras. A integração com dados de campo aumenta a precisão da análise temporal, fornecendo uma visão completa do sistema produtivo.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os métodos de campo, como estações meteorológicas, lisímetros e sensores de umidade, oferecem precisão e detalhamento temporal, sendo fundamentais para calibração de coeficientes de cultura e para medições diretas de evapotranspiração. Entretanto, sua baixa representatividade espacial e necessidade de manutenção tornam sua aplicação, de certa forma limitada, sobretudo em áreas extensas e heterogêneas. Nesse sentido, o sensoriamento remoto surge como uma alternativa complementar ao permitir a observação espacial contínua da vegetação, do solo e da atmosfera. Modelos como SEBAL, METRIC e SAFER, juntamente com dados de satélites como Landsat, Sentinel e MODIS, proporcionam estimativas da evapotranspiração real e permitem identificar zonas de manejo, padrões de estresse hídrico e variações intra-talhão. Apesar de limitações relacionadas à dependência de condições atmosféricas, resolução e necessidade de calibração com dados locais, o sensoriamento remoto ampliou a capacidade de análise do manejo hídrico em grande escala.

## REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G. et al. *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. Rome: FAO, 1998. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ARIAS, F. de J. et al. SAFER (simple algorithm for evapotranspiration retrieving): uma revisão bibliográfica. *CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES*, v. 17, n. 13, p. e14072, 2024.
- FERREIRA, K. R. et al. Earth Observation Data Cubes for Brazil: Requirements, Methodology and Products. *Remote Sens.* 2020, 12, 4033.
- GONÇALVES, I. Z. et al. Remote sensing-based evapotranspiration modeling using geeSEBAL for sugarcane irrigation in Brazil. *Agricultural Water Management*. v. 274. 2022.
- GORELICK, N. et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27. 2017.
- HOWELL, T. A. *Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture*. *Agronomy Journal*, v. 93, p. 281–289, 2001.

LIMA, G. S. A, de. et al. Evapotranspiration measurements in pasture, crops, and native Brazilian Cerrado based on UAV-borne multispectral sensor. *Environ Monit Assess*, 196, 1105. 2024. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-13224-7>

MapBiomas, 2025, "MapBiomas Water Brazil General"Handbook" - Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD)- Collection 4", <https://doi.org/10.58053/MapBiomas/HSR3BE>, MapBiomas Data, V1.

Schowengerdt, R. A. (2007). CHAPTER 1 - The Nature of Remote Sensing. In R. A. Schowengerdt (Ed.), *Remote Sensing (Third Edition)* (Third Edition, pp. 1–X). Academic Press.

TASUMI, M. Estimating evapotranspiration using METRIC model and Landsat data for better understandings of regional hydrology in the western Urmia Lake Basin. *Agricultural Water Management*. v. 226, 2019.



## C A P Í T U L O   4

# AVALIAÇÃO DA UNIFORMIDADE DE APLICAÇÃO DE ÁGUA EM PIVÔ CENTRAL

**Ana Cláudia Sátiro de Araújo**

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGESÁ,  
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/ESALQ, Universidade de São  
Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil

**Vinícius Villa e Vila**

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGESÁ,  
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/ESALQ, Universidade de São  
Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil

**Jessica Sabrina de Castro Couto**

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGESÁ,  
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/ESALQ, Universidade de São  
Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil

**Patricia Angélica Alves Marques**

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGESÁ,  
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/ESALQ, Universidade de São  
Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil

**Fernando Campos Mendonça**

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGESÁ,  
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/ESALQ, Universidade de São  
Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil

**Marcos Vinicius Folegatti**

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGESÁ,  
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/ESALQ, Universidade de São  
Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil

**Sergio Nascimento Duarte**

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGESÁ,  
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/ESALQ, Universidade de São  
Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil

**RESUMO:** A irrigação por pivô central destaca-se pela capacidade de aplicar água de forma automatizada e eficiente em grandes áreas agrícolas, porém sua eficiência depende diretamente da uniformidade de aplicação da água ao longo do raio irrigado. A determinação dessa uniformidade é essencial para evitar regiões com déficit ou excesso de lâmina, reduzir desperdícios, otimizar o uso de energia e garantir o desempenho agronômico das culturas. A avaliação envolve procedimentos estruturados que incluem seleção e posicionamento adequado de coletores, controle das condições ambientais, verificação da operação do pivô e mensuração precisa dos volumes aplicados. A conversão desses volumes em lâminas e o emprego de métodos de análise específicos para sistemas circulares, como o coeficiente de uniformidade de Heermann & Hein ( $CUC_{HH}$ ), permitem quantificar a homogeneidade da aplicação e identificar falhas de desempenho relacionadas a pressão, desgaste de emissores e condições operacionais. A metodologia possibilita diagnósticos confiáveis e fundamenta decisões de manejo e manutenção que asseguram o bom funcionamento do sistema.

**PALAVRAS-CHAVE:** coeficiente de Heermann & Hein; eficiência do uso da água; manejo da irrigação.

**ABSTRACT:** The center pivot irrigation system stands out for its ability to apply water automatically and efficiently over large agricultural areas; however, its efficiency depends directly on the uniformity of water application along the irrigated radius. Determining this uniformity is essential to prevent areas with deficit or excess irrigation, reduce waste, optimize energy use, and ensure the agronomic performance of crops. The evaluation involves structured procedures that include the proper selection and positioning of collectors, control of environmental conditions, verification of pivot operation, and precise measurement of the applied volumes. The conversion of these volumes into applied depths, along with the use of specific analytical methods for circular systems—such as the Heermann & Hein uniformity coefficient ( $CUC_{HH}$ )—allows quantification of application homogeneity and identification of performance issues related to pressure, emitter wear, and operational conditions. This methodology enables reliable diagnostics and supports management and maintenance decisions that ensure the proper functioning of the system.

