



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**ESTIMATIVA DO *YIELD GAP* PARA A CULTURA DA SOJA EM
NÍVEL DE FAZENDA NO ESTADO DE GOIÁS**

Thaynara Garcia Santos

Goiânia, GO – Brasil

2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE AGRONOMIA

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFMG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFMG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação Tese

2. Nome completo do autor

Thaynara Garcia Santos

3. Título do trabalho

Estimativa do *Yield Gap* para a cultura da soja em nível de fazenda no estado de Goiás

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

a) consulta ao(a) autor(a) e ao(a) orientador(a);

b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Rafael Battisti, Professor do Magistério Superior**, em 22/02/2021, às 16:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

04/03/2021

SEI/UFG - 1851004 - Termo de Ciência e de Autorização (TECA)



Documento assinado eletronicamente por **THAYNARA GARCIA SANTOS, Discente**, em 23/02/2021, às 21:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1851004** e o código CRC **A54A4D35**.

Referência: Processo nº 23070.006329/2021-99

SEI nº 1851004

https://sei.ufg.br/sei/controlador.php?acao=documento_imprimir_web&acao_origem=arvore_visualizar&id_documento=2000096&infra_sistema=1000... 2/2

THAYNARA GARCIA SANTOS

ESTIMATIVA DO *YIELD GAP* PARA A CULTURA DA SOJA EM NÍVEL
DE FAZENDA NO ESTADO DE GOIÁS

Dissertação apresentada à banca de defesa do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, da Universidade Federal de Goiás, como exigência parcial para obtenção do título de Mestre em Agronomia.

Área de concentração: Solo e Água
Orientador: Prof. Drº Rafael Battisti

Goiânia, GO – Brasil

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Garcia Santos, Thaynara
ESTIMATIVA DO YIELD GAP PARA A CULTURA DA SOJA EM
NÍVEL DE FAZENDA NO ESTADO DE GOIÁS [manuscrito] /
Thaynara Garcia Santos. - 2021.
63, LXIII f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Battisti .
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola
de Agronomia (EA), Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Goiânia,
2021.

Bibliografia.
Inclui siglas, mapas, gráfico, tabelas.

1. Glycine max (L) Merrill. 2. Condições climáticas. 3. Manejo
agrícola. 4. Fertilidade do solo. 5. Resistência a penetração . I. Battisti ,
Rafael , orient. II. Título.

CDU 631/635



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE AGRONOMIA

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata Nº 19/2021 da sessão de Defesa de Dissertação de **Thaynara Garcia Santos** que confere o título de Mestra em Agronomia, na área de concentração em Solo e Água.

Aos 22/02/2021, vinte e dois dias do mês de fevereiro do ano de dois mil e vinte e um, a partir das 8:30, nove horas, por videoconferência, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada “Estimativa de yield gap para a cultura da soja em função do nível nutricional foliar”. Os trabalhos foram instalados pelo Orientador e Presidente da Banca Examinadora, **Prof. Rafael Battisti (EA/UFG)** com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: **Dr. Alexandre Bryan Heinemann (Embrapa Arroz e Feijão)**, membro titular interno; **Prof. Felipe Gustavo Pilau (ESALQ/USP)**, membro titular externo. Durante a arguição, os membros da banca fizeram sugestão de alteração do título do trabalho, conforme apresentado a seguir. Após a arguição, a Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação tendo sido a candidata **APROVADA** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Presidente da Banca Examinadora, Prof. Rafael Battisti, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos 22/02/2021, vinte e dois dias do mês de fevereiro do ano de dois mil e vinte e um.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA

ESTIMATIVA DO YIELD GAP PARA A CULTURA DA SOJA EM NÍVEL DE FAZENDA NO ESTADO DE GOIÁS



Documento assinado eletronicamente por **Rafael Battisti, Professor do Magistério Superior**, em 22/02/2021, às 10:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Felipe Gustavo Pilau, Usuário Externo**, em 22/02/2021, às 10:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Bryan Heinemann, Usuário Externo**, em 22/02/2021, às 15:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1850992** e o código CRC **5A001DA7**.

