

Fazendas verticais *indoor*: uma abordagem das publicações no período de 2014 a 2023

Indoor vertical farms: an approach to publications from 2014 to 2023

Lara Ribeiro Andrade^{(1)*}, Rosete Pescador⁽²⁾

⁽¹⁾Acadêmica do curso de Agronomia do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Santa Catarina. Rod. Admar Gonzaga, 1346, Bairro Itacorubi, Caixa Postal 476, CEP 88040-900, Florianópolis, SC, Brasil.

⁽²⁾Professora, Depto de Fitotecnia, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Santa Catarina. Rod. Admar Gonzaga, 1346, Bairro Itacorubi, Caixa Postal 476, CEP 88034-001, Florianópolis, SC, Brasil.

* Autor correspondente – Email: lara_ribeiro03@hotmail.com

Resumo

Com o aumento populacional mundial, surgiram novos métodos agrícolas que visam promover o desenvolvimento sustentável do setor. Um desses métodos é o cultivo em ambiente controlado, mais especificamente nas Fazendas Verticais Internas (FVIs), que utilizam iluminação artificial e estruturas verticais para aumentar a produtividade e reduzir os impactos ambientais. Este estudo tem como objetivo fazer uma revisão da literatura sobre FVIs no período de 2014 a 2023. A pesquisa foi realizada na plataforma Capes usando os termos ‘vertical farms’ e ‘indoor’. Foram incluídos 46 artigos como resultado, nos quais observamos que as FVIs desempenham um papel eficiente no uso da água e do espaço produtivo. Por outro lado, são necessárias mais pesquisas para verificar os efeitos do uso de CO₂ nesse sistema. Existem vários estudos promissores acerca dos diferentes tipos de iluminação e uso aprimorado da energia elétrica, mas é essencial que os resultados da pesquisa sejam aplicados em escala produtiva para diferentes culturas, com ênfase na otimização dos custos produtivos.

Palavras-chave: agricultura urbana; fábrica de plantas; luz artificial; segurança alimentar.

Abstract

With the increasing global population, new agricultural methods have emerged to promote the sustainable development of the sector. One such method is cultivation in a controlled environment, specifically Indoor Vertical Farms (IVFs). IVFs utilize artificial lighting and vertical structures to enhance productivity and minimize environmental impacts. This study

aims to review the literature on IVFs from 2014 to 2023. The search was conducted on the Capes platform using the keywords 'vertical farms' and 'indoor'. A total of 46 papers were included as a result, in which we observed that FVIs play an efficient role in the use of water and productive space. On the other hand, more research is needed to verify the effects of CO2 use on this system. There are several promising studies about different types of lighting and improved electrical energy use, but it is essential that the research results are applied on a productive scale for different crops, with emphasis on optimizing production costs.

Keywords: urban agriculture; plant factory; artificial light; food security.

INTRODUÇÃO

Diante das limitações impostas pelos impactos ambientais e da crescente conscientização sobre o desenvolvimento sustentável, novos métodos agrícolas vêm sendo desenvolvidos nas últimas décadas, indo além da agricultura convencional em campo aberto (Stein, 2021). Um desses métodos é a agricultura vertical (AV), que ganhou popularidade nos últimos anos como uma abordagem sustentável para o setor agrícola (Jurga *et al.*, 2020). Esse sistema permite a produção de frutas e vegetais frescos, fazendo uso exclusivo de fontes de luz artificial, como lâmpadas de LED, por exemplo (Jin *et al.*, 2022). A Agricultura Vertical é um método de cultivo em ambiente controlado, no qual as plantas são protegidas das condições climáticas adversas por meio de estruturas específicas projetadas para o seu desenvolvimento. Por outro lado, uma Fazenda Vertical Interna (FVI) é uma forma de cultivo em múltiplas camadas ou prateleiras, dentro de um único prédio, no mesmo piso ou em diferentes andares. Essa prática geralmente é adotada em áreas urbanas, visando reduzir a distância entre os centros de consumo e a produção de alimentos. (LUBNA *et al.*, 2022).

A FVI funciona como um sistema de cobertura totalmente isolado, utilizando iluminação artificial para substituir a luz solar (Avgoustaki & Xydis, 2021). Essa técnica agrícola permite um controle preciso das condições ambientais, como temperatura, umidade e luz, favorecendo o crescimento das plantas de forma eficiente e sustentável. Segundo Benke & Tomkins (2017), as FVIs têm como objetivo aumentar a produtividade em espaços urbanos internos e climatizados, utilizando pequenas áreas e grandes estruturas verticais, ao mesmo tempo em que reduzem os impactos ambientais.

Conforme Lubna *et al.* (2022), o interesse pelas Fazendas Verticais Internas (FVIs) tem crescido ao longo da última década devido ao aumento das preocupações com o crescimento populacional global, os impactos das mudanças climáticas e a necessidade de garantir acesso a alimentos e recursos, como terra, água e energia. As tendências de pesquisa

em sistemas de FVIs estão, cada vez mais, focadas na economia e na qualidade da água, no controle do uso de águas pluviais e na utilização sustentável de recursos, o que requer adaptações (JURGA *et al.*, 2020). Além disso, Avgoustaki (2020) destaca que uma das principais limitações para a viabilidade das FVIs é a alta demanda energética.

É importante buscar soluções que tornem as FVIs mais eficientes em termos energéticos, visando reduzir seu impacto ambiental. Além disso, a pesquisa e o desenvolvimento contínuos são necessários para aprimorar a eficiência do uso de recursos, como água e nutrientes, e garantir a sustentabilidade desse sistema agrícola inovador.

Sendo assim, o objetivo com o trabalho foi realizar uma análise-descritiva-reflexiva dos artigos que tratam de ambos os temas ‘*vertical farms*’ e cultivo ‘*indoor*’ no período de 2014 a 2023.

MATERIAIS E MÉTODOS

Base bibliográfica

O presente trabalho utilizou a base de dados Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) como referência. Capes é um portal de biblioteca virtual reconhecido e de fácil acesso, que disponibiliza às principais produções científicas internacionais às instituições de ensino e pesquisa do Brasil.

Para realizar uma revisão bibliográfica consistente, foram abordadas as produções científicas realizadas nos últimos 10 anos (2014 a 2023), com objetivo de mapear os estudos acerca do tema cultivo interno em fazendas verticais. A pesquisa foi realizada no dia 27 de fevereiro de 2023, com base nos anos 2014 a 2023, utilizando de forma simultânea os termos “*vertical farm*” e “*indoor*”.

Seleção e análise de artigos

Foram adotadas as seguintes expressões para busca bibliográfica: “*vertical farm*” e “*indoor*” (terminologias no idioma inglês). Os critérios adotados para seleção dos estudos foram: (1) abordavam o tema fazendas verticais e cultivo interno; (2) estudos publicados no período de 2014 a 2023; (3) formato de artigo científico, (4) idiomas português e inglês, (5) por último, se enquadraram nos critérios anteriores, mas que abordavam, especificamente: resposta/resultado de culturas e cultivares; uso de recursos hídricos, energéticos e nutricionais; impactos positivos e negativos do sistema; e inovações para sistemas de fazendas verticais internas.

Foram excluídos os seguintes estudos: (1) repetidos; (2) em formato diferentes de artigo científico; (3) incompatibilidade com o tema de interesse deste trabalho.

Realizou-se a leitura de todos os 46 artigos incluídos nesta pesquisa, os quais foram analisados conforme metodologia descritivo-analítico-reflexiva e classificados em 3 (três) categorias distintas: (1) Potencial de fazendas verticais internas; (2) Análise da eficiência do uso de recursos (água, iluminação e energia elétrica, e CO₂); (3) Desafios e perspectivas das fazendas verticais internas.

RESULTADOS

Artigos inclusos

A pesquisa inicial, que incluiu simultaneamente os termos "*vertical farm*" e "*indoor*", resultou em um total de 89 publicações de artigos. Após a leitura dos títulos e/ou resumos completos desses 89 artigos, identificou-se que 4 trabalhos eram duplicados e 39 não estavam diretamente relacionados às Fazendas Verticais Internas (FVIs) ou não abordavam as categorias de interesse. Portanto, esses trabalhos foram excluídos.

No final, um total de 46 artigos foram analisados e incluídos neste estudo, pois se enquadram nos critérios estabelecidos para a pesquisa. Essa seleção rigorosa garante que os artigos utilizados sejam relevantes e contribuam efetivamente para o escopo e os objetivos deste trabalho.



Tabela 1. Resumo dos resultados da seleção de artigos encontrados para a pesquisa bibliográfica no Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), publicados até o dia 27 de fevereiro de 2023.

