

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS
ESCOLA POLITÉCNICA E DE ARTES DA PUC GOIÁS
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO II

Matheus Dias Barros

**PROGRAMAÇÃO LINEAR COMO FERRAMENTA PARA OTIMIZAÇÃO E REDUÇÃO
DE CUSTOS NA APLICAÇÃO DE ADUBO FOLIAR**

Trabalho de Conclusão de Curso II como parte dos requisitos para
obtenção do título de bacharel em Ciências da Computação
apresentado à Pontifícia Universidade Católica de Goiás.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Antônio Marcos Melo Medeiros – Orientador. Escola Politécnica e de Artes da
PUC Goiás

Prof. Dr. Bruno Quirino de Oliveira – Escola Politécnica e de Artes da PUC Goiás

Prof. Dr. Marcos Antônio de Sousa – Escola Politécnica e de Artes da PUC Goiás

Goiânia, 21 de junho de 2024.

PROGRAMAÇÃO LINEAR COMO FERRAMENTA PARA OTIMIZAÇÃO E REDUÇÃO DE CUSTOS NA APLICAÇÃO DE ADUBO FOLIAR

BARROS M. D, MEDEIROS A. M. M., OLIVEIRA B. Q., SOUZA M. A.

RESUMO

O agronegócio desempenha um papel crucial na economia global, especialmente no Brasil, onde a nutrição foliar tem um impacto direto na produtividade e constitui uma parte significativa dos custos de produção. Este artigo apresenta uma pesquisa focada na otimização da aplicação de adubo foliar no setor agrícola. O objetivo principal é avaliar a viabilidade da programação linear como uma abordagem para reduzir os custos de nutrição das plantas. A pesquisa envolve a identificação de dados relevantes e a avaliação das práticas atuais em comparação com as decisões geradas por um algoritmo de programação linear. Utilizando uma metodologia de coleta e análise de dados de campo, a pesquisa demonstrou melhorias na nutrição das plantas e uma redução nos custos de produção.

Palavras Chaves: Nutrição, Fertilizantes, Eficiência, Sustentabilidade, Simplex.

LINEAR PROGRAMMING AS A TOOL FOR OPTIMIZATION AND COST REDUCTION IN FOLIAR FERTILIZER APPLICATION

ABSTRACT

Agribusiness plays a crucial role in the global economy, especially in Brazil, where foliar nutrition directly impacts productivity and represents a significant portion of production costs. This article presents research focused on optimizing the application of foliar fertilizer in the agricultural sector. The main objective is to evaluate the feasibility of linear programming as an approach to reducing plant nutrition costs. The research involves identifying relevant data and assessing current practices compared to decisions generated by a linear programming algorithm. Using a methodology of field data collection and analysis, the study demonstrated improvements in plant nutrition and a reduction in production costs.

Keywords: Nutrition, Fertilizers, Efficiency, Sustainability, Simplex.

I. INTRODUÇÃO

O agronegócio desempenha um papel fundamental na economia global, sendo essencial para a produção de alimentos e matérias-primas em geral. No Brasil, a agricultura é responsável por 21% dos empregos formais no Brasil, em 2022, a agricultura participou em 47,6% das exportações brasileira e com 24,8% do PIB [1][2]. Na agricultura, otimizar os processos é crucial para garantir eficiência operacional, controle de custos e qualidade da produção. A adubação foliar desempenha um papel crítico no ciclo de cultivo, influenciando diretamente o desenvolvimento das plantas e, por consequência, a produção e qualidade dos produtos agrícolas [3][4].

Atualmente, a aplicação de nutrientes minerais diretamente nas folhas das plantas [4], conhecido como “nutrição foliar” como visto na Figura 1, se tornou uma prática agrícola essencial em todo o mundo para assegurar a produção agrícola de forma sustentável [4]. A adubação foliar desponta como uma abordagem ágil, direcionada a

objetivos específicos e ecologicamente viável para aumentar a produtividade das culturas, seja em condições ideais ou desfavoráveis de crescimento [4]. Por meio dessa abordagem nutricional completa, a aplicação foliar pode ser amplamente adotada para reduzir as deficiências nutricionais em plantas durante fases críticas de crescimento como representado na Figura 2.

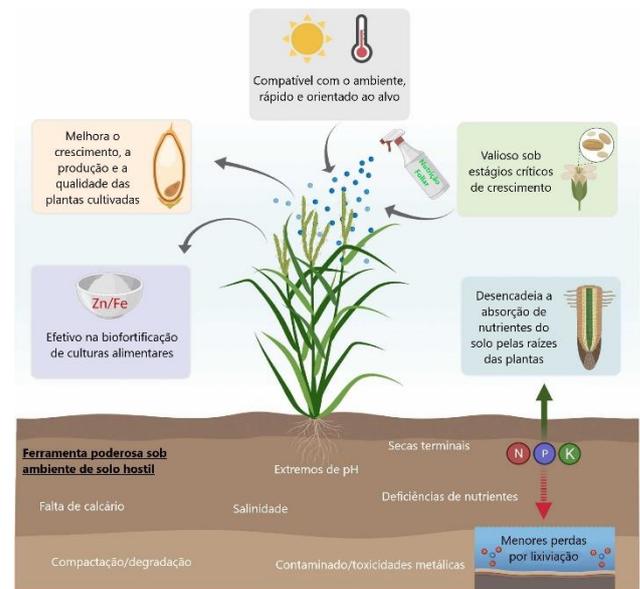


Figura 1: Vantagens da adubação foliar [4].

