



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**Influência do manejo nutricional mineral na biossíntese de
metabólitos secundários em *Cannabis sativa L.*: a revisão**

Marcelo Gomes Sonogo

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no formato de Revisão Bibliográfica ao curso de Graduação em Agronomia, do Centro de Ciências Agrárias, da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Agrônomo. Orientador: Arcângelo Loss

Florianópolis – SC

Novembro/2025

Influência do manejo nutricional mineral na biossíntese de metabólitos secundários em *Cannabis sativa* L.: a revisão

Marcelo Gomes Sonego^{(1)*}, Arcângelo Loss⁽²⁾

⁽¹⁾ Acadêmico 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 8840-900, Florianópolis-SC, Brasil.

⁽²⁾ Professor, Depto. de Engenharia Rural, Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Santa Catarina. Rod. Admar Gonzaga,1346, Bairro Itacorubi, Caixa Postal 476, CEP 8840-900, Florianópolis-SC, Brasil.

*Autor Correspondente- E-mail: marcelogomessonego@hotmail.com

Resumo

A *Cannabis sativa* L. tem se consolidado como uma das culturas de maior relevância científica e econômica no cenário atual, impulsionada pela expansão do mercado de *cannabis* medicinal e pelos avanços regulatórios no Brasil e no mundo. Contudo, apesar desse crescimento, ainda há lacunas significativas no conhecimento agrônomo da espécie, especialmente no que se refere ao manejo da nutrição mineral em sistemas de cultivo controlado. Dessa forma, realizou-se essa revisão sobre o tema, compilando e analisando trabalhos publicados entre 2006 e 2025 que investigaram a influência dos macro e micronutrientes sobre o desenvolvimento vegetativo, a produtividade e o perfil de metabólitos secundários, principalmente canabinoides e terpenoides em cultivares medicinais de *C. sativa*. Os resultados demonstram que a nutrição mineral exerce papel determinante no equilíbrio entre crescimento e diferenciação celular, afetando diretamente a qualidade fitoquímica das inflorescências. Para o nitrogênio, faixas intermediárias (160–230 mg L⁻¹) favorecem a produtividade sem diluição metabólica dos canabinoides. O fósforo apresenta demanda muito inferior ao que se pratica comercialmente, sendo que níveis moderados (15–30 mg L⁻¹) sustentam pleno desempenho fisiológico. O potássio, embora essencial à osmorregulação, apresenta respostas negativas em concentrações excessivas devido ao antagonismo com Ca e Mg, sendo indicado o intervalo de 60–175 mg L⁻¹. Também se destaca a ausência de estudos robustos envolvendo Ca, Mg, S e micronutrientes, mesmo diante de sua relevância fisiológica e de interações nutricionais críticas. Assim, esta revisão evidencia a necessidade de protocolos nutricionais mais precisos, capazes de integrar equilíbrio iônico, sustentabilidade e qualidade química, contribuindo para o desenvolvimento de uma base científica sólida para o cultivo de *cannabis* medicinal no contexto brasileiro.

Palavras-chaves: Macronutrientes, micronutrientes, canabinoides, terpenos, sustentabilidade.

Influence of mineral nutrient management on the biosynthesis of secondary metabolites in *Cannabis sativa* L.: a review

Abstract

Cannabis sativa L. has established itself as one of the most scientifically and economically relevant crops in the current scenario, driven by the expansion of the medicinal *cannabis* market and regulatory advances in Brazil and worldwide. However, despite this growth, there are still significant gaps in the agronomic knowledge of the species, especially regarding the management of mineral nutrition in controlled environment agriculture (CEA). Therefore, this review on the subject was carried out, compiling and analyzing studies published between 2006 and 2025 that investigated the influence of macro and micronutrients on vegetative development, productivity, and the

profile of secondary metabolites, mainly cannabinoids and terpenoids, in medicinal cultivars of *C. sativa*. The results demonstrate that mineral nutrition plays a determining role in the balance between growth and cell differentiation, directly affecting the phytochemical quality of the inflorescences. For nitrogen, intermediate ranges (160–230 mg L⁻¹) favor productivity without metabolic dilution of cannabinoids. Phosphorus has a much lower demand than what is commercially practiced, with moderate levels (15–30 mg L⁻¹) supporting full physiological performance. Potassium, although essential for osmoregulation, shows negative responses at excessive concentrations due to antagonism with Ca and Mg, with the recommended range being 60–175 mg L⁻¹. The lack of robust studies involving Ca, Mg, S, and micronutrients is also noteworthy, even considering their physiological relevance and critical nutritional interactions. Thus, this review highlights the need for more precise nutritional protocols capable of integrating ionic balance, sustainability, and chemical quality, contributing to the development of a solid scientific basis for the cultivation of medicinal *cannabis* in the Brazilian context

Keywords: Macronutrients, micronutrients, cannabinoids, terpenes, sustainability.

1. Introdução

A *C. sativa* L., espécie herbácea da família Cannabaceae, é uma planta anual, anemófila, predominantemente dióica, de fotoperíodo curto, com milênios de histórico de cultivo para fins industriais, alimentares e medicinais. Originária da Ásia Oriental, sua domesticação remonta ao período Neolítico, há cerca de 12 mil anos, e estudos genômicos indicam que todas as cultivares modernas tanto as destinadas à produção de fibras no inglês conhecida por ‘*hemp*’, quanto as do tipo psicoativo no inglês conhecido por ‘*drug type*’, divergiram de um *pool* genético ancestral localizado na China (Ren *et al.*, 2021). Atualmente, há um consenso na comunidade científica de que o gênero *Cannabis* compreende uma única espécie, *C. sativa* L., pondo fim a antigas controvérsias taxonômicas (Barcaccia *et al.*, 2020).

A *C. sativa* L. apresenta um conjunto complexo de metabólitos secundários, principalmente canabinoides e terpenoides, que desempenham papéis metabólicos e farmacológicos relevantes. Esses metabólitos pertencem à classe dos terpenofenólicos, e suas vias biossintéticas são centrais para a produção de fitocanabinoides como o ácido tetraidrocanabinólico (THCA), o ácido canabidiólico (CBDA) e o ácido canabicromênico (CBCA). Além disso, os terpenos, responsáveis pelo aroma característico da planta, podem exercer efeitos sinérgicos com os canabinoides um fenômeno conhecido como efeito comitiva, ampliando o potencial terapêutico e a complexidade química dos extratos de *C. sativa* (Jin *et al.*, 2019; Elsohly *et al.*, 2014; Russo, 2011). Segundo Goff *et al.* (2022), são as plantas femininas de *C. sativa* que se destacam por produzir tricomas ricos em canabinoides, como o THC, o CBD e o CBG por exemplo, localizados na planta nas brácteas florais, o que explica a preferência das plantas fêmeas no cultivo comercial. Em contraste, plantas masculinas e hermafroditas

apresentam menor potencial produtivo, podendo ainda gerar polinização indesejada que reduz a qualidade das flores femininas. Neste sentido, observa-se ainda uma diferença na composição bioquímica de plantas macho, fêmea e hermafroditas, permitindo inclusive sua distinção por métodos analíticos como espectroscopia Raman. (Goff, *et al.*, 2022)

O mercado global de *C.sativa* medicinal, avaliado em US\$ 27,38 bilhões em 2024, apresenta projeção de crescimento acentuado, podendo atingir US\$ 89,46 bilhões até 2033, a uma taxa composta anual de 14,06%. Esse avanço é impulsionado pela ampliação da legalização, pela crescente demanda por terapias alternativas, especialmente no tratamento de dor crônica e epilepsia, e pelos investimentos do setor farmacêutico em produtos derivados (Straits Research, 2024). Nos últimos anos, o cenário tem se transformado rapidamente. De acordo com o Anuário da Cannabis Medicinal 2024, (Kaya mind, 2024), mais de 672 mil brasileiros utilizam produtos à base da planta, um aumento de 56% em relação a 2023. As autorizações individuais de importação ainda correspondem a quase metade dos pacientes (313 mil), embora o acesso por farmácias (31%) e associações especializadas (22%) esteja em expansão. O mercado nacional já conta com mais de 2.180 produtos registrados, em formulações diversas como óleos, cápsulas e preparações tópicas.

Historicamente, o uso da *C.sativa* acompanha o desenvolvimento das civilizações. No Brasil, segundo Carlini (2006), sua introdução ocorreu no período colonial, trazida por pessoas escravizadas de origem africana, o que explica sua denominação popular de “fumo-de-Angola”. Inicialmente difundida entre comunidades afrodescendentes e indígenas, a planta passou a ser valorizada séculos mais tarde por intelectuais e médicos europeus por seu potencial terapêutico. Contudo, a partir da década de 1920, consolidou-se um processo de criminalização e estigmatização, intensificando-se após a II Conferência Internacional do Ópio, Genebra (1924), quando um delegado brasileiro fez a seguinte declaração: “a maconha é mais perigosa que o ópio”. Em paralelo a esse cenário, diversos países vêm estabelecendo modelos regulatórios para uso medicinal e/ou recreativo da *C.sativa*, com diferentes níveis de liberalização e controle. No Brasil, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa) iniciou a flexibilização do acesso por meio da importação excepcional em 2015 e, em 2019, aprovou a RDC 327, que regulamenta a fabricação, importação e comercialização de produtos medicinais à base de *C.sativa* (Brasil, 2019). Em 2024, a agência avançou

ao aprovar a Análise de Impacto Regulatório (AIR) voltada à futura normatização do cultivo medicinal em território nacional (Anvisa, 2024).

Sob o ponto de vista produtivo, diferentes sistemas de cultivo apresentam impactos ambientais e técnicos distintos. Segundo Zheng, Fiddes e Yang (2021), o cultivo ao ar livre é o método tradicional e de menor custo, mas está sujeito às condições climáticas e ao manejo de solo e água, podendo causar degradação ambiental. Em contrapartida, o cultivo em ambientes controlados permite o controle preciso de fatores como luz, temperatura e umidade, assegurando qualidade padronizada, mas exige alto consumo energético e investimentos mais elevados. Neste sentido, Hershkowitz e Bugbee (2025), afirmam que, ambientes controlados facilitam o monitoramento e o controle rigorosos da entrada de nutrientes e água, permitindo a fertilização de precisão.