Fonte: elaboração do próprio autor.

De acordo com a análise dos artigos verifica-se:

1. Potencial de fazendas verticais internas

A limitação de terras aráveis, o clima variável, a escassez de água e a sazonalidade são fatores que reduzem a eficiência da produção agrícola em campo aberto. Por outro lado, embora a produção em estufas tenha uma produtividade maior, ela é limitada devido à sazonalidade, ao clima severo e à eficiência reduzida. Enquanto isso, há uma demanda crescente dos consumidores por produtos frescos derivados de plantas, produzidos localmente durante todo o ano, porém há uma limitação na confiança e estabilidade do fornecimento desses alimentos.

Nesse cenário, a Agricultura Vertical Interna (AVI) tem se mostrado capaz de complementar os sistemas convencionais de produção em campo e em estufa, aumentando a eficiência de produção. As FVIs (Fazendas Verticais Internas) possuem diversas vantagens, como a possibilidade de serem construídas perto dos consumidores, permitindo a produção ao longo de todo o ano e também não utilizam herbicidas ou pesticidas, o que as torna mais sustentáveis. Ademais, as FVIs geram oportunidades de trabalho com ergonomia, promovendo condições mais saudáveis para os trabalhadores. (NIU & MASABNI, 2021).

Stein (2021) argumenta que novos métodos agrícolas têm sido desenvolvidos nas últimas décadas. O autor procurou compreender o sistema de Agricultura Interna (AI) em FVIs e estufas internas de ambiente controlado, delineando as principais áreas de pesquisa e quais os efeitos em larga escala desse modelo produtivo sobre o meio ambiente, para trazer maior conhecimento do assunto aos pesquisadores de ciências ambientais. Reconhecendo que, conforme a AI ganha conhecimento sobre seu potencial de fornecer alimentos frescos a boa parte da população, existe crescente necessidade de pesquisas acerca de seus efeitos ambientais cumulativos e transformados sobre a água, ar e solo.

Conforme Benke & Tomkins (2017), entre as justificativas para a expansão das FVIs está a diminuição dos estoques de terra arável por pessoa, agravado pelo aumento populacional, urbanização, diminuição do abastecimento de água e mudanças climáticas contínuas. Para os autores, às FVIs buscam elevar produtividade, em pequenas áreas e grandes estruturas verticais, em espaços urbanos, internos e climatizados, reduzindo impactos ambientais. Entre suas vantagens estão a biossegurança, fonte alimentar limpa, ausência de pragas e intempéries ambientais (secas, inundações e danos causados pelo sol), redução do uso de transportes a longas distâncias e combustíveis fósseis, redução no uso de máquinas agrícolas e de solo. O elevado rendimento por hectare em curto espaço de tempo é outra vantagem que reflete no custo-benefício das FVIs frente a agricultura em campo.

Por sua vez, Engler & Moncef (2021) destacam que as FVIs fazem parte da Agricultura de Ambiente Controlado (AAC), por meio de suas estratégias, auxiliando a atingir as metas climáticas globais. Os pesquisadores revisaram e analisaram várias técnicas de ACC, ambientes ideais de cultivo interno, estudos de caso bem-sucedidos e pesquisa de sistemas de energia recomendados. Como resultado, em vários estudos mudanças nos sistemas uma instalação, como climatização, iluminação e incorporação de tecnologia de geração distribuída podem reduzir o consumo de eletricidade em até 75%. Pesquisas futuras acerca do controle de desumidificação, iluminação e variedade de culturas são vitais para uma adoção mais ampla das aplicações de ACC.

Hübbers & Buyel (2020) consideram que FVIs são capazes de aumentar o controle do cultivo em relação a campo aberto, o que interessa ao setor de fármacos para produção em larga escala de proteínas recombinantes extraídas de plantas. Entretanto, existe bastante complexidade em cada etapa do cultivo, e pouca pesquisa específica realizada e/ou disponível, sendo necessário um estudo prévio para determinar investimentos e custos de operação de uma FVI com esse objetivo. Empresas interessadas e atuantes no ramo percebem que às receitas financeiras vem mais do produto do que da informação de como fazê-lo, um viés positivo para facilitar o compartilhamento de informações da metodologia de produção.

Sabendo que para realizar o cultivo de grandes quantidades e qualidade de um produto definido é necessário a padronização do sistema de produção, Petersen *et al.* (2022) estudou a produção de lentilhas de água (espécies *Lemna minor* e *Wolffiella hyalina*) em FVI. Os autores constataram seu potencial de uso em nutrição humana e animal, podendo ser uma fonte alternativa ao farelo de soja, contendo 32% de proteína bruta (PB) do peso seco e elevados níveis de aminoácidos. Além disso, possui potencial biotecnológico e de tratamentos de águas residuais, ao produzi-la em fertilização *in vitro* aquática, com recirculação de pequena escala, iluminação artificial e um sistema de controle e dosagem de nutrientes.

Paucek *et al.* (2023) perceberam que as FVIs com uso de iluminação artificial são oportunidades de potencializar a produtividade, qualidade e segurança alimentar por todo ano, com uso mais sustentável da água e nutrientes minerais, auxiliando no desenvolvimento econômico e desafios de produção de alimentos. Para confirmar sua hipótese, os autores utilizaram 147 indicadores de desenvolvimento e analisaram as oportunidades e desafios em cada território, totalizando 54 estados analisados individualmente. Entre os países analisados, a África do Sul, Argélia, Cabo Verde, Egito, Marrocos, Maurício, Nigéria, Seychelles e Tunísia se destacaram quanto às melhores perspectivas para implementação de AVI, sendo

que a África do Sul, Egito e Seychelles pontuaram mais quanto à possibilidade de maior sustentabilidade de AVI. Em conclusão da pesquisa, sistemas simplificados com uso de materiais disponíveis localmente e redução de investimentos, têm potencial uso para o desenvolvimento de novas formas de cultivo em países menos viáveis.

De acordo com Abdullah *et al.* (2021), os países do Conselho de Cooperação do Golfo (CCG) fornecem alimentos importados suficientes para sua demanda populacional, o que pode ser ruim porque aumenta a dependência externa e vulnerabilidade em condições de escassez de alimentos. O artigo demonstra que cerca de 15 km² de área de AI ou menos de 0,1 km² de área de FVI são capazes de reduzir ou eliminar a importação de seis importantes hortaliças do Estado do Kuwait, sendo eles Tomate (*Solanum lycopersicum*), Batata (*Solanum tuberosum*), Pimentão verde (*Capsicum annum*), Cenoura (*Daucus carota*), Alface (*Lactuca sativa*) e Repolho (*Brassica oleracea* var. capitata L).

As iniciativas de AI, como FVIs, se tiverem embasamento e apoio de uma legislação definida e órgãos reguladores bem administrados, pode ser capaz de diminuir a dependência de alimentos importados e aumentar a disponibilidade de alimentos internamente, além de permitir a produção de variedades de interesse que não são cultivadas com eficiência ao ar livre em regiões áridas. Outras qualidades do sistema são a capacidade de fomentar o desenvolvimento econômico local ao criar oportunidades de empregos, maior colaboração público-privada, e iniciativas de pesquisa e desenvolvimento. (ABDULLAH *et al.*, 2021).

2. Análise da eficiência do uso de recursos

2.1. Recurso: água

A água é um recurso limitado que precisa ser conservado. A recuperação de águas pluviais está se tornando cada vez mais popular e incentiva a adoção de novas tecnologias no setor agrícola. Essas águas recuperadas e armazenadas ajudam a aliviar as redes de abastecimento que estão em busca de fontes alternativas de água. Com o aumento da popularidade da recuperação de águas pluviais para o desenvolvimento sustentável no setor agrícola, as tendências de pesquisa atualmente estão focadas na economia e qualidade da água, controle do manejo das águas pluviais e uso sustentável de recursos, o que requer adaptações (JURGA *et al.*, 2020).

Para Flores-Velasquez *et al.* (2022) a transpiração das culturas em ambiente é um importante fator de avaliação, funcionando como um sistema de arrefecimento ao estabilizar o ambiente da FVI. Para medir a evapotranspiração utiliza-se variáveis ambientais, como temperatura, pressão de vapor, vento e radiação no solo, além dos sensores de medição os

quais usam a ferramenta Internet das Coisas (IoT) para realizar registros em tempo real. Sistemas fechados podem ter o Uso Eficiente da Água (UEA) e energia estimada para fotossíntese e controle do clima, a partir do cálculo dos valores de radiação e transferência de fluxos.