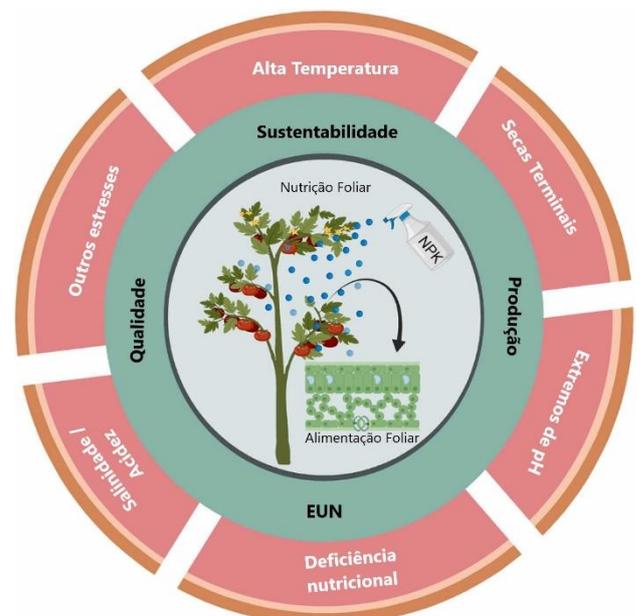


Figura 2: Benefícios da adubação foliar [4]. Legenda: EUN = Eficiência no Uso de Nutrientes

Os objetivos deste trabalho abrangem a identificação de dados relevantes relacionados à adubação foliar, a análise das decisões práticas no campo e a comparação dessas decisões com as soluções geradas pela programação

linear. Além disso, busca-se aprimorar as práticas agrícolas fornecendo orientações embasadas em dados para a tomada de decisões. O estudo visa fornecer informações valiosas para profissionais do agronegócio, permitindo a maximização da eficiência e a minimização dos custos relacionados à nutrição de plantas.

Alinhando as necessidades das culturas com as estratégias de fornecimento de nutrientes, contribuindo para a sustentabilidade econômica e ambiental do agronegócio. Essa pesquisa, portanto, possui implicações significativas para o setor agrícola, com o potencial de melhorar a eficiência operacional e promover práticas mais sustentáveis no agronegócio.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A adubação foliar é importante na agronomia pois permite a absorção dos nutrientes de forma rápida e eficiente [4], principalmente na reposição de nutrientes de baixa mobilidade na planta [4] como mostrado na Figura 3.

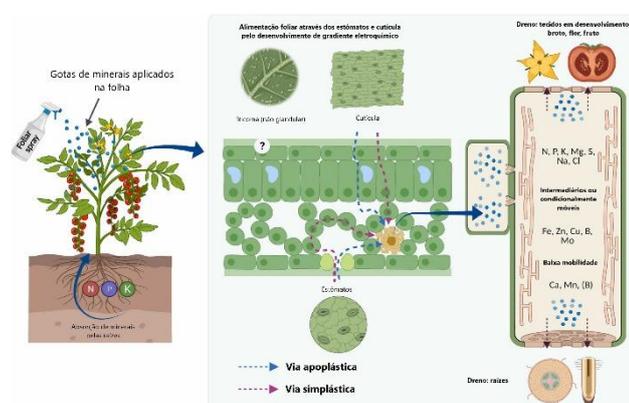


Figura 3: Absorção dos nutrientes pela folha [4].

Com a aplicação dos nutrientes diretamente na folha, esses nutrientes são absorvidos pela cutícula e estômatos da planta e entra no dreno, facilitando assim que nutrientes que possuem baixa mobilidade chegue mais fácil a áreas das plantas mais distantes das raízes, onde pode se ter deficiência desses nutrientes [4].

Isso é especialmente útil em situações de deficiência nutricional ou quando a absorção pelo solo é limitada [4]. Ela ajuda a suplementar a nutrição das plantas de forma rápida, corrigindo rapidamente deficiências nutricionais como mostrado na anteriormente na Figura 2 [4].

Os fertilizantes representam um dos maiores custos na agricultura, é mostrado na Tabela 1 uma análise dos custos de produção de soja na região do Mato Grosso do Sul, que os gastos com fertilizantes chegam a 24,28% de toda o custo de produção [5], sendo essenciais para suprir os nutrientes necessários ao crescimento das plantas. Um fator que contribui para a variação nos custos é a formulação dos produtos utilizados na adubação foliar. A diversidade de formulações disponíveis no mercado agrícola influencia diretamente o preço e a eficácia dos nutrientes aplicados. Formulações mais complexas, com maior concentração e variedade de nutrientes, geralmente têm um custo mais elevado. Além disso, a qualidade dos ingredientes, a tecnologia empregada na produção e a marca do produto também podem influenciar o preço final.

Essas variações de formulação podem influenciar diretamente o preço final dos adubos foliares, exigindo dos agricultores uma escolha criteriosa para balancear eficácia e custo-benefício na busca por maior produtividade e rentabilidade nas suas atividades agrícolas.

Tabela 1: Custo dos componentes e participação relativa no custo de produção da cultura da soja, na região centro-sul de Mato Grosso do Sul, para a safra 2021/2022. [5] Legenda: COE = Custo de Operação Efetivo e COT = Custo de Operação Total

Componente	Soja convencional (R\$ ha-1)	Participação (%)
1. Insumos	2.658,35	54,24
Sementes	473	9,65
Inoculante	6,2	0,13
Corretivos	135	2,75
Fertilizantes	1.190,00	24,28
Herbicidas	262,11	5,35
Inseticidas	325,55	6,64
Fungicidas	230,25	4,7
Adjuvantes	36,24	0,74
2. Operações agrícolas	427,76	8,72
Distribuição corretivos	49,7	1,01
Semeadura	133,69	2,73
Adubação em cobertura	29,99	0,61
Aplicação de defensivos	85,34	1,74
Colheita	129,04	2,63
3. Custos administrativos	783,95	15,99
Assistência técnica	62,82	1,28
Administração	62,82	1,28
Seguro	11,15	0,23
Juros de custeio	269,63	5,5
Impostos e taxas	196,93	4,02
Transporte da produção	54,6	1,11
Armazenagem	126	2,57
A) COE (1+2+3)	3.870,06	78,95
4. Manutenção	12,95	0,26
Benefitorias	12,95	0,26
5. Depreciações	188,46	3,84
Máquinas e equipamentos	173,66	3,54
Benefitorias	14,8	0,3
B) COT (COE+4+5)	4.071,47	83,05
6. Custo de oportunidade	830,34	16,95
Terra	627,91	12,81
Máquinas e equipamentos	163,58	3,34
Benefitorias	38,85	0,8
Custo total (COT +6)	4.901,81	100

Este estudo concentra-se na otimização da aplicação de adubo foliar em diversos cultivares que utilizam a via

foliar para aporte de nutrientes. Avaliamos a eficácia da programação linear na busca por estratégias que permitam a engenheiros agrônomos e produtores atender às necessidades nutricionais das culturas, minimizando despesas e otimizando a alocação de recursos.