Referência: Processo nº 23070.006329/2021-99

SEI nº 1850992

AGRADECIMENTOS

À Deus pela oportunidade da vida.

Aos meus pais, Terezinha Garcia de Araújo Santos e Heli Aparecido dos Santos (*in memoriam*) por todo amor, carinho e apoio.

Aos meus irmãos por todo companheirismo e paciência.

Ao meu orientador Rafael Battisti por toda paciência, apoio, empatia, orientação e ensinamentos.

Aos meus amigos da Pós-Graduação por toda ajuda e por nunca me deixarem desistir.

À Universidade Federal de Goiás e Escola de Agronomia pela oportunidade da realização da Pós-Graduação.

À empresa Satis Indústria e Comércio LTDA por todo apoio e compreensão durante essa jornada.

O meu muito obrigada a todos que de alguma forma contribuíram para a realização e conclusão desse trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO.....	10
ABSTRACT.....	11
1. INTRODUÇÃO.....	12
2. OBJETIVOS.....	15
2.1 Objetivo geral	15
2.2 Objetivos específicos	15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3.1. Importância econômica, produtiva e alimentar.....	16
3.2. Aspectos ecofisiológicos da cultura.....	18
3.2.1. Radiação solar e fotossíntese	19
3.2.2. Fotoperíodo	19
3.2.3. Temperatura	20
3.3. Modelos de simulação de produtividade.....	21
3.4. <i>Yield gap</i> por clima e manejo.....	22
3.5. Solo: nível nutricional e resistência a penetração.....	24
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	29
4.1. Descrição de local, clima e manejo agrícola das áreas.....	29
4.2. Análise de solo e folhas.....	32
4.3. Dados climáticos.....	33
4.4. Análise de compactação do solo.....	33
4.5. Modelo de simulação de produtividade.....	34
4.6. Relação entre <i>yield gap</i> e nível nutricional foliar.....	37
4.6. Análises estatísticas.....	37
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	56
7. REFERÊNCIAS.....	57

RESUMO

A soja (*Glycine max* (L) Merrill) é considerada a principal cultura do agronegócio brasileiro, desempenhando um papel muito importante na economia do país. Com um amplo aproveitamento dos grãos e seus derivados como fonte de proteína e energia, a cultura da soja é amplamente utilizada para suprir a necessidade alimentícia da população mundial. Visto que atentar-se para as condições necessárias de cultivo da cultura é um dos passos essenciais para a obtenção de altas produtividades, principalmente as condições climáticas das áreas em que as plantas serão inseridas, pois o clima não favorável associado com um manejo agrícola ineficiente pode ser responsável pela baixa produção de grãos de soja e assim não atender a demanda mundial. Diante do cenário atual, a agricultura vem cada vez mais se modernizando e atentando-se as demandas do mercado através de tecnologias e pesquisas. Com base nestes quesitos, é possível estimar o *yield gap* dos cultivos agrícolas que nos permite diferenciar os tipos e níveis de produtividades existentes e quantificar as quebras ocasionadas por déficit hídrico e por manejo agrícola através de dados obtidos a partir de modelos de simulação de produtividade. Objetivou-se com este trabalho estimar o *yield gap* da cultura da soja em nível de fazenda na região central do Estado de Goiás, sob condições de Cerrado, avaliando a interação entre clima, e manejo associado ao nível nutricional foliar e resistência a penetração no solo. O estudo foi realizado em 13 áreas de cultivo de soja em lavouras comerciais sob sistema de plantio direto, de cinco produtores rurais, localizadas nos municípios de Avelinópolis, Heitorai, Trindade e São Luiz do Norte, no estado de Goiás na safra 2019/2020. Verificou-se a nível de fazenda que as áreas em que se obteve as maiores eficiências agrícolas (EA) foram as áreas em que se obteve as menores eficiências climáticas (EC), ou seja, as condições climáticas ocasionaram os maiores *yield gap* quando comparado ao *yield gap* por manejo em todas as áreas estudadas. Houve uma correlação positiva entre a EA e os níveis de N, K, Cu e B obtidos na análise de folha e a resistência a penetração do solo se mostrou um fator limitante para um melhor desenvolvimento da cultura.