De acordo com a Health Canada (2021), as normas de boas práticas de fabricação reforçam o uso desses sistemas controlados, especialmente na produção farmacêutica, onde a rastreabilidade por lote é essencial. Estudos agronômicos recentes evidenciam que o manejo nutricional e o ambiente de cultivo exercem forte influência sobre o metabolismo da planta, a absorção de nutrientes e o perfil fitoquímico, afetando a síntese de canabinoides e terpenos (Shiponi e Bernstein, 2021; Saloner e Bernstein, 2023).

Embora o avanço econômico e regulatório do setor seja expressivo, persistem desafios agronômicos significativos. A ausência de protocolos nutricionais consolidados para *C. sativa* em ambientes controlados e a complexa interação entre ambiente e síntese de metabólitos secundários revelam uma lacuna científica importante. Diante disso, o objetivo deste trabalho foi realizar uma revisão sobre o tema compilando e analisando a literatura disponível sobre a nutrição mineral da *C. sativa* e seus efeitos na produção de canabinoides e terpenos. Busca-se, com isso, fornecer uma base de conhecimento integrado que possa subsidiar futuras pesquisas e o desenvolvimento de práticas de cultivo sustentáveis e de alta eficiência no contexto brasileiro, garantindo produtividade, qualidade e a desejada padronização farmacêutica.

2. Metodologia

A busca bibliográfica que fundamentou esta revisão integrativa foi realizada entre os meses de setembro e novembro de 2025, com o objetivo de reunir e analisar publicações relacionadas à nutrição mineral de *C. sativa* em cultivos controlados e seus efeitos na produção de metabólitos secundários, além de sugerir uma possível faixa

recomendação a ser usada em um protocolo de fertirrigação em *C.sativa*, com base nos estudos analisados, com o intuito de agregar algum embasamento científico no cultivo de *C.sativa*, que notoriamente ficou anos sem publicar estudos por conta do proibicionismo em volta da planta de *C.sativa*. Foram utilizadas combinações de palavras-chave e operadores booleanos em português e inglês, incluindo: “*nutrição mineral de cannabis*”, “*cannabis hidropônica*”, “*cultivo controlado de cannabis*”, “*cannabis e metabólitos secundários*”, “*manual de cultivo de cannabis*”, “*mineral nutrition of Cannabis*”, “*hydroponic cannabis*” e “*controlled environment cultivation*”.

As buscas abrangeram diferentes bases e repositórios acadêmicos, como: ScienceDirect, Frontiers in Plant Science, MDPI, Science Advances, SciELO e Google Acadêmico, além de teses, dissertações, livros e publicações institucionais como relatórios da Health Canada, (2023) e Kaya mind, (2024). O recorte temporal compreendeu publicações de 2006 a 2025. No total, foram identificadas aproximadamente 40 publicações, das quais aproximadamente 30 foram selecionadas para análise aprofundada. A seleção baseou-se nos seguintes critérios de inclusão:

- Estudos que abordassem *C.sativa* L. cultivada em condições controladas (indoor, estufa ou hidroponia);
- Trabalhos que apresentassem manejo ou formulação de soluções nutritivas minerais e/ou organominerais;
- Pesquisas que correlacionassem nutrição e síntese de metabólitos secundários (canabinoides, terpenos);

Foram excluídos artigos de enfoque farmacológico, genético ou toxicológico humano, bem como materiais sem descrição experimental, resumos de eventos e duplicatas. A análise dos estudos foi conduzida de forma qualitativa e interpretativa, com base na metodologia proposta por Souza, Silva e Carvalho (2010) para revisões integrativas, mas adaptada ao formato de revisão narrativa temática. Cada artigo foi avaliado quanto a:

- Espécie e genótipo de *C.sativa*;
- Tipo de sistema de cultivo (solo, substrato, hidroponia);
- Formulação da solução nutritiva e concentração de nutrientes;
- Variáveis fisiológicas e fitoquímicas avaliadas (biomassa, teor foliar, conteúdo de canabinoides e terpenos);

- Resultados relevantes para a correlação entre nutrição mineral e metabólitos secundários.

Os dados foram organizados em planilhas e categorizados conforme fase fenológica (vegetativa e reprodutiva) e nutriente principal estudado (N, P, K, Ca, Mg, S e micronutrientes).

3. Revisão teórica

3.1. Macronutrientes no cultivo de *Cannabis sativa* L

Nitrogênio (N)

O nitrogênio é, depois do carbono, o elemento mais essencial ao desenvolvimento vegetal, desempenhando papel central no metabolismo das plantas por ser componente estrutural de proteínas, ácidos nucleicos, clorofila, coenzimas, fitormônios e metabólitos secundários (Hawkesford *et al.*, 2012). Após sua absorção nas formas de amônio (NH_4^+) ou nitrato (NO_3^-), o N é assimilado em aminoácidos nas raízes ou na parte aérea e posteriormente translocado pelo xilema e floema, principalmente sob a forma de nitrato ou aminoácidos (Hawkesford *et al.*, 2012). Para Wogiatzi *et al.* (2019), o nitrogênio é o nutriente mais exigido durante a fase vegetativa, por estar diretamente associado ao metabolismo primário e ao crescimento estrutural da planta.

Na cultura da *C.sativa*, o manejo da nutrição nitrogenada exerce influência direta tanto sobre o crescimento quanto sobre a biossíntese de metabólitos secundários. Caplan *et al.* (2017) avaliaram diferentes doses de fertilizante orgânico líquido na fase vegetativa da *C.sativa* variedade 'WP:Med (Wappa)', o fertilizante com nome comercial de *NutriPlus Organic Bloom* (2,0N–0,87P–3,32K) além de fornecer (em $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$): 100,0 de Mn, 10,0 de Zn, 12,8 de B, 0,1 de Mo, 2,3 de Cu e 6,8 de Fe, em um substrato orgânico a base de fibra de coco com nome comercial de *ABCann UNIMIX 1-HP*, observaram que o aumento do suprimento de N favoreceu o crescimento vegetativo e a produção de biomassa floral até 389 mg L^{-1} , com teores máximos de tetraidrocannabinol (THC) e canabinol (CBN) em torno de 418 mg L^{-1} . Contudo, Caplan *et al.* (2017) em outro experimento conduzido na fase de floração utilizando os mesmos substratos e fonte de fertilizante do experimento anterior, porém com doses menores de N, os autores verificaram que doses elevadas de N estimularam excessivamente o crescimento vegetativo, reduzindo a densidade de tricomas e a síntese de canabinoides, indicando efeito de diluição dos metabólitos secundários. Assim, a faixa ideal de fornecimento neste experimento situou-se entre 212 e 261 mg L^{-1} de N, dependendo do tipo de substrato, estágio fenológico e até da variedade de *C.sativa*.

O trabalho de Saloner e Bernstein (2022), complementa esses achados ao demonstrar que, além da dose, a fonte de nitrogênio é determinante para o desempenho fisiológico e químico da planta. Comparando as formas amoniacal (NH_4^+) e nítrica (NO_3^-), os autores verificaram que a *C.sativa* apresenta maior eficiência e produtividade sob suprimento predominantemente nítrico, obtendo maiores rendimentos de inflorescência e teores superiores de THCA e CBDA. Entretanto, o uso exclusivo de NO_3^- em substratos inertes pode causar elevação do pH da solução e necrose marginal foliar. Recomenda-se, portanto, uma proporção de 10–30 % de NH_4^+ associada a 70–90 % de NO_3^- , assegurando estabilidade química e boa absorção. Doses excessivas de NH_4^+ resultaram em sintomas de toxicidade e redução dos teores de cálcio e magnésio foliar, evidenciando o antagonismo entre esses cátions. Para os autores, o fator mais relevante para a biossíntese de metabólitos secundários é a concentração de N acumulada nas inflorescências e não apenas o teor de N- NO_3^- no substrato, destacando também a influência do genótipo na resposta nutricional.

Dilena *et al.* (2023) reforçam essa relação entre o fornecimento de N e o balanço entre crescimento e metabolismo secundário. Em estudo com genótipo rico em CBD, doses acima de 210 mg L^{-1} de N promoveram incremento da biomassa foliar, mas reduziram significativamente as concentrações e o rendimento total de canabinoides. Os autores recomendam a faixa de $60\text{--}210 \text{ mg L}^{-1}$ de N como ideal para equilibrar produtividade e qualidade fitoquímica sob fotoperíodo de 12 horas, observaram ainda que a poda não apresentou efeito significativo sobre a produção de biomassa ou canabinoides, confirmando que o manejo nutricional é o principal fator de regulação fisiológica.

Resultados semelhantes foram relatados por Kpai *et al.* (2024), utilizando análise de superfície de resposta, ao identificar faixas ótimas entre 160 e 200 mg L^{-1} de N para maximizar o crescimento sem comprometer a qualidade química das inflorescências. Bevan *et al.* (2021) também verificaram resposta quadrática à adubação nitrogenada, sugerindo faixa ideal entre 160 e 230 mg L^{-1} de N. Esses autores observaram que, à medida que o teor de canabinoides diminuía, o rendimento em inflorescências aumentava, indicando uma relação inversa entre produtividade e concentração de metabólitos secundários. De acordo com Saloner e Bernstein (2020), o crescimento vegetativo da *C.sativa*, expresso em biomassa total e área foliar, apresentou incremento progressivo até aproximadamente 160 mg L^{-1} de N (Figura 1), estabilizando-se a partir desse ponto. Concentrações superiores a 200 mg L^{-1} de N

resultaram em acúmulo de nitrato nas folhas, redução na eficiência fotossintética e menor alocação de fotoassimilados para os tecidos florais em desenvolvimento. Os autores observaram que o aumento do fornecimento de nitrogênio apresentou correlação inversa com as concentrações dos principais canabinoides (THCA e CBDA), segundo a qual o excesso de N direciona o metabolismo para o crescimento vegetativo em detrimento da síntese de metabólitos secundários (Saloner e Bernstein, 2020). Assim, níveis moderados de nitrogênio (entre 80 e 120 mg L⁻¹ de N) favoreceram o acúmulo de canabinoides, enquanto doses elevadas provocaram diluição metabólica e redução na concentração desses compostos por unidade de biomassa, sugerindo que leves restrições nutricionais podem estimular vias biossintéticas relacionadas à qualidade química das inflorescências (Saloner e Bernstein, 2020).