A programação linear é amplamente reconhecida por sua capacidade de maximizar ou minimizar funções objetivas, como custos ou eficiência, fazendo-o indispensável na busca por estratégias de manejo agrícola mais eficazes e economicamente viáveis. O método Simplex, especificamente, destaca-se como uma técnica eficiente dentro da programação linear para encontrar a melhor solução possível, navegando através de um espaço de soluções viáveis até alcançar o ótimo.

III. METODOLOGIA

A abordagem escolhida para atender às necessidades de redução de custos por meio de decisões eficientes é a utilização da programação linear. Essa técnica permite lidar com problemas de otimização, como a maximização ou minimização de uma função linear, sujeita a um conjunto de restrições lineares [6]. No contexto específico da adubação foliar, a programação linear é aplicada para determinar a alocação ideal de recursos, como quantidade e distribuição de adubo, visando atender às necessidades nutricionais das plantas [7] ao mesmo tempo que minimiza os custos associados.

O método Simplex é uma técnica eficaz utilizada para resolver problemas de programação linear. Ele itera entre os vértices de um espaço de soluções viáveis para encontrar a solução ótima [8]. Neste estudo, o método Simplex é aplicado para otimizar a alocação de adubo foliar, visando atingir os objetivos de nutrição das plantas com custos mínimos. Essa abordagem oferece uma solução robusta e valiosa para engenheiros agrônomos e profissionais do agronegócio.

A programação linear busca otimizar uma função objetivo sujeita a certas restrições expressas por meio de equações lineares [6]. O método simplex começa com uma solução viável inicial e, em seguida, realiza iterações através de passos que melhoram continuamente a solução até encontrar a solução ótima [8]. Ele opera movendo-se de um vértice a outro do espaço de solução viável (chamado de poliedro viável), buscando uma direção que melhore o valor da função objetivo. Durante essas iterações, o método simplex escolhe uma variável básica para entrar na base (aumentando seu valor) e uma variável básica para sair da base (diminuindo seu valor), seguindo o princípio de que cada iteração melhora a solução até que não seja mais possível melhorá-la, momento em que é alcançada a solução ótima.

A forma padrão do modelo de problema consiste em uma função objetivo, sujeita a restrições, como exemplo:

Função objetivo: $c_1 * x_1 + c_2 * x_2 + \dots + c_n * x_n$
 sujeita às restrições:

$$\begin{aligned} a_{11} * x_1 + a_{12} * x_2 + \dots + a_{1n} * x_n &= b_1 \\ a_{21} * x_1 + a_{22} * x_2 + \dots + a_{2n} * x_n &= b_2 \\ &\dots \\ a_{m1} * x_1 + a_{m2} * x_2 + \dots + a_{mn} * x_n &= b_m \\ x_1, \dots, x_n &\geq 0 \end{aligned}$$

O modelo atende ao problema de forma que a função objetivo seja minimizar os valores gastos nos produtos, sendo “c” a representação do valor de cada produto e “x” a representação da quantidade de cada produto em L/há (litros por hectare). E as restrições identificam a quantidade (“a”) de cada nutriente (“m”) em composição de cada produto (“n”) seguida da igualdade para suprir essa necessidade. Para a uso no problema dos nutrientes, devemos transformar essa equação em uma inequação usando o operador “ \geq ” pois queremos igualar a necessidade nutricional (“b”) da cultura podendo fornecer mais que o necessário, porém sem faltar qualquer exigência nutricional. Atende também na quantidade de cada produto seja maior ou igual a zero, permitindo apenas a introdução do produto ou não, evitando probabilidades matemáticas impossíveis de serem realizadas, como a negativa de um produto. Todos os dados são visualizados em forma de tabela como a Tabela 2 demonstra.

Tabela 2: Modelo de tabela para operações Simplex [8].

	C_1	C_2	...	C_n		
Base	C_b	P_0	P_1	P_2	...	P_n
P_1	C_{b1}	b_1	a_{11}	a_{12}	...	a_{1n}
P_2	C_{b2}	b_2	a_{21}	a_{22}	...	a_{2n}
...
P_m	C_{bm}	b_m	a_{m1}	a_{m2}	...	a_{mn}
Z		Z_0	Z_1-C_1	Z_2-C_2	...	Z_n-C_n

A construção da tabela do método Simplex segue uma organização específica das colunas. A primeira coluna contém as variáveis da base, ou variáveis básicas, que assumem valores para fornecer uma solução. A segunda coluna apresenta os coeficientes das variáveis básicas na função objetivo, denotada como C_b . A terceira coluna mostra o termo independente de cada restrição, P_0 . Cada coluna subsequente corresponde a uma variável de decisão ou folga, P_j , na função objetivo. Além dessas colunas, a tabela inclui uma linha superior com os coeficientes das variáveis na função objetivo e uma linha inferior que indica o valor da função objetivo. Na primeira tabela, as variáveis de folga ocupam a base, resultando em um valor inicial de Z igual a zero.

O critério de parada é atendido quando não há valores negativos entre os custos reduzidos na linha indicadora, o que significa que não há possibilidade de melhoria. Quando o critério de parada é satisfeito, o valor de cada variável na solução ótima está na coluna P_0 . Se uma variável não aparece na base, seu valor é zero. O valor ótimo da função objetivo Z está na coluna P_0 , linha Z.

Se o critério de parada não é atendido, são necessárias iterações adicionais. É preciso determinar a variável que entra e a que sai da base, encontrar o elemento pivô, atualizar os valores da tabela e verificar novamente o critério de parada. A variável que entra na base é a da coluna com o menor valor, ou maior valor absoluto, entre os negativos na linha Z. A variável que sai da base é a da linha cujo quociente P_0/P_j é o menor valor entre os estritamente positivos.

O elemento pivô é a interseção entre a coluna da variável de entrada e a linha da variável de saída. Para atualizar a tabela, na linha do elemento pivô, cada novo elemento é calculado como o elemento anterior dividido

pelo pivô. Nas demais linhas, cada novo elemento é calculado como o elemento anterior menos o produto do elemento anterior na coluna pivô e o novo elemento da linha pivô. Essa atualização assegura que todos os elementos da coluna da variável de entrada sejam nulos, exceto o da linha da variável de saída, que será 1, similar ao método de Gauss-Jordan para resolver sistemas de equações lineares.