Segundo Pacak *et al.* (2020), a água não utilizada pelas plantas pode ser recirculada em sistemas hidropônicos. Sendo assim, analisou o funcionamento do sistema de recuperação de água do ar de exaustão em um trocador de calor de fluxo cruzado que recupera a água do ar de combustão de um sistema de ar condicionado. Seus cálculos demonstraram que o sistema pode suprir a demanda de água para a irrigação da alface em FVI durante o período de frio e de transição - maior parte do ano - porém em períodos quentes pode não haver recuperação de água devido à temperatura do ar estar relativamente alta. A condensação não recuperada é descartada ou usada para outros fins, e a recuperada é pré-tratada em uma unidade de purificação de água antes de ser usada no cultivo. Caso não haja recuperação é necessário abastecer a irrigação com água da torneira ou verificar a possibilidade de recuperação de águas pluviais, interessante recurso em climas temperados.

Em continuação, o estudo de Jurga *et al.* (2020) demonstrou que um sistema de captação de água da chuva localizado em Wrocław (Polônia), sob o telhado de uma FVI, possui eficiência expressiva de captação apenas no verão. Assim o sistema híbrido avaliado por Pacak *et al.* e Jurga *et al.* (2020) possui maior custo-benefício ao longo do ano, permitindo uma grande redução do consumo de água da torneira no cultivo hidropônico de alface.

Sabendo que 70% da água doce disponível é utilizada no setor agrícola e os recursos hídricos estão cada vez mais limitados, Tavan *et al.* (2021) propuseram otimizar o gerenciamento de irrigação em VF no cultivo de *microgreens*, buscando aumentar a UEA e favorecer a produção de alimentos em quantidade e qualidade nutricional. O sistema usou um sensor de umidade dielétrica (SUD) para monitorar os níveis de água e imagens infravermelhas para avaliar o estado hídrico da planta e sua reação ao estresse, além disso também foi determinado o acúmulo de osmólitos (prolina). O SUD levou ao aumento da UEA, com bons resultados de rendimento fresco e qualidade de *microgreens* de couve preta Toscano (*Brassica oleracea* var. *acephala*), possuindo eficiência e menor custo. Enquanto, o nível de irrigação em 17,5% do Volume Efetivo do Recipiente (VEC) teve ótimos resultados e proporcionou UEA de 88 g/L (30% melhor que o método gravimétrico no mesmo nível de irrigação), com aumento de 11,5% do rendimento fresco.

2.2. Recurso: iluminação e energia elétrica

Para Avgoustaki *et al.* (2020) o uso de LEDs justifica-se devido ter a função de satisfazer às necessidades das propriedades de tipos de luz das folhas, além dos diferentes pigmentos de clorofila, capazes de ao capturar energia dar início a fotossíntese. Em seu estudo utilizaram plantas de manjeriço (Genovese) em sistema de iluminação LED contínuo (16 h de luz) e intermitente (14h de luz) e identificaram que o uso de iluminação intermitente, com ciclos curtos de 10 min de luz, não interferiu negativamente na qualidade e quantidade de plantas. A taxa fotossintética geral não teve diminuição significativa entre tratamentos internos, enquanto na iluminação intermitente não foi suficiente a luz para alcançar a eficiência fotossintética ideal do cultivo.

Conforme Pennisi *et al.* (2020), a iluminação artificial empregada em FVIs possui impactos relevantes nos custos produtivos, porém pouco se sabe sobre o manejo ideal do fotoperíodo. O número de horas por dia correlacionado à luz total fornecida (Luz Diária Integral - LDI) levam a melhor compreensão dos custos energéticos. Sabendo disso, os autores utilizaram em sua pesquisa vegetais folhosos e ervas - Alface, Manjeriço (*Ocimum basilicum* L.), Rúcula (*Eruca sativa* Mill.) e Chicória (*Cichorium intybus* L.) sob diferentes fotoperíodos com V:A 3:1 (proporção entre porcentagem de luz vermelha e luz azul). O estudo apresentou mudanças específicas por espécie com relação a variação do LDI e fotoperíodo, interferindo na morfologia e fisiologia, o que revela a necessidade de estudos específicos para espécies diferentes, garantindo o uso de técnicas mais adequadas e viáveis ao cultivo, para minimizar custos.

Pennisi *et al.* (2020) encontrou em seu experimento que a adoção de LDI de 14,4 mol m⁻² d⁻¹ (16 h d⁻¹ fotoperíodo) em alface e chicória tiveram maior biomassa fresca e área foliar que às cultivadas com LDI de 21,6 mol m⁻² d⁻¹ (fotoperíodo de 24 h d⁻¹) e também resultou em maior UEA para chicória. Por sua vez, o teor de matéria seca aumentou conforme o LDI para alface, manjeriço e chicória. Para alface e almeirão houve diminuição da EUE linearmente conforme aumento da LDI, enquanto a EUE, para rúcula, e o Uso Eficiente da Luz (UEL), para manjeriço e rúcula, se mantiveram constantes. Portanto, indica que o uso de luminárias LEDs com V:A 3:1, Densidade do Fluxo de Fótons Fotossintéticos (DFFF) de μ 250 mol m⁻² s⁻¹, fornecendo LDI de 14,4 mol m⁻² d⁻¹ (16 h d⁻¹ fotoperíodo) pode melhorar o cultivo de alface e almeirão.

Em consonância, para Kong (2019) o cultivo interno de alface possui um elevado custo com o uso de energia elétrica, a sustentabilidade desse tipo de indústria é um desafio que pode ser contornado ao maximizar a Eficiência do Uso de Energia (EUE) - relação entre produção de matéria seca e consumo de energia elétrica. Em seu trabalho descreve que os

LEDs possuem energia eficiente e alta adequação às FVIs, mas ainda é escasso o entendimento sobre a EUE e o Consumo de Energia Elétrica (CCE) na produção de alface com LEDs. Em sua pesquisa encontrou que a Eficiência de Fótons (EF), parâmetro muito usado na seleção de luminárias LEDs, pouco se relaciona com EUE em alface, devido EUE ser mais influenciada por espectros de qualidade de luz. Houve boa relação entre EUE e EFv (EF com base na luz vermelha) e o aumento da porcentagem de vermelho na V:A, aumentou ainda mais EUE. Os autores testaram três cultivares (cv) de alface ('Redine', 'Rex' e 'Organic Rouge d'Hiver') e, por final, indicaram LEDs com elevada EFv e V:A, de 4,0 a 4,5, para elevar o peso de massa seca da parte aérea de alface no cultivo interno.

Avgoustaki & Xydis (2021) realizaram o estudo com base na rede flutuante da Dinamarca, um país extremamente avançado na produção e uso de energias renováveis. O país utiliza o Operador do Sistema de Transmissão (OST), a partir dele os consumidores conseguem ter acesso ao real valor gasto da energia por hora e decidir quando usar ou não a energia. A pesquisa comprovou que o deslocamento de carga de eletricidade em fertilizações in vitro é capaz de reduzir de 16% a 26% os custos de iluminação artificial ao longo do ano, com base nas regulagens de período de escuro para cultura do manjeriço, independentemente do local e clima externo da FVI. Os autores não consideram essa viabilidade para culturas de produção em largas áreas abertas como o trigo (*Triticum spp.*) e cevada (*Hordeum vulgare*). Em contrapartida, produtos como o manjeriço, hortelã (*Mentha spicata*), tomate cereja e alface, têm boas expectativas de produção em FVIs em grandes centros de consumo, reduzindo o uso de transportes e promovendo um ambiente urbano mais inteligente.

O sistema de AV utilizando como única fonte de luz as lâmpadas LEDs é considerado relativamente novo e alguns fatores ainda não estão bem claros com relação ao tema, no estudo os autores procuram compreender como se comportam os fótons fotossintéticos incidentes para calcular a Eficiência do Uso da Luz (UELinc) em FVIs, no cultivo em estufa e em campo aberto. Os autores observaram que UELinc médio da alface em uma FV foi de $0,55\text{gmol}^{-1}$, $0,39\text{gmol}^{-1}$ em casa de vegetação e o menor foi de $0,23\text{gmol}^{-1}$ em cultivo a campo. O máximo valor de UELinc encontrado em sua pesquisa foi de $1,63\text{gmol}^{-1}$, é um valor semelhante a o valor teórico máximo publicado ($1,26$ a $1,81\text{gmol}^{-1}$). Com a capacidade de controlar totalmente os fatores ambientais, estima-se que a produção em FVI seja capaz de alcançar a capacidade máxima teórica de UELinc. Além disso, ao considerar os maiores valores de UELinc do peso fresco da parte aérea (44gmol^{-1} a $200\mu\text{molm}^{-2}\text{ s}^{-1}$ DFFF e

fotoperíodo de 16h), uma FVI poderia produzir cerca de 700 kg de alface/m²/ano em cada camada, utilizando 500µmolm⁻² s⁻¹ de luz contínua. (JIN et al., 2022).