De forma coerente, Saloner e Bernstein (2020) destacam que a produção de

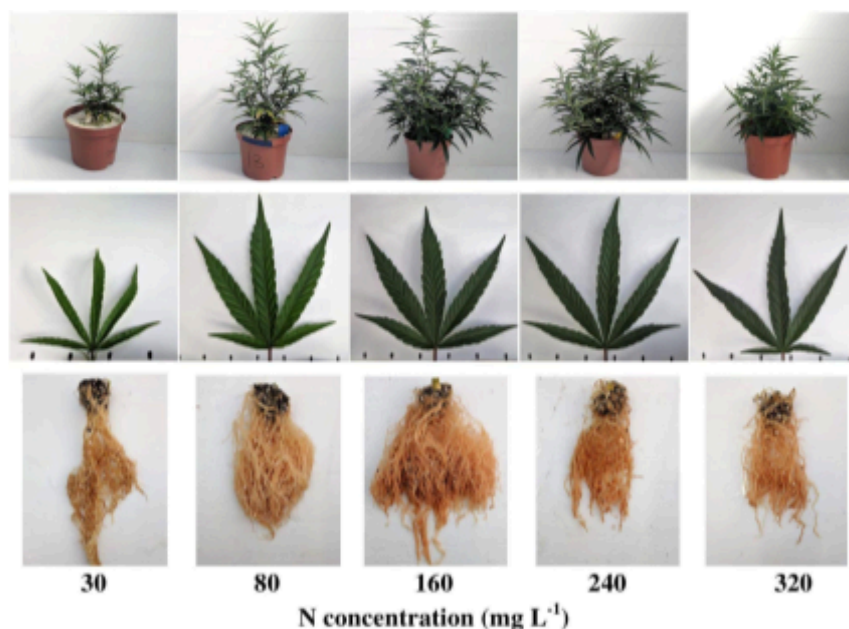


Figura 1. Aparência visual das plantas (fileira superior), folhas (fileira do meio) e raízes (fileira inferior) sob suprimento crescente de N. Da esquerda para a direita: 30, 80, 160, 240, 320 mg L⁻¹ N. As imagens das folhas são da folha mais jovem e totalmente desenvolvida do caule principal, obtidas 31 dias após o início dos tratamentos de fertirrigação. Fonte: Saloner e Bernstein (2020).

inflorescências apresenta forte correlação positiva com os atributos de crescimento vegetativo, de modo que plantas mais vigorosas tendem a apresentar maior rendimento floral. Esse comportamento decorre do papel central do nitrogênio na formação da clorofila e da enzima Rubisco, fundamentais para a fixação de carbono e a fotossíntese. Baixas concentrações de N reduzem a capacidade fotossintética e limitam o crescimento, enquanto níveis adequados entre 160 e 320 mg L⁻¹ de N promovem desenvolvimento equilibrado e bom desempenho reprodutivo (Saloner e Bernstein,

2021). Em consonância, Bevan *et al.* (2021) identificaram rendimento ótimo próximo de 194 mg L⁻¹ de N, confirmando que o suprimento adequado de N é determinante para maximizar o crescimento e a produtividade floral.

Corroborando esses resultados, Saloner e Bernstein (2021) demonstraram que o aumento do fornecimento de N de 30 para 320 mg L⁻¹ reduziu as concentrações de THCA e CBDA em 69 % e 63 %, respectivamente. Doses inferiores a 160 mg L⁻¹ de N, por outro lado, restringiram o crescimento e a função fisiológica, caracterizando deficiência nutricional. Assim, as condições morfofisiológicas mais equilibradas foram observadas entre 160 e 320 mg L⁻¹ de N, intervalo também proposto por Bevan *et al.* (2021), que relataram duplicação da produtividade em relação ao tratamento de 30 mg L⁻¹ de N. Leblanc (2022) também constatou que doses superiores a 150 mg L⁻¹ de N estimularam o crescimento vegetativo excessivo e reduziram em 9,5 % o teor de THC, embora tenham proporcionado aumento de 29 % na biomassa total em um dos genótipos avaliados sob cultivo hidropônico.

De modo geral, embora condições de deficiência ou estresse moderado possam elevar o teor de canabinoides nas inflorescências, esse manejo não é adequado para otimizar a produtividade global, uma vez que o excesso de N reduz a qualidade fitoquímica e sua escassez limita o crescimento e a fotossíntese. A literatura converge, portanto, para a necessidade de ajuste fino da adubação nitrogenada, considerando a fase fenológica, o genótipo e o sistema de cultivo.

Fósforo (P)

O fósforo é um macronutriente essencial ao metabolismo vegetal, atuando como componente estrutural dos ácidos nucleicos e das moléculas de fosfato de adenosina (ATP, ADP e AMP), fundamentais para os processos de captação, armazenamento e transferência de energia nas células (Hawkesford *et al.*, 2012). Além disso, exerce papel determinante na redistribuição de carboidratos e na manutenção do metabolismo energético foliar, o que o torna indispensável ao crescimento e desenvolvimento da planta (Hawkesford *et al.*, 2012).

Embora o manejo do P seja amplamente estudado em culturas agrícolas convencionais, no cultivo de *C.sativa* ainda se observa aplicação excessiva, prática que frequentemente não resulta em ganhos de produtividade ou qualidade e pode intensificar a eutrofização de ecossistemas aquáticos (Hershkowitz e Bugbee, 2022; Conley *et al.*, 2009). O excesso de fósforo nas soluções nutritivas muitas vezes superior a 100 mg L⁻¹

é comum entre produtores comerciais, sob a crença de que níveis elevados favorecem a floração e a síntese de canabinoides. Contudo, estudos recentes têm demonstrado que concentrações mais baixas, entre 15 e 30 mg L⁻¹ de P (Figura 2), são suficientes para sustentar crescimento e rendimento máximo (Cockson *et al.*, 2020; Shiponi e Bernstein, 2021; Westmoreland e Bugbee, 2022).



Figura 2. Efeito do fornecimento de P na aparência visual de plantas inteiras(A), folhas(B), raízes(C) e inflorescências podadas(D) de duas cultivares de *cannabis* medicinal, RM e DQ. Fonte: Shiponi e Bernstein (2021).

De fato, o incremento da concentração de P acima de 30 mg L⁻¹ não tem promovido aumento significativo na biomassa floral ou na concentração de canabinoides. Em experimentos hidropônicos, elevações de 15 para 90 mg L⁻¹ resultaram em aumento expressivo do P na solução e nos tecidos (até 70% nas flores), sem reflexo positivo no rendimento final (Hershkowitz, 2024). Esses resultados sugerem que a *C.sativa* apresenta alta tolerância ao fósforo, mas que a absorção em excesso conhecida como “absorção de luxo”, não necessariamente está associada a uma necessidade fisiológica, podendo refletir apenas um acúmulo passivo nas inflorescências (Shiponi e Bernstein, 2021; Bernstein *et al.*, 2019).

Os dados também apontam que o fósforo exerce papel distinto nas fases de desenvolvimento da planta. Durante o período vegetativo, concentrações entre 20 e 30 mg L⁻¹ favorecem o crescimento equilibrado, enquanto na fase floração, a maior demanda metabólica nas inflorescências pode requerer níveis levemente superiores (até 60 mg L⁻¹ de P), desta forma, valores acima disso não promovam ganhos adicionais de

produtividade (Bevan *et al.*, 2021; Kpai *et al.*, 2024). Na prática, a suplementação com 25 mg L⁻¹ de P já se mostrou suficiente para o crescimento e a qualidade máxima das flores (Hershkowitz e Bugbee, 2022).

Além do aspecto produtivo, estudos recentes têm evidenciado uma relação inversa entre o aumento da dose de P e a concentração de metabólitos secundários, como o THCA e o CBDA. Em concentrações acima de 30 mg L⁻¹, observou-se redução de até 25% nas frações ácidas de canabinoides, por exemplo o THCA e o CBDA (Shiponi e Bernstein, 2021), indicando que a alta disponibilidade de P estimula o crescimento vegetativo e o acúmulo de biomassa em detrimento da diferenciação celular e da biossíntese de metabólitos secundários. Os resultados de Cockson *et al.* (2020) reforçam essa tendência, demonstrando que a concentração ideal para maximizar a produção de canabinoides situa-se em torno de 11,25 mg L⁻¹ de P, sendo que doses mais altas apenas aumentaram o tamanho e o número de botões florais, mas não os teores de THCA ou CBDA. Em contrapartida, Velechovsky *et al.* (2024) relataram incrementos expressivos no teor de THC (até 50,7%) quando P, K e Fe foram simultaneamente elevados até 93, 266 e 13,8 mg L⁻¹ respectivamente, sugerindo interações complexas entre macro e micronutrientes na regulação metabólica, além de constatarem uma diferença de até 182% nos teores de THC entre os sistemas de recirculação e drenagem direta, sendo o sistema de recirculação com um melhor desempenho.

Dessa forma, o conjunto de evidências indica que a nutrição fosfatada da *C.sativa* deve ser cuidadosamente balanceada conforme o objetivo de cultivo. Para cultivos voltados à produção de flores frescas (mercado recreativo), doses entre 20 e 25 mg L⁻¹ de P parecem adequadas para promover uma morfologia floral atrativa. Já para cultivos com foco em extração de canabinoides, a restrição leve de P (entre 10 e 15 mg L⁻¹) pode induzir maior síntese de metabólitos secundários sem comprometer o rendimento. Em ambos os casos, a manutenção de níveis moderados de P contribui para reduzir o impacto ambiental e aumentar a sustentabilidade do sistema produtivo (Bevan *et al.*, 2021; Hershkowitz, 2024; Shiponi e Bernstein, 2021).

Potássio (K)

O potássio é um macronutriente essencial cuja principal função está relacionada à osmorregulação, mecanismo fundamental para a expansão celular, o movimento estomático e o transporte de sacarose no floema (Hawkesford *et al.*, 2012). Essa função é decisiva para o equilíbrio hídrico, a turgescência celular e o controle da transpiração,

afetando diretamente o fluxo de massa de solutos e a eficiência fotossintética das plantas (Hawkesford *et al.*, 2012). Além disso, o K participa da ativação de enzimas, da síntese proteica e da regulação da expressão gênica, sendo, portanto, indispensável para o crescimento e o funcionamento fisiológico da *C.sativa* (Wang e Wu, 2017).

