

Universidade de São Paulo  
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Arroz irrigado por gotejamento com água residuária da piscicultura

**Kamila Katiane Sotero Silva**

Dissertação apresentada para obtenção do título de  
Mestra em Ciências. Área de concentração: Engenharia  
de Sistemas Agrícolas

Piracicaba  
2023

Kamila Katiane Sotero Silva  
Engenheira de Biosistemas

**Arroz irrigado por gotejamento com água residuária da piscicultura**  
versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientadora:  
Profa. Dra. **TAMARA MARIA GOMES**

Dissertação apresentada para obtenção do título de  
Mestra em Ciências. Área de concentração: Engenharia  
de Sistemas Agrícolas

Piracicaba  
2023

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Silva, Kamila Katiane Sotero

Arroz irrigado por gotejamento com água residuária da piscicultura /  
Kamila Katiane Sotero Silva. - - versão revisada de acordo com a  
Resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2023.

82 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz  
de Queiroz”.

1. Reúso da água 2. Tilápia 3. Arroz agulhinha 4. Arroz japonico  
5. Produtividade da água I. Título

## DEDICATÓRIA

As minhas mães Vanda Maria e Inez Marinho,  
ao meu eterno pai Luiz Esperdião,  
a providência divina por guiar os meus passos.

## AGRADECIMENTOS

A providência divina que por sua misericórdia me concedeu o milagre de retornar a terra para quitar meus débitos dessa e de outras vidas e buscar a saúde integral.

A minha família, Vanda Maria, Inez Marinho e Luiz Esperdião, pela dedicação, amor e por sempre me fazerem enxergar que eu era a pessoa mais especial e única do mundo. A Lu Dantas pelo dom da vida, e irmãs, Andreane, Valentina, Júlia e Amanda, gratidão eterna.

A minha orientadora Profa. Dra. Tamara Maria Gomes, pela sua orientação e ensinamentos, compreensão e paciência pelo meu trabalho. Você é uma das mulheres mais incríveis que já conheci. Ao Prof. Dr. Brunno S. Cerozi, pelo apoio durante a condução do experimento e por abrir as portas do Setor de Piscicultura. Gratidão.

A minha querida e linda esposa, Taliana, por me amar, apoiar e por passar noites acordada comigo, te amo, você é minha vida, meu amor. Gratidão pela nossa filha pet, Tibine.

Aos meus amigos/irmãos Marco Antônio, Glau e Adri, pelo companheirismo, momentos de reflexão e risadas. A Tamira e Angélica por me acolherem e me ajudarem no experimento e na vida. A Davi, Caio, Laura, Tácia, Henrique, Paloma e Dudé pela dedicação e momentos de alegria com nossa amizade.

Aos professores do Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido (CDSA/UFCG), em especial a Janduy Gerra, que sempre acreditou no meu potencial. Aos professores da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP) e Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA/USP) pelo amplo apoio e ensinamento.

Ao Setor de Piscicultura (ESALQ/USP), em especial aos técnicos Júnior e Sérgio, pelo apoio prestado e ao Professor Zico pela conversas enriquecedoras nas aulas e nos cafézinhos. Aos estagiários do setor. Eterna gratidão.

Ao GEBIO, grupo de pesquisa que compartilhou conhecimento e me apoiou durante a condução do experimento.

A CAPES pela bolsa concedida, a FEALQ pelo o auxílio no início do mestrado e a Vila Estudantil da pós-graduação ESALQ/USP, pela moradia durante minha estadia em Piracicaba.

As pessoas que de maneira direta ou indireta contribuíram e não foram citadas aqui, mas estão no meu coração. Obrigada!

## SUMÁRIO

RESUMO .....	6
ABSTRACT .....	7
LISTA DE FIGURAS .....	8
LISTA DE TABELAS .....	9
1. INTRODUÇÃO.....	11
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	13
2.1. Arroz ( <i>Oryza sativa</i> ) .....	13
2.2. Arroz irrigado .....	15
2.3. Irrigação com água residuária da piscicultura .....	17
3. OBJETIVOS.....	21
3.1. Objetivos específicos .....	21
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	23
4.1. Local da pesquisa.....	23
4.2. Peixes e condições de criação.....	24
4.3. Caracterização da água residuária da piscicultura .....	26
4.4. Delineamento experimental.....	27
4.5. Solo e adubação .....	29
4.6. Irrigação.....	30
4.7. Cultivares de arroz e avaliação do desempenho agrônômico.....	32
4.8. Análise dos dados .....	34
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	35
5.1. Dados meteorológicos .....	35
5.2. Água residuária da piscicultura .....	39
5.3. Irrigação e aporte de nutrientes .....	45
5.4. Produção de peixes .....	49
5.5. Solo.....	50
5.6. Componentes de produção e produtividade da água .....	54
5.7. Análise foliar .....	60
6. CONCLUSÕES .....	65
REFERÊNCIAS .....	67

## RESUMO

**Arroz irrigado por gotejamento com água residuária da piscicultura**

A segurança alimentar tem sido largamente discutida por todas as nações do mundo e passa, sem dúvida, pelo paradigma de uma produção agropecuária sustentável, que considere a conservação dos recursos naturais, frente à crise climática. O arroz e o peixe são a base alimentar para diferentes populações e ambos, possuem sistemas produtivos, que impactam principalmente na quantidade e qualidade dos recursos hídricos. Diante deste contexto, esta pesquisa teve como objetivo promover a economia circular por meio da integração da produção agropecuária pelo uso múltiplo da água e nutrientes, pela avaliação da reutilização da água residuária de piscicultura na fertirrigação de arroz por sistema de gotejamento subsuperficial. Para isso foi conduzido experimento em campo em esquema de delineamento fatorial (3x2), em blocos casualizados, com quatro repetições, sendo três fontes de irrigação: 100% água de torneira (100AT); 50% água residuária da piscicultura (água residuária da piscicultura-ARP) e 50% AT (50ARP50AT); 100% ARP (100ARP) e, duas cultivares de arroz: IAC 109, tipo agulhinha – Ag; IAC 400, arroz japonico – J, em parcelas de 2 m<sup>2</sup>, totalizando 24 unidades experimentais. Para a produção da água residuária de piscicultura foi conduzida a criação 45 juvenis de tilápia-do-Nilo (*Oreochromis sp.*), em tanque de 1000 L com sistema fechado e renovação parcial de água, com taxa de arraçamento 0,02 (porcentagem de biomassa dia<sup>-1</sup>), por ração comercial. O manejo da irrigação para o cultivo do arroz foi realizado por tensiometria, visando manter a umidade do solo próximo à saturação. Após, 147 dias de condução das plantas e 250 dias de alimentação dos peixes, foram realizadas a colheita e as avaliações. Para tal, foram considerados o desempenho agrônomico do arroz, como variáveis de produção, estado nutricional, assim como, eficiência do uso da água (produtividade da água), química do solo, aporte de nutrientes pela irrigação com ARP de piscicultura e crescimento dos peixes. Os peixes tiveram uma taxa específica de crescimento em torno de 0,43%, com sobrevivência acima de 85%. A ARP mostrou potencial para o aporte de nutrientes, com moderado potencial salino. O fornecimento de N e K pela ARP ficou próximo dos valores recomendados para adubação da cultura do arroz, mantendo-se a umidade do solo próxima da saturação, o que sugere uma economia de 100% de fertilizante sintético no tratamento só com o uso da água residuária da piscicultura. O solo não foi impactado pela aplicação da ARP, reduzindo nestes tratamentos, às concentrações de K, Ca, matéria orgânica, S e V%. A produtividade dos grãos e biomassa do arroz foi incrementada com o aumento da dose de ARP, em ambas as cultivares. O arroz do tipo japonico apresentou maior biomassa da parte aérea e da raiz, em relação a cultivar agulhinha, o que não refletiu na massa dos grãos e nem na fertilidade das espiguetas. A produtividade da água foi superior no tratamento com 100ARP (2,40 kg m<sup>-3</sup>) e as análises foliares mostram aumentos nos teores de P e Ca, nos tratamentos com ARP, embora os valores de N, P e K tenham ficado abaixo da faixa considerada adequada para a cultura.

Palavras-chave: Reúso da água, Tilápia-do-Nilo, Arroz agulhinha, Arroz japonico, Produtividade da água

## ABSTRACT

**Drip-irrigated rice with fish farming wastewater**

Food security has been widely discussed by all nations of the world and undoubtedly involves the paradigm of sustainable agricultural production, considering the conservation of natural resources in the face of the climate crisis. Rice and fish are staple foods for different populations, and both have production systems that primarily impact the quantity and quality of water resources. In this context, the objective of this research was to promote circular economy through the integration of agricultural production using multiple water and nutrient resources, by evaluating the reuse of wastewater from fish farming for fertigation of rice through subsurface drip irrigation. For this purpose, a field experiment was conducted in a factorial design (3x2) in randomized blocks, with four replications, including three irrigation sources: 100% tap water (100TW); 50% fish farming wastewater (fish farming wastewater - ARP) and 50% TW (50ARP50TW); 100% ARP (100ARP), and two rice cultivars: IAC 109, short-grain type - Ag; IAC 400, japonica rice - J, in 2 m<sup>2</sup> plots, totaling 24 experimental units. To produce the fish farming wastewater, 45 juveniles of Nile tilapia (*Oreochromis sp.*) were raised in a 1000 L tank with a closed system and partial water exchange, with a feeding rate of 0.02 (percentage of biomass per day) using commercial feed. Irrigation management for rice cultivation was carried out using tensiometry, aiming to maintain soil moisture close to saturation. After 147 days of plant growth and 250 days of fish feeding, harvesting and evaluations were performed. The agronomic performance of rice, such as production variables, nutritional status, water use efficiency (water productivity), soil chemistry, nutrient input through irrigation with fish farming wastewater, and fish growth were considered. The fish had a specific growth rate of approximately 0.43%, with a survival rate above 85%. The ARP showed potential for nutrient supply, with a moderate saline potential. The supply of N and K through ARP was close to the recommended values for rice fertilization, while maintaining soil moisture near saturation, suggesting a 100% reduction in synthetic fertilizer use in the treatment using only fish farming wastewater. The soil was not significantly impacted by the application of ARP, with reduced concentrations of K, Ca, organic matter, S, and V% in these treatments. Grain yield and biomass of rice increased with increasing ARP dose in both cultivars. The japonica rice type showed higher aboveground and root biomass compared to the short-grain cultivar, although this did not reflect in grain weight or spikelet fertility. Water productivity was higher in the treatment with 100ARP (2.40 kg m<sup>-3</sup>), and foliar analyses showed increases in P and Ca contents in the treatments with ARP, although N, P, and K values remained below the range considered adequate for the crop.

Keywords: Water reuse, Nile Tilapia, Agulhinha rice, Japonica rice, Water productivity



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fases fenológicas do arroz.....	13
Figura 2. Localização do local da pesquisa – Setor da Piscicultura / ESALQ / USP – Piracicaba/SP (2022).....	23
Figura 3. a: Média mensal da temperatura máxima (linha azul) e mínima (linha verde) (°C), b: precipitação (mm) no período de 1917 a 2019.....	24
Figura 4. a: Juvenil de tilápia-do-nilo com peso de 100g, b: tanque de 1000l com 45 peixes, c: sistema fechado com filtro biológico e controle de temperatura da água (28 °C).....	25
Figura 5. Croqui do delineamento experimental. T = tratamento. T1 – 100ATAg; t2 – 100ATJ; t3 – 50ARP50ATAg; t4 – 50ARP50ATJ; t5 – 100ARPAg; t6 – 100ARPJ.....	28
Figura 6. Vista geral das parcelas experimentais.....	29
Figura 7. Curva característica da água do solo.....	31
Figura 8. a: valores mensais durante a condução do experimento no período de agosto/2021 e janeiro/2022 para temperatura média do ar (TEMP MÉDIA), temperatura média mínima do ar (TEMP MÍNIMA), temperatura média máxima do ar (TEMP MÁXIMA), velocidade do vento média (VEL VENTO MÉDIA), velocidade do vento máxima (VEL VENTO MÁXIMA), b: umidade relativa média do ar (UR MÉDIA), umidade relativa média do ar mínima (UR MÍNIMA) e umidade relativa média do ar máxima (UR MÁXIMA).....	36
Figura 9. Valores mensais durante a condução do experimento no período de agosto/2021 e janeiro/2022 para média mensal da precipitação em milímetros.....	37
Figura 10. Valores diários durante a condução do experimento no período de agosto/2021 e janeiro/2022 para evapotranspiração de referência (ET <sub>o</sub> ), evapotranspiração de cultura (ET <sub>c</sub> ) e coeficiente de cultura (K <sub>c</sub> ).....	38
Figura 11. Potencial da água do solo (kpa) durante o cultivo para as cultivares IAC 109 e IAC 400.....	46
Figura 12. Precipitação (mm) para irrigação e chuva durante o período do experimento. 100ATAg=100% água de torneira (AT), arroz tipo agulhinha (AG); 100ATJ= 100% AT, arroz japonico (j); 50ARP50ATAg=50% água residuária da piscicultura (ARP), 50%AT, Ag; 50ARP50ATJ=50%ARP, 50%AT, J; 100ARPAg=100%ARP, Ag; 100ARPJ=100%ARP, J.....	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores nutricionais da ração comercial .....	26
Tabela 2. Caracterização físico-química do solo antes do início do experimento .....	29
Tabela 3. Equações para determinar os componentes de produção. ....	33
Tabela 4. Caracterização físico-química das fontes de irrigação da água residuária da piscicultura (ARP) (médias e desvio padrão).....	40
Tabela 5. Caracterização físico-química das fontes de irrigação em relação ao ciclo de ração dos peixes durante o experimento (médias e desvio padrão). ....	43
Tabela 6. Aporte de nutrientes pela aplicação das fontes de irrigação para cada tratamento .....	49
Tabela 7. Valores de desempenho do cultivo de Tilápia-do-Nilo .....	50
Tabela 8. Análise da variância para ph, potássio ( $K^+$ ), cálcio ( $Ca^{2+}$ ), acidez potencial ( $H+Al$ ), sódio ( $Na^+$ ), matéria orgânica (M.O), carbono total (C.T), enxofre (S), saturação por bases (V) e porcentagem de sódio trocável (PST) no solo como efeito das cultivares, fontes de irrigação e interações. Valores-F são apresentados para efeitos significativos.....	51
Tabela 9. Valores de ph, potássio ( $K^+$ ), cálcio ( $Ca^{2+}$ ), acidez potencial ( $H+Al$ ), sódio ( $Na^+$ ), matéria orgânica (M.O), carbono total (C.T), enxofre (S), saturação por bases (V) do solo, ao final do cultivo do arroz irrigado por gotejamento subsuperficial.....	52
Tabela 10. Análise da variância para componentes de produção, produtividade dos grãos (PG), biomassa seca da raiz, número de panículas (NP) por $m^2$ , número de espiguetas por panícula (NE), biomassa seca, massa de 1000 grãos (MG), porcentagem de fertilidade de espiguetas (FE), comprimento de panícula (CP), comprimento da parte aérea (cpa) e produtividade da água, como efeito das cultivares, fontes de irrigação e interações. Valores-F são apresentados para efeitos significativos. ....	55
Tabela 11. Componentes de produção do cultivo do arroz irrigado por gotejamento subsuperficial com água residuária da piscicultura.....	58
Tabela 12. Análise da variância para análise foliar, como efeito das cultivares, fontes de irrigação e interações. Valores-F são apresentados para efeitos significativos. ....	60
Tabela 13. Valores da análise foliar do arroz irrigado com água residuária da piscicultura.....	62



## 1. INTRODUÇÃO

O arroz é a base alimentar para mais de 3 bilhões de pessoas no mundo e no Brasil, a insegurança alimentar atinge 15,4 milhões de pessoas, o que faz da produção deste grão um instrumento estratégico no contexto social, econômico e ambiental (FAO et al., 2022).

A elevada demanda por água pela rizicultura, devido a adoção de sistemas irrigados por inundação, principalmente na região sul do Brasil, exerce grande pressão sobre os recursos hídricos (ANA, 2019a).

A irrigação, embora em muitas situações seja considerada vilã no consumo da água, tem enorme relevância na produção agrícola brasileira, pelo aumento da produtividade e qualidade dos produtos, além de possibilitar a oferta em períodos de entre safra, agregando valor à cadeia. As projeções para a agricultura irrigada mostram expansões na ordem de três milhões de hectares até 2030, resultando no incremento de 40% pela demanda de água doce (ANA, 2019b).

Neste contexto, a segurança alimentar global exigirá esforços conjuntos para aumentar a produtividade do arroz por unidade de terra (Seck et al., 2012) e otimizar o uso da água, buscando eficiência e estratégias de economia (Bouman & Tuong, 2001; Yang et al., 2007; Yao et al., 2017). Perfazendo este caminho, a adoção de sistemas de irrigação mais eficientes, como a irrigação por gotejamento e fontes alternativas de água, principalmente em cenários de restrição hídrica, possibilitará sistemas produtivos mais sustentáveis (Fader et al., 2016; Ma, Sanguinet, & Jacoby, 2019).

No Brasil, ainda existe a concepção de que a irrigação com águas residuárias seja prejudicial ao meio ambiente, esse paradigma faz com que a utilização desta técnica ainda seja restrita. O uso de água residuária para fins de irrigação ainda necessita de uma abordagem diligente, embora o seu uso apresente vantagens na produção agrícola e no consumo consciente dos recursos hídricos, se faz necessário o desenvolvimento de estudos mais aprofundados na área, uma vez, que as pesquisas e leis brasileiras ainda são incipientes (Jesus et al., 2020).

A perspectiva de avanço nas pesquisas com águas residuárias tem um papel fundamental para o aprimoramento da reutilização de águas residuárias em culturas, como a do arroz (Fader et al., 2016; Ma, Sanguinet, & Jacoby, 2019).

Os setores da aquicultura exigem grandes volumes de água e mesmo a criação sob condições ideais, disponibilizam enormes quantidades de águas residuárias contendo altas concentrações de nutrientes ao meio ambiente (Dourou et al., 2020). O reúso de águas residuárias de piscicultura pode reduzir o impacto ambiental da aquicultura (Dourou et al., 2018). O gerenciamento adequado da alimentação dos peixes desempenha um papel crucial para garantir o crescimento ideal e preservar a qualidade da água. É essencial implementar estratégias eficazes para obter um crescimento eficiente e, ao mesmo tempo, manter um ambiente saudável para os peixes. Concentrar-se apenas em alimentar os peixes até o ponto de aparente saciedade sem o controle adequado pode ter efeitos prejudiciais sobre a saúde dos peixes e contribuir indiretamente para a poluição da água (Davis & Hardy, 2022).

O uso de sistemas de irrigação mais eficientes, associado ao reúso da água, demonstra uma vantagem em termos econômicos e ambientais, permitindo a manutenção da produção agrícola e da valoração da água residuária escalonável industrialmente. O entendimento da quantidade de água necessária para o desenvolvimento da planta é de grande relevância, sendo que, a possibilidade de uma irrigação proveniente de fontes alternativas de água, rica em nutrientes, pode suprir a necessidade pela busca de produtos complementares que dependem, em alguns casos, de importação, e pode ser impactado por questões geopolíticas, como a Guerra na Ucrânia iniciada no ano de 2022.

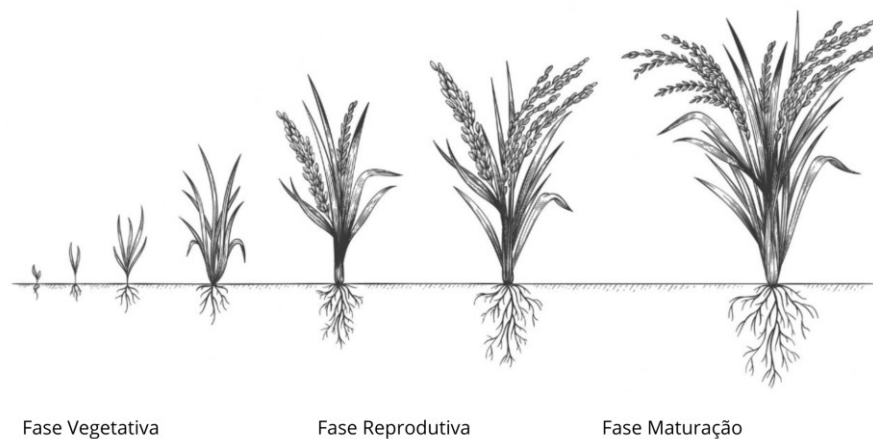
Esta pesquisa visa contribuir no sentido de fomentar informações relevantes para possibilitar novas técnicas para a rizicultura, desmitificar e valorar o uso de águas residuárias na produção agrícola, explorando uma forma adequada de gerenciar a água residuária que seja eficiente e de baixo custo, além de integrar como solução, a aquicultura na agricultura.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Arroz (*Oryza sativa*)

A cadeia orizícola desempenha um importante papel econômico, social e cultural por ser um dos produtos mais consumidos no Brasil. A área total estimada para a safra 2022/23 de arroz irrigado foi de 1,18 milhões de hectares, com uma produtividade esperada de 8.166 kg ha<sup>-1</sup>, resultando em uma produção de 9,67 milhões de toneladas (CONAB, 2023).

O ciclo de cultivo da cultura do arroz pode durar de 3 a 6 meses dependendo da cultivar e das condições ambientais. Em termos agronômicos esse ciclo compreende três fases de desenvolvimento: fase vegetativa, fase reprodutiva e fase de maturação (Figura 1). A fase vegetativa compreende o processo de germinação até a diferenciação do primórdio floral da panícula; a fase reprodutiva, a diferenciação do primórdio floral da panícula até a floração e a fase de maturação da fase leitosa do grão até a maturação (Yoshida, 1981).