Palavras-chaves: *Glycine max* (L) Merrill; Condições climáticas; Manejo agrícola; Fertilidade do solo; Resistência a penetração.

ABSTRACT

Soybean (*Glycine max* (L) Merrill) is the main crop in Brazilian agribusiness, playing a very important role in the country's economy. The grains area widely uses and their derivatives as a source of protein and energy. Soybeans is used to supply the world requirement for food. This bring attention to the necessary conditions for cultivating the crop is one of the essential steps to obtain high yield, mainly climatic conditions in the areas where the crop will be grown. The association of unfavorable climate and inefficient agricultural management may be responsible due to the low production of soybeans and thus not meeting world demand. The agriculture is modernizing and paying attention to market demands through technologies and research to supply the require food demand for future generation. Based on questions, it is possible to estimate the yield gap of agricultural crops that allow us to differentiate the types and levels of existing production and to quantify as breaks caused by water deficit and agricultural management through data obtained from productivity simulation models. The aim of this work was to estimate the yield gap of soybean at farm level in the central region of the State of Goiás, Brazil, under Cerrado conditions, evaluating the interaction between climate, and management associated with leaf nutritional level and soil penetration resistance. The study was carried out in 13 soybean commercial cultivation areas under no-tillage system, of five farmers, at the municipalities of Avelinópolis, Heitoraí, Trindade and São Luiz do Norte, in the 2019/2020 growing season. At the farm level, it was found that the areas of the highest agricultural efficiencies (AE) were obtained the lowest climatic efficiencies (CE). This lead to climatic conditions caused the greatest yield gap when compared to yield gap by management. There was a positive correlation between AE and the levels of N, K, Cu and B collected in the leaf analysis and resistance to soil penetration, proving that these were limiting factor for a better crop development.

Keywords: *Glycine max* (L) Merrill; Climate conditions; Agricultural management; Soil fertility; Penetration resistance.

1 INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* (L) Merrill) é considerada a principal cultura do agronegócio brasileiro, desempenhando um papel muito importante na economia do país. Segundo dados levantados pela Conab (2020), a área cultivada no Brasil na safra 2019/2020 foi de 36,9 milhões de hectares. Esse aumento de área plantada, conseqüentemente, influencia no aumento da produção total de grãos de soja, dependendo das condições climáticas nas regiões produtoras. A produção total na safra 2019/2020 foi de 124,8 milhões de toneladas, sendo que o estado de Goiás foi responsável por 13,1 milhões de toneladas de grãos produzidas em uma área plantada de 3,54 milhões de hectares com produtividade média de 3.712 kg ha⁻¹, assumindo o terceiro lugar no ranking dos maiores estados produtores de soja a nível Brasil (Conab, 2020). Contudo, o Brasil na safra 2019/2020 assumiu o primeiro lugar no ranking mundial de produção e exportação de grãos de soja, o que mostra e demonstra a importância econômica da cultura no país (Aprosoja, 2020).

Com um amplo aproveitamento dos grãos e seus derivados como fonte de proteína e energia, a cultura da soja é amplamente utilizada para suprir a necessidade alimentícia da população mundial, que tende a crescer de forma não proporcional com a quantidade de alimentos disponíveis. Diante desse cenário, é relevante preocupar-se com a qualidade e aumento da produção da soja e de outros cultivos alimentícios, pois segundo dados levantados pela Fundação Alemã para a População Mundial (DSW, 2019), a população mundial passará de 8 bilhões de pessoas no ano de 2020, sendo que o maior crescimento populacional ocorrerá principalmente em países do continente africano, em que a fome é uma realidade atual.