Apesar de sua relevância fisiológica amplamente reconhecida em culturas agrícolas, o papel do K na cannabis medicinal ainda é pouco compreendido. A maioria das informações disponíveis deriva de estudos com cultivares de cânhamo industrial destinados à produção de fibra ou semente, o que limita a aplicação direta desses dados às cultivares medicinais (Saloner e Bernstein, 2022). Em consequência, observa-se no cultivo comercial o uso empírico de altas concentrações de K (300–400 mg L⁻¹) na solução nutritiva, na crença de que níveis elevados favorecem o florescimento e a síntese de canabinoides (Saloner e Bernstein, 2022). No entanto, as evidências científicas recentes não corroboram essa prática: estudos indicam que faixas moderadas de 60 a 175 mg L⁻¹ (Figura 3) são suficientes para sustentar elevada produtividade e bom desempenho fisiológico, enquanto valores extremos tanto baixos (≤ 15 mg L⁻¹) quanto altos (≥ 240 mg L⁻¹) resultam em distúrbios fisiológicos, antagonismos nutricionais e redução do metabolismo secundário (Saloner *et al.*, 2019; Saloner e Bernstein, 2022).

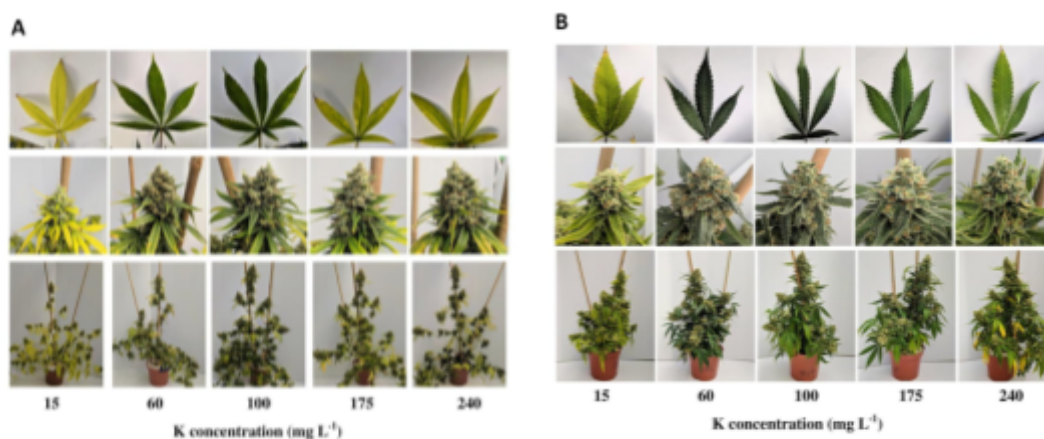


Figura 3. Aparência visual das folhas (fileira superior), inflorescências(fileira do meio) e planta inteira (fileira inferior) das cultivares de *cannabis* medicinal RM(A) e DQ (B) sob diferentes tratamentos com potássio(K). Fonte: Saloner e Bernstein (2022).

Em sistemas aquapônicos, observou-se que o rendimento floral (g planta⁻¹) aumentou linearmente com o incremento do K entre 15 e 150 mg L⁻¹, indicando resposta positiva até o limite superior da faixa testada (Brandonyep e Zheng, 2021). Em contrapartida, em cultivos hidropônicos convencionais, a produção de inflorescências não respondeu significativamente dentro do intervalo de 60–340 mg L⁻¹, sugerindo que

o suprimento de K nessa faixa já ultrapassa a demanda metabólica da planta (Bevan *et al.*, 2021). Essa ausência de resposta pode ser parcialmente atribuída ao fenômeno de competição iônica entre potássio, cálcio (Ca) e magnésio (Mg), especialmente em sistemas fechados.

De fato, o aumento da concentração de K na solução nutritiva induz um antagonismo competitivo com os cátions bivalentes Ca^{2+} e Mg^{2+} , reduzindo a absorção e o teor tecidual desses nutrientes (Saloner *et al.*, 2019; Saloner e Bernstein, 2022). Esse efeito negativo é fisiologicamente relevante, pois o Ca está envolvido na integridade das membranas e na sinalização celular, enquanto o Mg é componente central da molécula de clorofila e co-fator enzimático na fotossíntese. Assim, a elevação excessiva do K pode comprometer a estabilidade de membranas, a atividade fotossintética e a eficiência enzimática, resultando em crescimento vegetativo desbalanceado e redução da qualidade fitoquímica. Além disso, níveis elevados de K ($\geq 175 \text{ mg L}^{-1}$) provocam aumento da concentração de K no lixiviado, superando a absorção pelas plantas, o que evidencia um quadro de consumo de luxo, caracterizado pela absorção passiva do nutriente sem ganhos produtivos (Saloner *et al.*, 2019). Por esse motivo, o manejo equilibrado deve prever monitoramento simultâneo de Ca e Mg, ajustando-se as proporções via fontes como nitrato de cálcio e sulfato de magnésio, de forma a preservar a relação (2:1) iônica ideal no sistema radicular.

A resposta morfofisiológica ao K também é dependente do genótipo. Na variedade Royal Medic (RM), o crescimento respondeu positivamente até 175 mg L^{-1} de K e declinou em concentrações mais altas ($>175 \text{ mg L}^{-1}$ de K), por outro lado a variedade Desert Queen (DQ) manteve crescimento estável até 175 mg L^{-1} de K e ainda apresentou leve estímulo adicional a 240 mg L^{-1} de K (Saloner *et al.*, 2019). Essas diferenças refletem variações na arquitetura e na partição de biomassa: DQ apresentou maior transporte de K da raiz para a parte aérea, enquanto RM mostrou menor propensão à deficiência, devido à morfologia mais compacta. Portanto, a resposta ao K varia entre genótipos e estágios fenológicos, sendo mais pronunciada na fase vegetativa, quando o K desempenha papel central na regulação osmótica e na expansão celular (Saloner e Bernstein, 2022).

Do ponto de vista químico e metabólico, o potássio exerce forte influência sobre o perfil de canabinoides e terpenoides. As formas ácidas dos principais canabinoides (THCA, CBDA, CBGA, CBCA, THCVA e CBDVA) atingiram as maiores

concentrações sob condições de baixo K ($\approx 15 \text{ mg L}^{-1}$), diminuindo gradualmente com o aumento do fornecimento até 240 mg L^{-1} (Saloner e Bernstein, 2022). As formas neutras (THC, CBD, CBC), por outro lado, mostraram-se pouco sensíveis ao K, o que indica que a nutrição potássica atua sobretudo sobre a biossíntese primária, e não sobre a descarboxilação. Em relação aos terpenoides, observou-se padrão semelhante: o aumento do K reduziu a concentração da maioria dos monoterpenos (como mirceno, terpineno-4-ol e borneol) e sesquiterpenos (como β -cariofileno, α -bisabolol e β -farneseno), sobretudo na cultivar RM, sugerindo que níveis elevados de K suprimem a via metabólica do mevalonato e do MEP, responsáveis pela formação desses metabólitos aromáticos (Saloner e Bernstein, 2022).

Por outro lado, a deficiência de K ($\leq 15 \text{ mg L}^{-1}$) provocou estresse fisiológico acentuado, caracterizado por clorose foliar, redução do teor relativo de água, maior extravasamento de membranas e queda na taxa líquida de fotossíntese. Apesar de prejudicial ao crescimento, esse estresse leve atuou como sinal indutor do metabolismo secundário, aumentando as concentrações de canabinoides e terpenoides nas inflorescências (Saloner e Bernstein, 2022).

Com base nesse conjunto de evidências, conclui-se que a faixa ideal de potássio para o cultivo de *C.sativa* medicinal situa-se entre 60 e 175 mg L^{-1} , valor suficiente para garantir alta funcionalidade fisiológica, bom rendimento e perfil fitoquímico equilibrado. Concentrações inferiores a 60 mg L^{-1} de K limitam o crescimento e a condutância estomática, enquanto valores superiores a $175\text{--}240 \text{ mg L}^{-1}$ de K induzem antagonismos com Ca e Mg, consumo de luxo e redução das frações ácidas de canabinoides. Assim, a gestão racional do K deve equilibrar produtividade e qualidade, níveis moderados otimizam a fotossíntese e o transporte de açúcares sem comprometer o metabolismo secundário. Em sistemas hidropônicos, 60 mg L^{-1} de K tem se mostrado o ponto ótimo para conciliar alto rendimento, boa eficiência metabólica e sustentabilidade nutricional, desde que acompanhada de adequada reposição de Ca e Mg (Saloner e Bernstein, 2022; Bevan *et al.*, 2021).

Cálcio (Ca) , Magnésio (Mg) e Enxofre (S)

Segundo Hawkesford *et al.* (2012), o magnésio exerce papel central na fisiologia vegetal por integrar a molécula de clorofila, sendo indispensável à fotossíntese e à síntese proteica. O cálcio, por sua vez, atua na estabilidade estrutural das células, conferindo rigidez à parede celular e integridade à membrana plasmática, além de participar da osmorregulação e atuar como mensageiro secundário, coordenando

respostas de crescimento e defesa frente a estímulos ambientais (Hawkesford *et al.*, 2012). Já o enxofre é absorvido na forma de sulfato (SO_4^{2-}) e convertido em aminoácidos sulfurados, como cisteína, que servem de precursores para enzimas, coenzimas e metabólitos secundários sulfurados entre eles, fitoquelatinas (envolvidas na desintoxicação de metais pesados) e metabólitos de defesa como aliinas e glucosinolatos, fundamentais na resposta contra herbívoros e patógenos (Hawkesford *et al.*, 2012).

Pesquisas recentes demonstraram que o aumento do fornecimento de potássio (K) pode reduzir significativamente as concentrações de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) nas folhas de *C.sativa*, evidenciando um antagonismo iônico entre esses cátions essenciais (Saloner *et al.*, 2019). Essa relação competitiva sugere que o excesso de K pode inibir a absorção e o transporte de Ca e Mg, comprometendo tanto o equilíbrio nutricional quanto funções fisiológicas associadas à integridade celular e à fotossíntese (Saloner *et al.*, 2019). Nesse contexto, compreender as interações entre nutrientes, especialmente em sistemas hidropônicos e soluções concentradas, é crucial para otimizar o crescimento, a produtividade e a qualidade química da cannabis. Estudos com delineamentos experimentais otimizados, que considerem simultaneamente múltiplos nutrientes e suas faixas de concentração, tornam-se fundamentais para gerar recomendações nutricionais precisas e aplicáveis à escala comercial. No estudo de Llewellyn *et al.* (2023), o qual analisou os sinais de deficiências em *C.sativa*, utilizou como nível adequado de Ca, Mg e S, valores como 130, 40 e 54 mg L⁻¹ respectivamente.

