



# **Uso de água residual doméstica para o cultivo hidropónico de alfaces**

Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Ounísia Delgado dos Santos

Leiria, setembro de 2021



# **Uso de água residual doméstica para o cultivo hidropónico de alfaces**

Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Ounísia Delgado dos Santos

Dissertação realizada sob a orientação da Professora Doutora Helena Manuela Pala Dias de Sousa, e da Professora Doutora Judite Vieira

Leiria, setembro de 2021

# **Originalidade e Direitos de Autor**

A presente dissertação é original, elaborada unicamente para este fim, tendo sido devidamente citados todos os autores cujos estudos e publicações contribuíram para a elaborar.

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição de que seja mencionada a Autora e feita referência ao ciclo de estudos no âmbito do qual a mesma foi realizado, a saber, Curso de Mestrado em Engenharia da Energia e do ambiente, no ano letivo 2019/2020, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, e, bem assim, à data das provas públicas que visaram a avaliação destes trabalhos.

# Dedicatória

À minha mãe Maria Augusta Delgado, por quem foi e por quem fez de mim.

*“Only miss her when I am breathing.”*

# Agradecimentos

À Professora Doutora Helena Manuela Pala Dias de Sousa, e à Professora Doutora Judite Vieira pela disponibilidade, apoio, ajuda e sugestões relevantes feitas durante a orientação.

À Doutora Daniela Vaz, e à Cristiana Pires do grupo de Química Biológica do Centro de Química da Universidade de Coimbra, pela disponibilidade e colaboração na realização dos ensaios de toxicidade (ensaios de viabilidade celular com células Caco-2).

À técnica de laboratório Maria Carlos Rodrigues por toda a ajuda e esclarecimentos durante a realização das análises laboratoriais.

Ao Engenheiro André Fonseca pelo apoio na recolha das amostras, e recolha de dados de temperatura.

À Ana Costa por toda a ajuda durante a realização das análises laboratoriais.

Este trabalho foi suportado por: Financiamentos Base-UIDB/50020/2020 e Programático-UIDP/50020/2020 do LSRE-LCM, financiado por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC).

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Resumo

A necessidade crescente de produção de alimento e o uso elevado de água, especialmente na agricultura tradicional, tem levado à procura de tecnologias mais eficientes no setor agrícola, e ações que conduzam ao menor consumo, redução do desperdício e reutilização de águas residuais. Os sistemas de cultura sem solo são uma alternativa à agricultura tradicional, que oferecem a possibilidade de redução do uso de água.

O objetivo deste estudo foi avaliar a possibilidade da utilização de água residual proveniente de uma estação de tratamento de águas residuais urbanas, como fonte de nutrientes, no cultivo de alfaces num sistema hidropónico de pequena dimensão, sem recirculação. Estudou-se o crescimento de plantas em dois períodos do ano (inverno e verão), em diferentes condições, nomeadamente em água residual (após tratamento primário ou secundário), em água residual suplementada com potássio, e numa solução nutritiva, usada como controlo positivo.

Os parâmetros físicos e químicos tais como, carência bioquímica de oxigénio (CBO<sub>5</sub>), carência química de oxigénio (CQO), fósforo total, ortofosfatos (PO<sub>4</sub>), azoto amoniacal (NH<sub>4</sub>), nitratos (NO<sub>3</sub>), nitritos (NO<sub>2</sub>), potássio (K) e ferro (Fe), foram monitorizados semanalmente. Parâmetros como temperatura, pH, condutividade elétrica (EC), oxigénio dissolvido (OD), sólidos dissolvidos totais (SDT) e potencial de oxidação-redução (ORP), foram medidos diariamente. Semanalmente procedeu-se à medição de parâmetros de crescimento da cultura tais como, a altura da planta, o comprimento da raiz, o número de folhas, o diâmetro ocupado pela folhagem e o comprimento da maior folha. As condições ambientais no interior do Laboratório de Sistemas Multitróficos Integrados (LSMI), como temperatura, humidade e luminosidade, também foram monitorizadas diariamente.

Considerando as medições diárias de temperatura, pH, EC, OD, SDT e ORP, verificou-se que esses valores nem sempre estiveram nas faixas recomendadas ao crescimento. No entanto, nenhum sintoma visual de doença foi observado nas plantas.

Os resultados apontam para um crescimento limitado da cultura na água residual, devido às baixas concentrações de nutrientes. A suplementação foi mais eficiente no verão, período onde houve melhor desenvolvimento da cultura na água suplementada, embora não de forma significativa, sendo mais evidente nas raízes.

A solução nutritiva utilizada no presente estudo permitiu um bom crescimento das plantas, sendo uma boa referência para avaliar o desenvolvimento da cultura em crescimento na água residual. Poderá não ser a mais indicada para este tipo de sistema, tendo em conta que se pretende cultivar uma pequena quantidade de plantas por caixa. No final dos ensaios, verificou-se que a concentração de nutrientes ainda se encontrava elevada e as percentagens de remoção eram muito baixas.

Apesar das concentrações iniciais dos nutrientes medidos na água residual no inverno se revelarem menores, os nutrientes foram melhor aproveitados pela cultura, levando a percentagens de remoção de nutrientes maiores, em relação ao período de verão. O período de inverno seria o indicado como melhor período para produzir alfaces em hidroponia utilizando água residual, tendo como recomendação adicional uma suplementação mais abrangente, por forma a suprir as limitações de disponibilidade de nutrientes para a cultura.

As plantas cresceram mais rápido no verão, o que pode estar associado ao efeito das altas temperaturas na solubilidade dos nutrientes na água, e também na sua capacidade de acelerar o crescimento da cultura.

O sistema proporcionou uma melhoria na qualidade das águas residuais, permitindo a remoção da carga de nutrientes num valor mínimo de 43% N, 53% K, e 46% P (fósforo total). A água residual que sofreu apenas um tratamento primário apresentava grande carga orgânica, sendo que, nestas condições, o sistema hidropónico permitiu uma remoção de CBO<sub>5</sub> superior a 98% e uma remoção de CQO superior a 68%. A carga de nutrientes na água residual tratada demonstrou ser limitante, com percentagens de remoção de nutrientes muito próximos aos 100 % em ambos os períodos do ano. A carga de sólidos, o pH e a concentração de nitritos na água residual também pareceram afetar o crescimento da cultura.

A análise de toxicidade realizada através de ensaios de viabilidade celular com a linha de células Caco-2 mostrou que, para percentagens de extrato até 1%, não há evidência de toxicidade associada à cultura de alface proveniente do sistema hidropónico. As amostras tiveram em geral boa viabilidade, indicação de que não existem riscos associados ao consumo humano da cultura.

**Palavras-chave:** Hidroponia, Solução Nutritiva, Água Residual, Alfaces

# Abstract

The growing need for food production and the high use of water, especially in traditional agriculture, has led to the search for more efficient technologies in the agricultural sector, reducing consumption and water waste, and inducing wastewater reuse. Soilless cropping systems are an alternative to traditional agriculture, which offers the possibility of reducing water use.

The aim of this study was to evaluate the possibility of using wastewater from an urban treatment plant, as a source of nutrients, for growing lettuces in a small hydroponic system, without recirculation. The crop growth was studied in winter and summer, under three different conditions: wastewater (after primary or secondary treatment); wastewater with potassium supplementation; and in a nutrient solution, as a positive control.

Physical and chemical parameters, such as biochemical oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD), total phosphorus, orthophosphates ( $\text{PO}_4$ ), ammoniacal nitrogen ( $\text{NH}_4$ ), nitrates ( $\text{NO}_3$ ), nitrites ( $\text{NO}_2$ ), potassium (K) and iron (Fe), were monitored weekly. Temperature (T), pH, electric conductivity (EC), dissolved oxygen (DO), total dissolved solids (TDS), and oxidation-reduction potential (ORP), were measured daily. Once a week, the crop growth parameters, namely the plant height, root length, number of leaves, foliage diameter and the length of the bigger leaf were evaluated; at the end of the assay fresh weight was determined. The environmental conditions of the greenhouse (temperature, relative humidity, and light intensity) were also measured daily.

Considering the daily measurements of T, pH, EC, DO, TDS and ORP, it was noticed that these values were not always in the recommended ranges. Nevertheless, no visual symptoms of disease were observed in the plants.

The results point to a limited growth of the crop in wastewater, due to low nutrient concentrations. Supplementation was more efficient in the summer period, resulting in better crop development in the supplemented wastewater, although the differences was not significant, it was more evident in the roots.

The nutrient solution used in this study allowed a good growth of the plants, being a good reference for evaluating the development of the growing culture in wastewater. It may not

be the most suitable for this type of system, considering that it is intended to cultivate a small number of plants per box, and at the end of the tests its nutrient concentration was still high and with very low removal percentages.

Although the initial concentrations of nutrients measured in the wastewater in the winter proved to be lower than summer values, the nutrients were better utilized by the crop, leading to higher percentages of removal of nutrients in relation to the summer period. The winter period would be indicated as the best period to produce lettuce in hydroponics using wastewater, with the additional recommendation of a more comprehensive supplementation, in order to overcome the limitations caused by the low availability of nutrients for the crop.

Plants grew faster in summer, probably because of the high temperatures and its effects on the solubility of nutrients in water, and its ability to accelerate crop growth.

The system provided an improvement in the quality of wastewater, allowing the removal of the nutrient load (minimum value) of 43% N, 53% K, and 46% P (total phosphorus). Wastewater with a primary treatment had a large organic load, the system allowed the removal of over 98% of BOD<sub>5</sub> and the removal of over 68% of COD. The nutrient load in treated wastewater proved to be limiting, with nutrient removal percentages very close to 100% in both periods of the year. Solids loading, pH value and nitrite concentration in wastewater also appear to affect crop growth.

The toxicity analysis carried out through cell viability assays with the Caco-2 cell line, revealed that for extract percentages up to 1% there is no evidence of toxicity associated with the lettuce culture from the hydroponic system. The samples had generally good viability, indicating that there are no risks associated with human consumption of the crop.

**Keywords:** Hydroponics, Wastewater, Nutrient Solution, Lettuce

# Índice

Originalidade e Direitos de Autor .....	iii
Dedicatória .....	iv
Agradecimentos .....	v
Resumo .....	vii
Abstract .....	ix
Lista de figuras .....	xiv
Lista de tabelas .....	xvi
Lista de siglas e acrónimos.....	xvii
1. Introdução .....	1
1.1. Enquadramento .....	1
1.2. O uso de água residual em hidroponia .....	3
1.3. Objetivos.....	7
1.4. Estrutura .....	8
2. Hidroponia .....	9
2.1. Contextualização histórica.....	11
2.2. Tecnologias e Equipamentos .....	13
2.3. Substratos.....	17
2.4. Soluções nutritivas.....	18
2.5. Condições ambientais.....	23
3. Tratamento de águas residuais.....	25
4. Materiais e métodos.....	33
4.1. Sistema hidropónico .....	33

<b>4.2. Cultura .....</b>	<b>34</b>
<b>4.3. Condições de crescimento.....</b>	<b>35</b>
<b>4.4. Parâmetros de monitorização da qualidade da água usada no sistema hidropónico .....</b>	<b>41</b>
<b>4.5. Monitorização dos parâmetros da cultura.....</b>	<b>44</b>
<b>4.5. Condições ambientais na estufa .....</b>	<b>46</b>
<b>4.6. Análise de toxicidade.....</b>	<b>47</b>
<b>5. Resultados e Discussão.....</b>	<b>49</b>
<b>5.1. Crescimento em solução nutritiva .....</b>	<b>49</b>
5.1.1. Solução nutritiva e consumo de nutrientes.....	50
5.1.2. Crescimento da cultura.....	55
5.1.3. Condições ambientais.....	57
<b>5.2. Crescimento em água residual proveniente do decantador primário .....</b>	<b>60</b>
5.2.1. Qualidade da água e consumo de nutrientes .....	61
5.2.2. Crescimento da cultura.....	64
5.2.3. Condições ambientais.....	66
<b>5.3. Crescimento em AR proveniente do decantador primário e em AR recolhida à saída da estação de tratamento no período de verão .....</b>	<b>67</b>
5.3.1. Qualidade da água e consumo de nutrientes .....	68
5.3.2. Crescimento da cultura.....	75
5.3.3. Condições ambientais.....	79
<b>5.4. Crescimento em AR proveniente do decantador primário e em AR recolhida à saída da estação de tratamento no período de inverno.....</b>	<b>81</b>
5.4.1. Qualidade da água e consumo de nutrientes .....	82
5.4.2. Crescimento da cultura.....	89
5.4.3. Condições ambientais.....	92
<b>5.5. Comparação dos ensaios de crescimento realizados no período de inverno e no verão</b>	<b>94</b>

<b>5.6. Análise de toxicidade .....</b>	<b>98</b>
<b>6. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros.....</b>	<b>102</b>
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>104</b>

# Lista de figuras

Figura 1: Exemplos de alguns sistemas hidropónicos (adaptado de Nosoilsolution, n.d.).....	16
Figura 2: Etapas gerais do tratamento de uma AR doméstica (adaptado de Metcalf & Eddy, 2016) .....	30
Figura 3: Sistema hidropónico utilizado .....	33
Figura 4: Esquema geral de tratamento da AR da ETAR de Olhalvas (adaptado de Félix, 2017).....	37
Figura 5: Esquematização dos parâmetros medidos nas plantas; Legenda: 1- Diâmetro ocupado pela folhagem; 2- Comprimento da maior folha; 3- Altura da Planta; 4- Comprimento da raiz;.....	44
Figura 6: Localização dos pontos de medição da luminosidade .....	46
Figura 7: Variação dos valores de T, pH, EC, SDT, OD e ORP durante o crescimento da cultura em SN .....	50
Figura 8: Variação das concentrações de azoto e fósforo durante o crescimento da cultura em SN.....	53
Figura 9: Crescimento médio da cultura no período de ensaio em SN .....	55
Figura 10: Aspeto visual e crescimento da cultura em SN.....	56
Figura 11: Temperatura e humidade no interior da estufa durante o crescimento em SN.....	57
Figura 12: Posição das caixas durante o ensaio de crescimento da cultura em SN; AR, SDP e AR, SDP[K] .60	
Figura 13: Variação dos valores de T, pH, EC, SDT, OD e ORP durante o crescimento da cultura em SN; AR, SDP e AR, SDP[K] .....	61
Figura 14: Crescimento médio total da cultura durante o crescimento em SN; AR, SDP e AR, SDP[K] .....	64
Figura 15: Aspeto visual e crescimento da cultura em SN; AR, SDP e AR, SDP[K].....	65
Figura 16: Dados de temperatura e humidade no interior da estufa durante o crescimento da cultura em SN; AR, SDP e AR, SDP[K].....	66
Figura 17: Variação dos valores de T, pH, EC, SDT, OD e ORP durante o crescimento da cultura em SN; AR,SDP; AR SE; AR,SDP[K] e AR SE[K] no período de verão .....	68
Figura 18: Variação da CBO <sub>5</sub> e da CQO durante o crescimento da cultura em SN; AR,SDP; AR SE; AR,SDP[K] e AR SE[K] no período de verão .....	71
Figura 19: Variação da concentração de azoto durante o crescimento da cultura em SN; AR,SDP; AR SE; AR,SDP[K] e AR SE[K] no período de verão .....	72
Figura 20: Variação da concentração de fósforo durante o crescimento da cultura em SN; AR,SDP; AR SE; AR,SDP[K] e AR SE[K] no período de verão .....	73
Figura 21: Variação da concentração de potássio durante o crescimento da cultura em SN; AR,SDP; AR,SE; AR,SDP[K] e AR,SE[K] no período de verão .....	74
Figura 22: Crescimento semanal da cultura em SN; AR,SDP; AR,SE; AR,SDP[K] e AR,SE[K] no período de verão.....	75

Figura 23: Crescimento médio total da cultura em SN; AR,SDP; AR,SE; AR,SDP[K] e AR,SE[K] no período de verão .....	76
Figura 24: Aspeto visual e crescimento da cultura em SN; AR, SDP; AR SE; AR, SDP[K] e AR SE[K] no período de verão .....	78
Figura 25: Dados de temperatura e humidade no interior da estufa durante o crescimento da cultura em SN; AR,SDP; AR SE; AR,SDP[K] e AR SE[K] no período de verão .....	79
Figura 26: Variação dos valores de T, pH, EC, SDT, OD e ORP durante o crescimento da cultura em SN; AR, SDP; AR, SE; AR, SDP[K] e AR, SE[K] no período de inverno.....	82
Figura 27: Variação da CBO <sub>5</sub> e da CQO durante o crescimento da cultura em SN; AR,SDP; AR SE; AR,SDP[K] e AR SE[K] no período de inverno .....	85
Figura 28: Variação da concentração de azoto durante o crescimento da cultura em SN; AR,SDP; AR SE; AR,SDP[K] e AR SE[K] no período de inverno .....	86
Figura 29: Variação da concentração de fósforo durante o crescimento da cultura em SN; AR,SDP; AR SE; AR,SDP[K] e AR SE[K] no período de inverno .....	87
Figura 30: Variação da concentração de potássio durante o crescimento da cultura em SN; AR,SDP; AR SE; AR,SDP[K] e AR SE[K] no período de inverno .....	88
Figura 31: Crescimento da cultura em SN; AR,SDP; AR SE; AR,SDP[K] e AR SE[K] no período de inverno .....	89
Figura 32: Crescimento médio total da cultura em SN; AR,SDP; AR SE; AR,SDP[K] e AR SE[K] no período de inverno.....	90
Figura 33: Aspeto visual e crescimento cultura em SN; AR,SDP; AR SE; AR,SDP[K] e AR SE[K] no período de inverno.....	91
Figura 34: Dados de temperatura e humidade no interior da estufa durante o crescimento da cultura em SN; AR,SDP; AR SE; AR,SDP[K] e AR SE[K] no período de inverno .....	92
Figura 35: Resultados dos ensaios de viabilidade celular das células Caco-2, após exposição ao extrato das folhas de alface cultivadas na SN .....	98
Figura 36: Resultados dos ensaios de viabilidade celular das células Caco-2 após exposição ao extrato das folhas de alface cultivadas em AR, SDP .....	99
Figura 37: Resultados dos ensaios de viabilidade celular das células Caco-2 após exposição ao extrato das folhas de alface cultivadas em AR, SDP[K].....	99
Figura 38:Resultados dos ensaios de viabilidade celular das células Caco-2 após exposição ao extrato das folhas de alface cultivadas em AR, SE.....	100
Figura 39: Resultados dos ensaios de viabilidade celular das células Caco-2 após exposição ao extrato das folhas de alface cultivadas em AR, SE [K] .....	100

# Lista de tabelas

Tabela 1: Solução nutritiva proposta por Hoagland & Arnon em 1938 (adaptado de Furlani et al., 1999) .....	19
Tabela 2: Concentrações de nutrientes para o cultivo de alguns vegetais (adaptado de Furlani et al., 1999) ..	20
Tabela 3: Níveis de tratamento e exemplos de processos e operações (adaptado de Metcalf & Eddy, 2016) ..	26
Tabela 4: Valores nutricionais da alface (adaptado de Rodrigues, 2015) .....	35
Tabela 5: Solução nutritiva proposta por Martinez & Silva Filho ( adaptado de Carvalho et al., 2018).....	36
Tabela 6: Dados da caracterização da AR da ETAR de Olhavas no ano de 2019.....	38
Tabela 7: Ensaios de crescimento realizados .....	40
Tabela 8: Métodos analíticos utilizados para quantificação dos parâmetros de qualidade da água .....	42
Tabela 9: Escala para os parâmetros qualitativos de sanidade e viçosidade .....	45
Tabela 10: Comparação entre os valores medidos e os recomendados para os parâmetros T, pH, EC, SDT e OD durante o crescimento da alface em SN .....	51
Tabela 11: Dados de luminosidade durante o crescimento da cultura em SN.....	59
Tabela 12: Comparação entre os valores medidos e os recomendados para os parâmetros T, pH, EC, SDT e OD durante o crescimento em SN; AR, SDP e AR, SDP[K].....	62
Tabela 13: Comparação entre os valores medidos e os recomendados para os parâmetros T, pH, EC, SDT e OD durante o crescimento da cultura em SN; AR,SDP; AR SE; AR,SDP[K] e AR SE[K] no período de verão ..	69
Tabela 14: Concentrações iniciais de CBO <sub>5</sub> , CQO, P-total, PO <sub>4</sub> , NH <sub>4</sub> , NO <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , K e Fe na SN e na AR no período de verão.....	70
Tabela 15: Dados de luminosidade durante o crescimento da cultura em SN; AR,SDP; AR,SE; AR,SDP[K] e AR,SE[K] no período de verão .....	80
Tabela 16: Comparação entre os valores medidos e os recomendados para os parâmetros T, pH, EC, SDT e OD, durante o crescimento da cultura em SN; AR,SDP; AR, SE; AR,SDP[K] e AR, SE[K] no período de inverno .....	83
Tabela 17: Concentrações iniciais de CBO <sub>5</sub> , CQO, NH <sub>4</sub> , NO <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , P-total, PO <sub>4</sub> , K e Fe na AR e, na SN no período de inverno .....	84
Tabela 18: Dados de luminosidade durante o crescimento da cultura em SN; AR,SDP; AR SE; AR,SDP[K] e AR SE[K] no período de inverno.....	93
Tabela 19: Comparação dos valores medidos nos parâmetros de T, pH, EC, SDT, OD e ORP no inverno e no verão.....	94
Tabela 20: Comparação das percentagens de remoção de CBO <sub>5</sub> e CQO, N, P-total, PO <sub>4</sub> e K no inverno e no verão.....	95
Tabela 21: Comparação do crescimento da cultura para parâmetros medidos no inverno e no verão .....	97

## Lista de siglas e acrónimos

AR	Água Residual
AR, SDP	Água Residual recolhida à Saída do Decantador Primário
AR, SDP[K]	Água Residual recolhida à Saída do Decantador Primário suplementada com Potássio
AR, SE	Água Residual recolhida à Saída da Estação
AR, SE[K]	Água Residual recolhida à Saída da Estação suplementada com Potássio
CBO <sub>5</sub>	Carência Bioquímica de Oxigénio ao fim de cinco dias
CQO	Carência Química de Oxigénio
EC	Condutividade Elétrica
ESTG	Escola Superior de Tecnologia e Gestão
ETAR	Estação de Tratamento de Água Residual
LSMI	Laboratório de Sistemas Multitróficos Integrados
OD	Oxigénio Dissolvido
OMS	Organização Mundial da Saúde
ORP	Potencial de Oxidação Redução
PNUEA	Programa Nacional para o Uso Eficiente da Água
SDT	Sólidos Dissolvidos Totais
SMEWW	<i>Standard methods for the examination of water &amp; wastewater</i>
SN	Solução Nutritiva
SST	Sólidos Suspensos Totais



# 1. Introdução

“A água é um recurso hídrico que deve ser utilizado para benefício do Homem sem comprometer as necessidades dos ecossistemas e a continuidade hídrica dos cursos de água.” (PNUEA, 2012)

## 1.1. Enquadramento

A nível mundial, a maior utilização da água verifica-se na agricultura, com um consumo global de 70%; em segundo lugar, surge a indústria, com um consumo de 22%; e o menor consumo está associado ao setor doméstico e comercial, com 8%. Os países subdesenvolvidos contribuem com a maior parcela dos consumos no setor agrícola, que representa 82%; a indústria detém 10%, e as residências, 8%. Nos países desenvolvidos, a indústria é o setor mais consumidor, com 59%; seguido da agricultura, com 30%; e do uso doméstico, com 11%. O consumo da água, face à sua escassez, tem vindo a ser objeto de abordagens específicas que visam uma maior eficiência de utilização (Pena, 2020).

Um terço de água consumida na Europa, está relacionada com os gastos no setor agrícola (Agencia Europea do Ambiente, 2012). No caso específico português, apesar da insuficiente documentação das captações de água, particularmente captações em massas de água subterrânea, estima-se que cerca de 74,7% da água captada seja consumida no setor agropecuário. O setor urbano é o segundo maior consumidor, detendo 19,6% desse valor, e a indústria consome um total de 5% (Agencia Portuguesa do Ambiente, 2015).

Tendo como principal objetivo a promoção do uso eficiente da água em Portugal, especialmente nos setores urbano, agrícola e industrial, surge o Programa Nacional para o Uso Eficiente da Água (PNUEA). O objetivo do plano é promover a melhoria da eficiência de utilização da água, associada à consolidação de uma nova cultura de água em Portugal, através da qual este recurso possa ser crescentemente valorizado, não só pela sua importância para o desenvolvimento humano e económico, mas também para a preservação do meio natural numa ótica de desenvolvimento sustentável e respeito pelas gerações futuras (PNUEA, 2012).

Adicionalmente, como benefícios indiretos, pretende-se alcançar através do PNUEA, a redução dos volumes de águas residuais rejeitados para os meios hídricos e a redução dos consumos de energia, aspetos fortemente dependentes dos usos da água (PNUEA, 2012).

Dentro da perspetiva do uso eficiente da água, procuram-se alternativas para a redução do consumo de água doce, nomeadamente dentro do setor agropecuário. O uso de águas residuais tratadas poderá dar resposta às necessidades de água na agricultura se a qualidade da água recuperada for adequada, e garantir dessa forma maior disponibilidade de água doce (não consumida no setor) para outras necessidades, nomeadamente para manter os caudal ecológico e ser captada para distribuição para consumo humano (Agencia Europeia do Ambiente, 2012).

Devido à rápida urbanização e industrialização, tem ocorrido não só um decréscimo na quantidade de solos cultiváveis, mas também nas práticas de agricultura convencional, tornando-se na causa de uma larga escala de impactos negativos no meio ambiente. Para promover uma alimentação sustentável face ao crescimento da população mundial, os métodos que garantem o cultivo da quantidade suficiente de alimentos precisam evoluir e passar por modificações, que permitam conservar solos sobreexplorados, bem como os recursos de água disponíveis (Sharma et al., 2018).

O uso excessivo de água na agricultura, a saturação dos solos que obriga à rotação obrigatória de culturas, e outros fatores, como a presença reduzida de certos minerais no solo, bem como a presença de ervas daninhas que prejudicam a densidade de cultivo das plantas, associadas à elevada necessidade de trabalho realizado nos solos, despertaram a procura de tecnologias mais eficientes no setor agrícola (Tomasi et al., 2014).

Sistemas de cultura sem solo são uma alternativa à agricultura tradicional, oferecendo a possibilidade de redução do uso de água (relativamente aos sistemas de irrigação tradicionais), e a possibilidade de adaptação de soluções de nutrientes que dão resposta às necessidades específicas de uma dada cultura, maximizando a sua produção. Estas práticas agrícolas que se têm vindo a difundir pela Europa, e em alguns países ocidentais, são mais procuradas por produtores das regiões áridas e semiáridas, devido à escassez de água nessas regiões, o que leva, a um elevado valor no preço da água (Tomasi et al., 2014).

A agricultura sem o uso de solo inclui a hidroponia, a aquaponia, que combina a hidroponia com a aquacultura num sistema de recirculação, a aeroponia ou hidroponia suspensa, e o

cultivo em substratos. Entre as variadas soluções disponíveis, os sistemas hidropônicos têm aumentado a sua popularidade, devido à sua eficiência na gestão de recursos e produção de alimentos. Variadas culturas comerciais e especializadas podem ser obtidas em sistemas hidropônicos, incluindo tomates, pepinos, morangos, vegetais folhosos, entre outros (Sharma et al., 2018).

## **1.2. O uso de água residual em hidroponia**

A água residual doméstica é potencialmente rica em nutrientes e é tradicionalmente utilizada como fonte de nutrientes quer em agricultura como em aquacultura, em países desenvolvidos e em desenvolvimento (Rana et al., 2011).

A busca por sistemas que possibilitam o uso eficiente de água na agricultura tem aumentado e com eles a tentativa de reutilização de água. Sistemas hidropônicos que utilizam água residual são sistemas de duplo benefício, onde a água residual serve de fonte de nutrientes às plantas, e simultaneamente, é recuperada pela remoção do excesso de nutrientes através dos bioprocessos de produção agrícola (Rana et al., 2011).

O uso de água residual em hidroponia nos países desenvolvidos e em desenvolvimento é abordado por vários autores (Adrover et al., 2013; Carvalho et al., 2018; Rana et al., 2011), que apontam o seu uso como fertilizante no cultivo de diferentes produtos para consumo humano ou estética, tais como alface, tomate, cevada, flores ornamentais, entre outros.

Apesar de conter os macro e micronutrientes, o conteúdo encontrado nos efluentes pode ser limitante para o crescimento das plantas, quer pelo excesso quer pela deficiência de alguns nutrientes, o que faz com a caracterização do efluente seja essencial em hidroponia (Santos Júnior et al., 2014).

A composição química da água residual tratada depende da origem e do tratamento recebido. Efluentes provenientes de municípios que receberam pelo menos um tratamento secundário, geralmente têm menor concentração de metais pesados e não causam efeitos adversos no crescimento das plantas ou na saúde pública (Adrover et al., 2013).

A maior preocupação acerca da utilização de água residual em hidroponia é o seu impacto na saúde humana e o risco ambiental devido a presença de microrganismos patogênicos. Uma forma de reduzir esse risco passa pela utilização da água residual para o cultivo hidropônico de plantas apenas após o seu tratamento secundário (Magwaza et al., 2020).

A definição de normas e regras a aplicar à prática de reutilização de água residual, bem como o desenvolvimento de metodologias para a respetiva avaliação do risco, são abordagens que permitem o controle de potenciais efeitos adversos sobre a saúde e sobre o ambiente. Alguns dos riscos associados ao contacto direto, nomeadamente por ingestão e o risco de lixiviação, percolação ou arrastamento de contaminantes ou poluentes para as massas de água, poderão ser minimizados pela imposição de barreiras de segurança ao nível do tratamento das águas e de barreiras físicas para minimização do contacto com os recetores (Decreto-Lei n.º 119/2019, de 21 de agosto, 2019).

Em Portugal, segundo o Decreto-Lei n.º 119/2019, de 21 de agosto, é necessário um nível de tratamento mais avançado que o secundário, nomeadamente um processo de desinfecção, para que uma água residual possa ser usada para rega. O uso de uma água residual que sofreu um tratamento terciário para irrigação, demonstrou não ter nenhuma grande limitação no crescimento das plantas em viveiros uma vez que, a sua carga de nutrientes mostrou-se suficiente para manter o crescimento das plantas (Magwaza et al., 2020).

Estudos como o de Lopez-Galvez et al. (2014) demonstram que o risco de contaminação por microrganismos patogénicos, pode ser minimizado através de práticas agrícolas que evitem o contato direto da água com o produto. Por exemplo, deve ser evitado o cultivo de alfaces em sistemas de gotejamento, ou o contato da água com os frutos, como por exemplo, o tomate.

Num sistema hidropónico onde se utiliza água residual, os processos físicos, químicos e biológicos podem ocorrer ao mesmo tempo, contribuindo simultaneamente para a remoção de nutrientes. Assim sendo, as plantas desempenham uma função importante nestes sistemas e afetam diretamente a qualidade do sistema pela remoção de nutrientes. Embora não exista uma metodologia para a seleção das culturas, o curto ciclo de crescimento tem influenciado a seleção, pois permite um melhor controle e normalização do processo de cultivo (Magwaza et al., 2020).

Para que o uso de águas residuais em hidroponia seja economicamente viável do ponto de vista da produção de culturas, deverá dar resposta à procura do mercado local, e ter qualidade, para que possa satisfazer os interesses do consumidor (Magwaza et al., 2020). A suplementação da água residual, atendendo às suas carências nutricionais, faz com que haja um aumento na captura de nutrientes pela planta, assegurando assim o valor nutricional da

cultura e aumentando a sua massa. É uma forma de garantir que o produto satisfaz os padrões do mercado (Carvalho et al., 2018).

O aumento do consumo dos recursos hídricos, devido a rápida urbanização e aumento populacional, resulta na produção de grandes quantidades de água residual, o que acaba por colocar uma grande pressão nos sistemas de tratamentos de águas residuais. A lacuna entre a quantidade de água residual gerada e a capacidade de tratamento pelo setor cresce cada vez mais, e poderá levar a que dois-terços da população mundial sofra de problemas associados à quantidade e qualidade de água até 2050. Essa escassez de recursos tem levado a que, numa escala mundial, se procure cada vez mais soluções que visem transformar as estações de tratamentos de águas em estações de recuperação de recursos (Yadav et al., 2020).

Combinar sistemas de tratamentos de água residual doméstica com sistemas de produção agrícola, requer uma mudança de paradigma de otimização de taxas de degradação, nitrificação, desnitrificação e taxas de absorção, para maximizar as taxas de reciclagem de nutrientes. Estas intervenções incluem sistemas descentralizados e estratégias de remoção que não só produzam efluentes que cumpram os pré-requisitos ambientais, mas também figurem como sistemas de saneamento de baixo custo, tornando-os mais acessíveis. Por forma a melhorar o tratamento de efluentes orgânicos, várias tecnologias têm sido desenvolvidas nos últimos anos com foco na remoção orgânica, reutilização de água, remoção de nutrientes, recuperação e reutilização (Sheets et al., 2015).

Estudos como os de Rana et al. (2011), e Yadav et al. (2020) enquadram-se na busca de tecnologias mais baratas, ecológicas, de fácil manutenção e que sejam energética e quimicamente menos intensivas para recuperação da água residual doméstica, promovendo através dessas tecnologias a descentralização dos sistemas de tratamento de água residual atualmente existentes.

O estudo conduzido por Yang et al. (2015) avalia a eficiência de um sistema hidropônico para o tratamento de água residual rica em nutrientes. O sistema hidropônico em questão foi aplicado como tratamento final de urina humana separada na fonte, após hidrólise de ureia, precipitação induzida e remoção de amónia em condições climáticas correspondentes ao clima tropical (Singapura). Este sistema reduziu a carga de matéria orgânica (carência química de oxigénio), azoto total e sólidos suspensos totais, e tornou o efluente adequado à descarga local.

O estudo de López-Chuken (2012) apresenta algumas técnicas de biorecuperação de água e solos. O foco do estudo é a Rizofiltração, técnica definida pelo uso de plantas para a absorção, concentração e precipitação de contaminantes da água pelas raízes. Enquadra-se na busca por novas estratégias de limpeza de contaminantes, como os metais e outros contaminantes inorgânicos, com tecnologias de baixo custo, baixo impacto, visualmente benignas e ambientalmente corretas.

Uma forma de promover o uso de sistemas hidropónicos no tratamento de águas residuais é através de estudos que apontam os seus benefícios económicos. Shalaby et al., (2008) faz uma análise custo-benefício entre o tratamento de água residual num sistema hidropónico e num sistema convencional, para parâmetros como a quantidade de recursos utilizados, horas de trabalho, bens produzidos e consumidos. Conclui que a opção de uso de um sistema hidropónico para o tratamento de águas residuais é potencializada pelo local de implantação, clima e nível de preocupação com os impactos ambientais causados pela gestão de águas residuais, uma vez que requer maior investimento inicial, horas de trabalho e custos com energia. Por exemplo, em regiões de climas quentes os custos com arrefecimento das estufas aumentam os custos destes sistemas.

Um dos pré-requisitos de sustentabilidade num sistema biológico de tratamento de águas residuais domésticas que recorre ao crescimento de plantas, passa pela sua capacidade em reduzir gases de efeito estufa (GEE). Por figurarem nessa categoria, os sistemas hidropónicos podem ser usados para tratar águas residuais, desde que no seu projeto se tenha em conta características que promovam a redução de GEE, tais como o monóxido de azoto (Magwaza et al., 2020).

Nas comunidades carenciadas, o uso de água residual em hidroponia é uma forma não só de promover o tratamento de águas, mas também de assegurar a produção de alimentos e gerar renda às famílias (Magwaza et al., 2020).

O uso de água residual na agricultura é cada vez mais considerado um método capaz de combinar a reciclagem de água com a reciclagem de nutrientes, aumentar a segurança alimentar doméstica e melhorar a nutrição de lares carenciados. O interesse no uso de água residual na agricultura tem sido promovido pela escassez de água, pela baixa disponibilidade de nutrientes e pela contestação acerca da saúde e impactos ambientais. Com o objetivo de maximizar os benefícios do uso de água residual na agricultura e aquacultura para a saúde pública, a Organização Mundial da Saúde (OMS) tem guias onde reúne os possíveis

impactos que poderá ter na saúde humana, bem como as estratégias necessárias para minimização da transmissão de agentes infecciosos e da exposição a elementos químicos tóxicos. Outro objetivo é a gestão de água residual para maximizar a produção e minimizar impactos ambientais (OMS, 2006).

### **1.3.Objetivos**

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a possibilidade de utilizar uma água residual doméstica, proveniente da Estação de Tratamento de Águas Residuais (ETAR) de Olhalvas, como fonte de nutrientes no cultivo de alfaces num sistema hidropónico simples, sem recirculação.

Para dar suporte ao objetivo principal pretende-se:

- Avaliar a eficiência de remoção de nutrientes na água residual doméstica pelos bioprocessos que ocorrem na espécie cultivada, e consequentemente, as possíveis melhorias na qualidade da água.
- Conhecer as características físicas e químicas da água residual e estudar o crescimento da cultura, bem como as condições ambientais a que a cultura está sujeita.
- Estudar o crescimento da cultura em dois períodos do ano, em diferentes condições, nomeadamente em água residual, em água residual suplementada, e numa solução nutritiva como controlo positivo.
- Conhecer limitações do sistema, e avaliar a viabilidade da cultura para consumo humano através de análise de toxicidade.

## **1.4.Estrutura**

O presente trabalho apresenta-se estruturado em 6 capítulos onde:

O capítulo 1 (Introdução) justifica a pertinência do tema, através da abordagem da problemática da má gestão dos recursos hídricos associado às práticas agrícolas e apresenta o uso de água residual na hidroponia como oportunidade de melhoria. Aborda o uso de água residual em hidroponia e apresenta os objetivos do trabalho.

Segue-se o capítulo 2 (Hidroponia), que introduz a hidroponia como prática agrícola, sua história, vantagens e desvantagens e tecnologias associadas.