Visto que atentar-se para as condições necessárias de cultivo da cultura é um dos passos essenciais para a obtenção de altas produtividades, principalmente as condições climáticas das áreas em que as plantas serão inseridas, pois o clima não favorável associado com um manejo agrícola ineficiente pode ser responsável pela baixa produção de grãos de soja e assim não atender a demanda mundial (Silva et al., 2014). Segundo Battisti (2013), o

déficit hídrico é a principal consequência da interação das condições climáticas com as características físicas dos solos e o manejo agrícola das regiões de cultivo responsável pela quebra de produtividade da cultura da soja em todos os anos de cultivo nas regiões produtoras do país. A ineficiência do manejo agrícola adotado nas áreas cultivadas evidencia os efeitos climáticos adversos na produção da cultura, principalmente o manejo nutricional, em que a exigência nutricional da soja e o potencial de exportação da cultura são características determinadas por fatores genéticos, porém bastante influenciados por fatores climáticos, pela fertilidade do solo e pelo manejo agrícola adotado (Embrapa, 2008).

O manejo nutricional inicia-se com a construção de um perfil de solo para que a disponibilização dos nutrientes seja suficiente para o desenvolvimento e expressão genética, aumentando a produtividade final da cultura (Embrapa, 2007). A absorção de nutrientes por qualquer espécie vegetal é influenciada por vários fatores, entre eles as condições climáticas, como chuvas e temperaturas do ar, as diferenças genéticas entre cultivares de uma mesma espécie, a disponibilidade de nutrientes no solo e os diversos tratos culturais (Embrapa, 2013).

A soja é uma cultura altamente exigente em todos os macronutrientes essenciais, e para que sejam aproveitados adequadamente pela cultura, é necessário que estejam disponíveis no solo em quantidades suficientes e em relação de equilíbrio, pois o desequilíbrio ou insuficiência entre os nutrientes pode acarretar uma absorção excessiva de alguns e deficiente de outros (Embrapa, 2008). Quando se trata do cultivo em solos do Cerrado, que são caracterizados por possuírem pouca disponibilidade de fósforo em condições naturais, e alta concentração de alumínio, influenciando em uma elevação na acidez do solo (Oliveira et al., 2012), é fundamental uma maior atenção a demanda nutricional da cultura e aos manejos adotados que influenciem em uma melhor absorção e resposta as necessidades atendidas.

Diante do cenário atual, a agricultura vem cada vez mais se modernizando e atentando-se as demandas do mercado através de tecnologias e pesquisas. Com base nestes quesitos, é possível estimar o *yield gap* dos cultivos agrícolas, em que *yield gap* é um termo em inglês, pois a tradução para o português não abrange a amplitude de dados e análises da essência do termo, que nos permite diferenciar os tipos e níveis de produtividades existentes e quantificar as quebras ocasionadas por déficit hídrico e por manejo agrícola através de dados obtidos a partir de modelos de simulação de produtividade (Sentelhas et al., 2015). Para quantificar o *yield gap* existente por clima e/ou manejo agrícola, o uso de modelos de

simulação de produtividade nos permite dimensionar as quebras que possam acontecer e nos proporcionar uma melhor tomada de decisão para obtenção da máxima eficiência agrícola (Sentelhas et al., 2016). A partir da quantificação das quebras de produtividade, é possível adotar manejos para mitigar as perdas que podem ocorrer devido aos fatores climáticos, que são variáveis incontroláveis dentro dos cultivos, e perdas devidos ao manejo agrícola.

Sendo assim, o presente trabalho tem como hipótese que a interação do manejo agrícola associado com as condições químicas e físicas do solo em interação com as condições climáticas tem influência significativa na produtividade final da soja, possibilitando assim visualizar as principais interações que causam os maiores *yield gaps* na cultura da soja e assim possibilitar uma tomada de decisão sobre o melhor manejo que pode ser adotado diante das condições climáticas das áreas de cultivo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo estimar o *yield gap* da cultura da soja em nível de fazenda na região central do Estado de Goiás, sob condições de Cerrado, avaliando a interação entre clima e manejo, associado ao nível nutricional foliar e resistência a penetração no solo.