Estudos que relacionam esses elementos com metabólitos secundários em *C.sativa* ou recomendações para fertirrigação, não foram encontrados na busca bibliográfica, mostrando a lacuna existente em pesquisas agrônômicas sobre Ca, Mg e S em cultivo de *C.sativa*.

3.2. Micronutrientes no cultivo de *Cannabis sativa* L

As pesquisas sobre nutrição mineral em *C.sativa* ainda são incipientes e fragmentadas, concentrando-se, em sua maioria, na análise isolada de um único nutriente enquanto mantêm os demais em níveis fixos (Saloner *et al.*, 2019; Saloner e Bernstein, 2020, 2021; Shiponi e Bernstein, 2021). Essa abordagem univariada limita a compreensão das interações nutricionais, que podem exercer influência decisiva sobre o crescimento, a produtividade e a composição fitoquímica da cultura. A adoção de delineamentos experimentais multinutrientes é, portanto, essencial para a formulação de

recomendações agronômicas mais realistas, considerando as interdependências entre os elementos minerais no sistema radicular e no metabolismo vegetal (Caplan *et al.*, 2017; Bernstein *et al.*, 2019).

Além dos macronutrientes, o papel dos micronutrientes na *C.sativa* medicinal permanece pouco elucidado. Os resultados de Saloner *et al.* (2019) indicam que, nas condições avaliadas, não houve deficiência evidente desses elementos, mas foi observada uma tendência de acúmulo de zinco (Zn), manganês (Mn), ferro (Fe), cobre (Cu) e cloro (Cl) nas raízes, sugerindo um mecanismo de compartimentalização como estratégia de tolerância e regulação iônica. Notou-se ainda competição entre o K e os micronutrientes Mn, Zn e Fe, cujas concentrações diminuíram com o aumento da disponibilidade de potássio, enquanto o sódio (Na) apresentou menor variação devido à sua limitada presença na solução nutritiva.

Outros estudos complementares demonstraram que substratos ácidos podem induzir acúmulo excessivo de micronutrientes, levando à toxicidade, especialmente em genótipos mais sensíveis (Veazie *et al.*, 2025). Observou-se que o pH de 6,5 (Figura 4) proporciona as melhores condições de crescimento, enquanto valores mais baixos aumentam a absorção desregulada de metais e reduzem a produção de biomassa e flores (Veazie *et al.*, 2025). Assim, o monitoramento do pH e da disponibilidade de micronutrientes é fundamental para manter o equilíbrio químico e fisiológico da planta, evitando sintomas de toxicidade e garantindo o máximo potencial produtivo (Veazie *et al.*, 2025).

Micronutrients (mg L ⁻¹)						
Micro rate	Fe	Mn	Cu	Zn	B	Mo
1X	4.02	0.99	0.19	0.20	0.49	0.01
2X	8.04	1.98	0.38	0.40	0.98	0.02
4X	16.08	3.96	0.76	0.80	1.96	0.04
Macronutrient (mg L ⁻¹)						
All macro rates	N	P	K	Ca	Mg	S
	229.1	31.0	287.6	200.4	48.6	64.1

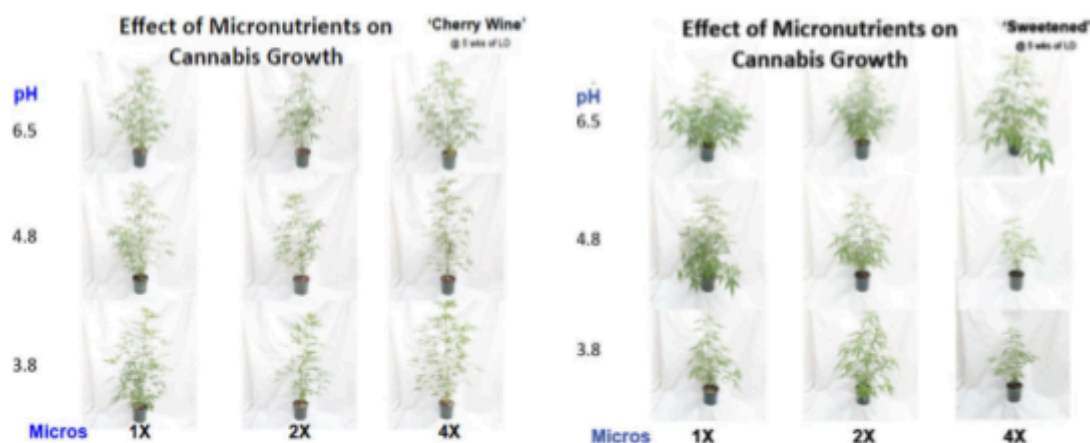


Figura 4. Uma comparação do efeito da concentração de micronutrientes e dos pH do substrato em *Cannabis sativa* após 5 semanas de crescimento vegetativo. Fonte: Veazie *et al.*, (2025).

Em síntese, os resultados apontam que o equilíbrio nutricional em *C.sativa* depende não apenas da dose isolada de cada nutriente, mas principalmente de suas interações competitivas e sinérgicas. O avanço no conhecimento sobre essas relações especialmente entre K, Ca, Mg e micronutrientes é determinante para o desenvolvimento de protocolos de fertirrigação mais precisos, que otimizem o rendimento, a qualidade química e a sustentabilidade do cultivo de *C.sativa* medicinal.

4. Sinais de deficiência nutricional em *cannabis sativa* L.

No presente momento em que não se tem uma base científica sólida a respeito de todos os nutrientes em *C.sativa*, os sinais da planta servem como um norteador para o produtor para corrigir eventuais problemas em seu cultivo. A seguir são evidenciados os principais sintomas de deficiência.

Nitrogênio (N)

A deficiência de nitrogênio (Figura 5) em *C.sativa* inicia-se com leve amarelamento nas pontas das folhas inferiores, avançando rapidamente para clorose generalizada nos dois terços inferiores da planta (Llewellyn *et al.*, 2023; Cockson *et al.*, 2019). A palidez progride da região internerval para todo o limbo foliar, acompanhada

de leve nanismo (Llewellyn *et al.*, 2023; Cockson *et al.*, 2019). Em estágios avançados, as folhas tornam-se totalmente amarelas, necrosam e caem (Llewellyn *et al.*, 2023; Cockson *et al.*, 2019).

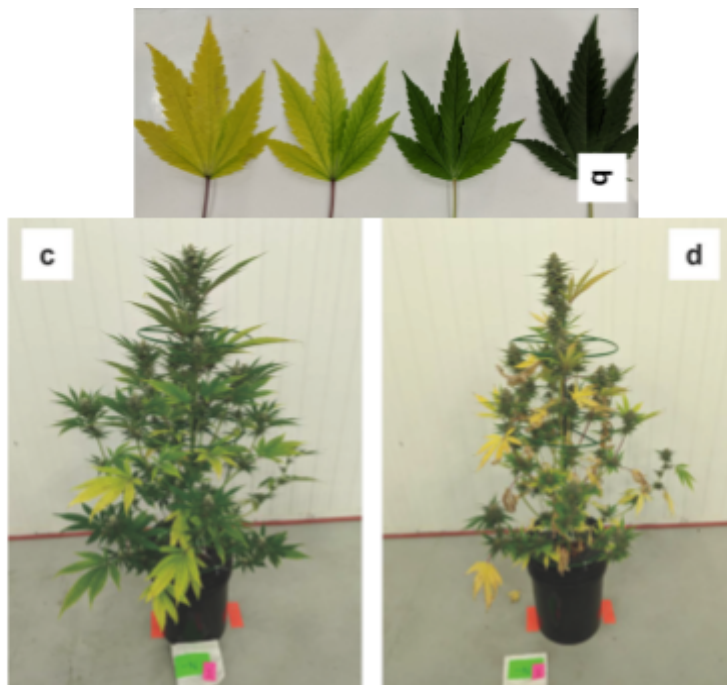


Figura 5. Deficiência de nitrogênio em *Cannabis sativa*. Fonte: Llewellyn *et al.*, (2023).

Fósforo (P)

Os primeiros sintomas de deficiência de fósforo (Figura 6) incluem pequenas manchas cloróticas nas folhas inferiores, que evoluem rapidamente para lesões necróticas irregulares e coalescentes (Llewellyn *et al.*, 2023; Cockson *et al.*, 2019). Com o avanço da deficiência, observa-se necrose das margens e das reentrâncias dos folíolos, enrolamento das folhas e morte progressiva das folhas em leque (Llewellyn *et al.*, 2023; Cockson *et al.*, 2019). Apesar de comum em outras espécies, o arroxamento foliar típico de deficiência de P é pouco evidente na *C.sativa*, ocorrendo apenas moderado escurecimento dos pecíolos (Llewellyn *et al.*, 2023; Cockson *et al.*, 2019). As plantas deficientes apresentam menor biomassa aérea, porém maior crescimento radicular, e podem apresentar leve aumento na concentração de THC (Llewellyn *et al.*, 2023; Cockson *et al.*, 2019).



Figura 6. Deficiência de Fósforo em *Cannabis sativa*.
Fonte:Llewellyn *et al.*, (2023).

Potássio (K)

A deficiência de potássio (Figura 7) em *C. sativa* manifesta-se por escurecimento e necrose nas pontas e margens dos folíolos, além de lesões marrom-escuras ao longo das nervuras secundárias das folhas maiores (Llewellyn *et al.*, 2023; Cockson *et al.*, 2019). As folhas menores apresentam amarelecimento seguido de escurecimento nas reentrâncias e pontas, evoluindo para tecido seco e quebradiço (Llewellyn *et al.*, 2023; Cockson *et al.*, 2019). Com a progressão da deficiência, ocorre necrose internerval, enrolamento das folhas e morte quase completa da folhagem fora das inflorescências (Llewellyn *et al.*, 2023; Cockson *et al.*, 2019). Apesar da redução acentuada da biomassa radicular e, sobretudo, da produção de flores, a deficiência de K aumenta as concentrações de canabinoides, especialmente THCA e o precursor CBGA, elevando o teor relativo de metabólitos secundários, porém com menor rendimento total de inflorescência (Llewellyn *et al.*, 2023; Cockson *et al.*, 2019).



Figura 7. Deficiência de Potássio em *Cannabis sativa*.
Fonte: Llewellyn *et al.*, (2023).