O capítulo 3 (Tratamento de águas residuais) resume a temática dos tratamentos de águas residuais, apresentando a legislação que rege os sistemas de tratamento de águas residuais em Portugal.

O capítulo 4 (Materiais e métodos) apresenta o processo metodológico aplicado ao desenvolvimento do estudo, separando em subsecções o sistema utilizado, a cultura e as várias condições dos ensaios realizados.

No capítulo 5 (Resultados e Discussão) apresentam-se e interpretam-se os resultados obtidos em cada ensaio, tendo em conta os parâmetros monitorizados.

O capítulo 6 (Conclusões e sugestões para trabalhos futuros) reúne as principais conclusões do estudo e inclui algumas recomendações a ter em conta em trabalhos futuros.

Por fim, são apresentadas todas as referências bibliográficas aludidas ao longo do trabalho.

## 2. Hidroponia

A hidroponia é uma técnica de cultivo de plantas com as raízes imersas em soluções de nutrientes, com ou sem o uso de um meio inerte, como cascalho, vermiculite, fibra de coco, lã de rocha, etc., para suporte mecânico. Implica suplementação de todos os nutrientes inorgânicos exclusivamente via irrigação e em concentrações adequadas para cada cultura. Os meios hidropônicos são projetados para serem muito porosos e excelentes para retenção de ar e água (Buckseth et al., 2016; Savvas, 2003; Sharma et al., 2018).

Uma vez que regular o ambiente aéreo e radicular é uma das maiores preocupações em tais sistemas agrícolas, a produção dá-se em ambientes fechados, projetados para permitir o controle da temperatura do ar e das raízes, iluminação, água, nutrição das plantas, e condições climáticas adversas. A hidroponia, como prática agrícola em ambiente controlado (estufas), é um sistema altamente produtivo, que permite grande conservação de água e solos, além de trazer benefícios para o ambiente (Jensen, 1999).

A prática tem ganho popularidade devido aos seus métodos relativamente simples, por não haver possibilidade de contrair doenças associadas ao solo, insetos ou pragas, reduzindo ou eliminando o uso de pesticidas e a toxicidade que lhes está associada. Além disso, as plantas têm um tempo de crescimento reduzido, uma vez que as raízes não enfrentam os obstáculos provenientes do crescimento no solo e têm os nutrientes facilmente disponíveis na solução (Sharma et al., 2018).

O cultivo em estufas e a larga produtividade são possíveis em hidroponia, mesmo em solos salinos ou sódicos, não aráveis, ou com estrutura deficiente, solos estes que representam a maior proporção de terrenos cultiváveis pelo mundo (Savvas, 2003). A técnica é também útil em ambientes pouco favoráveis, como desertos, regiões frias e regiões áridas, e pode ser exercida em qualquer altura do ano (Sharma et al., 2018).

A redução do trabalho de preparação de solos, irrigação e pulverização, em parte devido aos sistemas comerciais serem operados automaticamente, permite um aumento da duração do tempo de cultivo, o que garante o aumento da produção total das estufas (Savvas, 2003).

A maior vantagem do cultivo hidropônico é o controle preciso dos nutrientes fornecidos às plantas, sendo possível quer se faça o cultivo em solução nutritiva ou em substrato inerte (Savvas, 2003).

O crescimento da tecnologia tem tido apoio nas políticas ambientais, sendo que muitos países cada vez mais exigem a implementação de hidroponia em estufas, especialmente em áreas ambientalmente protegidas ou com recursos limitados. Esse apoio legislativo tem como base o facto dos efluentes em sistemas hidropónicos fechados possibilitarem uma redução considerável da aplicação de fertilizantes, e uma redução drástica, ou até mesmo a completa eliminação, de nutrientes lixiviados de estufas para o meio ambiente (Savvas, 2003).

Algumas limitações significativas dos sistemas de cultivo sem solo passam pelo nível de conhecimento técnico, bem como os altos investimentos iniciais, especialmente nos de escala comercial. Climas quentes e pouca oxigenação podem limitar a produção e resultar na perda de culturas. Estes sistemas requerem gastos com iluminação e eletricidade para operarem em estruturas protegidas (Sharma et al., 2018).

Nos países onde o cultivo em estufas atingiu dimensões industriais, o tamanho médio das estufas por empresa é relativamente alto. Nestes casos, o investimento em equipamentos hidropónicos é justificável, por permitir maximizar a produção e a qualidade do produto, controlando completamente as condições de crescimento, e excluindo o solo como fator limitante. A necessidade de conhecimento técnico específico não constitui um problema para grandes produtores, que podem custear a especialização do pessoal ou procurar serviços de consultoria externa, e assim assegurar o alcance dos objetivos de produtividade e qualidade (Savvas, 2003).

Por outro lado, quando a produção em estufas decorre em construções mais simples, maioritariamente baseadas em condições naturais favoráveis, como um inverno ameno e elevada radiação solar, os custos de operação e instalação dos equipamentos necessários para a introdução da hidroponia podem não ser justificáveis. O processo será aceite apenas quando os problemas originados pelo solo se tornam críticos, os recursos hídricos são limitados, ou a poluição pelos nutrientes lixiviados é preocupante (Savvas, 2003).

A reutilização de nutrientes em sistemas fechados implica o risco de contaminação por doenças espalhadas através do efluente reciclado, e é necessário a instalação de um sistema de desinfecção da solução nutritiva para prevenir que isso aconteça (Savvas, 2003).

## 2.1.Contextualização histórica

A palavra hidroponia foi cunhada pelo fisiologista vegetal da Universidade da Califórnia, William Frederick Gericke, que na década de 1930 publicou vários trabalhos sobre o tema, prevendo uma revolução na agricultura tal como era conhecida (Hershey, 1994). O termo Hidroponia vem do grego: “*hydro*”, que significa água, e “*ponos*”, que significa trabalho; a tradução literal é “trabalho de água”. Gericke utilizou o termo para descrever o crescimento de plantas com as raízes suspensas em água contendo nutrientes minerais (Sharma et al., 2018).

O desenvolvimento da hidroponia não aconteceu de forma rápida. Apesar da prática de agricultura em ambiente controlado ter tido início no império romano, durante o primeiro século, para cultivo de pepinos fora de época, acredita-se que a tecnologia não teve muito uso nos 1500 anos seguintes. Estufas e hidroponia experimental surgiram durante o século XVII, com o cultivo de plantas de hortelã, em Inglaterra, no ano de 1699 (Jensen, 1997).

Nos Estados Unidos da América, apenas no ano de 1925 se começou a desenvolver o interesse na possível utilização completa de soluções de nutrientes, por forma a combater a necessidade de troca frequente dos solos das estufas, e a sua conservação, que exigia larga quantidade de fertilizantes. Como resultado, alguns autores optaram pelo método de cultivo em soluções nutritivas, como meio de substituição do solo, passando a utilizar uma solução de nutrientes com arejamento, ou um solo artificial composto por agregados químicos inorgânicos misturados com soluções nutritivas (Jensen, 1999).

O crédito pelo desenvolvimento do cultivo em água é geralmente atribuído a Knop e Sachs, pelo trabalho científico que permitiu a preparação de soluções padronizadas de nutrientes, na Alemanha, em 1860, a partir da adição de vários sais inorgânicos à água e utilização da solução para cultivo de plantas fora do solo, numa tentativa de identificar os nutrientes essenciais à planta (Savvas, 2003).

Num dos seus trabalhos, no ano de 1929, Gericke reportou o cultivo em solução para produção em maior escala, e não só para fins de investigação (Hershey, 1994). Além dos trabalhos de Gericke, outros autores tentaram desenvolver técnicas inovadoras e métodos de crescimento de plantas sem o uso do solo, à escala comercial. Estes estudos contribuíram consideravelmente para o desenvolvimento comercial da hidroponia. No entanto, o padrão das tecnologias da época era insuficiente para possibilitar o sucesso económico,

nomeadamente, devido ao pouco conhecimento das necessidades de nutrientes e água pelas plantas, do arejamento das raízes em água parada, à ineficiência e aos altos preços dos sistemas de irrigação, e também às limitações relacionadas com a automação do fornecimento e reciclagem da solução nutritiva na cultura agregada (Savvas, 2003).

Mesmo sem obter resultados satisfatórios à escala comercial, a hidroponia atraiu muito o interesse da população, que procurou obter mais informação através da comunidade científica. A universidade da Califórnia sugeriu a Gericke que publicasse as informações que possuía sobre a tecnologia, porém, à data, o mesmo recusou, por entender não ter resultados suficientes e considerar ser necessário efetuar estudos adicionais antes de dar recomendações ao público (Jensen, 1997). Em sequência, a universidade nomeou Hoagland e Arnon, dois de seus cientistas, para estudar o problema e escrever um boletim informativo para o público. O boletim publicado por Hoagland e Arnon, em 1938, resumia os princípios e práticas do cultivo em água na época, numa revisão simplificada (Savvas, 2003).

O interesse comercial nos sistemas hidropónicos encontrou as suas principais limitações nos preços elevados de construção dos sistemas de cultivo. Foi só nos finais da década de sessenta que o avanço nas tecnologias de produção de plástico permitiu que se reacendesse essa chama, usando-se esse material para construção de estufas e de camas de crescimento (Jensen, 1999). No entanto, algumas publicações relevantes, contendo a composição de soluções nutritivas utilizadas em hidroponia, são da década de sessenta (Savvas, 2003).

Nessa altura, o interesse em aplicar a hidroponia para fins comerciais foi tendencialmente aceite em países como Reino Unido, Holanda e Escandinávia (Savvas, 2003), porém não demorou muito para que o aumento dos preços do petróleo, no ano de 1973, provocassem a próxima paragem no desenvolvimento da tecnologia, que demorou cerca de 20 anos a voltar ao interesse dos investidores (Jensen, 1999).

No entanto, a investigação para otimizar as metodologias das práticas hidropónicas nunca parou. Assim, nos finais da década de sessenta, no Instituto de Pesquisa de Culturas em Estufa, em *Littlechampton*, Inglaterra, desenvolveu-se a técnica de filme de nutrientes (do inglês "*Nutrient film Technique - NTF*"). Este trabalho deu origem aos sistemas hidropónicos conhecidos atualmente. Jensen e Collins, em 1985, publicaram uma revisão completa sobre a hidroponia, onde destacam muitos dos sistemas de cultivo desenvolvidos na Europa e nos Estados Unidos até a data (Jensen, 1997).

## 2.2. Tecnologias e Equipamentos

A parte principal de uma instalação hidropônica é definitivamente a unidade colocada a montante da instalação de fertilização-irrigação, que permite uma dosagem precisa de nutrientes e água para a cultura, na forma de uma solução de nutrientes equilibrada (Savvas, 2003).

A construção das unidades de fertilização-irrigação é baseada em dois conceitos diferentes, envolvendo a preparação da solução de nutrientes, quer por dispensa de fertilizantes na água dentro de um tanque de mistura, quer injetando os fertilizantes diretamente nos tubos de irrigação. Na maioria dos casos, o processo de mistura e as razões de injeção de fertilizantes são automaticamente controlados por meio de monitores *on-line* de condutividade elétrica e pH da solução de irrigação à saída do sistema. Em geral, são utilizados dois tanques contendo diferentes fertilizantes, um para fertilizantes contendo cálcio, amônia e complexos de ferro, e outro para fertilizantes contendo sulfatos e fosfatos. Grandes empresas podem ainda ter tanques separados para cada fertilizante, permitindo preparar soluções nutritivas de combinações variadas (Savvas, 2003).

Além das unidades referidas, são necessários muitos outros componentes para otimizar as condições de crescimento num sistema hidropônico em estufa. Incluem-se reservatórios e unidades de fornecimento de água; o substrato e os seus recetores (canais, sacos e reservatórios); estruturas de drenagem ou equipamentos que permitam a captura, e retorno, da solução de nutrientes drenada para a unidade de fertilização-irrigação, para sua reutilização; e, considerando os sistemas fechados, é ainda necessário um sistema de desinfecção de água antes desta ser reaproveitada (Savvas, 2003).

Os equipamentos exatos de uma instalação hidropônica dependem do sistema envolvido, do valor do investimento inicial, do tipo de cultura que se pretende, dos requisitos e preferências do produtor e das condições climáticas da região de instalação, entre outros (Savvas, 2003).

Os sistemas atuais de cultivo hidropônico podem ser categorizados de acordo com a reutilização da solução nutritiva: são chamados sistemas abertos, quando a solução nutritiva fornecida às raízes da planta não é reutilizada; e fechados, quando a solução excedente é recuperada, reabastecida e reciclada (Hussain et al., 2014).

Uma vez que a água drenada nos sistemas hidropônicos contem uma quantidade significativa de nutrientes, os efluentes dos sistemas hidropônicos resultam numa fonte de poluentes. A

recirculação é uma forma de garantir a sustentabilidade dos sistemas hidropônicos, fazendo com que os sistemas fechados tenham maior aposta no mercado (Grewal et al., 2011).

São ainda classificados de acordo com as técnicas de fornecimento da solução nutritiva às raízes das plantas (Hussain et al., 2014), nomeadamente: sistema de cultivo sem substrato, que inclui a técnica de filme de nutrientes (NFT) e diferentes tipos de sistemas de cama flutuante; e sistemas baseados num meio, onde um dado volume de substrato assegura a ancoragem das raízes e age como substrato para aderência de microrganismos e meio condutor de água e nutrientes. O último grupo pode ainda dividir-se de acordo com o tipo de substrato utilizado (orgânico ou inorgânico) (Maucieri et al., 2017).

Os sistemas comumente usados, de acordo com as técnicas de fornecimento da solução nutritiva às raízes das plantas, são de pavio, gotejamento, vazão, NFT, sistema de cultura mergulhada em água, e sistema de técnica de fluxo profundo (Buckseth et al., 2016; Sharma et al., 2018).

#### **Sistemas de pavio:**

São os sistemas hidropônicos mais simples com recurso a eletricidade, bombas e arejadores. As plantas são colocadas num meio absorvente como fibras de coco, vermiculite ou perlite, com um pavio de *nylon*, ou outro material absorvente, ligado a um reservatório contendo a solução nutritiva. A solução nutritiva é fornecida às plantas através da ação capilar, fluindo do reservatório até o meio de crescimento pelo pavio. Estes sistemas funcionam bem para plantas pequenas, ervas e especiarias.

#### **Sistemas de gotejamento**

Sistemas hidropônicos de gotejamento são muito utilizados, tanto a nível comercial como para produção de alimentos para consumo próprio. A solução de nutrientes proveniente do reservatório percorre pequenos tubos, com o auxílio de uma bomba hidráulica, e é fornecida às plantas a partir do topo, na proporção apropriada. As plantas são usualmente posicionadas no meio de crescimento moderadamente absorvente, para que a solução nutritiva goteje lentamente. São preferíveis meios cuja drenagem seja lenta para este tipo de sistemas. Várias culturas podem crescer regularmente com maior conservação de água.

### **Sistemas de vazão e fluxo (*Ebb and Flow*):**

Trata-se de um sistema hidropónico de uso comercial, que opera segundo o princípio de inundação e drenagem. A solução de nutrientes proveniente do reservatório flui através de uma bomba hidráulica até à cama de crescimento, provocando uma inundação. Após encharcar as raízes e o meio de crescimento, a solução é drenada de volta para o reservatório, e o ciclo repete-se em intervalos previamente definidos. É possível cultivar diferentes tipos de cultura, mas o problema das raízes podres, algas e mofo é muito comum, portanto, nestes sistemas é necessário utilizar unidades de filtração.

### **Sistemas de cultura mergulhada em água:**

No cultivo em águas profundas, as raízes estão suspensas em água rica em nutrientes, e é fornecido ar diretamente às raízes das plantas através de arejadores de bolha, ou alternativamente, com bombas com injeção de ar. As plantas são dispostas em redes de vasos geralmente apoiados num material flutuante; os vasos possuem furos por onde as raízes atravessam e mergulham na solução nutritiva, onde crescem rapidamente e em larga escala. É obrigatória a monitorização dos níveis de oxigénio, concentração de nutrientes, salinidade e pH dentro do reservatório, que deve ficar em escuridão total como forma de evitar o desenvolvimento de microalgas e algas, que competem com as plantas pelos nutrientes. Estes sistemas funcionam para produção de plantas de maior porte e que produzem frutos, como é o caso dos tomates e dos pepinos.

### **Sistema de técnica de filme de nutrientes (NFT):**

Esse sistema foi desenvolvido em meados dos anos 60, em Inglaterra, pelo Dr. Alen Cooper para superar as limitações dos sistemas de vazão. A solução nutritiva circula por todo o sistema e entra na área de crescimento através de uma bomba hidráulica, sem que seja necessário o controlo do tempo. O sistema é levemente inclinado para que a solução nutritiva percorra as raízes e escorra para o reservatório num nível inferior. As plantas são colocadas num canal ou tubo, com as raízes mergulhadas na solução, que é mantida num fluxo constante. Apesar das raízes estarem sujeitas a infeções fúngicas por causa da constante imersão em água, pode-se facilmente produzir vegetais de um verde frondoso. Comercialmente é muito utilizado na produção de alfaces.

### Sistema de técnica de fluxo profundo:

Do inglês “*Deep Flow Technique*” (DFT), são sistemas simples, constituídos por um reservatório que contem a solução aquosa com os nutrientes necessários para a cultura e um sistema de circulação que leva essa solução a uma superfície plana, com profundidade entre 5 e 20 cm, onde as plantas crescem apoiadas num dado material flutuante, como por exemplo o polietileno, estando as suas raízes imersas. Na extremidade oposta da superfície plana existe um ralo, por onde a água volta ao reservatório. É uma técnica muito similar à NFT e aos sistemas hidropônicos de cultura mergulhada em água.

A figura 1 reúne a esquematização de cada um dos sistemas acima descritos para melhor percepção das diferenças entre eles.

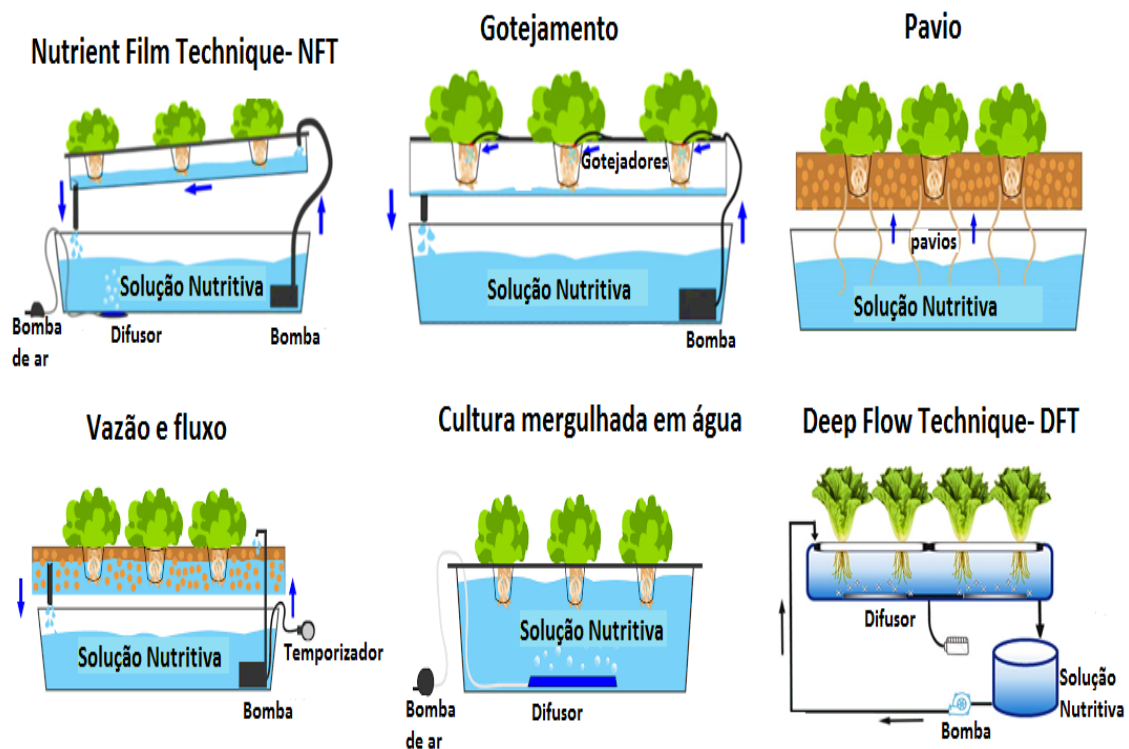


Figura 1: Exemplos de alguns sistemas hidropônicos (adaptado de Nosoilsolution, n.d.)

### **2.3. Substratos**

O requisito mais importante para um meio de crescimento é que retenha ar e água suficientes para garantir as condições ótimas de crescimento às raízes e conseqüentemente, à planta (Maucieri et al., 2017).

Os materiais usados como substratos em sistemas de cultivo sem solo dividem-se em duas grandes categorias: orgânicos e inorgânicos. Os substratos orgânicos são originários de resíduos de plantas e estão sujeitos ao processo de biodegradação. O composto orgânico é mais ou menos ativo quimicamente, devido à presença de locais de trocas de iões, o que poderá promover a absorção ou libertação de nutrientes. Os substratos inorgânicos são de material inerte, com exceção de materiais como zeolite e vermiculite, que possuem uma larga capacidade de troca de catiões. A capacidade ou, incapacidade do substrato reter ou, libertar nutrientes é uma característica significativa, e influencia a proporção de nutrientes que se deve fornecer às plantas (Savvas, 2003).

Existem vários tipos de meios usados em sistemas hidropônicos, tais como turfa e vermiculite, ou uma combinação dos dois, com adição de poliestireno ou perlite para redução dos custos. Outros meios, como a fibra de coco, areia e serradura, também são comuns em algumas partes do mundo. Meios artificiais como a lã de rocha e perlite exigem um cuidado extra, por forma a evitar a formação de sais tóxicos e manter o sistema livre de doenças; estes materiais têm um custo adicional, a menos que sejam extraídos ou fabricados na região. Assim, é comum que os substratos usados variem de região para região, de acordo com a sua abundância no local (Hussain et al., 2014).

A disponibilidade de água às plantas depende da condutividade hidráulica do meio, que diminui drasticamente em materiais porosos, quando se reduz o volume de água. Como consequência, é necessário um volume de água que se aproxima à capacidade máxima do recipiente, como pré-requisito para otimizar a disponibilidade de água nas culturas em substrato, desde que possa ser garantido o fornecimento de ar adequado pelo meio nesse volume de água (Savvas, 2003).

## 2.4. Soluções nutritivas

A maioria das plantas precisa de 17 elementos essenciais para o seu crescimento, cuja deficiência ou a falta impossibilita a planta de completar o seu ciclo biológico. Estes elementos são o carbono (C), hidrogénio (H), oxigénio (O), azoto (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), ferro (Fe), cobre (Cu), zinco (Zn), manganês (Mn), molibdénio (Mo), boro (B), cloro (Cl) e níquel (Ni). Outros elementos, como sódio (Na), silício (Si), vanádio (V), selénio (Se), cobalto (Co), alumínio (Al) e iodo (I), entre outros, são considerados benéficos e podem estimular o crescimento, compensar efeitos tóxicos de outros elementos, ou substituir nutrientes essenciais que desempenham um papel menos específico numa dada cultura (Furlani et al., 1999).

Em hidroponia é essencial que todos os nutrientes sejam fornecidos às plantas através da solução de nutrientes, com exceção do carbono, oxigénio e do hidrogénio, que são incorporados no metabolismo da planta através da água e do ar atmosférico. Para preparar soluções contendo todos os nutrientes essenciais, recorre-se ao uso de fertilizantes inorgânicos, sendo o ferro a exceção à regra, por ser adicionado na forma de quelatos com compostos orgânicos sintéticos, para melhorar a sua disponibilidade às plantas. Na maioria dos casos, os fertilizantes usados são sais inorgânicos de alta solubilidade e alguns ácidos, como é o caso do ácido bórico, nítrico e o fosfórico (Savvas, 2003).

A composição ideal de uma solução nutritiva depende não só das concentrações dos nutrientes, mas também de outros fatores ligados ao cultivo, incluindo o tipo ou o sistema hidropónico, os fatores ambientais tais como, a salinidade, oxigenação, temperatura, pH da solução nutritiva, temperatura e humidade do ar, intensidade de luz, duração do período da luz, e a cultura em produção (Furlani et al., 1999).

Podem ser encontradas na literatura soluções nutritivas variadas, que podem conter diferenças marcantes entre elas, nomeadamente no que concerne às concentrações dos macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S), e diferenças menores para os micronutrientes (Mn, Fe, B, Zn, Cu, Mo, Cl) (Furlani et al., 1999).

É comum encontrar a frase “solução nutritiva modificada de Hoagland”, que traduz fórmulas derivadas da proposta apresentada em 1938, por Hoagland & Arnon, com as concentrações de nutrientes presentes na tabela 1.

**Tabela 1:** Solução nutritiva proposta por Hoagland & Arnon em 1938 (adaptado de Furlani et al., 1999)

<b>Nutriente</b>	<b>Concentrações (mg/L)</b>
<b>Nitratos (N-NO<sub>3</sub>)</b>	210
<b>Fósforo (P)</b>	31
<b>Potássio (K)</b>	234
<b>Cálcio (Ca)</b>	160
<b>Magnésio (Mg)</b>	48
<b>Enxofre (S)</b>	64
<b>Boro (B)</b>	0,5
<b>Cobre (Cu)</b>	0,02
<b>Ferro (Fe)</b>	1,0
<b>Manganês (Mn)</b>	0,5
<b>Molibdênio (Mo)</b>	0,01
<b>Zinco (Zn)</b>	0,05

Esta fórmula pode, numa das suas versões, incluir uma concentração de 14 mg/L de azoto na forma de amónia (N-NH<sub>4</sub>), mantendo-se o azoto total constante. Esta solução tem sido a mais utilizada em trabalhos de investigação com nutrição mineral de plantas e constitui a base para a formulação de inúmeras soluções nutritivas comercializadas mundialmente (Furlani et al., 1999).

A aplicação de nutrientes pode ser feita a partir da análise das fases de crescimento de uma cultura específica, que poderá descrever o consumo dos vários nutrientes típicos dessa cultura ou então, por meio de uma análise das necessidades totais de nutrientes pela planta, ajustadas à taxa de crescimento e à quantidade de água fornecida (Trejo-Téllez & Gómez-Merino, 2012).

Furlani et al. (1999) faz uma listagem de várias soluções nutritivas propostas por diversos autores, para algumas espécies vegetais. Defende a não existência de uma fórmula única global, sendo que para as condições em que foram avaliadas, todas as fórmulas mostraram resultados satisfatórios.

A tabela 2 contém valores de concentrações de nutrientes para cultivo de alguns vegetais, recomendados por Castellane & Araújo em 1994, extraídos dessa listagem. Serve de reforço à necessidade de adaptação da solução para cada cultura.

**Tabela 2:** Concentrações de nutrientes para o cultivo de alguns vegetais (adaptado de Furlani et al., 1999)

Cultura	Concentrações (mg/L)											
	N-NO <sub>3</sub>	P	K	Ca	Mg	S-SO <sub>4</sub>	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
<b>Tomate</b>	169	62	311	153	43	50	0,3	0,1	4,3	1,1	0,1	0,3
<b>Pepino</b>	174	56	258	153	41	54	0,3	0,1	4,3	1,1	0,1	0,3
<b>Pimentão</b>	152	39	245	110	29	32	0,3	0,1	3,7	0,4	0,1	0,3
<b>Beringela</b>	179	46	303	127	39	48	0,3	0,1	0,8	0,6	0,1	0,3
<b>Alface</b>	238	62	426	161	24	32	0,3	0,1	5,0	0,4	0,1	0,3

Para obter estas concentrações, o produtor pode utilizar qualquer sal solúvel na preparação da solução nutritiva, desde que forneça o nutriente requerido e não contenha nenhum elemento químico prejudicial ao desenvolvimento da cultura. A preparação da solução requer alguns cuidados como, o conhecimento da qualidade da água quanto às suas características químicas e microbiológicas, e da solubilidade dos sais fertilizantes. Caso se opte pelo uso de azoto na forma de ião amónia (NH<sub>4</sub>), este não deve ultrapassar mais do que 20% da quantidade total de azoto considerado na fórmula. Durante a preparação da solução, deve-se evitar a mistura de solução concentrada de nitrato de cálcio com sulfatos e fosfatos, pois pode ocorrer a formação de precipitados, como sulfato de cálcio e fosfato de cálcio; e ainda deve dar-se preferência ao uso de molibdato de amónio em vez do molibdato de sódio, pois este é muito alcalino e pode ocasionar precipitações de alguns sais na solução (Furlani et al., 1999).

A nível comercial, as quantidades adequadas de fertilizantes são misturadas com água em tanques, por forma a obter-se um *stock* de soluções concentradas, que posteriormente serão diluídas na água de irrigação, em sistemas de injeção automáticos do fertilizante, segundo uma dada razão de nutrientes (Savvas, 2003).

O controlo das condições de crescimento de culturas em hidroponia passa pela monitorização e adaptação das concentrações de nutrientes na solução, da sua constituição química, da temperatura e do pH, durante o período de crescimento, características estas que afetam diretamente a produtividade e qualidade do produto. Para fazer estes ajustes recorre-se, na maioria das vezes, à medição da condutividade elétrica, contudo essa abordagem não

leva em conta que a preferência por nutrientes e a sua forma iônica variam dependendo do tipo de cultura. Para um balanço adequado dos nutrientes, a melhor forma de monitorização consiste na utilização de sistemas automáticos, ou computadorizados, associados ao uso de um elétrodo de iões seletivos, ou ainda de espectroscopia de infravermelho (Tomasi et al., 2014).

O pH das soluções nutritivas é geralmente ajustado entre valores neutros ou subácidos, porém, a absorção preferencial de catiões ou aniões pode resultar em mudanças drásticas desses valores, com fortes impactos na solubilidade de certos nutrientes (Tomasi et al., 2014). Valores de pH abaixo dos 3,5 podem provocar a morte das plantas, e abaixo dos 5,5 provocam competições entre os iões  $H^+$  e outros catiões essenciais ( $NH_4^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ). Valores de pH muito elevados favorecem a diminuição da concentração de aniões e a precipitação de elementos. O ajuste do pH para as gamas recomendadas pode ser feito através de soluções de ácidos ou bases, consoante a necessidade de aumentar ou diminuir o pH do meio de crescimento (Furlani et al., 1999).

A temperatura da solução afeta diretamente a solubilidade dos componentes, sendo esperado que temperaturas mais altas favoreçam a solubilização dos sais do fertilizante, enquanto uma refrigeração da solução pode provocar uma precipitação parcial de seus componentes. Da mesma forma, é plausível assumir que mudanças no volume da solução devido a evapotranspiração das plantas, e consequentes flutuações de salinidade, possam favorecer fenómenos de precipitação de certos elementos (Tomasi et al., 2014). A temperatura da solução não deve ultrapassar os  $30^{\circ}C$ , sendo que o ideal para a planta é a faixa de  $18^{\circ}C$  a  $24^{\circ}C$  em períodos quentes (verão) e  $10^{\circ}C$  a  $16^{\circ}C$  em períodos frios (inverno), (Furlani et al., 1999). Em dias quentes, o contato das raízes com temperaturas da solução abaixo da temperatura ambiente resulta em plantas temporariamente murchas, na redução na absorção de nutrientes, na queda de flores e no atraso na maturação dos frutos. Soluções nutritivas com temperatura mais alta do que a do ambiente também não são recomendáveis, pois podem causar a morte das raízes e o desenvolvimento de fungos e bactérias (Carrijo & Makishima, 2000).

A oxigenação da solução é muito importante para a capacidade de absorção de nutrientes pelas raízes, podendo ser feita durante a circulação da solução, no retorno ao reservatório ou na própria cama de crescimento, com a aplicação de ar comprimido ou oxigênio através de bombas de arejamento (Furlani et al., 1999). O consumo de oxigênio aumenta quando a

temperatura da solução aumenta, e conseqüentemente produz um aumento na concentração de CO<sub>2</sub> na região das raízes, caso o arejamento não seja adequado. A concentração de O<sub>2</sub> na solução depende das necessidades da cultura, sendo maior quando a atividade fotossintética é maior. Valores abaixo dos 3 ou 4 mg/L de oxigênio dissolvido inibem o crescimento das raízes e produzem mudança de cor para um tom acastanhado, que pode ser considerado um dos primeiros sintomas da carência de oxigênio na planta. Quando o período de crescimento é longo, geralmente ocorre um aumento na carga orgânica e na atividade microbológica da solução/substrato e um conseqüente aumento da competição por oxigênio junto às raízes. Caso as raízes sejam muito densas podem afetar a distribuição do oxigênio (Trejo-Téllez & Gómez-Merino, 2012).

O controle da condutividade elétrica é de grande importância, pois determina a quantidade de íons na solução, e conseqüentemente a quantidade de nutrientes. Quanto mais íons houver na solução, maior será a condutividade elétrica, e vice-versa. As medições de condutividade ideais encontram-se na faixa de 1500 a 3500 µS/cm, que corresponde ao intervalo 1000 a 1500 mg/L de concentração total de íons na solução. Valores acima dessa faixa são prejudiciais à planta. Valores inferiores indicam a deficiência de algum elemento, embora não se saiba qual e em que quantidade, sendo que a resposta só pode ser obtida com a análise química laboratorial da solução nutritiva (Furlani et al., 1999).

A solução nutritiva deve estar sempre protegida da luz, quer seja no reservatório ou no sistema de circulação, para evitar o aquecimento e o desenvolvimento de algas que, além de absorverem nutrientes, podem contaminar a solução (Carrijo & Makishima, 2000).

## **2.5. Condições ambientais**

Quando o cultivo hidropônico é realizado em ambiente protegido torna-se necessário a monitorização constante das condições ambientais, principalmente nas horas mais frias e mais quentes do dia, pois cada espécie vegetal tem determinadas faixas de temperatura, luminosidade e fotoperíodo favoráveis ao seu desenvolvimento. A humidade relativa do ar, por sua vez, favorece ou evita a incidência de insetos e a proliferação de organismos causadores de doenças. As condições ambientais da estufa devem ser adaptadas à espécie que se deseja cultivar, através de mecanismos de adaptação do microclima interno. Em climas quentes, as estruturas devem ser dotadas de sistemas de arrefecimento, como ventilação natural e forçada, superfície de evaporação, nebulizadores e redução da luminosidade; em climas frios, devem possuir sistema de aquecimento (Carrijo & Makishima, 2000).

A temperatura é o fator ambiental que mais afeta o crescimento da planta. A temperatura na solução nutritiva e a temperatura ambiente podem afetar severamente a qualidade dos vegetais cultivados em sistemas hidropônicos. Quando a temperatura do meio de crescimento é muito superior ou muito inferior à temperatura do ar, pode causar a incapacidade de aquisição de nutrientes pelas raízes. Os efeitos da temperatura podem ir além dos processos que ocorrem nas raízes, por exemplo, as temperaturas baixas limitam os processos enzimáticos nas raízes e diminuem a necessidade de carbono, o que resulta num retorno negativo em termos de fotossíntese (Tomasi et al., 2014).

Em geral, as culturas da alface desenvolvem-se bem em climas temperados e húmidos, principalmente no período de crescimento vegetativo. A ocorrência de temperaturas mais altas acelera o ciclo e resulta em plantas menores devido ao espigamento precoce. No entanto, algumas espécies suportam bem o calor, sem tendência a espigar; e outras, são capazes de suportar o inverno, desde que não seja demasiado rigoroso. Contudo, em termos gerais o seu crescimento ótimo ocorre a temperaturas do ar entre os 15 e os 20 °C, podendo a temperatura máxima tolerável chegar aos 30°C e a mínima aos 6°C. A humidade relativa mais apropriada está entre os 60 e 80%, contudo, em determinadas fases do ciclo, a alface pode desenvolver-se melhor com humidade relativa abaixo dos 60% (Rodrigues, 2015).

A radiação solar é um fator ambiental muito significativo, pois permite regular a função fotossintética e conseqüentemente o crescimento e a sobrevivência da planta. Espécies cultivadas em ambientes de baixa radiação solar tendem para o decréscimo da biomassa da

planta, bem como da sua atividade fotossintética, transpiração e condutância estomática, enquanto a altura da planta tende a ser maior nestas condições. As necessidades de radiação solar variam de acordo com a espécie cultivada, sendo que algumas espécies, tal como a alface, podem alcançar a saturação fotossintética quando expostas a cerca de 25% da radiação solar do esperado num dia de verão, sugerindo que esta cultura pode atingir uma produtividade máxima quando cultivada sob um sombreamento parcial. A alface pode ser cultivada em qualquer altura do ano, tanto ao ar livre como em estufas, e, portanto, adapta-se a uma larga escala de intensidade de radiação solar (Kavga et al., 2018).

A radiação solar, juntamente com a temperatura do ar, contribuem para o aumento da temperatura da solução nutritiva (Carrijo & Makishima, 2000).

Em ambiente protegido, uma combinação de placas evaporativas, ventiladores, sensores de temperatura e aquecedores, são coordenados por interconexões elétricas por forma a manter a temperatura e humidade no interior da estufa dentro dos níveis predefinidos, e garantir a circulação e renovação do ar. Em alguns casos, aparelhos de pulverização em forma de sopradores de névoa são utilizados sobre as plantas para arrefecimento, quando a luz do sol se torna tão intensa que é prejudicial à cultura. No entanto, é importante destacar que os sistemas hidropónicos têm desempenhos distintos quanto aos efeitos de aquecimento e arrefecimento. As taxas de evaporação da cultura e do substrato utilizado, as características do material da estrutura, sua orientação em relação ao sol, e condições ambientais do exterior são fatores importantes a se ter em conta no cultivo hidropónico (Magwaza et al., 2020).

### 3. Tratamento de águas residuais

Uma Água Residual (AR), pode ser composta por efluentes resultantes das atividades domésticas, industriais, pluviais e infiltrações. As suas características dependem da origem e utilização, do tipo de rede de saneamento e ainda da altura do ano na qual foi produzida (Metcalf & Eddy, 2016).