**Figura 1.** Fases fenológicas do arroz. Fonte: Adaptada de Tartila (2023)

Os conhecimentos das características fenológicas são de suma importância para entender como os fatores climáticos influenciam o desenvolvimento da planta (Menegassi, 2022). No Brasil a cultura do arroz é submetida a várias condições climáticas distintas, desse modo, fatores como; temperatura do ar, fotoperíodo, radiação solar e precipitações pluviais, podem ocasionar divergências durante o plantio (Yoshida, 1981).

A temperatura do ar é um dos fatores mais importantes para o crescimento do arroz, a temperatura ótima para esse tipo de cultura situa-se entre 20 a 35 °C para a germinação, 30 a 33 °C para a floração e para a maturação entre 20 a 25 °C (Ferreira et al., 2013).

O excesso de nitrogênio na cultura do arroz poderá retardar a maturação, provocar o acamamento das plantas e o aparecimento de brusone, doença foliar causada por fungo. A reposição adequada de nutrientes no solo também é importante para a produtividade das culturas. Estima-se que a perda de nutrientes dos arrozais é menor do que a de outros vegetais não cultivados intensivamente. Em geral, deficiência ou excesso de nitrogênio (N) são mais perceptíveis nas lavouras, devido as funções que o nitrogênio exerce nas plantas (Fageria et al, 1995; Liu et al., 2019).

O desenvolvimento do melhoramento genético para a cultura do arroz tem se desenvolvido para os mais diversos fins, como aumento de produtividade, adaptações em ambientes com e sem restrição de água, variedades especiais para agregação de valor, dentre outros. No Brasil, pesquisadores do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), juntamente com a Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios (APTA) do Vale do Paraíba, desenvolveram cultivares de arroz especiais para a culinária italiana (IAC 300) e japonesa (IAC 400), além de arroz aromático (IAC 500) e arroz preto (IAC 600) e do tipo agulhinha (IAC 109), dentre outros.

Em 1995, o IAC realizou cruzamento entre a linhagem 95Ay222 oriunda dos ensaios avançados da Louisiana (USA) e da cultivar de grãos médios M202 da Califórnia (USA) e após vários ciclos de seleção a linhagem IAC 1755 destacou-se das demais pelo seu excelente desempenho agrônomo, planta com arquitetura moderna, panícula muito densa, excelente qualidade culinária e com bom potencial produtivo. As avaliações preliminares da cultivar IAC 400 mostraram produtividade média superior (4.978,00 kg ha<sup>-1</sup>) às cultivares importadas e equivalente aos tipos tradicionais de arroz (IAC 103, EPAGRI 109 e Koshihikari) irrigado cultivado em São Paulo (IAC, 2005).

A cultivar IAC 400 apresentou produtividade média de 8.493 kg ha<sup>-1</sup>, isso pode ser justificado pela sua arquitetura foliar, permitindo maior penetração de luz na planta devido as folhas eretas, alta capacidade de perfilhamento e produção de espiguetas. A cultivar IAC 400 destaca-se pelo número de panículas viáveis por metro quadrado, número de

espiguetas por panícula e espiguetas férteis por panícula, sendo a mais produtiva dentre algumas cultivares avaliadas (Lima et al., 2019).

O IAC lançou em 2018 na feira Agrishow a cultivar de arroz do tipo agulhinha (IAC 109), com potencial produtivo médio de 6.238 kg ha<sup>-1</sup>. O porte ereto da cultivar IAC 109 beneficia a cultura, por permitir maior entrada de luz solar, melhorando a fotossíntese, e proporciona o plantio com menor espaçamento entre as plantas. A cultivar IAC 109 pode ser plantada do início de agosto a meados de janeiro, é resistente à brusone, a principal doença do arrozal e tem maturação média de 120 dias (IAC, 2018).

## **2.2. Arroz irrigado**

O cultivo do arroz no Brasil é realizado sob condições de sequeiro (terras altas) e predominantemente sob irrigação, o que corresponde a 76% da área total (CONAB, 2023).

O Rio Grande do Sul (RS) é o estado brasileiro com a maior área irrigada, sendo que 78% dessa área é destinada para a cultura do arroz inundado. O arroz irrigado por sistema de inundação teve uma área em 2015 de 1,54 milhões de ha, correspondendo a 22% da área irrigada no Brasil, sendo que os estados de SC, TO e demais unidades federativas, ficaram com 10%, 5% e 7%, respectivamente (ANA, 2017). Segundo dados da ANA, o arroz responde por 45,9% e 37,8% da água retirada e consumida, cuja demanda média anual é de 435 e 281 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, respectivamente. A estimativa para 2030 é de que essa demanda atinja os valores de 499 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> (retirada) e 325 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> (consumo).

O arroz consome, no decorrer do seu ciclo, de 700 a 1.500 mm de água, dependendo do solo, manejo, método de irrigação, condições climáticas e ciclo da cultivar. Na irrigação por inundação as perdas de água podem ocorrer na condução, por percolação, infiltração lateral e escoamento superficial (EPAGRI, 2002).

Guimarães, Stone, & Silva (2016) observaram que a demanda de água durante o cultivo de arroz irrigado foi maior na fase reprodutiva do que na fase de maturação, devido a maior área foliar no período reprodutivo, em contrapartida, durante a fase final de desenvolvimento da planta, observou-se perda de área foliar com o início da senescência e redução da atividade celular na maturação. Porém, esses autores encontraram que a produtividade foi mais afetada em condição de estresse hídrico na fase de maturação.



O desenvolvimento de estratégias que maximizam a eficiência do uso da água na cultura do arroz, que é a relação entre a quantidade de grão produzidos e a quantidade de água utilizada (Santos et al., 2015), tem sido cada vez mais pesquisada, principalmente em situações de escassez hídrica.

Diversos estudos sobre métodos e manejos de irrigação têm sido desenvolvidos para aumentar a eficiência de uso da água. A irrigação por inundação contínua normalmente propicia maior produtividade, devido a eliminação do estresse hídrico, melhor controle de plantas daninhas e da temperatura do solo (Tsutsui, 1972) e de maneira negativa causa compactação do solo (Munareto et al., 2010).

No entanto, produtividades similares têm sido observadas quando se compara os sistemas de inundação contínua com intermitente (Stone, Moreira, & Silveira Filho, 1990; Scivittaro, Steinmetz & Severo, 2010; Santos et al., 2015; Pineda Suárez & Sánchez Román, 2018); em condições de solo saturado (Tabbal et al., 2002); em sistemas de irrigação por aspersão em solos com boa drenagem (Marano, Folegatti, & Imhoff, 2014) e sistemas irrigados por gotejamento (Sharda et al., 2017).

A irrigação por gotejamento subsuperficial fornece água abaixo da superfície do solo, podendo potencialmente reduzir os níveis de evaporação (Li & Zhang, 2017) e se mostra como promessa de rendimento e eficiência no uso da água (Levidow et al., 2014; Pisciotta et al., 2018), além do potencial para incentivar o enraizamento profundo (Ma, Sanguinet, & Jacoby, 2019). A irrigação direta na zona da raiz aumenta a eficiência do uso da água da lavoura e pode ser avaliado como melhor benefício econômico e ambiental em comparação com as estratégias de irrigação tradicionais em diferentes cenários climáticos (Ma, Sanguinet, & Jacoby, 2020; Mo, Li, & Wang, 2017; Ayars, Fulton, & Taylor, 2015).

O desenvolvimento de novas tecnologias nos campos de arroz irrigado é fundamental para que se tenha manutenção da produção, com economia de água, garantindo a sustentabilidade no cultivo, pelo equilíbrio entre o tripé econômico, social e ambiental. O reúso da água surge como outra estratégia sustentável para garantir a segurança hídrica, uma vez que reduz a descarga de poluentes em corpos receptores, conservando os recursos hídricos para usos mais nobres, como o abastecimento humano.

### 2.3. Irrigação com água residuária da piscicultura

Durante a década de 1970, a aquicultura no Brasil passou por uma transformação, tornando-se um setor profissional. Hoje, a produção aquícola do país é em grande parte impulsionada por pequenos empresários, fazendas e incubatórios de peixes. De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), as atividades de aquicultura se estenderam por 4.198 municípios em 2020, refletindo a adoção generalizada de vários métodos de produção. Notavelmente, as espécies de peixes de água doce dominaram o cenário da aquicultura, emergindo como o grupo mais predominante cultivado em todos os estados (Valenti et al., 2021).

De acordo com PeixeBR (2021), o cultivo de peixes no Brasil é a atividade zootécnica que mais vem ganhando espaço no país nos últimos 10 anos, em 2021 atingiu 841.005 mil toneladas. Segundo dados da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) 2022, mostra que o Brasil está entre os 15 maiores produtores de peixe do mundo. Atualmente a aquicultura movimenta R\$ 8 bilhões ano<sup>-1</sup>, gera mais de 3 milhões de empregos diretos e indiretos e cresce com taxas superiores a 5% ao ano (PeixeBR, 2021).

A aquicultura brasileira é baseada em regime-intensivo de produção, sendo sustentada principalmente por pequenos produtores (Marques et al., 2020). Os principais produtores de peixe de cultivo no Brasil em 2021 foram Paraná (Sul) produzindo 188.000 ton ano<sup>-1</sup>, São Paulo (sudeste) com 81.640 ton ano<sup>-1</sup> e Rondônia (norte) com 59.600 ton ano<sup>-1</sup> (PeixeBR, 2022).

Entre as mais diversas espécies de peixes produzidas no Brasil, a tilápia do nilo (*Oreochromis niloticus*) é a mais cultivada, por sua grande capacidade de produção, carne de qualidade, baixo custo de produção e adaptação, liderando a produção de carne de peixe em valor e volume (Pedroza Filho & Muñoz, 2019).

A utilização da reciclagem de água na irrigação agrícola serve como uma estratégia valiosa para o gerenciamento eficaz dos recursos hídricos. Ela oferece uma solução alternativa para atender às necessidades de água das culturas, especialmente durante as estações secas e em regiões com disponibilidade limitada de água. O gerenciamento adequado da irrigação não apenas garante a conservação da água, mas também facilita o ciclo de nutrientes, reduzindo assim a necessidade de aplicação excessiva de fertilizantes. Além disso, essa prática desempenha um papel fundamental na minimização da poluição da

água, protegendo a saúde dos corpos d'água (Menegassi et al., 2020; Lima, 2020; Brichi, 2019).

A água residuária da piscicultura (ARP) por ser rica em matéria orgânica e mineral, provenientes dos resíduos da alimentação e das fezes excretadas pelos peixes, apresenta-se como alternativa para reúso do ponto de vista nutricional, uma vez que pode favorecer o desenvolvimento das plantas, além de diminuir o impacto ambiental negativo dos lançamentos dessas águas residuárias no ambiente (Nascimento et al., 2016a; Nascimento et al., 2016b).

Os sólidos da ARP e os resíduos da alimentação não ingeridas são metabolizados pelas bactérias presentes no meio, as quais consomem oxigênio e produzem amônia. Esta condição de aumento na quantidade de amônia pode causar a morte dos peixes devido a grande toxicidade (Sipaúba-Tavares, Fávero, & Braga, 2002; Al-Hafedh, Alam & Alam, 2003). Portanto, é fundamental o acompanhamento da qualidade da água nos sistemas de criação para um manejo adequado dos animais, com um melhor uso da água e controle da alimentação (Sipaúba-Tavares, Gomes & Braga, 2003).

Os descartes de sistemas de pisciculturas têm grande quantidade de nutrientes, exigindo antes de serem devolvidos ao ambiente um tratamento ou destino adequado (Rakocy, 2012). As ARPs devem estar em conformidade com os padrões de qualidade da água estabelecidos pelos órgãos ambientais, obedecendo a critérios numéricos específicos. Isso é essencial porque essas águas residuais podem resultar em concentrações elevadas de fósforo e nitrogênio nos corpos d'água, no acúmulo de matéria orgânica nos sedimentos, na diminuição dos níveis de oxigênio dissolvido e na proliferação de quantidades significativas de fitoplâncton. Além disso, as águas residuais da piscicultura compartilham semelhanças com os efluentes residenciais, necessitando de amplo oxigênio para o metabolismo dos compostos, exibindo altas concentrações de sólidos em suspensão, bem como níveis elevados de nitrogênio e compostos de fosfato (Snow, Ghaly & Snow, 2008).

A ARP também foi investigado como um método de irrigação alternativo para o cultivo de tomate cereja em ambientes protegidos. Quando combinada com água de baixa condutividade elétrica, a ARP demonstrou potencial como uma fonte benéfica de água e nutrientes (Silva et al., 2021). Em outro estudo envolvendo a mesma cultura, a irrigação com

ARP proveniente da criação de tilápias resultou em maior produtividade em comparação com a irrigação com água de poço (Castro, Borges Azevedo, & Bezerra-Neto, 2006).

Na irrigação de gramíneas com ARP proveniente da criação de Tambaqui os resultados foram positivos sobre o desenvolvimento das alturas das plantas e no tamanho da raiz (Souza & Neto, 2018).

Os estudos mostram potencial positivo sobre o uso de águas residuárias da criação de peixes na irrigação de culturas, complementar à gestão sustentável dos recursos hídricos, mas ainda pouco se conhece sobre o comportamento dessas águas como fonte nutrientes às plantas, o efeito no solo e nas águas subterrâneas.



### **3. OBJETIVOS**

O objetivo geral do estudo foi promover a economia circular por meio da integração na produção agropecuária pelo uso múltiplo da água e nutrientes: uma avaliação da reutilização da água residuária nutritiva de piscicultura na fertirrigação de arroz por sistema de gotejamento subsuperficial.

#### **3.1. Objetivos específicos**

a) Caracterizar a água residuária da criação de tilápia, em sistema aberto com renovação parcial de água e validar a eficiência do uso da água e nutrientes, no cultivo de arroz;

b) Avaliar o desempenho agrônômico de duas cultivares de arroz (arroz do tipo agulhinha e arroz utilizado na culinária japonesa), irrigadas com água residuária de piscicultura por gotejamento subsuperficial, visando atingir a produtividade comercial.



## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1. Local da pesquisa

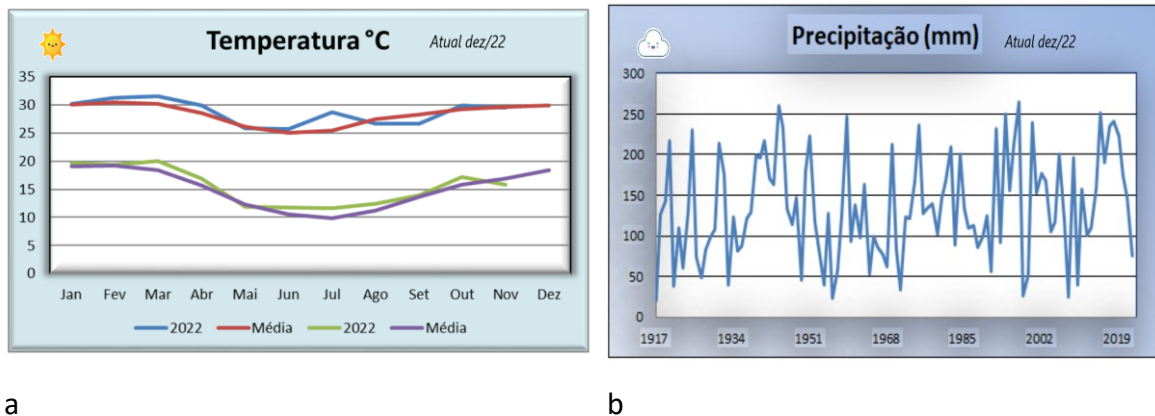
A pesquisa foi realizada na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”/USP, Departamento de Zootecnia, Setor de Piscicultura em Piracicaba/SP (Figura 2), com altitude de 546 metros, latitude de 22°42’ sul e longitude 47°38’ oeste, no período de 21/08/2021 a 14/01/2022.



**Figura 2.** Localização do local da pesquisa – Setor da Piscicultura / ESALQ / USP – Piracicaba/SP (2022). Fonte: Google Earth (2022)

O clima da região de Piracicaba é do tipo Aw, tropical com inverno seco, segundo classificação de Köppen & Geiger (1936), com temperatura média anual é 21.7 °C e precipitação média anual de 1346 mm. A série de dados climatológicos da região de Piracicaba foi representado por médias iniciada em 1917 e observados a partir da Estação Meteorológica da ESALQ. A média mensal da temperatura máxima e mínima (°C) e precipitação (mm) no período de 1917 a 2022 é apresentada na Figura 3.

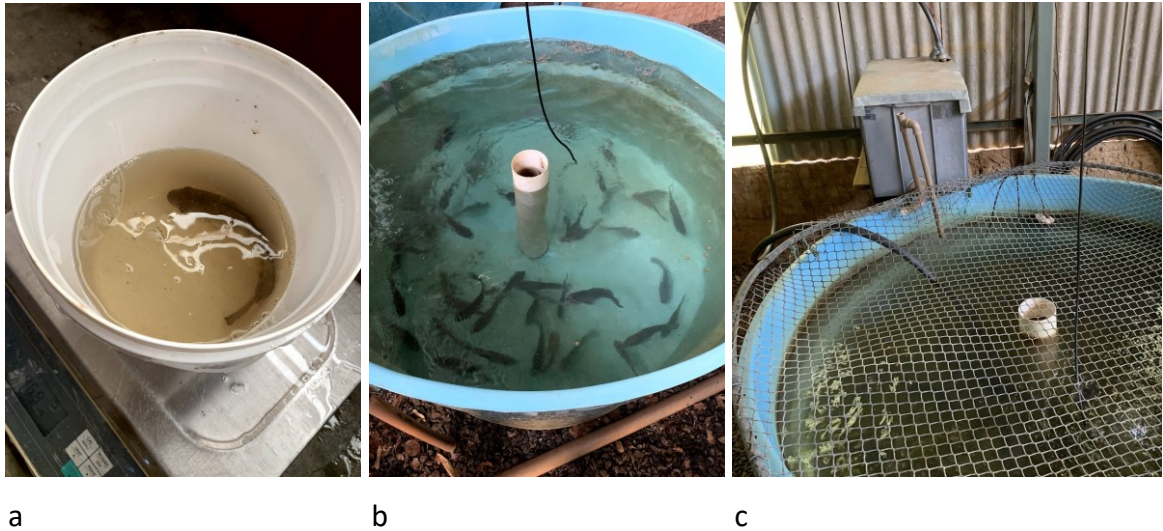




**Figura 3.** a: Média mensal da temperatura máxima (linha azul) e mínima (linha verde) (°C), b: precipitação (mm) no período de 1917 a 2019. Fonte: <http://www.leb.esalq.usp.br/leb/boletimmensal.html>

#### 4.2. Peixes e condições de criação

Para a realização do experimento foram utilizados juvenis de tilápia-do-Nilo (*Oreochromis sp.*), 45 peixes no tanque, cada peixe com 100 g, com taxa de arraçoamento 0,02 (porcentagem de biomassa  $\text{dia}^{-1}$ ) obtidos a partir de piscicultura comercial, sendo cultivados em tanques de 1000 L em sistema fechado com renovação parcial de água, proveniente do sistema de abastecimento de água da ESALQ/USP, após processo de período de repouso de 24 horas, para evaporação do cloro (Figura 4).



**Figura 4.** a: Juvenil de tilápia-do-Nilo com peso de 100g, b: tanque de 1000L com 45 peixes, c: sistema fechado com filtro biológico e controle de temperatura da água (28 °C). Fonte: Própria autoria.

Como o sistema era fechado foi necessário utilizar um filtro biológico com bactérias que convertam a amônia em nitrito e este em nitrato. O uso filtro biológico ajuda na conversão da amônia tóxica dos peixes em nitrato, o que é benéfico para as plantas (Bracino et al., 2020). O tanque foi sifonado a cada 15 dias para remoção de restos de ração e matéria orgânica, sedimentado ao fundo. A temperatura da água foi mantida em  $28 \pm 1$  °C por meio da instalação de aquecedores com termostatos.

Os peixes receberam ração comercial (Tabela 1) por um período de aproximadamente 250 dias. A ração foi fornecida em duas refeições diárias, programadas para as 08:00 e 16:00 horas, com um total de 110 g por dia durante a fase inicial. Durante essa fase, os peixes receberam uma ração diária de 220 g.

Na primeira fase, o manejo da alimentação foi baseado na biomassa total dos peixes, que era de aproximadamente 4,5 kg. À medida que os peixes avançavam para a segunda fase, o regime de alimentação foi ajustado para acomodar suas maiores necessidades nutricionais. Para determinar a quantidade adequada de ração necessária, uma nova pesagem foi realizada, revelando uma biomassa total de 11 kg, com cada peixe pesando aproximadamente 245 g.