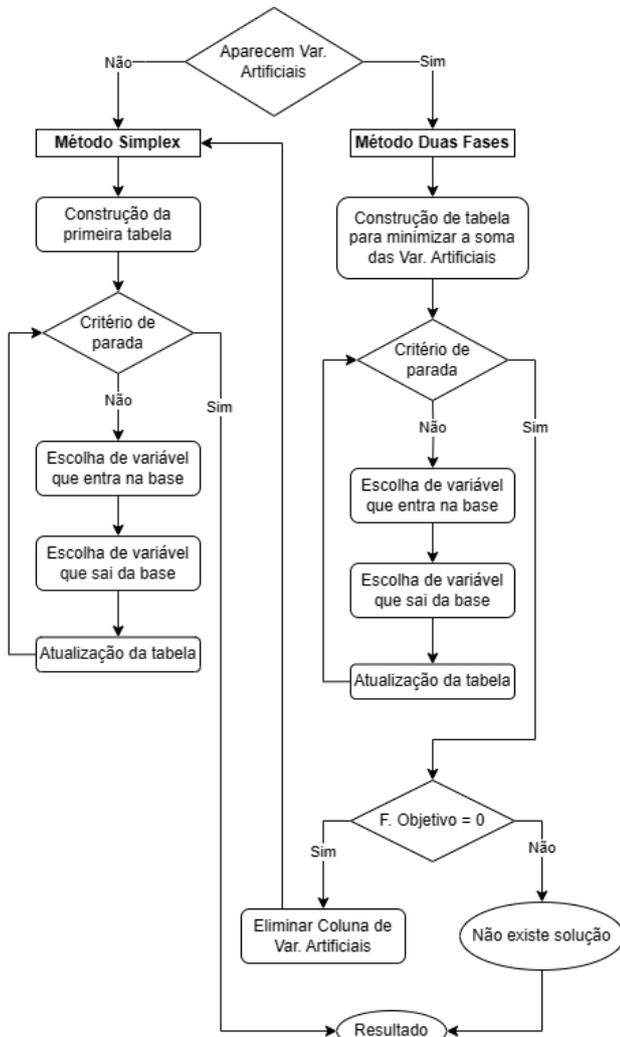


Figura 4: Fluxograma do método Simplex [8].

O processo começa identificando se há necessidade de variáveis artificiais para transformar inequações, como as do tipo 'maior ou igual', em equações. Caso sejam requeridas, o Método de Duas Fases é empregado. Esta abordagem inicia com um simplex especializado para minimizar a soma das variáveis artificiais até zero. Uma vez atingido esse objetivo, o algoritmo do Simplex padrão é aplicado para encontrar a solução ótima como mostra a Figura 4.

No final do problema é possível encontrar uma solução ótima, quando o critério de parada é alcançado, porém em casos de critério de parada onde uma variável não básica tenha um valor nulo, isso significa que existem outras soluções ao invés da calculada, portanto, possui infinitas soluções. E por fim não existe solução quando nenhum ponto satisfaz as restrições do problema como demonstra o diagrama na Figura 4.

Para desenvolver um algoritmo para resolver esse problema, optou-se pelo uso da linguagem de programação Python [9]. Esta escolha se justifica pelos diversos benefícios que a linguagem proporciona, incluindo a biblioteca 'scipy' [10], que implementa o algoritmo de programação linear nativamente [11]. Isso permite concentrar-se na manipulação e organização dos dados inseridos, simplificando o estudo.

Os dados necessários serão importados de um arquivo .csv, contendo a identificação do produto, sua composição por litro de cada elemento químico e seu custo para o agricultor. Além disso, será importante informar os nutrientes já presentes no solo e aqueles a serem adicionados via adubação foliar.

IV. DESENVOLVIMENTO

No desenvolvimento deste estudo, é relevante destacar a semelhança com o clássico problema da dieta, que também é um problema de programação linear. No problema da dieta, o objetivo é determinar a combinação ideal de alimentos que satisfaçam todas as necessidades nutricionais ao menor custo possível. De forma análoga, o problema enfrentado neste estudo busca otimizar a alocação de adubo foliar, garantindo que todas as necessidades nutricionais das plantas sejam atendidas, enquanto minimiza os custos de aplicação. Assim como no problema da dieta, onde cada alimento possui um custo e um perfil nutricional específico, cada adubo foliar possui um custo e uma composição química particular, necessitando de uma abordagem sistemática para encontrar a solução ótima que equilibre custo e eficiência nutricional.

Inicialmente é necessária uma modelagem do problema a ser resolvido [12]. Primeiro é determinado as variáveis de decisões como mostra a expressão 1, isso é, o "x", que no caso abordado eles representam a quantidade dos produtos, dado em litros por hectare, estes produtos que variam a 1 a n.

$$x_1, \dots, x_n \quad (1)$$

Em que:

x_n = quantidade do produto em L/ha
 n = variedade do produto

Depois de identificado as variáveis de decisão são necessárias determinar as restrições dos problemas. Para esse caso, cada nutriente representa uma restrição, e ela se estabelece como a soma do produto da quantidade do produto "x" pela quantidade "a" do nutriente "m" que ele possui, variando em "n" produtos, dado em gramas por litro, tudo isso deve atender a restrição de maior ou igual a "b_m" que representa a quantidade "b" desejada do nutriente "m", dados em gramas por hectare. A expressão é matematicamente expressa como demonstrado na expressão 2.

$$\sum_{n=1}^N a_{mn} \times x_n \geq b_m \quad (2)$$

Em que:

a_{mn} = quantidade do nutriente 'm' no produto 'n' em g/L
 b_m = quantidade do nutriente 'm' desejada em g/ha
 m = variedade de nutrientes

A natureza das variáveis estabelece certas condições implícitas. No nosso problema, não é possível aplicar uma quantidade negativa de um produto, pois isso implicaria na remoção de nutrientes já presentes e que não podem ser removidos. Portanto, todas as nossas variáveis de decisão devem ser maiores ou iguais a zero, conforme mostrado na expressão 3. Esta condição é adicionada às restrições do problema.