Os pesquisadores Avgoustaki et al. (2020) procuraram verificar se o fotoperíodos de menor quantidade de horas de luz, utilizados no desenvolvimento da planta da semente até a germinação e maturidade da planta, interferem na produção de biomassa das plantas de manjericão e se podem ser empregados para otimizar o uso energético, reduzindo assim os custos. O estudo constatou que o tratamento com fotoperíodo reduzido de 16h para 14h de iluminação não afetou negativamente parâmetros de qualidade e quantidade de plantas de manjericão, o que pode favorecer positivamente nos aspectos energéticos, ecológicos e econômicos do sistema de produção em questão.

Em consonância, Avgoustaki et al. (2021) utilizou um sistema de FVI no cultivo de manjericão (var. *'platyphyllum'*), o efeito positivo utilizando luz intermitente foi superior ao contínuo, quanto ao crescimento, desenvolvimento, qualidade e quantidade das plantas. Houve aumento significativo de 47% na produção de biomassa do fotoperíodo intermitente, ante o contínuo, surtindo em maior economia, sustentabilidade e melhor resposta comercial e ecológica. Os valores de teor de clorofila, taxa fotossintética, de transpiração e condutância estomática das plantas seguiram taxa média de desenvolvimento para ambos fotoperíodos. Podendo concluir que para o consumo de energia e a produção de biomassa do manjericão, houve maior eficiência nos controles de luz intermitente nas horas escuras, se comparado ao fluxo contínuo de luz durante o dia. Ainda necessita-se pesquisas de intensidade de luz adequada e seleção de LEDs para outras espécies propícias a FVI e de potencial econômico e ambiental em larga escala, que podem auxiliar na avaliação e otimização dos custos de FVIs.

Em seu estudo QIAN et al. (2022) compararam o cultivo do agrião (*Nasturtium officinale* R. Br.) em três sistemas contrastantes, sendo ensaio em fazenda tradicional de agrião com água de nascente no Reino Unido (FRU), fazenda irrigada cultivada em solo na Califórnia (FCA) e FVI com dois níveis de proporção de luz (%) V:A (80:20 e 70:30). Verificaram que houve massa fresca significativamente mais elevada em FVI e FCA, mas FVI teve o cultivo com caule menos lenhoso, mais palatável e folhas de maior área foliar, se comparado a FCA. Ainda, os autores indicaram que alguns compostos glicosinolatos (GLS) alifáticos foram encontrados em maiores concentrações em FVI se comparado a FCA e FRU, e um novo composto (4-fenil-butil GLS) foi detectado em FVI, os quais tem propriedade benéficas a saúde. Concluindo assim que o rendimento e teor de nutrientes do agrião podem

ser melhorados em condições de FVI, devido à capacidade de controle rígida do ambiente, com nutrientes, temperatura e luz ideal.

Voutsinos *et al.* (2021) comparou a intensidade luminosa natural (ILN), em estufa mediterrânea durante o inverno, e artificial intensidade luminosa alta e baixa, 310 e 188 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, respectivamente) em AV, sobre alface manteiga (cv. Glória). Como resultado, a intensidade luminosa baixa produziu alfaces não comercializáveis (formato de vértice), a alta teve a maior biomassa vegetal. Intensidade luminosa alta e baixa tiveram maior fotossíntese líquida, e o mal desempenho de baixa intensidade luminosa, em relação a morfologia, foi reflexo da menor intensidade e uniformidade de luz, devido às lâmpadas LED estarem mais próximas que no tratamento com alta intensidade luminosa. Além disso, os autores observaram que o teor de nitrato em ILN foi maior, influência da maior variação na intensidade de luz e fotoperíodo. Encontraram também um teor de nitrato reduzido em alfaces cultivadas em AV, quando possuem até 100 g de massa fresca, se comparado ao cultivo em estufa, aumentando a segurança para o consumo alimentar. Por fim, verificaram que houve aumento significativo de biomassa e qualidade/quantidade fotossintética em alfaces com intensidade luminosa alta.

Hernández *et al.* (2016) avaliaram o crescimento e morfologia de mudas de tomateiro (cv. 'Komeett' e 'Beaufort') utilizando LEDs (A:V) e lâmpadas fluorescentes brancas frias (LFB), sob diferentes Fluxos de Fótons (FF). Os resultados demonstraram que os espectros A:V 30:70 e 50:50 produziram mudas melhores. Os LEDs 30:70 e 50:50 também tiveram 172% maior eficácia no crescimento de mudas do que às LFB. Tratamento com A:V FF foram responsáveis por área foliar 64-72% maior do que em tratamentos puros de 100 A e 100V. Para o tomate 'Komeett', a massa fresca e seca, número de folhas e concentração de clorofila, foi maior nos tratamentos A:V FF do que nos tratamentos 100 A e 100V. Por fim, os tratamentos com A FF (até 75%) obtiveram plantas com maior compacidade, menor comprimento do caule e severidade de intumescência, características desejáveis para o cultivo. Plantas sob LFB 10A:90V, 20A:28Ve:52V e 75A:25V tiveram qualidade aceitável.

Em seu estudo, Dou *et al.* (2020) usou o manjericão 'Improved Genovese Compact' (folha verde) e 'Red Rubin' (folha roxa) e algumas espécies da família Brassicaceae, como mostarda verde 'Amara' (*Brassica carinata*) e vermelha 'Red Giant' (*B. juncea*), couve verde 'Siberian' (*B. napus* var. *pabularia*) e vermelha 'Scarlet' (*B. oleracea*). Realizaram experimentos com FF 224 $\text{mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ e fotoperíodo de 16 horas, para os tratamentos V:A 88:12, 76:24 e 51:49 combinações de V e A, e as combinações de luz branca V:A:Ve

44:12:44 e 35:24:41. Como resultados, conforme aumenta-se FA (Fótons Azul), aumenta-se a fotossíntese e a concentração de fitoquímicos, mas se suprime o crescimento, rendimento e a quantidade total de fitoquímicos por planta. O FVe (Fótons Verde) relativamente alto levou à influência negativa sobre a fotossíntese, teor de clorofila, área foliar e rendimento das plantas. A utilização de luz verde teve efeitos negativos e positivos em relação ao acúmulo de fitoquímicos, o que revela a necessidade de mais pesquisas acerca dos efeitos deste comprimento de onda na síntese de metabólitos secundários. Houve efeito espécie-específico do Ve no alongamento de haste, diferindo em FV e/ou relações FA e V. Por sua vez, mais fótons azul aumentaram a clorofila em manjericão roxo e couve vermelha, porém suprimiu o alongamento do caule, expansão das folhas e diminuiu o acúmulo de biomassa da parte aérea em todas as espécies estudadas, afora mostarda vermelha. Ainda, para todas as espécies testadas, houve redução da biomassa da parte aérea em comprimentos de onda Ve se comparado às combinações V:A com FA semelhantes. Por fim, recomenda-se que uma luz branca com menores proporções de FA e Ve pode ser recomendada para cultivo de ervas culinárias e produção de folhas verdes de Brassica, levando em conta biomassa produzida, valores nutricionais e qualidade do ambiente de trabalho. (DOU *et al.*, 2020).

Barbi *et al.* (2023) calcularam o efeito da otimização de LEDs em diferentes estádios de crescimento de manjericão. Essa otimização de recursos e custos pode ser alcançada ao introduzir iluminação personalizada e sensores de monitoramento do cultivo ao longo do ciclo de crescimento de plantas. Durante o experimento, nos primeiros dias de crescimento (15-25 dias), a razão de luz LED V:A teve maior importância do que os LEDs brancos, assim a proporção V:A de 44% pode ser utilizada para maximizar parâmetros de crescimento. Outrossim, a intensidade luminosa determinou resposta para o número de plantas; altura de plantas; índice de área foliar e quantidade de água utilizada, cultivando manjericão e avaliando aos 30 dias.