**Tabela 1.** Valores nutricionais da ração comercial

Parâmetro	Concentração (%)
Proteína Bruta (Mín.)	28
Umidade (Máx.)	12
Extrato Etéreo (Mín.)	5
Mat. Mineral (Máx.)	14
Fibra Bruta (Máx.)	10
Cálcio (Mín.)	15
Cálcio (Máx.)	30
Fósforo (Mín.)	0,60
Vitamina C (Mín.)	0,02

Fonte: <https://www.presencenutricaoanimal.com.br/produto/nutripiscis-si-crescimento-28-6-8>

Para avaliação do desenvolvimento dos peixes, durante a condução do experimento, foram determinados indicadores de desempenho, conforme apresentado pelas Equações 1, 2, 3, 4 e 5, sugerido por Tacon (1990).

a. Ganho de peso (GP)

$$GP = [(peso\ final) - (peso\ inicial)]; \quad \text{Equação 1}$$

b. Conversão alimentar (CA)

$$CA = [(consumo\ de\ ração) \div (ganho\ de\ peso)]; \quad \text{Equação 2}$$

c. Taxa de crescimento específico (TCE)

$$TCE = 100 \times [(ln\ peso\ final - ln\ peso\ inicial) \div período] \quad \text{Equação 3}$$

d. Sobrevivência (S)

$$S = [(100 \times \text{número de animais final}) \div (\text{número de animais inicial})] \quad \text{Equação 4}$$

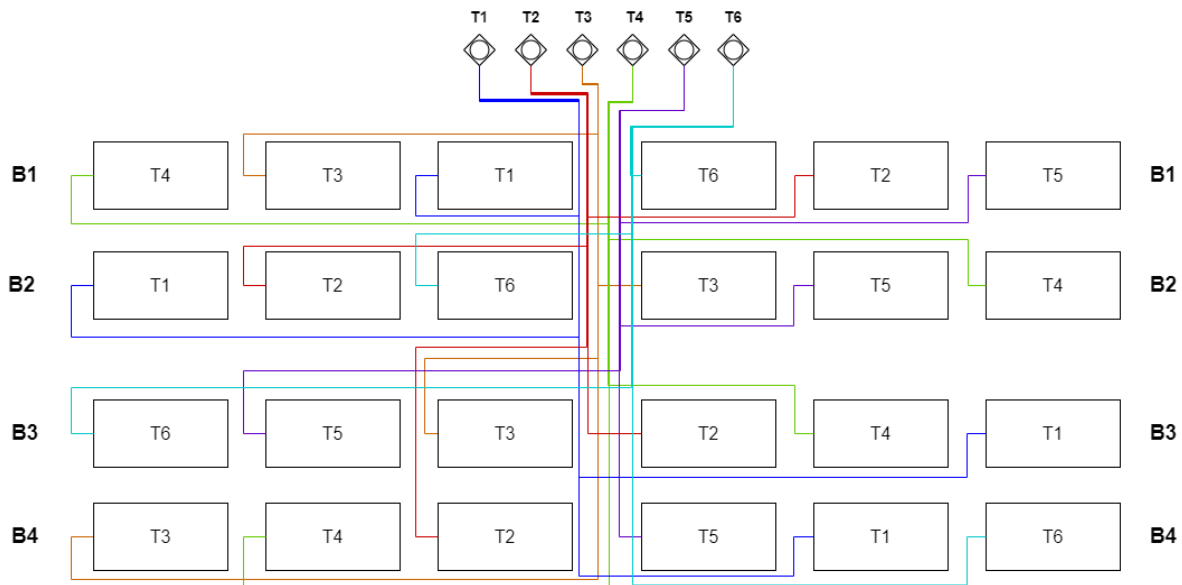
### 4.3. Caracterização da água residuária da piscicultura

A água residuária da piscicultura (ARP) utilizada para irrigação do arroz foi proveniente do tanque de criação de tilápia, como descrito anteriormente. A caracterização físico-química foi realizada previamente à semeadura, para definição do aporte de nutrientes às plantas de arroz e, durante a condução do experimento seguiu-se com amostragens quinzenais.

As coletas das amostras foram realizadas conforme o Guia Nacional de Coleta e Preservação de amostras de água (CETESB & ANA, 2011) e analisadas segundo APHA/AWWA/WEF (2012), no laboratório de Solos e Qualidade de Água/Departamento de Engenharia de Biosistemas/ESALQ/USP, na Central Multitusuário de Análises Ambientais do Departamento de Ciência do Solo e no Laboratório da Piscicultura/ESALQ/USP. Os parâmetros analisados foram condutividade elétrica (CE), pH, amônia total, série nitrogenada (NTK – Nitrogênio Total Kjeldahl,  $\text{NH}_4^+$  – amônio,  $\text{NO}_3^-$  – nitrato,  $\text{NO}_2^-$  – nitrito), fósforo (P), potássio (K), enxofre (S), ferro (Fe), manganês (Mn), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e sódio (Na), estes três últimos por sua vez permitiram a determinação da razão de adsorção de sódio (RAS), por equação descrita por Ayer & Westcot (1999). As variáveis pH e CE foram monitorados a cada utilização da água.

#### **4.4. Delineamento experimental**

O delineamento experimental adotado foi em blocos casualizados, fatorial (3x2), com quatro repetições. Foram utilizadas três fontes de irrigação: (i) 100% água de torneira (100AT); (ii) 50% água residuária da piscicultura (água residuária da piscicultura - ARP) e 50% AT (50ARP50AT); (iii) 100% ARP (100ARP) e duas cultivares de arroz: (i) IAC 109: tipo agulhinha – Ag; (ii) IAC 400: arroz japonico – J). Sendo assim, os tratamentos foram intitulados: T1 – 100ATAg; T2 – 100ATJ; T3 – 50ARP50ATAg; T4 – 50ARP50ATJ; T5 – 100ARPAg; T6 – 100ARPJ. Totalizando 24 parcelas experimentais (Figura 5).



**Figura 5.** Croqui do delineamento experimental. T = Tratamento. T1 – 100ATAg; T2 – 100ATJ; T3 – 50ARP50ATAg; T4 – 50ARP50ATJ; T5 – 100ARPAg; T6 – 100ARPJ. Fonte: Própria autoria.

As parcelas experimentais foram construídas com um metro de largura e dois metros de comprimento, totalizando 2 m<sup>2</sup>, com quatro fileiras de plantas de arroz, cada uma com uma linha de tubo gotejadores subsuperficiais, nas quais foram consideradas as duas fileiras centrais, como área útil para avaliação e as laterais como bordadura. As parcelas foram suspensas à 0,40 m do solo, contidas por tábuas de madeira, cujo fundo foi revestido por lona plástica, com a finalidade de evitar a infiltração da água para a camada mais profunda e assim ser possível manter a umidade do solo próxima à saturação na camada de 0-0,20 m, definida como o manejo da irrigação (Figura 6).



Figura 6. Vista geral das parcelas experimentais. Fonte: Própria autoria.

#### 4.5. Solo e adubação

O solo utilizado para montagem das parcelas experimentais foi proveniente de barranco da região de Cruz Caiada (Piracicaba-SP), classificado como Latossolo vermelho, segundo classificação da EMBRAPA (2013). Antes de iniciar o experimento foi realizada a caracterização físico-química do solo, de micronutrientes e macronutrientes e determinação de sódio para cálculo da porcentagem de sódio trocável (PST) no Laboratório Agrotécnico Piracicaba, PiraSolo. A caracterização física classificou a textura do solo como argilo arenosa (Tabela 2).

Tabela 2. Caracterização físico-química do solo antes do início do experimento

K	Ca	Mg	H+Al	Na	SB	CTC	pH	MO	PST
-----mmolc dm <sup>-3</sup> -----								g dm <sup>-3</sup>	(%)
0,5	16	14	18	0,12	31	49	5,1	5	0,25
Cu	Fe	Zn	Mn	B	Argila	Silte	Areia	P	V
-----mg dm <sup>-3</sup> -----					-----g kg <sup>-1</sup> -----			mg dm <sup>-3</sup>	(%)
0,2	4	0,8	3,4	0,25	440	100	460	3	63

H+Al: hidróxido de alumínio; SB: soma de bases; CTC: capacidade de troca de cátions; MO: matéria orgânica; PST: porcentagem de sódio trocável; V: saturação por bases. Fonte: Própria autoria.

A caracterização química inicial do solo definiu a adubação de plantio para todas as parcelas experimentais, conforme recomendação para arroz irrigado proposta por Rajj et al. (1997), cujos valores adotados foram: 30 kg ha<sup>-1</sup> de N, 100 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O e 80 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, parcelados em quatro aplicações a cada dois dias a partir de 23/08/2021.

As fontes de fertilizantes sintéticos utilizadas foram: nitrato de cálcio (15,5% de N e 19% de Ca), nitrato de potássio (Krista - 12% de N, 43% de K<sub>2</sub>O, 1% de S e 1% de Mg) e ácido fosfórico (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>).

Segundo Rajj et al. (1997) a adubação de cobertura para arroz irrigado é recomendada nos valores de 120 kg ha<sup>-1</sup> de N e 90 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O. Considerando o aporte de nutrientes pela ARP, as doses aplicadas foram diferenciadas por tratamentos. A caracterização inicial da ARP para nitrogênio e potássio, apresentou valores de 20 e 15 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente. Ao se prever a precipitação pluviométrica para o período de cultivo e localidade, pela série de dados climatológicos, e considerando a demanda hídrica da cultura (EPAGRI, 2002), foi estimado o valor de lâmina de irrigação de 600 mm por ciclo de cultivo. Com esses valores, foi definido que o tratamento com 100ARP, teria condições de suprir a necessidade nutricional da cultura para N e K, sendo assim, a adubação foi completa para o tratamento 100AT e a metade (60 kg ha<sup>-1</sup> de N e 45 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O) para 50ARP50AT.

A aplicação dos fertilizantes de cobertura foram parcelados em sete aplicações, com frequência semanal, distribuídos entre os estádios vegetativo e início do reprodutivo, iniciados em 06/10/2022 (Crusciol et al., 2016).

Ao término do ciclo da cultura foi realizada caracterização química do solo na camada de 0-0,20 m, por amostras compostas, dentro da parcela, em todos os tratamentos e repetições. As análises foram realizadas no Laboratório de Ciências Agrárias/Solos da FZEA, segundo metodologia descrita em Rajj et al. (2001), com determinação do sódio trocável para cálculo da porcentagem de sódio trocável do solo.

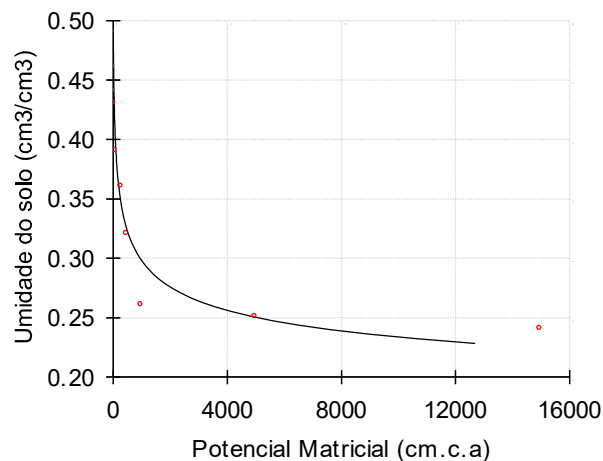
#### **4.6. Irrigação**

O sistema de irrigação adotado foi gotejamento subsuperficial. Cada parcela recebeu quatro linhas de tubogotejadores, enterrados a 0,15 m de profundidade, com 2 m de comprimento e com emissores espaçados 0,15 m entre si. Os gotejadores utilizados

foram da marca netafim, modelo aires, vazão de  $1,60 \text{ L h}^{-1}$  e pressão de serviço de  $15 \text{ kPa}$ , sem regulação de pressão.

O manejo da irrigação foi realizado com base na determinação da umidade do solo, para manutenção da saturação, adotando a frequência de dois dias, entre cada aplicação. A determinação da umidade atual do solo foi realizada por tensiômetros instalados na parte central da parcela experimental, pela média de três repetições (B1, B2 e B4) por tratamento, na profundidade de  $0,20 \text{ m}$ . A leitura de tensão foi realizada por tensímetro analógico e os valores de tensão foram convertidos em umidade pela curva característica de retenção da água no solo (CCRAS).

A CCRAS foi confeccionada no Laboratório de Física do Solo/Departamento de Engenharia de Biosistemas/ESALQ/USP, por meio de mesa de tensão e câmara de Richards. Os dados obtidos em laboratório foram ajustados pelo modelo de Van Genuchten (1980), por meio do software RETC (Van Genuchten et al., 1991) versão 6.00 (Figura 7), os quais forneceram os valores de umidade para a definição das lâminas de irrigação, para a camada de  $0,20 \text{ m}$ .



**Figura 7.** Curva característica da água do solo. Fonte: Própria autoria.

As fontes de irrigação (AT e ARP) foram armazenadas em reservatórios de  $1000 \text{ L}$  e bombeadas separadamente por conjunto moto-bomba, cada tratamento foi individualizado por válvula solenoide e teve o volume medido por hidrômetros. A programação de irrigação foi realizada por painel controlador.



O monitoramento das variáveis climáticas foi realizado por acesso de dados à estação meteorológica automática (EMA) localizada na Estação Meteorológica da ESALQ/USP, pertencente ao Departamento de Engenharia de Biosistemas/ESALQ/USP. Os dados climáticos obtidos possibilitaram a estimativa da evapotranspiração potencial diária.

A evapotranspiração de referência (ou de potencial) (ET<sub>o</sub>) foi estimada pelo método de Penman-Monteith FAO-56 (Allen et al., 1998), que requer dados de radiação solar, temperatura máxima, mínima e média do ar, umidade do ar e velocidade do vento medidos. A evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>) é o cálculo do balanço hídrico diário do solo e K<sub>c</sub> é o coeficiente de cultura, que varia com o DAS da cultura. Neste modelo:  $ET_c = ET_o * K_c$ , e com a perda de água para a atmosfera através da evapotranspiração, o armazenamento hídrico no solo diminui, reduzindo a disponibilidade de água para a planta que, eventualmente não poderá evapotranspirar todo o seu potencial.

#### **4.7. Cultivares de arroz e avaliação do desempenho agrônômico**

As cultivares de arroz testadas foram agulhinha (IAC 109) e do tipo especial utilizado na culinária japonesa (IAC 400), ambas de ciclo médio (100 - 120 dias). A semeadura foi realizada em linha com espaçamento de 0,17 m entrelinhas e 70 sementes por metro linear (Aguiar et al., 2014).

Os componentes de produção foram avaliados por meio do número de panículas (NP) por m<sup>2</sup>, comprimento de panícula (CP), número de espiguetas por panícula (NE), porcentagem de fertilidade de espiguetas (FE) e massa de 1000 grãos (MG) (Tabela 3).

Tabela 3. Equações para determinar os componentes de produção.

Equação	Variáveis
$PG = NP * NE * FE * MG * 10^{-5}$	PG: produtividade dos grãos ( $kg\ ha^{-1}$ ) NP: número de panículas por $m^2$ NE: número de espiguetas por panícula FE: porcentagem de fertilidade de espiguetas MG: peso de 1000 grãos (g) com humidade corrigida para 13%
$NE_{total} = NE_{cheia} + NE_{cocha}$	NE <sub>total</sub> : número de espiguetas total NE <sub>cheia</sub> : número de espiguetas cheias NE <sub>cocha</sub> : número de espiguetas cocha
$NE = NE_{total} / NP_{contadas}$	NP <sub>contadas</sub> : números de panículas contadas que atingiram 1000 NE <sub>cheia</sub>
$FE = NE_{cheia} / NE_{total}$	
$MG = (MG_{fresco} - MG_{seco}) / MG_{seco}$	MG <sub>fresco</sub> : massa de 1000 grãos fresca MG <sub>seco</sub> : massa de 1000 grãos seca

Fonte: (Fageria, Baligar, & Jones, 2011).

O NP foi avaliado em toda área útil, enquanto os demais parâmetros foram avaliados mediante a coleta aleatória de uma amostra de panícula que representasse aproximadamente 20% do total da área avaliada. O CP foi obtido medindo-se a distância, em centímetros, a partir do nó basal da panícula até a extremidade superior. O NE foi obtido por contagem, somando-se o número de espiguetas cheias e chochas. A FE foi determinada dividindo o número de espiguetas cheias pelo número total de espiguetas por panícula e multiplicando-se por 100. A MG foi obtida mediante a massa de 1000 grãos em balança eletrônica de precisão, à umidade de 13%.

Ainda por ocasião da colheita, foram separadas a folha bandeira da parte aérea para análise química. As amostras foram lavadas com solução de água e ácido clorídrico, numa diluição de 0,1%, visando retirar as impurezas, e secas em estufa com circulação forçada de ar a 65°C. Posteriormente, foram processadas em moinho e encaminhadas para análises de macro e micronutrientes e sódio, conforme metodologia proposta por Malavolta, Vitti & Oliveira (1997), na Central Multitusuário de Análises Ambientais do Departamento de Ciência do Solo/ESALQ/USP.

A produtividade da água para o arroz foi determinada pela relação entre a produtividade com base em matéria seca de cada fonte de irrigação e o consumo de água durante o ciclo de cultivo (Frizzone, 2015).

#### **4.8. Análise dos dados**

Com os resultados das variáveis estudadas foram aplicadas análises da variância, quando constatado diferença significativa ( $p < 0,01$  ou  $p < 0,05$ ), foram realizadas comparações de médias entre tratamentos pelo teste de Tukey, utilizando o programa computacional SISVAR, versão 5.3 (Ferreira, 2011). Para os dados sobre caracterização da ARP foi realizada média das amostras no tempo e desvio padrão.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos durante a condução do experimento de campo, no período de 21/08/2021 a 14/01/2022 apresentados a seguir, versam sobre: o acompanhamento das variáveis climáticas; a caracterização da ARP; as lâminas de irrigação aplicadas, assim como o aporte de nutrientes; o desenvolvimento dos peixes; o desempenho agrônômico das plantas de arroz e a produtividade da água.

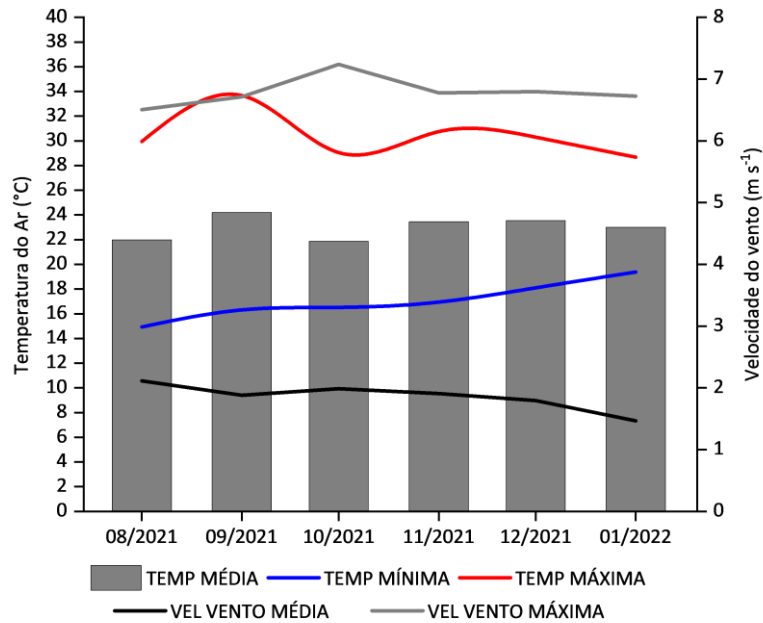
### 5.1. Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos foram coletados durante a condução do experimento na Estação Meteorológica Automática (EMA) localizada na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”/USP, pertencente ao Departamento de Engenharia de Biosistemas. A temperatura média do ar durante o experimento foi de 23,1°C, a temperatura média para fase germinação foi de 23,0 °C, floração foi de 23,0 °C e maturação foi de 23,7 °C, mantendo-se dentro da faixa ótima de temperatura segundo alguns autores como Ferreira et. al., (2013) que apresentaram a temperatura média ideal para a germinação (20 a 35 °C), floração (30 a 35 °C) e maturação na faixa de 20 a 25°C. A temperatura média de mínima foi 17,1°C e a média de máxima de 30,6°C.

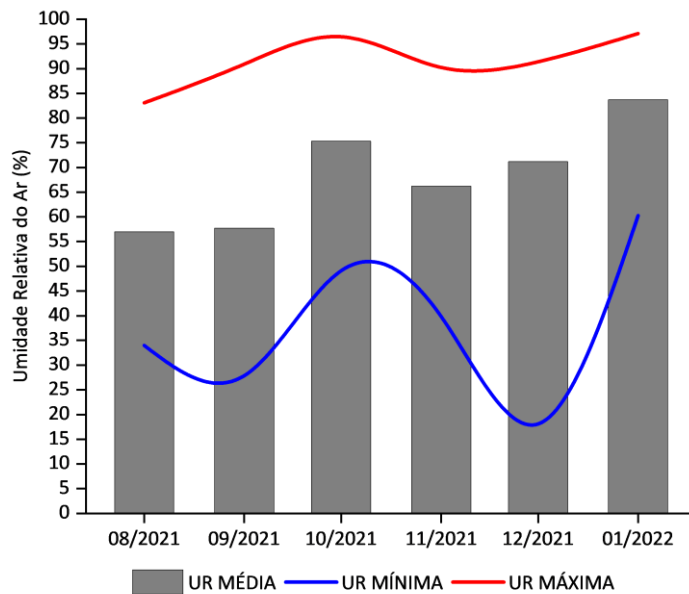
A temperatura ótima em cada estágio fenológico da cultura do arroz, reflete positivamente na produtividade (Pandolfo et al., 2022). A cultura do arroz não tolera temperaturas excessivamente baixas ou altas (Silva, Steinmetz & Heinemann, 2015).

Em São Paulo, na região do vale do Paraíba, a maior parte das lavouras de arroz irrigado apresentam desenvolvimento abaixo do esperado em consequência das baixas temperaturas e da baixa luminosidade, fatores que promovem o alongamento do ciclo da cultura (CONAB, 2023).

A média da umidade relativa do ar foi 68,4% e as médias máximas e mínimas foram 92,1% e 41,8%, respectivamente e estão apresentadas na Figura 8. A velocidade do vento média foi de 1,9 m s<sup>-1</sup> e a velocidade máxima média do vento foi de 6,8 m s<sup>-1</sup>.