**KEYWORDS:** Heermann & Hein coefficient; water use efficiency; irrigation management.

## INTRODUÇÃO

A irrigação mecanizada por pivô central consolidou-se, nas últimas décadas, como uma das tecnologias mais empregadas para o suprimento hídrico em sistemas agrícolas de médio e grande porte. Sua ampla adoção no Brasil está associada à elevada capacidade de automação, à possibilidade de aplicação controlada de

lâminas de água e ao potencial de manejo preciso, capaz de atender às exigências hídricas de diferentes culturas ao longo de todo o ciclo produtivo. No entanto, a eficiência real de um pivô central depende de forma decisiva de sua uniformidade de distribuição de água, parâmetro que expressa o quanto homogênea é a lâmina aplicada ao longo de toda a área irrigada.

A uniformidade de aplicação determina o desempenho técnico, econômico e ambiental de sistemas de irrigação pressurizados. Uma distribuição inadequada provoca regiões com déficit e outras com excesso de água, acarretando impactos significativos na produtividade das culturas, no uso de energia, na lixiviação de nutrientes, na eficiência do uso da água e no aumento de custos operacionais. Em condições de baixa uniformidade, o produtor tende a elevar a lâmina média de irrigação para compensar as zonas que recebem menor volume, induzindo desperdício hídrico e aumento de custos sem ganhos de produtividade proporcionais. Assim, avaliações periódicas da uniformidade tornam-se ferramentas essenciais para o manejo racional da irrigação e para a tomada de decisão em relação à manutenção, substituição de emissores, ajustes na pressão e calibração de velocidade do equipamento.

No caso particular dos pivôs centrais, a avaliação da uniformidade envolve desafios específicos decorrentes do caráter radial da distribuição de água. Diferentemente de sistemas lineares ou por aspersão convencional, onde os coletores representam áreas semelhantes, no pivô central cada ponto amostrado corresponde a diferentes faixas de área irrigada conforme a distância radial do ponto em relação ao centro do equipamento. Dessa forma, métodos convencionais de cálculo, como o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), não representam adequadamente a variabilidade espacial da aplicação em pivôs, exigindo o uso de metodologias adaptadas, como o índice de Heermann & Hein ( $CUC_{HH}$ ), amplamente recomendado para sistemas circulares.

A determinação precisa desses coeficientes requer a execução de um protocolo sistematizado que contempla fatores como número e disposição dos coletores, condições meteorológicas durante a avaliação, controle e correção para evaporação, verificação das pressões de operação, velocidade do pivô, tipo e espaçamento dos emissores e características topográficas da área. A correta interpretação dos resultados obtidos permite identificar falhas operacionais, desgastes de bocais, problemas hidráulicos, distorções causadas por vento, desuniformidades estruturais e limitações do projeto original do equipamento. A adoção de práticas de monitoramento contínuo e manutenção preventiva contribui para aumentar a longevidade dos equipamentos.

## MATERIAIS E EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS

A execução de uma avaliação de uniformidade em pivô central exige um conjunto específico de materiais e equipamentos que garantem precisão nas medições, repetibilidade dos resultados e confiabilidade nos cálculos posteriores. O item central são os coletores, recipientes responsáveis por armazenar a água aplicada durante o ensaio. Eles devem ser totalmente padronizados, sem deformações, com bordas rígidas e simétricas, altura mínima de cerca de 150 mm e diâmetro que não seja inferior a metade da altura ou a 85 mm. Essa configuração é necessária para evitar respingos, extravasamentos e interferências na coleta, assegurando que todo volume retido seja apenas o decorrente da precipitação proveniente dos emissores do pivô.

Para a sustentação dos coletores utilizam-se hastes ou suportes, que podem ser metálicos, de PVC ou outro material resistente. O suporte deve permitir nível adequado, garantindo que a boca do coletor permaneça sempre horizontal; inclinações mínimas podem provocar erros significativos na lâmina coletada. Além disso, recomenda-se a utilização de provetas volumétricas com diferentes capacidades, permitindo a leitura precisa dos volumes coletados após o ensaio. A acurácia das provetas deve ser compatível com o intervalo de volumes esperado conforme a lâmina aplicada e a área do coletor.

O levantamento espacial dos coletores exige equipamentos como trena, marcadores, GPS e preferencialmente um nível de mão ou nível a laser, assegurando o correto posicionamento radial e alinhamento das fileiras. Para monitoramento ambiental, instrumentos como anemômetros, termômetros e, quando possível, sensores portáteis de umidade relativa auxiliam na caracterização das condições meteorológicas durante o teste, elemento fundamental para interpretação dos resultados, uma vez que ventos acima de limites aceitáveis podem comprometer a distribuição da água.

Também são indispensáveis planilhas de campo, pranchetas, etiquetas de identificação, sacolas para armazenamento de coletores após uso e recipientes com volumes previamente medidos, utilizados para o controle de evaporação. Por fim, computadores com software de planilha eletrônica são essenciais para o processamento dos dados, especialmente para o cálculo de índices ponderados como o CUC<sub>HH</sub>.

## PREPARAÇÃO DA ÁREA E CONDIÇÕES DE ENSAIO

Antes do início das medições, a área destinada ao ensaio deve ser cuidadosamente preparada, de modo a minimizar interferências externas e assegurar que o teste represente com fidelidade o desempenho real do pivô central. Inicialmente,

recomenda-se selecionar dias com condições climáticas favoráveis, priorizando períodos com velocidade do vento inferior a 2 m/s, o que geralmente corresponde às primeiras horas da manhã, ao entardecer ou durante a noite. Caso não seja possível evitar a realização em períodos mais quentes, é imprescindível registrar as condições de vento, temperatura e umidade relativa, informações que serão utilizadas posteriormente para interpretação ou correções de evaporação.

Um passo fundamental é a avaliação prévia do estado de funcionamento do pivô. Isso inclui verificar pressões de operação das linhas laterais, conferir se todos os bocais e reguladores de pressão estão íntegros e sem obstruções, analisar possíveis vazamentos, rupturas em mangueiras e garantir que todos os emissores estejam operando nas características especificadas pelo fabricante. Ajustar a pressão dentro de uma faixa de tolerância de  $\pm 5\%$  da pressão de projeto é indispensável para que as vazões estejam dentro dos valores esperados e, consequentemente, para que a lâmina de água aplicada seja representativa do desempenho do sistema. A topografia da área também deve ser observada e registrada. Desníveis podem alterar a pressão disponível nos emissores e influenciar significativamente a distribuição de água. Recomenda-se elaborar um perfil topográfico simplificado, identificando variações de declividade ao longo do percurso do pivô, especialmente se houver trechos ascendentes ou descendentes relevantes. Em áreas planas, esta etapa é mais simples, mas ainda assim deve ser documentada.