Por sua vez, Cammarisano & Körner (2022) utilizaram duas cvs. de alface verde ('Aquino', CVve) e vermelha ('Barlach', CVv), para verificar os efeitos do aumento da proporção de luz azul:branca (A:B) ao comparar com luz branca (BB), utilizando FFD de $260 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ e fotoperíodo de 18h. Os resultados mostraram que houve aumento significativo de 20% de densidade e 17% de condutância estomática em CVve sob A:B, bem como aumento de 40% no índice de reflectância de antocianina modificado em CVv sob AB. A fotossíntese líquida teve maior resposta em CVve do que CVv, pois BA aumentou em 23 e 18%, respectivamente, quando comparadas a BB, sob DFFF $1000 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Assim, a luz

azul pode ser utilizada a curto prazo para favorecer a nutrição e a morfologia, visto que em longo prazo não afetou o acúmulo de biomassa, apesar do maior consumo energético.

Existe crescente interesse na produção de morango em FVIs e Park *et al.* (2023) realizaram experimento com a cv. 'Albion'. Como resultados, no crescimento vegetativo o aumento do DFFF (200 para 450 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) aumentou a biomassa da parte aérea e raiz, e diâmetro da copa, enquanto o aumento do fotoperíodo (12 para 16 h) aumentou a biomassa radicular. Já na fase reprodutiva, o aumento do fotoperíodo (12 para 16 h) acelerou a floração (quando $\text{DFFF} \geq 300 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) e frutificação (DFFF de 450 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) com boa colheita de frutos. Entretanto, o DFFF apresentou pouco ou nenhum efeito significativo sobre a floração, frutificação e colheita. Os autores recomendam que o aumento do LDI e DFFF ou fotoperíodo pode levar ao maior crescimento da planta, mas o efeito do maior fotoperíodo pode ser mais efetivo na floração e produção de frutos precoces.

Conforme Carotti *et al.* (2021), pouco se sabe sobre o efeito da frequência de comutação (fc), fator que auxilia na determinação da eficácia de iluminação LED, ao converter eletricidade em luz. Os autores utilizaram tratamentos com um fc baixo (293 kHz) e outro mais elevado (850 kHz) para LED azul, sendo fc de 443 kHz e 437 kHz, respectivamente, relação V:A 3:1, enquanto o terceiro tratamento foi realizado com luz fluorescente (LF). Os tratamentos foram realizados sob 16h de fotoperíodo, DFFF de 215 $\mu\text{mol m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ utilizando a cultura da alface "Gentilina" (cv. 'Rebelina', 'Gautier', 'Eyragues' e 'França'). Com resultado, a menor fc aumentou a Eficiência do Uso de Energia em 40%, se comparado a alta fc. A elevada fc melhorou os níveis de antioxidante da folha, aumentou as concentrações de ácidos catártico e chicórico, além da isoquercetina e luteolina, potencializando a biossíntese de compostos fenólicos (4C3H e DFR). Ainda, diferentes valores de fc tem capacidade de afetar significativamente EUE e propriedades nutricionais da cultura, porém não tem efeito significativo sobre morfologia, biomassa fresca ou seca, número de folhas, área foliar e UEA. A baixa fc foi capaz de afetar positiva e significativamente as plantas, em comparação com a alta fc e principalmente sob LF, mantendo um bom rendimento final de UEA o que pode ser um facilitador na economia de custos energéticos. Ainda, plantas cultivadas com alta fc obtiveram aumento significativo de compostos fenólicos derivados do ácido cafeico e flavonóis, e na Capacidade Antioxidante Total (CAT), melhorando propriedades nutraceuticas.

Kubota (2020) comparou teoricamente uma estufa hidropônica com iluminação suplementar e uma FVI com iluminação de fonte única, em Columbus, Ohio. Os resultados

indicaram custos de produção de alface maiores em FVI do que na estufa, com em média uma diferença de \$0,12 por unidade, diminuindo para \$0,01-0,07 no inverno, devido ao aquecimento intensivo e iluminação suplementar usado na estufa. A melhoria da eficiência da iluminação ou enriquecimento com CO₂ podem auxiliar na redução de custos em FVIs.

2.3. Recurso: CO₂

Huber et al. (2021) realizou experimento com quatro cultivares de tomate, sendo elas ‘Florida-47 R’, ‘Rebelski’, ‘Maxifort’ e ‘Shin Cheong Gang’. O experimento resultou em aumento da taxa de crescimento das plantas com aumentos na concentração de LDI e CO₂. Ao utilizar enriquecimento com CO₂, mesmo com padrões mais baixos (6,5LDI–1600CO₂, 9,7LDI–1000CO₂ e 9,7LDI–1600CO₂) que os comerciais de LDIs (13,0 mol. m⁻².d⁻¹), há bons efeitos no crescimento e morfologia de mudas de tomate, com boa manutenção da qualidade da planta, o que pode reduzir entre 25 a 50% do LDI, totalizando na diminuição dos custos de até 44%. Contudo, menores LDIs empregados foram associados a alongamento do hipocótilo das mudas. Assim, o autor indica manter LDI de 13,0 mol m⁻² d⁻¹, dentro do padrão comercial, e enriquecer com 1600 μmol mol⁻¹ de CO₂, produzindo plantas com boa morfologia, reduzindo 3% dos custos e 12% do tempo de produção.

O estudo de Lucena & Massuia (2021) mensurou o papel do modelo de agricultura urbana em FVIs de Singapura na redução de CO₂, ao comparar a agricultura convencional com a AV com iluminação natural e artificial. Os resultados encontrados demonstraram que a agricultura interna gerou 2,51 kg CO₂ por kg de alface produzida e consumiu 100 vezes mais energia do que AV com luz natural, portanto com maior potencial de aquecimento global.

3. Desafios e perspectivas das fazendas verticais internas.

Para Stein (2021), as FVIs estão entre os principais métodos de cultivo interno, que auxiliam na produção e fornecimento de alimentos, visto que, estamos em meio a mudanças climáticas, aumento dos custos de transporte e interrupção na cadeia de alimentos, podendo assim promover a construção de sistemas mais sustentáveis. Em comparação com estufas de ambiente controlado, às FVIs possuem a vantagem de cultivos em vários níveis, controle e conservação de água, porém exigem mais energia para operar equipamentos e iluminação. Comparativamente aos métodos tradicionais, são capazes de mitigar os impactos do escoamento de água superficial, erosão do solo, uso de pesticidas e a carga de nutrientes.

Ainda, pode reduzir a produção pontual de emissões de GEE como metano, nitrogênio e dióxido de carbono.

Conforme Lubna *et al.* (2022) as FVs possuem como vantagens a reduzir o consumo de água e degradação da terra, diminuir o uso de agrotóxicos e elevar a qualidade da colheita, enquanto diminui a distância do produtor e consumidor. Apesar das FVs possuírem maior potencial de eficiência no uso de diversos recursos, o uso exclusivo de iluminação elétrica eleva o uso e despesas com energia. Entre os obstáculos, o maior custo de operação, investimento e manutenção, quando comparado aos métodos tradicionais e visando elevada produção, torna o cultivo complexo e enfrenta escassez de informações acessíveis. Existem outros desafios, como construção dos sistemas de cultivo, manutenção de equipamentos, seleção de espécies adequadas, maior sanidade, atração e treinamento de trabalhadores, controle otimizado do ambiente e gerenciamento de decisões com base em dados e marketing. Para os autores, é necessário maior colaboração e compartilhamento de informações e experiências para desenvolvimento da indústria de FVs, diminuindo a necessidade de retrabalho em pesquisas e implantação dos sistemas, pois às informações específicas do setor auxiliam investidores a tomarem suas decisões.

De acordo com Parkes *et al.* (2022), às FVIs têm potencial para fortalecer sistemas alimentares urbanos circulares e assim diminuir desperdício, ao passo que aumentam a eficiência no uso de recursos. Esse sistema circular ao disponibilizar acesso ao local de compostagem e serviços de varejo também é capaz de remover a necessidade de transporte e assim diminuir a geração de materiais a serem descartados (resíduos orgânicos e plásticos). Além disso, esse modelo de cadeia encurtada e uso de energia renovável pode elevar o desempenho ambiental da fertilização *in vitro* integrada em edifícios.

Em seu estudo Parkes *et al.* (2022), quantificaram o desempenho ambiental ao integrar uma futura FVI a um edifício, com finalidade de produção de brócolis e *microgreens* para saladas, com auxílio da tecnologia IoT. Os pesquisadores estimaram uma capacidade de produzir 7,5 Kg de *microgreens* de brócolis diariamente. Se a venda ocorrer no próprio campus, que possui sistema de compostagem de resíduos, pode gerar 18,6 kg CO₂/kg, mas se for transportada e vendida fora do local pode aumentar em 20% essas emissões de CO₂. Ainda, as emissões poderiam ser reduzidas em 35% com o uso de uma fonte renovável de eletricidade, por meio de um sistema fotovoltaico conectado ao prédio. Para a venda interna ou externa, a eletricidade foi responsável pela emissão de 10,03 kg CO₂e/kg e às sementes por 4,04 kg CO₂e/kg, este último necessita de maiores pesquisas sobre a seleção de sementes.