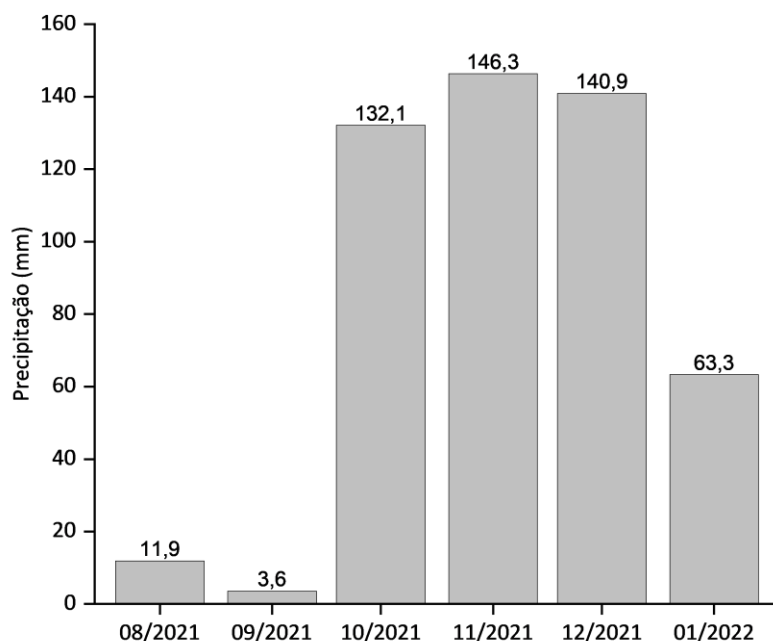
a



b

**Figura 8.** a: valores mensais durante a condução do experimento no período de agosto/2021 e janeiro/2022 para temperatura média do ar (TEMP MÉDIA), temperatura média mínima do ar (TEMP MÍNIMA), temperatura média máxima do ar (TEMP MÁXIMA), velocidade do vento média (VEL VENTO MÉDIA), velocidade do vento máxima (VEL VENTO MÁXIMA), b: umidade relativa média do ar (UR MÉDIA), umidade relativa média do ar mínima (UR MÍNIMA) e umidade relativa média do ar máxima (UR MÁXIMA). Fonte: <http://www.leb.esalq.usp.br/leb/postoaut.html>

As Figuras 9 e 10 apresentam os valores de precipitação acumulados mensais e evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) e da cultura (ET<sub>c</sub>) diários, respectivamente, durante a condução do experimento. A precipitação total para o período foi de 498,1 mm, sendo que o maior valor foi observado no mês de novembro (146,3 mm) (Figura 9).



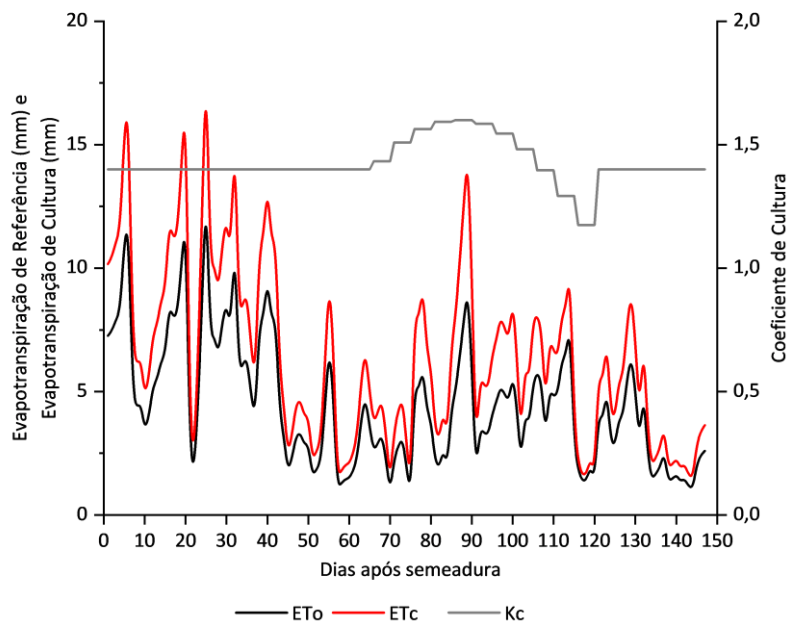
**Figura 9.** Valores mensais durante a condução do experimento no período de agosto/2021 e janeiro/2022 para média mensal da precipitação em milímetros.

Fonte: <http://www.leb.esalq.usp.br/leb/postoaut.html>

A evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), trata-se da quantidade de água que foi utilizada por uma superfície vegetada com grama para atender as necessidades da evaporação do solo e da transpiração. A ET<sub>o</sub> é usada como um valor indicativo da demanda evaporativa de uma cultura em um local, período, em condições ditas não-padrões (Allen et al., 1998; Carvalho et al., 2011).

Os valores do coeficiente de cultura (k<sub>c</sub>) variaram de 1,17 a 1,60 ao longo do experimento, de acordo com valores do modelo de monitoramento INMET/ SISDAGRO e balanço hídrico de cultivo do arroz, durante o experimento. De acordo com Timm et al. (2014), à medida que uma cultura cresce e se desenvolve, a exposição da superfície do solo à

radiação solar incidente diminui e a transpiração da área foliar aumenta. Quando a cultura vai se aproximando do estágio final de crescimento, a diminuição de  $k_c$  é esperado durante a maturação da cultura.



**Figura 10.** Valores diários durante a condução do experimento no período de agosto/2021 e janeiro/2022 para evapotranspiração de referência (ETo), evapotranspiração de cultura (ETc) e coeficiente de cultura ( $k_c$ ).

Fonte: <http://sisdagro.inmet.gov.br/sisdagro/app/monitoramento/bhc>

Os valores de ETc (evapotranspiração da cultura) e ETo (evapotranspiração de referência) acumulados no período foi de 946,3 mm e 662,9 mm, respectivamente. Usualmente, é comparado os valores acumulados de ETc com os valores de ETo. Se a ETc acumulada for menor ou próxima da ETo, isso sugere que as necessidades hídricas da cultura estão sendo atendidas adequadamente. Se a ETc acumulada for significativamente mais alta do que a ETo, que é o caso apresentado acima, isso pode indicar que foi necessário uma irrigação adicional para atender às necessidades de água da cultura.

A irrigação por gotejamento subsuperficial é conhecida por ser mais eficiente do que a irrigação por inundação em termos de economia de água. A irrigação por inundação envolve a aplicação de água em toda a área, resultando em perdas significativas de água devido à evaporação e ao escoamento. Por outro lado, a irrigação por gotejamento

subsuperficial fornece água diretamente para a zona da raiz das plantas, minimizando essas perdas.

## 5.2. Água residuária da piscicultura

A utilização das águas provenientes da aquicultura como fonte de irrigação vem gerando grande interesse nas últimas décadas (Qi, Yan, & Zhu, 2020), tanto pela possibilidade de substituir água de melhor qualidade, quanto pela fonte de nutrientes de baixo custo (Deviram et al., 2020).

Na Tabela 4 são apresentados os valores de caracterização da fonte de irrigação da ARP, em comparação com a literatura. Autores como Kimera et al. (2021) abordaram a utilização de águas residuárias de peixes oriundo da tilápia-do-nilo (*Oreochromis niloticus*) no cultivo de orégano, o valor dos níveis de amônio nas águas residuais de peixes eram significativamente mais baixos em comparação com este trabalho. de amônio bem abaixo do que foi encontrado na ARP, Elsbaay & Darwesh (2022) no cultivo de repolho, Álvarez-García et al. (2019) na produção de “pelargonium”, conhecido no Brasil como gerânio, Al-Hafedh, Alam, & Beltagi (2008) na produção aquapônica de alface, Enwereuzoh, Harding, & Low (2021) no cultivo de microalgas, Alameen et al. (2023) na produção de hortelã e grão-de-bico e Kaab Omeir et al. (2020) utilizou efluente da piscicultura para produção de manjericão e a beldroega.

A alimentação dos peixes é a principal fonte de amônia no sistema de cultivo, 20 a 30% dos nutrientes derivados da alimentação são absorvidos, enquanto o restante é excretado para o meio ambiente na forma de amônia e proteína orgânica. No interior do viveiro, a amônia é produzida pela conversão biológica do nitrogênio orgânico, sendo que a maioria das formas de nitrogênio disponível é proteica convertida para moléculas de amônia ou íons amônio (Baldisseroto, 2018).



**Tabela 4.** Caracterização físico-química das fontes de irrigação da água residuária da piscicultura (ARP) (médias e desvio padrão).

Parâmetros	ARP	ARP Literatura*
N-NTK (mg L <sup>-1</sup> )	16,26 ± 3,48	-
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	13,67 ± 5,22	2,30 <sup>1</sup>
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	1,64 ± 0,72	1,69 <sup>2</sup>
N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	1,28 ± 1,17	0,21 <sup>2</sup>
		0,60 <sup>3</sup>
N-org (mg L <sup>-1</sup> )	3,98 ± 1,21	-
P-PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	1,88 ± 0,45	2,4 <sup>1</sup>
K <sup>+</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	12,94 ± 1,73	18,3 <sup>4</sup>
Na <sup>+</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	92,63 ± 20,63	-
Ca <sup>2+</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	76,03 ± 56,69	6,37 <sup>6</sup>
Mg <sup>2+</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	13,66 ± 12,36	5,30 <sup>6</sup>
S-SO <sub>4</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	125,99 ± 66,58	-
Fe <sup>2+</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	0,62 ± 0,20	-
Mn <sup>2+</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	0,17 ± 0,13	-
RAS (mmol/L) <sup>-1/2</sup>	3,33 ± 1,64	-
pH	7,31 ± 0,24	7,4 <sup>1</sup>
		7,3 <sup>5</sup>
CE (dS m <sup>-1</sup> )	0,87 ± 0,15	0,8 <sup>1e7</sup>

NTK: nitrogênio total Kjeldahl; RAS: razão de adsorção de sódio; CE: condutividade elétrica. \*: valores de ARP da literatura; <sup>1</sup>: (Kimera et al., 2021); <sup>2</sup>: (Elsbaay & Darwesh, 2022); <sup>3</sup>: (Al-Hafedh, Alam, & Beltagi, 2008); <sup>4</sup>: (Kaab Omeir et al., 2020); <sup>5</sup>: (Enwereuzoh, Harding, & Low, 2021); <sup>6</sup>: (Alameen et al., 2023); <sup>7</sup>: (Álvarez-García et al., 2019).

Fonte: Própria autoria.

A ARP é uma fonte de nutrientes e sais para as culturas agrícolas. Especificamente, fornecem nutrientes essenciais como nitrogênio (N), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) como nutrientes (Tabela 4). Em relação a presença de sais, conforme indicado pelos parâmetros RAS (razão de adsorção de sódio) e CE (condutividade elétrica), os valores observados estão dentro das faixas aceitáveis para seu uso como fonte de irrigação, esses níveis não representam risco significativo de sodificação do solo, conforme determinado pela CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo) em 2006.

O arroz é moderadamente sensível ao estresse salino, com tolerância limite de 2,2 dS m<sup>-1</sup> de condutividade elétrica para a fonte de irrigação (Ayer & Westcot, 1999), podendo cada cultivar manifestar resistência diferenciada (Hoang et al., 2015). O arroz por natureza é suscetível à salinidade e mostra uma resposta ampla e vívida contra os efeitos prejudiciais do aumento do acúmulo de sal (Ghosh, Md & Gantait, 2016).

A ARP quando utilizada em outras culturas resultou no aumento da produtividade, como: repolho (Elsbaay & Darwesh, 2022), tomate cereja (Silva et al., 2021), orégano (Kimera et al., 2021), alface (Ulaş, Yücel, & Ulaş, 2022) e mudas de eucalipto (Paulus et al., 2019).

O amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) proveniente da digestão anaeróbica de resíduos orgânicos está prontamente disponível às plantas. As principais etapas envolvem a formação de glutamina, que começa com a incorporação de amônio por meio da síntese de glutamina. Esse processo é catalisado pela enzima glutamina sintetase, que facilita a reação entre o amônio e o glutamato para produzir glutamina. Posteriormente, a glutamina é convertida novamente em glutamato por meio da ação da enzima glutamina amidotransferase. Durante essa conversão, é liberada amônia livre, que pode ser reassimilada ou utilizada em outros processos metabólicos. Esse processo de assimilação de amônia é um aspecto essencial do metabolismo do nitrogênio nas plantas (Taiz & Zeiger, 2015).

Wang et al. (2016) observaram que o nitrogênio derivado das fezes de carpa prateada ou tilápia contribui diretamente para o aumento da biomassa de algas e que as fezes dos peixes podem lixiviar nutrientes para os corpos d'água, o que pode contribuir para o aumento de nitrogênio total (NT) e fósforo total (PT) e estimular o crescimento de algas. O fósforo na forma de ortofosfato ( $\text{PO}_4$ ) é um nutriente essencial para às plantas, pois o fósforo (P) se acumula nos tecidos das raízes das plantas e serve como fertilizante orgânico.

Na utilização de ARP como fonte de irrigação é necessário, nos momentos em que não há necessidade de irrigação, que o efluente atenda padrões de lançamento para os corpos hídricos. Neste caso (Tabela 4), a concentração de nitrogênio apresentou valores adequados para o lançamento, segundo o padrão estabelecido pela Conama nº430 (2011) de  $20 \text{ mg L}^{-1}$ , para nitrogênio amoniacal.

A Tabela 5 apresenta a caracterização da ARP em relação às mudanças na alimentação dos peixes. O aumento na alimentação dos peixes ocorreu 84 dias após a semeadura do arroz (Fase 2) durante o desenvolvimento reprodutivo das cultivares de arroz, incluindo o surgimento da folha bandeira e a expansão superior do dossel.

Durante a transição da Fase 1 para a Fase 2 da ração, vários parâmetros apresentaram um aumento em seus níveis. Esses parâmetros incluem nitrogênio Kjeldahl

total (NTK), nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), nitrogênio orgânico, fósforo ( $\text{PO}_4^-$ ), cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), enxofre ( $\text{S-SO}_4$ ), ferro ( $\text{Fe}^{2+}$ ) e manganês ( $\text{Mn}^{2+}$ ) (Tabela 5).

O aumento nos níveis de nutrientes pode ser atribuído à composição da formulação da ração para peixes. Vários componentes desempenham um papel na elevação desses níveis. As fontes de proteína, como farinha de peixe, farinha de soja, farinha de aves e outras fontes de proteína vegetal ou animal, fornecem os blocos de construção essenciais para esses nutrientes. As fontes de carboidratos, incluindo grãos, cereais e outros ingredientes de origem vegetal, contribuem com compostos ricos em energia. Lipídios e óleos, como óleo de peixe, óleo vegetal ou outros ingredientes ricos em óleo, também contribuem para a composição geral dos nutrientes. A formulação incorpora ainda vitaminas vitais (A, D3, E, K3, B1, B2, niacina, ácido pantotênico, B6, ácido fólico, biotina, B12, C) e minerais essenciais, como cálcio, fósforo e minerais residuais (FAO, 1980; Suresh, 2016; Hua et al., 2019). Além disso, a presença de aditivos e aglutinantes na formulação pode influenciar os níveis de nutrientes observados (Bai, Katya, & Yun, 2015; Encarnação, 2016; Yadav et al., 2021).

Em complemento, componentes como milho integral moído, farelo de trigo, farelo de arroz, farelo de glúten de milho, óleo de soja, farinha de carne e ossos, farinha de penas hidrolisada, farinha de sangue, caulim, calcário calcítico, fosfato bicálcico, cloreto de sódio, sulfato de ferro, sulfato de cobre, monóxido de manganês, óxido de zinco, iodato de cálcio, sulfato de cobalto, selenito de sódio, cloreto de colina, lisina, metionina, ácido acético, ácido propiônico, propionato de amônio e hidróxido de tolueno butilado (BHT) contribuem para a composição geral da ração para peixes (“Ração nutripiscis para todo tipo de peixe”, 2023).

Entre os componentes listados, é provável que alguns elementos contenham enxofre, explicando o nível elevado apresentado na caracterização da ARP. A metionina, por exemplo, é um aminoácido essencial frequentemente adicionado à ração de peixes como um composto contendo enxofre (Brosnan & Brosnan, 2006; Martínez et al., 2017; Blachier, Andriamihaja, & Blais, 2020). Outra fonte de enxofre é a farinha de penas hidrolisada, um subproduto do processamento de aves que contém queratina, uma proteína rica em enxofre (Osunbami & Adeola, 2022). A farinha de carne e ossos, derivada de tecidos animais, incluindo ossos e carne, também pode conter compostos que contêm enxofre (Ockerman & Basu, 2014).

A farinha de sangue, uma forma desidratada de sangue animal, pode servir como uma fonte potencial de nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) e nitrogênio orgânico em formulações de ração para peixes (Hueze & Tran, 2016). O fósforo, por outro lado, está presente em vários componentes da formulação da ração para peixes, como farelo de trigo, farelo de arroz, farelo de soja, farinha de carne e ossos, farinha de penas hidrolisada, caulim, calcário calcítico, fosfato bicálcico e vitamina D3 (Robson, 2014). Esses ingredientes contribuem para o conteúdo geral de fósforo da ração para peixes. Além disso, o cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) é derivado do calcário calcítico e do fosfato bicálcico (Görlach, Bertram, Hudecova, & Krizanova, 2015), enquanto o magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) é encontrado no farelo de trigo, no farelo de soja e no calcário calcítico (Fiorentini, Cappadone, Farruggia, & Prata, 2021). O ferro ( $\text{Fe}^{2+}$ ) é fornecido pelo sulfato de ferro, e o manganês ( $\text{Mn}^{2+}$ ) está presente na forma de monóxido de manganês.

**Tabela 5.** Caracterização físico-química das fontes de irrigação em relação ao ciclo de ração dos peixes durante o experimento (médias e desvio padrão).

Parâmetros	ARP	
	Fase 1 Ração 110g/dia	Fase 2 Ração 220g/dia
N-NTK ( $\text{mg L}^{-1}$ )	15,44 ± 4,11	17,48 ± 2,22
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ( $\text{mg L}^{-1}$ )	14,01 ± 6,63	13,17 ± 2,78
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ( $\text{mg L}^{-1}$ )	1,32 ± 0,87	0,78 ± 0,41
N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ( $\text{mg L}^{-1}$ )	0,35 ± 0,24	0,52 ± 0,20
N-org ( $\text{mg L}^{-1}$ )	3,64 ± 1,12	4,31 ± 1,37
P-PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> ( $\text{mg L}^{-1}$ )	1,77 ± 0,52	2,05 ± 0,30
K <sup>+</sup> ( $\text{mg L}^{-1}$ )	13,23 ± 1,90	12,50 ± 1,59
Na <sup>+</sup> ( $\text{mg L}^{-1}$ )	102,00 ± 18,74	78,58 ± 3,42
Ca <sup>2+</sup> ( $\text{mg L}^{-1}$ )	32,42 ± 4,75	141,45 ± 9,61
Mg <sup>2+</sup> ( $\text{mg L}^{-1}$ )	4,18 ± 0,57	27,88 ± 2,86
S-SO <sub>4</sub> ( $\text{mg L}^{-1}$ )	75,34 ± 9,79	201,95 ± 17,71
Fe <sup>2+</sup> ( $\text{mg L}^{-1}$ )	<0,02 ± 0,00	0,62 ± 0,20
Mn <sup>2+</sup> ( $\text{mg L}^{-1}$ )	0,08 ± 0,05	0,31 ± 0,07
RAS ( $\text{mmol/L}^{-1/2}$ )	4,50 ± 0,85	1,57 ± 0,27
pH	7,35 ± 0,27	7,25 ± 0,22
CE ( $\text{dS m}^{-1}$ )	0,94 ± 0,13	0,77 ± 0,12

NTK: nitrogênio total Kjeldahl; RAS: razão de adsorção de sódio; CE: condutividade elétrica.  
Fonte: Própria autoria.

O fósforo ( $\text{PO}_4^-$ ), o cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) e o magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) são macronutrientes essenciais para as plantas de arroz, especialmente durante a fase reprodutiva. Níveis adequados de

fósforo favorecem o desenvolvimento adequado das raízes, a floração e a formação de grãos. O cálcio e o magnésio contribuem para o desenvolvimento de paredes celulares fortes, a ativação de enzimas e a saúde geral da planta. O aumento dos níveis desses nutrientes pode influenciar positivamente o desenvolvimento reprodutivo dos cultivares de arroz, promovendo a formação de flores, a polinização e, por fim, a produção de grãos (Malhotra et al., 2018; Chaudhry et al., 2021; De Bang et al., 2021).

A solubilização do fósforo (P) das fezes é muito influenciada pela forma em que ele está presente. Nas operações de criação de peixes, a maior parte dos resíduos sólidos de P, que é derivada do P indigesto da dieta, é excretada nas fezes pelos peixes. Por outro lado, o resíduo de P solúvel ou dissolvido, que representa a maior parte da produção de resíduos de P, é derivado principalmente do excesso de P digestível ingerido pelos peixes e é excretado pela urina (Kaushik et al., 2004; Nwanna, Okonji & Aniebo 2010; Deng et al., 2015).

Estudos realizados por Godoy et al. (2021), Effendi et al. (2020) e Ndiaye et al. (2020) destacaram a importância desse processo. Essas descobertas enfatizam que a solubilização do P nas operações de criação de peixes depende do equilíbrio entre o P indigestível excretado nas fezes e o excesso de P digestível excretado pela urina. O gerenciamento adequado da ingestão e da excreção de P é essencial para minimizar o desperdício de P e seus possíveis impactos ambientais.

Compreender a dinâmica da solubilização de P nas fezes dos peixes é fundamental para o desenvolvimento de estratégias eficazes para mitigar as consequências ambientais associadas ao descarte de P das operações de criação de peixes. Ao otimizar as formulações de ração, ajustar as práticas de alimentação e implementar tecnologias de tratamento de águas residuais, a solubilização de P pode ser regulada, resultando em práticas de aquicultura mais sustentáveis e impactos ambientais reduzidos.