Após essas verificações, deve-se proceder a marcação da trajetória do pivô e ao delineamento das linhas onde os coletores serão posicionados. É importante estimar a lâmina esperada e programar a velocidade do pivô para que o ensaio forneça volumes suficientes para uma leitura precisa, geralmente resultando em lâmina mínima de 15 mm. Todas essas informações são registradas no formulário de campo, que também inclui horário de início e término, direção e intensidade do vento, condições da cultura (quando realizada sobre lavoura), além de observações sobre o entorno que possam interferir no ensaio, como obstáculos, áreas sombreadas, presença de animais ou trânsito de máquinas.

## POSICIONAMENTO E ARRANJO DOS COLETORES

O posicionamento dos coletores é uma das etapas mais críticas do processo, uma vez que a representatividade espacial da amostragem impacta diretamente a precisão dos cálculos de uniformidade. Para sistemas de pivô central, recomenda-se dispor os coletores em duas ou mais linhas retas, perpendiculares ao sentido de deslocamento do pivô (Figura 1), estendendo-se desde a região próxima ao centro até o limite externo da área irrigada. Cada coletor deve representar adequadamente um anel concêntrico da área circular que o pivô cobre, e, por isso, o espaçamento

entre eles não deve ultrapassar determinados limites: até 3 metros quando o raio de alcance dos aspersores é inferior a 10 metros, e até 5 metros quando o raio é maior. Esse cuidado garante que a amostragem seja suficientemente densa para captar variações rápidas na lâmina distribuída.

Para evitar padrões artificiais ou interferências geométricas nos dados, é recomendável introduzir uma descentralização entre linhas, fazendo com que cada linha seja levemente deslocada em relação à anterior. Essa técnica reduz o risco de que todos os coletores coincidam exatamente com a projeção de emissores específicos, o que poderia gerar tendências sistemáticas nas medições. Além disso, as linhas não devem ultrapassar 50 metros de extensão total para manter proporcionalidade com o raio do pivô e permitir que o ensaio seja processado com coerência espacial.

Na instalação, cada coletor deve ser firmemente fixado ao suporte e nivelado, garantindo que a boca esteja perfeitamente horizontal. Em condições de vento moderado, recomenda-se posicionar o lábio dos coletores a no máximo 0,3 metro acima do solo ou do topo da vegetação, reduzindo a interferência aerodinâmica e o desvio lateral das gotas. Em casos de culturas de porte elevado, pode ser necessário elevar o coletor, desde que mantida a estabilidade e o nivelamento.

Após o posicionamento, cada coletor é devidamente numerado, mapeado e incluído no croqui da área, indicando claramente sua distância radial em relação ao centro do pivô. Essa informação é essencial para o cálculo da lâmina ponderada e das áreas anelares representadas por cada ponto. Durante todo o arranjo, devem-se evitar áreas próximas a torres, rodas e estruturas do pivô que possam causar sombreamento, turbulência ou respingos indesejados. Finalizada a montagem, fotografa-se o arranjo e registram-se quaisquer observações que possam influenciar a interpretação dos resultados.



Figura 1, Posicionamento dos coletores para a realização do teste. Fonte: Hohenberger, 2016.

## CONTROLE DE EVAPORAÇÃO

O controle de evaporação constitui uma etapa essencial para garantir a precisão das medições durante a avaliação de uniformidade, especialmente quando o ensaio é realizado sob condições ambientais menos favoráveis, como temperaturas elevadas, baixa umidade relativa ou ventos moderados. A evaporação da água acumulada nos coletores pode gerar erros significativos, reduzindo artificialmente o volume coletado e, consequentemente, alterando de forma não representativa os valores de lâmina aplicados ao longo da área irrigada. Para compensar esses efeitos, utiliza-se o método dos coletores de controle, que consiste em posicionar pelo menos três coletores adicionais, localizados em área protegida ou parcialmente sombreada, onde não receberão precipitação do pivô.

Esses coletores de controle são preenchidos previamente com um volume conhecido de água, medido com precisão por proveta volumétrica. Durante todo o período do ensaio, eles permanecem expostos às mesmas condições ambientais observadas pelos demais coletores, sendo o volume final medido imediatamente após o término da aplicação. A diferença entre o volume inicial e o volume final fornecido pelos coletores de controle representa a taxa de evaporação ao longo do experimento. Este valor deve então ser descontado proporcionalmente do volume coletado nos demais recipientes.

## PROCEDIMENTOS PARA A REALIZAÇÃO DO ENSAIO

Inicia-se com a verificação de todos os elementos envolvidos, garantindo que os coletores estejam devidamente posicionados, nivelados e identificados, e que a planilha de campo esteja pronta para receber as medições. Uma vez confirmada a correta instalação dos coletores, procede-se à preparação operacional do pivô, ajustando-se sua velocidade e assegurando que todos os emissores estejam funcionando conforme o padrão estabelecido pelo fabricante. É importante que a operação do pivô durante o teste represente fielmente as condições usuais de irrigação, utilizando os mesmos ajustes de pressão, velocidade, acionamento do canhão final e setores de irrigação. Alterações artificiais nesses parâmetros comprometeriam a representatividade dos resultados.

Com tudo verificado, o pivô é acionado e inicia-se oficialmente o ensaio, anotando-se o horário inicial, direção predominante do vento e quaisquer observações relevantes. À medida que o equipamento percorre a área e inicia o processo de aplicação de água sobre os coletores, deve-se evitar interferências externas, como

tráfego de pessoas, entrada de animais ou deslocamento de máquinas, que possam atingir, derrubar ou salpicar água nos recipientes.

Assim que a irrigação sobre a área de coletores é concluída, normalmente após a passagem completa do lance do pivô correspondente à extensão das linhas de coleta, inicia-se a etapa de medição dos volumes. Essa medição deve ser feita de forma rápida, porém cuidadosa, utilizando provetas volumétricas adequadas ao volume esperado. Cada volume medido é imediatamente registrado na planilha, junto das informações do coletor correspondente. Caso algum coletor tenha sido derrubado, danificado ou esteja com algum indício de erro evidente, tal observação deve ser anotada, e a medição poderá ser descartada na fase de tratamento dos dados.