$$x_1, \dots, x_n \geq 0 \quad (3)$$

Por fim, é determinada a função objetivo. Nesse problema, a função objetivo é definida como a soma do produto do valor dos adubos foliares, representado por “ c ” em reais por litro, pela quantidade a ser usada, representada por “ x ”. Esta função é igualada a Z , que representa o custo total calculado dado em reais por hectare. A expressão matemática da nossa função objetivo é mostrada na expressão 4.

$$\sum_{n=1}^N c_n \times x_n = Z \quad (4)$$

Em que:

c_n = valor do produto 'n' em R\$/L

Z = custo total em R\$/ha

No nosso problema nós buscamos a otimização do custo dessa aplicação foliar, isso é, pretendemos chegar a nutrição necessária da planta gastando o mínimo possível, como nossa função objetivo tem os valores dos adubos foliares, devemos então minimizar essa função, expressando como exemplificado na equação 5.

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{n=1}^N c_n \times x_n \quad (5)$$

Para a leitura dos dados, por lidar com uma quantidade de dados alta e totalmente variável, pois leva-se em consideração a cultura e os nutrientes necessários para aquela cultura, assim como a diversidade de produtos disponíveis no mercado para aplicação com diferentes composições, então a inserção depende de muitos fatores, por isso foi adotado o uso de um arquivo “.csv” para definir e inserir todos os dados necessários.

Para o arquivo ser lido corretamente é necessário seguir alguns parâmetros de construção, sendo estruturado da seguinte forma, a primeira coluna é completada pelos nomes dos produtos, nas colunas subsequentes são destinadas cada uma para um nutriente específico, e a última coluna insere o valor de cada um desses produtos. Já as linhas são definidas de forma que a primeira seja o nome dos nutrientes (N (Nitrogênio), P (Fósforo) e K (Potássio) na Tabela 3) representados por cada coluna, sendo assim, a primeira e a última coluna não necessitam de valores, as linhas subsequentes são destinadas a cada produto, e as duas últimas linhas são destinadas respectivamente pelos nutrientes já contidos no solo obtidas de uma análise de solo e na nutrição desejada para

a cultura, esta é, essas últimas duas linhas dispensam a primeira e a última coluna devido a primeira coluna ser destinadas ao nome dos produtos e a última coluna os valores dos produtos, e como os dados de nutrientes em solo e nutrientes desejados não possuem esses dados, não é necessário seu preenchimento, o algoritmo ignora essas lacunas, um exemplo de como esse arquivo deve ser montado em .csv é definido na Tabela 3 usando dados fictícios e nomes genéricos para melhor exemplificar.

Tabela 3: Exemplo de construção de arquivo .csv com dados fictícios. Legenda: N = Nitrogênio, P = Fósforo, K = Potássio

Produtos	N	P	K	Preço R\$/L
Prod. 1	39.8	0	15	90.00
Prod. 2	25.5	8.3	7	84.30
Prod. 3	10	12.1	8	49.70
Em solo	125.7	12.5	99.8	N/A
Desejado	273	50.82	125.4	N/A

Os valores dos nutrientes são completados em g/L que cada produto oferece, o valor é o cálculo do Litro do volume, ou seja, R\$/L, e os nutrientes inseridos na adubação, os presentes no solo e o recomendado são na proporção de g/ha. No fim o resultado dará quantos litros de cada produto será necessário por hectare para atingir a nutrição desejada e o valor em R\$/ha que será necessário para cumprir o manejo.

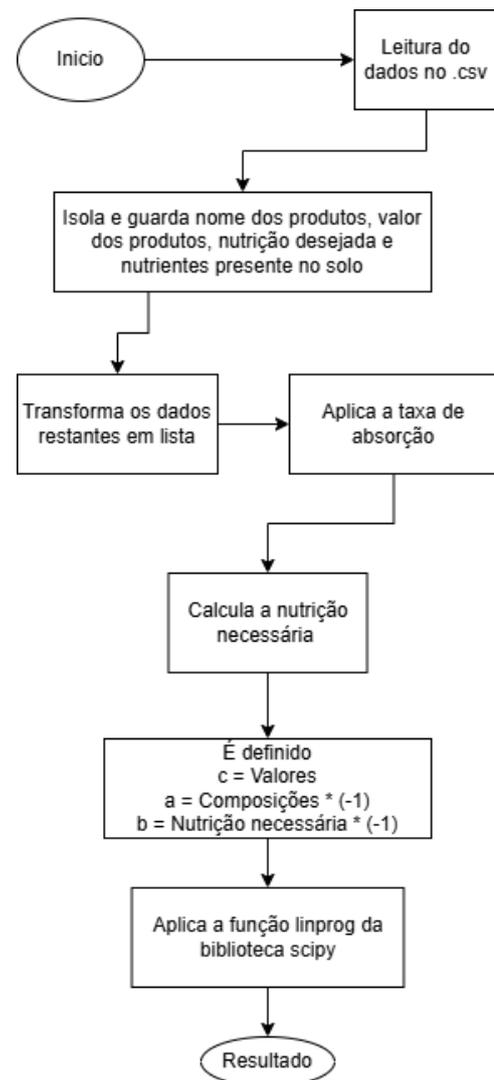


Figura 5: Fluxograma do algoritmo.

Para ler e manipular os dados inseridos foi utilizado a biblioteca do python “pandas” [13] e para os cálculos de programação linear foi usado a biblioteca “scipy” [10].

Como mostra a Figura 5, inicialmente todo o conteúdo do arquivo .csv é guardado em um DataFrame [14], e a partir desse DataFrame é separado cada categoria de informações, inicialmente guardando a primeira coluna descartando as últimas 2 linhas para identificação de cada produto posteriormente, assim como é feito com os nomes dos produtos, é feito com os valores dos mesmos, mantendo sempre a ordem, assim o valor no índice 1 representa o produto no índice 1, os valores são guardados em uma lista, esses são os “c” da nossa equação, usando a Tabela 3 com dados fictícios apresentada após a primeira parte .