O enxofre ( $S-SO_4$ ), o ferro ( $Fe^{2+}$ ) e o manganês ( $Mn^{2+}$ ) são micronutrientes que desempenham papéis importantes em vários processos metabólicos nas plantas de arroz. O enxofre está envolvido na síntese de proteínas e na ativação de enzimas, enquanto o ferro e o manganês são essenciais para a produção de clorofila e a fotossíntese (Lucca, Hurrell & Potrykus, 2002; Cakmak, 2008; Norton et al., 2017). Níveis elevados desses micronutrientes podem favorecer o desenvolvimento saudável das folhas, melhorar a absorção de nutrientes

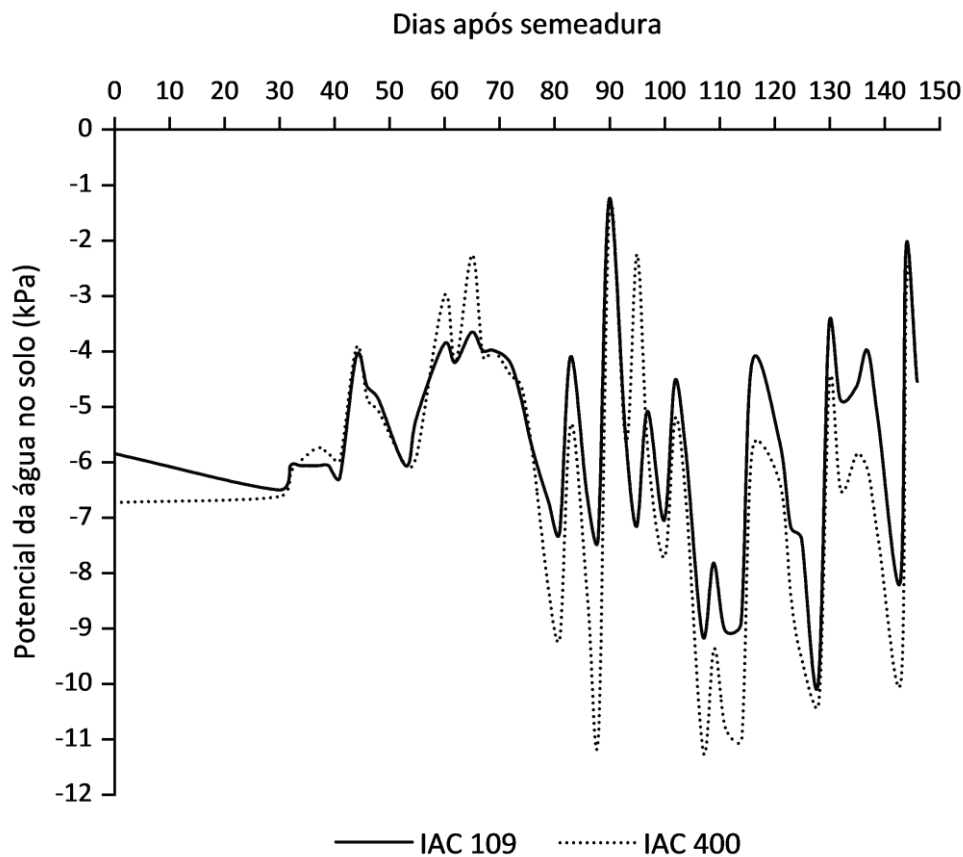
e aumentar o vigor geral da planta, o que pode contribuir para um melhor desenvolvimento reprodutivo dos cultivares de arroz (Reineke & Schlömann, 2023).

É importante observar que, embora uma faixa ideal de níveis de nutrientes seja benéfica para o desenvolvimento da cultura do arroz, níveis excessivos podem levar a desequilíbrios e possíveis problemas de toxicidade. O gerenciamento e o monitoramento adequados dos nutrientes são cruciais para garantir os melhores resultados de crescimento e rendimento no cultivo do arroz.

### **5.3. Irrigação e aporte de nutrientes**

A umidade do solo, indicada pela tensão da água no solo, apresentou picos frequentes (Figura 11), refletindo os eventos de irrigação/precipitação e o consumo de água pelas plantas. O potencial de água do solo variou de -11,23 a -1,26 kPa. Em geral, a abordagem de gerenciamento baseada em tensiometria manteve efetivamente os níveis de umidade do solo próximos à saturação, alinhando-se com o objetivo original, com apenas algumas exceções durante os períodos de pico de demanda de água pela cultura.

Entre 79 e 143 dias após a semeadura (DAS), as duas cultivares avaliadas apresentaram a maior demanda de água por estarem nas fases reprodutiva e de enchimento de grãos. A disponibilidade adequada de água durante essa fase crítica é crucial para o desenvolvimento da cultura. Embora as cultivares tenham apresentado respostas semelhantes à reposição de água no solo, a cultivar IAC 400 demonstrou maior demanda de água a partir dos 79 DAS, sofrendo maior estresse em comparação com a cultivar IAC 109 (Figura 11).



**Figura 11.** Potencial da água do solo (kPa) durante o cultivo para as cultivares IAC 109 e IAC 400.

Fonte: Própria autoria.

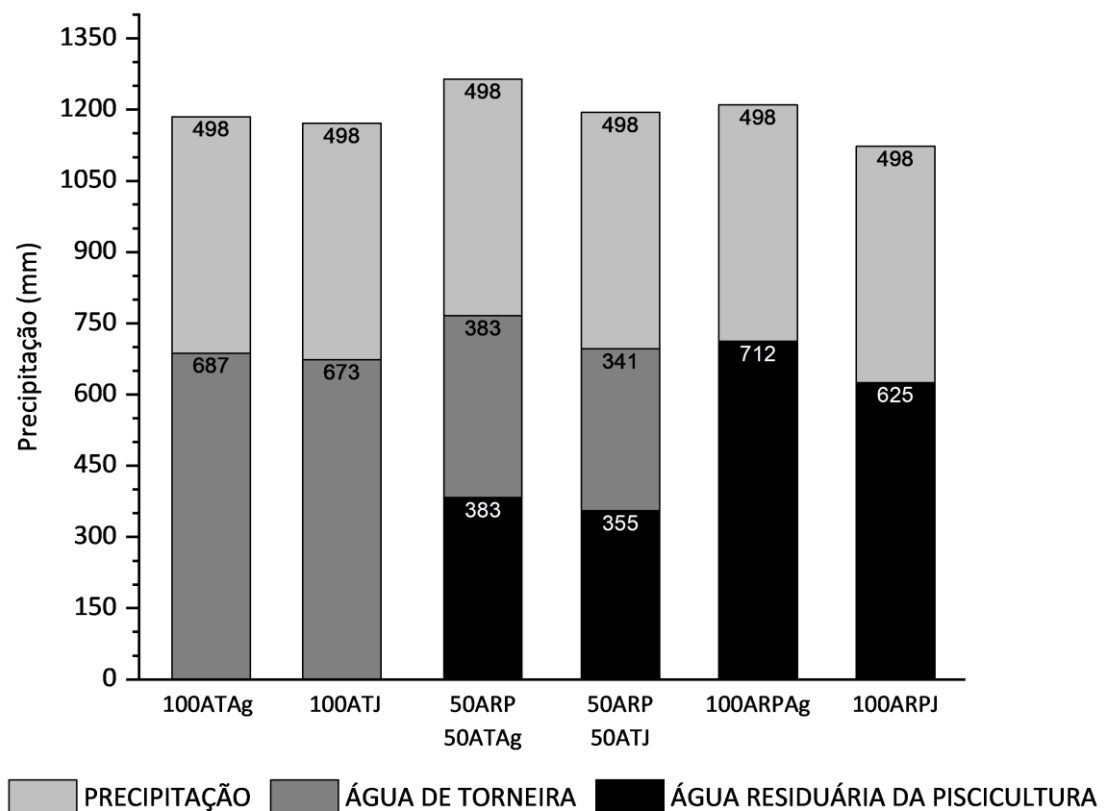
A Figura 12 apresenta o somatório das precipitações (chuva + irrigação) ocorridas durante o cultivo do arroz, em função dos tratamentos. A precipitação pluviométrica para todo o período foi de 498 mm, somada às lâminas de irrigação, a cultura recebeu o valor médio de 1.191 mm.

Segundo Parthasarathi et al. (2018) a irrigação por gotejamento melhora o rendimento do arroz e promove uma economia de até 50% em água, além de promover melhor desempenho no crescimento, fisiologia e produtividade do arroz, favorecendo o poder oxidante das raízes, a fotossíntese da copa e a partição da matéria seca.

A redução ou eliminação do uso de fertilizantes minerais e o reúso da água para irrigação conserva quantidades significativas de água doce para outros usos, além do impacto positivo no setor de cultivo de arroz (Ouoba et al., 2022).

Ao comparar as lâminas de irrigação entre os tratamentos, os valores ficaram bem próximos, com exceção de 50ARP50ATAg, que recebeu o maior valor (766 mm) e de 100ARPJ, com o menor valor (625 mm). Sharda et al. (2017) encontraram 42% de economia de água com irrigação por gotejamento em comparação com irrigação por inundação. Coltro et al. (2017) encontraram valores de 900 mm para o cultivo de arroz por gotejamento e Parthasarathi et al. (2018) registraram um consumo médio de água de irrigação por gotejamento de 545 mm no sistema de produção de arroz.

Rajwade et al. (2018) no estudo com irrigação por gotejamento verificou uma redução de cerca de 50% de água durante o preparo da terra até o perfilhamento e 30% durante a floração até a maturação do arroz, resultando em economia geral de água de 32%.



**Figura 12.** Precipitação (mm) para irrigação e chuva durante o período do experimento. 100ATAg=100% água de torneira (AT), arroz tipo agulhinha (Ag); 100ATJ= 100% AT, arroz japonês (J); 50ARP50ATAg=50% água residuíria da piscicultura (ARP), 50%AT, Ag; 50ARP50ATJ=50%ARP, 50%AT, J; 100ARPAg=100%ARP, Ag; 100ARPJ=100%ARP, J.

Fonte: Própria autoria.



A utilização de águas residuais no cultivo de arroz oferece vários benefícios, como a redução da dependência de fertilizantes minerais (Phung et al., 2020). Além disso, facilita a reciclagem de nutrientes e reduz o volume de efluentes lançados nos corpos d'água.

Em um estudo conduzido por Ouoba et al. (2022), verificou-se que a utilização da irrigação por gotejamento com águas residuais para o cultivo de arroz resultou em uma lâmina irrigada de 1.015 mm, levando a uma redução de 25% no consumo de água doce. Em comparação, a irrigação por inundação convencional exigiu uma lâmina irrigada de 1.356,7 mm. Notavelmente, ambos os métodos de irrigação foram capazes de manter a produtividade do arroz de forma eficaz.

A Tabela 6 apresenta uma visão geral do aporte de nutrientes e da caracterização química da ARP para cada tratamento, categorizadas com base na lâmina de irrigação aplicada. É importante observar que o teor de sódio ( $\text{Na}^+$ ) nas águas residuárias está diretamente ligado aos seus níveis de salinidade (Menegassi, 2022). No caso das águas residuárias da piscicultura, a concentração de sódio excede o limite de  $69 \text{ mg L}^{-1}$ , que é considerado um limite para sua aplicação em culturas agrícolas. Isso sugere que pode haver restrições ao uso dessa água para fins de irrigação, de acordo com as diretrizes estabelecidas pela CETESB (2006).

A presença de estresse salino nas plantas é conhecida por elevar a concentração de sódio ( $\text{Na}^+$ ) e reduzir a concentração de potássio ( $\text{K}^+$ ). Essa ocorrência se deve à semelhança nas propriedades físico-químicas do  $\text{Na}^+$  e do  $\text{K}^+$ , resultando em uma relação competitiva para a absorção de nutrientes pelas plantas. O objetivo dessa competição é garantir que as plantas possam sustentar processos metabólicos essenciais mesmo em condições de estresse salino (Jiadkong et al., 2022).

Ao avaliar o aporte dos macronutrientes essenciais para as culturas agrícolas, como, nitrogênio (N), potássio (K), fósforo (P), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), observam-se quantidades significativas, capazes de substituir os fertilizantes sintéticos. As doses de 100ARPAg (N:  $118,18 \text{ kg ha}^{-1}$ ; K:  $92,13 \text{ kg ha}^{-1}$ ) e 100ARPJ (N:  $103,74 \text{ kg ha}^{-1}$ ; K:  $80,88 \text{ kg ha}^{-1}$ ) proporcionam uma contribuição notável de nitrogênio e potássio totais, que se aproximam dos níveis recomendados para a cultura (N:  $120 \text{ kg ha}^{-1}$ ; K:  $90 \text{ kg ha}^{-1}$ ). As outras doses variam de  $58,92$  a  $63,57 \text{ kg ha}^{-1}$  para nitrogênio e  $45,94$  a  $49,56 \text{ kg ha}^{-1}$  para potássio, que

também estão dentro da faixa recomendada, visto que para estes tratamentos (50ARP50AT) a adubação foi complementada com fertilizantes sintéticos (Tabela 6).

**Tabela 6.** Aporte de nutrientes pela aplicação das fontes de irrigação para cada tratamento

Parâmetros	ARP	Aporte (kg ha <sup>-1</sup> )			
	Concentração	50ARP50ATAg	50ARP50ATJ	100ARPAg	100ARPJ
N-NTK (mg L <sup>-1</sup> )	16,26 ± 3,48	62,26	57,71	115,74	101,60
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	13,67 ± 5,22	52,37	48,54	97,35	85,46
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	1,64 ± 0,72	6,29	5,83	11,70	10,27
N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	1,28 ± 1,17	4,91	4,55	9,13	8,01
N-org (mg L <sup>-1</sup> )	3,98 ± 1,21	15,23	14,11	28,31	24,85
N-NT (mg L <sup>-1</sup> )	19,18 ± 2,58	63,57	58,92	118,18	103,74
P-PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	1,88 ± 0,45	7,20	6,68	13,39	11,75
K <sup>+</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	12,94 ± 1,73	49,56	45,94	92,13	80,88
Na <sup>+</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	92,63 ± 20,63	354,77	328,84	659,53	578,94
Ca <sup>2+</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	76,03 ± 56,69	291,20	269,91	541,35	475,20
Mg <sup>2+</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	13,66 ± 12,36	52,32	48,50	97,27	85,38
S-SO <sub>4</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	125,99 ± 66,58	482,53	447,25	897,02	787,41
Fe <sup>2+</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	0,62 ± 0,20	2,39	2,21	4,43	3,89
Mn <sup>2+</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	0,17 ± 0,13	0,65	0,61	1,22	1,07

ARP: água residuária da piscicultura; NTK: nitrogênio total Kjeldahl; NT: nitrogênio total (somatório de NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup> e NO<sub>3</sub><sup>-</sup>). 100ATAg=100% água de torneira (AT), arroz tipo agulhinha (Ag); 100ATJ= 100% AT, arroz japonico (J); 50ARP50ATAg=50% água residuária da piscicultura (ARP), 50%AT, Ag; 50ARP50ATJ=50%ARP, 50%AT, J; 100ARPAg=100%ARP, Ag; 100ARPJ=100%ARP, J.

Fonte: Própria autoria.

As plantas podem absorver as duas formas de nitrogênio, nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) e amônio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) de nitrogênio, no entanto nos solos em condições anaeróbias, quando se adota um manejo para manter a umidade do solo na saturação, a forma NH<sub>4</sub><sup>+</sup> apresenta-se em maior quantidade. A taxa de absorção de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> é de 5 a 20 vezes maior que a de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (Fageria, Santos & Stone, 2003).

#### 5.4. Produção de peixes

O cálculo e interpretação dos dados de taxa de crescimento específico (TCE) não só decresce com o tamanho dos peixes, mas, também com o tempo. Os peixes são animais pecilotérmicos cujo crescimento é influenciado pela variação da temperatura da água. A

sobrevivência do lote de peixes ao final do experimento também pode ser um indicador da qualidade da dieta experimental (Fracalossi & Cyrino, 2013).

A conversão alimentar indica a eficiência de aproveitamento da ração pelos peixes. A conversão alimentar apresentada, indica que foi necessário 156,09 g de ração na fase 1 e 62,98 g de ração na fase 2 para cada grama de peso ganho pelos peixes. O valor da taxa específica de crescimento foi de 0,43% nas duas fases de alimentação do peixe, a sobrevivência média foi acima de 85%.

**Tabela 7.** Valores de desempenho do cultivo de Tilápia-do-Nilo

Desempenho	Fase 1	Fase 2
GP (g)	143,06	220,06
CA (g g <sup>-1</sup> )	156,09	62,98
TCE (% dia <sup>-1</sup> )	0,43	0,43
S (%)	86,67	93,33

GP: Ganho de peso. CA: Conversão alimentar. TCE: Taxa de crescimento específico. S: Sobrevivência.

Fonte: Própria autoria.

A taxa de conversão alimentar avalia o desempenho produtivo e financeiro da produção de peixes. Quanto menor o valor da taxa de conversão alimentar, mais eficiente é o uso da ração e mais lucrativa é a produção (SENAR, 2019).

Visto que, a produção integrada de peixes e de arroz é de grande interesse para agricultura e para o setor comercial, temos que nos atentar para a proporção de alimentação dos peixes, para que o ciclo da produção de peixes e de arroz sejam suficientes para o balanço dos nutrientes.

## 5.5. Solo

A análise química do solo nas parcelas experimentais foi realizada na camada de 0-0,20 m após a aplicação dos tratamentos. A Tabela 8 apresenta os valores da ANOVA para as variáveis afetadas pelos tratamentos e os fatores avaliados. Além disso, a Tabela 9 apresenta os resultados dos parâmetros analisados na análise do solo.

Os tratamentos não tiveram influência estatisticamente significativa sobre os níveis de fósforo (P), magnésio (Mg), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) e micronutrientes do solo (ferro, manganês, zinco, cobre, boro, molibdênio e cloro).

As interações entre a cultivar e a fonte de irrigação tiveram efeitos significativos em parâmetros como pH e H+Al. O pH mostrou efeitos de interação tanto para a cultivar quanto para a fonte de irrigação, enquanto o H+Al teve um efeito de interação específico para a cultivar.

Entre os parâmetros, o sódio ( $\text{Na}^+$ ), o enxofre (S) e a porcentagem de sódio trocável (PST) foram influenciados pela cultivar. Já o potássio ( $\text{K}^+$ ), o cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), a matéria orgânica (M.O), o carbono total (C.T), o enxofre (S) e a saturação de bases (V) foram influenciados pelas fontes de irrigação.

**Tabela 8.** Análise da variância para pH, potássio ( $\text{K}^+$ ), cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), acidez potencial (H+Al), sódio ( $\text{Na}^+$ ), matéria orgânica (M.O), carbono total (C.T), enxofre (S), saturação por bases (V) e porcentagem de sódio trocável (PST) no solo como efeito das cultivares, fontes de irrigação e interações. Valores-F são apresentados para efeitos significativos.

Fatores	pH $\text{CaCl}_2$	$\text{K}^+$ ----- mmolc $\text{dm}^{-3}$ -----	$\text{Ca}^{2+}$	H+Al	$\text{Na}^+$
C	6,15*	ns	ns	10,39**	4,95*
FI	6,64**	5,12*	3,80*	ns	ns
C x FI	4,67*	ns	ns	4,40*	ns
CV (%)	1,41	23,15	7,99	3,71	20,78
Fatores	M.O ----- $\text{g kg}^{-1}$ -----	C.T	S $\text{mg dm}^{-3}$	V %	PST %
C	ns	ns	7,01*	ns	5,15*
FI	5,37*	5,38*	3,80*	4,38*	ns
C x FI	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	30,02	30,01	14,83	2,23	21,28

C: cultivares. FI: fontes de irrigação. CV: coeficiente de variação. \*P < 0,05. \*\*P < 0,01. ns, não significativo.

Fonte: Própria autoria.

O valor de pH do solo inicialmente foi de 5,1 (Tabela 2), ao final do experimento os valores de pH aumentaram tanto para o tratamento com 50% de ARP, quanto para a cultura, isso acontece devido ao fato da ARP ter apresentado valor próximo da neutralidade (Tabela 4:  $\text{pH}=7,31 \pm 0,24$ ), o que pode no tempo influenciar o pH do solo, principalmente nas condições tropicais, em que prevalece solos mais ácidos (Ayer & Westcot, 1999).

**Tabela 9.** Valores de pH, potássio (K<sup>+</sup>), cálcio (Ca<sup>2+</sup>), acidez potencial (H+Al), sódio (Na<sup>+</sup>), matéria orgânica (M.O), carbono total (C.T), enxofre (S), saturação por bases (V) do solo, ao final do cultivo do arroz irrigado por gotejamento subsuperficial.

Fontes de Irrigação	IAC 109	IAC 400	Média
pH			
100AT	5,68 Bb	5,86 Aa	5,78 b
50ARP50AT	5,86 Aa	5,96 Aa	5,93 a
100ARP	5,86 Aa	5,83 Aa	5,85 ab
Média	5,81 B	5,90 A	
K <sup>+</sup> (mmolc dm <sup>-3</sup> )			
100AT	2,65	2,18	2,41 a
50ARP50AT	1,75	1,93	1,84 ab
100ARP	1,80	1,65	1,73 b
Média	2,07	1,92	
Ca <sup>2+</sup> (mmolc dm <sup>-3</sup> )			
100AT	34,75	35,50	35,13 ab
50ARP50AT	37,00	37,50	37,25 a
100ARP	34,75	32,00	33,38 b
Média	35,50	35,00	
H + Al (mmolc dm <sup>-3</sup> )			
100AT	14,71 A	13,21 B	13,96
50ARP50AT	13,78 A	13,31 A	13,54
100ARP	13,81 A	13,77 A	13,79
Média	14,10 A	13,43 B	
Na <sup>+</sup> (mmolc dm <sup>-3</sup> )			
100AT	0,93	1,26	1,09
50ARP50AT	0,98	1,14	1,06
100ARP	0,97	1,07	1,02
Média	0,96 B	1,16 A	
M.O (g kg <sup>-1</sup> )			
100AT	11,20	11,65	11,43 a
50ARP50AT	12,23	10,63	11,43 a
100ARP	7,03	7,30	7,16 b
Média	10,15	9,86	
C.T (g kg <sup>-1</sup> )			
100AT	6,50	6,76	6,63 a
50ARP50AT	7,09	6,16	6,63 a
100ARP	4,07	4,24	4,15 b
Média	5,89	5,72	
S (mg dm <sup>-3</sup> )			
100AT	130,00	102,75	116,38 a
50ARP50AT	109,50	107,75	108,63 ab
100ARP	106,00	83,75	94,88 b
Média	115,17 A	98,08 B	
V (%)			
100AT	75,60	78,23	76,91 ab
50ARP50AT	77,60	78,65	78,13 a
100ARP	76,35	74,83	75,59 b
Média	76,52	77,23	

Fontes de Irrigação	IAC 109	IAC 400 PST (%)	Média
100AT	1,54	2,10	1,82
50ARP50AT	1,57	1,80	1,68
100ARP	1,68	1,95	1,81
Média	1,60 B	1,95 A	

100AT=100% água de torneira (AT); 100ARP=100% água residuária da piscicultura (ARP); 50ARP50AT=50% ARP, 50% AT; IAC 109=arroz tipo agulhinha; IAC 400=arroz japonico. Médias seguidas por letras diferentes, maiúscula na linha e minúscula na coluna, diferem pelo teste de Tukey.