Conforme Appolloni *et al.* (2021), a luz é considerada um dos principais fatores que podem interferir nas respostas dos fotorreceptores das plantas e assim modular genes expressos, bem como vias biossintéticas de diferentes metabólitos. Para os autores, a escolha da combinação do tratamento de luz deve considerar as respostas específicas da espécie de interesse e o metabólito a ser preconizado. Ao estudarem os efeitos da iluminação LED nos teores de metabólitos de plantas medicinais e aromáticas, *microgreens* e flores comestíveis, constataram que cada categoria de cultura possui respostas específicas aos tratamentos de iluminação e diferentes dentro da mesma espécie, a depender do metabólito especializado analisado. Isso significa que fornecer recomendações específicas acerca dos tratamentos de iluminação por categoria de cultura pode ser equivocado. Boa parte dos estudos acerca de metabólitos especializados, analisados pelos autores, analisaram fenóis, carotenóides e antocianinas, enquanto uma parte menos expressiva incluiu nas avaliações de terpenóides, tocoferóis e glicosídeos. Finalmente, observaram a necessidade de mais pesquisas acerca de luz ultravioleta suplementar, que pode ter aplicações de interesse econômico, porém questões de segurança alimentar e regulamentos existentes não têm estimulado, até então, seu uso.

O estudo de Avgoustaki *et al.* (2022) encontrou viabilidade no uso de imagens multiespectrais para irrigação (água) e manejo nutricional (nitrogênio) do manjericão com base no Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e Índice de Reflectância Fotoquímica (PRI). O sistema proposto é capaz de definir cronogramas e atualizar o sistema de tomada de decisão de forma automática, utilizando dados de reflectância específicos e simplificados da cultura. Dessa forma, a AVI pode ser beneficiada na produção de manjericão, favorecendo às condições e a manutenção da linha de produção e facilitando o monitoramento do empilhamento vertical das plantas. Por sua vez, o processo de automatização pode reduzir custos de produção significativos, relacionados principalmente à mão-de-obra, melhorar a eficiência do sistema produtivo, diminuindo desperdícios de recursos (água, energia e nutrientes). Finalmente, há necessidade de pesquisas com base em outras culturas para melhorias das condições ambientais e de cultivo, e aplicar a metodologia em larga escala e definir o LED ideal.

Em seu estudo, Orsini *et al.* (2020) procuraram entender a eficiência de FVIs frente os cultivos em hidroponia ou campo, para quatro espécies de folhas verdes, sendo elas alface, manjericão, rúcula e chicória. Já se sabe que o uso de água e o número de plantas/m² é melhor se comparado à agricultura convencional, mas para que as FVIs sejam viáveis, é necessário compreender além disso, integrando os avanços de iluminação, hidroponia e climatização. A energia ainda é responsável por elevados custos econômicos e de impacto

ambiental, por isso, é necessário compreender as diferentes necessidades de iluminação por cultura - além das folhosas verdes - e projetar soluções para níveis comerciais, são caminhos para elevar a sustentabilidade do sistema.

Weidner *et al.* (2021) em seu estudo verificou que a opção de ventilar uma estufa aberta em comparação a fechada, teve um efeito mais positivo no consumo específico de energia em climas menos extremos, mas por outro lado, levou ao aumento no consumo de água. Em contrapartida, as estufas abertas tiveram eficiência energética consideravelmente superior do que FVIs em locais como, por exemplo, Reykjavík (Islândia) e Gauteng (África do Sul). Ainda, os resultados encontrados indicam que para a maioria das regiões habitadas do planeta tem um desempenho energético melhor em estufas ventiladas do que em FVIs.

Em contrapartida, Cichocki *et al.* (2022) avaliaram o sistema “*Smart Office Farm*” (Fazenda de Escritórios Inteligentes, na tradução do inglês), para o ciclo de produção de alface crespa, lolo rosso, pak choi e manjeriço, em 5 semanas. Realizou-se uma análise técnico-econômica e encontrou-se despesas operacionais (sem custos de mão de obra) até duas vezes mais caras se comparado com FVIs de grande escala e cultivo em campo aberto. A eficiência energética também foi muito menor em relação a AV em larga escala, além de possuir produtividade menor e manejo menos eficiente.

Além disso, Hosseini *et al.* (2021) realizou experimento com alface (cv. ‘Batavia-Caipira’) e manjeriço (cv. ‘Emily’) em FVI utilizando a técnica de cultivo hidropônico fluxo e refluxo (conforme descrito no artigo), com DFFF de $215 \pm 5,5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e fotoperíodo de 16 h. Resultando em um nível de Condutividade Elétrica (CE) ideal para o crescimento e desenvolvimento do manjeriço de $1,2 \text{ dS m}^{-1}$ e de $0,9 \text{ dS m}^{-1}$ para alface.

Xu *et al.* (2020) verificaram que problemas com ‘tipburn’ (queima de folhas jovens) tem aumentando ao passo que há o aumento da taxa de crescimento da planta em cultivo interno, reduzindo qualidade e valor comercial do produto. Dessa forma, o controle dos valores de Taxa de Crescimento Relativa (TCR) abaixo do limite ($0,12 \text{ g.d}^{-1}$) entre 23 a 26 dias após semeadura foi indicado pelos autores para evitar a ocorrência desta anomalia em plantas de alface.

Conforme Asseng *et al.* (2020), a AV é um possível meio de produção de trigo, podendo ter rendimentos em FVIs de 220 a 600 vezes a média anual do rendimento global do trigo ($3,2 \text{ t/ha}$; ano de 2020). Para um índice máximo de colheita atingível, é necessário o emprego de temperatura otimizada, luz artificial intensa e de elevados níveis de CO_2 . Para os autores, apesar do ambiente interno favorecer o cultivo em áreas menores, reutilização da

água, mínimo uso de pesticidas e herbicidas e baixas perdas de nutrientes, os preços de mercado para venda dos produtos, a torna pouco competitiva. A iniciativa pode contribuir para a segurança alimentar, ainda que de forma pequena frente à necessidade de grãos demandada no mundo, mas é necessário maior conhecimento do assunto para reduzir capital e custos de energia nessas instalações.

Kaur *et al.* (2023) projetaram e construíram um sistema de FVIs operado por IoT em ambiente controlado (utiliza a Técnica do Fluxo Profundo) com ou sem automatização, entender a viabilidade e necessidades do clima do norte da Índia (região de Punjab). Ao realizarem a análise da alface romana produzida, observaram que o peso fresco da parte aérea para o sistema manual foi de 48,81g e para o automatizado 58,66g. O sistema automatizado promoveu maior comprimento e largura de folha e forneceu condições ótimas para desenvolvimento do cultivo, porém o custo total e o consumo de energia foram muito maiores, sendo recomendado para produção de larga escala. Já no sistema manual, observou-se grandes alterações nos valores de temperatura, pH e sólidos dissolvidos totais, podendo ser recomendado para produção de menor escala. Os autores propõem que trabalhos futuros podem levar em conta a automatização de CO₂ também e que algoritmos ML (*Machine Learning*) também podem ser testados para aumentar o desempenho dos sistemas automatizados.

De acordo com Baumont de Oliveira et al (2022) “a análise de risco financeiro apresentada usa um modelo de tempo inicial com limites de probabilidade para avaliar a quase-insolvência para duas fazendas verticais única”. Além disso, verificaram que a FVI do Reino Unido possui um risco financeiro crítico e opera com prejuízos, mas é possível aumentar a lucratividade e diminuir riscos ao injetar capital, coletar dados robustos, efetuar limpeza frequente, distribuir eficientemente e utilizar embalagens mais baratas. Já para a fazenda japonesa, em um estudo de caso hipotético, a diversificação das entradas de receita (como passeios e educação) podem reduzir o risco financeiro envolvido no rendimento e nas vendas, pois possui um modelo mais resiliente, com um bom retorno sobre o investimento.

Ainda, para Baumont de Oliveira et al (2022), em próximas análises é recomendado o uso de estudos de casos reais mais abrangentes, com diferentes culturas, modelos de negócios e configurações de FVIs, aumentando a credibilidade dos dados obtidos. A possibilidade do setor computar com incertezas, devido sua complexidade, poderia auxiliar na estimativa das finanças e assim facilitar o acesso ao financiamento de indústrias em fase de implantação. Por isso, o modelo de risco econômico apresentado pelos autores tem a capacidade de auxiliar analistas a calcular com mais precisão a produção real e os valores financeiros.