Cálcio (Ca)

A deficiência de cálcio (Figura 8) em *C. sativa* caracteriza-se por manchas internervais formadas por anéis amarelados ao redor de centros necróticos nas folhas inferiores, concentrando-se principalmente nas margens e pontas dos folíolos (Llewellyn *et al.*, 2023; Cockson *et al.*, 2019). À medida que progride, as manchas coalescem, formando necrose irregular nas bordas, acompanhada de escurecimento das reentrâncias e enrolamento para cima das folhas (Llewellyn *et al.*, 2023; Cockson *et al.*, 2019). Com o avanço da deficiência, a necrose atinge folhas maiores, folhas superiores, enquanto algumas folhas basais apresentam clorose difusa (Llewellyn *et al.*, 2023; Cockson *et al.*, 2019). Os sintomas diferem do padrão típico de Ca em culturas terrestres geralmente iniciado em folhas jovens e refletem desequilíbrios iônicos induzidos pelo aumento relativo de Na, K e Mg no tecido (Llewellyn *et al.*, 2023; Cockson *et al.*, 2019). No aspecto químico, a deficiência de Ca reduz moderadamente a biomassa total e o rendimento floral, mas afeta de forma mais marcante a qualidade química: é o tratamento associado às menores concentrações de canabinoides entre todos os avaliados, indicando forte impacto negativo sobre o perfil fitoquímico das inflorescências (Llewellyn *et al.*, 2023; Cockson *et al.*, 2019).

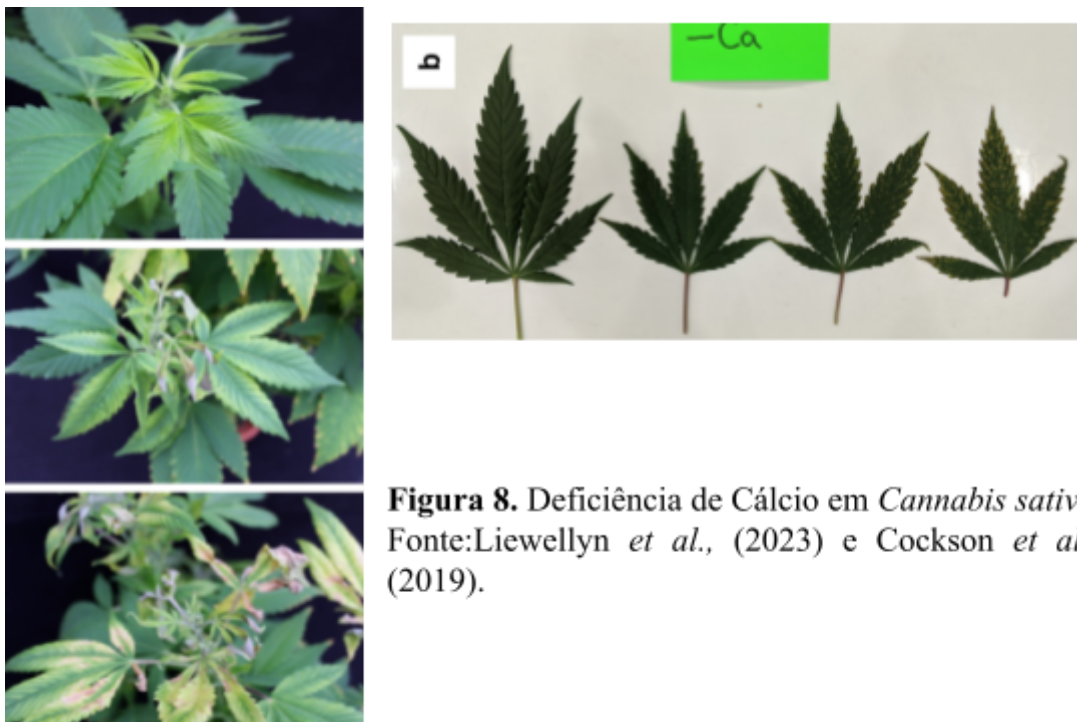


Figura 8. Deficiência de Cálcio em *Cannabis sativa*.
 Fonte: Llewellyn *et al.*, (2023) e Cockson *et al.*, (2019).

Magnésio (Mg)

A deficiência de magnésio (Mg) (Figura 9) em *C. sativa* manifesta-se inicialmente como clorose internerval nas folhas inferiores, começando entre a nervura central e as margens (Llewellyn *et al.*, 2023; Cockson *et al.*, 2019). Conforme a deficiência avança, a clorose torna-se mais intensa e passa a atingir principalmente folhas menores e mais jovens, evoluindo para necrose internerval que se acentua das bases para as pontas dos folíolos (Llewellyn *et al.*, 2023; Cockson *et al.*, 2019). A maior parte da folhagem apresenta amarelecimento severo, enquanto algumas folhas mais velhas permanecem pouco afetadas, padrão típico da mobilidade do Mg (Llewellyn *et al.*, 2023; Cockson *et al.*, 2019). No desempenho produtivo, embora a deficiência de Mg não reduza significativamente a biomassa vegetativa nem altere as concentrações de canabinoides, ela diminui a produção de inflorescências em cerca de 30%, indicando que o magnésio é essencial para o desenvolvimento e enchimento floral, mesmo sem afetar diretamente o teor de metabólitos secundários (Llewellyn *et al.*, 2023; Cockson *et al.*, 2019).

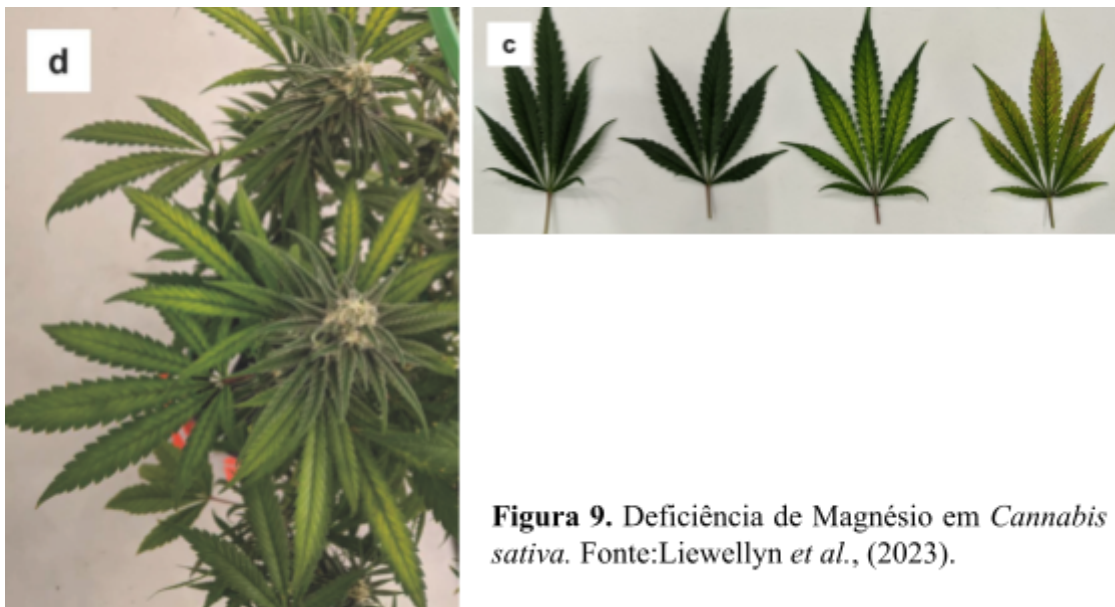


Figura 9. Deficiência de Magnésio em *Cannabis sativa*. Fonte:Llewellyn *et al.*, (2023).

Enxofre (S)

A deficiência de enxofre (Figura 10) em *C.sativa* manifesta-se como um amarelecimento generalizado nas folhas superiores recém-formadas, acompanhado de leve escurecimento nas pontas e dentições (Llewellyn *et al.*, 2023; Cockson *et al.*, 2019). Com a progressão do déficit, folhas inferiores passam a apresentar clorose internerval que se expande da nervura central para as margens, avançando posteriormente para amarelecimento total e senescência (Llewellyn *et al.*, 2023; Cockson *et al.*, 2019). A sintomatologia é semelhante à da deficiência de nitrogênio, porém iniciando no topo da planta, refletindo o caráter pouco móvel do S (Llewellyn *et al.*, 2023; Cockson *et al.*, 2019). Apesar de não alterar significativamente as concentrações de canabinoides nem a biomassa vegetativa, a deficiência de enxofre reduz a produção de inflorescências em cerca de 34%, indicando impacto expressivo sobre o rendimento floral, embora sem prejuízo direto ao teor de metabólitos secundários. (Llewellyn *et al.*, 2023; Cockson *et al.*, 2019).

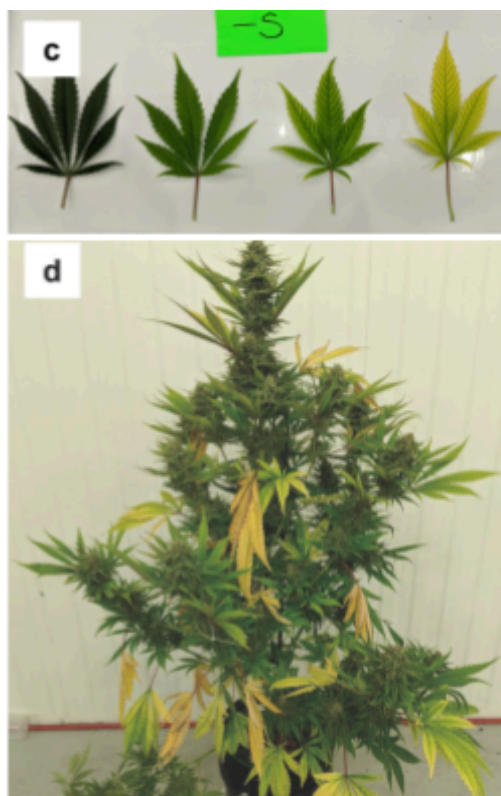


Figura 10. Deficiência de Enxofre em *Cannabis sativa*. Fonte:Llewellyn *et al.*, (2023).

Manganês (Mn)

A deficiência de manganês (Figura 11) em *C.sativa* caracteriza-se por uma clorose internerval amarela brilhante em forma de rede nas folhas superiores e medianas (Llewellyn *et al.*, 2023; Cockson *et al.*, 2019). A clorose inicia-se ao longo da nervura central dos folíolos e avança em direção às margens, criando um contraste marcante entre as áreas internervais amareladas e as nervuras ainda verdes (Llewellyn *et al.*, 2023; Cockson *et al.*, 2019). Com a progressão da deficiência, surgem pequenas manchas necróticas castanhas nas regiões internervais. (Llewellyn *et al.*, 2023; Cockson *et al.*, 2019).