Fonte: Própria autoria.

O aumento na dose de água residuária da piscicultura (100ARP) como fonte de irrigação reduziu os teores de potássio ( $K^+$ ), cálcio ( $Ca^{2+}$ ), matéria orgânica (M.O), enxofre (S) e saturação de bases (V) do solo na camada avaliada (Tabela 9), em comparação aos tratamentos 100AT e 50E. Este comportamento não era esperado, já que a ARP apresentou aporte significativo de nutrientes (Tabela 8), pela irrigação. Por outro lado, esse resultado confirma o potencial da aplicação dessas águas, sem risco de contaminação por excesso de algum elemento, que nela possa conter.

A entrada de enxofre por meio da irrigação usando o tratamento 100ARP resultou em 897,02 kg ha<sup>-1</sup> para o 100ERPAg e 787,41 kg ha<sup>-1</sup> para o 100ARPJ. O teor médio de enxofre no solo para o tratamento 100ARP foi de 94,88 mg dm<sup>-3</sup>, indicando que aproximadamente 84,62% do enxofre permaneceu no solo para o 100ERPAg e 96,40% para o 100ARPJ.

A presença de alto teor de enxofre no solo pode ter efeitos diferentes, dependendo do contexto específico e dos níveis de concentração. O enxofre é um elemento que ocorre naturalmente no ambiente e desempenha papéis importantes no crescimento das plantas e na fertilidade do solo. Em quantidades moderadas, o enxofre é benéfico para as plantas, pois é um componente crucial de aminoácidos, proteínas e enzimas (Hawkesford, Horst & Kichey, 2012).

Entretanto, níveis excessivos de enxofre no solo podem levar a certas preocupações ambientais. Quando o enxofre está presente em grandes quantidades, ele pode contribuir para a acidificação do solo, especialmente quando combinado com outros fatores, como alta pluviosidade ou materiais de origem ácidos (Du et al., 2017; Wang et al., 2023). As condições ácidas do solo podem afetar negativamente o crescimento das plantas e a disponibilidade de

nutrientes, o que pode levar à redução da produtividade das culturas (Öborn, Jansson & Stendahl, 2016).

O cálcio (Ca) no solo possui uma alta afinidade por certos elementos, conhecidos como parceiros de troca catiônica. Esses elementos incluem o hidrogênio ( $H^+$ ), onde o cálcio pode deslocar íons de hidrogênio das partículas do solo, resultando na redução da acidez e aumento do pH. Com relação ao alumínio ( $Al^{3+}$ ), o cálcio pode substituir íons de alumínio no solo, reduzindo a toxicidade associada a altos níveis de alumínio. Além disso, os íons de cálcio e magnésio ( $Mg^{2+}$ ) podem competir por locais de ligação nas partículas do solo, podendo levar à diminuição da absorção de magnésio pelas plantas em situações de altos níveis de cálcio. No caso do potássio ( $K^+$ ), o cálcio e o potássio podem competir pela absorção pelas raízes das plantas, com altos níveis de cálcio podendo reduzir a disponibilidade e absorção de potássio. Já em relação ao sódio ( $Na^+$ ), o cálcio pode deslocar íons de sódio das partículas do solo, contribuindo para a redução da salinidade e melhoria da estrutura do solo (Ryan & Delhaize, 2010; Marschner, 2012; Singh & Schulze, 2015; Chen et al., 2018; Gao et al., 2019; Prietzel, Klysubun, & Hurtarte, 2021). Essas interações entre o cálcio e outros elementos evidenciam sua importância no equilíbrio nutricional das plantas e no funcionamento do solo.

## **5.6. Componentes de produção e produtividade da água**

As duas cultivares de arroz, IAC 109 (tipo agulhinha) e IAC 400 (tipo japônica), apresentaram características distintas em termos de seus parâmetros produtivos. O número de panículas (NP) não apresentou diferenças significativas, enquanto a produtividade da água apresentou um efeito de interação entre as cultivares e as fontes de irrigação (Tabela 10).

O fator cultivar, teve impacto sobre as características da raiz, número de espiguetas por panícula (NE), biomassa seca, massa de 1.000 grãos (MG), porcentagem de fertilidade das espiguetas (FE), o comprimento da panícula (CP) e o comprimento da parte aérea (CPA). A produtividade de grãos (PG) foi influenciada pela fonte de irrigação.

**Tabela 10.** Análise da variância para componentes de produção, produtividade dos grãos (PG), biomassa seca da raiz, número de panículas (NP) por m<sup>2</sup>, número de espiguetas por panícula (NE), biomassa seca, massa de 1000 grãos (MG), porcentagem de fertilidade de espiguetas (FE), comprimento de panícula (CP), comprimento da parte aérea (CPA) e produtividade da água, como efeito das cultivares, fontes de irrigação e interações. Valores-F são apresentados para efeitos significativos.

Fatores	PG	Raiz	NP	NE	Biomassa seca
C	ns	14,60**	ns	8,93**	17,71**
FI	3,96*	ns	ns	ns	3,99*
C x FI	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	21,18	32,57	18,25	15,05	12,85
Fatores	MG	FE	CP	CPA	Produtividade da Água
C	43,36**	42,77**	31,57**	41,27**	9,15**
FI	ns	ns	ns	ns	6,89**
C x FI	ns	ns	ns	ns	1,84**
CV (%)	4,16	3,42	4,51	7,23	15,37

C: cultivares. FI: fontes de irrigação. CV: coeficiente de variação. \*P < 0,05. \*\*P < 0,01. ns, não significativo.

Fonte: Própria autoria.

A produtividade dos grãos (PG) de arroz foi incrementada com o aumento da concentração da água residuária da piscicultura, independente da cultivar avaliada. Os valores de produtividade de grãos (PG) obtidos neste estudo superaram os valores potenciais médios observados sob condições de irrigação por inundação (Tabela 11). Para o IAC 400, o potencial médio de produtividade é de 4.978,00 kg ha<sup>-1</sup> de acordo com o IAC (2005), enquanto para o IAC 109, o potencial médio de produtividade é de 6.238,00 kg ha<sup>-1</sup>, conforme relatado pelo IAC (2018).

Em um estudo realizado por Lima et al. (2019), a produtividade de várias cultivares de arroz especiais foi avaliada em condições de inundação. A maior produtividade foi observada para a cultivar IAC 400, atingindo um valor de 8.493 kg ha<sup>-1</sup>.

Os resultados referentes à produtividade de grãos (PG) não só ressaltam o potencial de utilização da ARP, mas também revelam a resposta positiva às técnicas de irrigação localizada. As cultivares de arroz com maior capacidade de perfilhamento desempenham um papel crucial na determinação do rendimento de grãos, pois apresentam uma correlação direta com o desenvolvimento da panícula, que é um fator essencial que contribui para o rendimento final. Isso enfatiza a importância do perfilhamento para maximizar a produção de arroz. De acordo com Yoshida (1981), a capacidade das plantas de arroz de produzir mais perfilhos é fundamental para a obtenção de maiores rendimentos de grãos, pois influencia



diretamente o desenvolvimento das panículas, uma característica essencial para a obtenção de rendimentos ideais. A utilização da ARP combinada com práticas de irrigação adequadas pode aumentar ainda mais a capacidade de perfilhamento do arroz, levando ao aumento da produtividade e do desempenho geral da cultura.

Os valores de biomassa seca se alinham com os resultados de rendimento de grãos, demonstrando um aumento consistente com doses mais altas de ARP. Notavelmente, a cultivar IAC 400 apresentou valores mais altos em termos de produção de biomassa seca da parte aérea e da raiz, comprimento da parte aérea e número de espiguetas. Por outro lado, a IAC 109 apresentou superioridade em termos de massa de 1000 grãos, comprimento da panícula e fertilidade das espiguetas. Esses resultados destacam os pontos fortes e as características distintas de cada cultivar.

A IAC 400 demonstra seu vigor ao apresentar um crescimento robusto na biomassa acima e abaixo do solo, indicando sua capacidade de alocar recursos de forma eficiente. Por outro lado, a IAC 109 se destaca em características diretamente relacionadas à qualidade dos grãos, como tamanho maior, panículas mais longas e maior fertilidade das espiguetas, contribuindo para sua produtividade geral. A combinação desses atributos contrastantes pode fornecer informações valiosas para a seleção de cultivares de arroz apropriadas com base em metas de produção específicas e nos resultados desejados para a cultura.

Os resultados obtidos por esta pesquisa corroboram com diferentes relatos da literatura que destacam o aumento substancial da biomassa vegetal acima do solo obtido por meio da irrigação com águas residuais da piscicultura. Esses estudos, incluindo os de Naylor et al. (2003), Graber e Junge (2009), Abdul-Rahman et al. (2011), Joesting et al. (2016) e Kimera et al. (2021), demonstram consistentemente os efeitos positivos da utilização de ARP como fonte de irrigação. A composição rica em nutrientes dos efluentes da piscicultura, juntamente com o conteúdo de matéria orgânica, contribui para aumentar o crescimento e a produtividade das plantas. Ao reciclar e reutilizar essas águas residuais, os sistemas agrícolas podem se beneficiar dos valiosos nutrientes e minerais presentes, que são essenciais para o desenvolvimento das plantas. Essas práticas se alinham aos princípios de gerenciamento de recursos sustentáveis e oferecem possíveis soluções para mitigar a escassez de água e reduzir a dependência de fertilizantes sintéticos.

Em um estudo conduzido por Ouoba et al. (2022), com águas residuárias de esgoto doméstico por meio de irrigação por gotejamento em plantações de arroz levou a melhorias notáveis na biomassa aérea e no rendimento de grãos. O aumento na produção de grãos foi atribuído ao aumento do perfilhamento, que contribuiu para um número maior de panículas produtivas. Além disso, a irrigação com águas residuais resultou em um enriquecimento do conteúdo de proteína dos grãos. É importante ressaltar que o estudo também destacou que a aplicação de águas residuais não levou ao acúmulo de metais no solo.

A produtividade da água (PA), é um importante indicador para avaliar a eficiência do uso da água na produção agrícola, considera a relação entre a produtividade da matéria seca e o consumo de água durante todo o ciclo da cultura. No presente estudo, houve uma interação entre as cultivares e as fontes de irrigação estudadas. Vale ressaltar que valores superiores a 1, conforme preconizado por Frizzone (2015), validam a aplicação de práticas de irrigação, destacando as vantagens do emprego da irrigação por gotejamento nessa pesquisa específica. Os resultados ressaltam os benefícios potenciais da irrigação por gotejamento na maximização da produtividade da água e na otimização da utilização eficiente dos recursos hídricos em sistemas agrícolas.

**Tabela 11.** Componentes de produção do cultivo do arroz irrigado por gotejamento subsuperficial com água residuária da piscicultura.

Fontes de Irrigação	IAC 109	IAC 400	Média
Produtividade de grãos (kg ha <sup>-1</sup> )			
100AT	7696,95	8772,70	8234,83 b
50ARP50AT	9068,52	9496,73	9282,63 ab
100ARP	12369,63	9718,02	11043,83 a
Média	9711,70	9329,15	
Biomassa seca da raiz (g)			
100AT	33,69	42,92	38,30
50ARP50AT	32,17	70,19	49,88
100ARP	38,11	61,65	51,18
Média	34,66 B	58,25 A	
NE (espiguetas/panícula)			
100AT	93,75	122,25	108,00
50ARP50AT	105,50	126,50	116,00
100ARP	119,75	134,75	127,25
Média	106,33 B	127,83 A	
Biomassa seca da parte aérea (g)			
100AT	2902,75	3851,05	3376,90 b
50ARP50AT	3290,98	4256,80	3773,89 ab
100ARP	3772,15	4330,40	4051,28 a
Média	3321,96 B	4146,08 A	
Massa 1000 grãos (g)			
100AT	24,36	21,89	23,13
50ARP50AT	25,21	22,17	23,69
100ARP	25,08	22,69	23,88
Média	24,88 A	22,25 B	
FE (%)			
100AT	0,95	0,84	0,90
50ARP50AT	0,94	0,86	0,90
100ARP	0,95	0,89	0,92
Média	0,95 A	0,87 B	
CP (cm)			
100AT	21,13	19,51	20,32
50ARP50AT	21,91	19,36	20,52
100ARP	21,61	19,42	20,64
Média	21,55 A	19,43 B	
CPA (cm)			
100AT	69,75	83,25	76,50
50ARP50AT	72,33	89,04	80,69
100ARP	73,88	88,88	81,38
Média	71,99 B	87,06 A	
Produtividade da água (kg m <sup>-3</sup> )			
100AT	1,64 Bc	1,90 Ac	1,77 c
50ARP50AT	1,79 Bb	2,01 Ab	1,90 b
100ARP	2,57 Aa	2,22 Ba	2,40 a
Média	2,00 B	2,04 A	

100AT=100% água de torneira (AT); 100ARP=100% água residuária da piscicultura (ARP); 50ARP50AT=50% ARP, 50% AT; IAC 109=arroz tipo agulhinha; IAC 400=arroz japonico; número de espiguetas=NE; fertilidade de espiguetas=FE; comprimento de panícula=CP; comprimento da parte aérea=CPA. Médias seguidas por letras diferentes, maiúscula na linha e minúscula na coluna, diferem pelo teste de Tukey.

Fonte: Própria autoria.

A produtividade da água, juntamente com a produtividade de grãos e a biomassa seca da parte aérea, apresentou uma resposta significativa ao aumento da concentração de ARP. Especificamente, no caso da cultivar IAC 400, o valor da produtividade da água obtido no tratamento com 100 ARP ( $2,22 \text{ kg m}^{-3}$ ) se aproxima dos resultados de Menegassi (2022). O estudo de Menegassi examinou várias cultivares de arroz especiais sob irrigação por gotejamento subsuperficial com efluente de laticínio tratado em um ambiente controlado, no qual a cultivar do tipo japonesa alcançou um valor de produtividade de água de  $2,95 \text{ kg m}^{-3}$ . Vale ressaltar que a dose de efluente não exerceu nenhuma influência perceptível sobre a produtividade da água no estudo de Menegassi.

Em um estudo conduzido por Ouoba et al. (2022), uma comparação entre os métodos de irrigação por inundação e por gotejamento revelou uma economia significativa de água. Os resultados indicaram que a irrigação por gotejamento levou a uma redução máxima de 31% no consumo de água quando comparada à irrigação por inundação. Isso demonstra o potencial da irrigação por gotejamento como uma estratégia de gerenciamento de água mais eficiente, contribuindo para os esforços de conservação e enfrentando os desafios da escassez de água nas práticas agrícolas.

Os resultados obtidos por esta pesquisa fornecem evidências substanciais que sustentam a viabilidade técnica do cultivo de arroz irrigado por gotejamento usando água de reúso. Esse resultado significativo abre caminho para a implementação de práticas agrícolas, lançando luz para uma agricultura conservacionista, especialmente com relação aos recursos hídricos. Ao utilizar água de reúso por meio de irrigação por gotejamento, essa abordagem mostra um caminho promissor para a agricultura sustentável, em que o uso eficiente e a conservação dos recursos hídricos são priorizados.

### 5.7. Análise foliar

A Tabela 12 apresenta os resultados da análise da variância para a análise química foliar. Com exceção do potássio (K), todos os elementos apresentaram variações significativas influenciadas pela cultivar (C) ou pela fonte de irrigação (FI), e foi observado um efeito de interação para o fósforo (P) entre a cultivar e a fonte de irrigação (C x FI). O fator cultivar teve um efeito significativo nos níveis de nitrogênio (N), magnésio (Mg), enxofre (S), boro (B), cobre (Cu), zinco (Zn) e sódio (Na). Por outro lado, o fator fonte de irrigação (FI) só apresentou um efeito significativo sobre o cálcio (Ca).

**Tabela 12.** Análise da variância para análise foliar, como efeito das cultivares, fontes de irrigação e interações. Valores-F são apresentados para efeitos significativos.

Fatores	N	P	K	Ca	Mg
C	13,09**	12,22**	ns	ns	107,33**
FI	ns	ns	ns	7,31**	ns
C x FI	ns	4,50*	ns	ns	ns
CV (%)	11,77	15,94	12,29	9,92	12,13
Fatores	S	B	Cu	Zn	Na
C	9,70**	24,62**	8,89**	11,60**	6,40*
FI	ns	ns	ns	ns	ns
C x FI	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	29,71	11,79	16,43	13,83	38,87

C: cultivares. FI: fontes de irrigação. CV: coeficiente de variação. \*P < 0,05. \*\*P < 0,01. ns: não significativo.

Fonte: Própria autoria.

Os resultados da análise química foliar para macro e micronutrientes, conforme mostrado na Tabela 13, são comparados com as faixas recomendadas para arroz irrigado indicado na literatura. Os teores de nutrientes observados em todos os tratamentos estavam abaixo dos valores sugeridos por Raji et al. (1997) para nitrogênio (N), fósforo (P) e magnésio (Mg), com exceção do magnésio, que atendeu ao padrão para a cultivar IAC 400. Por outro lado, os níveis de cálcio (Ca), enxofre (S) e todos os micronutrientes indicaram um status nutricional adequado para as plantas de arroz, sugerindo uma disponibilidade suficiente desses elementos.

Entre as cultivares, os elementos não seguiram uma tendência definida, principalmente com relação aos micronutrientes. Pode-se destacar os maiores teores de

nitrogênio (N) e potássio (P) na cultivar agulhinha (IAC 109), beneficiada também na massa de 1000 grãos e na fertilidade das espiguetas (Tabela 11).

O nitrogênio é um nutriente essencial para as plantas de arroz e desempenha um papel significativo em seu crescimento e desenvolvimento. É o segundo nutriente mais acumulado, depois do potássio. O nitrogênio é um componente crucial da clorofila, que é responsável pela cor verde da planta e desempenha um papel fundamental na fotossíntese. Ao aumentar a área foliar, o nitrogênio melhora a capacidade da planta de interceptar a radiação solar e realizar a fotossíntese com eficiência. Isso, por sua vez, contribui para um maior rendimento de grãos, conforme observado por Fageria, Santos e Stone (2003).

Embora os tratamentos não tenham exercido influência significativa nos níveis de potássio (Tabela 12), o valor médio detectado de 10,88 g kg<sup>-1</sup> está abaixo da faixa recomendada de 13-30 g kg<sup>-1</sup> sugerida por Raij et al. (1997). O potássio desempenha um papel crucial no aumento da tolerância da planta de arroz ao déficit hídrico e na melhoria da eficiência do uso da água. Sua deficiência pode levar à redução das trocas gasosas por meio da diminuição da área estomática e da condutância foliar, conforme observado por Yang et al. (2022). Além disso, o potássio é conhecido por sua capacidade de fortalecer as paredes celulares com lignina, proporcionando às plantas de arroz maior resistência ao acamamento, às doenças e às pragas, conforme destacado por Ferreira et al. (2013). A manutenção de níveis adequados de potássio é, portanto, essencial para otimizar a saúde das plantas de arroz e a produtividade geral.

A pesquisa conduzida por Ali et al. (2021) destaca o impacto positivo do teor de magnésio (Mg) aplicado às culturas de arroz em todos os estágios por meio da aplicação constante de ARP. A presença de níveis adequados de magnésio pode contribuir para vários efeitos benéficos nas plantas de arroz. Observou-se que ele promove o aumento da altura da planta, melhor perfilhamento, maior peso de 1.000 grãos e um número maior de espiguetas por panícula. Em última análise, essas melhorias se traduzem em maior produtividade do arroz. As descobertas sugerem que garantir níveis suficientes de magnésio no cultivo de arroz, especialmente por meio da aplicação de águas residuais de piscicultura, pode ser vantajoso para otimizar o crescimento das plantas e o rendimento geral da colheita.

Tabela 13. Valores da análise foliar do arroz irrigado com água residuária da piscicultura.

Fontes de Irrigação	IAC 109	IAC 400	Média
N Faixa <sup>#</sup> 27 – 35 (g kg <sup>-1</sup> )			
100AT	13,75	10,50	12,13
50ARP50AT	12,50	10,50	11,38
100ARP	11,50	10,50	11,00
Média	12,50 A	10,50 B	
P Faixa <sup>#</sup> 1,8 – 3,0 (g kg <sup>-1</sup> )			
100AT	0,78 Aa	0,48 Bb	0,63 a
50ARP50AT	0,80 Aa	0,60 Bab	0,70 a
100ARP	0,75 Aa	0,78 Aa	0,76 a
Média	0,78 A	0,62 B	
Ca Faixa <sup>#</sup> 2,5 – 10,0 (g kg <sup>-1</sup> )			
100AT	8,50	8,50	8,50 b
50ARP50AT	9,75	9,75	9,75 a
100ARP	10,75	9,75	10,25 a
Média	9,67	9,33	
Mg Faixa <sup>#</sup> 1,5 – 5,0 (g kg <sup>-1</sup> )			
100AT	1,23	1,80	1,51
50ARP50AT	1,13	1,90	1,51
100ARP	0,86	1,75	1,31
Média	1,08 B	1,82 A	
S Faixa <sup>#</sup> 1,4 – 3,0 (g kg <sup>-1</sup> )			
100AT	2,33	3,93	3,13
50ARP50AT	2,05	3,38	2,71
100ARP	2,18	2,30	2,24
Média	2,18 B	3,20 A	
B Faixa <sup>#</sup> 4 – 25 (mg kg <sup>-1</sup> )			
100AT	10,50	12,50	11,50
50ARP50AT	9,75	12,75	11,25
100ARP	9,25	12,25	10,75
Média	9,83 B	12,50 A	
Cu Faixa <sup>#</sup> 3 – 25 (mg kg <sup>-1</sup> )			
100AT	4,00	3,00	3,50
50ARP50AT	3,75	3,00	3,38
100ARP	3,25	3,00	3,13
Média	3,67 A	3,00 B	
Zn Faixa <sup>#</sup> 10 – 50 (mg kg <sup>-1</sup> )			
100AT	14,25	11,75	13,00
50ARP50AT	14,50	12,00	13,25
100ARP	14,00	11,50	12,75
Média	14,25 A	11,75 B	
Na (g kg <sup>-1</sup> )			
100AT	0,01	0,03	0,02
50ARP50AT	0,01	0,03	0,02
100ARP	0,01	0,03	0,02
Média	0,01 B	0,03 A	

100AT=100% água de torneira (AT); 100ARP=100% água residuária da piscicultura (ARP); 50ARP50AT=50% ARP, 50% AT; IAC 109=arroz tipo agulhinha; IAC 400=arroz japonico. #: Raij et al. 1997. Médias seguidas por letras diferentes, maiúscula na linha e minúscula na coluna, diferem pelo teste de Tukey.