O Decreto-Lei n.º 152/97 de 19 de junho, que transpõe a Diretiva n.º 91/271/CEE, do Conselho, de 21 de maio de 1991, relativamente ao tratamento de águas residuais urbanas apresenta as seguintes definições:

“**Águas residuais domésticas:** as águas residuais de serviços e de instalações residenciais, essencialmente provenientes do metabolismo humano e de atividades domésticas.

**Águas residuais industriais:** as águas residuais provenientes de qualquer tipo de atividade que não possam ser classificadas como águas residuais domésticas nem sejam águas pluviais.

**Águas residuais urbanas:** as águas residuais domésticas ou a mistura destas com águas residuais industriais e ou com águas pluviais.”

Os objetivos do tratamento das águas residuais estão associados à remoção de constituintes que possam causar efeitos a longo prazo sobre a saúde e seus impactos ambientais. O projeto de sistemas de tratamento deve ter em consideração os objetivos de qualidade da água e as obrigações legais da região onde se inserem, além de ter em conta as características do efluente (Metcalf & Eddy, 2016). Atualmente, o consumo crescente de água põe em causa a sua disponibilidade futura e obriga a uma gestão cada vez mais sustentável dos recursos hídricos. A reutilização de água surge como uma origem alternativa, pois permite a manutenção de água no meio ambiente e a sua preservação para usos futuros, seguindo os princípios da economia circular. Neste contexto, acresce aos objetivos indicados, a necessidade de adequar os processos de tratamento ao fim a que se possam destinar as águas residuais tratadas (para reutilização) (Decreto-Lei n.º 119/2019, de 21 de Agosto, 2019).

Os processos de tratamento de águas residuais são geralmente classificados como processos unitários físicos, químicos e biológicos. Processos unitários físicos são os processos nos quais predominam as forças físicas e foram os primeiros a serem utilizados para tratamento de águas residuais. Nos processos unitários químicos, a remoção de constituintes é efetuada por

meio de compostos químicos e reações químicas. Os processos unitários biológicos funcionam pela atividade biológica, e são geralmente utilizados para remover substâncias orgânicas biodegradáveis, coloidais ou dissolvidas encontradas na água residual (Metcalf & Eddy, 2016).

O tratamento da água residual depende da sucessão de vários níveis de depuração, que permitem remover uma parte significativa das substâncias poluentes que se encontram em suspensão ou diluídas e que, após descarga, poderiam prejudicar a qualidade das águas do meio receptor, o ambiente e a saúde pública (Metcalf & Eddy, 2016).

Os processos unitários são geralmente agrupados, de modo a constituir os níveis de tratamento primário, secundário e terciário ou avançado, com breve descrição na tabela 3 (adaptado de Metcalf & Eddy, 2016).

**Tabela 3:** Níveis de tratamento e exemplos de processos e operações (adaptado de Metcalf & Eddy, 2016)

Nível de tratamento	Descrição	Exemplos
<b>Preliminar</b>	Remoção de constituintes, como trapos, galhos, materiais flutuantes, areia e óleos e gorduras, que possam causar problemas operacionais ou de manutenção às operações e aos processos de tratamento e sistemas auxiliares	Gradagem, tamisação, flutuação, desarenação, igualização, trituração
<b>Primário</b>	Remoção de parte dos sólidos suspensos e matéria orgânica.	Sedimentação, coagulação/floculação, filtração
	Remoção melhorada, tipicamente pela adição de produtos químicos ou filtração.	
<b>Secundário</b>	Remoção de matéria orgânica biodegradável (em solução ou suspensão) e sólidos suspensos.	Lamas ativadas, leitos percoladores, biodiscos, lagunagem, digestão anaeróbia
	Remoção de compostos orgânicos biodegradáveis, sólidos suspensos e nutrientes, como o azoto e o fósforo.	
<b>Terciário</b>	Remoção de sólidos suspensos residuais usualmente por filtros granulares, filtros de pano ou microtelas. Inclui remoção de nutrientes e pode ainda incluir a remoção de materiais suspensos ou dissolvidos que ficam após tratamento biológico, e desinfecção.	Filtração, nitrificação/desnitrificação, desinfecção, permuta iônica, adsorção

Nos **tratamentos preliminares** são aplicados geralmente processos unitários físicos que têm como objetivos a proteção dos órgãos das estações de tratamento, a remoção e/ou trituração dos sólidos de maiores dimensões, a remoção de gorduras e a regularização e homogeneização da AR (Metcalf & Eddy, 2016). A maior parte dos resíduos originados pelo

tratamento preliminar, nomeadamente os gradados, tamisados e as areias, a nível nacional, têm como destino final o encaminhamento para aterro (Félix, 2017).

O **tratamento primário** é geralmente aplicado após o tratamento preliminar, podendo ser dividido em 2 subníveis. No Decreto-Lei nº 152/97 de 19 de junho, é definido como “*o tratamento das águas residuais urbanas por qualquer processo físico e ou químico que envolva a decantação das partículas sólidas em suspensão, ou por outro processo em que a Carência Bioquímica de Oxigénio (CBO<sub>5</sub>) das águas recebidas seja reduzida de, pelo menos, 20% antes da descarga e o total das partículas sólidas em suspensão das águas recebidas seja reduzido de, pelo menos, 50%*”.

A sedimentação primária, cujo objetivo é a remoção de sólidos facilmente sedimentáveis e material flutuante, é o primeiro subnível do tratamento primário, e dá-se através de um processo unitário físico. Permite a remoção de quantidades significativas de sólidos suspensos por sedimentação, e também do material flutuante que ascende à superfície (Metcalf & Eddy, 2016).

No segundo subnível (tratamento primário avançado), o objetivo é promover uma remoção melhorada, com utilização de um processo unitário físico/químico. O processo mais utilizado é a coagulação/floculação. A coagulação é o processo de destabilização química das partículas, sob ação de uma mistura rápida. A floculação é realizada sob mistura lenta, imediatamente após a mistura rápida, com o objetivo de promover o contacto entre as partículas destabilizadas, por colisão, devido à sua movimentação aleatória ou devido à turbulência gerada por forças mecânicas exteriores. (Metcalf & Eddy, 2016).

Os agregados ou flocos formados podem ser facilmente removidos por meio de sedimentação gravitacional. A remoção dos sólidos é geralmente realizada em decantadores primários, projetados para proporcionar um tempo de retenção entre 1,5 e 2,5 horas, de acordo com o caudal médio afluente. A remoção das lamas primárias sedimentadas e dos flutuantes acumulados na superfície é efetuada por um braço giratório designado de ponte raspadora de fundo e de superfície (Metcalf & Eddy, 2016).

O Decreto-Lei nº 152/97 de 19 de junho, define como **tratamento secundário** o tratamento que envolve geralmente um tratamento biológico com decantação secundária ou outro processo que permita respeitar requisitos para as descargas, nomeadamente

percentagens de remoção da  $CBO_5$  entre 70 e 90%, Carência Química de Oxigênio (CQO) de 75% e Sólidos Suspensos Totais (SST) entre 70 e 90%.

O tratamento biológico é geralmente realizado através da degradação biológica de algumas substâncias poluentes, promovida pela aceleração de processos naturais de depuração. A sua eficiência é garantida adaptando o ambiente às características de cada processo, nomeadamente condições de temperatura, pH, nutrientes, tempo de residência e teor de oxigênio dissolvido (OD). Em relação a este parâmetro, o processo pode decorrer na presença ou na ausência de OD (processos aeróbios ou anaeróbios), ou ainda sem oxigênio dissolvido e na presença de compostos oxidados como nitrato e nitrito (processos anóxicos), sendo que, nalguns casos as várias condições podem ser verificadas no processo. (Metcalf & Eddy, 2016).

A decantação secundária garante a separação sólido-líquido, com mecanismos de limpeza de características idênticas aos decantadores primários. Como recebem grande quantidade de sólidos floculentos, os decantadores secundários requerem uma maior profundidade útil, para assegurar uma maior capacidade de armazenamento e um melhor desempenho global do sistema (Metcalf & Eddy, 2016).

O tratamento secundário convencional é utilizado para remover a matéria orgânica biodegradável (em suspensão ou dissolvida) e os sólidos suspensos da AR. O tratamento secundário com remoção de nutrientes é um subnível mais avançado, que permite a remoção adicional de azoto e/ou fósforo (Metcalf & Eddy, 2016).

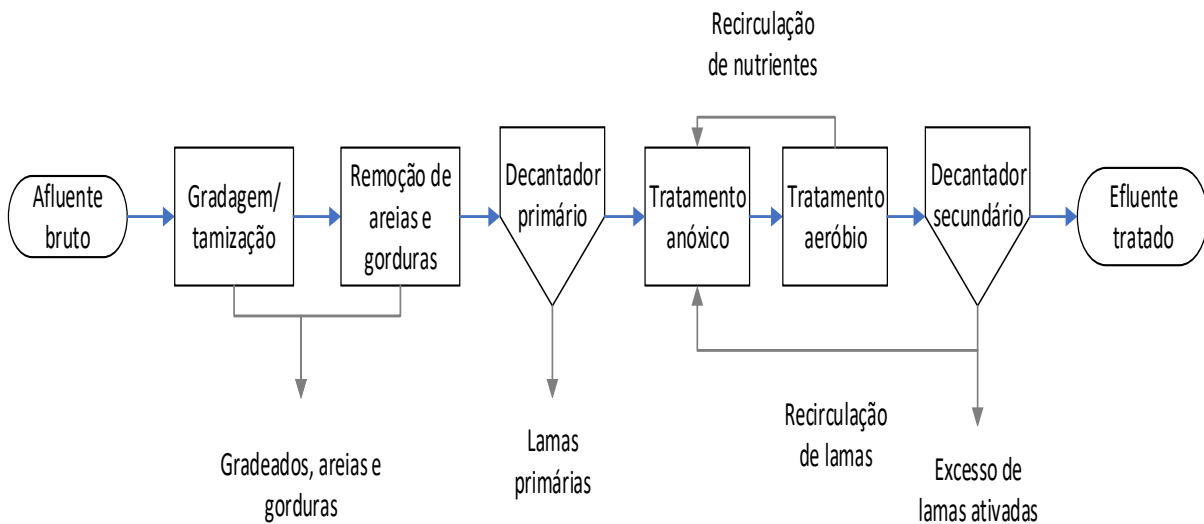
Nos processos biológicos também pode ocorrer a remoção de metais solúveis pela adsorção e complexação de metais com microrganismos. Dependendo da concentração inicial do metal, da concentração de sólidos no reator biológico e do tempo de retenção de sólidos no sistema, as percentagens de remoção podem ser significativas (entre 50 e 98%) (Metcalf & Eddy, 2016).

O **tratamento terciário** é um tratamento complementar aos níveis de tratamento anteriores, para a remoção de constituintes poluentes remanescentes, como por exemplo, sólidos suspensos ou dissolvidos, microrganismos patogénicos, metais e nutrientes. Surge da necessidade de adaptar a qualidade da AR tratada às exigências de qualidade do meio recetor, e aos requisitos necessários à sua reutilização (Metcalf & Eddy, 2016).

Nesse nível de tratamento recorre-se a operações de transferência de massa e processos de transformação química e/ou biológica para remoção de constituintes remanescentes. Quando o objetivo é a remoção de poluentes dissolvidos e/ou em suspensão, convertendo-os em precipitados insolúveis, o processo de tratamento terciário mais utilizado é a precipitação química, com decantação e/ou filtração para remoção dos precipitados resultantes.

Se o intuito for a destruição ou inativação de microrganismos patogênicos, de forma a minimizar o risco de surtos de infecção, o processo utilizado é a desinfecção (Metcalf & Eddy, 2016). Para a desinfecção, são geralmente usados agentes químicos, como cloro e seus derivados, e radiação não ionizante, como a radiação UV, a mais utilizada dentro das radiações não ionizantes. A radiação UV é um processo físico, com propriedades germicidas (alterações na informação genética que impedem a multiplicação), mais eficaz que o cloro para a inativação da maioria dos vírus, esporos e cistos (Lazarova et al., 1999; Metcalf & Eddy, 2016). Destacam-se ainda outros processos, como os processos de oxidação avançada, os processos de separação por membrana e a adsorção em carvão ativado (Espíndola & Vilar, 2020; Ribeiro et al., 2015; Surra et al., 2021).

O esquema da figura 2 representa as etapas gerais do tratamento de uma AR doméstica numa estação convencional (adaptado de Metcalf & Eddy, 2016) .



**Figura 2:** Etapas gerais do tratamento de uma AR doméstica (adaptado de Metcalf & Eddy, 2016)

Considera-se que a AR recebeu um tratamento apropriado se os processos e/ou sistemas utilizados no seu tratamento permitem que após a sua descarga, as águas receptoras satisfaçam os objetivos de qualidade que lhes são exigidos. Assim sendo, o nível de tratamento adequado varia de acordo com as características e classificação do meio receptor da AR tratada, das características da AR e também da dimensão do aglomerado populacional servido pela Estação de Tratamento de Águas Residuais (ETAR) e sua localização (Decreto-Lei n.º 152/97, de 19 de Junho, 1997).

De acordo com o Decreto-Lei n.º 152/97 de 19 de junho, alterado pelo Decreto-Lei n.º 149/2004 de 22 de junho, o tratamento secundário seria o nível mínimo de tratamento exigido para o licenciamento de sistemas que sirvam aglomerados com um equivalente de população superior a 2 000. Este diploma impõe um tratamento mais rigoroso aos sistemas de tratamento com um equivalente de população inferior a 10 000, em zonas de descarga consideradas sensíveis (zonas propensas à eutrofização), obrigando a que reduza no mínimo 80% do fósforo total afluente e 70-80% do azoto total.

Visando a proteção das águas superficiais dos efeitos das descargas de águas residuais urbanas, as estações de tratamento de águas residuais urbanas deverão satisfazer os requisitos estabelecidos pelo Decreto-Lei n.º 152/97 de 19 de junho, tendo especial atenção às descargas

em zonas sensíveis sujeitas a eutrofização, garantindo dessa forma que as águas recetoras satisfaçam as condições estabelecidas por qualquer outra diretiva aplicável e sempre que seja necessário respeitar os objetivos de qualidade fixados para o meio recetor pela legislação vigente.

Assim, as licenças de descarga de AR podem ter fixados outros parâmetros constantes da legislação aplicável, nomeadamente no Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de agosto, que estabelece normas, critérios e objetivos de qualidade com a finalidade de proteger o meio aquático e melhorar a qualidade das águas em função dos seus principais usos. O Decreto-Lei prevê que a aplicação do tratamento terciário seja exigido pela entidade licenciadora, quando o meio recetor das AR ou as massas de água situadas a jusante da descarga são classificados de água para uso balnear, de fonte de água para rega agrícola, de águas piscícolas ou conquícolas ou de origem de água para produção de água para consumo humano, tendo em conta, por exemplo, os parâmetros microbiológicos.

Integrando a orientação da promoção da reutilização de água, como medida para alcançar e manter o bom estado das massas de água, prevista pelo Decreto-Lei n.º 152/97, de 19 de junho, o artigo 57.º do Decreto-Lei n.º 226-A/2007, de 31 de maio, determina que as águas residuais tratadas devem ser reutilizadas, sempre que tal seja possível ou adequado.

No anexo I do Decreto-Lei n.º 119/2019, de 21 de agosto, são definidas normas de qualidade, que a água para reutilização deve satisfazer de acordo com os usos aos quais será destinada, designadamente rega, usos paisagísticos, usos urbanos e industriais, por forma a evitar efeitos nocivos para a saúde e para o ambiente. Estas normas deverão ser incluídas nas licenças para a produção ou para utilização da água para reutilização.

As lamas resultantes do processo de tratamento da fase líquida apresentam características diversas, dependendo do tipo de AR tratada, das operações ou processos utilizados, e do nível de tratamento no qual foram originadas. A sua eliminação está sujeita a autorização da entidade licenciadora, sendo proibida a sua descarga em águas de superfície (Decreto-Lei n.º 152/97, de 19 de Junho, 1997).

Como resíduo, as lamas têm a sua gestão abrangida pelo Decreto-Lei n.º 73/2011 de 17 de junho, aplicável às operações de gestão de resíduos destinadas a prevenir ou reduzir a produção de resíduos, o seu carácter nocivo e os impactes adversos decorrentes da sua produção e gestão, bem como a diminuição dos impactes associados à utilização dos

recursos, de forma a melhorar a eficiência da sua utilização e a proteção do ambiente e da saúde humana. A prioridade na gestão de resíduos é a prevenção e redução, a reciclagem e outros tipos de valorização (Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de Junho, 2011).

A valorização agrícola é o principal destino final das lamas em Portugal e também na Europa (PENSAAR 2020, 2015). Esta aplicação está regulada pela Diretiva n.º 86/278/CEE, do Conselho, de 12 de Junho, transposta para a ordem jurídica interna no Decreto-Lei n.º 276/2009 de 2 de outubro. Este Decreto-lei estabelece o regime de utilização de lamas de depuração em solos agrícolas, de forma a evitar efeitos nocivos para o homem, para a água, para os solos, para a vegetação e para os animais, promovendo a sua correta utilização (Decreto-Lei n.º 276/2009 de 2 de Outubro, 2009).

## 4. Materiais e métodos

Para estudar a possibilidade de cultivo hidropónico de alfaces em AR, foi montado um pequeno sistema hidropónico sem recirculação, onde se procedeu aos ensaios de crescimento, com monitorização de alguns parâmetros, conforme descrito nas seções deste capítulo.

### 4.1. Sistema hidropónico

O sistema hidropónico foi desenvolvido no Laboratório de Sistemas Multitróficos Integrados (LSMI) da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria. Este laboratório consiste numa estufa composta por uma estrutura metálica em arco, com cerca de 150 m<sup>2</sup>, coberta por um filme de polietileno transparente, com aberturas laterais para arejamento nos dias de temperaturas mais elevadas.

O estudo foi realizado num sistema hidropónico simples de cultura mergulhada em água, sem recirculação, composto por caixas de 23 litros de volume, contendo quatro plantas por caixa. As plantas foram posicionadas em pequenos vasos contendo grânulos de argila expandida (Leca) para suporte mecânico da planta, e estes foram encaixados em um material flutuante, dimensionado para servir de tampa à caixa e impedir a entrada de luz (figura 3).



**Figura 3:** Sistema hidropónico utilizado

A bancada de trabalho foi montada numa superfície de 125 cm de largura e 185 cm de comprimento, numa zona coberta por telas de sombreamento, por forma a amenizar a intensidade de radiação solar entre os vários pontos da bancada. Nessa área, foi posicionado um total de 12 caixas, às quais estavam ligadas duas bombas de arejamento por ar comprimido (HAILEA ACO-328) com seis entradas cada, para ligação de pequenos difusores de madeira, posicionados no fundo de cada caixa para assegurar o arejamento das raízes.

As caixas que não foram utilizadas num dado ensaio tiveram o seu volume preenchido com água e foram cobertas com sacos de plástico escuros, por forma a evitar a entrada da luz e a evaporação do volume de água no interior. Este procedimento permitiu manter o número de saídas de ar por bomba, independentemente do número de caixas a utilizar no ensaio, e assegurar uma distribuição constante e homogénea de ar pelas caixas.

Os grânulos de argila expandida foram utilizados para maximizar a capacidade de armazenamento e retenção de água na região das raízes. Escolhido por ser inerte, estável e não tóxico, isento de bactérias e de quaisquer substâncias fitotóxicas prejudiciais às plantas.

## **4.2.Cultura**

A cultura selecionada para o estudo foi a alface, planta da família das *Asteraceae*, do género *Lactuca* e da espécie *Lactuca sativa* L., especificamente a variedade alface frisada de folhas verdes.

Trata-se de uma planta herbácea, de ciclo anual, com raiz aprumada e pouco desenvolvida, apresentando-se mais ou menos ramificada em função do modo de produção e das características do solo (Rodrigues, 2015).

A seleção desta cultura foi influenciada pelo facto de Portugal produzir alface durante todo o ano, ao ar livre, e em estufa, normalmente de novembro a abril. No ano de 2018, a produção de alface no país foi de 45.219 toneladas e ocupou uma área total de 1 934 hectares. A maior região produtora é o Ribatejo e o Oeste, incluindo-se a zona a norte de Lisboa (Loures-Mafra-Sintra) (Instituto Nacional de Estatística, 2019). Outros fatores decisivos na seleção da cultura foram o seu sistema radicular pequeno e o seu tamanho, que permitem que sejam cultivadas muitas plantas por área de cultivo

As folhas da alface são muito apreciadas pelas suas qualidades dietéticas (vitaminas e fibras) e pela sua fácil preparação, tendo o seu consumo praticamente generalizado em todo o mundo, em saladas cruas, acompanhando pratos diversos (Rodrigues, 2015). A tabela 4 apresenta dados dos valores nutricionais da alface.

**Tabela 4:** Valores nutricionais da alface (adaptado de Rodrigues, 2015)

Macronutrientes e energia 100g		Vitaminas		Minerais	
Água (%)	94-96	Vitamina A (UI)	502-7405	Potássio (mg)	141-247
Energia (kcal)	13-18	Tiamina (mg)	0,04-0,07	Cálcio (mg)	18-36
Proteína (%)	0,8-1,6	Riboflavina (mg)	0,03-0,07	Fósforo (mg)	20-33
Gordura (%)	0,15-0,30	Niacina (mg)	0,12-0,38	Magnésio (mg)	5 - 3
Hidratos de carbono (%)	2,1-3,5	Ácido ascórbico (mg)	3,0-24,0	Sódio (mg)	5 - 9
Fibra (%)	1,1-2,1	Vitamina B6 (mg)	0,04-0,09	Ferro (mg)	0,4-1,2

### 4.3. Condições de crescimento

Com vista a alcançar os objetivos do estudo, foram propostas algumas variações da água de alimentação, estudando-se assim o crescimento da cultura em diferentes condições. A proposta global consistiu na realização de ensaios onde se proporcionasse o crescimento das plantas em água residual, em água residual suplementada com potássio, nutriente que se verificou deficitário na água residual, e numa solução nutritiva preparada especificamente para o efeito.

A solução nutritiva foi utilizada como controlo positivo e teve por base a recomendada para o crescimento específico da cultura de alface em hidroponia por Martinez & Silva Filho em 2004 (tabela 5), citado por Carvalho et al., (2018).

A solução nutritiva utilizada no estudo foi modificada de acordo com a disponibilidade de reagentes, tendo sido substituídos o nitrato de cálcio por um adubo comercial (YaraTera, Adubo de nitrato de cálcio 15,5 (26,59), contendo na sua composição em percentagem de massa: azoto total (15,5%), azoto nítrico (14,4%), azoto amoniacal (1,1%) e óxido de cálcio (26,5%)); e o dihidrogenofosfato de amónio por dihidrogenofosfato de potássio ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ),

para se manter uma fonte de fósforo na solução, mantendo-se as concentrações iniciais. Para os restantes componentes foram utilizados reagentes adequados para o uso em laboratório.

A solução foi preparada diluindo os sais em água da chuva coletada nas instalações da estufa. Para alguns reagentes, cuja concentração na solução era muito reduzida, nomeadamente o sulfato de zinco, sulfato de cobre e o molibdato de sódio, foram previamente preparadas soluções de concentração mil vezes superior à necessária, que posteriormente foram diluídas na solução nutritiva.

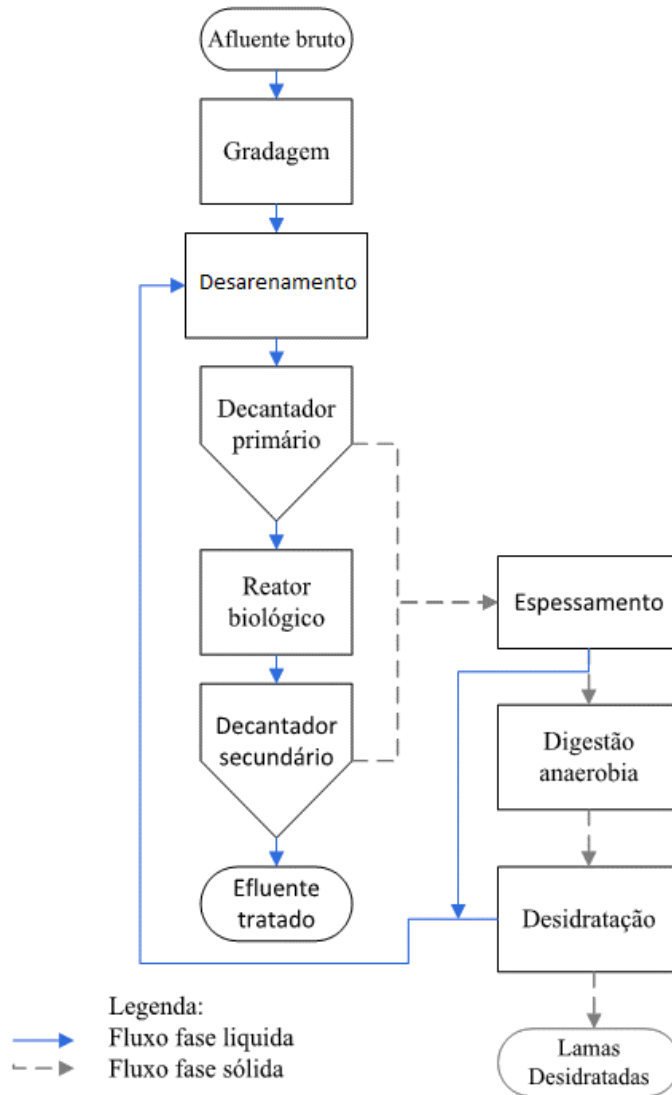
**Tabela 5:** Solução nutritiva proposta por Martinez & Silva Filho ( adaptado de Carvalho et al., 2018)

<b>Componente</b>	<b>Fórmula química</b>	<b>Concentração (mg/L)</b>
Nitrato de cálcio	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	900
Nitrato de potássio	$\text{KNO}_3$	134
Sulfato de potássio	$\text{K}_2\text{SO}_4$	280
Sulfato de magnésio	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	495
Cloreto de potássio	$\text{KCl}$	138
Dihidrogenofosfato de amónio	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	142
Cloreto de ferro	$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	11,97
Sulfato de manganês	$\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	3,39
Ácido bórico	$\text{H}_3\text{BO}_3$	2,92
Sulfato de zinco	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,49
Sulfato de cobre	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0,08
Molibdato de sódio	$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0,12
EDTA-dissódico	$\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{N}_2\text{O}_8\text{Na}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	16,42

A água da chuva, além de ter sido utilizada na preparação da SN, também foi utilizada para manter o volume das caixas constante, sendo acrescentada semanalmente de acordo com os consumos de água em cada caixa. A sua caracterização permitiu verificar que não apresentava risco de alteração das concentrações dos nutrientes nas caixas, ou outros parâmetros.

A água residual utilizada como fonte de nutrientes para a cultura foi recolhida na Estação de Tratamento de Águas Residuais (ETAR) das Olhalvas, localizada em Leiria, na proximidade da confluência do rio Lis com a Ribeira de Sirol. A estação trata águas residuais urbanas e o efluente tratado da ETAR é descarregado no rio Lis, a montante do centro da cidade de Leiria, tendo em conta a qualidade das águas superficiais e a área topográfica da ETAR. O tratamento da fase sólida que é efetuado na ETAR de Olhalvas tem em vista a valorização agrícola das lamas (Félix, 2017).

A Figura 4 apresenta um esquema dos processos de tratamento da AR realizada na ETAR de olhalvas, adaptado de Félix, (2017).



**Figura 4:** Esquema geral de tratamento da AR da ETAR de Olhalvas (adaptado de Félix, 2017)

Foi recolhida água em duas fases distintas do tratamento, nomeadamente à Saída do Decantador Primário (AR, SDP) e à Saída da Estação (AR, SE), após sofrer todo o tratamento disponível na ETAR. A tabela 6 reúne dados de caracterização da água residual fornecidos pela entidade gestora, referentes ao período compreendido entre janeiro e outubro de 2019, correspondentes às médias mensais das concentrações dos parâmetros monitorizados pela ETAR.

**Tabela 6:** Dados da caracterização da AR da ETAR de Olhavas no ano de 2019

<b>Água residual à saída do decantador primário (AR, SDP)</b>										
<b>Parâmetros</b>	<b>Jan</b>	<b>Fev</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>Mai</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Set</b>	<b>Out</b>
<b>CQO (mg O<sub>2</sub>/L)</b>	275,0	238,0	312,3	197,6	374,3	269,3	286,2	341,5	294,0	272,0
<b>pH</b>	7,6	7,5	7,5	7,6	7,4	7,5	7,5	7,4	7,5	7,5
<b>Sólidos suspensos totais - SST (mg/L)</b>	83,0	96,0	100,7	73,0	111,8	81,5	86,2	95,0	85,8	97,2
<b>CBO<sub>5</sub> (mg O<sub>2</sub>/L)</b>	148,8	131,7	201,7	125,0	206,3	157,5	157,0	190,0	124,5	122,5
<b>Azoto total (mg/L)</b>	65,3	47,9	52,6	32,6	55,1	64,0	56,6	63,9	59,6	130,0
<b>Fósforo total (mg/L)</b>	--	6,2	9,1	4,5	6,7	7,9	7,6	9,2	9,2	8,7
<b>Água residual à saída da estação (AR, SE)</b>										
<b>Parâmetros</b>	<b>Jan</b>	<b>Fev</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>Mai</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Set</b>	<b>Out</b>
<b>CQO (mg O<sub>2</sub>/L)</b>	60,3	41,1	47,1	40,4	63,5	66,7	55,2	48,5	44,2	87,6
<b>pH</b>	7,5	7,5	7,6	7,7	7,7	7,5	7,6	7,6	7,5	7,3
<b>SST (mg/L)</b>	21,0	10,8	15,7	7,8	20,1	22,3	10,4	10,8	22,6	73,6
<b>CBO<sub>5</sub> (mg O<sub>2</sub>/L)</b>	11,0	6,0	9,0	5,0	7,0	37,0	9,0	15,0	13,0	15,0
<b>Azoto total (mg/L)</b>	23,3	16,2	17,1	6,7	32,0	54,7	1,6	1,9	8,8	40,2
<b>Fósforo total (mg/L)</b>	--	2,3	3,7	3,2	2,9	7,1	5,4	7,0	12,0	19,3
<b>NH<sub>4</sub> (mg/L)</b>	29,1	20,5	21,6	7,3	41,1	70,5	1,0	1,0	1,1	47,1
<b>NO<sub>3</sub> (mg/L)</b>	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	6,6	7,1	34,9	16,1

Para além de se promover o crescimento da alface diretamente nestas amostras, também se estudou o crescimento nas águas residuais suplementadas com potássio, por este ser um nutriente essencial à cultura, que normalmente se encontra em baixas concentrações nas águas residuais.

Uma vez que, por limitações técnicas, não foi possível conhecer a concentração exata de potássio na AR na fase inicial do projeto, de acordo com análises anteriormente realizadas e com dados descritos em literatura por Arienzo et al., (2009), assumiu-se que o valor na AR seria inferior ao necessário para o crescimento da cultura estudada. Neste sentido procedeu-se a suplementação com sulfato de potássio ( $K_2SO_4$ ), numa concentração de 29 mg K/L. Optou-se por utilizar uma baixa concentração de potássio na suplementação, comparativamente com a concentração encontrada na SN, para não causar um desequilíbrio nas proporções de nutrientes na AR visto que as concentrações de outros nutrientes como N e P também eram baixas. A quantidade de sulfato de potássio utilizada foi a mesma em todos os ensaios, permitindo a comparação entre eles.

Foram realizados quatro ensaios, nos quais se estudou o crescimento da cultura em diferentes condições, conforme tabela 7.

**Tabela 7:** Ensaio de crescimento realizados

<b>Ensaio</b>	<b>Condições de crescimento</b>	<b>Objetivos</b>	<b>Observações</b>
<b>Crescimento em solução nutritiva</b>	4 caixas contendo SN	Determinar o tempo de crescimento da cultura em condições nutricionais ótimas	Decorreu entre 19/02/2020 e 26/03/2020 Sem monitorização dos parâmetros semanais nas últimas duas semanas *
<b>Ensaio preliminar com AR, SDP</b>	1 caixa com SN 1 caixa com AR, SDP 1 caixa com AR, SDP com suplementação em potássio	Ensaio no período de inverno. Testar a adaptabilidade da espécie à AR	Decorreu entre 11/03/2020 e 29/04/2020 Sem monitorização dos parâmetros semanais *
<b>Crescimento em AR, SDP e AR, SE (período de verão)</b>	2 caixas com SN 2 caixas com AR, SDP 2 caixas com AR, SDP com suplementação em potássio 2 caixas com AR, SE 2 caixas com AR, SE com suplementação em potássio	Ensaio no período de verão, com estudo adicional do crescimento em AR, SE	Decorreu entre 05/08/2020 e 09/09/2020
<b>Crescimento em AR, SDP e SE (período de inverno)</b>	2 caixas com SN 2 caixas com AR, SDP 2 caixas com AR, SDP com suplementação em potássio 2 caixas com AR, SE 2 caixas com AR, SE com suplementação em potássio	Ensaio no período de inverno. Comparar com o crescimento decorrido no verão, para as mesmas condições de crescimento	Decorreu entre 13/01/2021 e 04/03/2021 Sem monitorização dos parâmetros semanais entre 20/01 e 04/02 *

\* Restrições no âmbito das medidas de prevenção e de mitigação da pandemia de COVID-19

#### **4.4. Parâmetros de monitorização da qualidade da água usada no sistema hidropônico**

Por forma a verificar as condições de crescimento e estudar a sua influência na cultura procedeu-se a medições diárias, com a sonda multiparamétrica Hanna-HI9829, dos parâmetros de temperatura (T), pH, condutividade elétrica (EC), sólidos dissolvidos totais (SDT), oxigénio dissolvido (OD) e potencial de oxidação-redução (ORP).

O controlo da temperatura e do pH é requerido por se tratarem de características que afetam diretamente a produtividade e a qualidade do produto. A temperatura da solução afeta diretamente a solubilidade dos componentes, comprometendo a sua disponibilidade devido aos fenómenos de precipitação; também causa redução na absorção pela cultura, ou até morte das raízes, entre outros. O pH pode ser responsável pela morte das plantas, levar à competição entre os iões  $H^+$  e outros catiões essenciais e promover a precipitação de elementos essenciais (Furlani et al., 1999).

A condutividade elétrica é um dos parâmetros cuja monitorização é de extrema importância para garantir o bom funcionamento e eficiência dos sistemas hidropónicos. É uma forma de conhecer o teor de nutrientes na água. A concentração SDT na solução também está relacionada com o teor de nutrientes (Furlani et al., 1999).

A monitorização de OD permite assegurar que as raízes permanecem arejadas e têm capacidade de absorção de nutrientes (Furlani et al., 1999).

O parâmetro ORP também está relacionado com a concentração de nutrientes na solução, sendo que as reações de oxidação e redução medeiam o comportamento de muitos constituintes químicos da água. A reatividade e mobilidade de elementos importantes nos sistemas biológicos, bem como os de vários outros elementos metálicos, são fortemente dependentes das condições de oxidação-redução (APHA, 2005). O parâmetro ORP pode também ser utilizado na monitorização operacional da eficácia da desinfeção. É possível definir um nível mínimo de ORP necessário para garantir uma desinfeção eficaz. Este valor deve ser determinado caso a caso; valores universais não podem ser recomendados (OMS, 2008). Muitas substâncias biológicas como por exemplo as enzimas, vitaminas e muitos processos metabólicos estão fortemente ligados com o ORP da água. Valores de ORP podem indicar concentrações de CQO, OD,  $NO_3^-$  e  $NH_4^+$  na água residual. É um ótimo indicador da eficiência do tratamento em reatores aeróbicos, que têm maior eficiência em efluentes cujos valores de ORP estão entre os 250 e 300 mV. Valores de ORP mais altos (380 mV),

favorecem os processos de nitrificação em relação a oxidação de outros substratos orgânicos (Li & Bishop, 2002).

A caracterização da água utilizada nos ensaios também foi feita através de análises realizadas no Laboratório de Análise Instrumental da ESTG, para parâmetros físicos e químicos tais como, carência bioquímica de oxigênio ( $CBO_5$ ), carência química de oxigênio (CQO), azoto amoniacal ( $NH_4$ ), nitratos ( $NO_3$ ), nitritos ( $NO_2$ ), fósforo total (P-total), ortofosfatos ( $PO_4$ ), potássio (K) e ferro (Fe). Os métodos analíticos utilizados (tabela 8) para a caracterização estão de acordo com os recomendados pelo “*Standard methods for the examination of water & wastewater* (SMEWW)” (APHA, 2005), e outras normas.

**Tabela 8:** Métodos analíticos utilizados para quantificação dos parâmetros de qualidade da água

<b>Parâmetro</b>	<b>Método</b>	<b>Norma</b>	<b>Equipamento</b>
<b><math>CBO_5</math></b>	Teste dos cinco dias	SMEWW 5210 B	Medidor de oxigênio dissolvido Yellow Springs 5000
<b>CQO</b>	Método de digestão com dicromato de potássio em refluxo aberto	ISO 6060	Reactor CQO- Selecta-4000638
<b><math>NH_4</math></b>	Método colorimétrico do dicloroisocianurato de sódio	ISO 7150-1	Espectrofotômetro VARIAN-Cary 50 UV-vis
<b><math>NO_3</math></b>	Método colorimétrico da brucina	EPA 352.1	Espectrofotômetro VARIAN-Cary 50 UV-vis
<b><math>NO_2</math></b>	Método colorimétrico	SMEWW 4500- $NO_2^-$ B	Espectrofotômetro VARIAN-Cary 50 UV-vis
<b>P-total</b>	Digestão seguida de método colorimétrico do ácido ascórbico	SMEWW 4500-P-E	Espectrofotômetro VARIAN-Cary 50 UV-vis
<b><math>PO_4</math></b>	Filtração seguido de método colorimétrico do ácido ascórbico	SMEWW 4500-P-E	Espectrofotômetro VARIAN-Cary 50 UV-vis
<b>K e Fe</b>	Espectrometria de absorção atômica com chama	SMEWW 3111B	Espectrofotômetro de absorção atômica VARIAN- spectrAA 55B

Durante o período de crescimento da cultura, estes parâmetros também foram monitorizados semanalmente na água dos sistemas hidropônicos, para que se pudesse avaliar o seu consumo pelas plantas, eventuais carências de nutrientes na água residual e quantificar a possível melhoria da qualidade da água ao longo do processo.