2.2 Objetivos específicos

- a) Estimar e particionar o *yield gap* da cultura da soja por clima e/ou manejo;
- b) Avaliar a relação entre o nível nutricional foliar e resistência a penetração no solo com o *yield gap* por manejo;
- c) Identificar o potencial produtivo e fatores de solo limitantes da produtividade na região central do Estado de Goiás.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Importância econômica, produtiva e alimentar

O cultivo da cultura da soja iniciou-se no norte da China, a partir de duas espécies selvagens de soja que foram cruzadas e posteriormente melhoradas e domesticadas (Dall'agnol et al., 2007). Segundo estes mesmos autores, no ocidente, o cultivo teve início a partir do século XX com um cultivo inicial com soja forrageira nos EUA em 1940, e posteriormente este passou a cultivar soja para produção de grãos. Já no Brasil, o cultivo teve início na Bahia, em seguida São Paulo, depois Rio Grande do Sul, sendo que neste último a cultura da soja obteve uma melhor adaptação devido as condições de alta altitude da região serem semelhantes as condições do EUA, já que as cultivares eram advindas deste país. E com a intervenção do melhoramento genético, hoje a soja é uma cultura cultivada em quase todo o território brasileiro, adaptando-se as diferentes condições climáticas existentes.

A soja é considerada a principal cultura do agronegócio brasileiro, sendo empregada para diversas finalidades no mercado interno e externo. Devido a toda sua variabilidade de uso, o produto soja apresenta um valor econômico alto a nível nacional e internacional (Silva et al., 2006). No cenário mundial, o Brasil ultrapassou os EUA e se tornou o maior produtor de soja (Tabela 1), em que na safra 2019/2020 obteve um aumento de 3% de área plantada em relação à safra passada, com um total de 36,949 milhões de hectares plantados, produzindo 124,8 milhões de toneladas de grãos, com produtividade média de 3.379 kg ha⁻¹ (Conab, 2020).

Esse aumento de área plantada, se dá devido a disponibilidade de áreas no Brasil, que são maiores se comparado a Argentina e aos EUA, e que juntamente com novas tecnologias existentes que vem acompanhando os cultivos, faz com que a produção de soja e outros grãos vem se destacando em regiões que anteriormente o cultivo não era expressivo, que são as novas fronteiras agrícolas. Como, por exemplo, o MATOPIBA, que abrange a região do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, em que MA e TO se destacaram entre as maiores produtividades médias obtidas na safra 2019/2020, juntamente com os estados do

Mato Grosso, Paraná, Rio Grande do Sul, Goiás, São Paulo, Rondônia e Distrito Federal (Figura 1).

Tabela 1. Ranking mundial de países produtores de soja em 2019 e suas respectivas produções, em milhões de toneladas.

Ranking	Países	Milhões toneladas
1º	Brasil	124,8
2º	EUA	96,8
3º	Argentina	52
4º	China	18,1
5º	Paraguai	9,9
6º	Outros	36,74

Fonte: USDA (2020).