Fonte: Própria autoria.

A influência de diferentes fontes de irrigação sobre o estado nutricional das plantas de arroz pode ser observada nos teores de cálcio (Ca) e fósforo (P). À medida que a dose de ARP aumentou, os níveis de cálcio apresentaram um aumento correspondente. Entre as cultivares, a IAC 400 apresentou o maior teor de fósforo quando tratada com 100 ARP. A presença de ARP também teve um impacto positivo em outros parâmetros, como rendimento de grãos (PG), biomassa seca da parte aérea e produtividade da água. Notavelmente, o arroz do tipo japônica (IAC 400) apresentou os valores mais altos para esses parâmetros. Essas descobertas sugerem que a aplicação de ARP na irrigação pode melhorar o estado nutricional e o desempenho geral das plantas de arroz, especialmente em termos de absorção de cálcio e fósforo, rendimento de grãos, produção de biomassa e produtividade da água.

O transporte de cálcio (Ca) na planta de arroz ocorre por meio de um processo que envolve mecanismos passivos e ativos. Inicialmente, os íons de cálcio são absorvidos da solução do solo pela raiz por meio de transporte passivo, impulsionado por gradientes de concentração. Uma vez dentro da raiz, os íons de cálcio são transportados através das células da raiz e para os vasos do xilema por meio de vias apoplásticas e simplásticas (Demidchik et al., 2018; Tong et al., 2021).

Em seu estudo, Rios et al. (2022) enfatizam a importância do teor de cálcio (Ca) na promoção do crescimento da raiz e no aumento da tolerância ao estresse climático nas plantas. O cálcio está particularmente concentrado na parede celular, onde desempenha um papel vital como barreira física contra ataques de patógenos. Além disso, o cálcio contribui para melhorar a estrutura da planta, a permeabilidade e a infiltração de água, ajudando a planta a lidar com o estresse da salinidade. A presença de níveis adequados de cálcio é fundamental para a saúde geral e a resiliência das plantas, permitindo que elas superem as condições ambientais adversas.

No caso do sódio (Na), embora a ARP tenha apresentado valor considerado de sódio (Tabela 4), os teores foliares encontrados são baixos e não foram significativos para fonte de



irrigação, apenas para cultivar. O Na foi superior na IAC 400, cujos resultados produtivos, não indicam nenhum efeito salino dessas águas nas plantas de arroz.

As deficiências detectadas de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) nas análises químicas das folhas de arroz não resultaram em impacto significativo no desempenho produtivo das cultivares estudadas.

Esses resultados sugerem, que a faixa de valores indicada como adequada, não reflete o estado nutricional dessas cultivares e neste caso, são necessários mais estudos para confirmação.

## 6. CONCLUSÕES

Os resultados da fertirrigação do arroz com água residuária da piscicultura, por sistema de gotejamento subsuperficial mostraram grande potencial para a integração da aquicultura com a agricultura, promovendo a ciclagem de nutrientes e água, reduzindo o uso de fertilizantes sintéticos e conservando os recursos hídricos.

A água residuária da criação de tilápia, em sistema fechado com renovação parcial de água, mostrou potencial para o aporte de nutrientes, com moderado potencial salino. A adubação nitrogenada e potássica foi 100% substituída pela água residuária da piscicultura (ARP).

A produção do arroz foi incrementada pela ARP, independente das cultivares estudadas. Tanto a IAC 109 (agulhinha), quanto a IAC 400 (japônico) apresentaram valores de produtividade de grãos superiores ao encontrados na literatura, indicando o favorecimento do uso da irrigação por gotejamento na eficiência do uso da água pelas plantas. O resultado alcançado neste estudo superou os padrões comerciais.

O estado nutricional das folhas de arroz foi adequado para cálcio (Ca), enxofre (S) e todos os micronutrientes, entretanto os teores de N, P e K ficaram abaixo da faixa recomendada, sugerindo um aprofundamento das pesquisas, visto que essas deficiências não tiveram consequências na produtividade dos grãos.



## REFERÊNCIAS

- Abdul-Rahman, S., Saoud, I. P., Owaied, M. K., Holail, H., Farajalla, N., Haidar, M., & Ghanawi, J. (2011). Improving water use efficiency in semi-arid regions through integrated aquaculture/agriculture. *Journal of Applied Aquaculture*, 23(3), 212–230. doi: 10.1080/10454438.2011.600629
- Aguiar, A. T. E., Gonçalves, C., Paterniani, M. E. A. G. Z., Tucci, M. L. S. A., & de Castro, C. E. F. (2014). Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas. 7 ed. (Boletim IAC, nº 200) Campinas: Instituto Agronômico, 452 p.
- Alameen, A. M., Devi, K. N., Kumar, S. D., Gunabal, S., Krishnaveni, N., Gowthami, A., ... Perumal, P. (2023). A sustainable utilization of aquaculture wastewater for the production of commercially important tilapia fish and plants (Mint and chickpea) in improved integrated aqua-agriculture system. *Bioresource Technology Reports*, 21, 101313. doi: 10.1016/j.biteb.2022.101313
- Al-Hafedh, Y., Alam, A., Alam, A. M. (2003). Performance of plastic biofilter media with different configuration in a water recirculation system for the culture of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquacultural Engineering*, 29(3–4), 139–154. doi: 10.1016/S0144-8609(03)00065-7
- Al-Hafedh, Y. S., Alam, A., & Beltagi, M. S. (2008). Food production and water conservation in a recirculating aquaponic system in Saudi Arabia at different ratios of fish feed to plants. *Journal of the World Aquaculture Society*, 39(4), 510–520. doi: 10.1111/j.1749-7345.2008.00181.x
- Ali, H., Sarwar, N., Muhammad, S., Farooq, O., Rehman, A., Wasaya, A., ... Akhtar, M. N. (2021). Foliar application of magnesium at critical stages improved the productivity of rice crop grown under different cultivation systems. *Sustainability*, 13(9), 4962. doi: 10.3390/su13094962
- Álvarez-García, M., Urrestarazu, M., Guil-Guerrero, J. L., & Jiménez-Becker, S. (2019). Effect of fertigation using fish production wastewater on *Pelargonium x zonale* growth and nutrient content. *Agricultural Water Management*, 223, 105726. doi: 10.1016/j.agwat.2019.105726

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, Rome, 300(9), D05109.
- ANA (2017)- Agência Nacional de Águas. Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada. , 86p. Brasília.
- ANA (2019a) - Agência Nacional de Águas. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2019: informe anual. 100p. Brasília.
- ANA (2019b)- Agência Nacional de Águas. Coeficientes técnicos de uso da água para a agricultura irrigada. 29 p. Brasília.
- APHA/AWWA/WEF - American Public Health Association/American Water Works Association/ Water Environment Federation. (2012). Standard methods for the examination for water and wastewater. 22 ed. Vol 10. Washington, 1496p.
- Ayer, R. S.; Westcot D. W. (1999). A qualidade da água na agricultura. Tradução de Gheyi, H. R.; Medeiros, J. F.; Damasceno, F. A. V. 2 ed. Campina Grande: UFPB. 153 p.
- Ayars, J. E., Fulton, A., & Taylor, B. (2015). Subsurface drip irrigation in California—Here to stay? *Agricultural Water Management*, 157, 39–47. doi: 10.1016/j.agwat.2015.01.001
- Bai, S. C., Katya, K., & Yun, H. (2015). Additives in aquafeed. Em *Feed and Feeding Practices in Aquaculture* (p. 171–202). Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-08-100506-4.00007-6
- Baldisserotto, B. (2018). *Fisiologia de peixes aplicada à piscicultura*. Santa Maria: UFSM, 3 ed. 352 p.
- Blachier, F., Andriamihaja, M., & Blais, A. (2020). Sulfur-containing amino acids and lipid metabolism. *The Journal of Nutrition*, 150, 2524S-2531S. doi: 10.1093/jn/nxaa243
- Bouman, B. A. M., & Tuong, T. P. (2001). Field water management to save water and increase its productivity in irrigated lowland rice. *Agricultural Water Management*, 49(1), 11–30. doi: 10.1016/S0378-3774(00)00128-1
- Bracino, A. A., Concepcion, R. S., Dadios, E. P., & Vicerra, R. R. P. (2020). Biofiltration for recirculating aquaponic systems: A review. 2020 IEEE 12th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management (HNICEM), 1–6. Manila, Philippines: IEEE. doi: 10.1109/HNICEM51456.2020.9400136

- Brosnan, J. T., & Brosnan, M. E. (2006). The sulfur-containing amino acids: An overview. *The Journal of Nutrition*, 136(6), 1636S-1640S. doi: 10.1093/jn/136.6.1636S
- Conama (2011). Resolução CONAMA nº 430, de 16 de maio de 2011. Diário Oficial da União, Brasília.
- Brichi, L. (2019). Minitomateiro consorciado com adubos verdes fertirrigados com efluente tratado de laticínio (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas, Universidade de São Paulo). Universidade de São Paulo, Piracicaba. doi: 10.11606/D.11.2019.tde-22032019-144610
- Carvalho, L. G. D., Rios, G. F. A., Miranda, W. L., & Castro Neto, P. (2011). Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 41, 456-465.
- Cakmak, I. (2008). Micronutrients in Agriculture: Sulfur in Crop Production. *Academic Journals*.
- Castro, R. S., Borges Azevedo, C. M. S., & Bezerra-Neto, F. (2006). Increasing cherry tomato yield using fish effluent as irrigation water in Northeast Brazil. *Scientia Horticulturae*, 110(1), 44–50. doi: 10.1016/j.scienta.2006.06.006
- CETESB-Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. (2006). Orientação para apresentação de projeto visando à aplicação de água de reuso proveniente de estação de tratamento de esgoto doméstico na agricultura.
- CETESB & ANA (2011). Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos / Companhia Ambiental do Estado de São Paulo; Organizadores: Carlos Jesus Brandão - São Paulo: CETESB; Brasília: ANA, 326 p.
- Coltro, L., Marton, L. F. M., Pilecco, F. P., Pilecco, A. C., & Mattei, L. F. (2017). Environmental profile of rice production in Southern Brazil: A comparison between irrigated and subsurface drip irrigated cropping systems. *Journal of Cleaner Production*, 153, 491–505. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.09.207
- Chaudhry, A. H., Nayab, S., Hussain, S. B., Ali, M., & Pan, Z. (2021). Current understandings on magnesium deficiency and future outlooks for sustainable agriculture. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(4), 1819. doi: 10.3390/ijms22041819

- Chen, Z., Cao, C., Yan, X., Hu, T., Yang, X., & Zhang, F. (2018). Synergistic effects of calcium and magnesium on photosynthesis and ethylene synthesis in rice leaves. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1-11. doi: 10.3389/fpls.2018.01561
- CONAB (2023). Safra brasileira de grãos. Acomp. Safra brasileira de grãos, Brasília, v.10 – Safra 2022/23. n.4—Quarto levantamento, p. 1-83, Janeiro 2023. website: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>
- Crusciol, C. A. C., Fernandes, A. M., Carmeis Filho, A. C. de A., & Alvarez, R. de C. F. (2016). Macronutrient uptake and removal by upland rice cultivars with different plant architecture. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 40(0). doi: 10.1590/18069657rbc20150115
- Davis, D. A., & Hardy, R. W. (2022). Feeding and fish husbandry. In *Fish Nutrition* (p. 857–882). Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-12-819587-1.00015-X
- Deviram, G., Mathimani, T., Anto, S., Ahamed, T. S., Ananth, D. A., & Pugazhendhi, A. (2020). Applications of microalgal and cyanobacterial biomass on a way to safe, cleaner and a sustainable environment. *Journal of Cleaner Production*, 253, 119770. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119770
- De Bang, T. C., Husted, S., Laursen, K. H., Persson, D. P., & Schjoerring, J. K. (2021). The molecular–physiological functions of mineral macronutrients and their consequences for deficiency symptoms in plants. *New Phytologist*, 229(5), 2446–2469. doi: 10.1111/nph.17074
- Demidchik, V., Shabala, S., Isayenkov, S., Cuin, T. A., & Pottosin, I. (2018). Calcium transport across plant membranes: Mechanisms and functions. *New Phytologist*, 220(1), 49–69. doi: 10.1111/nph.15266
- Deng, J., Bi, X., Kong, X., Zhou, X., & Zhang, S. (2015). Phosphorus nutrition in aquaculture. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 23(1), 1-17.
- Dourou, M., Tsolcha, O. N., Tekerlekopoulou, A. G., Bokas, D., & Aggelis, G. (2018). Fish farm effluents are suitable growth media for *Nannochloropsis gaditana*, a polyunsaturated fatty acid producing microalga. *Engineering in Life Sciences*, 18(11), 851–860. doi: 10.1002/elsc.201800064

- Dourou, M., Dritsas, P., Baeshen, M. N., Elazzazy, A., Al-Farga, A., & Aggelis, G. (2020). High-added value products from microalgae and prospects of aquaculture wastewaters as microalgae growth media. *FEMS Microbiology Letters*, 367(12), fnaa081. doi: 10.1093/femsle/fnaa081
- Du, C., Zhou, J., Shrestha, P., Song, Z., & Zhao, B. (2017). Effects of long-term sulfur fertilization on soil pH and availability of micronutrients. *Soil Science Society of America Journal*, 81(3), 614-622.
- Effendi, H., Widyatmoko, Utomo, B. A., & Pratiwi, N. T. M. (2020). Ammonia and orthophosphate removal of tilapia cultivation wastewater with *Vetiveria zizanioides*. *Journal of King Saud University - Science*, 32(1), 207–212. doi: 10.1016/j.jksus.2018.04.018
- Elsbaay, A. M., & Darwesh, M. R. (2022). Effects of the fish effluent on cabbage production under mulching conditions. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 24(3). <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/6383>
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. (2013). Sistema brasileiro de classificação de solos. 3 ed. Brasília, 353 p.
- Encarnação, P. (2016). Functional feed additives in aquaculture feeds. Em *Aquafeed Formulation* (p. 217–237). Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-12-800873-7.00005-1
- Enwereuzoh, U., Harding, K., & Low, M. (2021). Microalgae cultivation using nutrients in fish farm effluent for biodiesel production. *South African Journal of Chemical Engineering*, 37, 46–52. doi: 10.1016/j.sajce.2021.03.007
- EPAGRI (2002), A cultura do arroz irrigado pré-germinado. Florianópolis, 273 p.
- Fader, M., Shi, S., von Bloh, W., Bondeau, A., & Cramer, W. (2016). Mediterranean irrigation under climate change: More efficient irrigation needed to compensate for increases in irrigation water requirements. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(2), 953–973. doi: 10.5194/hess-20-953-2016
- Fageria, N. K., Baligar, V. C., & Jones, C. A. (2011). Growth and mineral nutrition of field crops (3rd ed). Boca Raton: CRC Press.
- Fageria, N. K., Ferreira, E., Prabhu, A. S., Barbosa Filho, M. P., & Filippi, M. C. (1995). Seja o doutor do seu arroz (Vol. 9, p. 20). Piracicaba: Potafos.



- Fageria, N. K., dos SANTOS, A. B., & Stone, L. F. (2003). Manejo de nitrogênio em arroz irrigado.
- FAO, (2022). Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação: Uma produção pesqueira e aquícola sem precedentes contribui decisivamente para a segurança alimentar global. Relatório da FAO sobre o Estado Mundial da Pesca e Aquicultura (SOFIA) observa o crescimento impulsionado pela aquicultura. Disponível em: <<https://www.fao.org/brasil/noticias/detail-events/es/c/1585153/>>. Acesso em: 2 jan. 2023.
- FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO. 2022. The State of Food Security and Nutrition in the World 2022. Repurposing food and agricultural policies to make healthy diets more affordable. Rome, FAO. doi: <https://doi.org/10.4060/cc0639en>
- FAO, 1980. Fish feed technology: Lectures presented at the fao/undp training course in fish feed technology, held at the college of fisheries, university of washington, seattle, washington, u. S. A. , 9 october-15 december 1978. (1980). Rome: United Nations Development Programme : Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Ferreira, D. F. (2011). Sisvar: A computer statistical analysis system. *Ciência e Agrotecnologia*, 35(6), 1039–1042. doi: 10.1590/S1413-70542011000600001
- Ferreira, C. M. et al. (2013) Arroz: o produtor pergunta, a Embrapa responde. Brasília, DF: Embrapa.
- Fiorentini, D., Cappadone, C., Farruggia, G., & Prata, C. (2021). Magnesium: Biochemistry, nutrition, detection, and social impact of diseases linked to its deficiency. *Nutrients*, 13(4), 1136. doi: 10.3390/nu13041136
- Fracalossi, D. M., Cyrino, J., & Eurico, P. (2013). Nutriaqua: Nutrição e alimentação de espécies de interesse para a aquicultura brasileira, 375p. Sociedade Brasileira de Aquicultura e Biologia Aquática/AQUABIO, Florianópolis, Santa Catarina, BR.
- Frizzone, J. A. (2015). Irrigação por aspersão; uniformidade e eficiência. *Serie Didática. Depto Engenharia Rural*, (3), 1-53.
- Gao, Z., Zhao, C., Zhang, Y., Zhang, C., Li, J., & Chen, X. (2019). Effects of calcium on magnesium uptake and distribution in different rice genotypes. *Scientific Reports*, 9(1), 1-11. doi: 10.1038/s41598-019-46311-6

- Ghosh, B., Md, N. A., & Gantait, S. (2016). Response of rice under salinity stress: a review update. *Rice research: open access*, 1-8.
- Godoy, A. C., Rovigatti Chiavelli, L. U., Oxford, J. H., Rodrigues, R. B., de Oliveira Ferreira, I., Marcondes, A. S., ... Neu, D. (2021). Evaluation of limnological dynamics in Nile tilapia farming tank. *Aquaculture and Fisheries*, 6(5), 485–494. doi: 10.1016/j.aaf.2020.08.005
- Görlach, A., Bertram, K., Hudecova, S., & Krizanova, O. (2015). Calcium and ROS: A mutual interplay. *Redox Biology*, 6, 260–271. doi: 10.1016/j.redox.2015.08.010
- Graber, A., & Junge, R. (2009). Aquaponic Systems: Nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. *Desalination*, 246(1–3), 147–156. doi: 10.1016/j.desal.2008.03.048
- Guimarães, C. M., Stone, L. F., & Silva, A. C. de L. (2016). Evapotranspiration and grain yield of upland rice as affected by water deficit. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 20(5), 441–446. doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v20n5p441-446
- Hawkesford, M., Horst, W., & Kichey, T. (2012). Functions of macronutrients. In Marschner's *Mineral Nutrition of Higher Plants* (3rd ed., pp. 135-189). Academic Press.
- Hoang, T. M. L., Moghaddam, L., Williams, B., Khanna, H., Dale, J., & Mundree, S. G. (2015). Development of salinity tolerance in rice by constitutive-overexpression of genes involved in the regulation of programmed cell death. *Frontiers in Plant Science*, 6. doi: 10.3389/fpls.2015.00175
- Hua, K., Cobcroft, J. M., Cole, A., Condon, K., Jerry, D. R., Mangott, A., ... Strugnell, J. M. (2019). The future of aquatic protein: Implications for protein sources in aquaculture diets. *One Earth*, 1(3), 316–329. doi: 10.1016/j.oneear.2019.10.018
- Hueze, V., & Tran, G. (2016). Blood meal. *Feedipedia*, a programme by INRA, CIRAD, AFZ and FAO.
- IAC (2005) Instituto Agronômico de Campinas. IAC 400: cultivar de arroz tipo especial culinária japonesa. Instituto Agronômico, Centro de Comunicação e Transferência do Conhecimento: Campinas, São Paulo, BR.
- IAC (2018) Instituto Agronômico de Campinas. IAC apresenta na Agrishow 2018 duas novas cultivares de arroz agulhinha e uma do tipo arbóreo. Por Carla Gomes (MTb 28156) – Assessora de imprensa IAC.