## CÁLCULOS DA UNIFORMIDADE

Uma vez registrados os volumes coletados, o passo seguinte consiste em convertê-los para valores de lâmina de irrigação expressos em mm (Equação 1). Essa conversão é fundamentada na relação direta entre o volume de água armazenado pelos coletores e a área da sua borda. Para realizar essa conversão, é necessário conhecer a área útil do coletor, normalmente calculada com base no diâmetro interno da borda superior.

$$L \left( \text{mm} \right) = \frac{V}{A_c} \times 1000 \quad \text{Equação 1}$$

em que:  $L$  é a lâmina aplicada (mm),  $V$  é o volume coletado ( $\text{m}^3$ ),  $A_c$  é a área da borda do coletor ( $\text{m}^2$ ), e 1000 é o fator que converte metros cúbicos para milímetros sobre a área.

A etapa de cálculo da uniformidade constitui o núcleo analítico da avaliação, pois é nela que os dados coletados em campo são transformados em indicadores quantitativos capazes de expressar o desempenho real do pivô central. Diferentemente de sistemas de irrigação lineares ou por aspersão convencional, nos quais os coletores representam áreas iguais, o pivô central apresenta uma particularidade geométrica singular: a área irrigada aumenta proporcionalmente com a distância ao centro. Isso torna inadequado o uso de coeficientes tradicionais baseados em médias simples, como o CUC de Christiansen (1942), e exige o emprego de índices que considerem o caráter radial da aplicação, sendo o mais recomendado o coeficiente de uniformidade de Heermann & Hein (CUC<sub>HH</sub>) (1968).

O CUC<sub>HH</sub> utiliza um método ponderado que atribui maior peso às lâminas coletadas nos pontos mais distantes do pivô, uma vez que esses representam faixas de área maiores dentro do círculo irrigado. Assim, cada lâmina ( $L$ ) é relacionada diretamente ao respectivo raio ( $R_i$ ), garantindo que a contribuição de cada coletor para o cálculo final seja proporcional à área irrigada que ele representa. Antes,

porém, torna-se necessário calcular a lâmina ponderada ( $L_p$ ) que corresponde a uma referência média ajustada à distribuição espacial dos pontos (Equação 2). Essa ponderação leva em conta o fato de que cada coletor representa um anel circular de largura proporcional ao espaçamento entre coletores, e sua distância ao pivô define o peso relativo no cálculo da média.

Após determinada a lâmina ponderada, aplicam-se os valores na fórmula do  $CUC_{HH}$  (Equação 3), que compara a diferença entre cada ponto coletado e a lâmina ponderada pelo respectivo raio:

$$L_p = \frac{\sum (R_i \cdot L_i)}{\sum R_i} \quad \text{Equação 2}$$

$$CUC_{HH} = 100 \left( 1 - \frac{\sum R_i |L_i - L_p|}{\sum R_i L_p} \right) \quad \text{Equação 3}$$

Esse cálculo resulta em um índice percentual que expressa o grau de homogeneidade da aplicação. Quanto menor a soma das diferenças ponderadas entre as lâminas individuais e a lâmina média ponderada, maior será o valor do  $CUC_{HH}$ , aproximando-se do ideal de 100%. Valores elevados indicam distribuição uniforme e operação adequada dos emissores, pressões dentro dos limites recomendados e baixa influência de vento ou topografia. Por outro lado, valores baixos refletem problemas mecânicos, variações de pressão ao longo do equipamento, mal dimensionamento ou condições ambientais adversas durante o ensaio.

## AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

O coeficiente de uniformidade calculado deve ser utilizado como um indicador do desempenho do conjunto aspersor em relação às condições do campo, ambientes e de pressão, e às variações de pressão que prevalecem durante o ensaio. O coeficiente de uniformidade de um novo conjunto aspersor pode ser utilizado para a comparação de diferentes tipos de conjuntos aspersores e como uma referência para máquinas de irrigação similares que foram utilizadas durante um período de tempo;

Se o coeficiente de uniformidade de um equipamento de irrigação instalado desviar substancialmente do valor especificado no projeto inicial, realizar outras investigações para determinar a causa. Um coeficiente de uniformidade menor do que o valor de projeto pode indicar dispositivos de aplicação de água desgastados, quebrados ou com defeito. A interpretação do  $CUC_{HH}$  geralmente segue faixas classificatórias como: excelente (> 90%), bom (80–90%), regular (70–80%), ruim (60–70%) e inaceitável (< 60%). No entanto, essas faixas podem variar conforme normas técnicas, recomendações de fabricantes ou exigências de certificações.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A avaliação da uniformidade em pivô centrais demonstra-se indispensável para garantir a eficiência operacional do sistema de irrigação. O uso de procedimentos padronizados, aliado ao cálculo do CUC<sub>HH</sub>, permite identificar variações na distribuição de água que podem comprometer o desempenho do equipamento. Resultados inferiores aos valores esperados indicam a necessidade de inspeções adicionais para verificar desgaste, defeitos ou inadequações no manejo, enquanto valores satisfatórios confirmam o correto funcionamento do sistema e a adequação das condições de operação. A uniformidade elevada contribui para melhor aproveitamento da água, redução de perdas, maior eficiência energética e estabilidade produtiva das culturas.

## REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT. NBR 14244: Equipamentos de irrigação mecanizada: pivô central e lateral móvel providos de emissores fixos ou rotativos: determinação da uniformidade de distribuição de água. 1998.

Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR ISO 11545: equipamentos de irrigação agrícola: máquinas de irrigação pivô central e linear móvel, equipadas com sprayers ou aspersores: determinação da uniformidade de distribuição de água. Rio de Janeiro, 2016.

Borges Júnior, J. C. F., Andrade, C. L. T. AvaPivo - Programa computacional para avaliação da irrigação por pivô central. Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 281, 27 p, 2024.