Quadro 1: Manipulação de dados fictícios da Tabela 3, separação das colunas dos nomes dos produtos e seus valores.

```
Produtos = ['Prod. 1', 'Prod. 2', 'Prod. 3']
Valores = [90.0, 84.3, 49.7]
```

Sobrou após essa subtração apenas os valores nos nutrientes de cada produto, assim como os valores da adubação via solo, do existente e do desejado, essas 2 últimas linhas também são separadas em 2 listas diferentes para cálculos posteriores. O restante dos dados que apresentam a formulação de g/L de cada produto então é guardado em uma matriz transposta, isso é cada linha vira uma coluna, onde cada linha é um nutriente e cada coluna um produto.

Quadro 2: Manipulação de dados fictícios da Tabela 3, separando os dados de solo, nutrição desejada e composições dos produtos de forma transposta.

```
Solo = [125.7, 12.5, 99.8]
Desejado = [273.0, 50.82, 125.4]
Composições = [[39.8, 25.5, 10.0], [0.0, 8.3, 12.1], [15.0,
7.0, 8.0]]
```

Os dados dos nutrientes de cada produto e os nutrientes presentes no solo passam por uma redução levando em conta que nenhum nutriente é totalmente absorvido pela planta, respeitando assim um valor de absorção máximo.

Quadro 3: Manipulação de dados fictícios da Tabela 3, obtenção da taxa de absorção e cálculo dos nutrientes do solo e produtos absorvidos.

```
Absorção = 75%
Solo = [94.275, 9.375, 74.85]
Composições = [[29.849, 19.125, 7.5], [0.0, 6.225, 9.075],
[11.25, 5.25, 6.0]]
```

O valor dos nutrientes necessários para a planta é feito usando o valor desejado e retirando dele todo nutriente já presente no solo e na adubação via solo, chegando a uma lista de valores que representa nossos termos independentes (“b”).

Quadro 4: Manipulação de dados fictícios da Tabela 3, cálculo dos nutrientes necessários.

```
Necessário = [178.725, 41.445, 50.55]
```

Pela nossa necessidade de minimizar nossa função objetivo então a lista de “c” que são os valores dos produtos é entregue sem qualquer mudança, já as listas de nutrientes e da necessidade nutricional são multiplicadas por -1 a fim de inverter seus valores pois as restrições são do tipo “≥”. Os dados dos nutrientes representam nosso “a” e a lista de nutrientes necessários forma nossos termos independentes (“b”).

Quadro 5: Manipulação de dados fictícios da Tabela 3 para adaptar na modelagem do nosso problema.

```
c = [90.0, 84.3, 49.7]
a = [[-29.849, -19.125, -7.5], [-0.0, -6.225, -9.075],
[-11.25, -5.25, -6.0]]
b = [-178.725, -41.445, -50.55]
```

Todos esses valores são jogados então na função “linprog” da biblioteca “scipy”, e utilizando o método “highs” que equivale ao simplex, ele nos dá o resultado da função objetiva e os valores de “x” que é a quantidade de cada produto a ser utilizada.

Quadro 6: Saída do algoritmo com dados fictícios.

```
message: Optimization terminated successfully. (HiGHS
Status 7: Optimal)
success: True
status: 0
fun: 662.5738103741851
x: [ 4.840e+00  0.000e+00  4.567e+00]
...
```

A linha ‘message’ mostra que a otimização foi terminada com sucesso usando o método “HiGHS” que é o equivalente ao Simplex dentro da função linprog, e dando um status de “Optimal”, ou seja, chegou a um resultado ótimo. A linha ‘fun’ mostra o valor resultado da nossa função objetivo, o Z, dado em R\$/há. E por fim a linha ‘x’ representa a quantidade em L/ha de cada produto seguindo a ordem inserida no arquivo .csv, esse valor é representado em exponenciação, o e+00 equivale a “* 10⁰”.

O que pode ser lido desse resultado é:

Quadro 7: Visualização dos resultados do algoritmo com dados fictícios.

```
Custo por hectare = R$ 662.57

Prod. 1    4.84 litros
Prod. 2    0.0 litros
Prod. 3    4.567 litros
```

Identificando os produtos e calculando a quantidade final de nutrientes oferecido por eles identificamos o seguinte:

Quadro 8: Verificação dos nutrientes recomendados com base nos dados fictícios inseridos para exemplo.

Elemento	Resultado	Necessário
N	238.3	178.72
P	55.26	41.45
K	109.14	50.55

Todos os nutrientes desejados foram alcançados já levando em consideração a redução de absorção (75%).

V. RESULTADOS

Para a aplicação dos métodos apresentados utilizamos dados de uma propriedade rural real denominada Fazenda Sussuarana, com sede em Campos Lindos – TO, e com o manejo de foliares completo feito pelo agrônomo Marcos Cintra de Barros sem uso de nenhuma ferramenta específica para auxiliá-lo na tomada de decisão sobre quais produtos comprar.

Os valores dos produtos foram obtidos via nota fiscal de compra e venda feita pela propriedade, assim como alinhamento desses preços com o valor de tabela dos produtos praticados pelo fornecedor. Para diversificar ainda mais o catálogo de produtos em busca de apresentar produtos que poderiam ter sido escolhidos, mas não foram, foi verificada outras opções de adubos foliares com os fornecedores da região.

A composição de cada produto é disponível publicamente nos catálogos das empresas, demonstrando assim quantas gramas de cada elemento tem em um litro do produto, informação essencial para alimentar o sistema.

Os dados obtidos do manejo feito na propriedade foram descritos na Tabela 4 a um custo total de R\$ 274,48 por hectare.

Tabela 4: Produtos e suas quantidades usadas na propriedade sem auxílio da ferramenta.

Produto	Quantidade (Lt/ha)
Borotop	2,03
Alga+	0,4
Flor	1,01
Magnésio	0,61
Fruto Plus Nitro	2,02
Vegetação	2,01
Defesa	0,8

Os produtos fornecidos na região assim como sua formulação e seus preços foram inseridos no arquivo .csv, organizado como demonstrado na Tabela 5.