Para isso, foi recolhido um volume de 0,75 L de cada caixa. Esse volume foi repostado utilizando água da chuva, e a diluição resultante desse processo foi tida em conta nos cálculos de concentração dos parâmetros.

A CBO é um dos parâmetros mais utilizados na determinação da poluição orgânica das águas superficiais e residuais. Mede a quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica presente numa AR, o que permite medir indiretamente a quantidade de matéria orgânica biodegradável na AR. Dados de CBO são utilizados na etapa de dimensionamento de ETAR, para medir a eficiência de alguns processos de tratamento e determinar o cumprimento das obrigações legais requeridas para tratamento de AR (APHA, 2005; Metcalf & Eddy, 2016).

A CQO também é utilizada como medida de poluição da água, traduzindo a quantidade de oxigênio necessária à oxidação de substâncias orgânicas e inorgânicas em condições específicas de tempo, temperatura e agente oxidante (APHA, 2005; Metcalf & Eddy, 2016).

O azoto e o fósforo são elementos essenciais ao crescimento de algas, para a produção agrícola e para a sobrevivência de outros organismos biológicos. O conhecimento das concentrações de azoto é essencial para avaliar a capacidade de tratamento da AR pelos processos biológicos, permitindo quantificar e sua remoção através destes processos; além disso, é importante no controle do crescimento de algas no meio recetor, pelo que as AR tratadas devem respeitar limites que não promovam fenómenos de eutrofização (Metcalf & Eddy, 2016). Nas AR o interesse pelas formas de azoto varia de acordo com o seu estado de oxidação. Assim, as formas de maior interesse são os nitratos, seguidos dos nitritos, ião amónio e azoto orgânico. O azoto na forma de nitrato é essencial aos organismos autotróficos fotossintéticos e, em alguns casos, é identificado como o nutriente limitante ao crescimento. A preocupação com a monitorização dos nitritos está associada à significância toxicológica das reações de nitrificação. A amónia é produzida pela conversão do azoto orgânico pelos microrganismos presentes no meio aquático, e a sua baixa concentração na AR é indicativa da eficácia dos processos de nitrificação (APHA, 2005). O Azoto nas plantas faz parte da composição das proteínas, dos ácidos nucleicos e da clorofila, estando ligado à formação de folhas (Furlani et al., 1999).

Controlar a concentração de fósforo na AR é essencial para a prevenção do crescimento prejudicial de algas em águas superficiais (APHA, 2005). O fósforo faz parte das membranas vegetais e interfere no metabolismo das plantas como fonte de energia. É importante para o crescimento das raízes, flores e frutos (Furlani et al., 1999).

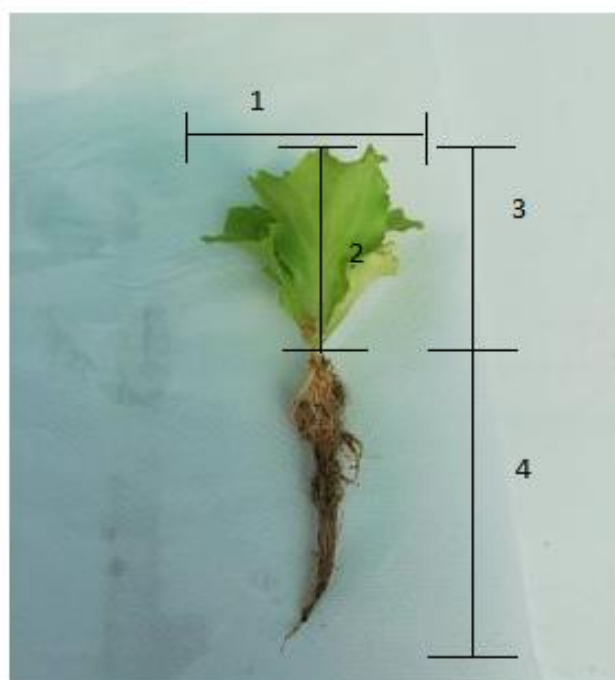
O potássio é um elemento essencial tanto na nutrição de plantas quanto na nutrição humana, existe na água subterrânea como resultado da dissolução mineral, da degradação de plantas,

e lixiviados agrícolas. Nas águas subterrâneas é encontrado em concentrações entre os 0,5 e os 10 mg/L, e nas águas superficiais em concentrações médias de 2,3 mg/L (APHA, 2005). O potássio é um ativador enzimático, atua na fotossíntese, na formação e translocação de açúcares nas plantas, e tem influência na resistência às pragas, à doenças, ao frio e à seca (Furlani et al., 1999).

O ferro é também um ativador enzimático importante na síntese da clorofila e dos citocromos, influencia a respiração, a fotossíntese e a fixação de azoto nas plantas (Furlani et al., 1999). O ferro e o potássio foram monitorizados na sua concentração dissolvida na água.

#### 4.5. Monitorização dos parâmetros da cultura

O controle do crescimento da cultura foi efetuado semanalmente, sempre que possível através de medições de parâmetros tais como, o número de folhas, o diâmetro ocupado pela folhagem, o comprimento da maior folha, a altura da planta e o comprimento da raiz (figura 5).



**Figura 5:** Esquematização dos parâmetros medidos nas plantas; Legenda: 1- Diâmetro ocupado pela folhagem; 2- Comprimento da maior folha; 3- Altura da Planta; 4- Comprimento da raiz;

O número de folhas considerado diz respeito apenas às folhas não secas e cujo comprimento seja aproximadamente  $\geq 2$ cm.

Os resultados são expressos em termos do crescimento médio das plantas para cada um dos parâmetros monitorizados. Os cálculos foram efetuados de modo a determinar o crescimento da cultura a cada setes dias. Quando não foi possível fazer a monitorização semanal, calculou-se o crescimento entre duas monitorizações consecutivas. O crescimento médio total ao fim do período de crescimento da cultura também foi representado graficamente, considerando as diferentes condições de crescimento. A avaliação integrou a análise de todos os exemplares colocados no sistema hidropônico no início de cada ensaio, com exceção dos dois primeiros estudos (secções 5.1.2 e 5.2.2), onde alguns exemplares não sobreviveram até o final do período de crescimento.

A avaliação qualitativa do aspeto da cultura foi feita segundo uma escala subjetiva de viçosidade e sanidade, conforme a tabela 9, abaixo apresentada.

**Tabela 9:** Escala para os parâmetros qualitativos de sanidade e viçosidade

<b>Sanidade das plantas (escala de 1 a 5)</b>	<b>Viçosidade das plantas (escala de 1 a 5)</b>
<b>1</b> - Plantas com muitos sintomas de doenças e folhas muito lesionadas	<b>1</b> - Plantas murchas, cor acastanhada e folhas pequenas secas
<b>2</b> - Plantas com alguns sintomas de doenças e folhas ligeiramente lesionadas	<b>2</b> - Plantas murchas e maioria das folhas amareladas
<b>3</b> - Plantas com poucos sintomas de doenças e folhas ligeiramente lesionadas	<b>3</b> - Plantas murchas e com alguma folha amarelada
<b>4</b> - Plantas com folhas ligeiramente lesionadas	<b>4</b> - Plantas aprumadas e cor verde amarelada
<b>5</b> - Plantas sem sintomas de doenças	<b>5</b> - Plantas aprumadas e com cor verde vivo

As plantas ficaram no sistema até atingir um estado adulto ideal para comercialização (entre 35 e 49 dias). Após a colheita, foi feita a pesagem da massa fresca das folhas e das raízes das plantas, e determinou-se o teor de humidade (TH) das folhas após secagem em estufa (SELETA Digiheat 150L–20001245) a 60°C, até peso constante. O cálculo do teor de humidade nas folhas deu-se pela equação 1.

$$TH(\%) = \frac{\text{massa fresca} - \text{massa seca}}{\text{massa fresca}} * 100$$

Eq.1

#### 4.5. Condições ambientais na estufa

As condições ambientais no interior da estufa são dependentes das condições ambientais no exterior, sendo que a estufa não dispõe de sistemas de aquecimento e o único sistema de arrefecimento são as aberturas laterais.

O perfil diário das condições ambientais no interior da estufa foi caracterizado ao longo de cada ensaio através da medição em contínuo da temperatura e humidade com um sensor LogTag HAXO-8, posicionado exatamente em cima da bancada de trabalho; e da medição da luminosidade, utilizando um luxímetro (KOBAN-KL1330), em diferentes pontos da bancada, tais como o centro e as extremidades (figura 6), fazendo-se essas medições em diferentes horários do período solar, nomeadamente ao início do dia, após o meio-dia, e ao final do dia. A bancada de trabalho foi posicionada à uma distância de cerca de 4 m das janelas laterais e 3 m da fachada frontal da estufa.



**Figura 6:** Localização dos pontos de medição da luminosidade

#### 4.6. Análise de toxicidade

A maior preocupação acerca da utilização de água residual em hidroponia é o seu impacto na saúde humana e o risco ambiental devido a presença de microrganismos patogénicos (Magwaza et al., 2020).

As análises de toxicidade foram realizadas com o intuito de avaliar os riscos associados ao consumo humano da cultura de alface proveniente do sistema hidropónico. Para determinação da toxicidade celular da cultura, procedeu-se à realização de ensaios de viabilidade celular com a linha de células Caco-2 de adenocarcinoma do cólon humano (*European Collection of Cell Cultures, UK*), como resposta à presença de extrato da alface. As amostras de alface utilizadas foram selecionadas aleatoriamente entre as plantas que cresciam em cada uma das condições de estudo (SN; AR, SDP; AR, SE; AR, SDP[K] e AR, SE[K]), tendo sido retiradas duas amostras por condição. Estas amostras foram recolhidas após retirada das plantas do sistema hidropónico, correspondendo a plantas do ensaio realizado no período de inverno (secção 5.4). A realização destes ensaios foi feita com o apoio da Doutora Daniela Vaz, e da Cristiana Pires do grupo de Química Biológica do Centro de Química da Universidade de Coimbra.

As células Caco-2 possuem a capacidade de se diferenciarem de forma espontânea em condições de cultura, apresentando características semelhantes às de enterócitos humanos maduros. Apesar da sua origem cólica, estas células expressam uma morfologia e funcionalidade semelhante às células do intestino delgado (Kamiloglu et al., 2015).

As células Caco-2 foram usadas entre as passagens 95 a 105 e foram rotineiramente cultivadas em frascos de cultura de 75 cm<sup>2</sup> e mantidas no meio de glicose, *Dulbecco's Modified Eagle's Medium* (DMEM) [4500 mg/L de glicose com 2 mM de L-glutamina, sem bicarbonato de sódio), suplementado com 10% v/v de soro fetal bovino inativado pelo calor, 1% v/v de aminoácidos não essenciais (NEAA) e 1% de penicilina (100 unidades/mL) - estreptomicina (10 mg/mL)], a 37 °C, 5% de CO<sub>2</sub>.

As células foram subcultivadas em 80-90% de confluência, duas vezes por semana (na proporção de subcultura 1: 8), usando uma solução 2,5% m/v de tripsina-EDTA (solução 10x). Depois foram semeadas em placas de 96 poços a uma densidade de 1x10<sup>4</sup> células/poço, em 200 uL de meio. As células foram então mantidas em cultura por 5 dias, com renovações de meio a cada dois dias. Monocamadas confluentes de células Caco-2 foram incubadas com

concentrações crescentes de material vegetal durante 24 horas. Seguidamente, o meio de cultura foi removido e substituído por 200  $\mu$ L de extrato de planta diluído em meio de cultura DMEM com diferentes concentrações (% massa/ volume folha seca liofilizada).

O ensaio MTT (brometo de 3-(4,5-dimetil-2-tiazolil)-2,5-difenil-2H-tetrazólio) foi usado para medir a viabilidade celular. Após a exposição aos extratos e antes da adição de MTT, as células foram lavadas com PBS (*Phosphate saline buffer* - Tampão fosfato salino que corresponde as concentrações 10 mM  $\text{NaH}_2\text{PO}_4/\text{Na}_2\text{HPO}_4$ , 140 mM NaCl, 2,7 mM KCl, pH 7,4), que pretende simular as condições dos fluidos fisiológicos do organismo humano. O meio MTT (0,5 mg/mL) foi adicionado a cada poço e incubado durante 4 horas, a 37 ° C. Em seguida, o meio foi descartado e os precipitados de formazano dissolvidos com dimetilsulfóxido (DMSO). Por fim, mediu-se a absorvância a 570 nm (BioTek *Absorbance microplate reader*, Bad Friedrichshall, Germany). As células incubadas com o DMEM, foram consideradas como controlo para viabilidade celular 100%. Cada ensaio foi realizado em triplicado.

## **5. Resultados e Discussão**

Os dados obtidos durante a monitorização do sistema foram tratados no Excel, e os resultados para cada parâmetro são apresentados e analisados neste capítulo, sendo feita a distinção entre os respetivos ensaios.

### **5.1. Crescimento em solução nutritiva**

Para determinar o tempo mínimo de crescimento da cultura realizou-se um ensaio preliminar, no qual se promoveu o crescimento da alface em condições nutritivas consideradas ótimas. Para isso utilizou-se um total de quatro caixas com 4 plantas cada, contendo a solução nutritiva preparada especificamente para o crescimento hidropónico de alfaces (tabela 5).

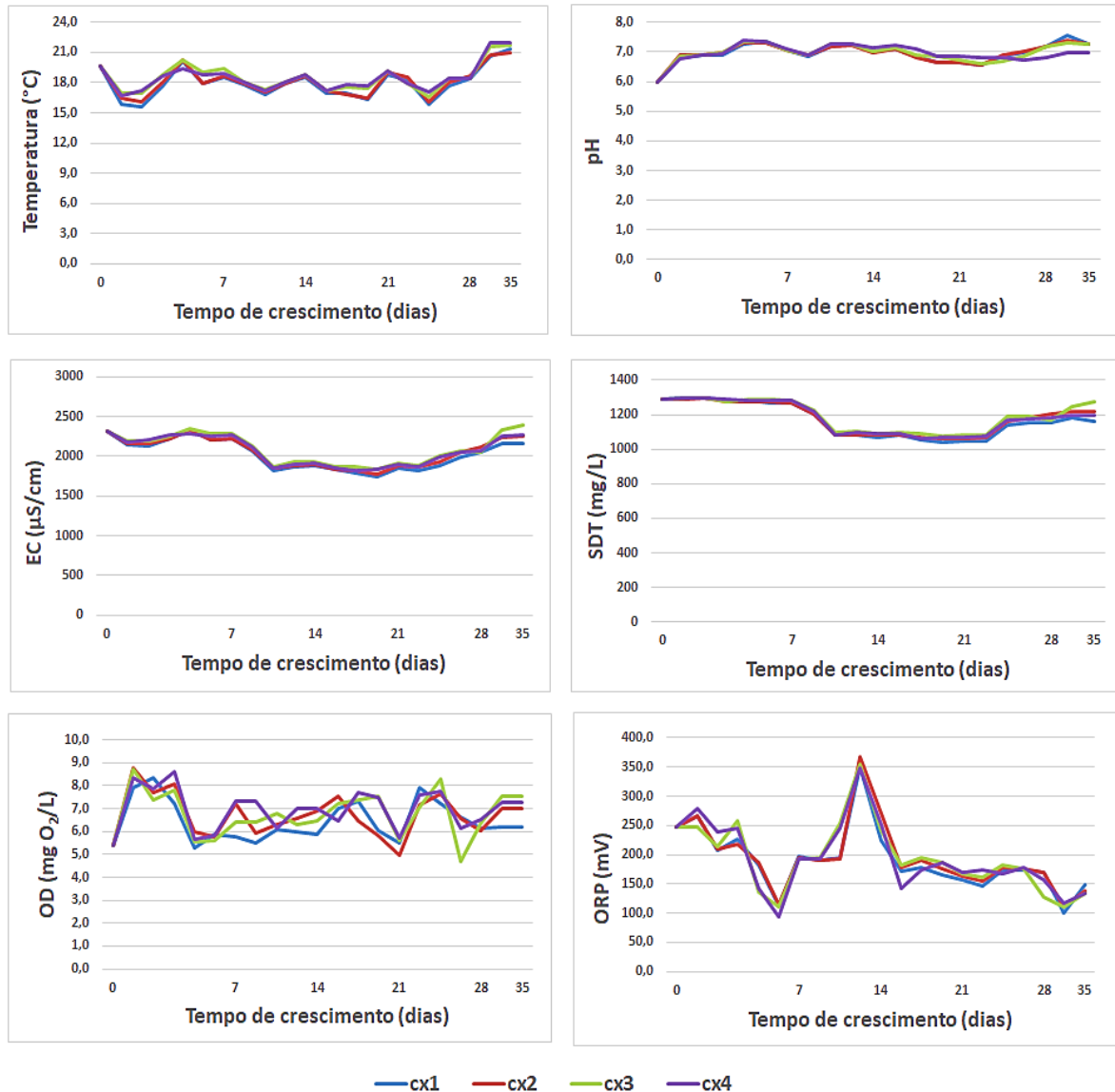
Este ensaio permitiu também verificar o funcionamento da instalação e verificar se a cultura selecionada se adaptava ao sistema.

As plantas utilizadas neste ensaio foram adquiridas num estágio avançado de crescimento e inseridas no sistema no dia 19/02/2020. Este ensaio teve a duração de 35 dias, tendo-se colhido as plantas no dia 26/03/2020, período correspondente ao final do inverno português.

### 5.1.1. Solução nutritiva e consumo de nutrientes

A monitorização das características da água contida no interior das caixas permitiu verificar as alterações decorridas na SN durante o crescimento da cultura e verificar o efeito que essas mudanças causaram na cultura.

A figura 7 reúne os dados da monitorização diária dos parâmetros T, pH, EC, SDT, OD e ORP nas caixas de hidroponia (cx 1 a 4).



**Figura 7:** Variação dos valores de T, pH, EC, SDT, OD e ORP durante o crescimento da cultura em SN

Quando comparados com os valores recomendados em literatura por Furlani et al.,(1999), os valores obtidos no presente trabalho mostram-se bastante satisfatórios, e sempre dentro das gamas recomendadas, à exceção dos valores de pH e de T (tabela 10).

**Tabela 10:** Comparação entre os valores medidos e os recomendados para os parâmetros T, pH, EC, SDT e OD durante o crescimento da alface em SN

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor Recomendado (Furlani et al., 1999)</b>	<b>SN</b>
<b>T(°C)</b>	18- 24 verão	15,6 a 22,0
	10-16 Inverno	
<b>pH</b>	5,5 a 6,5	6,0 a 7,5
<b>EC (µS/cm)</b>	1500 a 3500	1782 a 2395
<b>SDT (mg/L)</b>	1000 a 1500	1058 a 1299
<b>OD (mg O<sub>2</sub>/L)</b>	≥3	4,7 a 8,8

A variável temperatura tem um comportamento similar em todas as caixas, embora se tenham identificado dias onde houve pequenas diferenças nos valores (por exemplo, dois dias após a introdução das plantas no sistema verificou-se uma temperatura de 15,6 °C na cx1 e de 17,2 °C na cx4). Isto deve-se sobretudo ao posicionamento das caixas umas em relação às outras e, conseqüentemente, à sua exposição ao sol. Embora se tenha tentado uniformizar essa exposição através do sombreamento da bancada de trabalho, os dados mostram que essa ação não foi totalmente eficaz. Apesar da diferença, verificou-se um valor médio da temperatura de 18,3±0,2 °C, e acredita-se que a diferença entre as caixas não tenha tido impacto significativo no crescimento das plantas. A temperatura esteve, em média, acima da gama recomendada para o período de inverno (10 – 16 °C).

A monitorização do pH mostra um comportamento similar entre as caixas: um aumento na primeira semana, com tendência a oscilar durante o decorrer do ensaio. O valor médio obtido foi de 6,9, chegando a atingir-se um valor máximo de 7,5. Os valores medidos não se encontram em conformidade com a respetiva gama recomendada, podendo, juntamente com a temperatura, ser a causa das flutuações nos valores de SDT e EC, devido aos impactos na solubilidade de certos nutrientes, favorecimento da diminuição de aniões e a precipitação de elementos.

A temperatura pode afetar diretamente a solubilidade dos componentes, sendo esperado que dias mais quentes favoreçam a solubilização dos sais e dias mais frios a sua precipitação. Estas flutuações de salinidade têm efeito nos valores de EC e SDT, que determinam a

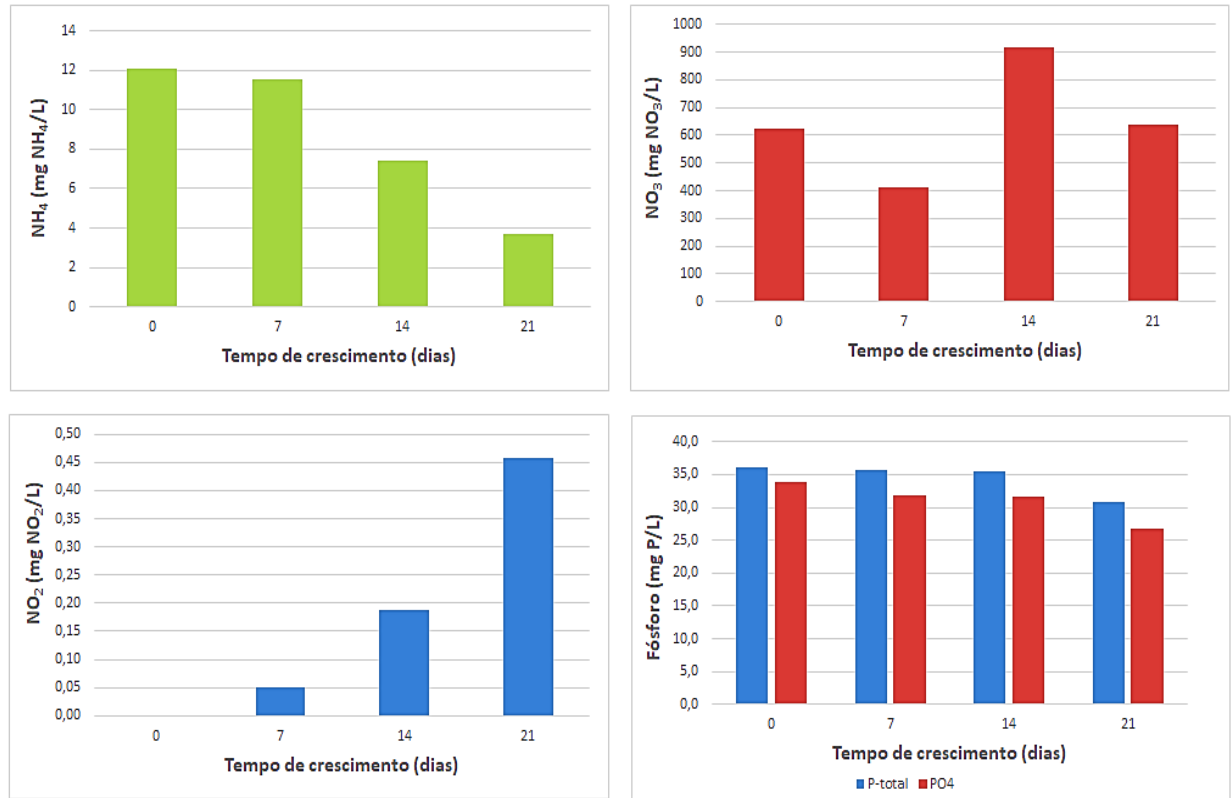
quantidade de íons na solução e conseqüentemente a carga de nutrientes. Os íons associados a EC são geralmente os macronutrientes ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{OH}^-$ ); os micronutrientes, por serem adicionados numa proporção baixa em relação aos macronutrientes, não têm efeito significativo na EC (Trejo-Téllez & Gómez-Merino, 2012). A EC na SN apresentou um valor médio de 2060  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e a concentração de SDT foi em média 1179 mg/L. A influência da temperatura nos valores de EC e SDT verifica-se pela diminuição nos seus valores em função da diminuição da temperatura; e no aumento, nos últimos dias, correspondente ao aumento da temperatura da água. Ambos estiveram dentro das gamas recomendadas.

A média dos valores medidos para o OD na solução nutritiva durante o período de crescimento da cultura foi de 6,5 mg  $\text{O}_2/\text{L}$ , tendo-se verificado que o arejamento das raízes foi sempre funcional. Os valores de OD estiveram sempre acima do valor mínimo recomendado (3 mg/L).

Valores de ORP entre 100–300 mV são característicos da presença de oxigênio livre na água, e também de uma ampla gama de elementos de altos graus de valência nomeadamente  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Mo}^{6+}$  e  $\text{Cu}^{2+}$  (Goncharuk et al., 2010). Valores de ORP acima 400 mV favorecem processos de redução de oxigênio, nitratos e manganês (III/IV), para valores de pH entre 7 e 8 (Sigg, 2000). O parâmetro ORP apresenta uma grande oscilação nos seus valores. O valor médio registado foi de 193,4 mV, sendo que, aos 13 dias de crescimento da cultura, atingiu um pico máximo acima dos 350 mV. Este parâmetro é representativo das trocas de íons que se dão na própria SN, e indica a presença de nutrientes na forma livre na SN, como por exemplo  $\text{Fe}^{3+}$ .

Os parâmetros  $\text{CBO}_5$  e CQO não foram monitorizados no ensaio com a SN uma vez que a sua formulação envolveu apenas a adição de sais inorgânicos. Nos estudos seguintes (secções 5.2 a 5.4), estes parâmetros foram monitorizados na SN, de modo a avaliar a diferença relativamente às concentrações apresentadas na AR recolhida na ETAR de Olhalvas, na qual a remoção de matéria orgânica durante o processo hidropônico se revela de maior importância na melhoria da qualidade da água.

As concentrações de azoto amoniacal ( $\text{NH}_4$ ), nitratos ( $\text{NO}_3$ ) e nitritos ( $\text{NO}_2$ ), fósforo total (P-total), ortofosfatos ( $\text{PO}_4$ ), foram monitorizadas semanalmente, até aos 21 dias de crescimento da cultura (figura 8), momento em que as análises foram interrompidas devido às restrições implementadas no âmbito da pandemia de COVID-19.



**Figura 8:** Variação das concentrações de azoto e fósforo durante o crescimento da cultura em SN

A alface, por ser maioritariamente composta por folhas, responde adequadamente ao consumo de azoto, e a sua deficiência retarda o crescimento da planta, induz a má formação da cabeça e o amarelecimento das folhas mais velhas (Grangeiro et al., 2006). A monitorização do nutriente azoto, na forma de  $\text{NH}_4$ ,  $\text{NO}_3$  e  $\text{NO}_2$ , permitiu verificar uma diminuição constante na concentração de azoto na forma de amónia, com redução de cerca 7,2 mg  $\text{NH}_4$ /L no período monitorizado. A concentração de  $\text{NO}_3$  apresentou oscilações, diminuindo numa semana e aumentando na seguinte, que podem estar relacionadas com o consumo pelas plantas e com a oxidação do  $\text{NH}_4$  via nitrificação. Pela concentração de nitritos verifica-se que se dá uma nitrificação do azoto, ocorrido pela oxidação do  $\text{NH}_4$ .

A quantidade de fósforo exigida pela alface é baixa de uma forma geral. A carência de fósforo além de afetar o desenvolvimento da planta, pode interferir no equilíbrio nutricional da cultura. (Grangeiro et al., 2006). Os resultados das análises laboratoriais permitiram

determinar uma concentração inicial de fósforo total e de ortofosfatos na SN de 35,4 e 33,8 mg P/L, respetivamente. Esses valores tenderam a diminuir com o crescimento da cultura, representando uma remoção de 14,3% do P-total e de 20,5% de PO<sub>4</sub>, o que se traduz num consumo de 5,2 e 6,9 mg P/L, respetivamente. De acordo com os resultados, verifica-se que o maior consumo ocorreu na terceira semana de crescimento, com diminuição acentuada nos valores de concentração de fósforo (P-Total e PO<sub>4</sub>), e que durante a segunda semana, a necessidade deste nutriente foi muito baixa.

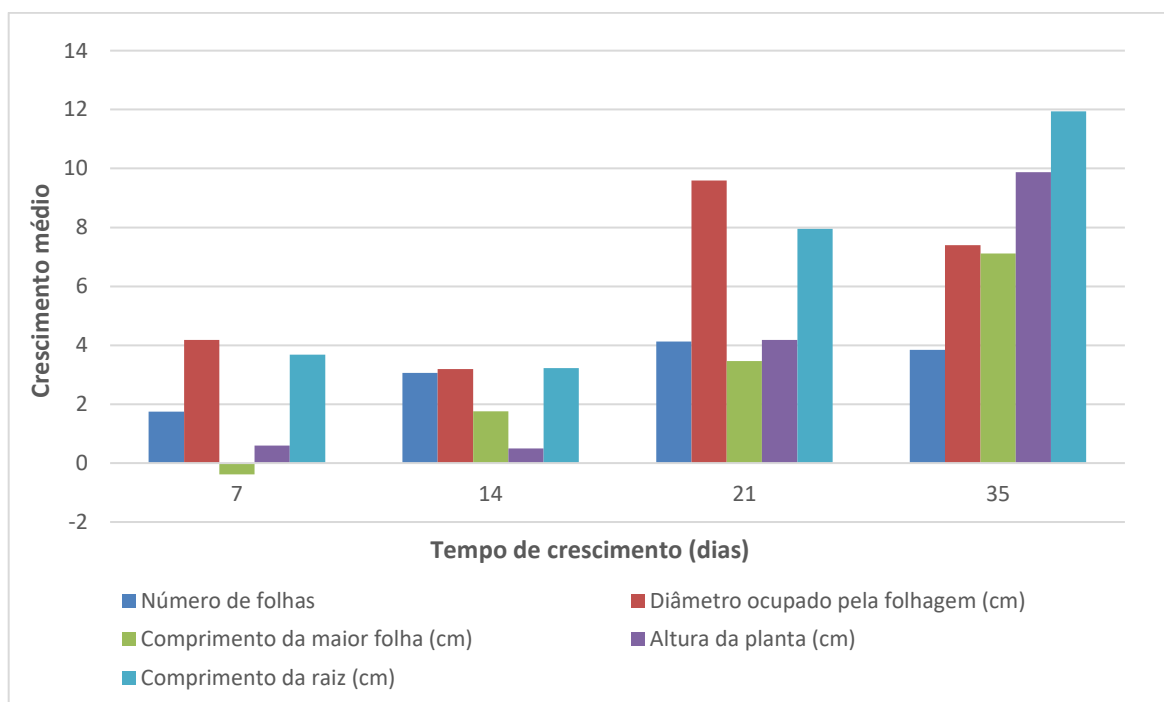
Por motivos técnicos não foi possível determinar as concentrações de potássio e ferro na SN durante o crescimento da alface neste período.

### 5.1.2. Crescimento da cultura

Os parâmetros de crescimento da cultura, tais como, o número de folhas, o diâmetro ocupado pela folhagem, o comprimento da maior folha, a altura da planta e o comprimento da raiz, foram medidos semanalmente até aos 21 dias de crescimento. A partir desta data, a monitorização foi interrompida, e estes parâmetros foram novamente medidos, apenas, no dia de colheita (ao fim de 35 dias). A interrupção foi devida às restrições de acesso implementadas no âmbito da pandemia de COVID-19.

Pela falta de supervisão, a redução do volume de água nas caixas, que ocorreu por evaporação e devido ao consumo pela cultura, levou a que algumas das plantas não sobrevivessem até ao final do ensaio. Assim, a avaliação dos parâmetros de crescimento considerou a análise de apenas 13 exemplares das 16 introduzidas inicialmente no sistema.

A figura 9 mostra o crescimento médio das plantas, atendendo aos parâmetros definidos para a caracterização, sendo possível verificar um crescimento limitado da cultura nos primeiros 14 dias, que foi superado no período entre os 14 e os 21 dias.

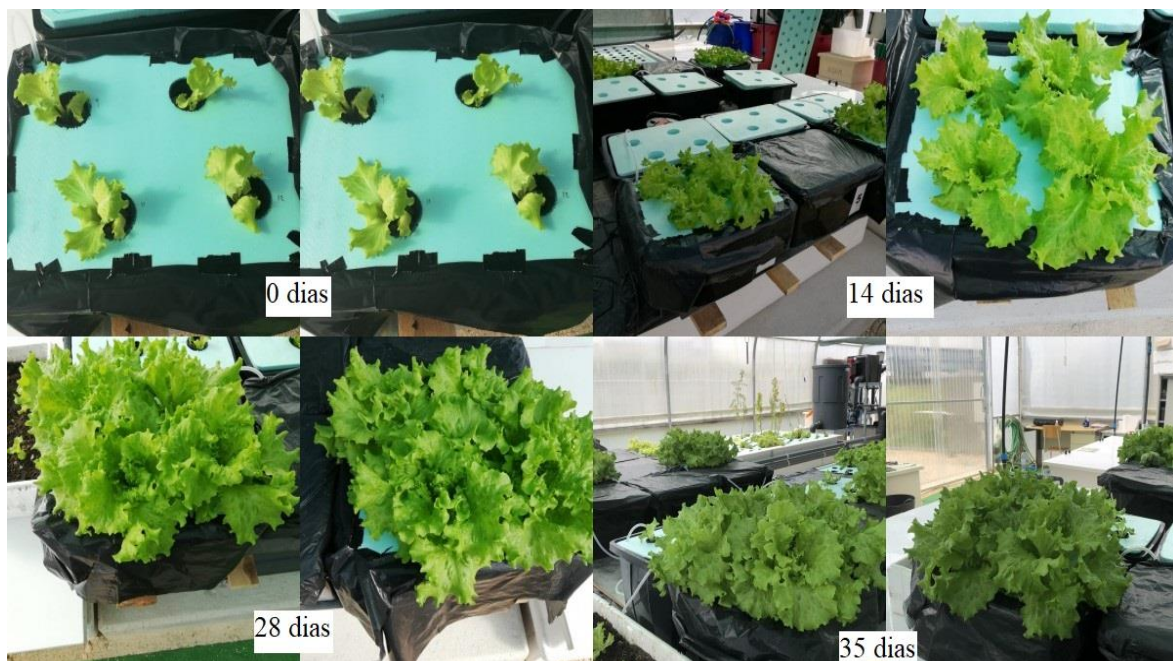


**Figura 9:** Crescimento médio da cultura no período de ensaio em SN

Na primeira semana, verificou-se uma redução no comprimento da maior folha, o que poderá ser justificado pelo período de adaptação das plantas de alface às novas condições de crescimento, já que estas foram transplantadas numa fase de crescimento avançado, levando a que as folhas maiores não resistissem e secassem.

O crescimento efetivo das plantas ocorreu 15 dias após a preparação do sistema hidropônico, tendo-se verificado o aumento em todos os parâmetros de avaliação a partir dessa data. Esta evolução também poderá estar relacionada com o período de adaptação das plantas. Neste período, o aumento mais evidente ocorreu no diâmetro ocupado pela folhagem. A raiz das plantas desenvolveu-se de forma bastante significativa.

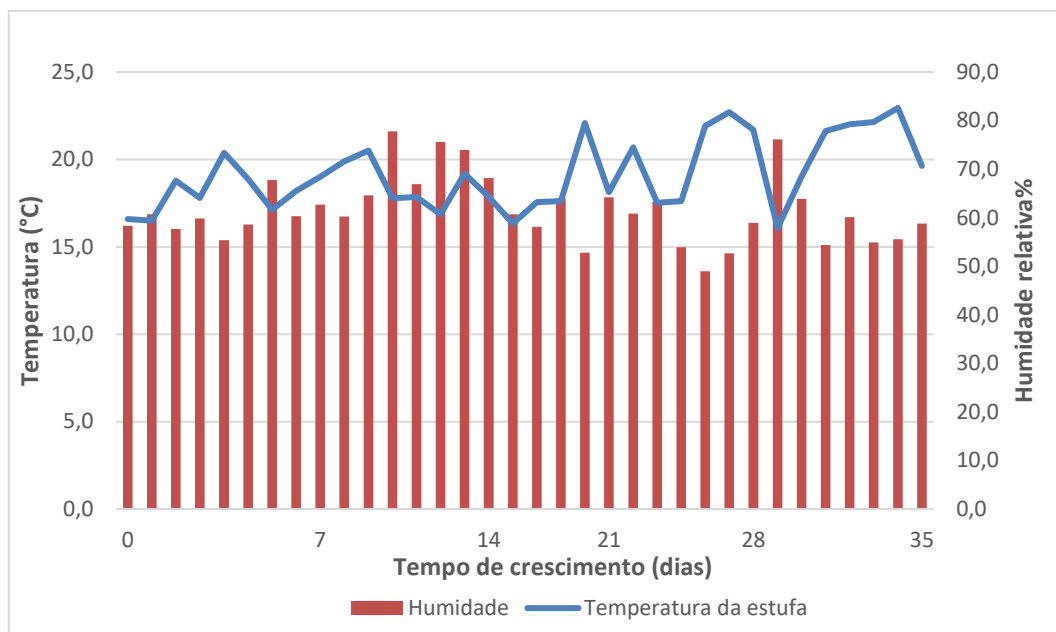
A avaliação qualitativa da cultura permitiu verificar que as plantas estiveram sempre vistosas (figura 10), não apresentaram sintomas visuais de doenças, estando os valores de sanidade e viçozidade sempre no topo das respectivas escalas.



**Figura 10:** Aspeto visual e crescimento da cultura em SN

### 5.1.3. Condições ambientais

A caracterização das condições ambientais para os parâmetros de temperatura e humidade relativa no interior do LSMI, durante o período de crescimento da cultura (figura 11), mostra que o valor médio da temperatura no interior da estufa foi de  $19,1 \pm 2,0$  °C, e a humidade relativa foi de  $61,5 \pm 6,8\%$ .