Colombo, A.; Faria, L. C.; Silva Júnior, J. J. D.; Sant'ana, J. A. D. V.; Beskow, S.; Nörenberg, B. G. Modelagem das perdas de água por evaporação e arraste de sprays de placa oscilante. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 19, p. 719- 726, 2015.

Hart, W. E. Overhead irrigation pattern parameters. Transactions of the ASAE, Saint Joseph, 42, 354-355, 1961.

Hohenberger, L. Avaliação de uniformidade de distribuição de água em um pivô central no município de Alegrete-RS. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA, RS), 2016.



## C A P Í T U L O 5

# QUALIDADE DE ÁGUA PARA IRRIGAÇÃO

**Jessica Sabrina de Castro Couto**

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGESÁ,  
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/ESALQ, Universidade de São  
Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil

**Vinícius Villa e Vila**

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGESÁ,  
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/ESALQ, Universidade de São  
Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil

**Ana Cláudia Sátiro de Araújo**

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGESÁ,  
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/ESALQ, Universidade de São  
Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil

**Patricia Angélica Alves Marques**

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGESÁ,  
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/ESALQ, Universidade de São  
Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil

**Fernando Campos Mendonça**

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGESÁ,  
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/ESALQ, Universidade de São  
Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil

**Marcos Vinicius Folegatti**

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGESÁ,  
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/ESALQ, Universidade de São  
Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil

**Tamara Maria Gomes**

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGESÁ,  
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/ESALQ, Universidade de São  
Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil

**RESUMO:** A avaliação da qualidade da água é fundamental para garantir sua adequação a diferentes usos como consumo humano, irrigação e dessedentação de animais. Desse modo, parâmetros como condutividade elétrica, pH, sódio, potássio e coliformes permitem identificar a composição química, o grau de salinidade, o equilíbrio ácido-base e a presença de contaminação microbiológica. Esses indicadores são influenciados por fatores naturais e principalmente antrópicos como práticas agrícolas e despejos de efluentes. O processo de análise envolve etapas de coleta adequada, preparação das amostras, uso de equipamentos específicos, além do registro sistemático dos resultados. Na irrigação a interpretação dos resultados é feita com base em normas e recomendações, permitindo avaliar conformidades e identificar possíveis riscos. Dessa forma, os parâmetros de qualidade da água oferecem suporte indispensável para a saúde pública, o manejo eficiente dos sistemas agrícolas e a gestão sustentável dos recursos hídricos.

**PALAVRAS-CHAVE:** qualidade da água; monitoramento; análises laboratoriais.

**ABSTRACT:** The assessment of water quality is essential to ensure its suitability for different uses such as human consumption, irrigation, and livestock watering. Parameters such as electrical conductivity, pH, sodium, potassium, and coliforms allow the identification of chemical composition, salinity levels, acid-base balance, and the presence of microbiological contamination. These indicators are influenced by natural factors and especially by anthropogenic activities such as agricultural practices and wastewater discharge. The analytical process involves proper sample collection, sample preparation, the use of specific equipment, and systematic recording of results. In irrigation, the interpretation of results is based on standards and guidelines, allowing the evaluation of compliance and the identification of potential risks. Thus, water quality parameters provide essential support for public health, efficient agricultural management, and the sustainable administration of water resources.

**KEYWORDS:** water quality; monitoring; laboratory analyses.

## INTRODUÇÃO

A qualidade da água utilizada na irrigação é um dos fatores mais importantes para garantir produtividade e desempenho adequado dos sistemas agrícolas. Mesmo quando a água está disponível em quantidade suficiente, suas características químicas, físicas e biológicas podem influenciar diretamente o crescimento das plantas, a eficiência dos equipamentos de irrigação e a conservação das propriedades do solo. Por isso, conhecer e monitorar a qualidade da água é fundamental para o planejamento do manejo. Nesse contexto, entender os principais parâmetros e seus efeitos permite ao produtor adotar estratégias práticas e prevenir prejuízos.

A avaliação da qualidade da água envolve diversos parâmetros que determinam a forma como ela se comporta no solo e interage com as plantas. Entre os mais relevantes estão a salinidade, o teor de íons específicos, o pH, a turbidez e a presença de microrganismos. Cada um desses fatores exerce influência distinta no ambiente agrícola e, quando não monitorados, podem causar problemas como entupimento de emissores, compactação do solo, desequilíbrios nutricionais e queda de produtividade. A salinidade, por exemplo, refere-se à concentração total de sais dissolvidos na água; quando elevada, afeta a capacidade das plantas de absorver água, causando estresse hídrico mesmo em solos aparentemente úmidos. Já o excesso de sódio pode promover dispersão das partículas do solo, reduzindo a infiltração e prejudicando sua estrutura. O pH interfere diretamente na disponibilidade de nutrientes e no metabolismo das plantas, enquanto a turbidez e a contaminação biológica podem comprometer o funcionamento de equipamentos, especialmente em sistemas de irrigação localizada.

Em áreas irrigadas com água salina, por exemplo, ocorre acúmulo de sais nas camadas superficiais devido à evaporação, aumentando a salinização do solo e reduzindo a absorção de água pelas raízes. Em solos afetados por alto teor de sódio, além da toxicidade direta às plantas, há degradação física, dificultando o preparo, a infiltração de água e a oxigenação do sistema radicular. Esses efeitos mostram a importância do acompanhamento periódico da água, evitando que o problema se agrave silenciosamente. As plantas também apresentam diferentes níveis de tolerância aos componentes presentes na água: algumas espécies suportam salinidade moderada, enquanto outras sofrem danos mesmo em níveis baixos. Conhecer essas particularidades permite ao produtor escolher cultivares mais adaptadas e definir manejos específicos de irrigação que evitem estresse fisiológico, necrose foliar, redução de crescimento e perda de rendimento.

A análise da qualidade da água é um processo fundamental para avaliar se a água atende aos padrões e requisitos necessários para um uso específico. Quando a água é destinada ao consumo humano, é necessário garantir que ela esteja livre de contaminantes que possam representar riscos à saúde. Parâmetros como concentrações de patógenos, substâncias químicas tóxicas e características físicas são avaliados (Quadro 1). As normas de qualidade da água potável devem ser atendidas para garantir a segurança dos indivíduos (BRASIL, 2021). A água usada na irrigação deve ser avaliada quanto à sua composição química e à presença de contaminantes que possam afetar as plantas, o solo e a segurança dos alimentos produzidos (Almeida, 2010).