A nutrição desejada para a cultura, expressa na última linha do arquivo .csv na Tabela 5 foi definida pelo Agrônomo responsável pela cultura devido a necessidade das recomendações de micronutrientes na soja serem feitas em função de informações locais (experimentos, sintomas de deficiência etc.) [15], assim como a taxa de absorção de nutrientes que depende de fatores externos. Já na linha acima desta foi inserido as informações de nutrientes já presentes no solo atual fornecido pelo agrônomo após análise do solo.

Todas as informações coletadas apresentaram um problema Simplex com 12 variáveis de decisão, representadas pela quantidade de produtos diferentes identificados com os fornecedores da região da propriedade, e 10 restrições, que representam a quantidade de nutrientes diferentes a serem aplicados e que esses produtos atendem.

Tabela 6: Resultado do algoritmo informando a quantidade de cada produto que deve ser aplicado.

Produto	Quantidade (Lt/ha)
Moltop Concentrado	0,0
Flor	0,0
Folha Top	1,84
Fruto Plus Nitro	0,12
Alga+	0,0
Vegetação	3,79
Complex	0,87
Magnésio	1,93
Molibdenio 15	0,13
P50	0,06
Defesa	0,0
Borotop	1,22

Os resultados obtidos sugeriram o manejo apresentado na Tabela 6 a um custo total de R\$ 273,51 após um tempo de processamento do algoritmo de 600ms.

Tabela 5: Arquivo .csv de alimentação do algoritmo com dados reais. Legenda: N = Nitrogênio, K = Potássio, Ca = Cálcio, B = Boro, Mn = Manganês, Zn = Zinco, Mo = Molibdênio, S = Enxofre, Mg = Magnésio, P = Fósforo.

Produto	N	K	Ca	B	Mn	Zn	Mo	S	Mg	P	R\$/L
Moltop Concentrado	130	13	0	0	0	0	0	0	0	0	47.5
Flor	126.5	0	65.55	5.75	0	0	0	0	0	0	46.11
Folha Top	115	11.5	0	0	17.2	5.7	0	0	0	0	44.44
Fruto Plus Nitro	42	420	0	0	0	0	1.4	0	0	0	28.75
Alga+	115	0	0	0	11.5	5.7	0	0	0	0	90
Vegetação	39	0	0	3.9	52	6.5	1	26	0	0	22.22
Complex	0	0	0	3.9	65	65	1.3	75.4	0	0	27.08
Magnésio	0	0	0	0	0	0	0	59.5	49.6	0	15.56
Molibdenio 15	0	0	0	0	0	0	195	0	0	0	159.72
P50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	800	48.61
Defesa	0	260	0	0	0	0	0	0	0	0	44.44
Borotop	0	0	0	205	0	0	0	0	0	0	21.74
Nutrientes em solo	0	96	73	70	287	177	0	21	11	16	N/A
Nutrientes desejados	273	125.4	40.26	254.1	429	201.3	23.1	50.82	80	50.82	N/A

Tabela 7: Análise dos resultados e comparação com o usado na propriedade.

Nutriente	Necessário (g/ha)	Propriedade Real			Programação Linear		
		Aplicado (g/ha)	Absorvido (g/ha)	Atendido (%)	Aplicado (g/ha)	Absorvido (g/ha)	Atendido (%)
N	273	337	252,75	93%	364	273	100%
K	53,4	1059,4	794,55	1488%	71,2	53,4	100%
Ca	0	66,21	49,6575	∞	0	0	100%
B	201,6	429,8	322,35	160%	268,8	201,6	100%
Mn	213,75	109,12	81,84	38%	285	213,75	100%
Zn	68,55	15,34	11,505	17%	91,4	68,55	100%
Mo	23,1	4,84	3,63	16%	30,8	23,1	100%
S	35,07	88,55	66,4125	189%	278,63	208,9725	596%
Mg	71,75	30,26	22,695	32%	95,67	71,7525	100%
P	0	0	0	100%	0	0	100%

A Tabela 7 separa cada nutriente para mostrar individualmente eles e visualizar se a quantidade requerida deles foi atendida, nela separamos os dados usados na propriedade e os dados que a programação linear apresentou. Em cada cenário é demonstrado o valor total aplicado e a quantidade absorvida respeitando o valor de 75% informado pelo agrônomo para a região, assim conseguimos calcular a quantidade atendida de cada nutriente em cada cenário, em casos em que a necessidade é 0 e nada foi aplicado o atendido é de 100% e se foi aplicado algo o atendido se torna infinito pois é impossível mensurar matematicamente.

Ao analisar os resultados obtidos, verificamos que o manejo com ferramentas adequadas conseguiu suprir todas as necessidades nutricionais da soja, com um custo de R\$ 273,51 por hectare em fertilizantes. Em comparação, a análise dos dados reais da propriedade indicou um custo de R\$ 274,48 por hectare. No entanto, como mostra a Tabela 7, o manejo sem ferramentas não conseguiu suprir a nutrição necessária para a soja em vários elementos, especialmente após considerar a taxa de absorção de 75%, comumente usada pelo agrônomo na região na tomada de decisões sem auxílio.

Especificamente, a Tabela 7 mostra que o manejo sem ferramentas apropriadas alcançou a nutrição necessária em apenas três elementos, e mesmo assim com excesso. Houve desperdício significativo de nutrientes, com aplicações de 160% a mais de Boro (B), 189% a mais de Enxofre (S) e 1488% a mais de Potássio (K) do que o necessário. Além disso, Cálcio (Ca) foi aplicado desnecessariamente, pois o solo já possuía a quantidade recomendada. Para os outros elementos, nenhum atingiu a nutrição necessária, e em alguns casos, nem metade da necessidade foi alcançada. O único elemento introduzido de forma satisfatória foi o Nitrogênio, que ainda assim não atingiu a necessidade real.

Por outro lado, o manejo calculado conseguiu fornecer a nutrição adequada para todos os elementos a um custo menor (R\$ 0,97 por hectare). No entanto, mesmo com um custo reduzido, houve uma aplicação seis vezes maior de Enxofre (S) do que o necessário, resultando em desperdício ou potencial acúmulo no solo. Essa aplicação extra ocorreu

porque um dos produtos usados, contendo Enxofre, foi o mais eficiente em termos de custo para atingir a nutrição necessária de outro elemento.