**Figura 11:** Temperatura e humidade no interior da estufa durante o crescimento em SN

No caso específico das alfaces, a ocorrência de temperaturas mais altas acelera o ciclo de crescimento, e resulta em plantas menores devido ao espigamento precoce, indicando-se geralmente que o seu crescimento ótimo ocorre a temperaturas entre 15 e 20 °C. A humidade relativa mais apropriada está entre os 60 e 80% (Rodrigues, 2015). Assim, os dados mostram que os valores de temperatura e de humidade registados durante o período de crescimento estão dentro da gama de valores recomendados para a cultura, constituindo boas condições de crescimento para as plantas e justificando o fato dos seus valores de sanidade e viçosidade estarem sempre no topo das respetivas escalas.

A temperatura no interior da estufa foi em média cerca de 0,8 °C superior à temperatura da água no interior das caixas, sendo que valores muito inferiores à temperatura do ar poderiam causar a incapacidade de aquisição de nutrientes pelas raízes.

O crescimento e o desenvolvimento das plantas são regulados pela qualidade da luz, intensidade da luz e fotoperíodo. As necessidades de luz das plantas variam de acordo com as espécies, modo de cultivo, estágios de crescimento e desenvolvimento da planta,

condições ambientais e objetivos de produção e qualidade (Ali et al., 2009). O aumento da intensidade da luz leva a diferenças significativas na biomassa acima do solo e ao aumento das atividades de enzimas antioxidantes, e provoca um leve *stress* na alface. Enquanto que é amplamente conhecido que a intensidade da luz pode afetar positivamente a acumulação fotoquímica, os efeitos da qualidade da luz (cor da luz) são mais complexos, obtendo-se frequentemente resultados que variam entre diferentes espécies (Ali et al., 2009; Kang et al., 2013).

O trabalho de Schoeninger et al. (2011) mostra que a variação da incidência solar não altera significativamente a altura das plantas de alface, porém, altera significativamente o seu diâmetro, sendo maior em plantas sujeitas a um sombreamento maior. Os autores concluíram que a utilização de mecanismos que visam o controle da radiação possibilitam um aumento na produção de fitomassa para a cultura da alface, e resulta num aumento do peso fresco. Outros resultados, como os de Kang et al. (2013), mostram que o aumento da intensidade da luz com fotoperíodo curto proporciona o aumento significativo no crescimento e desenvolvimento da alface cultivada em ambiente controlado.

Os dados de luminosidade (tabela 11), permitiram estimar um fotoperíodo entre 8-9 h diárias de luz, com uma intensidade luminosa média para os dias monitorizados de 7400 lux.

**Tabela 11:** Dados de luminosidade durante o crescimento da cultura em SN

<b>Luminosidade (klx)</b>						
<b>Data</b>	<b>Hora</b>	<b>Ponto 1 cx1</b>	<b>Ponto 2 cx2</b>	<b>Ponto 3 cx3</b>	<b>Ponto 4 cx4</b>	<b>Ponto 5 centro</b>
<b>19/02/2020</b>	12:30	7,46	9,85	11,82	12,51	6,67
	15:50	11,9	12,29	10,05	7,13	8,99
<b>20/02/2020</b>	10:00	9,86	8,54	9,51	8,99	8,15
	15:10	8,78	9,55	10,02	6,43	7,82
	17:30	0,8	1,09	0,7	0,66	0,86
<b>21/02/2020</b>	10:00	9,58	7,86	8,85	7,78	7,83
	11:55	9,36	8,30	10,30	13,23	8,04
	15:20	8,78	12,38	12,11	5,42	6,55
<b>24/02/2020</b>	10:40	9,35	9,22	9,38	9,7	9,55
	12:40	8,78	10,55	13,15	12,63	6,96
	15:10	9,35	10,74	9,2	7,48	8,84
<b>27/02/2020</b>	10:00	10,13	11,06	10,76	10,78	4,97
	12:40	10,54	10,42	10,82	11,46	7,35
	15:05	8,99	9,7	9,02	5,72	6,13
<b>03/03/2020</b>	10:00	7,48	7,4	5,99	5,06	5,78
	12:00	6,54	6,67	5,05	6,72	5,89
	17:30	0,79	0,89	0,63	0,60	0,83
<b>04/03/2020</b>	10:00	2,91	2,82	2,77	2,71	2,5
	12:00	7,35	7,77	6,02	5,34	5,5
	18:20	0,05	0,05	0,02	0,02	0,03
<b>05/03/2020</b>	10:00	9,48	8,54	7,58	8,94	9,14
	15:00	4,82	4,66	3,41	3,42	3,70
	17:45	0,99	0,99	0,94	0,95	1,04
<b>06/03/2020</b>	11:00	3,33	3,95	3,85	2,96	3,5
	13:00	15,47	13,96	13,94	13,71	8,78
	15:30	10,75	11,25	9,06	6,57	7,4
<b>10/03/2020</b>	11:00	7,37	7,34	12,44	12,79	9,01
	15:50	13,5	14,02	6,68	5,93	5,97
	17:30	0,88	1,15	0,97	0,99	1,14
<b>12/03/2020</b>	11:00	9,55	9,36	9,69	11,42	10,55
	15:30	11,05	9,83	8,29	5,93	8,25
	17:40	0,95	0,97	0,99	1,01	0,98

As medições efetuadas também permitiram verificar que a intensidade luminosa era diferente nos diferentes pontos da bancada de trabalho, com intensidade mais fraca no centro da bancada, e mais forte do lado direito (correspondente à localização das caixas 3 e 4, usadas no ensaio). Atendendo aos resultados de crescimento e consumo de nutrientes semelhantes entre as caixas, considera-se que a diferença não teve efeitos significativos na cultura.

## 5.2. Crescimento em água residual proveniente do decantador primário

Neste ensaio utilizou-se um total de três caixas, contendo 4 plantas cada, em crescimento em solução nutritiva, AR recolhida à saída do decantador primário (AR, SDP) da ETAR de Olhalvas ou AR, SDP com suplementação em potássio (AR, SDP[K]). As caixas utilizadas foram posicionadas do mesmo lado da bancada, de modo a privilegiar condições de luminosidade semelhantes (Figura 12).



**Figura 12:** Posição das caixas durante o ensaio de crescimento da cultura em SN; AR, SDP e AR, SDP[K]

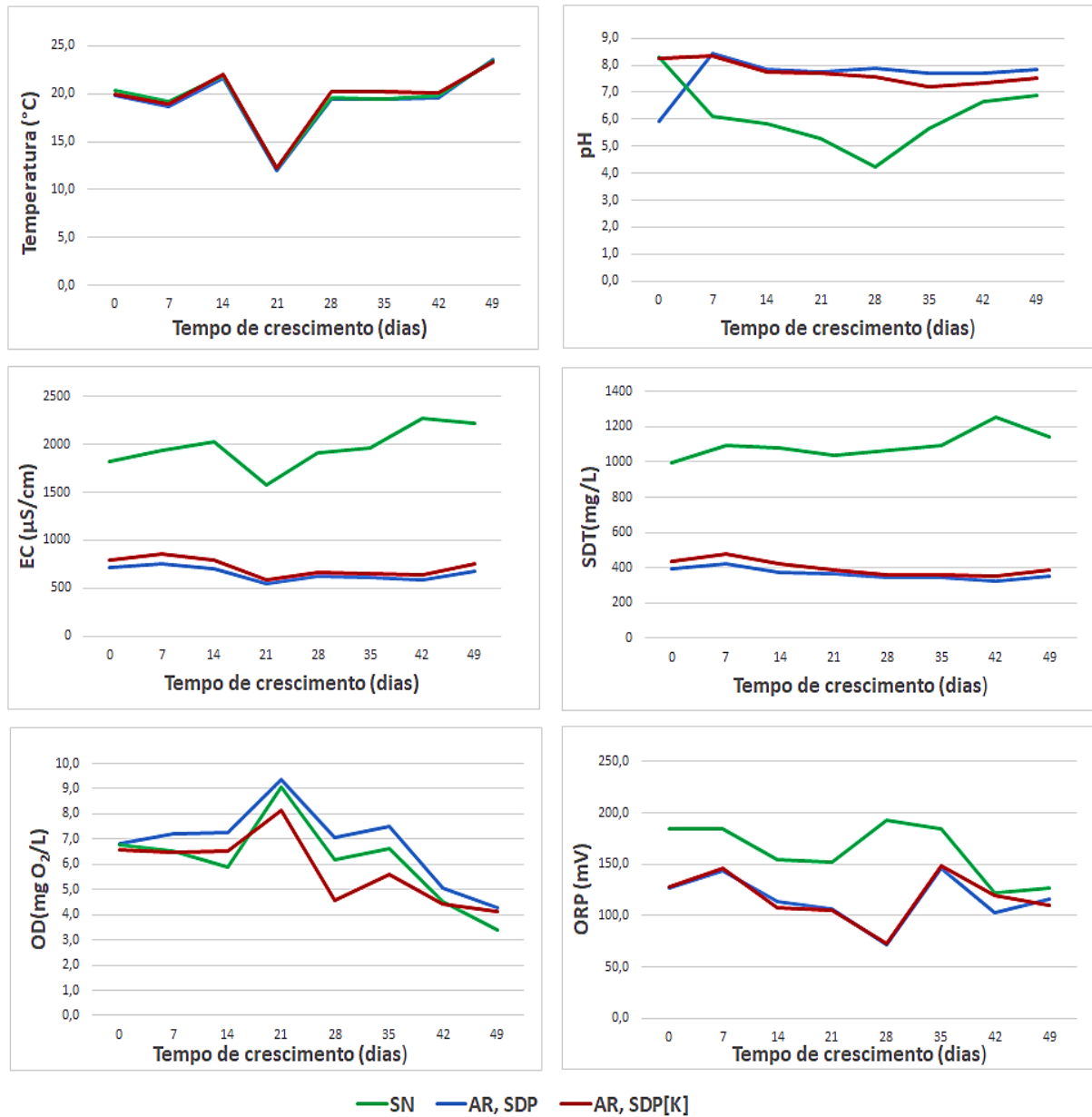
Durante o ensaio, compararam-se os parâmetros de crescimento das plantas, para que se pudesse avaliar a influência da AR no seu desenvolvimento e verificar a viabilidade da sua utilização como fonte de nutrientes no cultivo hidropônico de alfaces, tendo como controle positivo o crescimento em SN.

As doze plantas utilizadas no ensaio foram adquiridas em viveiros. Foram inseridas no sistema no dia 11/03/2020, e colhidas no dia 29/04/2020, durante o período correspondente à primavera.

A duração do ensaio foi superior aos 35 dias previstos pelo ensaio de crescimento em SN, tendo sido necessário que as plantas estivessem no sistema até aos 49 dias, para alcançarem um crescimento satisfatório para a colheita.

### 5.2.1. Qualidade da água e consumo de nutrientes

Atendendo à situação pandémica, não foi possível proceder à monitorização diária dos parâmetros de T, pH, EC, SDT, OD e ORP, sendo monitorizados apenas três vezes por semana durante o período de crescimento da cultura (figura 13).



**Figura 13:** Variação dos valores de T, pH, EC, SDT, OD e ORP durante o crescimento da cultura em SN; AR, SDP e AR, SDP[K]

A tabela 12 permite comparar os valores medidos com os recomendados por Furlani et al.,(1999).

**Tabela 12:** Comparação entre os valores medidos e os recomendados para os parâmetros T, pH, EC, SDT e OD durante o crescimento em SN; AR, SDP e AR, SDP[K]

Parâmetro	Valor recomendado (Furlani et al., 1999)	SN	AR, SDP	AR, SDP[K]
T (°C)	18- 24 verão	12,3 a 23,4	12,0 a 23,5	12,2 a 23,3
	10-16 Inverno			
pH	5,5 a 6,5	4,2 a 8,3	5,9 a 8,3	7,2 a 8,3
EC (µS/cm)	1500 a 3500	1573 a 2268	553 a 748	586 a 854
SDT (mg/L)	1000 a 1500	997 a 1257	325 a 425	353 a 482
OD (mg O <sub>2</sub> /L)	≥3	3,4 a 9,1	4,3 a 9,4	4,1 a 8,1

A temperatura média para ambas as condições foi de cerca de 19 °C, e o comportamento desta variável foi semelhante ao longo do tempo. No período entre os 14 e 21 dias observou-se uma diminuição significativa da temperatura da água, o que está relacionado com a diminuição da temperatura no interior da estufa. Atendendo aos valores registados, assume-se que as condições de temperatura estiveram na gama considerada ótima para o período, que corresponde à primavera.

Existe uma diferença significativa entre os valores de pH medidos na AR e na SN, sendo que os valores de pH são inferiores na SN, com um valor médio de 6,1 *versus* 7,6 na AR. Os valores registados evidenciam a necessidade de ajuste de pH, tanto na SN como na AR, para que possam satisfazer as condições favoráveis ao crescimento em hidroponia. Uma análise mais detalhada indica que a situação é menos preocupante no caso da SN uma vez que os valores de pH se encontraram tendencialmente dentro da gama, com um pico abaixo dos valores recomendados aos 28 dias de crescimento da cultura (figura 13). Os valores de pH na AR estiveram maioritariamente acima dos valores da gama recomendada.

As variáveis EC e SDT relacionam-se entre si, e são medidas da concentração de sais dissolvidos na solução. Na SN a concentração de nutrientes é maior e conseqüentemente apresenta valores mais elevados de EC e SDT. Na AR (com e sem suplemento em K) observa-se uma tendência para valores estáveis durante o período em análise, enquanto na SN se identificam picos bastante acentuados. Pela comparação com as gamas recomendadas,

identifica-se a necessidade de aumentar a concentração de nutrientes na AR para atingir os valores recomendados de EC e SDT.

Os valores de OD apresentam comportamento semelhante entre si, embora na AR, SDP suplementada com K esses valores sejam inferiores na maior parte do tempo de ensaio. A oxigenação garantiu que os níveis de OD estivessem sempre acima do mínimo recomendado (3 mg/L). Contudo, segundo Trejo-Téllez & Gómez-Merino (2012), os valores observados abaixo dos 4 mg/L de oxigênio dissolvido inibem o crescimento das raízes e produzem mudança de cor para um tom acastanhado, que pode ser considerado um dos primeiros sintomas da carência de oxigênio na planta. Pela figura 13 pode observar-se que a redução da concentração de OD na água se deu no período final de crescimento da cultura, período correspondente à redução do volume de água nas caixas, o que ocorreu pela falta de monitorização e manutenção do sistema.

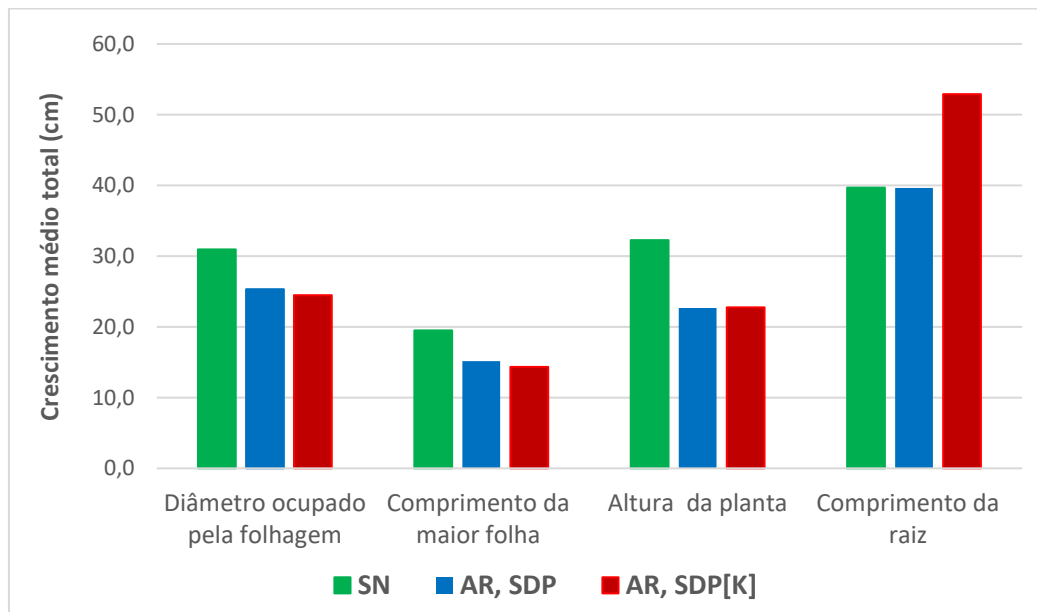
Os valores de ORP são mais elevados na SN, com uma média de 162,7 mV; e inferiores na AR, com média de 115,8 mV na AR, SDP e 117,16 mV na AR, SDP[K]. Apesar disso, o comportamento da variável ao longo do tempo tende a ser semelhante nas três condições, embora os picos na AR sejam mais acentuados. Por ter uma concentração de íons mais elevada, é esperado que ocorram mais trocas de elétrons na SN, o que justifica os valores superiores de ORP. Valores acima dos 100 mV são característicos de uma boa oxigenação da água, para além de uma maior concentração de íons livres, tornando-os mais acessíveis a cultura.

Não foi possível monitorizar os parâmetros físicos e químicos, tais como, carência bioquímica de oxigênio (CBO<sub>5</sub>), carência química de oxigênio (CQO), azoto amoniacal (NH<sub>4</sub>), nitratos (NO<sub>3</sub>), nitritos (NO<sub>2</sub>), fósforo total(P-total), ortofosfatos (PO<sub>4</sub>), potássio (K) e ferro (Fe) durante o período de crescimento da cultura, devido às restrições de acesso ao estabelecimento no contexto da pandemia de COVID-19.

### 5.2.2. Crescimento da cultura

Pela falta de supervisão, a redução do volume de água nas caixas, devido à evaporação e ao consumo pela cultura, levou a que uma das plantas que crescia na SN não sobrevivesse até ao final do ensaio. Assim, a avaliação dos parâmetros de crescimento considerou a análise de apenas 3 exemplares por condição de crescimento. Atendendo às restrições de acesso ao laboratório, só se procedeu às medições pretendidas no início e no final do período de ensaio, e só foi possível analisar o crescimento total da cultura.

Os resultados obtidos evidenciam que o crescimento é maior na SN relativamente aos parâmetros: diâmetro ocupado pela folhagem, comprimento da maior folha e altura da planta. Contudo, para o parâmetro comprimento da raiz, o sistema com AR suplementada em potássio (AR, SDP[K]) teve maior desenvolvimento (figura 14).



**Figura 14:** Crescimento médio total da cultura durante o crescimento em SN; AR, SDP e AR, SDP[K]

O estudo de Sapkota et al., (2019), identifica diferenças significativas no comprimento das folhas e das raízes de alfaces que cresciam em diferentes soluções nutritivas. Associaram o menor crescimento das raízes e das folhas, com as baixas concentrações de nutrientes (K, N, Ca), e também foi observado que uma solução com concentrações excessivas desses nutrientes, produziu raízes curtas, não sendo recomendável em hidroponia. Kay et al., (1990), aponta as altas concentrações de azoto como supressoras do metabolismo das raízes, o que faz com que haja limitação no seu crescimento.

Embora os dados de crescimento da cultura indiquem um crescimento inferior ao que se verifica na SN, a AR, SDP aparenta ter potencial para servir de fonte de nutrientes no cultivo hidropónico de alfaces. Os dados referentes aos parâmetros de pH, EC, e SDT sugerem a necessidade de ajuste das gamas recomendadas, acreditando-se que ao proceder a estes ajustes, através de uma solução contendo os nutrientes deficitários, se possa vir a ter resultados de crescimento na AR próximos dos obtidos na SN.

O crescimento na AR suplementada com K foi semelhante ao da AR sem suplementação, indicando que a suplementação em potássio, embora necessária, não permite dar resposta às necessidades da cultura nos termos em que foi realizada. Assim, torna-se também necessário, não só adaptar a quantidade de K a utilizar, para dar respostas às necessidades da cultura, mas também identificar os nutrientes que, para além do K, poderão contribuir para melhorar a produção da cultura.

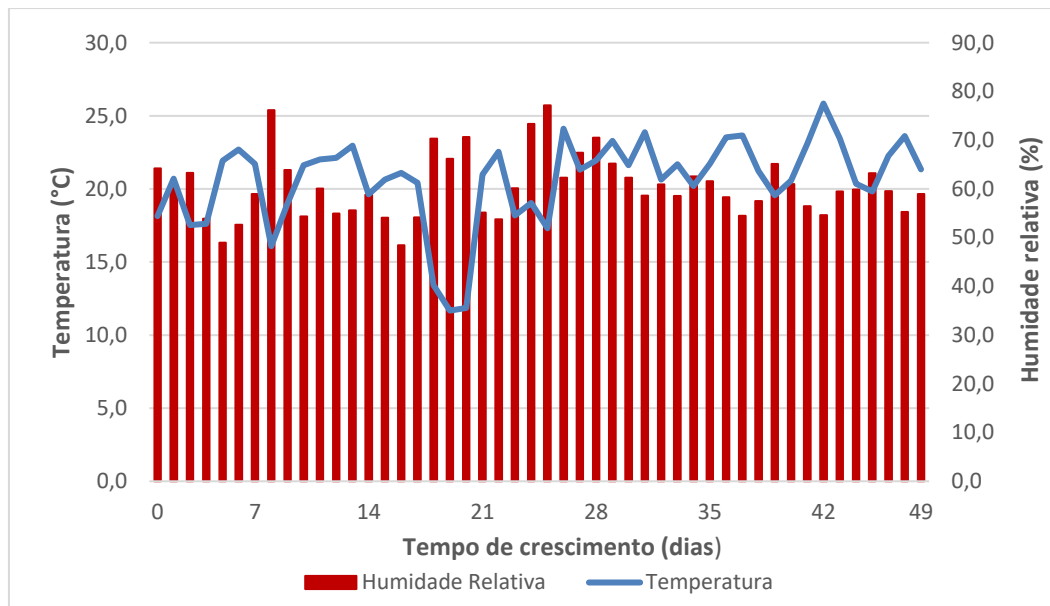
A figura 15 mostra o aspeto visual e o crescimento da cultura durante o período do ensaio. A avaliação qualitativa permitiu identificar que os valores de sanidade e viçosidade da cultura estiveram sempre no topo das respetivas escalas. Não se verificaram sinais de doença e o aspeto visual da cultura era adequado aos padrões de consumo.



**Figura 15:** Aspeto visual e crescimento da cultura em SN; AR, SDP e AR, SDP[K]

### 5.2.3. Condições ambientais

As condições ambientais no interior da estufa foram caracterizadas em contínuo, para os parâmetros de temperatura e humidade relativa do ar (figura 16).



**Figura 16:** Dados de temperatura e humidade no interior da estufa durante o crescimento da cultura em SN; AR, SDP e AR, SDP[K]

O valor da temperatura foi em média  $20,2 \pm 3$  °C e a humidade relativa de  $60,49 \pm 6\%$ . Os valores de temperatura do ar estiveram, em média, sempre acima dos valores recomendados para o crescimento da cultura, que ocorre a temperaturas entre 15 e os 20 °C, tendo-se atingido um valor máximo de 23,49 °C, que não sendo a ideal, se considera suportável pela cultura, já que Rodrigues (2015) reporta um máximo de 30 °C como possível para o crescimento desta espécie. Alguns valores de humidade relativa registados durante o período de crescimento fugiram da gama de valores recomendados para a cultura ,estando abaixo dos 60%, contudo segundo Rodrigues,( 2015), em determinadas fases do ciclo, a alface pode desenvolver-se melhor com humidade relativa abaixo dos 60%.

A temperatura média da água no interior das caixas foi cerca de 1,2 °C inferior à temperatura no interior da estufa. Este valor é próximo da temperatura do ar e, portanto, considera-se que não é prejudicial ao desenvolvimento da cultura.

Durante o período em que decorreu este ensaio, devido às restrições de acesso ao estabelecimento devido à pandemia de COVID-19, não foi possível monitorizar os dados de luminosidade.

### **5.3.Crescimento em AR proveniente do decantador primário e em AR recolhida à saída da estação de tratamento no período de verão**

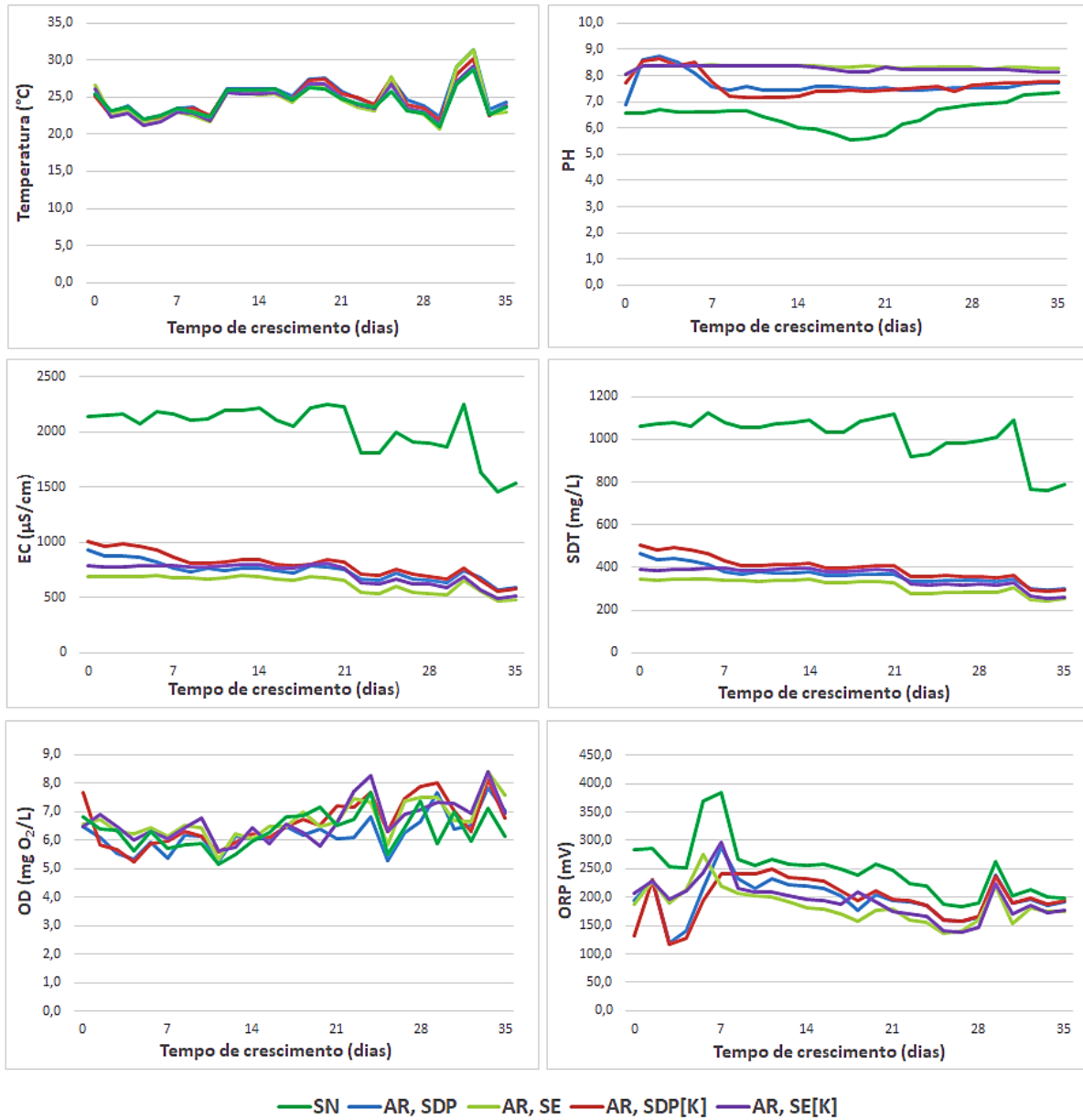
Neste ensaio procedeu-se à avaliação do potencial de utilização da AR recolhida à saída do decantador primário (AR, SDP) e da AR recolhida à saída da estação de tratamento (AR, SE), como fonte de nutrientes, no cultivo hidropónico de alfaces. Atendendo à necessidade prevista de suplementação em potássio, também se estudou o crescimento da alface nestas AR suplementadas com potássio (AR, SDP[K], e AR, SE[K]). De forma a permitir a comparação com os ensaios anteriores, a razão de suplementação, apesar de não ser a ideal, foi mantida constante.

A água residual AR, SDP é mais rica em nutrientes comparativamente com a AR, SE, pelo que se considera que poderá ser mais interessante sob o ponto de vista de reutilização na hidroponia. No entanto, o estudo do crescimento da alface em AR, SE é relevante, uma vez que, por esta ter sofrido um tratamento secundário, será mais segura para uso em produção agrícola, segundo recomendações da OMS.

Para o ensaio utilizou-se um total de 10 caixas, duas para cada condição de crescimento acima descrita, totalizando 8 caixas, e outras duas para o crescimento em SN, utilizada como controlo positivo. Utilizaram-se quatro plantas por caixa o que se traduz num total de 8 plantas de alface por condição de crescimento. As plantas de alface foram adquiridas de viveiro e o tempo de crescimento da cultura foi de 35 dias, entre 05/08/2020 e 09/09/2020, período correspondente ao verão português.

### 5.3.1. Qualidade da água e consumo de nutrientes

Os resultados da medição diária dos parâmetros de T, pH, EC, SDT, OD e ORP são apresentados na figura 17.



**Figura 17:** Variação dos valores de T, pH, EC, SDT, OD e ORP durante o crescimento da cultura em SN; AR,SDP; AR,SE; AR,SDP[K] e AR,SE[K] no período de verão

A comparação dos valores medidos com as gamas recomendadas na literatura para os parâmetros em estudo (tabela 13), indica que as medidas de T, pH, EC e SDT na AR não se integram totalmente na gama recomendada.

**Tabela 13:** Comparação entre os valores medidos e os recomendados para os parâmetros T, pH, EC, SDT e OD durante o crescimento da cultura em SN; AR,SDP; AR SE; AR,SDP[K] e AR SE[K] no período de verão

Parâmetro	Valor recomendado (Furlani et al., 1999)	SN	AR, SDP	AR, SDP[K]	AR, SE	AR, SE[K]
T(°C)	18 a 24, verão	21,0 a 28,8	22,1 a 31,3	21,9 a 30,2	20,7 a 31,4	21,2 a 28,8
pH	5,5 a 6,5	5,5 a 7,3	6,9 a 8,7	7,2 a 8,6	8,1 a 8,4	8,0 a 8,4
EC (µS/cm)	1500 a 3500	1454 a 2256	572 a 932	554 a 1009	468 a 694	487 a 806
SDT (mg/L)	1000 a 1500	759 a 1126	296 a 466	291 a 504	245 a 397	255 a 347
OD (mg O <sub>2</sub> /L)	≥3	5,1 a 7,7	5,3 a 7,9	5,2 a 8,1	5,3 a 8,4	5,6 a 8,4

Os valores da temperatura na água apresentam o mesmo comportamento em todas as condições, com valores próximos entre si. A temperatura média da água durante o ensaio foi de 24,4±2 °C, estando sujeita a variações consoante a intensidade solar no período diurno, que conduziram a valores máximos de 31,4 °C. Embora a temperatura média da água tenha apresentado valores próximos do máximo recomendado, muitas vezes ultrapassou os 30 °C, principalmente nos horários correspondentes à maior intensidade de radiação solar, tendo-se verificado, nesses períodos, que as plantas se encontravam murchas.

Os dados de pH mostram que a variação mais significativa ocorrida neste parâmetro, durante o período de crescimento, se verifica na SN, atingindo-se um mínimo de 5,5. Os valores variaram na gama recomendada, exceto na última semana, onde se registou um máximo de 7,3. Nesta solução, o pH manteve-se sempre inferior aos valores medidos na AR, embora no final do ensaio, se tenha aproximado do observado nas restantes condições. Observou-se também que, embora na primeira semana de crescimento, os valores medidos na AR, SDP e na AR, SE fossem próximos, no decurso do ensaio, passou a registar-se diferença entre as duas condições. O pH na água residual esteve sempre acima da gama recomendada, pelo que se acredita que o pH tenha influenciado a precipitação de alguns nutrientes na água residual SDP, o que justificaria o atraso no crescimento da cultura nessas condições, devido à acumulação de sólidos junto às raízes das plantas. O mesmo não ocorreu na água residual SE, pelo facto de ter uma concentração de sólidos inferior, bem como de nutrientes.

O aumento da temperatura promove o aumento na EC e na concentração de SDT da água, pelo que estas três variáveis têm comportamento semelhante, sendo mais evidente para a SN, onde os valores de EC e SDT são mais elevados. O consumo de nutrientes pela cultura, necessário ao seu desenvolvimento, causa uma diminuição nos valores de EC e SDT durante o período de ensaio. Os valores medidos na SN estiveram dentro da gama recomendada durante a maior parte do tempo de crescimento, mas na AR, estiveram sempre abaixo dos valores recomendados (tabela 13).

Os dados de OD apontam para uma correta oxigenação das raízes e, mais uma vez, não se notam diferenças significativas entre as condições de crescimento, estando acima do valor mínimo recomendado em literatura (3 mg/L).

Os valores de ORP são maiores na SN, com uma média de 248,7 mV, verificando-se uma diferença de cerca de 54,4 mV em relação aos valores medidos na AR. O comportamento da variável ao longo do tempo tende a ser semelhante entre as condições. A diferença observada entre os valores de ORP na SN e na AR pode estar associada a concentrações de iões livres na SN, que é superior.

A caracterização da água no início do ensaio para os parâmetros de CBO<sub>5</sub>, CQO, NH<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, P-total, PO<sub>4</sub>, K e Fe é apresentada na tabela 14.

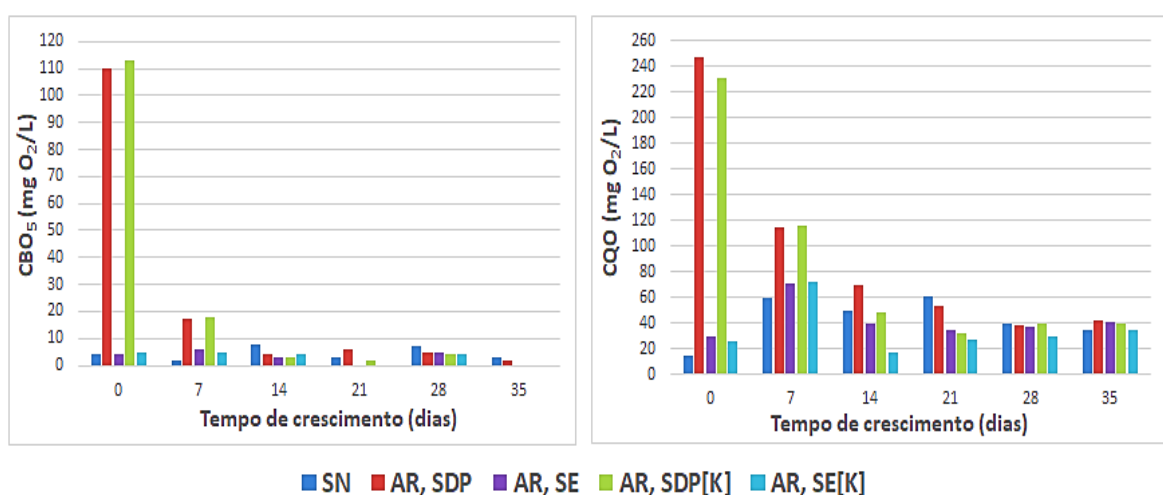
**Tabela 14:** Concentrações iniciais de CBO<sub>5</sub>, CQO, P-total, PO<sub>4</sub>, NH<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, K e Fe na SN e na AR no período de verão

Parâmetros	Amostra				
	SN	AR, SDP	AR, SDP[K]	AR, SE	AR, SE[K]
<b>CBO<sub>5</sub> (mg O<sub>2</sub>/L)</b>	4	110	113	4	5
<b>CQO (mg O<sub>2</sub>/L)</b>	15	247	231	30	26
<b>NO<sub>2</sub> (mg NO<sub>2</sub>/L)</b>	0,04	< 0,02*	< 0,02*	0,10	0,11
<b>NO<sub>3</sub> (mg NO<sub>3</sub>/L)</b>	576	< 4,4*	< 4,4*	60	60
<b>NH<sub>4</sub> (mg NH<sub>4</sub>/L)</b>	13,70	52,37	56,02	0,36	0,75
<b>P-total (mg P/L)</b>	36,56	6,35	6,25	7,00	6,85
<b>PO<sub>4</sub> (mg P/L)</b>	36,00	5,77	5,66	6,78	6,65
<b>K (mg K/L)</b>	263,9	21,3	38,7	18,7	34,8
<b>Fe (mg Fe(III)/L)</b>	2,5	<0,50*	<0,50*	<0,50*	<0,50*

\* menor que o limite de quantificação do método analítico utilizado

Verifica-se que a AR que sofreu apenas um tratamento primário (AR, SDP) apresenta os valores de CBO<sub>5</sub> e de CQO mais elevados, justificando o maior interesse em estudar a hidroponia como uma alternativa possível para a remoção da carga orgânica.

A monitorização semanal dos parâmetros de CBO<sub>5</sub> e CQO permitiu verificar a redução significativa da carga orgânica na AR, SDP com e sem suplementação com potássio (figura 18), identificando-se uma remoção acima dos 98% na CBO<sub>5</sub>, e cerca de 83% na CQO. Esta redução era expectável, já que, por não ter sofrido um tratamento secundário, esta água residual possui maior quantidade de compostos orgânicos biodegradáveis. A variação observada nos resultados da SN e da AR, SE pode ser justificada pela presença de material orgânico com origem, nomeadamente, nas raízes das plantas, que se possam ter degradado e afetado de forma significativa a carga orgânica presente na água de hidroponia que, nestes casos, tem concentração reduzida.