Quadro 1. Comparação entre parâmetros de qualidade da água para consumo humano e para irrigação.

Parâmetro	Água para consumo humano	Água para irrigação
Condutividade Elétrica (CE)	Geralmente baixa na água potável para evitar o acúmulo de sais no corpo humano.	Níveis mais altos podem ser tolerados na água de irrigação, mas a CE deve ser monitorada para evitar salinização do solo.
pH	Deve estar na faixa de pH neutro (cerca de 6,5 a 8,5) para evitar efeitos adversos à saúde.	Pode variar dependendo das culturas e do tipo de solo. Geralmente, um pH ligeiramente ácido a neutro é preferível.
Sódio	Baixo teor desejável de sódio para a saúde humana. Elevados níveis podem ser prejudiciais.	Níveis moderados de sódio geralmente tolerados, mas níveis muito altos podem prejudicar algumas culturas e o solo.
Potássio	Não é um parâmetro regulamentado na água potável, mas níveis moderados são aceitáveis.	O potássio é um nutriente importante para as plantas e pode ser benéfico, desde que não esteja em excesso.
Turbidez	Deve ser baixa na água potável para garantir a clareza e a ausência de partículas em suspensão.	A turbidez não é tão crítica na água de irrigação, mas água excessivamente turva pode causar problemas de obstrução em sistemas de irrigação.
Coliformes fecais	Deve estar ausente ou em níveis muito baixos, pois indicam contaminação fecal e risco à saúde humana.	Não é um parâmetro crítico na água de irrigação, mas altos níveis podem indicar contaminação e impactar a qualidade da água para as plantas.
Coliformes totais	Deve estar ausente ou em níveis muito baixos, pois podem indicar contaminação e risco à saúde humana.	Não é um parâmetro crítico na água de irrigação, mas altos níveis podem indicar contaminação e impactar a qualidade da água para as culturas
Cloro	Deve ser presente em quantidade apropriada para desinfecção e garantia da qualidade da água.	Pode ser necessário controlar o teor de cloro na água de irrigação para evitar efeitos negativos nas plantas.
Ferro	Baixos níveis são desejáveis na água potável, pois altos níveis podem afetar o sabor e causar manchas.	O ferro pode estar presente na água de irrigação, mas em excesso, pode prejudicar as plantas.
Dureza	A dureza pode variar, mas níveis moderados são geralmente aceitáveis para o consumo humano.	A dureza da água de irrigação pode afetar a eficácia dos fertilizantes e pode exigir ajustes dependendo das necessidades da cultura.

Fonte: Almeida, 2010; BRASIL, 2017; BRASIL, 2021.

## COLETA DA AMOSTRA DE ÁGUA

A coleta de amostras de água para análise laboratorial deve ser realizada com cuidado, pois qualquer erro nessa etapa pode comprometer os resultados e gerar interpretações equivocadas sobre a qualidade da água disponível para irrigação. O procedimento inicia-se com a seleção de recipientes limpos e adequados, preferencialmente frascos esterilizados ou frascos fornecidos pelo próprio laboratório. Antes da coleta, recomenda-se identificar corretamente o recipiente, anotando o local, data, horário e responsável pela amostragem.

A água deve ser coletada de um ponto que represente de forma fiel a fonte utilizada na irrigação. Em poços artesianos, por exemplo, é importante deixar a bomba funcionando por alguns minutos antes da coleta, de modo a eliminar água parada na tubulação. Em rios, lagos, represas ou canais, a coleta deve ser feita a uma profundidade de aproximadamente 20 centímetros abaixo da superfície, evitando áreas com acúmulo de matéria orgânica, margens e locais com fluxo muito lento.

Antes de encher o frasco, recomenda-se enxaguá-lo três vezes com a própria água a ser coletada, exceto quando houver conservantes no frasco (caso comum para análises microbiológicas), pois nesses casos o enxágue não deve ser realizado. A coleta deve ser feita deixando o recipiente encher lentamente, evitando turbulência e garantindo que ele seja preenchido quase até a borda para minimizar a presença de ar. Quando a análise incluir coliformes, o frasco deve possuir tampa esterilizada e nunca pode ser tocado internamente.

Após a coleta, o frasco deve ser imediatamente fechado e mantido resfriado, preferencialmente entre 4 e 10 °C, armazenado em caixa térmica com gelo, evitando congelamento. O transporte até o laboratório deve ocorrer o mais rápido possível, idealmente dentro de 24 horas, especialmente quando serão realizadas análises microbiológicas. É fundamental acompanhar a amostra com uma ficha de identificação contendo informações sobre o ponto de coleta, condições da água, finalidade da análise e demais dados solicitados pelo laboratório.

Esse procedimento assegura que a amostra mantenha suas características físicas, químicas e microbiológicas até o momento da análise, permitindo que os resultados reflitam de forma precisa a real qualidade da água utilizada na irrigação.

## DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

A determinação da Condutividade Elétrica (CE) da água é um procedimento fundamental para avaliar a quantidade de sais dissolvidos no líquido, sendo amplamente utilizada no monitoramento da qualidade da água destinada à irrigação (Molin e Rabelo, 2011). A CE indica o nível de salinidade, que influencia diretamente a

absorção de água pelas plantas e pode provocar desde estresse hídrico até problemas de salinização do solo, caso não seja adequadamente controlada. Para realizar a medição, utiliza-se um condutivímetro, equipamento que deve ser previamente verificado para garantir que esteja devidamente calibrado.

A análise inicia-se com a coleta da amostra em um recipiente limpo e isento de qualquer contaminação, a qual é, em seguida, transferida para um frasco apropriado. O condutivímetro deve ser ligado conforme as orientações do manual do fabricante, e seu eletrodo é inserido na amostra, assegurando-se que fique submerso. Após alguns instantes, a leitura se estabiliza no visor do equipamento, permitindo a verificação precisa do valor da CE. Concluída a medição, o eletrodo deve ser enxaguido com água destilada para evitar interferências nas próximas análises, e o resultado obtido é registrado. Esse procedimento simples, quando realizado corretamente, fornece informações essenciais para o manejo seguro e eficiente da irrigação.