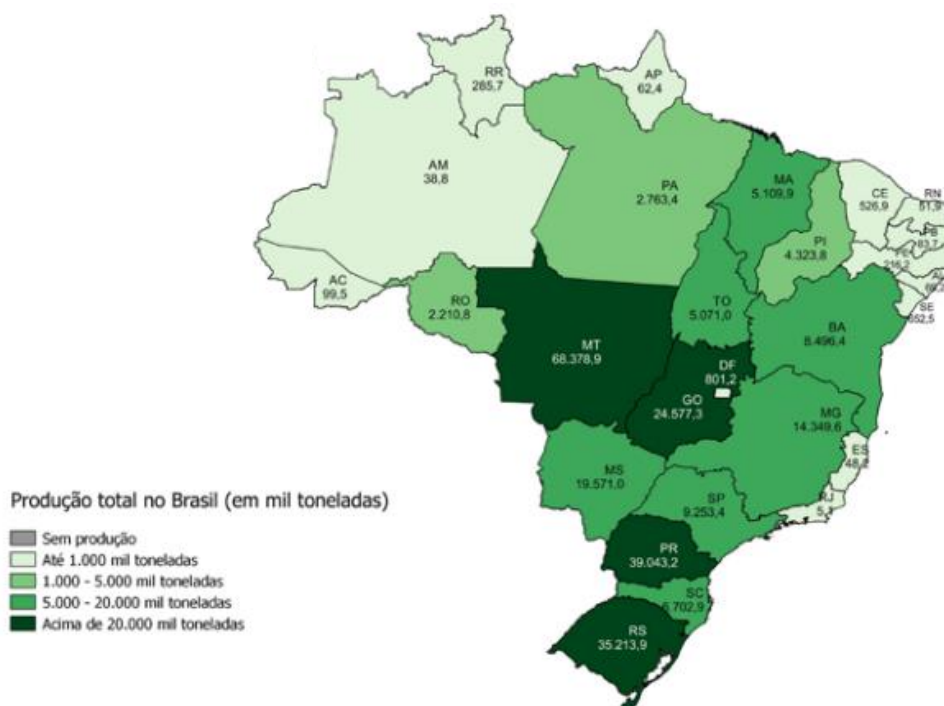


Figura 1. Mapa de produção agrícola total de grãos no Brasil.

Fonte: CONAB (2020).

O consumo interno de soja e seus derivados, como farelo de soja, óleo de soja para consumo humano e biodiesel somam um total de 46,9 milhões de toneladas de soja

consumidas, e as exportações somam um total de 89 milhões de toneladas, visto que o Brasil é o maior exportador mundial de soja em grãos, e a China é o maior país importador de soja (Conab, 2020). É importante ressaltar o impacto que o complexo produtivo da soja promove na geração de empregos, validando assim o papel importante no desenvolvimento da economia brasileira, sendo que 1,5 milhões de empregos são gerados em 17 estados do território brasileiro (Abiove, 2020).

3.2 Aspectos ecofisiológicos da cultura

A soja é a principal leguminosa cultivada a nível mundial. É uma planta pertencente à família Fabaceae e possui metabolismo do tipo C_3 na assimilação de carbono, o que quando comparada a plantas C_4 , pode apresentar uma menor eficiência na taxa fotossintética (Casarolli et al., 2007). Essa menor eficiência na assimilação de carbono em plantas do tipo C_3 ocorre porque a enzima ribulose-1,5-bifosfato carboxilase/oxidase (RuBisCo), presente nas respectivas plantas, possui uma afinidade tanto por O_2 , tanto quanto por CO_2 , influenciando na atividade da carboxilase ou oxidase de acordo com a disponibilidade de O_2 ou CO_2 presente na câmara subestomática (Cabral, 2019).

A atividade da carboxilase ou oxidase pode ser determinada pelas condições ambientais em que a planta está inserida, ou seja, quando em condições favoráveis ao seu desenvolvimento sem nenhum estresse, seja abiótico ou biótico, a concentração de CO_2 na folha aumenta estimulando então a atividade da carboxilase da RuBisCo. Já em condições estressantes, principalmente de temperaturas elevadas associada a déficit hídrico, há a ocorrência de fechamento dos estômatos, o que influencia na diminuição da entrada de CO_2 e elevação na concentração de O_2 na célula da planta, estimulando assim a atividade da oxidase da RuBisCo, diminuindo a taxa fotossintética da planta, processo esse denominado de fotorrespiração (Cabral, 2019).

Entretanto, a fotorrespiração, segundo Taiz et al., (2017), é importante pois possibilita que a planta não diminua sua taxa fotossintética em função das condições de estresse. Atualmente, o principal fator que propicia o estresse em plantas de cultivo, é o déficit hídrico, que segundo Battisti (2013) é a principal consequência da interação do elemento climático, precipitação, e capacidade de armazenamento de água dos solos, responsável pela quebra de produtividade da cultura da soja em todos os anos de cultivo nas regiões produtoras a nível Brasil. Segundo estudos de Borrmann (2009), sobre as respostas

fisiológicas da cultura da soja sob déficit hídrico, afirma-se que na fase de enchimento dos grãos na soja, o estresse hídrico pode causar redução no tamanho e peso dos grãos além da retenção da cor verde, pois à falta de água prejudica a atividade das enzimas responsáveis pela degradação da clorofila, o que resulta em alta proporção de grãos verdes.