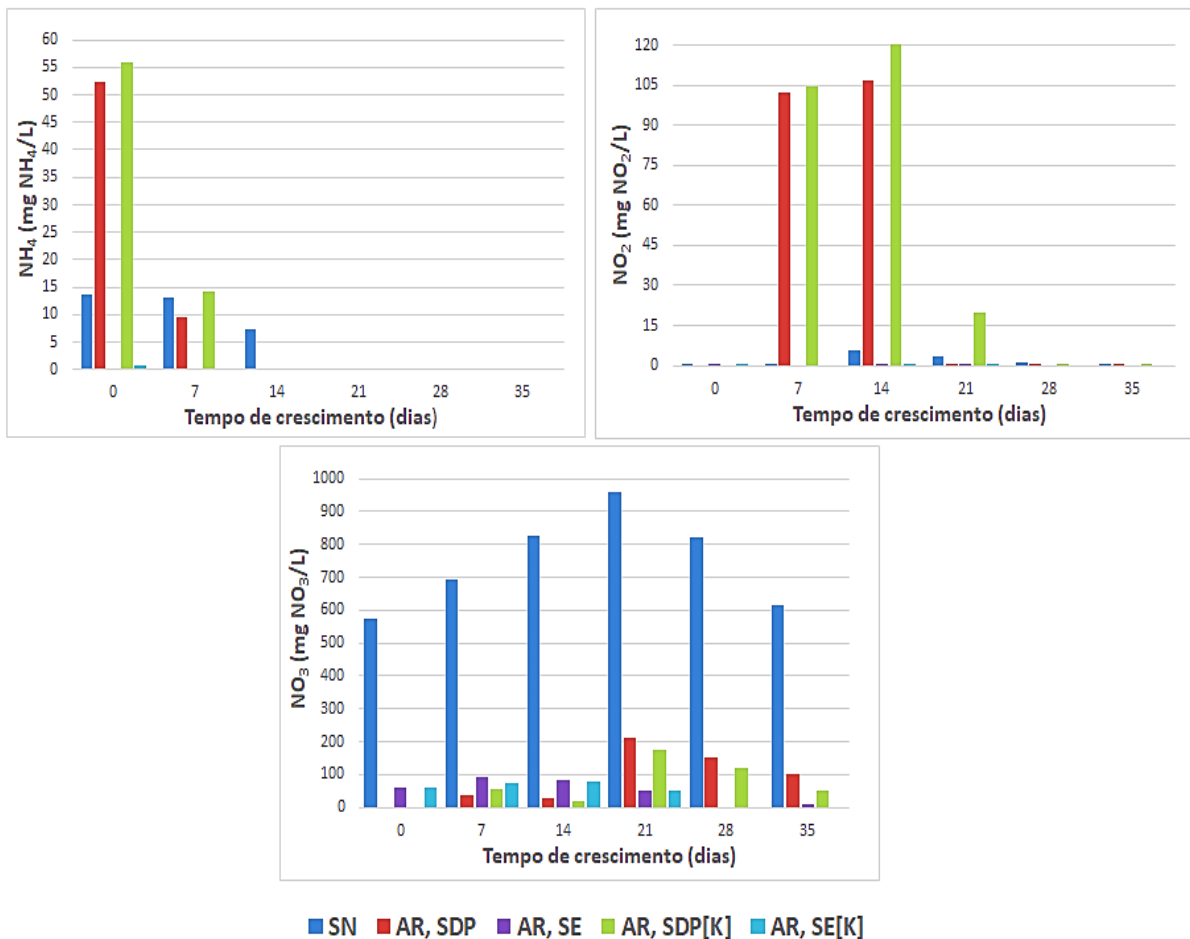


**Figura 18:** Variação da CBO<sub>5</sub> e da CQO durante o crescimento da cultura em SN; AR,SDP; AR SE; AR,SDP[K] e AR SE[K] no período de verão

A caracterização inicial das amostras de água AR, SDP e AR, SE (tabela 14) indica que a nitrificação do azoto decorreu de forma eficiente durante o tratamento secundário na ETAR de Olhalvas, já que a maior concentração desse nutriente na AR, SE está na forma de nitratos. Como seria de esperar a maior concentração de N na forma de NH<sub>4</sub> encontra-se na AR, SDP.

Os dados da monitorização do azoto (figura 19) permitem verificar a ocorrência do processo de nitrificação durante o processo hidropónico, com uma remoção da amónia praticamente completa até à segunda semana, em todas as condições de crescimento. A amónia deixa de ser quantificável pelo método analítico utilizado, atingindo concentrações abaixo do limite de quantificação (<0,06 mg NH<sub>4</sub> /L). Os resultados indicam que a amónia existente na SN e na AR, SDP é convertida em nitratos e que, apesar de haver consumo pela cultura, a quantidade deste nutriente no final do ensaio ainda é significativa.

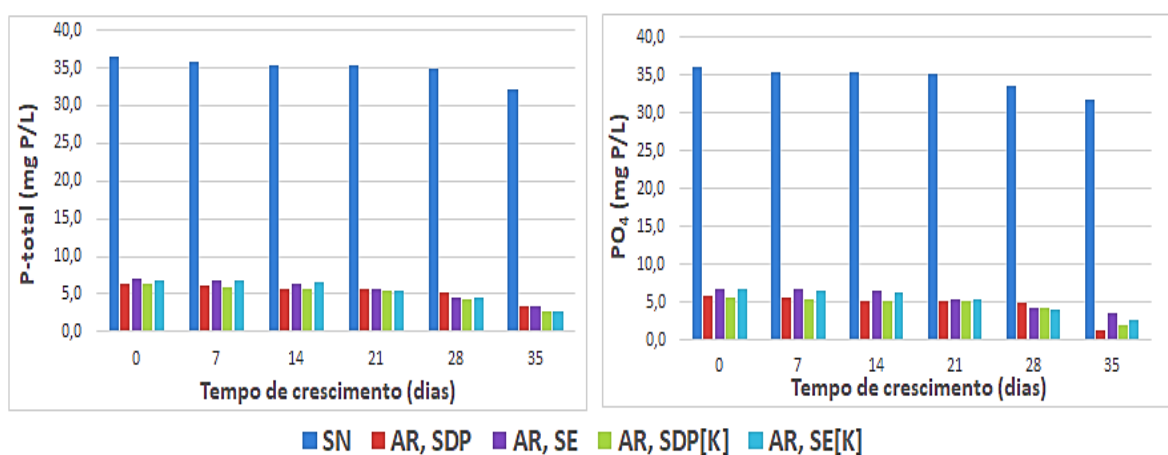
No início do ensaio, o azoto presente na AR, SE, está quase na totalidade na forma de nitratos, que são consumidos pela cultura no decorrer do seu processo de crescimento. No final do ensaio, a quantidade presente na AR, SE[K] está abaixo do limite de quantificação (<4,4 mg NO<sub>3</sub>/L); e na AR, SE, identificou-se uma concentração final de 10 mg NO<sub>3</sub>/L.



**Figura 19:** Variação da concentração de azoto durante o crescimento da cultura em SN; AR,SDP; AR SE; AR,SDP[K] e AR SE[K] no período de verão

Considerando as três formas de azoto monitorizadas a maior percentagem de remoção observada foi na AR, SE com e sem suplementação onde se atingiu valores acima dos 90 % da concentração inicial de N, na SN a remoção foi de 6,5%. Na AR, SDP a remoção foi de 43,5% e na AR, SDP[K] a percentagem foi de 71,8%.

Relativamente à presença do nutriente fósforo, a AR apresenta valores significativamente mais baixos do que a SN (tabela 14). A análise da variação das concentrações do nutriente durante o período de ensaio permite conhecer os consumos efetuados pelas plantas. A figura 20 reúne os dados da monitorização das concentrações de fósforo total e ortofosfatos na água durante o período de crescimento da cultura, verificando-se uma diminuição constante na concentração desse nutriente ao longo do tempo, ainda que menor nas primeiras duas semanas.

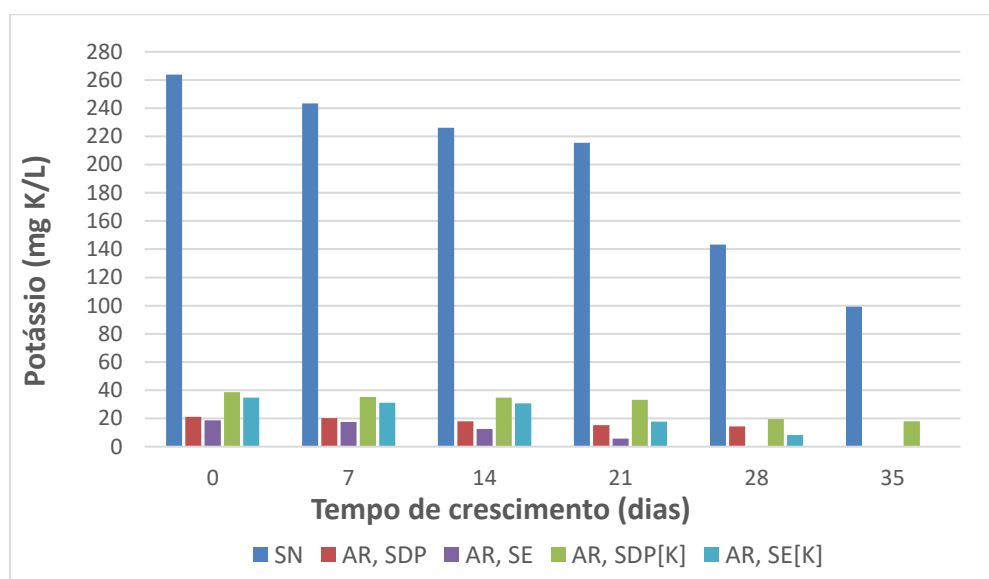


**Figura 20:** Variação da concentração de fósforo durante o crescimento da cultura em SN; AR,SDP; AR SE; AR,SDP[K] e AR SE[K] no período de verão

Verificou-se um consumo médio de 4,4 mg/L na SN; de 2,9 mg/L na AR, SDP; de 3,5 mg/L na AR, SDP[K] e na AR, SE; e de 4 mg/L na AR, SE[K]. De acordo com os resultados, e atendendo à pequena diferença entre os valores de PO<sub>4</sub> e P-total, verifica-se que o fósforo presente na água está maioritariamente na forma de ortofosfatos. Apesar da concentração inicial deste nutriente na SN ser cerca de 6 vezes superior à verificada na AR, o que poderia ser entendido como uma carência significativa deste nutriente na AR, a diferença entre as quantidades consumidas na AR e na SN é pequena (4,4 mg/L *versus* 2,9 a 4,0 mg/L, respetivamente). Os valores indicam que a quantidade de fósforo consumida na SN representa uma baixa percentagem da quantidade total de fósforo presente (12%), que pode ser lido como um excesso do nutriente na SN em vez de uma carência na AR.

O potássio desempenha funções importantes na planta no que diz respeito às propriedades osmóticas, fotossíntese, ativação enzimática, síntese de proteínas, transporte de carboidratos entre outros. O consumo do potássio nas plantas é maior quando comparado com outros nutrientes, como o azoto e o fósforo (Grangeiro et al., 2006).

A figura 21 mostra o consumo da totalidade da concentração de potássio presente na água nas condições de crescimento em AR, SDP e AR, SE, onde não houve adição desse nutriente; e em AR, SE[K], onde, apesar da suplementação, a concentração de potássio se terá mantido num nível insuficiente para superar o requisito nutricional das plantas.



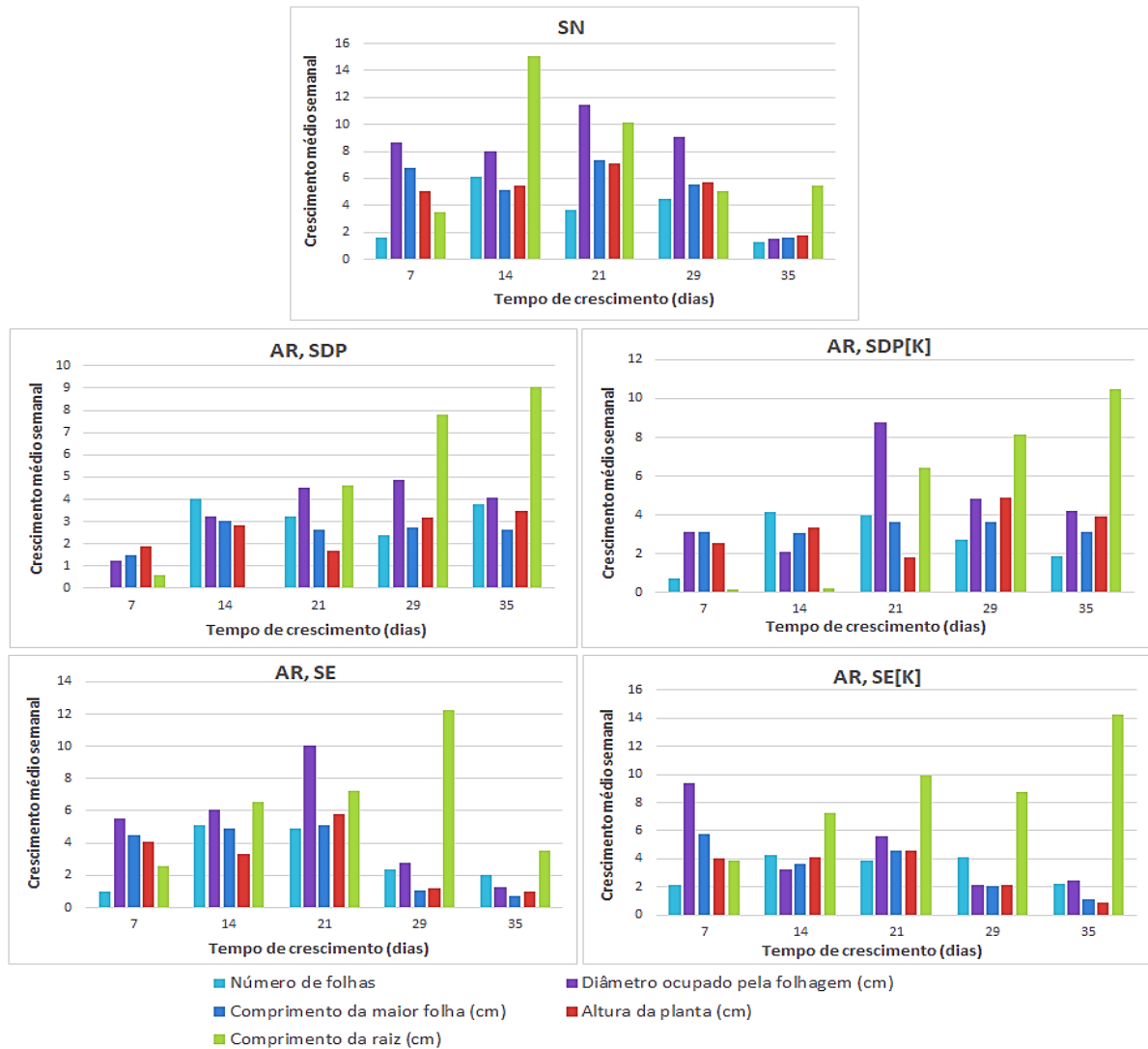
**Figura 21:** Variação da concentração de potássio durante o crescimento da cultura em SN; AR,SDP; AR,SE; AR,SDP[K] e AR,SE[K] no período de verão

O consumo de potássio na SN e na AR, SDP[K] é elevado, correspondendo a uma diminuição de 164,6 mg K/L e de 20,7 mg K/L relativamente à concentração inicial (62,4% *versus* 53,5%), respetivamente. O consumo elevado do nutriente na SN deixa claro a sua importância no desenvolvimento da cultura e a sua carência na AR.

Os resultados das análises semanais à concentração de ferro dissolvido na água apontam para valores na AR abaixo do limite de quantificação do método analítico utilizado (tabela 13). Na SN, a concentração inicial de ferro foi de 2,5 mg Fe(III)/L, e ao fim do período de crescimento da cultura, identificou-se uma concentração de 1,4 mg Fe(III)/L, revelando um consumo deste nutriente de 44%. Os dados do consumo de ferro pela cultura em crescimento na SN apontam para a necessidade de se suplementar a AR com este nutriente, que é importante para a planta em processos tais como a fixação do azoto, além de ser um dos benefícios nutricionais que a cultura oferece ao consumo humano.

### 5.3.2. Crescimento da cultura

Ao comparar o crescimento semanal da cultura em SN e em AR (figura 22), verifica-se que as plantas que crescem em SN e em AR, SE se desenvolvem desde a primeira semana, com um nível de desenvolvimento muito próximo entre si, enquanto que as plantas que crescem em AR, SDP têm um menor nível de desenvolvimento.



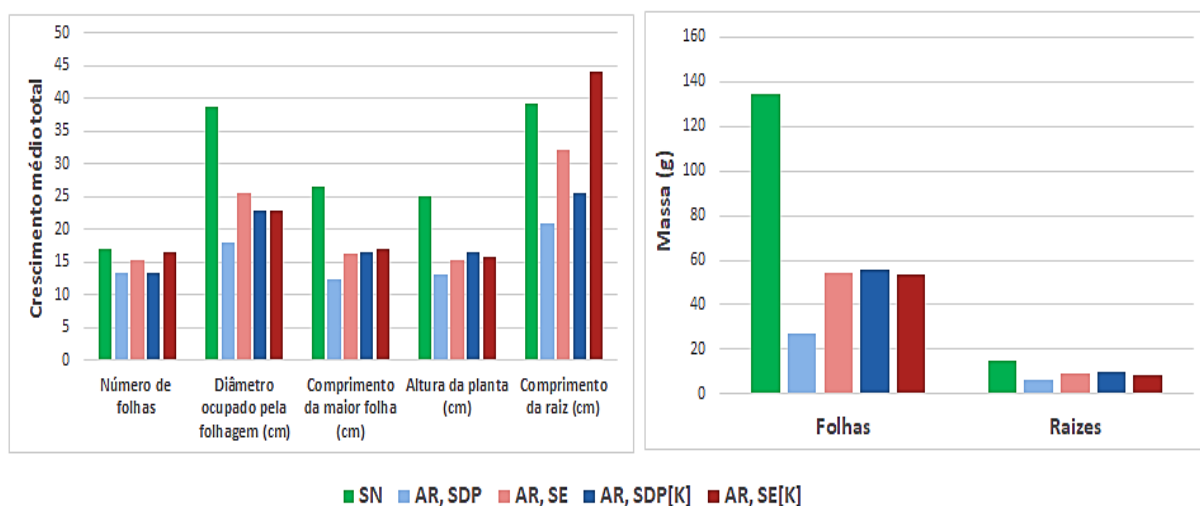
**Figura 22:** Crescimento semanal da cultura em SN; AR,SDP; AR,SE; AR,SDP[K] e AR,SE[K] no período de verão

A limitação no desenvolvimento das plantas em crescimento na água residual recolhida à saída do decantador primário (AR, SDP e AR, SDP[K]) é bastante visível, especialmente nas primeiras duas semanas, com evolução dos parâmetros de crescimento inferior à observada na água residual tratada (AR, SE e AR, SE[K]) e na SN. Nesse período, a diferença é bastante acentuada no comprimento das raízes, verificando-se que, enquanto na SN e na AR, SE as raízes crescem entre 3 cm (AR, SE) a 15 cm (SN) por semana, na AR, SDP o crescimento não atinge 1 cm por semana (figura 22).

O atraso no desenvolvimento da cultura em crescimento na AR, SDP está relacionado com as características dessa AR, que por ter sofrido apenas um tratamento primário apresenta maior carga de sólidos e de matéria orgânica (tabela 14). Para além disso, o alto valor no pH nesta água, associado à sua elevada concentração de  $\text{NH}_4$ , podem ter contribuído para esses resultados (tabelas 13 e 14). Segundo Trejo-Téllez & Gómez-Merino, (2012), o processo de nitrificação é afetado pelo valor do pH da água. Segundo os autores, o aumento da taxa de oxidação da amónia em relação à taxa de oxidação de nitritos, em pH 8,5, resulta na acumulação de  $\text{NO}_2$ , até que se atinjam níveis considerados perigosos para as plantas ( $>4,2$  mg  $\text{NO}_2/\text{L}$ ). De acordo com os dados de pH e da concentração de  $\text{NO}_2$  (pH acima de 8 nos primeiros 7 dias e 102,4 mg  $\text{NO}_2/\text{L}$ , figuras 17 e 19, respetivamente), pode-se assumir que seja esse o caso.

Na água residual tratada (AR, SE e AR, SE[K]) observa-se uma redução no crescimento nas duas últimas semanas, possivelmente devido à indisponibilidade de nutrientes que, como verificado anteriormente, foram consumidos quase na totalidade na primeira fase de crescimento.

Quando analisado o crescimento total da cultura na SN e na AR, identifica-se um crescimento predominante nas plantas do sistema hidropónico com SN, embora aquelas onde o comprimento médio das raízes é maior sejam as que cresceram na AR, SE[K] (figura 23), o que está associado à disponibilidade dos nutrientes na solução.



**Figura 23:** Crescimento médio total da cultura em SN; AR,SDP; AR,SE; AR,SDP[K] e AR,SE[K] no período de verão

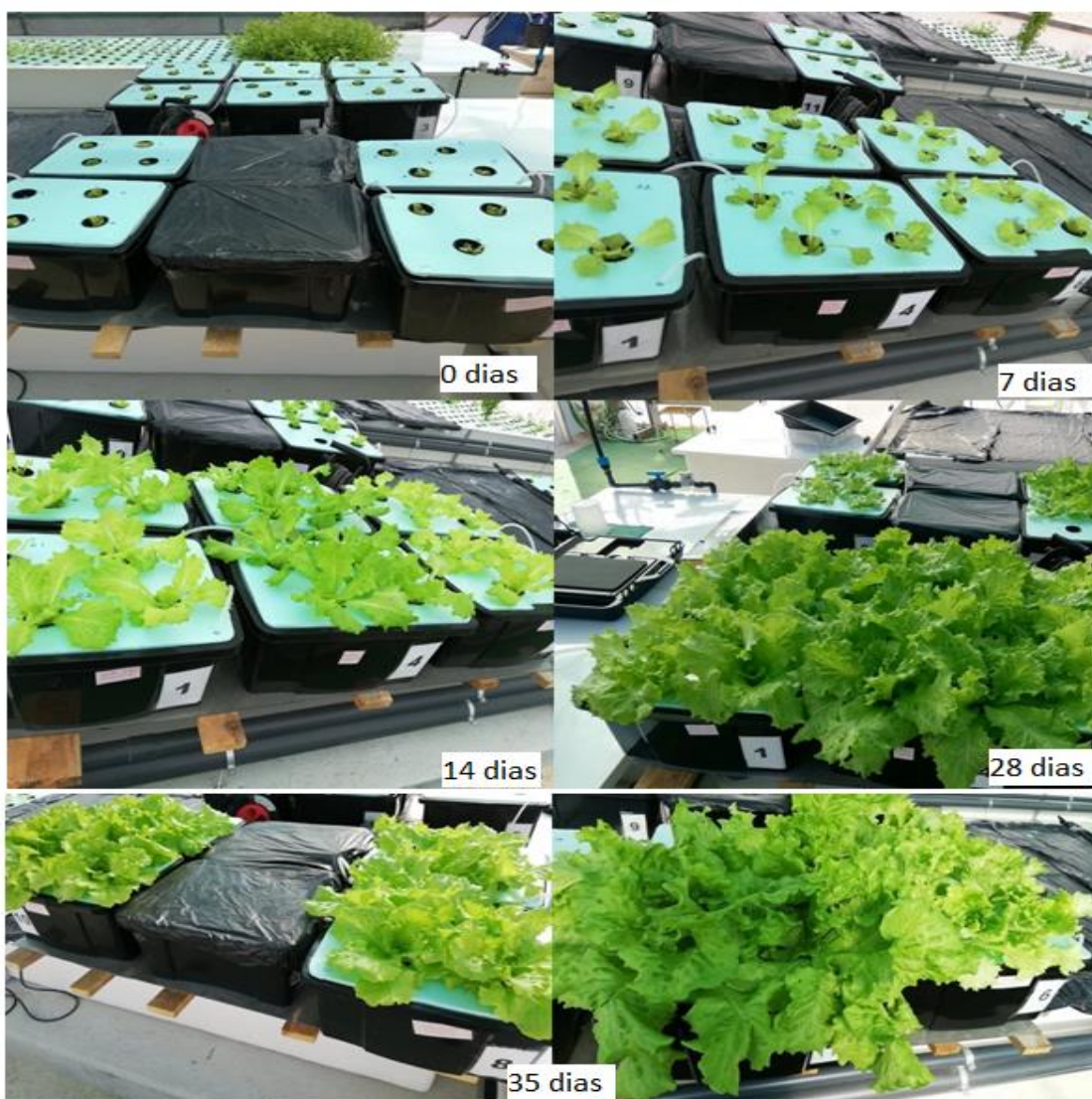
As plantas com melhor desenvolvimento (crescimento em SN) atingiram 25,1 cm de altura, 38,7 cm de diâmetro ocupado pela folhagem, 26,5 cm de comprimento na maior folha, e pesavam em média 134,3 g. As plantas que cresceram em AR, SDP apresentaram o menor crescimento, com valores cerca de 2,1 vezes inferiores aos da SN para os parâmetros analisados, e com 80% menos massa fresca das folhas. Nas restantes condições (AR, SE; AR, SE[K]; e AR, SDP[K]) verificou-se um melhor desempenho em termos de massa da planta, com apenas cerca de 60% menos massa fresca das folhas, e o crescimento apenas 1,5 vezes inferior ao das plantas cultivadas em SN.

Ao analisar o crescimento das raízes pode-se verificar que, apesar das raízes das plantas do sistema AR, SE[K] terem sido aquelas que mais cresceram em comprimento, não eram raízes tão densas. Em média, as raízes dessas plantas pesavam 8,8 g, enquanto as raízes das plantas que cresceram na SN, embora menores, pesavam 14,9 g. A massa dessas raízes também era ligeiramente inferior à das raízes das plantas que cresceram na AR, SE e AR, SDP[K], que pesavam 9,4 g e 9,7 g respetivamente.

Segundo a figura 23, verifica-se ainda que a suplementação com potássio influenciou o crescimento da cultura, embora de forma pouco significativa, sendo possível notar diferenças na evolução das plantas crescidas em AR suplementada (AR, SDP[K] e AR, SE[K]) e não suplementada (AR, SDP e AR, SE), nomeadamente no crescimento das raízes e no comprimento da maior folha.

No final do ensaio determinou-se o teor de humidade nas folhas, obtendo-se valores acima dos 94% em todas as condições de crescimento.

Apesar das plantas que cresceram na solução nutritiva apresentarem melhores condições visuais, por serem maiores, mais pesadas, e conseqüentemente mais atrativas aos padrões comerciais (figura 24), os valores de sanidade e viscosidade para as plantas em todas as condições de crescimento estiveram sempre no topo da escala qualitativa.

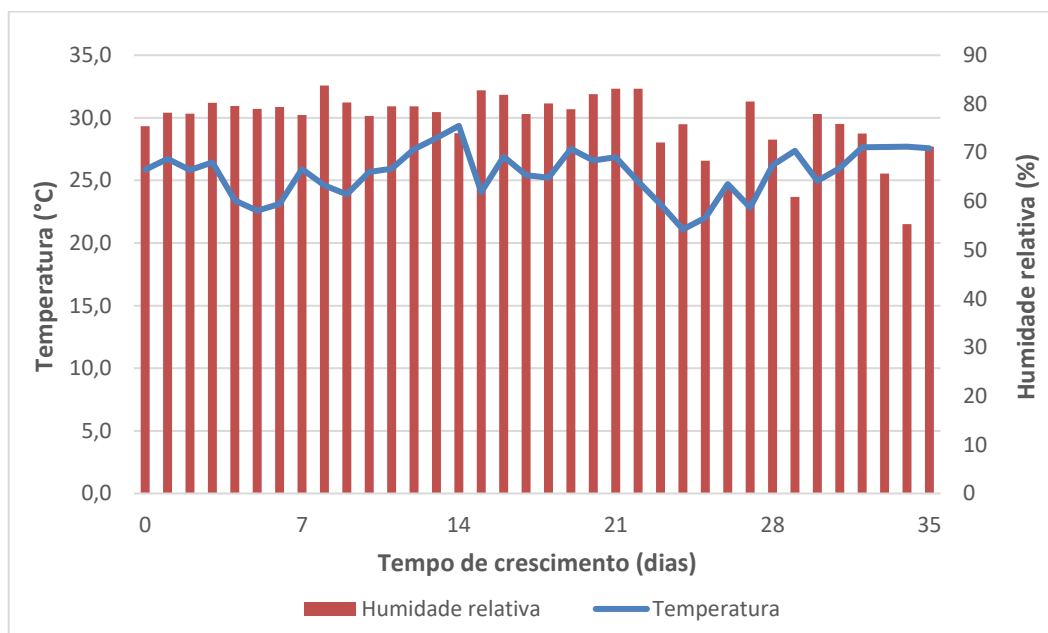


**Figura 24:** Aspecto visual e crescimento da cultura em SN; AR, SDP; AR SE; AR, SDP[K] e AR SE[K] no período de verão

Nas semanas em que a temperatura foi mais elevada (figura 25), as plantas murchavam durante o período mais quente do dia, voltando a estar apumadas à medida que a temperatura diminuía. As altas temperaturas na estufa levaram ao aparecimento de lagartas na cultura, sendo necessário o uso de um inseticida para extermínio da praga. Nenhuma das plantas do sistema apresentou sintomas de doença, pelo que as diferenças verificadas no seu crescimento se devem exclusivamente às diferenças entre as características da SN e das águas residuais em que cresceram durante os 35 dias.

### 5.3.3. Condições ambientais

A caracterização das condições ambientais no interior do LSMI, durante o período de crescimento da cultura (figura 25), mostra que o valor médio da temperatura no interior da estufa foi de  $26,0 \pm 2$  °C e a humidade relativa foi de  $59,9 \pm 8\%$ . Quando se compara a temperatura no interior da estufa com a temperatura da água no interior das caixas observa-se uma diminuição do valor medido em cerca de  $1,8^\circ\text{C}$ .



**Figura 25:** Dados de temperatura e humidade no interior da estufa durante o crescimento da cultura em SN; AR,SDP; AR SE; AR,SDP[K] e AR SE[K] no período de verão

O valor médio de humidade relativa para o período de crescimento esteve ligeiramente abaixo do valor mínimo recomendado para a cultura (60%), verificando-se um valor mínimo diário no período de crescimento de 42%. Embora os valores de temperatura do ar (médias diárias entre 21,1 e 29,4 °C) estivessem sempre acima dos valores recomendados para o crescimento da cultura, que ocorre a temperaturas entre 15 e os 20 °C, considera-se que esta condição é suportável pela cultura, que sobrevive a máximos de 30 °C (Rodrigues, 2015). Os valores de temperatura acima da gama podem ter acelerado o ciclo de crescimento das alfaces, o que resulta em plantas menores devido ao espigamento precoce.

Devido a uma avaria no equipamento, a monitorização da luminosidade teve de ser interrompida, não tendo sido efetuada durante todo o período de crescimento da cultura. Para os dias monitorizados (tabela 15), o valor médio de luminosidade na área da bancada foi de 8908 lux. O fotoperíodo foi estimado em cerca de 10 h. A combinação da alta intensidade solar com longas horas de exposição ao sol tiveram efeito na viçosidade das plantas, verificando-se, como referido na secção 5.3.2, intervalos onde elas se encontravam murchas. Porém, de uma forma geral, a luminosidade não prejudicou a cultura, obtendo-se plantas visivelmente saudáveis e com aspeto desejável para comercialização no final do ensaio.

**Tabela 15:** Dados de luminosidade durante o crescimento da cultura em SN; AR,SDP; AR,SE; AR,SDP[K] e AR,SE[K] no período de verão

Luminosidade (klx)						
Data	Hora	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5
<b>05/08</b>	13:00	13,19	13,25	17,1	16,70	12,74
<b>06/08</b>	9:30	2,86	3,02	4,31	4,27	2,80
	14:30	14,91	13,38	12,43	13,08	13,38
	18:30	3,40	3,49	3,78	4,30	4,33
<b>07/08</b>	10:00	2,66	2,71	2,65	2,51	2,55
	14:00	13,14	14,66	13,33	12,95	15,13
	16:30	11,91	10,30	8,98	8,14	12,18
<b>10/08</b>	10:00	2,20	2,33	2,34	2,28	2,17
	14:30	8,31	7,62	8,01	8,03	7,66
	18:00	1,43	1,44	1,12	1,04	1,25
<b>07/09</b>	18:00	3,92	4,44	3,68	3,76	3,74
<b>08/09</b>	9:30	11,60	12,84	7,50	8,38	12,50
	12:00	19,18	17,54	19,18	19,10	16,74
	17:00	5,84	12,22	9,10	9,18	8,94
<b>09/09</b>	9:00	5,84	8,02	9,10	9,18	8,94
	12:00	17,32	15,18	20,54	23,10	18,32

Como verificado anteriormente, a distribuição da luminosidade na bancada não é a mesma. Neste ensaio, as plantas que cresciam em SN; AR, SE e AR, SE[K] foram expostas, em média, a uma maior intensidade de luz. Embora não seja possível identificar isoladamente os efeitos benéficos dessa exposição, é importante referir que estas plantas foram as que obtiveram melhor desempenho no sistema.

#### **5.4. Crescimento em AR proveniente do decantador primário e em AR recolhida à saída da estação de tratamento no período de inverno**

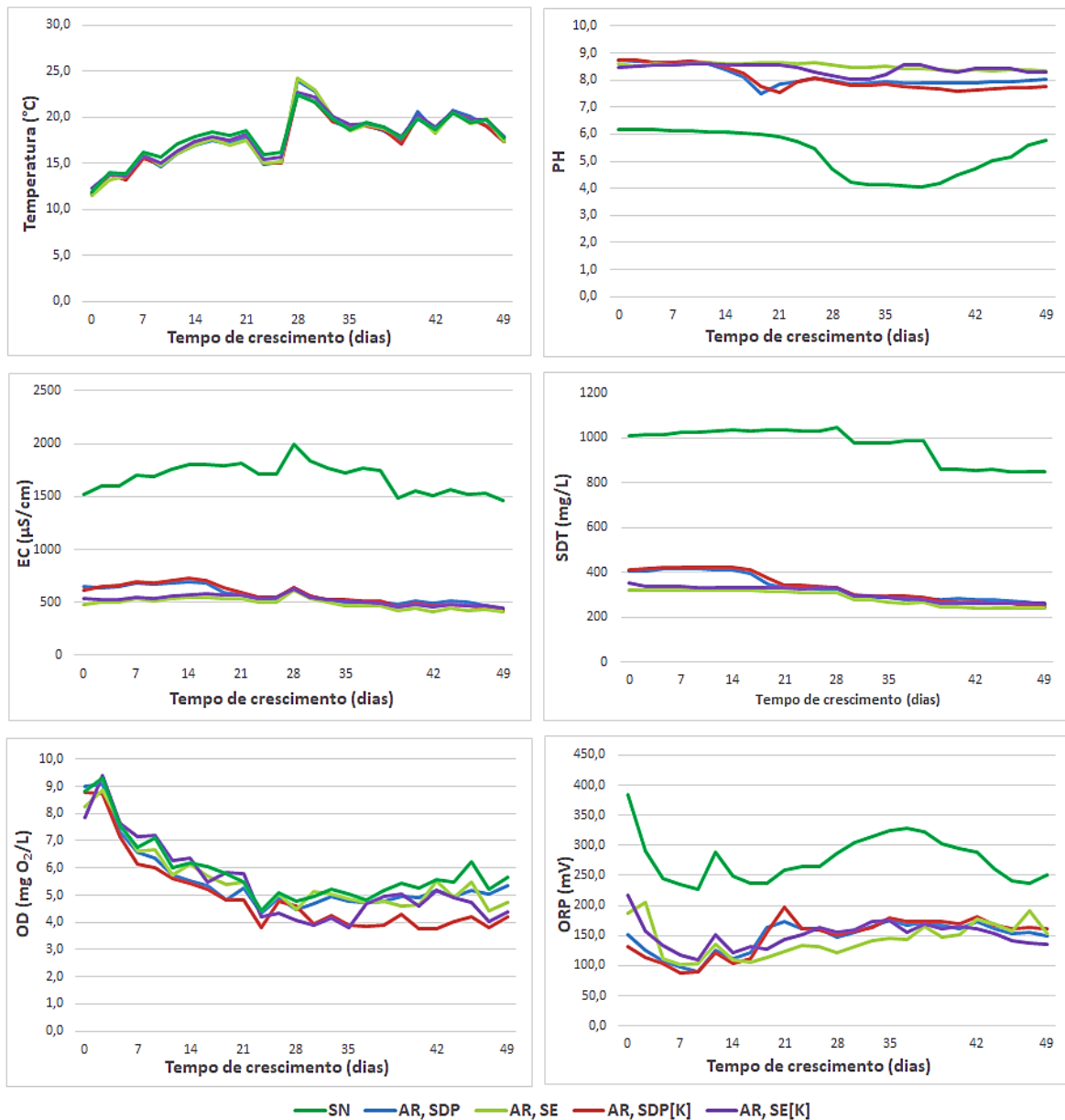
Este ensaio teve como objetivo a obtenção de dados do crescimento hidropónico das alfaces em AR recolhida à saída do decantador primário (AR, SDP) e AR recolhida à saída da estação de tratamento (AR, SE), no período de inverno. Também se estudou o crescimento da alface nestas AR suplementadas com potássio (AR, SDP[K], e AR, SE[K]), sendo a suplementação feita de acordo com o critério usado nos ensaios anteriores.

O interesse em estudar o crescimento da cultura num diferente período do ano reside na importância de avaliar a influência das diferentes condições ambientais verificadas na estufa e das características da água residual, que também se alteram em função da época do ano.

À semelhança do ensaio anterior (secção 5.3), utilizou-se um total de 10 caixas, duas para cada condição de AR, totalizando 8 caixas; e outras duas para o crescimento em SN, utilizada como controlo positivo. Utilizaram-se quatro plantas por caixa, o que se traduz num total de 8 plantas de alface por condição de crescimento. As plantas de alface foram adquiridas em viveiros e o tempo de crescimento da cultura foi de 49 dias, entre 13/01/2021 e 04/03/2021.