VI. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstraram que a ferramenta de Programação linear alinhada ao método Simplex pode ajudar o agrônomo na tomada de decisão em campo, economizando no custo da lavoura e reduzindo o tempo, que antes incluía reuniões, análise de dezenas de produtos um a um e inserindo e retirando no acerto e erro até encontrar um manejo satisfatório, enquanto a ferramenta opera de forma quase instantânea e apresentando resultados em uma solução ótima.

Com o uso da programação linear conseguimos fornecer todos os nutrientes que a planta necessita de forma mais satisfatória que a escolha manual que não conseguiu suprir todos os elementos e ao mesmo tempo reduzindo o custo de compra desses nutrientes a um custo de 600ms de tempo.

O algoritmo, porém, não trabalha sozinho, ele tem a necessidade de se fazer uma análise de solo frequente na propriedade para ajudar o algoritmo na tomada de decisão mais assertiva assim como o profissional da área saber dosar as recomendações das plantas para o solo da área e o clima. O catálogo dos produtos deve-se manter atualizado para entrada de novos produtos e readequação dos preços.

Por fim o algoritmo demonstra em valores quebrados qual a dosagem correta para cada produto, dependendo de o trabalhador em campo saber dosar corretamente os produtos para a área, assim como ele mostra um resultado ótimo, porém sem levar em consideração as tecnologias de cada produto, devendo assim o agrônomo avaliar o resultado e fazer ajustes para melhor aproveitamento.

O algoritmo cumpriu seu papel de agilizar as escolhas dos produtos levando em consideração nutrição e custo da lavoura, sendo uma ferramenta rápida e de fácil operação já que utiliza um arquivo amplamente usado como o .csv.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] APÓS ALCANÇAR PATAMAR RECORDE EM 2021, PIB DO AGRONEGÓCIO RECUA 4,22% EM 2022. [S. l.], 17 mar. 2023. Disponível em: [https://www.cepea.esalq.usp.br/upload/kceditor/files/PIB-DO-AGRONEGOCIO-2022.17MAR2023\(1\).pdf](https://www.cepea.esalq.usp.br/upload/kceditor/files/PIB-DO-AGRONEGOCIO-2022.17MAR2023(1).pdf). Acesso em: 8 nov. 2023.
- [2] LAMAS, Fernando Mendes. Artigo - A evolução da agricultura do Brasil. [S. l.]: Embrapa, 5 jul. 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/81665485/artigo---a-evolucao-da-agricultura-do-brasil>. Acesso em: 7 nov. 2023.
- [3] REETZ, Harold F. Fertilizantes e seu Uso Eficiente. 1. ed. [S. l.: s. n.], 2016. Disponível em: <https://www.ufla.br/dcom/wp-content/uploads/2018/03/Fertilizantes-e-seu-uso-eficiente-WEB-Word-Ouubro-2017x-1.pdf>. Acesso em: 8 nov. 2023.
- [4] ISHFAQ, Muhammad; KIRAN, Aysha; REHMAN, Hafeez; FAROOQ, Muhammad; IJAZ, Naseem Hassan; NADEEM, Faisal; AZEEM, Imran; LI, Xuexian; WAKEEL, Abdul. Foliar nutrition: Potential and challenges under multifaceted agriculture. *Environmental and Experimental Botany*, [s. l.], 13 maio 2022.
- [5] RICHETTI, Alceu. Viabilidade econômica da cultura da soja para a safra 2021/2022, em Mato Grosso do Sul. Embrapa, [S. l.], p. 5-5, 1 ago. 2021. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1133296/1/COT-262-2021.pdf>. Acesso em: 8 nov. 2023.
- [6] BREGALDA, Paulo F.; OLIVEIRA, Antonio A. F. de; BORNSTEIN, Cláudio T. Introdução à Programação Linear. [S. l.: s. n.], 1981.
- [7] BORKERT, Clóvis Manuel; YORINORI, José Tadashi; CORRÊA-FERREIRA, Beatriz Spalding; ALMEIDA, Álvaro M.R.; FERREIRA, Léo Pires; SFREDO, Gedi Jorge. Seja o doutor da sua soja. *INFORMAÇÕES AGRONÔMICAS*, [s. l.], n. 66, JUNHO 1994. Disponível em: [https://www.npct.com.br/npctweb/npct.nsf/article/BRS-3140/\\$File/Seja%20Soja.pdf](https://www.npct.com.br/npctweb/npct.nsf/article/BRS-3140/$File/Seja%20Soja.pdf). Acesso em: 19 out. 2023.
- [8] GRANJA, Daniel Izquierdo; RUIZ, Juan José Ruiz. Teoria do método Simplex. [S. l.], 2006?. Disponível em: https://www.phpsimplex.com/pt/teoria_metodo_simplex.htm. Acesso em: 19 out. 2023.
- [9] PYTHON. [S. l.], 1991?. Disponível em: <https://www.python.org/>. Acesso em: 16 ago. 2023.
- [10] SCIPY. [S. l.], 2008?. Disponível em: <https://scipy.org/>. Acesso em: 16 ago. 2023.
- [11] SCIPY.OPTIMIZE.LINPROG. [S. l.: s. n.], 2008?. Disponível em: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.linprog.html>. Acesso em: 16 ago. 2023.
- [12] GRANJA, Daniel Izquierdo; RUIZ, Juan José Ruiz. Teoria sobre modelagem de problemas. [S. l.], 2006?. Disponível em: https://www.phpsimplex.com/pt/teoria_modelagem_problemas.htm. Acesso em: 19 out. 2023.
- [13] PANDAS. [S. l.: s. n.], 2011?. Disponível em: <https://pandas.pydata.org/>. Acesso em: 16 ago. 2023.
- [14] PANDAS.DATAFRAME. [S. l.: s. n.], 2011?. Disponível em: <https://pandas.pydata.org/docs/reference/api/pandas.DataFrame.html>. Acesso em: 16 ago. 2023.
- [15] RIBEIRO, Antonio Carlos; GUIMARÃES, Paulo Tácito G.; ALVAREZ V., Victor Hugo. RECOMENDAÇÕES PARA O USO DE CORRETIVOS E FERTILIZANTES EM MINAS GERAIS. [S. l.: s. n.], 1999.