Figura 11. Deficiência de Manganês em *Cannabis sativa*. Fonte:Cokson *et al.*, (2019).

Cobre (Cu)

A deficiência de cobre (Figura 12) em *C.sativa* manifesta-se tardiamente e inicia-se com leve nanismo e distorção das folhas jovens em expansão, especialmente na base dos folíolos, que se tornam mais estreitos e ligeiramente amarelados. Com o avanço da deficiência, essa distorção basal torna-se mais acentuada, acompanhada por clorose internerval marginal. Em estágios severos, toda a folha apresenta clorose fina e difusa, e suas margens passam a se curvar para dentro e para baixo, enquanto as folhas novas exibem redução de turgidez. (Llewellyn *et al.*, 2023; Cockson *et al.*, 2019).



Figura 12. Deficiência de Cobre em *Cannabis sativa*. Fonte:Cockson *et al.*, (2019).

Zinco (Zn)

A deficiência de zinco (Figura 13) em *C.sativa* surge tardiamente e inicia-se com amarelecimento marginal nas folhas jovens em expansão, concentrado nas bordas e ao longo das dentições dos folíolos (Llewellyn *et al.*, 2023; Cockson *et al.*, 2019). Com a progressão do déficit, essas áreas amareladas evoluem para necrose castanha de formato irregular ao longo das margens, caracterizando o avanço da deficiência. (Llewellyn *et al.*, 2023; Cockson *et al.*, 2019).



Figura 13. Deficiência de Zinco em *Cannabis sativa*. Fonte: Cockson *et al.*, (2019).

Boro

A deficiência de boro (Figura 14) em *C.sativa* manifesta-se com leve nanismo e distorção do crescimento nas pontas ativas, onde os folíolos jovens tornam-se menores, estreitos na base e assimétricos (Llewellyn *et al.*, 2023; Cockson *et al.*, 2019). Conforme a deficiência avança, as folhas novas apresentam deformação severa, com margens necróticas e curvatura pronunciada para dentro e para baixo (Llewellyn *et al.*, 2023; Cockson *et al.*, 2019). Em estágios críticos, há morte das pontas de crescimento e intensa murcha da planta, decorrente da necrose das raízes finas e perda substancial de biomassa radicular, levando ao colapso do desenvolvimento vegetativo. (Llewellyn *et al.*, 2023; Cockson *et al.*, 2019).



Figura 14. Deficiência de Boro em *Cannabis sativa*. Fonte:Cockson *et al.*, (2019).

Toxicidade de Manganês (Mn)

A toxicidade por manganês (Figura 15) em *C.sativa* inicia-se com amarelecimento marginal nas folhas inferiores, que rapidamente avança para o interior do limbo em direção à nervura central (Llewellyn *et al.*, 2023; Cockson *et al.*, 2019). Com a intensificação do acúmulo de Mn, as margens tornam-se necróticas e a folha desenvolve clorose severa (Llewellyn *et al.*, 2023; Cockson *et al.*, 2019). Nos casos mais avançados, ocorre queda prematura das folhas afetadas, indicando forte comprometimento funcional do tecido. (Llewellyn *et al.*, 2023; Cockson *et al.*, 2019).



Figura 15. Toxicidade de Manganês em *Cannabis sativa*. Fonte: Cockson *et al.*, (2019).

Toxicidade de Boro (B)

A toxicidade por boro (B) (Figura 16) em *C.sativa* manifesta-se inicialmente como um amarelecimento marginal nas folhas inferiores (Llewellyn *et al.*, 2023; Cockson *et al.*, 2019). À medida que o acúmulo de B aumenta, esse amarelamento intensifica-se e avança em direção à nervura central (Llewellyn *et al.*, 2023; Cockson *et al.*, 2019). Nos estágios avançados, as margens foliares tornam-se marrons e evoluem para necrose, caracterizando o dano típico por excesso de boro. (Llewellyn *et al.*, 2023; Cockson *et al.*, 2019).



Figura 16. Toxicidade de Boro em *Cannabis sativa*. Fonte: Cockson *et al.*, (2019).

5. Discussão sobre macronutrientes

Nitrogênio

O nitrogênio exerce papel determinante no crescimento e no metabolismo da *C.sativa*, influenciando diretamente a produção de biomassa e a síntese de canabinoides. A literatura demonstra que tanto a deficiência quanto o excesso desse nutriente provocam desequilíbrios morfofisiológicos: em baixas concentrações, há limitação fotossintética e redução no crescimento vegetativo, enquanto o suprimento excessivo estimula o desenvolvimento estrutural em detrimento da diferenciação celular e da produção de metabólitos secundários. Essa relação inversa entre produtividade e teor de canabinoides confirma a hipótese do balanço entre crescimento e diferenciação, na qual o aporte moderado de N favorece o equilíbrio entre vigor e qualidade fitoquímica.

Os estudos convergem para uma faixa ideal de fornecimento entre 160 e 230 mg L⁻¹ de N, na qual se observam bom desenvolvimento vegetativo, manutenção da eficiência fotossintética e teores satisfatórios de canabinoides. Doses superiores a 250 mg L⁻¹ aumentam o risco de acúmulo de nitrato e reduzem a densidade de tricomas, enquanto níveis inferiores a 80 mg L⁻¹ induzem sintomas de deficiência e queda de rendimento. A proporção entre as fontes nítrica e amoniacal também se mostra fundamental, sendo recomendada a combinação de 70–90 % de NO₃⁻ e 10–30 % de NH₄⁺, a fim de garantir estabilidade química e absorção equilibrada.

De modo geral, o manejo nitrogenado ideal deve priorizar a sincronização entre oferta de nutrientes e estágio fenológico, ajustando a concentração de N de acordo com o ciclo da planta e o genótipo cultivado. Essa abordagem permite maximizar a eficiência de uso do nutriente, reduzir perdas e preservar a qualidade química do produto final, conciliando produtividade, sustentabilidade e valor fitoquímico na produção de cannabis medicinal.

Fósforo

Com base na literatura revisada, evidencia-se que a nutrição fosfatada exerce influência determinante sobre o crescimento, o metabolismo energético e a qualidade fitoquímica da *C.sativa*, especialmente durante a fase reprodutiva. No entanto, a tendência de superdosagem observada em cultivos comerciais carece de respaldo técnico, uma vez que a maioria dos estudos demonstra que concentrações moderadas entre 15 e 30 mg L⁻¹ de P são suficientes para alcançar o rendimento e a qualidade máximos das inflorescências. A aplicação excessiva de fósforo não apenas deixa de promover incrementos produtivos, como também pode reduzir a concentração dos principais canabinoides por efeito de diluição metabólica e gerar impactos ambientais significativos, como a eutrofização de corpos hídricos, principalmente quando se trabalha com drenagem direta ou até mesmo com recirculação no momento em que se realiza o descarte da solução utilizada (*runoff*). Por outro lado, leves restrições no fornecimento de P, quando bem manejadas, parecem estimular rotas biossintéticas associadas à diferenciação celular e à síntese de metabólitos secundários, sem comprometer o vigor vegetativo da planta.

Assim, para o cultivo de *C.sativa* em sistemas controlados, recomenda-se um manejo fosfatado racional e adaptado à finalidade de produção: valores próximos de 20 mg L⁻¹ atendem plenamente às necessidades fisiológicas e maximizam o equilíbrio entre produtividade e qualidade fitoquímica. Estratégias baseadas em nutrição sustentável, além de reduzir o desperdício e o impacto ambiental, alinham-se à crescente demanda de mercados regulados por produtos com certificação ecológica e rastreabilidade de origem.

Potássio

O potássio mostrou-se um elemento essencial para o funcionamento fisiológico da *C.sativa*, desempenhando papel central na osmorregulação, na expansão celular e no transporte de fotoassimilados. No entanto, assim como observado para outros

macronutrientes, o equilíbrio nutricional é determinante para o desempenho da planta e para a qualidade química do produto final. A deficiência de K ($\leq 15 \text{ mg L}^{-1}$) comprometeu o metabolismo primário, reduzindo a fotossíntese e o crescimento vegetativo, enquanto o excesso ($\geq 175 \text{ mg L}^{-1}$) gerou antagonismos com cálcio e magnésio, caracterizando consumo de luxo e queda na concentração de canabinoides e terpenoides.

Os resultados de diversos estudos indicam que a faixa ideal de fornecimento de K situa-se entre 60 e 175 mg L^{-1} , suficiente para sustentar alta produtividade e boa funcionalidade fisiológica sem comprometer a síntese de metabólitos secundários. Dentro dessa faixa, a planta mantém adequado balanço entre crescimento e diferenciação, assegurando tanto o desenvolvimento estrutural quanto a qualidade fitoquímica.

Portanto, o manejo racional do potássio deve priorizar a moderação e o equilíbrio iônico, garantindo suprimento adequado de Ca e Mg para evitar antagonismos nutricionais. Essa abordagem favorece a eficiência fisiológica, o aproveitamento dos nutrientes e a sustentabilidade do cultivo, permitindo ao produtor otimizar simultaneamente rendimento, qualidade e estabilidade química das inflorescências de cannabis medicinal.

6. Lacunas de conhecimento e desafios futuros

De acordo com os estudos relatados na presente revisão, destacam-se como apontamentos:

- Poucos estudos investigam explicitamente a influência de micronutrientes (Zn, Cu, B, Mn, Mo) na produção de canabinoides e terpenoides em cannabis.
- A maioria dos estudos foca na fase vegetativa ou no uso de macronutrientes; há menor número de estudos controlados para o florescimento e maturação, sob diferentes regimes nutricionais.
- A variabilidade genética e o fato de que a resposta nutricional pode depender do fenótipo ou quimiotipo (alto CBD vs alto THC) torna difícil generalizar recomendações.
- Interações nutricionais x ambiente (luz, temperatura, CO_2 , solo/substrato) complicam o efeito isolado da nutrição.

- Falta de estudos que relacionem nutrição mineral especificamente com perfil de terpenoides (em oposição apenas aos canabinoides) de forma robusta.