### 5.4.1. Qualidade da água e consumo de nutrientes

Durante o período de crescimento da cultura procedeu-se à medição diária dos parâmetros de T, pH, EC, SDT, OD e ORP, com exceção do período em que, devido às restrições implementadas no âmbito da pandemia de COVID-19, só foram monitorizados três vezes por semana (segundas, quartas e sextas). Os dados dessa monitorização estão representados na figura 26.



**Figura 26:** Variação dos valores de T, pH, EC, SDT, OD e ORP durante o crescimento da cultura em SN; AR, SDP; AR, SE; AR, SDP[K] e AR, SE[K] no período de inverno

Com exceção do OD, os valores medidos encontram-se fora da gama de valores recomendados na literatura, em especial na água residual, conforme dados da tabela 16.

**Tabela 16:** Comparação entre os valores medidos e os recomendados para os parâmetros T, pH, EC, SDT e OD, durante o crescimento da cultura em SN; AR,SDP; AR, SE; AR,SDP[K] e AR, SE[K] no período de inverno

Parâmetro	Valor recomendado (Furlani et al., 1999)	SN	AR, SDP	AR, SDP[K]	AR, SE	AR, SE[K]
T(°C)	10-16 Inverno	11,9 a 22,4	11,7 a 24,0	11,8 a 22,6	11,5 a 24,2	12,3 a 22,7
pH	5,5 a 6,5	4,1 a 6,2	7,5 a 8,7	7,5 a 8,8	8,3 a 8,6	8,0 a 8,6
EC (µS/cm)	1500 a 3500	1467 a 1993	439 a 693	419 a 725	407 a 614	450 a 631
SDT (mg/L)	1000 a 1500	851 a 1047	257 a 417	245 a 424	238 a 323	260 a 352
OD (mg O <sub>2</sub> /L)	≥3	4,4 a 9,3	4,3 a 9,1	3,8 a 8,8	3,4 a 8,9	3,8 a 9,4

A variável temperatura tem comportamento semelhante em todas as condições, com valores próximos entre elas. A temperatura média da água durante o ensaio foi de  $17,7 \pm 3$  °C, com máximos diários de 24,2 °C e mínimos de 11,5 °C. Os valores de temperatura na água apresentaram um comportamento dependente da temperatura no interior da estufa, oscilando ao longo do dia. O máximo medido está muito acima do máximo recomendado por Furlani et al.,(1999) para este período do ano (tabela 16).

A monitorização do pH identificou valores médios de 8,1 na AR, SDP; de 8,5 na AR, SE; e de 5,3 na SN. Os valores de pH na SN têm uma diminuição mais acentuada após 28 dias de crescimento da cultura, o que faz com que fiquem abaixo do mínimo recomendado; porém, voltam a aumentar no final do período de crescimento. O pH da SN atingiu valores mínimos de 4,1. As mudanças drásticas nos valores do pH estão associadas a absorção preferencial de cátions ou aniões, com fortes impactos na solubilidade de certos nutrientes (Tomasi et al., 2014). A AR mostrou-se mais estável em relação a este parâmetro, com oscilações menores nos valores de pH, que sempre se mantiveram acima do valor máximo recomendado.

O comportamento das variáveis EC e SDT é o mesmo em todas as condições de água de alimentação, com tendência de diminuição, de acordo com o crescimento da cultura. Na AR, os parâmetros têm sempre os seus valores abaixo dos mínimos recomendados. Na SN, os valores medidos de SDT atingem valores abaixo dos 1000 mg/L (que seria o mínimo recomendado), a partir dos 29 dias de crescimento da cultura e continuam a diminuir no

período seguinte. Quanto aos valores de EC, apesar do mínimo registado na SN se encontrar abaixo do mínimo recomendado (1500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), esta situação ocorreu apenas em dois dias do período de crescimento da cultura.

Os dados de OD apontam para uma correta oxigenação das raízes, com um valor médio de 5,48 mg/L. Nos primeiros 21 dias de crescimento da cultura, os valores de OD baixaram consideravelmente, tendo-se estabilizado no restante período de crescimento da cultura. A diminuição da concentração de OD na água pode estar associada ao processo de nitrificação do azoto, que também ocorreu nesse período, com consumo de parte do oxigénio que ali se encontrava.

Os valores para o parâmetro ORP são maiores na SN, com uma média de 277,4 mV, relativamente aos observados na AR, onde os valores médios foram: AR, SDP 147,8 mV, AR, SDP[K] 148,8 mV, AR, SE 142,6 mV e AR, SE[K] 150,8 mV. Estes valores estão associados à concentração de iões, que se verifica ser maior na SN. São característicos da presença de oxigénio livre na água e também de uma ampla gama de elementos de altos graus de valência, nomeadamente,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Mo}^{6+}$  e  $\text{Cu}^{2+}$  (Goncharuk et al., 2010).

Antes de se inserir as plantas no sistema foi feita uma caracterização das águas a utilizar no sistema hidropónico. As concentrações para os parâmetros de  $\text{CBO}_5$ , CQO,  $\text{NH}_4$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{NO}_2$ , P-total,  $\text{PO}_4$ , K e Fe são apresentados na tabela 17.

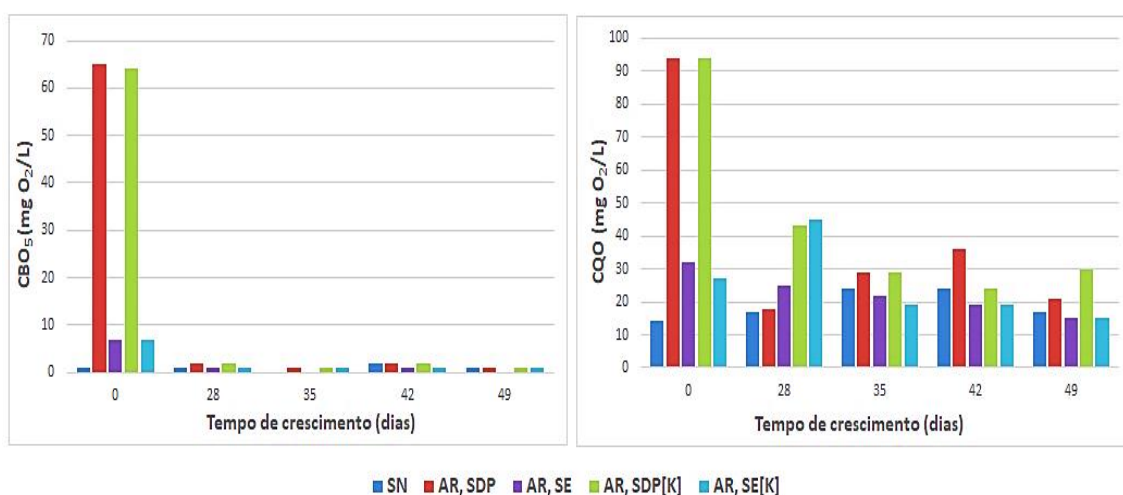
**Tabela 17:** Concentrações iniciais de  $\text{CBO}_5$ , CQO,  $\text{NH}_4$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{NO}_2$ , P-total,  $\text{PO}_4$ , K e Fe na AR e, na SN no período de inverno

Parâmetros	Amostra				
	SN	AR, SDP	AR, SDP[K]	AR, SE	AR, SE[K]
<b><math>\text{CBO}_5</math> (mg <math>\text{O}_2/\text{L}</math>)</b>	<2*	65	64	7	7
<b>CQO (mg <math>\text{O}_2/\text{L}</math>)</b>	14	94	94	32	27
<b><math>\text{NH}_4</math> (mg <math>\text{NH}_4/\text{L}</math>)</b>	14,98	43,61	51,09	3,00	2,78
<b><math>\text{NO}_3</math> (mg <math>\text{NO}_3/\text{L}</math>)</b>	640	5	<4,4*	46	46
<b><math>\text{NO}_2</math> (mg <math>\text{NO}_2/\text{L}</math>)</b>	<0,02*	0,30	0,31	0,19	0,19
<b>P-total (mg P/L)</b>	39,07	4,06	4,52	4,63	4,95
<b><math>\text{PO}_4</math> (mg P/L)</b>	32,38	2,60	2,64	2,55	2,67
<b>K (mg K/L)</b>	274,0	15,0	29,0	15,0	20,9
<b>Fe (mg Fe(III)/L)</b>	4,0	<0,50*	<0,50*	<0,50*	<0,50*

\* menor que o limite de quantificação do método analítico utilizado

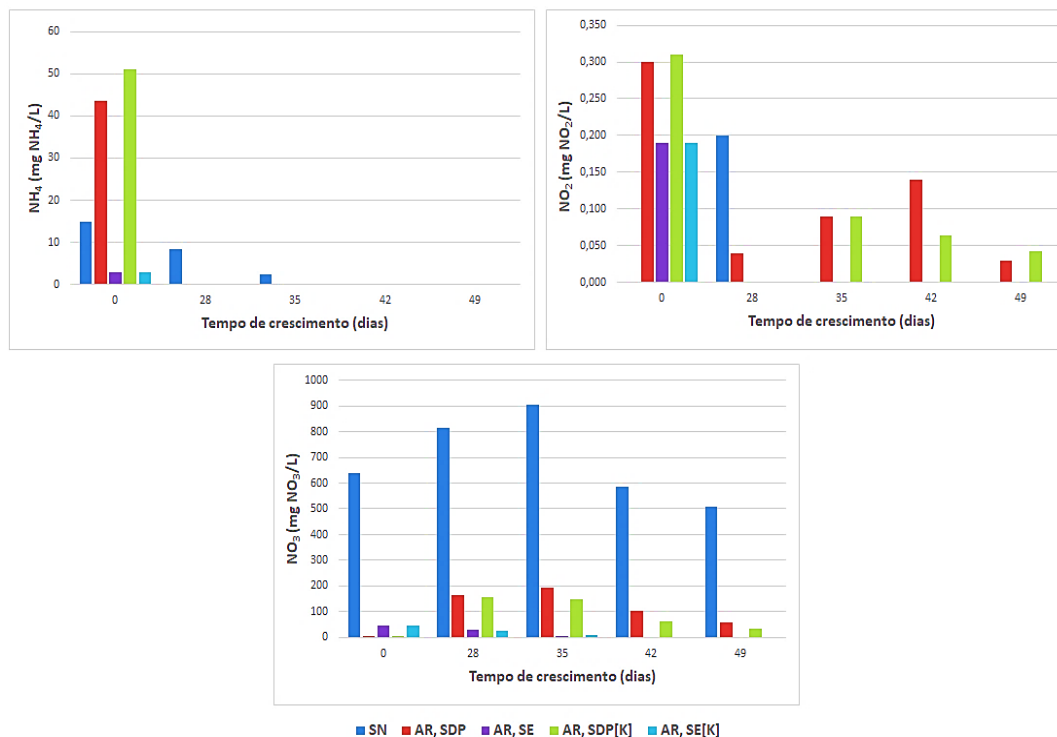
As concentrações iniciais medidas na água para este período do ano mostram uma baixa concentração de nutrientes na AR quando comparada com a SN, com diferenças significativas na carga biológica da AR, SDP e a AR, SE.

Os dados de monitorização de CBO<sub>5</sub> e CQO na água (figura 27) permitem verificar uma carga orgânica maior na AR, que sofreu apenas um tratamento primário. Na AR, SDP a remoção de CBO<sub>5</sub> foi de 98,5% e na AR, SDP[K] foi de 98,4%. Em relação à CQO, a remoção foi de 77,7% na AR, SDP e 68,1% na AR, SDP[K]. Na AR SE, que por ter sofrido um nível de tratamento mais avançado, apresentava quantidades iniciais menores, o sistema tornou possível a remoção de mais de 44% da CQO e acima dos 85% da CBO<sub>5</sub>. Na SN a carga orgânica é praticamente inexistente, sendo facilmente verificada pelos valores baixos de CBO<sub>5</sub> e CQO, porém, provavelmente devido à degradação de alguma matéria orgânica das raízes, verificou-se uma pequena oscilação positiva nos valores desses parâmetros.



**Figura 27:** Variação da CBO<sub>5</sub> e da CQO durante o crescimento da cultura em SN; AR,SDP; AR SE; AR,SDP[K] e AR SE[K] no período de inverno

A monitorização do nutriente azoto, feito nas formas de amónia, nitritos e nitratos (figura 28), mostra não só a nitrificação da amónia, mas também um consumo de nitratos ao longo do crescimento da cultura.

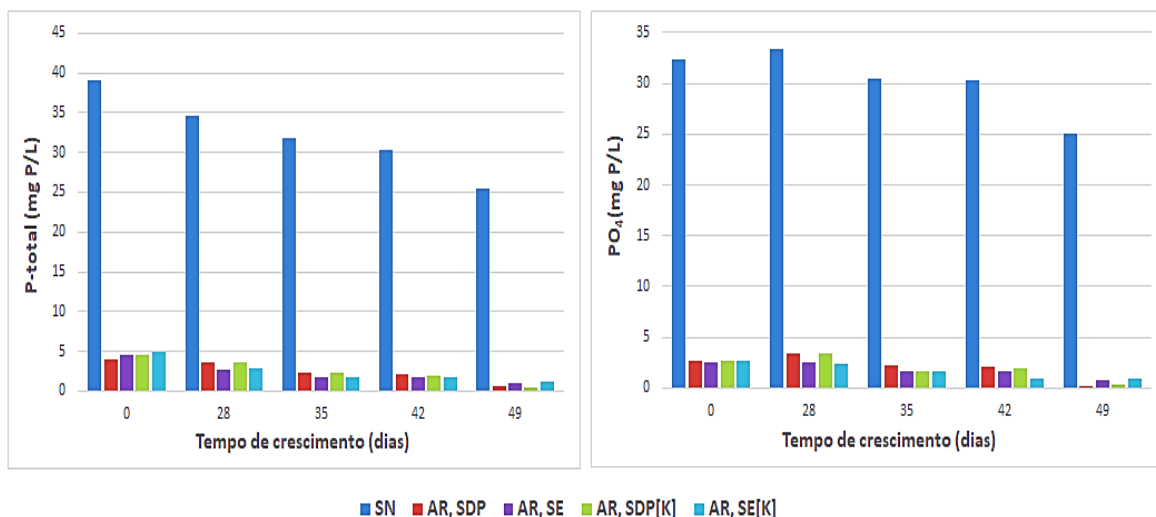


**Figura 28:** Variação da concentração de azoto durante o crescimento da cultura em SN; AR,SDP; AR SE; AR,SDP[K] e AR SE[K] no período de inverno

O aumento das concentrações de  $\text{NO}_2^-$  e  $\text{NO}_3^-$ , que ocorrem na AR, SDP com e sem suplementação em potássio, é uma forma de verificar a ocorrência do processo de nitrificação do azoto. Note-se que, aos 28 dias de crescimento da cultura já não é possível quantificar amónia em nenhuma das AR; e que, nas duas últimas semanas de crescimento, não foi possível quantificar azoto em nenhuma das formas monitorizadas na AR, SE com e sem suplementação em potássio, indicando o consumo da totalidade desse nutriente. Na SN, a nitrificação da amónia é completa após 35 dias de crescimento da cultura e, a partir desse período, é possível verificar uma redução na concentração de  $\text{NO}_3^-$ , cuja tendência inicial era aumentar no seguimento da conversão da amónia. Estes resultados corroboram com os obtidos nas outras condições experimentais, que evidenciam o consumo de nitratos pelas plantas. Entre os 35 dias e os 49 dias foram consumidos cerca de 395 mg  $\text{NO}_3^-/\text{L}$ .

A remoção de azoto na AR, SE e na AR, SE[K] atingiu os 99,9% da concentração inicial. Na AR, SDP foi de 61,1% e na AR, SDP[K] 81,0%. Na SN cujas concentrações iniciais das formas de azoto eram maiores a remoção foi de apenas 15%.

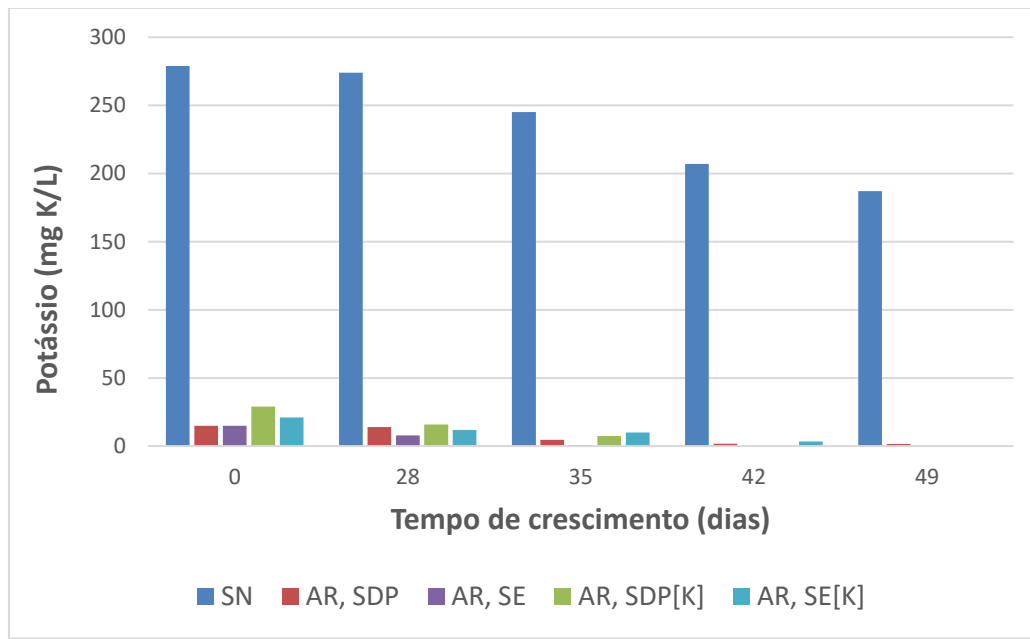
A monitorização semanal das concentrações de P-total e PO<sub>4</sub> na água (figura 29) mostra que o consumo desse nutriente se dá de forma gradual ao longo do crescimento da cultura. O fósforo presente na AR e na SN está maioritariamente na forma de ortofosfatos, pois a diferença entre as concentrações medidas para os dois parâmetros é muito pequena.



**Figura 29:** Variação da concentração de fósforo durante o crescimento da cultura em SN; AR,SDP; AR SE; AR,SDP[K] e AR SE[K] no período de inverno

O consumo do nutriente na SN foi de 13,7 mg P/L, na AR suplementada (AR, SDP[K] e AR, SE[K]) foi cerca de 4,0 mg P/L; e na AR não suplementada (AR, SDP e AR, SE) foi ligeiramente inferior, com um consumo de cerca de 3,5 mg P/L. Em termos percentuais o consumo do nutriente fósforo na SN representou um total de 35,1%, enquanto na AR representou uma remoção acima dos 76% da concentração inicial de P-total.

Devido à sua importância para a planta, o consumo de potássio é maior que o consumo de azoto e fósforo. O nutriente foi consumido na sua totalidade nas condições de crescimento em AR, SDP [K], SE e SE[K], conforme identificado na figura 30. Na SN, o consumo do nutriente foi de 92 mg K/L (35% da concentração inicial); na AR, SDP, o consumo foi de 13,6 mg K/L (90,7%).



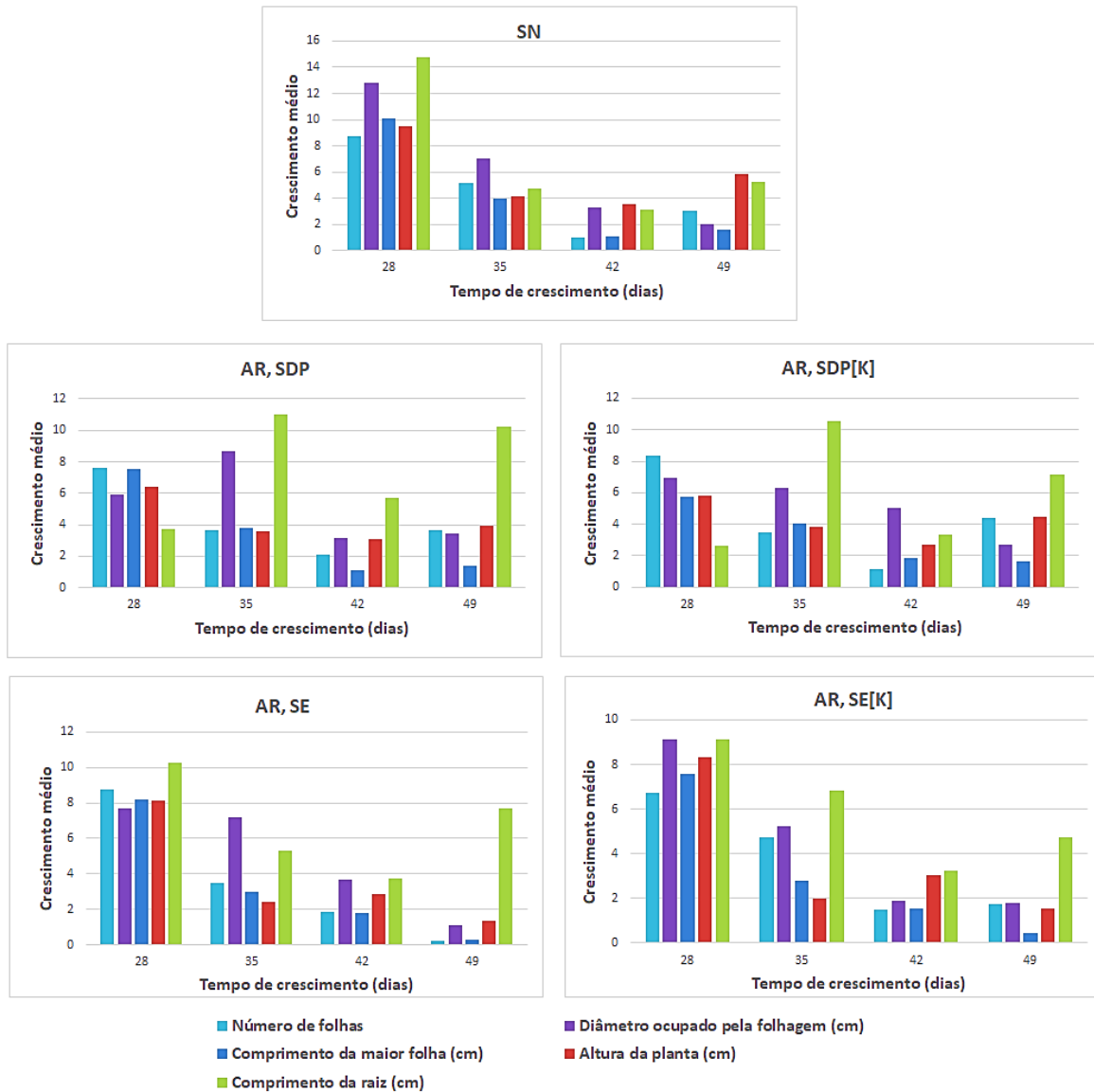
**Figura 30:** Variação da concentração de potássio durante o crescimento da cultura em SN; AR,SDP; AR SE; AR,SDP[K] e AR SE[K] no período de inverno

Mais uma vez a suplementação em potássio revelou-se insuficiente nos termos em que foi feita, e as quantidades na SN parecem ser excessivas, considerando o tipo de sistema utilizado e a quantidade de plantas que se pretende cultivar.

Como verificado anteriormente, a monitorização semanal para determinação do ferro dissolvido na água resultou em dados de concentrações na AR abaixo do limite de quantificação do método analítico utilizado ( $<0,50$  mg Fe(III)/L). Na SN foi medida uma concentração inicial de ferro de 4 mg Fe(III)/L e, ao fim do período de crescimento da cultura, quantificou-se um consumo de 1,2 mg Fe(III)/L (35,0% da concentração inicial). A percentagem consumida do nutriente é bastante significativa e, como referido anteriormente, seria de elevado interesse do ponto de vista nutricional da cultura, suplementar a AR para dar resposta a essa carência em ferro.

### 5.4.2. Crescimento da cultura

Por não ter sido possível monitorizar o sistema durante os primeiros 21 dias de crescimento da cultura, procedeu-se à avaliação do crescimento total ao fim de 28 dias de crescimento, e do crescimento semanal no período restante (figura 31).

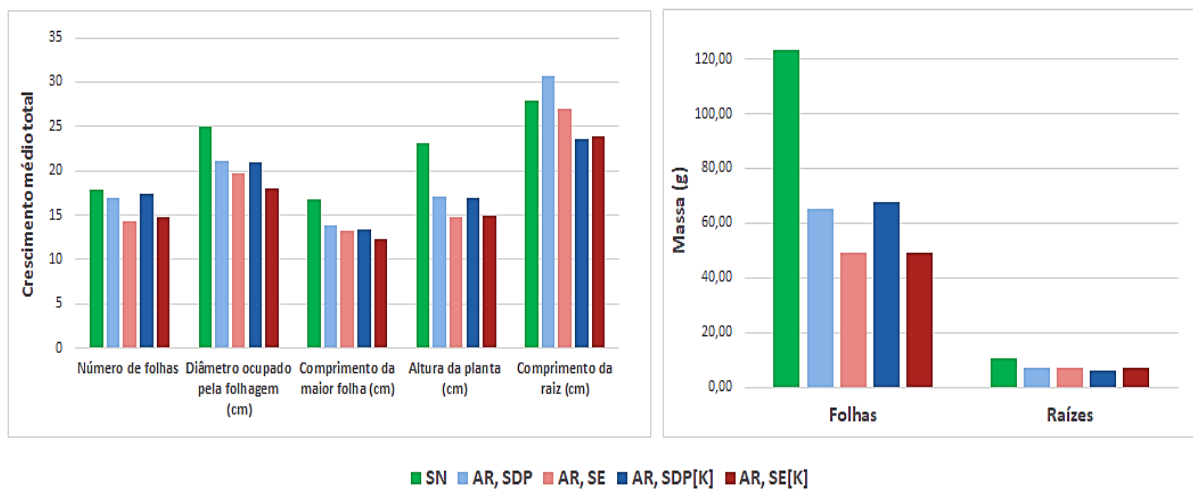


**Figura 31:** Crescimento da cultura em SN; AR,SDP; AR SE; AR,SDP[K] e AR SE[K] no período de inverno

De acordo com a informação presente na figura 31 é possível verificar que, nos primeiros 28 dias de crescimento, o desenvolvimento da cultura foi maior na SN. O padrão de crescimento observado na AR, SE, nesse período, assemelhou-se ao da SN. Na última semana de monitorização, as plantas que cresciam na AR, SE e na SN tiveram um crescimento bastante reduzido.

No caso da cultura do sistema hidropónico AR, SDP, verificou-se que o desenvolvimento das plantas no que se refere ao diâmetro ocupado pela folhagem e ao comprimento da raiz foi superior no período compreendido entre os 28 e os 35 dias ao crescimento total observado nos primeiros 28 dias em que as plantas estiveram no sistema. Esta informação indica que, para estes parâmetros, a cultura teve limitações no crescimento na fase inicial.

A suplementação em potássio não produziu resultados muito diferentes no crescimento da cultura, e os valores dos parâmetros monitorizados são próximos na AR com e sem suplementação, tanto a AR, SDP quanto a AR, SE. Efetivamente, a figura 32 permite verificar que neste ensaio, diferente do reportado anteriormente (secção 5.3.2), a suplementação em potássio não potenciou o crescimento das raízes. As plantas que cresceram na SN tiveram um melhor desempenho no sistema tal como esperado, sendo no geral maiores e tendo um maior número de folhas, comparativamente às restantes condições de crescimento. No entanto, o comprimento das raízes foi maior nas plantas que cresciam em AR, SDP, identificada como a segunda condição mais favorável ao bom desenvolvimento da cultura neste ensaio.



**Figura 32:** Crescimento médio total da cultura em SN; AR,SDP; AR SE; AR,SDP[K] e AR SE[K] no período de inverno. As plantas que se desenvolveram na AR, SDP são 1,4 vezes menores, comparativamente com as plantas que cresceram na SN. Em termos de massa fresca das folhas, as plantas que cresceram em AR, SDP e em AR, SDP[K] registaram valores 47% e 44% inferiores aos das plantas do sistema SN, respetivamente. As plantas que cresceram em AR, SE com e sem suplementação foram aquelas que menos se desenvolveram, com plantas 1,5 vezes menores que as da SN, e com cerca de 60% menos massa fresca das folhas, relativamente ao

observado na SN. A diferença de crescimento da cultura em AR, SDP e AR, SE, com e sem a suplementação em potássio, é muito pequena.

No final do ensaio determinou-se o teor de humidade nas folhas, obtendo-se valores acima dos 94% em todas as condições de crescimento.

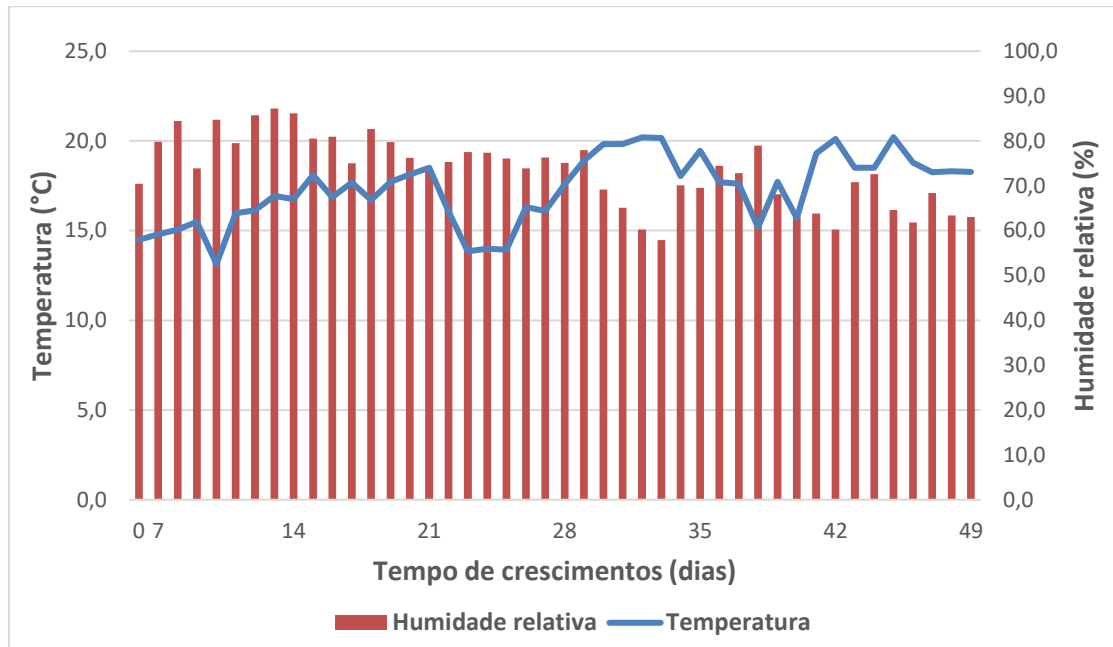
Durante o período de inverno não se verificaram casos onde, devido às altas temperaturas as plantas ficassem murchas, obtendo-se plantas vistosas durante todo o período de crescimento da cultura (figura 33). A qualificação da cultura relativamente aos parâmetros de viçosidade e sanidade foi positiva, e os respetivos valores estiveram sempre no topo das respetivas escalas.



**Figura 33:** Aspecto visual e crescimento cultura em SN; AR,SDP; AR SE; AR,SDP[K] e AR SE[K] no período de inverno

### 5.4.3. Condições ambientais

A monitorização em contínuo dos parâmetros de temperatura e humidade relativa no interior da estufa permitiu determinar valores médios de temperatura de  $17,3\pm 2$  °C e humidade relativa de  $73,4\pm 8\%$  (figura 34).



**Figura 34:** Dados de temperatura e humidade no interior da estufa durante o crescimento da cultura em SN; AR,SDP; AR SE; AR,SDP[K] e AR SE[K] no período de inverno

A temperatura máxima diária registada no interior da estufa foi de 20,2 °C e a mínima de 13,1 °C, estando dentro da gama recomendada para a cultura. Em média, a temperatura da água foi cerca de 0,4 °C menor do que a temperatura no interior da estufa, não se prevendo, por isso, efeitos adversos na cultura.

A humidade relativa esteve maioritariamente dentro da gama apropriada (entre os 60 e 80%), tendo-se verificado que houve apenas um dia onde o valor medido esteve abaixo dos 60%, e outros seis dias onde foi maior que 80%.

As condições ambientais amenas no exterior são responsáveis pelas condições amenas obtidas no interior da estufa. No inverno, as aberturas laterais da estufa são mantidas sempre fechadas por forma a preservar o calor no seu interior.

Os dados de luminosidade medidos no período de crescimento da cultura no inverno revelam uma média de intensidade luminosa de 3066 lux e o fotoperíodo estimado foi de 8h diária (tabela 18). Como seria esperado para este período do ano, a intensidade da radiação solar é menor, bem como o fotoperíodo. As condições ambientais amenas permitiram um bom

desenvolvimento da cultura, com um aspeto visual atrativo para o mercado, e não foram verificados sintomas que pudessem indicar que as condições ambientais tivessem sido prejudiciais à cultura.

**Tabela 18:** Dados de luminosidade durante o crescimento da cultura em SN; AR,SDP; AR SE; AR,SDP[K] e AR SE[K] no período de inverno

<b>Luminosidade (klx)</b>						
<b>Data</b>	<b>Hora</b>	<b>Ponto 1</b>	<b>Ponto 2</b>	<b>Ponto 3</b>	<b>Ponto 4</b>	<b>Ponto 5</b>
<b>13-jan</b>	10:30	3,42	3,47	5,56	5,07	2,23
<b>14-jan</b>	10:30	2,29	3,36	2,16	2,05	2,18
<b>15-jan</b>	11:30	5,01	3,82	5,11	5,19	4,50
	14:30	4,69	8,19	8,17	5,63	6,14
	18:00	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02
<b>16-fev</b>	10:00	2,33	2,38	2,54	2,33	2,50
	13:40	3,34	3,44	3,17	3,08	3,11
	16:30	0,50	0,52	0,50	0,49	0,52
<b>17-fev</b>	10:40	5,20	4,65	4,24	4,44	5,45
	13:00	4,30	4,21	4,17	4,00	4,17
	17:00	1,25	1,28	1,18	1,15	1,19
<b>18-fev</b>	10:00	0,95	0,92	0,86	0,82	0,87
	14:10	2,37	2,33	2,22	2,16	2,26
	17:30	1,01	1,00	0,84	0,86	0,96
<b>19-fev</b>	10:00	6,38	5,51	7,12	6,23	4,95
	14:00	0,84	0,83	0,96	0,97	0,96
	17:30	0,23	0,22	0,17	0,17	0,19
<b>22-fev</b>	10:15	5,72	5,28	5,95	7,58	5,64
	13:30	9,90	9,65	2,98	2,77	8,75
<b>23-fev</b>	10:00	2,90	2,97	3,39	3,18	2,59
	14:00	3,38	3,21	2,95	2,98	2,92
	18:00	0,12	0,12	0,12	0,11	0,12
<b>24-fev</b>	10:20	7,94	7,53	4,88	5,00	3,00
	12:40	8,49	7,30	7,28	9,42	8,67
	17:00	1,38	1,42	1,27	1,25	1,40
<b>25-fev</b>	10:00	1,48	1,50	1,60	1,61	1,61
	14:30	5,20	5,38	4,77	4,77	5,15
	18:30	0,02	0,01	0,02	0,02	6,01
<b>26-fev</b>	9:30	1,70	1,74	1,68	1,65	1,75
	14:20	5,64	5,08	5,55	5,45	5,04
	17:30	0,38	0,37	0,37	0,37	0,36
<b>01-mar</b>	13:30	3,00	3,13	3,30	3,15	2,94
<b>03-mar</b>	10:00	5,39	5,18	5,42	6,20	6,25
	12:30	2,38	2,76	2,48	2,50	2,60
	17:00	1,14	1,20	1,20	1,23	1,15

### 5.5. Comparação dos ensaios de crescimento realizados no período de inverno e no verão

Conhecer o crescimento da cultura nos períodos de inverno e de verão, que caracterizam extremos das condições ambientais ao longo de um ano, torna possível a sua comparação, o que permite estimar qual o período mais adequado para produção de alfaces em hidroponia, utilizando a AR.

Considerando os parâmetros de monitorização diária na água, nomeadamente T, pH, EC, SDT, OD e ORP, pode observar-se pelos dados da tabela 19 que é necessário um ajuste na temperatura para que se integre nas gamas recomendadas por Furlani et al., (1999), para os dois períodos do ano. A média dos valores de pH na SN apresenta uma diferença significativa entre os dois períodos, verificando-se que no inverno se encontra abaixo do mínimo recomendado. Na AR também é possível verificar uma diferença nos valores médios registados para o pH, porém não chega a ser tão significativa.

**Tabela 19:** Comparação dos valores medidos nos parâmetros de T, pH, EC, SDT, OD e ORP no inverno e no verão

Valor médio		T(°C)	pH	EC (µS/cm)	SDT (mg/L)	OD (mg O <sub>2</sub> /L)	ORP (mV)
SN	inverno	17,9	5,3	1679	972	5,9	277,4
	verão	24,4	6,5	2029	1017	6,3	248,7
AR, SDP	inverno	17,6	8,1	569	332	5,5	147,8
	verão	25,1	7,7	742	367	6,2	198,6
AR, SDP[K]	inverno	17,6	8,0	572	335	5,0	148,8
	verão	24,7	7,7	796	396	6,6	198,1
AR, SE	inverno	17,6	8,5	492	287	5,6	142,6
	verão	24,4	8,3	627	313	6,7	185,4
AR, SE[K]	inverno	17,8	8,4	524	304	5,4	150,8
	verão	24,3	8,3	713	356	6,7	195,1

Os valores de EC e SDT na AR, medidos no verão, foram maiores do que aqueles registados no inverno, sugerindo uma maior carga de nutrientes disponível nesse período. O efeito da temperatura da água na solubilidade dos seus componentes é corroborado pelos dados da tabela 19, identificando-se valores de EC e SDT mais altos na SN, no verão. Segundo Tomasi et al., (2014) é esperado que temperaturas mais altas favoreçam a solubilização dos componentes da solução nutritiva enquanto uma refrigeração da solução pode provocar uma precipitação parcial dos seus componentes.