## DETERMINAÇÃO DO PH

A determinação do pH da água é um procedimento essencial para avaliar seu caráter ácido, neutro ou alcalino, informação que influencia diretamente a disponibilidade de nutrientes, a eficiência de defensivos e fertilizantes e o comportamento químico da água no solo e nos sistemas de irrigação. O pH não representa, por si só, um risco sanitário imediato, mas funciona como um importante indicador de qualidade, permitindo identificar alterações que podem comprometer o uso agrícola da água. Para realizar essa medição, utiliza-se um pHmetro previamente calibrado, etapa indispensável para garantir a precisão dos resultados, que se distingue em ácido ( $\text{pH} < 7$ ), neutra ( $\text{pH} = 7$ ) ou alcalino ( $\text{pH} > 7$ ) (CETESB, 2019).

A amostra deve ser coletada em um recipiente limpo e livre de qualquer contaminação e, em seguida, transferida para um béquer adequado. O eletrodo do pHmetro é então inserido na amostra, assegurando que esteja completamente submerso. Após alguns segundos, o aparelho estabiliza a leitura no visor, permitindo a verificação do valor de pH. Assim como em outras análises, o eletrodo deve ser enxaguido com água destilada após cada medição, prevenindo interferências em testes posteriores. Por fim, o valor determinado é registrado no quadro apropriado. Esse processo simples e rápido oferece informações fundamentais para o monitoramento e o manejo adequado da qualidade da água utilizada na irrigação.

Na prática, tanto a CE quanto o pH da água podem ser determinados de forma rápida e eficiente sem a necessidade de levar as amostras para um laboratório. Atualmente, existem equipamentos portáteis amplamente utilizados em campo, capazes de fornecer leituras instantâneas com boa precisão. No caso da CE, condutivímetros portáteis permitem medir diretamente no ponto de captação da

água ou em qualquer local da propriedade, bastando ligar o equipamento, calibrá-lo quando necessário e mergulhar o eletrodo na amostra. Da mesma forma, o pH pode ser obtido com pHmetros portáteis ou até canetas medidoras de pH, que funcionam com o mesmo princípio dos equipamentos laboratoriais, mas de forma mais prática e acessível, dispensando preparo complexo ou infraestrutura especializada. Esses dispositivos são especialmente úteis em propriedades rurais, em atividades de manejo diário e em situações em que decisões precisam ser tomadas rapidamente, permitindo que o monitoramento da qualidade da água seja realizado diretamente em campo, com agilidade e menor custo operacional.

## DETERMINAÇÃO DE SÓDIO

A determinação da concentração de sódio na água é uma etapa essencial na avaliação da sua qualidade, especialmente quando se trata de irrigação, já que níveis elevados desse elemento podem comprometer tanto o solo quanto o desenvolvimento das plantas. Altos níveis de sódio podem gerar danos às culturas irrigadas e aos sistemas de irrigação, comprometendo a eficiência e qualidade (Nascimento, 2020). O procedimento é realizado utilizando um fotômetro de chama, que deve estar devidamente calibrado antes do início das análises. Inicialmente, preparam-se as soluções reagentes de acordo com as recomendações técnicas e, em seguida, elabora-se uma série de padrões de calibração contendo concentrações conhecidas de sódio.

Cada padrão é introduzido no equipamento para que sua absorção de luz seja medida, possibilitando a construção de uma curva de calibração, fundamental para interpretar os resultados das amostras reais. Após essa etapa, coleta-se uma amostra representativa da água em uma cubeta limpa, que pode ser filtrada previamente caso apresente partículas que interfiram na leitura. Com o fotômetro ligado, a amostra é introduzida no equipamento e sua absorção de luz é registrada. O valor obtido é então comparado com a curva de calibração, permitindo determinar a concentração de sódio presente na amostra analisada. Esse procedimento garante precisão na quantificação e auxilia no diagnóstico de possíveis limitações da água para seu uso na agricultura.

## DETERMINAÇÃO DE POTÁSSIO

A determinação da concentração de potássio na água é essencial para avaliar a qualidade da água, pois níveis elevados desse elemento podem ter implicações tanto ambientais quanto de saúde pública. O potássio é um nutriente essencial, mas altas concentrações podem resultar de atividades industriais, escoamento agrícola ou influências geológicas (Queiroz e Oliveira, 2018). Esse procedimento também é realizado por meio de um fotômetro de chama, o qual deve estar devidamente calibrado antes do início da análise.

As soluções reagentes necessárias são preparadas conforme instruções técnicas, e em seguida procede-se à conexão do gás combustível, geralmente propano ou acetileno, e do ar comprimido ao equipamento. A limpeza do bico do queimador de chama deve ser verificada para garantir medições estáveis. As amostras de água destinadas à análise precisam ser filtradas ou tratadas sempre que houver presença de sólidos que possam interferir na atomização. Durante o procedimento, a amostra é aspirada pelo bico do queimador e atomizada em uma chama quente, produzindo uma coloração cuja intensidade é diretamente proporcional à concentração de potássio presente. O fotômetro realiza a leitura dessa intensidade, e, com base na curva de calibração previamente construída, determina-se a concentração de potássio na amostra. Ao finalizar as medições, o equipamento deve ser desligado e os gases desconectados, garantindo segurança e preservação do sistema. Esse método fornece resultados confiáveis e é amplamente utilizado em análises de rotina sobre a qualidade da água. A Figura 1 apresenta alguns equipamentos para a medição da CE e do pH de amostras de água.



Figura 1. Equipamentos para medição da CE e do pH.

## DETERMINAÇÃO DE COLIFORMES TOTAIS E FECAIS

A determinação de coliformes totais e fecais na água é um procedimento essencial para avaliar a presença de contaminação microbiológica, uma vez que esses micro-organismos indicam possíveis fontes de poluição, especialmente quando associados a material fecal (Nunes et al., 2019). Para a realização da análise, utiliza-se um conjunto específico de materiais (Figura 2), incluindo um recipiente para a coleta da amostra, a cartela Quanty-Tray, uma seladora, uma incubadora ajustada a  $35 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ , um equipamento de luz ultravioleta, utilizado para a leitura de coliformes fecais, e o reagente Colilert, adicionado em quantidade correspondente a uma unidade por amostra.