Outrossim, Parkes et al. (2023) analisaram o pilar sustentabilidade-governança em um projeto experimental de FVI que não foi adiante, no contexto de Agricultura Urbana (UA), realizado em 2018 com interesse de 27 grupos em Lisboa, Portugal. Os autores observaram que houve falha em engajar-se às partes interessadas na governança do projeto do início ao fim. Sendo assim, deve existir em futuros projetos de UA boas estruturas de governança que promovam o diálogo entre as partes, tornando o projeto sustentável. Se houver muitas partes interessadas no projeto, pode ser implementada uma estrutura de conselho de representantes, com uma pessoa responsável capaz de tomar decisões para todos os interessados e comunicá-los em tempo hábil. Também, pode se estabelecer no início os objetivos e serem usados como base para monitorar o andamento do projeto conforme avança.

O estudo de Hwang *et al.* (2022) foi capaz de desenvolver um método chamado Pseudo Mistura de Culturas (SC-Mix), em que o modelo treinado para monitorar o crescimento consegue atingir o desempenho ideal com poucos dados de culturas rotulados, uma vantagem para espécies de longo prazo, além de reduzir custos de construção de conjuntos de dados (que necessitam de atualização conforme a mudança das culturas). Os pesquisadores verificaram que o modelo proposto teve desempenho de 76,9%, sendo 12,5% maior que o método já existente de um conjunto de dados de uma FVI do tipo contêiner. Ao utilizar o modelo SC-Mix há precisão da área de cultivo, mesmo em condições de cultivos sobrepostos, assim auxiliando no aumento da produção dos cultivos em FVIs.

CONCLUSÃO

O sistema de produção em Fazendas Verticais Internas é um tema que tem sido abordado de forma mais intensa na última década. Esse trabalho encontrou publicações de 89 artigos nos últimos 10 anos (2014 a 2023) acerca de ambos os termos ‘*vertical farms*’ e ‘*indoor*’ (plataforma Capes), mas apenas 46 desses trabalhos foram selecionados e analisados.

A pesquisa verificou que as FVIs possuem potencial de produzir alimentos frescos ao longo de todo ano, diminuindo a necessidade de importação de alimentos, gerando oportunidades de trabalho de qualidade e aumentando o controle do cultivo. Além disso, mudanças na instalação quanto ao sistema de climatização, iluminação e outras tecnologias embutidas podem reduzir em até 75% o consumo de eletricidade.

Os artigos analisados foram suficientes para afirmar a eficiência do uso da água nesses sistemas, bem como a elevada produtividade por área. Entretanto, são necessárias mais pesquisas acerca de como o uso de CO₂ interfere na produtividade e desenvolvimento desses

cultivos. Por outro lado, existem muitos experimentos a respeito dos diferentes tipos e frequências de iluminação que favorecem o desenvolvimento de culturas específicas e a diminuição de custos com energia elétrica. Os estudos encontrados ainda precisam ser aplicados em escala produtiva e para diferentes cultivos, visando confirmar a eficiência do uso dos recursos empregados e assim viabilizar a produção.

As FVIs enfrentam diversos desafios técnicos, econômicos e ambientais, e o conhecimento atual acerca do tema aponta para a necessidade de estudos mais específicos sobre as diferentes culturas e técnicas utilizadas. Não há uma abordagem única para cada tipo de cultivo, nem se pode assumir que esse modelo produtivo substituirá completamente a agricultura convencional. No entanto, a capacidade produtiva das FVIs pode aproximar a agricultura dos centros urbanos, reduzir impactos ambientais e proporcionar alimentos com biossegurança.

Por fim, a existência de uma estrutura de apoio legal na localidade e região onde se pretende implementar uma FVI aumenta as chances de sucesso desse sistema produtivo. Isso reduz a dependência externa e, por consequência, aumenta a estabilidade no fornecimento de alimentos localmente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABDULLAH, M. J., et al. Potential for Food Self-Sufficiency Improvements through Indoor and Vertical Farming in the Gulf Cooperation Council: Challenges and Opportunities from the Case of Kuwait. *Sustainability* (Basel, Switzerland), vol. 13, no. 22, 2021, p. 12553., <https://doi.org/10.3390/su132212553>.
2. APPOLLONI, E., et al. Beyond Vegetables: Effects of Indoor LED Light on Specialized Metabolite Biosynthesis in Medicinal and Aromatic Plants, Edible Flowers, and Microgreens. *J Sci Food Agric*, vol. 102, no. 2, 2022, pp. 472–487., <https://doi.org/10.1002/jsfa.11513>.
3. Asseng, Senthold, et al. Wheat Yield Potential in Controlled-Environment Vertical Farms. *Proceedings of the National Academy of Sciences - PNAS*, vol. 117, no. 32, 2020, pp. 19131–19135., <https://doi.org/10.1073/pnas.2002655117>.
4. Avgoustaki, Dafni Despoina, and Xydis, George. Energy Cost Reduction by Shifting Electricity Demand in Indoor Vertical Farms with Artificial Lighting. *Biosystems Engineering*, vol. 211, 2021, pp. 219–229., <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.09.006>.
5. Avgoustaki, Dafni Despoina, et al. Autonomous Mobile Robot with Attached Multispectral Camera to Monitor the Development of Crops and Detect Nutrient and

- Water Deficiencies in Vertical Farms. *Agronomy (Basel)*, vol. 12, no. 11, 2022, p. 2691., <https://doi.org/10.3390/agronomy12112691>.
6. Avgoustaki, Dafni Despoina, et al. Basil Plants Grown under Intermittent Light Stress in a Small-Scale Indoor Environment: Introducing Energy Demand Reduction Intelligent Technologies. *Food Control*, vol. 118, 2020, p. 107389., <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107389>.
 7. Avgoustaki, Dafni Despoina, et al. Minimising the Energy Footprint of Indoor Food Production While Maintaining a High Growth Rate: Introducing Disruptive Cultivation Protocols. *Food Control*, vol. 130, 2021, p. 108290., <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108290>.
 8. Barbi, Silvia, et al. Quantitative Calculation of the Most Efficient LED Light Combinations at Specific Growth Stages for Basil Indoor Horticulture: Modeling through Design of Experiments. *Applied Sciences*, vol. 13, no. 2004, 2023, p. 2004., <https://doi.org/10.3390/app13032004>.
 9. Baumont de Oliveira, Francis J., et al. How High Is High Enough? Assessing Financial Risk for Vertical Farms Using Imprecise Probability. *Sustainability (Basel, Switzerland)*, vol. 14, no. 9, 2022, p. 5676., <https://doi.org/10.3390/su14095676>.
 10. Benke, Kurt, and Bruce Tomkins. Future Food-Production Systems: Vertical Farming and Controlled-Environment Agriculture. *Sustainability : Science, Practice, & Policy*, vol. 13, no. 1, 2017, pp. 13–26., <https://doi.org/10.1080/15487733.2017.1394054>.
 11. Cammarisano, Laura, and Oliver Körner. Response of Cyanic and Acyanic Lettuce Cultivars to an Increased Proportion of Blue Light. *Biology (Basel, Switzerland)*, vol. 11, no. 7, 2022, p. 959., <https://doi.org/10.3390/biology11070959>.
 12. Carotti, Laura, et al. Pulsed LED Light: Exploring the Balance between Energy Use and Nutraceutical Properties in Indoor-Grown Lettuce. *Agronomy (Basel)*, vol. 11, no. 6, 2021, p. 1106., <https://doi.org/10.3390/agronomy11061106>.
 13. Cichocki, Jędrzej, et al. Techno-Economic Assessment of an Office-Based Indoor Farming Unit. *Agronomy (Basel)*, vol. 12, no. 12, 2022, p. 3182., <https://doi.org/10.3390/agronomy12123182>.
 14. Dafni, Despoina Avgoustaki. Optimization of Photoperiod and Quality Assessment of Basil Plants Grown in a Small-Scale Indoor Cultivation System for Reduction of Energy Demand. *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 20, 2019, p. 3980., <https://doi.org/10.3390/en12203980>.
 15. Dou, Haijie, et al. Morphological and Physiological Responses in Basil and Brassica Species to Different Proportions of Red, Blue, and Green Wavelengths in Indoor Vertical Farming. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, vol. 145, no. 4, 2020, pp. 267–278., <https://doi.org/10.21273/JASHS04927-20>.