Os dados da monitorização de OD revelam uma correta oxigenação das raízes, embora no verão se tenha medido uma maior quantidade de oxigénio dissolvido na água, mesmo para temperaturas superiores o que indica o bom funcionamento do sistema de arejamento associado a uma configuração do sistema adequada. Em termos de variação das quantidades medidas durante o crescimento da cultura, verificou-se que no verão houve menos oscilações, e que não foram acentuadas, mantendo-se o OD relativamente estável, dentro de uma dada gama.

Os valores de ORP medidos na AR no inverno são inferiores aos correspondentes ao período de verão, embora o comportamento da variável em função do tempo de crescimento da cultura tenha sido semelhante para ambos as estações do ano.

A análise da percentagem de remoção de nutrientes da água do sistema hidropónico (tabela 20) indica que o consumo por parte das plantas é maior no período de inverno.

**Tabela 20:** Comparação das percentagens de remoção de CBO<sub>5</sub> e CQO, N, P-total, PO<sub>4</sub> e K no inverno e no verão

%remoção		CBO <sub>5</sub>	CQO	N-(NO <sub>2</sub> +NH <sub>4</sub> +NO <sub>3</sub> )	P-total	PO <sub>4</sub>	Potássio
SN	inverno	---	---	15,0	35,1	22,7	35,0
	verão	---	----	6,5	12,0	11,8	62,4
AR, SDP	inverno	98,5	77,7	61,1	84,2	97,7	90,7
	verão	98,2	83,0	43,5	46,3	78,9	100
AR, SDP[K]	inverno	98,4	68,1	81,0	89,8	85,6	100
	verão	99,1	83,1	71,8	56,6	65,7	53,5
AR, SE	inverno	100	53,1	99,9	76,9	67,4	100
	verão	75,0	----	91,5	50,3	49,1	100
AR, SE[K]	inverno	85,7	44,4	99,9	76,8	65,1	100
	verão	80,0	----	99,4	59,9	61,4	99,5

Apesar das concentrações iniciais dos nutrientes na AR serem menores no inverno, observa-se que neste período do ano há um melhor aproveitamento dos nutrientes pela cultura, o que leva ao seu melhor desenvolvimento. Atendendo ao tempo de crescimento, pode-se assumir que o efeito das altas temperaturas na solubilidade dos nutrientes na água, e também na capacidade de acelerar o crescimento da cultura, possa ter sido o responsável pelas diferenças de crescimento, resultando em plantas que cresceram mais rápido no verão.

É conhecido que temperaturas do meio de crescimento, muito superiores ou muito inferiores à temperatura do ar, causam a incapacidade de aquisição de nutrientes pelas raízes (Tomasi et al., 2014). Como foi referido anteriormente, a temperatura da água no interior das caixas foi cerca de 1,8 °C inferior à temperatura do ar no verão; enquanto no inverno, a diferença

foi cerca de 0,4 °C. A diferença de temperatura observada no verão poderá ter levado à redução na aquisição de nutrientes, justificando o menor consumo. A diferença entre a temperatura do ar e da água chegou a atingir máximos de 6,4 °C, conforme dados registados aos 29 dias de crescimento da cultura, no período de verão.

A tendência para o consumo quase que total de nutrientes, tais como, o potássio e o azoto presentes na AR, pode ser lida como evidência da carência desses nutrientes nesta água. Embora se tenha considerado uma suplementação com potássio, esta poderá ter sido insuficiente. Porém, vale a pena realçar, que as concentrações presentes na SN podem ser consideradas excessivas, dadas as quantidades restantes no final dos ensaios. Uma forma de suprir as necessidades nutricionais na AR, para futura suplementação, passa pela caracterização da AR, tendo em conta outros nutrientes, nomeadamente macronutrientes (Ca, Mg, S) e micronutrientes (Mn, B, Zn, Cu, Mo, Cl), de modo a estimar com precisão as quantidades necessárias para suplementação.

Os valores de concentração medidos no final do ensaio, em especial na AR, SDP, mostram conformidade da água relativamente aos valores limite de emissão presentes no Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de agosto, considerando os parâmetros analisados. Dessa forma, o sistema funciona como técnica de tratamento da AR, após o tratamento primário, e melhora significativamente a qualidade da água tratada, pela redução da concentração poluente, em resultado do consumo pela cultura.

As plantas de alface são capazes de remover aproximadamente cerca de 77% do fósforo e 80% de azoto presentes na água residual urbana, e 87% do CBO<sub>5</sub> e 86% do CQO. Porém, as plantas cultivadas em água residual têm uma redução de mais de 50% na massa fresca, sendo que o fator determinante para essa redução está nas baixas concentrações de nutrientes na água residual (Boyden & Rababah, 1996). No sistema utilizado neste estudo, as percentagens de remoção pela cultura aproximam-se dos resultados de Boyden & Rababah, no período de inverno, chegando até a ultrapassar as percentagens obtidas pelos autores. Já no período de verão, a remoção é muito menor, especialmente na AR, SDP, que representou a condição com menor desenvolvimento da cultura.

Em termos de crescimento da cultura, o período de inverno revelou ser o melhor período para produzir alfaces em hidroponia, utilizando AR, SDP (tabela 21). Nesse período, produziram-se plantas mais pesadas e vistosas, sem ser preciso recorrer a suplementação. Também se pôde verificar que as características da água residual nesse período reduzem o problema da acumulação de sólidos junto às raízes na AR, SDP, o que permitiu o seu melhor desenvolvimento.

**Tabela 21:** Comparação do crescimento da cultura para parâmetros medidos no inverno e no verão

Crescimento médio total	SN		AR, SDP		AR, SDP[K]		AR, SE		AR, SE[K]	
	inverno	verão	inverno	verão	inverno	verão	inverno	verão	inverno	verão
<b>Número de folhas</b>	18	17	17	13	17	13	14	15	15	17
<b>Diâmetro ocupado pela folhagem (cm)</b>	25,0	38,7	21,2	17,9	21,0	23,0	19,7	25,6	18,1	22,8
<b>Comprimento da maior folha (cm)</b>	16,8	26,5	13,9	12,5	13,3	16,6	13,3	16,3	12,4	17,1
<b>Altura da planta (cm)</b>	23,1	25,1	17,0	13,1	16,9	16,5	14,8	15,4	14,9	15,7
<b>Comprimento da raiz (cm)</b>	27,9	39,3	30,7	20,9	23,6	25,5	27,0	32,2	23,9	44,0
<b>Massa das folhas (g)</b>	123,1	134,2	65,1	27,3	67,9	55,6	49,1	54,2	49,0	53,3
<b>Massa das raízes (g)</b>	10,9	14,9	7,2	6,3	6,1	9,7	7,2	9,4	7,1	8,8

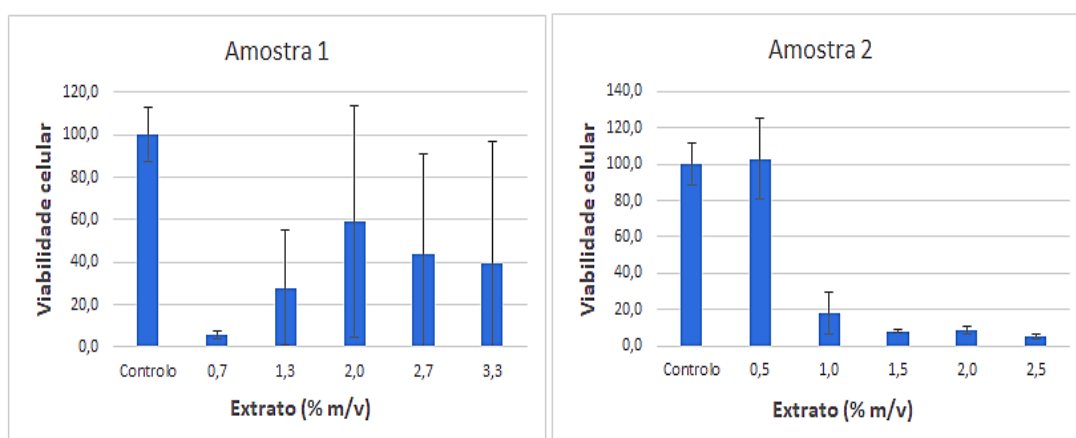
Nas restantes condições (AR, SE e SN), o período de verão favoreceu o desenvolvimento da cultura, mesmo com o consumo reduzido de nutrientes. Do ponto de vista nutricional da cultura talvez não seja um aspeto positivo, uma vez que o produto final poderá apresentar carências nutricionais na perspetiva do consumo humano.

Atendendo aos parâmetros de qualidade da água, crescimento da cultura e condições ambientais no interior do LSMI, recomenda-se o inverno como o período do ano indicado para produção hidropónica de alfaces. As condições ambientais amenas possibilitam um maior consumo dos nutrientes pela cultura, o que leva à uma melhoria na qualidade da água. Evita-se cenários onde as plantas estejam expostas à altas temperaturas, o que leva a que fiquem muitas, e episódios de surgimento de pragas na cultura, que encontram durante o verão um ambiente propício para a proliferação (altas temperaturas e humidade do ar). No entanto as baixas concentrações de nutrientes na AR nesse período do ano, são umas das limitações encontradas, pelo que é recomendável uma suplementação mais abrangente da AR voltada as necessidades nutricionais da cultura por forma a aumentar a produção neste período.

## 5.6. Análise de toxicidade

Os resultados dos ensaios de viabilidade celular com a linha de células Caco-2 de adenocarcinoma do cólon humano, permitem ter informação acerca da toxicidade associada à cultura usada no estudo. A resposta das células ao contacto com o extrato da cultura, medida através da viabilidade celular, pode ser indicador de toxicidade, sendo que a cultura é tóxica para as células quando põe em risco a sua viabilidade.

As amostras de alfaces recolhidas no sistema hidropónico onde se utilizava a solução nutritiva foram avaliadas, e os resultados estão apresentados na figura 35.

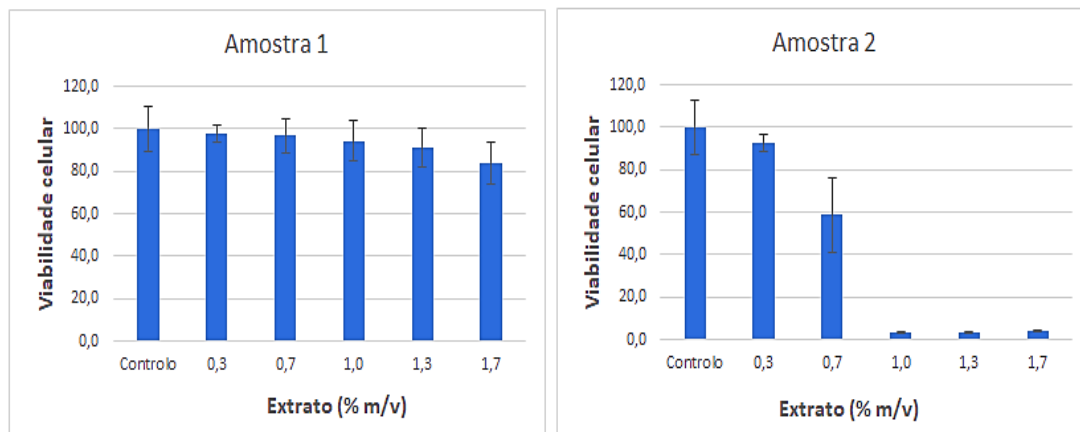


**Figura 35:** Resultados dos ensaios de viabilidade celular das células Caco-2, após exposição ao extrato das folhas de alface cultivadas na SN

Os dados da figura 35 mostram uma diferença significativa entre os ensaios realizados nas duas amostras. Essas diferenças, existentes em amostras provenientes da mesma condição de crescimento, podem ser lidas como indicativas da necessidade de efetuar ensaios com um maior número de amostras, por forma a assegurar que a viabilidade obtida para uma dada concentração se repete. A baixa viabilidade obtida (concentrações de extrato superiores a 0,5% (m/v)) pode estar relacionada com o fato da SN conter altas concentrações de nutrientes, que ao serem absorvidos pela cultura em grandes quantidades, vão degradar as células Caco-2, que são muito sensíveis. Outra justificação está nalguma possível contaminação da amostra. O elevado desvio padrão entre os triplicados dos ensaios de crescimento realizados (três ensaios por amostra), tem explicação na heterogeneidade do extrato da cultura.

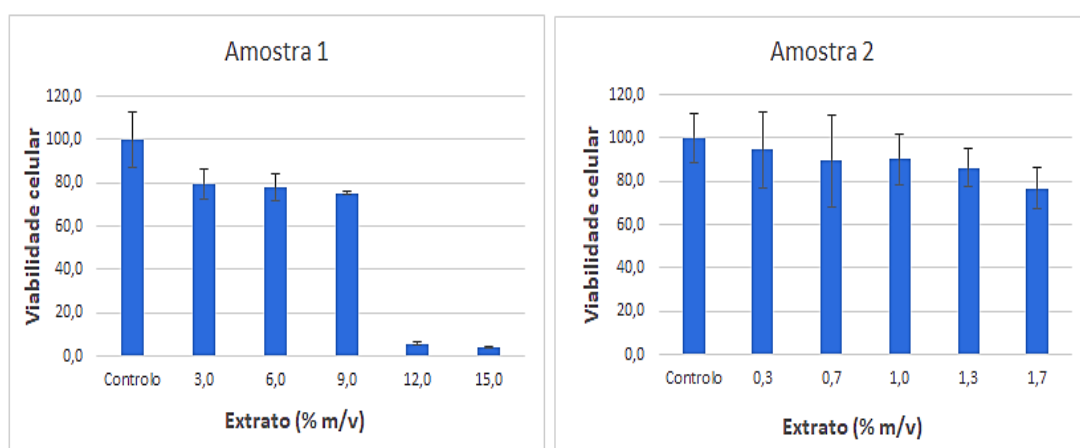
As amostras de alfaces provenientes do crescimento em AR, SDP (figura 36) também evidenciam uma diferença significativa entre as amostras analisadas. No entanto, os

resultados da viabilidade celular das células expostas às concentrações de extrato do teste obtidos numa delas, são muito próximas da viabilidade do controlo, o que indicaria que as alfaces não põem em perigo as células Caco-2, que se assemelham às encontradas no intestino humano. Já na segunda amostra, a partir da concentração de extrato de 1,0% m/v, a viabilidade das células é muito baixa.



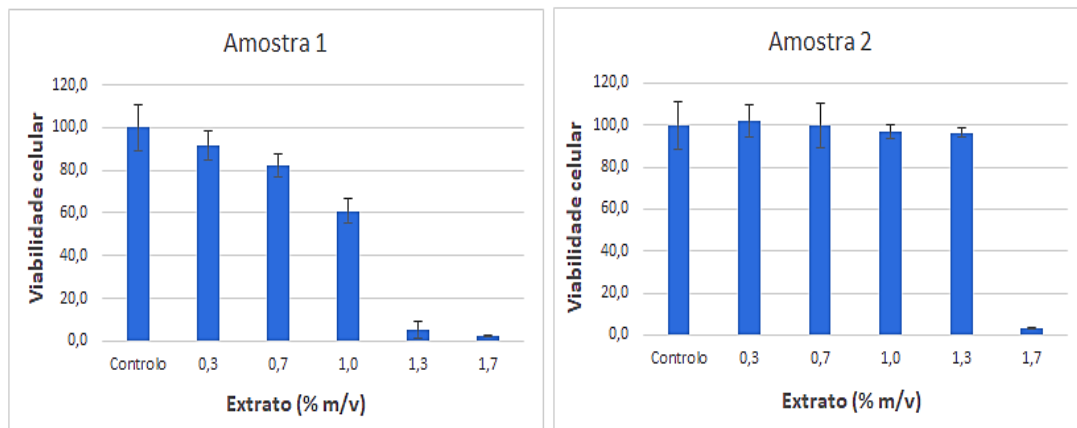
**Figura 36:** Resultados dos ensaios de viabilidade celular das células Caco-2 após exposição ao extrato das folhas de alface cultivadas em AR, SDP

As amostras de alfaces provenientes do cultivo hidropónico em AR, SDP[K] foram testadas para concentrações diferentes e numa gama de concentrações mais alargada. Pela figura 37, pode observar-se que, para baixas concentrações de extrato, os resultados de viabilidade celular se aproximam ao do controlo, e apenas as concentrações mais altas apresentam alguma toxicidade para as células.



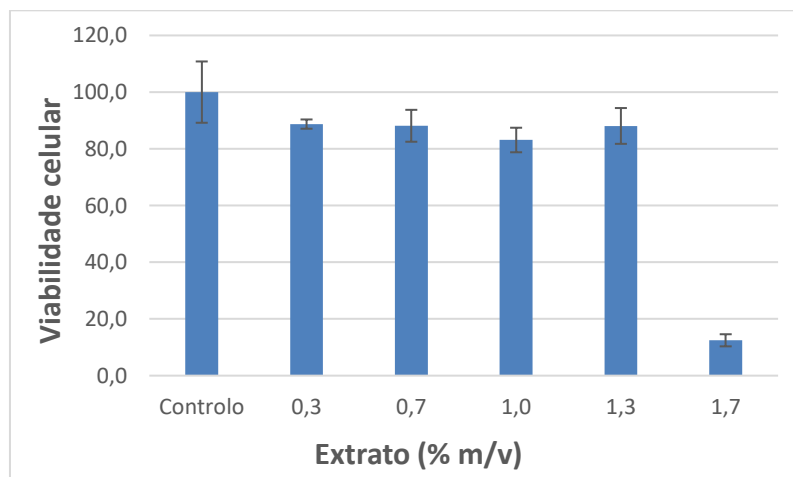
**Figura 37:** Resultados dos ensaios de viabilidade celular das células Caco-2 após exposição ao extrato das folhas de alface cultivadas em AR, SDP[K]

A necessidade de reforçar a quantidade de amostras utilizadas nos ensaios de viabilidade celular, é mais uma vez apoiada pelos resultados dos ensaios realizados às amostras de alfaces provenientes do crescimento hidropónico em AR, SE (figura 38). Esses dados apontam para uma viabilidade celular até uma concentração de 1% m/v, próxima da do controlo. Os resultados das outras concentrações não são conclusivos, sendo muito diferentes entre as amostras.



**Figura 38:** Resultados dos ensaios de viabilidade celular das células Caco-2 após exposição ao extrato das folhas de alface cultivadas em AR, SE

Por último, são apresentados os resultados dos ensaios realizado na amostra de alface proveniente do crescimento hidropónico em AR, SE[K] (figura 39). Apenas foi possível realizar ensaios em triplicado para uma amostra.



**Figura 39:** Resultados dos ensaios de viabilidade celular das células Caco-2 após exposição ao extrato das folhas de alface cultivadas em AR, SE [K]

Até uma concentração de 1,3% m/v, a viabilidade celular nas células expostas ao extrato da alface proveniente do crescimento em AR, SE foi próxima da obtida para o controlo.

A presença de bactérias ou fungos nas amostras pode fazer com que haja competição com as células Caco-2, que não conseguem sobreviver e morrem pela presença dos microrganismos, e não necessariamente pela composição da água.

É necessário que sejam efetuados novos ensaios por forma a obter dados coerentes nos duplicados. No entanto, os dados dos ensaios de viabilidade celular indicam que, para percentagens de extrato até 1%, não há evidência de toxicidade na cultura, em nenhuma das condições de fonte de nutrientes usadas no sistema hidropônico. As amostras têm em geral boa viabilidade e são indicativas de que não existem riscos associados ao consumo humano da cultura.

## 6. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

Os resultados obtidos no presente trabalho indicam que é possível cultivar alfaces num sistema hidropônico simples, utilizando água residual como fonte de nutrientes.

O período de inverno revelou ser o mais indicado para produzir alfaces em hidroponia, atendendo aos parâmetros de qualidade da água residual, crescimento da cultura e condições ambientais no interior da estufa. No inverno, apesar das concentrações iniciais dos nutrientes medidos na água residual se revelarem menores, os nutrientes foram melhor aproveitados pela cultura, levando a percentagens de remoção maiores, em relação ao período de verão, onde a cultura cresceu num curto período de tempo, possivelmente devido às altas temperaturas verificadas no interior da estufa e na água.

A solução nutritiva utilizada no presente estudo permitiu um bom crescimento das plantas, sendo uma boa referência para avaliar o desenvolvimento da cultura em crescimento na AR. Poderá não ser a mais indicada para este tipo de sistema, tendo em conta que se pretende cultivar uma pequena quantidade de plantas por caixa. Na verdade, a concentração de nutrientes na SN ainda se encontrava elevada no final dos ensaios, identificando-se percentagens de remoção muito baixas.

O sistema proporcionou uma melhoria na qualidade das águas residuais, permitindo a redução da carga de nutrientes, nomeadamente, um consumo mínimo de 43% N, 53% K e 46% do fósforo total. A remoção de  $CBO_5$  na água residual com apenas um tratamento primário (AR, SDP) foi superior a 98% e a remoção de CQO superior a 68%.

A água residual que sofreu apenas um tratamento primário, apesar de conter concentrações superiores de nutrientes (N e K), mostrou não ser a mais adequada para o crescimento de alfaces neste tipo de sistema, se este se verificar no verão, apresentando limitações que prejudicaram o crescimento da cultura, nomeadamente a concentração de nitritos, pH e sólidos, sendo mais evidente nas primeiras semanas. A carga de nutrientes na água residual tratada demonstrou ser limitante, com percentagens de remoção de nutrientes muito próximas dos 100%, em ambos os períodos do ano.

A análise de toxicidade realizada através de ensaios de viabilidade celular com a linha de células Caco-2 mostrou que, para percentagens de extrato até 1%, não há evidência de

toxicidade associada à cultura de alface proveniente do sistema hidropônico. As amostras tiveram em geral boa viabilidade, indicação de que não existem riscos associados ao consumo humano da cultura.

Para garantir que não haja contaminações com microrganismos, e dessa forma evitar a morte das células Caco-2, recomenda-se um maior cuidado na preparação das amostras para análise, nomeadamente através de lavagem, seguida de congelação e liofilização, realizada logo após a retirada da cultura do sistema hidropônico. Este procedimento certamente permitirá obter uma maior concordância entre duplicados, assegurando que não existe risco alimentar no consumo da cultura proveniente do sistema hidropônico com água residual.

Além da monitorização do pH na água, recomenda-se que seja feito o seu ajuste para as gamas recomendadas através de soluções de ácidos ou bases, consoante a necessidade de aumentar ou diminuir o pH do meio de crescimento.

O estudo de outros nutrientes essenciais ao crescimento da cultura como por exemplo cálcio, magnésio e enxofre, seria de elevado interesse, e permitiria conhecer a eventual necessidade de suplementação da água residual com estes nutrientes.

Recomenda-se uma suplementação da água residual que seja mais abrangente em nutrientes, para que se possa atingir resultados ainda mais satisfatórios.

## Referências Bibliográficas

- Adrover, M., Moyà, G., & Vadell, J. (2013). Use of hydroponics culture to assess nutrient supply by treated wastewater. *Journal of Environmental Management*, *127*, 162–165. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.04.044>
- Agencia Europeia do Ambiente. (2012). *Água na agricultura*. <https://www.eea.europa.eu/pt/articles/a-agua-na-agricultura>
- Agencia Portuguesa do Ambiente. (2015). *Plano Nacional da Água - Relatório N.º 2 Análise dos principais problemas, diagnóstico, objetivos e medidas*. [https://apambiente.pt/sites/default/files/\\_SNIAMB\\_Agua/DRH/PlaneamentoOrdenamento/PNA/2015/PNA2015\\_Relatorio\\_2.pdf](https://apambiente.pt/sites/default/files/_SNIAMB_Agua/DRH/PlaneamentoOrdenamento/PNA/2015/PNA2015_Relatorio_2.pdf)
- Ali, M. B., Khandaker, L., & Oba, S. (2009). Comparative study on functional components, antioxidant activity and color parameters of selected colored leafy vegetables as affected by photoperiods. *J. Food Agric. Environ*, *7*(3–4), 392–398.
- APHA. (2005). *Standard methods for the examination of water & wastewater* (A. D. Eaton, L. S. Clesceri, E. W. Rice, & A. E. Greenberg (eds.); 21st ed.). American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.
- Arienzo, M., Christen, E. W., Quayle, W., & Kumar, A. (2009). A review of the fate of potassium in the soil–plant system after land application of wastewaters. *Journal of Hazardous Materials*, *164*(2–3), 415–422.
- Boyden, B. H., & Rababah, A. A. (1996). Recycling nutrients from municipal wastewater. *Desalination*, *106*(1–3), 241–246.
- Buckseth, T., Sharma, A. K., Pandey, K. K., Singh, B. P., & Muthuraj, R. (2016). Methods of pre-basic seed potato production with special reference to aeroponics—A review. *Scientia Horticulturae*, *204*, 79–87. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.03.041>
- Carrijo, O. A., & Makishima, N. (2000). *Princípios de Hidroponia* (No. 22; Embrapa Hortaliças - Circular Técnica).
- Carvalho, R. da S. C., Bastos, R. G., & Souza, C. F. (2018). Influence of the use of

- wastewater on nutrient absorption and production of lettuce grown in a hydroponic system. *Agricultural Water Management*, 203, 311–321. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.03.028>
- Decreto-Lei n.º 119/2019, de 21 de agosto, Pub. L. No. Diário da República n.º 159/2019, Série I de 2019-08-21: Presidência do Conselho de Ministros, 21 (2019). <https://dre.pt/home/-/dre/124097549/details/maximized>
- Decreto-Lei n.º 152/97, de 19 de junho, Pub. L. No. Diário da República n.º 139/1997, Série I-A de 1997-06-19: Ministério do Ambiente, 2959 (1997). <https://data.dre.pt/eli/dec-lei/152/1997/06/19/p/dre/pt/html>
- Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de agosto, Pub. L. No. Diário da República n.º 176/1998, Série I-A de 1998-08-01:Ministério do Ambiente, 3676 (1998). <https://data.dre.pt/eli/dec-lei/236/1998/08/01/p/dre/pt/html>
- Decreto-Lei n.º 276/2009 de 2 de outubro, Pub. L. No. Diário da República n.º 192/2009, Série I de 2009-10-02 :Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, 7154 (2009). <https://dre.pt/pesquisa/-/search/490974/details/maximized>
- Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de junho, Pub. L. No. Diário da República n.º 116/2011, Série I de 2011-06-17: Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território, 3251 (2011). <https://dre.pt/pesquisa/-/search/670034/details/maximize>
- Espíndola, J. C., & Vilar, V. J. P. (2020). Innovative light-driven chemical/catalytic reactors towards contaminants of emerging concern mitigation: A review. *Chemical Engineering Journal*, 394, 124865.
- Félix, J. R. S. (2017). *Avaliação da Qualidade de Lamas de ETAR Urbanas : Contaminação por Metais* [Instituto Politécnico de Leiria]. [https://iconline.ipleiria.pt/bitstream/10400.8/2939/1/Relatório de estágio\\_Joana Félix.pdf](https://iconline.ipleiria.pt/bitstream/10400.8/2939/1/Relatório%20de%20estágio_Joana%20Félix.pdf)
- Furlani, P. R., Silveira, L. C. P., Bolonhezi, D., & Faquin, V. (1999). *Cultivo hidropônico de plantas*. Instituto Agrônômico. <https://books.google.pt/books?id=6tL2GwAACAAJ>
- Goncharuk, V. V, Bagrii, V. A., Mel'nik, L. A., Chebotareva, R. D., & Bashtan, S. Y. (2010).

- The use of redox potential in water treatment processes. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 32(1), 1–9.
- Grangeiro, L. C., da Costa, K. R., Medeiros, M. A. de, Salviano, A. M., Negreiros, M. Z. de, Bezerra Neto, F., & de Oliveira, S. L. (2006). Accumulation of nutrients by three lettuce cultivars grown under semi-arid conditions. *Horticultura Brasileira*, 24(2), 190–194.
- Grewal, H. S., Maheshwari, B., & Parks, S. E. (2011). Water and nutrient use efficiency of a low-cost hydroponic greenhouse for a cucumber crop: An Australian case study. *Agricultural Water Management*, 98(5), 841–846.
- Hershey, D. R. (1994). Solution culture hydroponics: History and inexpensive equipment. *The American Biology Teacher*, 56, No. 2, 111–118.
- Hussain, A., Iqbal, K., Aziem, S., Mahato, P., & Negi, A. K. (2014). A Review On The Science Of Growing Crops Without Soil (Soilless Culture) – A Novel Alternative For Growing Crops. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 7 (11), 833–842.
- Instituto Nacional de Estatística. (2019). *Estatísticas Agrícolas: 2018*. [https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine\\_publicacoes&PUBLICACOESpub\\_boui=358629204&PUBLICACOESmodo=2](https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_publicacoes&PUBLICACOESpub_boui=358629204&PUBLICACOESmodo=2)
- Jensen, M. H. (1997). Hydroponics. *Hort Science, University of Arizona, School of Agriculture*, 32.
- Jensen, M. H. (1999). Hydroponics worldwide - A Technical overview. *University of Arizona, School of Agriculture*, 1–12.
- Kamiloglu, S., Capanoglu, E., Grootaert, C., & Van Camp, J. (2015). Anthocyanin absorption and metabolism by human intestinal Caco-2 cells—A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 16(9), 21555–21574.
- Kang, J. H., KrishnaKumar, S., Atulba, S. L. S., Jeong, B. R., & Hwang, S. J. (2013). Light intensity and photoperiod influence the growth and development of hydroponically grown leaf lettuce in a closed-type plant factory system. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 54(6), 501–509.
- Kavga, A., Trypanagnostopoulos, G., Zervoudakis, G., & Tripanagnostopoulos, Y. (2018).

- Growth and Physiological Characteristics of Lettuce (*Lactuca sativa* L.) and Rocket (*Eruca sativa* Mill.) Plants Cultivated under Photovoltaic Panels. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 46(1), 206–212. <https://doi.org/10.15835/nbha46110846>
- Kay, C. J., Solomonson, L. P., & Barber, M. J. (1990). Oxidation-reduction potentials of flavin and Mo-pterin centers in assimilatory nitrate reductase: variation with pH. *Biochemistry*, 29(48), 10823–10828.
- Lazarova, V., Savoye, P., Janex, M. L., Blatchley Iii, E. R., & Pommepeuy, M. (1999). Advanced wastewater disinfection technologies: state of the art and perspectives. *Water Science and Technology*, 40(4–5), 203–213.
- Li, B., & Bishop, P. (2002). Oxidation-reduction potential (ORP) regulation of nutrient removal in activated sludge wastewater treatment plants. *Water Science and Technology*, 46(1–2), 35–39.
- López-Chuken, U. J. (2012). Hydroponics and environmental clean-up. *Hydroponics—a Standard Methodology for Plant Biological Researches*, 181.
- Lopez-Galvez, F., Allende, A., Pedrero-Salcedo, F., Alarcon, J. J., & Gil, M. I. (2014). Safety assessment of greenhouse hydroponic tomatoes irrigated with reclaimed and surface water. *International Journal of Food Microbiology*, 191, 97–102. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2014.09.004>
- Magwaza, S. T., Magwaza, L. S., Odindo, A. O., & Mditshwa, A. (2020). Hydroponic technology as decentralised system for domestic wastewater treatment and vegetable production in urban agriculture: A review. *Science of the Total Environment*, 698. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134154>
- Maucieri, C., Nicoletto, C., Junge, R., Schmutz, Z., Sambo, P., & Borin, M. (2017). Hydroponic systems and water management in aquaponics: A review. *Italian Journal of Agronomy*, 13(1). <https://doi.org/10.4081/ija.2017.1012>
- Metcalf, L., & Eddy, H. P. (2016). *Tratamento de efluentes e recuperação de recursos* (D. W. Nowaczyk (ed.); 5<sup>a</sup>). AMGH Editora,Ltda.
- Nosoilsolution. (n.d.). *6 different types of hydroponics systems*. Retrieved November 4,

- 2020, from <https://www.nosoilsolutions.com/6-different-types-hydroponic-systems/>
- OMS. (2006). *Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater - Volume 2 e 3* (p. 222). Organização Mundial da Saúde. [https://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/publications/gsuweg2/en/](https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/gsuweg2/en/)
- OMS. (2008). Guidelines for drinking-water quality. In *WHO chronicle* (Vol. 38, Issue 4).
- Pena, R. (2020). *Consumo de água*. Mundo Educação. <https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/consumo-agua-no-mundo.htm>
- PENSAAR 2020. (2015). *Uma Estratégia ao Serviço da População: Serviços de Qualidade a um Preço Sustentável, Volume 2*. [https://apambiente.pt/sites/default/files/\\_SNIAMB\\_Agua/DRH/PlaneamentoOrdenamento/PlanosSetoriais/SetorUrbano/PENSAAR2020/PENSAAR2020\\_Volume2.pdf](https://apambiente.pt/sites/default/files/_SNIAMB_Agua/DRH/PlaneamentoOrdenamento/PlanosSetoriais/SetorUrbano/PENSAAR2020/PENSAAR2020_Volume2.pdf)
- PNUEA. (2012). *Programa Nacional para o Uso Eficiente da Água*. Ministério da Agricultura do Mar do Ambiente e do Ordenamento de território. [https://apambiente.pt/sites/default/files/\\_SNIAMB\\_Agua/DRH/PlaneamentoOrdenamento/PlanosGestaoSecaEscassez/PNUEA/PNUEA\\_2020\\_Jun2012.pdf](https://apambiente.pt/sites/default/files/_SNIAMB_Agua/DRH/PlaneamentoOrdenamento/PlanosGestaoSecaEscassez/PNUEA/PNUEA_2020_Jun2012.pdf)
- Rana, S., Bag, S. K., Golder, D., Mukherjee Roy, S., Pradhan, C., & Jana, B. B. (2011). Reclamation of municipal domestic wastewater by aquaponics of tomato plants. *Ecological Engineering*, 37(6), 981–988. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.01.009>
- Ribeiro, A. R., Nunes, O. C., Pereira, M. F. R., & Silva, A. M. T. (2015). An overview on the advanced oxidation processes applied for the treatment of water pollutants defined in the recently launched Directive 2013/39/EU. *Environment International*, 75, 33–51.
- Rodrigues, S. J. V. (2015). *Cultura da Alface em Semi-Hidroponia* [Instituto Politécnico de Beja]. <https://repositorio.ipbeja.pt/handle/20.500.12207/4620>
- Santos Júnior, J. A., Gheyi, H. R., Dias, N. da S., Medeiros, S. de S., & Filho, D. H. G. (2014). Substratos e tempo de renovação da água residuária no crescimento do girassol ornamental em sistema semi-hidroponia / Substrates and time intervals of renewal of wastewater on growth of ornamental sunflower in semi-hydroponic system. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 18(8), 790–797.

<https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v18n08p790-797>

- Sapkota, S., Sapkota, S., & Liu, Z. (2019). Effects of nutrient composition and lettuce cultivar on crop production in hydroponic culture. *Horticulturae*, 5(4), 72.
- Savvas, D. (2003). Hydroponics: A modern technology supporting the application of integrated crop management in greenhouse. *Food, Agriculture & Environment*, 1(1), 80–86.
- Schoeninger, V., Giacomim, F., Monteiro, D. P. S., & dos Santos, R. F. (2011). Variação da incidência de radiação solar na cultura da alface (*Lactuca sativa* L. cv. Elisa). *Revista Cultivando o Saber*, 4(3), 1–8.
- Shalaby, I. M. I., Altalhy, A. D., & Mosallam, H. A. (2008). Preliminary field study of a model plant for sewage water treatment using gravel bed hydroponics method. *World Applied Sciences*, 4 (2), 238–243.
- Sharma, N., Acharya, S., Kumar, K., Narendra, S., & Chaurasi, O. P. (2018). Hydroponics as an advanced technique for vegetable production: An overview. *Journal of Soil and Water Conservation*, 17(4), 364–371.
- Sheets, J. P., Yang, L., Ge, X., Wang, Z., & Li, Y. (2015). Beyond land application: Emerging technologies for the treatment and reuse of anaerobically digested agricultural and food waste. *Waste Management*, 44, 94–115. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.037>
- Sigg, L. (2000). Redox potential measurements in natural waters: significance, concepts and problems. In *Redox* (pp. 1–12). Springer.
- Surra, E., Correia, M., Figueiredo, S., Silva, J. G., Vieira, J., Jorge, S., Pazos, M., Sanromán, M. Á., Lapa, N., & Delerue-Matos, C. (2021). Life Cycle and Economic Analyses of the Removal of Pesticides and Pharmaceuticals from Municipal Wastewater by Anodic Oxidation. *Sustainability*, 13(7), 3669.
- Tomasi, N., Dalla Costa, L., Pinton, R., Cortella, G., Terzano, R., Mimmo, T., Scampicchio, M., & Cesco, S. (2014). New “solutions” for floating cultivation system of ready-to-eat salad: A review. *Trends in Food Science and Technology*, 46(Part B), 267–276. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.08.004>

- Trejo-Téllez, L. I., & Gómez-Merino, F. C. (2012). Nutrient solutions for hydroponic systems. *Hydroponics-a Standard Methodology for Plant Biological Researches*, 1–22.
- Yadav, R. K., Chiranjeevi, P., Sukrampal, & Patil, S. A. (2020). Integrated drip hydroponics-microbial fuel cell system for wastewater treatment and resource recovery. *Bioresource Technology Reports*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100392>
- Yang, L., Giannis, A., Chang, V. W.-C., Liu, B., Zhang, J., & Wang, J.-Y. (2015). Application of hydroponic systems for the treatment of source-separated human urine. *Ecological Engineering*, 81, 182–191.