- Jesus, F. L. F. de, Santos, O. N. A., Talamini Junior, M. V., Gomes, T. M., Rossi, F., & Sánchez Román, R. M. (2020). Águas residuárias para irrigação no brasil: Uma abordagem química, física e microbiológica. *IRRIGA*, 25(3), 562–589. doi: 10.15809/irriga.2020v25n3p562-589
- Jiadhong, K., Nampei, M., Wangsawang, S., & Ueda, A. (2022). Riboflavin seed priming activates osnhxs expression to alleviate salinity stress in rice seedlings. *Journal of Plant Growth Regulation*. doi: 10.1007/s00344-022-10768-1
- Joesting, H. M., Blaylock, R., Biber, P., & Ray, A. (2016). The use of marine aquaculture solid waste for nursery production of the salt marsh plants *Spartina alterniflora* and *Juncus roemerianus*. *Aquaculture Reports*, 3, 108–114. doi: 10.1016/j.aqrep.2016.01.004
- Kaab Omeir, M., Jafari, A., Shirmardi, M., & Roosta, H. (2020). Effects of irrigation with fish farm effluent on nutrient content of basil and purslane. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 90(4), 825–831. doi: 10.1007/s40011-019-01155-0
- Kaushik, S. J., Luquet, P., Blanc, D., & Valceschini, E. (2004). Phosphorus availability and requirements in aquaculture. *Aquaculture Research*, 35(6), 519-527.
- Kimera, F., Sewilam, H., Fouad, W. M., & Suloma, A. (2021). Sustainable production of *Origanum syriacum* L. using fish effluents improved plant growth, yield, and essential oil composition. *Heliyon*, 7(3), e06423. doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e06423
- Köppen, W. & Geiger, R. (1936). *Das geographische system der klimat. Handbuch der klimatologie*, Gebrüder Bornträger, Berlin, part C, 1-46.
- Levidow, L., Zaccaria, D., Maia, R., Vivas, E., Todorovic, M., & Scardigno, A. (2014). Improving water-efficient irrigation: Prospects and difficulties of innovative practices. *Agricultural Water Management*, 146, 84–94. doi: 10.1016/j.agwat.2014.07.012
- Li, T., & Zhang, J. (2017). Effect of pit irrigation on soil water content, vigor, and water use efficiency within vineyards in extremely arid regions. *Scientia Horticulturae*, 218, 30–37. doi: 10.1016/j.scienta.2017.01.050
- Lima, A. C. M. (2020). *Pepino tipo japonês irrigado com efluente tratado de laticínio e aplicação de Trichoderma asperellum* (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas, Universidade de São Paulo). Universidade de São Paulo, Piracicaba. doi: 10.11606/D.11.2020.tde-05052020-144007

- Lima, R. H. P., Lopes, H. M. L., Menezes, B. R. da S. M., Pereira, M. B. P., & Moreira, L. B. M. (2019). Desempenho agrônômico de tipos especiais de arroz sob sistema de irrigação por inundação e transplante de mudas. *MAGISTRA*, 30, 331–335.
- Liu, J., Liu, H., Liu, R., Mostofa Amin, M., Zhai, L., Lu, H., ... Zhao and Xiaodong Ding, Y. (2019). Water quality in irrigated paddy systems. In G. Ondrašek (Org.), *Irrigation in Agroecosystems*. IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.77339
- Lucca, P., Hurrell, R., & Potrykus, I. (2002). Iron and manganese in rice grains and their effects on human nutrition. *Annals of Nutrition and Metabolism*, 46(Suppl. 1), 1–10. doi: 10.1159/000066402
- Marques, F. B., Watterson, A., Rocha, A. F., & Cavalli, L. S. (2020). Overview of Brazilian aquaculture production. *Aquaculture Research*, 51(12), 4838–4845. doi: 10.1111/are.14828
- Ma, X., Sanguinet, K. A., & Jacoby, P. W. (2019). Performance of direct root-zone deficit irrigation on *Vitis vinifera* L. cv. Cabernet Sauvignon production and water use efficiency in semi-arid southcentral Washington. *Agricultural Water Management*, 221, 47–57. doi: 10.1016/j.agwat.2019.04.023
- Ma, X., Sanguinet, K. A., & Jacoby, P. W. (2020). Direct root-zone irrigation outperforms surface drip irrigation for grape yield and crop water use efficiency while restricting root growth. *Agricultural Water Management*, 231, 105993. doi: 10.1016/j.agwat.2019.105993
- Marschner, P. (2012). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants* (3rd ed.). Academic Press.
- Martínez, Y., Li, X., Liu, G., Bin, P., Yan, W., Más, D., ... Yin, Y. (2017). The role of methionine on metabolism, oxidative stress, and diseases. *Amino Acids*, 49(12), 2091–2098. doi: 10.1007/s00726-017-2494-2
- Malavolta, E., Vitti, G. C., & Oliveira, S. A. D. (1997). *Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações*. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 319 p.
- Malhotra, H., Vandana, Sharma, S., & Pandey, R. (2018). Phosphorus nutrition: Plant growth in response to deficiency and excess. Em M. Hasanuzzaman, M. Fujita, H. Oku, K. Nahar, & B. Hawrylak-Nowak (Orgs.), *Plant Nutrients and Abiotic Stress Tolerance* (p. 171–190). Singapore: Springer Singapore. doi: 10.1007/978-981-10-9044-8\_7

- Marano, R. P., Folegatti, M. V., & Imhoff, S. (2014). Resposta produtiva do arroz (*Oryza sativa* L.) cultivado em diferentes agro ecossistemas com manejos de água sem saturação do solo. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, 8(2), 171–187. doi: 10.7127/rbai.v8n200229
- Menegassi, L. C., Rossi, F., Dominical, L. D., Tommaso, G., Montes, C. R., Gomide, C. A., & Gomes, T. M. (2020). Reuse in the agro-industrial: Irrigation with treated slaughterhouse effluent in grass. *Journal of Cleaner Production*, 251, 119698. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119698
- Menegassi, L. C. (2022). Arroz tipo especial fertirrigado por gotejamento subsuperficial com efluente tratado de laticínio (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas, Universidade de São Paulo). Universidade de São Paulo, Piracicaba. doi: 10.11606/T.11.2022.tde-08112022-115745
- Mo, Y., Li, G., & Wang, D. (2017). A sowing method for subsurface drip irrigation that increases the emergence rate, yield, and water use efficiency in spring corn. *Agricultural Water Management*, 179, 288–295. doi: 10.1016/j.agwat.2016.06.005
- Munareto, J. D., Beutler, A. N., Ramão, C. J., Dias, N. P., Ramos, P. V., Pozzebon, B. C., ... Hernandez, G. C. (2010). Propriedades físicas do solo e produtividade de arroz irrigado por inundação no sistema plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 45(12), 1499–1506. doi: 10.1590/S0100-204X2010001200022
- Nascimento, T. S., Monteiro, R. N. F., Sales, M. A. de L., Floriano, L. S., & Pereira, A. I. de A. (2016b). Irrigação com efluente de piscicultura no cultivo de mudas de tomate. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, 10(4), 866–874. doi: 10.7127/rbai.v10n400462.
- Nascimento, T. S., Floriano, L. S., Pereira, A. I. de A., Monteiro, R. N. F., & Sales, M. A. de L. (2016a). Produção de mudas de pimentão irrigadas com efluentes de piscicultura. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, 10(1), 449–459. doi: 10.7127/rbai.v10n100386
- Naylor, S., Brisson, J., Labelle, M. A., Drizo, A., & Comeau, Y. (2003). Treatment of freshwater fish farm effluent using constructed wetlands: The role of plants and substrate. *Water Science and Technology*, 48(5), 215–222. doi: 10.2166/wst.2003.0324

- Ndiaye, W. N., Deschamps, M.-H., Comeau, Y., Chowdhury, K., Bunod, J.-D., Letourneau-Montminy, M.-P., & Vandenberg, G. (2020). In situ chelation of phosphorus using microencapsulated aluminum and iron sulfate to bind intestinal phosphorus in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Animal Feed Science and Technology*, 269, 114675. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2020.114675
- Norton, G. J., Dasgupta, T., Islam, M. R., Islam, S., Deacon, C. M., Zhao, F. J., ... Price, A. H. (2017). Manganese in rice: The path forward for sustainable production. *Rice*, 10(1), 14. doi: 10.1186/s12284-017-0151-7
- Nwanna, L. C., Okonji, V. A., & Aniebo, A. O. (2010). Phosphorus in fish nutrition and fish growth. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 14(2), 117-123.
- Öborn, I., Jansson, P. E., & Stendahl, J. (2016). Soil acidification effects on carbon and nitrogen cycles, leaching and biodiversity – A European perspective. *European Journal of Soil Science*, 67(4), 478-491.
- Ockerman, H. W., & Basu, L. (2014). By-products | inedible. Em *Encyclopedia of Meat Sciences* (p. 125–136). Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-12-384731-7.00032-5
- Ouoba, N., Phung, L. D., Sasaki, A., Pham, D. V., & Watanabe, T. (2022). Drip fertigation with treated municipal wastewater and soil amendment with composted sewage sludge for sustainable protein-rich rice cultivation. *Environmental Technology & Innovation*, 28, 102569. doi: 10.1016/j.eti.2022.102569
- Osunbami, O. T., & Adeola, O. (2022). Energy value of hydrolyzed feather meal and flash-dried poultry protein for broiler chickens and pigs. *Journal of Animal Science*, 100(3), skac073. doi: 10.1093/jas/skac073
- Pandolfo, C., Vianna, L. F. de N., Lucietti, D., & Vale, M. L. C. do. (2022). Recomendações para a produção de arroz irrigado em Santa Catarina: 4a. edição. Caracterização do ambiente de cultivo. *Sistemas de Produção*, (56), 11–13. <https://publicacoes.epagri.sc.gov.br/SP/article/view/1587>
- Parthasarathi, T., Vanitha, K., Mohandass, S., & Vered, E. (2018). Evaluation of drip irrigation system for water productivity and yield of rice. *Agronomy Journal*, 110(6), 2378–2389. doi: 10.2134/agronj2018.01.0002

- Paulus, D., Zorzi, I. C., Rankrape, F., & Nava, G. A. (2019). Wastewater from fish farms for producing eucalyptus grandis seedlings. *Floresta e Ambiente*, 26(4), e20170580. doi: 10.1590/2179-8087.058017
- PeixeBR, (2022). Anuário Peixe BR da Piscicultura 2022. Associação Brasileira da Piscicultura, São Paulo, p. 25.
- PeixeBR, (2021)| Produção. Disponível em: <<https://www.peixebr.com.br/producao/>>. Acesso em: 2 jan. 2023.
- Pedroza Filho, M. X., & Muñoz, A. E. P. (2019). Potencial e barreiras para a exportação de carne de tilápias pelo Brasil. <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/17001>
- Pineda Suárez, D. F., & Sánchez Román, R. M. (2018). Consumo de água em arroz irrigado por inundação em sistema de multiplas entradas. *IRRIGA*, 1(1), 78. doi: 10.15809/irriga.2016v1n1p78-95
- Pisciotta, A., Di Lorenzo, R., Santalucia, G., & Barbagallo, M. G. (2018). Response of grapevine (Cabernet Sauvignon cv) to above ground and subsurface drip irrigation under arid conditions. *Agricultural Water Management*, 197, 122–131. doi: 10.1016/j.agwat.2017.11.013
- Phung, L. D., Ichikawa, M., Pham, D. V., Sasaki, A., & Watanabe, T. (2020). High yield of protein-rich forage rice achieved by soil amendment with composted sewage sludge and topdressing with treated wastewater. *Scientific Reports*, 10(1), 10155. doi: 10.1038/s41598-020-67233-w
- Prietzl, J., Klysubun, W., & Hurtarte, L. C. C. (2021). The fate of calcium in temperate forest soils: A Ca K-edge XANES study. *Biogeochemistry*, 152(2–3), 195–222. doi: 10.1007/s10533-020-00748-6
- Qi, D., Yan, J., & Zhu, J. (2020). Effect of a reduced fertilizer rate on the water quality of paddy fields and rice yields under fishpond effluent irrigation. *Agricultural Water Management*, 231, 105999. doi: 10.1016/j.agwat.2020.105999
- Ração nutripiscis para todo tipo de peixe. (2023). Recuperado 11 de junho de 2023, de [https://www.nutrinortefranca.com.br/MLB-2015264840-raco-nutripiscis-tr-32-4-a-6mm-para-todo-tipo-de-peixe-25kg-\\_JM](https://www.nutrinortefranca.com.br/MLB-2015264840-raco-nutripiscis-tr-32-4-a-6mm-para-todo-tipo-de-peixe-25kg-_JM)
- Raij, B. V. et al. (1997). Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2 ed. Campinas: Instituto Agrônômico, (Boletim técnico 100) 285p.

- Raij, B. V.; Andrade, J. C.; Cantarella, H.; Quaggio, J. A. (2001). Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas: Instituto Agronômico, . 285 p.
- Raij, B. V. (2011). Fertilidade do solo e manejo de nutrientes. International Plant Nutrition Institute, Piracicaba. Salas M., Aumont G, Biessy G, Magnie E (1992) Effect of variety, stage of maturity and nitrate fertilization on nutritive value of sugarcane. Anim Feed Sci Technol, 39(3), 1992.
- Rajwade, Y. A., Swain, D. K., Tiwari, K. N., & Singh Bhadoria, P. B. (2018). Grain yield, water productivity, and soil nitrogen dynamics in drip irrigated rice under varying nitrogen rates. *Agronomy Journal*, 110(3), 868–878. doi: 10.2134/agronj2017.09.0538
- Rakocy, J. E. (2012). Aquaponics—Integrating fish and plant culture. In J. H. Tidwell (Org.), *Aquaculture Production Systems* (1o ed, p. 344–386). Wiley. doi: 10.1002/9781118250105.ch14
- Reineke, W., & Schlömann, M. (2023). Cycles of sulfur, iron and manganese. Em W. Reineke & M. Schlömann, *Environmental Microbiology* (p. 307–329). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-662-66547-3\_8
- Rios, C. V., Souza, G. V. D., Brito, E. P. de, Pagliosa, F. M., & Silva, C. P. da. (2022). Efeito do cálcio, boro e potássio no crescimento inicial de hortelã-verde (*Mentha spicata* L.) em solução nutritiva. *Revista Agraria Academica*, 5(3), 159–171. doi: 10.32406/v5n3/2022/159-171/agrariacad
- Robson, B. J. (2014). State of the art in modelling of phosphorus in aquatic systems: Review, criticisms and commentary. *Environmental Modelling & Software*, 61, 339–359. doi: 10.1016/j.envsoft.2014.01.012
- Ryan, P. R., & Delhaize, E. (2010). The convergent evolution of aluminium resistance in plants exploits a convenient currency. *Functional Plant Biology*, 37(4), 275–284. doi: 10.1071/FP09277
- Silva. S. C., Steinmetz, S., & Heinemann, A. B. (2015). Arroz: do plantio à colheita. Viçosa: Ed. UFV. *Exigências climáticas*, (242), 43–65.
- Seck, P. A., Diagne, A., Mohanty, S., & Wopereis, M. C. S. (2012). Crops that feed the world 7: Rice. *Food Security*, 4(1), 7–24. doi: 10.1007/s12571-012-0168-1
- SENAR (2019). *Piscicultura: alimentação*. / Serviço Nacional de Aprendizagem Rural. – Brasília: Senar. 48 p.; il. 21 cm (Coleção Senar, 263).



- Santos et al. (2015), Desempenho agrônômico de arroz irrigado e eficiência de uso da água em razão do manejo da irrigação. IX Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado.
- Sharda, R., Mahajan, G., Siag, M., Singh, A., & Chauhan, B. S. (2017). Performance of drip-irrigated dry-seeded rice (*Oryza sativa* L.) in South Asia. *Paddy and Water Environment*, 15(1), 93–100. doi: 10.1007/s10333-016-0531-5
- Scivittaro, W. B.; Steinmetz, S. & Severo, A. C. M. (2010). Demanda hídrica e eficiência de Uso da Água pelo Arroz: Supressão da Irrigação. *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento* 132, n. Embrapa Clima Temperado. p. 21.
- Silva, A. A. da, Melo, S. S., Umbelino, B. F., Sá, F. V. da S., Dias, N. da S., & Ferreira Neto, M. (2021). Cherry tomato production and seed vigor under irrigation with saline effluent from fish farming. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 25(6), 380–385. doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v25n6p380-385
- Singh, B. & Schulze, D. G. (2015) Soil Minerals and Plant Nutrition. *Nature Education Knowledge* 6(1):1
- Sipaúba-Tavares, L. H., Fávero, E. G. P., & Braga, F. M. S. (2002). Utilization of macrophyte biofilter in effluent from aquaculture: I. Floating plant. *Brazilian Journal of Biology*, 62(4a), 713–723. doi: 10.1590/S1519-69842002000400019
- Sipaúba-Tavares, L. H.; Gomes, J. P. F.; Braga, F. M. S. (2003). Effect of liming management on the water quality in *Colossoma macropomum* (“Tambaqui”) ponds. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 15(3): p. 95-103.
- Snow, A. M., Ghaly, A. E., & Snow, A. (2008). A comparative assessment of hydroponically grown cereal crops for the purification of aquaculture wastewater and the production of fish feed. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 3(1), 364-378.
- Souza, P. P. & Neto, J. R. S. (2018). Reaproveitamento da água de piscicultura na irrigação da forragem *brachiaria brizantha* cv. Brs piatã. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*. Ano 03, Ed. 12, Vol. 06, pp. 28 – 43.
- Stone, L. F.; Moreira, J. A. A.; Silveira Filho, A. (1990). Manejo de água na cultura do arroz: consumo, ocorrência de plantas daninhas, absorção de nutrientes e características produtivas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 25, n. 3, p. 323–337.
- Suresh, A. V. (2016). Feed formulation software. Em *Aquafeed Formulation* (p. 21–31). Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-12-800873-7.00002-6

- Tabbal, D. F., Bouman, B. A. M., Bhuiyan, S. I., Sibayan, E. B., & Sattar, M. A. (2002). On-farm strategies for reducing water input in irrigated rice; case studies in the Philippines. *Agricultural Water Management*, 56(2), 93–112. doi: 10.1016/S0378-3774(02)00007-0
- Tacon, A. G. J. & Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (1990). *Standard methods for the nutrition of farmed fish and shrimp*. Seattle: Argent Laboratories Press, 208 p.
- Taiz, L., & Zeiger, E., (2015). *Plant physiology and development* (Sixth edition). Sunderland, Massachusetts: Sinauer Associates, Inc., Publishers.
- Tartila. (2023). Crecimiento del arroz. Ciclo de cultivo de cultivos de plantas. Dibuje las etapas de la vida de los cereales agrícolas. Espiguillas dibujadas a mano en el suelo. Los granos aumentan el concepto de vector de pasos. Periodos y fases de maduración, cultivo. | Vector Premium. Recuperado 3 de janeiro de 2023, de Freepik website: [https://www.freepik.es/vector-premium/crecimiento-arroz-ciclo-cultivo-cultivos-plantas-dibuje-etapas-vida-cereales-agricolas-espiguillas-dibujadas-mano-suelo-granos-aumentan-concepto-vector-pasos-periodos-fases-maduracion-cultivo\\_17571244.htm](https://www.freepik.es/vector-premium/crecimiento-arroz-ciclo-cultivo-cultivos-plantas-dibuje-etapas-vida-cereales-agricolas-espiguillas-dibujadas-mano-suelo-granos-aumentan-concepto-vector-pasos-periodos-fases-maduracion-cultivo_17571244.htm)
- Timm, A. U., Roberti, D. R., Streck, N. A., Gustavo G. de Gonçalves, L., Acevedo, O. C., Moraes, O. L. L., ... Toll, D. L. (2014). Energy partitioning and evapotranspiration over a rice paddy in southern brazil. *Journal of Hydrometeorology*, 15(5), 1975–1988. doi: 10.1175/JHM-D-13-0156.1
- Tong, T., Li, Q., Jiang, W., Chen, G., Xue, D., Deng, F., ... Chen, Z.-H. (2021). Molecular evolution of calcium signaling and transport in plant adaptation to abiotic stress. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(22), 12308. doi: 10.3390/ijms222212308
- Tsutsui, H. (1972). Manejo da água para produção de arroz. *Lav. arroz*, (269):36-41.
- Ulaş, A., Yücel, Y. C., & Ulaş, F. (2022). The application of fish wastewater to improve the plant growth, development and yield of lettuce(*Lactuca sativa* L.). *International Journal of Agriculture, Environment and Food Sciences*, 100–107. doi: 10.31015/jaefs.2022.1.14
- Van Genuchten, M. V., Leij, F. J., & Yates, S. R. (1991). The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils.
- Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44(5), 892-898.

- Valenti, W. C., Barros, H. P., Moraes-Valenti, P., Bueno, G. W., & Cavalli, R. O. (2021). Aquaculture in Brazil: Past, present and future. *Aquaculture Reports*, 19, 100611. doi: 10.1016/j.aqrep.2021.100611
- Wang, Y., Bai, D., Yang, X., Zhang, Y., & Luo, X. (2023). Soil sulfur cycle bacteria and metabolites affected by soil depth and afforestation conditions in high-sulfur coal mining areas. *Applied Soil Ecology*, 185, 104802. doi: 10.1016/j.apsoil.2022.104802
- Wang, Y., Gu, X., Zeng, Q., Mao, Z., & Wang, W. (2016). Contrasting response of a plankton community to two filter-feeding fish and their feces: An in situ enclosure experiment. *Aquaculture*, 465, 330–340. doi: 10.1016/j.aquaculture.2016.08.014
- Yadav, M. K., Khati, A., Chauhan, R. S., Arya, P., & Semwal, A. (2021). A review on feed additives used in fish diet. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 6(2), 184–190. doi: 10.22161/ijeab.62.21
- Yang, C., Zhang, J., Zhang, G., Lu, J., Ren, T., Cong, R., ... Li, X. (2022). Potassium deficiency limits water deficit tolerance of rice by reducing leaf water potential and stomatal area. *Agricultural Water Management*, 271, 107744. doi: 10.1016/j.agwat.2022.107744
- Yang, J., Liu, K., Wang, Z., Du, Y., & Zhang, J. (2007). Water-saving and high-yielding irrigation for lowland rice by controlling limiting values of soil water potential. *Journal of Integrative Plant Biology*, 49(10), 1445–1454. doi: 10.1111/j.1672-9072.2007.00555.x
- Yao, Z., Zheng, X., Liu, C., Lin, S., Zuo, Q., & Butterbach-Bahl, K. (2017). Improving rice production sustainability by reducing water demand and greenhouse gas emissions with biodegradable films. *Scientific Reports*, 7(1), 39855. doi: 10.1038/srep39855
- Yoshida, S. (1981) *Fundamentals of rice crop science*. International Rice Research Institute, Los Baños, Laguna, Philippines, p. 269.