16. Engler, N. & Moncef, K. Review of Energy Efficiency in Controlled Environment Agriculture. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 141, 2021, p. 110786., <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110786>.
17. Flores-Velazquez, Jorge, et al. The Role of Radiation in the Modelling of Crop Evapotranspiration from Open Field to Indoor Crops. *Agronomy (Basel)*, vol. 12, no. 11, 2022, p. 2593., <https://doi.org/10.3390/agronomy12112593>.
18. Hernández, Ricardo, et al. Tomato Seedling Physiological Responses under Different Percentages of Blue and Red Photon Flux Ratios Using LEDs and Cool White Fluorescent Lamps. *Scientia Horticulturae*, vol. 213, 2016, pp. 270–280., <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.11.005>.
19. Hosseini, Hadis, et al. Nutrient Use in Vertical Farming: Optimal Electrical Conductivity of Nutrient Solution for Growth of Lettuce and Basil in Hydroponic Cultivation. *Horticulturae*, vol. 7, no. 9, 2021, p. 283., <https://doi.org/10.3390/horticulturae7090283>.
20. Huber, Brandon M, et al. Impact of Different Daily Light Integrals and Carbon Dioxide Concentrations on the Growth, Morphology, and Production Efficiency of Tomato Seedlings. *Front Plant Sci*, vol. 12, 2021, pp. 615853–615853., <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.615853>.
21. Huebbers, J.W., and J.F. Buyel. On the Verge of the Market – Plant Factories for the Automated and Standardized Production of Biopharmaceuticals. *Biotechnol Adv*, vol. 46, 2021, p. 107681., <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2020.107681>.
22. Hwang, Yujin, et al. Crop Growth Monitoring System in Vertical Farms Based on Region-of-Interest Prediction. *Agriculture (Basel)*, vol. 12, no. 5, 2022, p. 656., <https://doi.org/10.3390/agriculture12050656>.
23. Jin, Wenqing, et al. Light Use Efficiency of Lettuce Cultivation in Vertical Farms Compared with Greenhouse and Field. *Food and Energy Security*, vol. 12, no. 1, 2023, p. n/a., <https://doi.org/10.1002/fes3.391>.
24. Jurga, Anna, et al. A Long-Term Analysis of the Possibility of Water Recovery for Hydroponic Lettuce Irrigation in an Indoor Vertical Farm. Part 2: Rainwater Harvesting. *Applied Sciences*, vol. 11, no. 1, 2020, p. 310., <https://doi.org/10.3390/app11010310>.
25. Kaur, Gaganjot, et al. Comparative Analysis of IoT-Based Controlled Environment and Uncontrolled Environment Plant Growth Monitoring System for Hydroponic Indoor Vertical Farm. *Environ Res*, vol. 222, 2023, pp. 115313–115313., <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115313>.

26. Kong, Yuyao, et al. Spectral Quality of Light Can Affect Energy Consumption and Energy-Use Efficiency of Electrical Lighting in Indoor Lettuce Farming. *HortScience*, vol. 54, no. 5, 2019, pp. 865–872., <https://doi.org/10.21273/HORTSCI13834-18>.
27. Kubota, C. A Theoretical Comparison of Costs between Greenhouses and Indoor Farms: a Case Analysis in Ohio. *Acta Horticulturae*, no. 1296, 2020, pp. 79–86., <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2020.1296.11>.
28. Lubna, Farzana A., et al. What You May Not Realize about Vertical Farming. *Horticulturae*, vol. 8, no. 4, 2022, p. 322., <https://doi.org/10.3390/horticulturae8040322>.
29. Lucena, L. P. & Massuia, F. M. O Papel Da Moderna Agricultura Urbana De Singapura Na Política De Segurança Alimentar e Na Contribuição Da Redução De Emissão De CO2 Na Atmosfera. *Urbe. Revista Brasileira De Gestão Urbana*, vol. 13, 2021, <https://doi.org/10.1590/2175-3369.013.e20190272>.
30. Niu, G., and J. Masabni. Roles of Indoor Vertical Farming in Sustainable Production of Horticultural Crops. *Acta Horticulturae*, no. 1305, 2021, pp. 365–374., <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1305.48>.
31. Orsini, F., et al. Sustainable Use of Resources in Plant Factories with Artificial Lighting (PFALs). *European Journal of Horticultural Science*, vol. 85, no. 5, 2020, pp. 297–309., <https://doi.org/10.17660/eJHS.2020/85.5.1>.
32. Pacak, Anna, et al. A Long-Term Analysis of the Possibility of Water Recovery for Hydroponic Lettuce Irrigation in Indoor Vertical Farm. Part 1: Water Recovery from Exhaust Air. *Applied Sciences*, vol. 10, no. 24, 2020, p. 8907., <https://doi.org/10.3390/app10248907>.
33. Park, Yujin, et al. Growth, Flowering, and Fruit Production of Strawberry 'Albion' in Response to Photoperiod and Photosynthetic Photon Flux Density of Sole-Source Lighting. *Plants (Basel)*, vol. 12, no. 4, 2023, p. 731., <https://doi.org/10.3390/plants12040731>.
34. Parkes, Michael Graham, et al. An Experimental Portuguese Social-Enterprise Project in Urban Agriculture: A Case Study on the Influence of the Interaction of Stakeholder Roles on Sustainable Governance. *Sustainability (Basel, Switzerland)*, vol. 15, no. 4, 2023, p. 3817., <https://doi.org/10.3390/su15043817>.
35. Parkes, Michael G., et al. Life Cycle Assessment of a Prospective Technology for Building-Integrated Production of Broccoli Microgreens. *Atmosphere*, vol. 13, no. 8, 2022, p. 1317., <https://doi.org/10.3390/atmos13081317>.
36. Paucek, Ivan, et al. A Methodological Tool for Sustainability and Feasibility Assessment of Indoor Vertical Farming with Artificial Lighting in Africa. *Sci Rep*, vol. 13, no. 1, 2023, pp. 2109–2109., <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29027-8>.

37. Pennisi, G, et al. Optimal Photoperiod for Indoor Cultivation of Leafy Vegetables and Herbs. *European Journal of Horticultural Science*, vol. 85, no. 5, 2020, pp. 329–338., <https://doi.org/10.17660/eJHS.2020/85.5.4>.
38. Petersen, Finn, et al. Influence of Light Intensity and Spectrum on Duckweed Growth and Proteins in a Small-Scale, Re-Circulating Indoor Vertical Farm. *Plants (Basel)*, vol. 11, no. 8, 2022, p. 1010., <https://doi.org/10.3390/plants11081010>.
39. Petersen, Finn, et al. Re-Circulating Indoor Vertical Farm: Technicalities of an Automated Duckweed Biomass Production System and Protein Feed Product Quality Evaluation. *Journal of Cleaner Production*, vol. 380, 2022, p. 134894., <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134894>.
40. Qian, Yufei, et al. Improved Yield and Health Benefits of Watercress Grown in an Indoor Vertical Farm. *Scientia Horticulturae*, vol. 300, 2022, p. 111068., <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111068>.
41. Song, Shuang, et al. Comparison of Vegetable Production, Resource-Use Efficiency and Environmental Performance of High-Technology and Conventional Farming Systems for Urban Agriculture in the Tropical City of Singapore. *Sci Total Environ*, vol. 807, no. Pt 2, 2022, pp. 150621–150621., <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150621>.
42. Stein, Eric W. The Transformative Environmental Effects Large-Scale Indoor Farming May Have On Air, Water, and Soil. *Air, Soil and Water Research*, vol. 14, no. 1, 2021, p. 117862212199581., <https://doi.org/10.1177/1178622121995819>.
43. Tavan, Mahya, et al. Optimizing Sensor-Based Irrigation Management in a Soilless Vertical Farm for Growing Microgreens. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, vol. 4, 2021, <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.622720>.
44. Voutsinos, Orfeas, et al. Comparative Assessment of Hydroponic Lettuce Production Either under Artificial Lighting, or in a Mediterranean Greenhouse during Wintertime. *Agriculture (Basel)*, vol. 11, no. 6, 2021, p. 503., <https://doi.org/10.3390/agriculture11060503>.
45. Weidner, Till, et al. Energy Optimisation of Plant Factories and Greenhouses for Different Climatic Conditions. *Energy Conversion and Management*, vol. 243, 2021, p. 114336., <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114336>.
46. Xu, Wenshuo, et al. Relation between Relative Growth Rate and Tipburn Occurrence of Romaine Lettuce under Different Light Regulations in a Plant Factory with LED Lighting. *European Journal of Horticultural Science*, vol. 85, no. 5, 2020, pp. 354–361., <https://doi.org/10.17660/eJHS.2020/85.5.7>.