7. Considerações finais

A nutrição mineral exerce influência determinante sobre o crescimento, o rendimento e o perfil químico da *C.sativa*. em cultivo controlado. Os estudos analisados demonstram que faixas moderadas de nitrogênio, fósforo e potássio promovem equilíbrio entre desenvolvimento vegetativo e síntese de metabólitos secundários. O fornecimento excessivo desses nutrientes reduz a concentração de canabinoides, enquanto níveis muito baixos limitam o crescimento. Observa-se também que cálcio, magnésio, enxofre e micronutrientes apresentam funções essenciais, embora ainda pouco investigadas.

Pelo exposto, verifica-se que há necessidade de definição de faixas nutricionais adequadas, as quais permitem otimizar a eficiência fisiológica, a produtividade e a qualidade fitoquímica da cultura. Assim, o manejo racional de nutrientes constitui base técnica para protocolos de fertirrigação mais precisos e sustentáveis na produção de *C.sativa* medicinal.

Como recomendação, sugere-se:

- Ajustar o manejo nutricional conforme o objetivo: se o foco for máxima biomassa floral, adotar regime de nutrientes elevado; se foco for alta concentração/qualidade de canabinoides/terpenoides, considerar regimes mais moderados ou estilos ‘restritivos’ de nutrição para potencializar o metabolismo secundário.
- Monitorar e equilibrar micronutrientes e estruturas radicular/absorção, pois deficiência ou desequilíbrio (ex: Mg baixo ou excessivo; Ca competitivo) impactam vigor, saúde e qualidade do florescimento.
- Considerar a forma de aplicação, fase fenológica, cultivar, substrato, e conduzir análise foliar/tecidual para ajustes finos.
- Em manejos de cultivo medicinal, é importante padronizar não apenas rendimento, mas perfil químico; assim, nutrição mineral torna-se parte do ‘controle de processo’ para qualidade de produto.

8. Referências

- ANVISA. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. *Aprovado Relatório de Análise de Impacto Regulatório (AIR) sobre Cannabis para fins medicinais*. Brasília, 15 maio 2024.
- BARCACCIA G, *et al.* Potentials and Challenges of Genomics for Breeding Cannabis Cultivars. **Front Plant Sci.** 2020 Sep 25;11:573299. doi: 10.3389/fpls.2020.573299. PMID: 33101342; PMCID: PMC7546024.
- BERNSTEIN, N. *et al.* Impact of N, P, K, and humic acid supplementation on the chemical profile of medical cannabis (*Cannabis sativa* L.). **Frontiers in Plant Science**, v. 10, p. 736, 2019.
- BEVAN, L.; JONES, M.; ZHENG, Y. Optimisation of nitrogen, phosphorus, and potassium for soilless production of *Cannabis sativa* in the flowering stage using response surface analysis. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 764103, 2021. DOI: 10.3389/fpls.2021.764103.
- BRANDONYEP; ZHENG, Y. Potassium and micronutrient fertilizer addition in a mock aquaponic system for drug-type *Cannabis sativa* L. cultivation. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 101, n. 3, p. 341–352, 2021.
- BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). Resolução RDC nº 327, de 9 de dezembro de 2019. Brasília, DF: ANVISA, 2019. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2019/rdc0327_09_12_2019.pdf. Acesso em: nov. 2025.
- CANADÁ. Health Canada. Guidance on Good Production Practices for Cannabis: Quality Guidance – **Cannabis Series**. Ottawa: Health Canada, 2023. 67 p. Disponível em: <https://www.canada.ca/content/dam/hc-sc/documents/services/cannabis-regulations-licensed-producers/good-production-practices-guide/guidance-document/GPP-EN-July-5.pdf>. Acesso em: novembro de 2025.
- CAPLAN, D; DIXON, M; ZHENG, Y. Optimal rate of organic fertilizer during the flowering stage for cannabis grown in two coir-based substrates. **HortScience**, v. 52, n. 12, p. 1796-1803, 2017.
- CAPLAN, D., DIXON, M. e ZHENG, Y. Optimal Rate of Organic Fertilizer during the Vegetative-stage for Cannabis Grown in Two Coir-based Substrates, **HortScience**, 2017.

- CARLINI, E. A. A história da maconha no Brasil. *Jornal Brasileiro de Psiquiatria*, v. 55, n. 4, p. 316–322, 2006.
- COCKSON, P., *et al.* Characterization of Nutrient Disorders of *Cannabis sativa*. *Appl. Sci.* 2019 , 9 , 4432. <https://doi.org/10.3390/app9204432>
- COCKSON, P., *et al.* Impact of phosphorus on *Cannabis sativa* reproduction, cannabinoids, and terpenes. *Applied Sciences*, v. 10, n. 21, p. 7875, 2020.
- CONLEY, D., *et al.* Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus. *Science*, v. 323, n. 5917, p. 1014-1015, 2009.
- DILENA, E., *et al.* Investigating how nitrogen nutrition and pruning impacts on CBD and THC concentration and plant biomass of *Cannabis sativa*. *Scientific Reports*, v. 13, n. 1, p. 19533, 2023.
- ELSOHLY, M., *et al.* Synthetic cannabinoids: analysis and metabolites. *Life sciences*, v. 97, n. 1, p. 78-90, 2014.
- GOFF, N.K., *et al.* Non-Invasive and Confirmatory Differentiation of Hermaphrodite from Both Male and Female Cannabis Plants Using a Hand-Held Raman Spectrometer. *Molecules* 2022, 27, 4978. <https://doi.org/10.3390/molecules27154978>
- HAWKESFORD, M. *et al.* Functions of macronutrients. In: *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. London: Academic Press, 2012.
- HERSHKOWITZ, J. Nutrient Management of Cannabis in Controlled Environments. 2024.
- JIN, D. , JIN, S. and CHEN, J. Cannabis Indoor Growing Conditions, Management Practices, and Post-Harvest Treatment: A Review. *American Journal of Plant Sciences*, 10, 2019.
- KAYA MIND. Anuário da Cannabis Medicinal no Brasil 2024. Brasil, 26 nov. 2024. Disponível em: <https://kayamind.com/anuario-da-cannabis-medicinal-2024/>. Acesso em: novembro de 2025.
- KPAI, P., *et al.* Mineral nutrition for *Cannabis sativa* in the vegetative stage using response surface analysis. *Frontiers in Plant Science*, v. 15, p. 1501484, 2024.
- LEAGUE OF NATIONS. Records of the Second Opium Conference: Geneva, 17 November 1924–19 February 1925. **Geneva: League of Nations, 1925**. Disponível em: <https://digitallibrary.un.org/record/1297459/files/unodc0185e.pdf>
- LEBLANC, C. Production du cannabis médical (*Cannabis sativa* L.) cultivé en hydroponie: impact de N, P et K sur la croissance, productivité et qualité. 2022.

- LLEWELLYN, D., *et al.* Foliar Symptomology, Nutrient Content, Yield, and Secondary Metabolite Variability of Cannabis Grown Hydroponically with Different Single-Element Nutrient Deficiencies. *Plants* 2023, 12, 422;
- REN, G., *et al.* Large-scale whole-genome resequencing unravels the domestication history of *Cannabis sativa*. **Science advances**, v. 7, n. 29, p.2286, 2021.
- RUSSO, E. Taming THC: potential cannabis synergy and phytocannabinoid-terpenoid entourage effects. **British journal of pharmacology**, v. 163, n. 7, p. 1344-1364, 2011.
- SALONER, A; BERNSTEIN, N. Dynamics of mineral uptake and plant function during development of drug-type medical cannabis plants. **Agronomy**, v. 13, n. 12, p. 2865, 2023.
- SALONER, A; BERNSTEIN, N. Effect of potassium (K) supply on cannabinoids, terpenoids and plant function in medical cannabis. **Agronomy**, v. 12, n. 5, p. 1242, 2022.
- SALONER, A.; BERNSTEIN, N. “Nitrogen Source Matters: High NH₄/NO₃ Ratio Reduces Cannabinoids, Terpenoids, and Yield in Medical Cannabis.” **Frontiers in Plant Science**, v.13, 2022.
- SALONER, A; BERNSTEIN, N. Nitrogen supply affects cannabinoid and terpenoid profile in medical cannabis (*Cannabis sativa* L.). **Industrial Crops and Products**, v. 167, p. 113516, 2021.
- SALONER, A.; BERNSTEIN, N. Response of Medical Cannabis (*Cannabis sativa* L.) to Nitrogen Supply Under Long Photoperiod. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, 2020.
- SHIPONI, S.; BERNSTEIN, N. The highs and lows of P supply in medical cannabis: effects on cannabinoids, the ionome and morpho-physiology. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, 2021.
- SALONER, A; SACKS, M.; BERNSTEIN, N. Response of medical cannabis (*Cannabis sativa* L.) genotypes to K supply under long photoperiod. **Frontiers in plant science**, v. 10, p. 1369, 2019.
- SOUZA, M. T.; SILVA, M. D.; CARVALHO, R. Revisão integrativa: o que é e como fazer. **Einstein**, v. 8, n. 1, p. 102-106, 2010.
- STRAITS RESEARCH. **Medical Cannabis Market**. 2024. Disponível em: <https://straitsresearch.com/report/medical-cannabis-market>.
- VEAZIE, P. *et al.* Impact of substrate pH and micronutrient fertility rates on *Cannabis sativa*. **Agrosystems, Geosciences & Environment**, v. 8, 2025.

VELECHOVSKÝ, J. *et al.* Effect of augmented nutrient composition and fertigation system on biomass yield and cannabinoid content of medicinal cannabis (*Cannabis sativa* L.) cultivation. ***Frontiers in Plant Science***, v. 15, 2024.

WANG, Y.; WU, W.-H. Regulation of potassium transport and signaling in plants. ***Current Opinion in Plant Biology***, v. 39, p. 123–128, 2017.

WESTMORELAND, F. M.; BUGBEE, B. Sustainable Cannabis Nutrition: Elevated root-zone phosphorus significantly increases leachate P and does not improve yield or quality. ***Frontiers in Plant Science***, v. 13, p. 1015652, 2022.

WOGIATZI, E. *et al.* Effect of irrigation and fertilization levels on mineral composition of *Cannabis sativa* leaves. ***Notulae Botanicae Horti Agrobotanici***, v. 47, n. 4, p. 1073–1080, 2019.

ZHENG, Z.; FIDDES, K.; YANG, L. A narrative review on environmental impacts of cannabis cultivation. ***Journal of Cannabis Research***, v. 3, n. 35, p. 1-14, 2021.