3.2.1 Radiação solar e fotossíntese

As plantas realizam a fotossíntese a partir da radiação solar contida na faixa da luz visível, entre 400 nm e 700 nm, que recebe a denominação de radiação fotossinteticamente ativa (RFA). Essa fração corresponde de 45% a 50% da quantidade total de radiação solar incidente na superfície da terra (Ommeto, 1981). A relação de radiação solar com a cultura da soja é importante, pois de acordo com Câmara (2000), a radiação solar está diretamente relacionada com aspectos do desenvolvimento da planta, como fotossíntese, alongação da haste principal e suas ramificações, pegamento de vagens e grãos, expansão foliar e fixação biológica de nitrogênio.

Para desencadear o processo fotossintético, a RFA é captada pelas moléculas de clorofilas e carotenóides, que constituem o complexo antena dos fotossistemas juntamente com as proteínas estruturais (Taiz et al., 2017). A taxa fotossintética da cultura é variável de acordo com a fase de desenvolvimento em que a cultura se encontra. Por exemplo, a fase cotiledonar tem a taxa fotossintética baixa quando comparada com a fase vegetativa que se tem folhas verdadeiras, porém, é o suficiente para suprir a necessidade da plântula (Fagan, 2007). Em estudos feitos por Pereira (2002), observou-se que a cultura da soja aumenta sua taxa fotossintética gradativamente do período vegetativo até o reprodutivo, atingindo um máximo na fase de enchimento de grãos, e esse incremento de fotossíntese acontece devido ao aumento da demanda por fotossintatos para suprir a necessidade da cultura.

3.2.2 Fotoperíodo

O fotoperíodo é definido como a duração de horas entre o nascer e o pôr do sol e é influenciado pela latitude do local e época do ano. Para culturas como a soja, é necessário um fotoperíodo crítico, que varia entre 13 e 14 horas dependendo da cultivar, sendo que o fotoperíodo precisa estar abaixo do crítico para que ocorra a indução da floração. Para Farias et al., (2009), o crescimento da cultura da soja é afetado pelo clima, o qual influencia na

estatura das plantas e por consequência, na colheita mecanizada e ocorrência de acamamento. Por outro lado, especificamente o início da floração, o nictoperíodo e/ou fotoperíodo tem efeito significativo para o florescimento, pois trata-se de uma cultura que floresce sob condições de noites longas.

Os dias longos reduzem significativamente a taxa de desenvolvimento da cultura por atrasar a idade reprodutiva da planta (Setiyono et al., 2007), contudo o fotoperíodo é o principal fator climático determinante na duração do ciclo do cultivar desde a data de emergência até a data de maturação, e a temperatura do ar age como fator modulador (Battisti, 2013).

3.2.3 Temperatura

A cultura da soja apresenta uma melhor adaptação em locais em que a temperatura do ar varia entre 20 °C e 30 °C, sendo 30 °C o ideal para um melhor máximo desenvolvimento (Embrapa, 2013), pois nesta faixa de temperatura a taxa de manutenção respiratória é menor influenciando em maior acúmulo de CO₂. De acordo com Farias et al., (2007), a temperatura do solo ideal para semeadura é de 25 °C, para que assim obtenha-se uma emergência rápida e uniforme, pois temperatura dos solos abaixo de 20 °C podem acarretar menores germinações e emergências e acima de 55 °C plantas em fase cotiledonar podem ter suas membranas celulares desestruturadas podendo ocorrer tombamento. Para a indução da floração na cultura, é necessário que haja a ocorrência da temperatura do ar superior a basal da cultura, de 13 °C (Farias et al., 2007).