O processo inicia-se com a coleta de 100 mL da água a ser analisada, que deve ser condicionada em recipiente adequado. Em seguida, adiciona-se o reagente Colilert diretamente à amostra, agitando-se o frasco até que o produto esteja completamente

dissolvido. A solução obtida é então transferida para a cartela Quanty-Tray, a qual é selada utilizando a seladora apropriada, garantindo que os compartimentos fiquem devidamente isolados. Após a selagem, a cartela é colocada em uma incubadora mantida a  $35 \pm 0,5$  °C durante um período de 24 horas, tempo necessário para o desenvolvimento das reações enzimáticas que permitem a detecção dos coliformes.

Após a incubação, procede-se à interpretação dos resultados. Para determinar o número mais provável de coliformes totais, realiza-se a contagem dos compartimentos que apresentaram coloração amarela, identificando esses valores na tabela fornecida pelo método Idexx. Já para a determinação dos coliformes fecais, a cartela deve ser exposta à luz ultravioleta, e os compartimentos que exibirem fluorescência são registrados. Esses valores também são interpretados utilizando a tabela Idexx, que converte o número de compartimentos positivos na concentração final de coliformes fecais. Esse procedimento permite avaliar com precisão o nível de contaminação microbiológica da água, contribuindo para diagnósticos mais seguros sobre sua adequação ao uso na irrigação.



Figura 2. Materiais e equipamentos necessários para a determinação de coliformes.  
A: Cartela Quanty-Tray; B: Seladora; C: Incubadora; D: Equipamento de luz UV.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A avaliação da qualidade da água constitui uma ferramenta indispensável para compreender as condições químicas, físicas e microbiológicas dos diferentes mananciais, fornecendo subsídios fundamentais para a proteção da saúde humana, o manejo agrícola e a segurança ambiental. A determinação de parâmetros como condutividade elétrica, pH, sódio, potássio e coliformes permite identificar alterações na composição da água, diagnosticar possíveis fontes de contaminação e reconhecer limitações que possam comprometer seu uso. Além disso, a aplicação de métodos analíticos padronizados e o registro dos resultados garantem maior precisão na interpretação dos dados, contribuindo para decisões mais eficientes e para o cumprimento de normas e recomendações técnicas. Dessa forma, o monitoramento da qualidade da água fortalece a gestão sustentável dos recursos hídricos, favorecendo práticas que promovam segurança, eficiência e preservação ambiental.

## REFERÊNCIAS

- Almeida, O. Á. Qualidade da água de irrigação. Cruz das Almas: Embrapa Mandiocae Fruticultura, 2010.
- BRASIL. Portaria de Consolidação nº 4, de 28 de setembro de 2017. Consolidação das normas sobre os sistemas e os subsistemas do Sistema Único de Saúde. Diário oficial da União, Brasília, 2017.
- BRASIL. Portaria GM/MS nº 888. Consolidação das normas sobre os sistemas e os subsistemas do Sistema Único de Saúde. Diário oficial da União, Brasília, 2021.
- CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Apêndice E - Significado Ambiental e Sanitário das Variáveis de Qualidade das Águas e dos Sedimentos e Metodologias Analíticas e de Amostragem. São Paulo: CETESB, 2019.
- Molin, J. P.; Rabello, L. M. Estudos sobre a mensuração da condutividade elétrica do solo. Engenharia Agrícola, v. 31, p. 90-101, 2011.
- Nascimento, D. M. A importância da qualidade da água para seu uso na irrigação. Boletim do Tempo Presente, v. 9, n. 1, p. 70-92, 2020.
- Nunes, L. M.; Monteiro, M. D. F. G.; Sousa Júnior, D. L.; Aquino, P. E. A.; Saraiva, C. R. N.; Leandro, M. K. D. N. S.; Marques, A. E. F.; Silva, R. O. M.; Leandro, L. M. G. Pesquisa de coliformes totais e termotolerantes no rio Salgadinho no município de Juazeiro do Norte, CE. Revista Eletrônica Acervo Científico, v. 7, p. e2243-e2243, 2019.
- Queiroz, T. M.; Oliveira, L. C. P. Qualidade da água em comunidades quilombolas do Vôo Grande, município de Barra do Bugres (MT). Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 23, p. 173-180, 2018.

## ORGANIZADORES

**VINÍCIUS VILLA E VILA** - Engenheiro Agrônomo pela Universidade Estadual de Maringá (UEM) e École d'Ingénieurs de PURPAN-França, Mestre em Agronomia pela UEM e Doutor em Engenharia de Sistemas Agrícolas pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP). Pesquisador a nível de pós-doutorado no Departamento de Engenharia de Biossistemas da ESALQ. Atua com pesquisas nas áreas de agronomia e engenharia agrícola, com ênfase em estratégias para aumento da eficiência do uso da água na agricultura irrigada, manejo da irrigação, irrigação deficitária e inteligência artificial na irrigação.

ORCID: 0000-0001-8757-8195.

**PATRICIA ANGÉLICA ALVES MARQUES** - Engenheira Agrônoma pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP), Mestre e Doutora em Irrigação e Drenagem pela ESALQ/USP. Professora Associada no Departamento de Engenharia de Biossistemas (LEB) e INCT-EI da ESALQ/USP. Atua com pesquisas nas áreas de agronomia e engenharia agrícola, com ênfase em softwares e modelos para engenharia de água no solo, manejo da irrigação, modelagem, inteligência artificial, recursos hídricos, viabilidade econômica e plantas medicinais, aromáticas e condimentares.

ORCID: 0000-0002-6818-4833.



# ESTRATÉGIAS PARA AVALIAÇÃO E MANEJO EM SISTEMAS IRRIGADOS

- 🌐 [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)
- ✉️ [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)
- 📷 [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
- ⬇️ [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)



# ESTRATÉGIAS PARA AVALIAÇÃO E MANEJO EM SISTEMAS IRRIGADOS

- 🌐 [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)
- ✉️ [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)
- 📷 [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
- ⬇️ [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)