Para a cultura da soja os limites críticos de temperatura do ar máxima e mínima afetam o crescimento vegetativo da planta, em que temperaturas do ar menores que 10 °C ou maiores que 40 °C influenciam negativamente a taxa de crescimento das plantas pela diminuição ou degradação da atividade enzimática (Farias et al., 2007). A temperatura do ar acima de 40 °C inibe a germinação do pólen e o crescimento do tubo polínico, interferindo negativamente na floração e retenção de vagens na planta (Salem et al., 2007).

De acordo com Farias et al., (2009), a temperatura do ar afeta significativamente a duração do ciclo da soja, principalmente em cultivares que possuem sensibilidade ao fotoperíodo, pois em condições de temperaturas elevadas, há uma diminuição do período entre a emergência e o início da floração, influenciando na redução da estatura das plantas, principalmente se a ocorrência de altas temperaturas esteja associada ao déficit hídrico e

insuficiência fotoperiódica durante a fase de crescimento, levando há uma redução do ciclo mesmo em época de semeadura semelhante.

3.3 Modelos de simulação de produtividade

Modelos de simulação de produtividade são ferramentas que auxiliam o processo produtivo dos cultivos agrícolas afim de antecipar ou quantificar riscos e proporcionar a possibilidade de planejamento e tomada de decisões que minimizem as perdas de produção de toda a cadeia agrícola, seja por fator climático, genético, e de manejo. Os modelos são ferramentas que possibilitam a criação de cenários através da variação de combinações dos diversos fatores que influenciam a produtividade das culturas (Freitas et al., 2004), pois com a simulação é possível prever resultados de ensaios e/ou ações que não podem ser obtidos experimentalmente ou em condições de campo. Na literatura é possível encontrar diversos tipos de modelos de simulação de culturas que possibilitam a estimativa da produtividade, e podem ser classificados em empíricos, matemático-fisiológicos e mecanísticos.

De acordo com Acock & Acock (1991) e Dourado-Neto et al., (1998), os modelos empíricos empregam relações simples entre a produtividade e uma ou duas variáveis meteorológicas, já os modelos matemático-fisiológicos são capazes de explicar parte dos processos fisiológicos das plantas através de equações matemáticas, e os modelos mecanísticos tem a capacidade de explicitar todos os processos envolvidos na produção de matéria seca das culturas. Porém, para a aplicação de modelos em larga escala na agricultura, o método do modelo matemático-fisiológico é uma das melhores alternativas, pois após calibrado devidamente, é capaz de apresentar resultados satisfatórios para um amplo conjunto de condições com um baixo número de variáveis de entrada. Nesse exemplo, pode ser citado o modelo matemático-fisiológico da Zona Agroecológica (MZA-FAO), sendo amplamente utilizado no Brasil em estudos aplicados (Battisti, 2013).

Brun (2019) utilizando o modelo da zona agroecológica para a cultura da soja constatou a eficiência do modelo para estimativa de parâmetros produtivos da cultura em função da penalização pelo déficit hídrico e a possibilidade de definição de melhores épocas de semeadura para a cultura da soja nas distintas regiões produtoras do Brasil em função dos diferentes tipos de solo e ciclo de cultivares. Freitas (2018) realizou estudos com eucalipto, através do modelo MZA-FAO adaptado para essa cultura, para estimativa da produtividade e volume do fuste do eucalipto, já Carvalho et al., (2017) utilizaram o modelo MZA-FAO,

após calibrações, para obtenção da estimativa da produtividade da palma forrageira no estado da Bahia. Bosi et al., (2015) estimaram a produtividade de cultivares do gênero *Urochloa* cultivadas a pleno sol e em sistemas silvipastoril através do MZA-FAO. Cunha & Faccioli (2020) estimaram a produtividade da cultura do sorgo nos plantios sequeiro e irrigado no estado do Sergipe através do MZA-FAO, bem como Oliveira et al., (2012) estimaram a produtividade da cana-de-açúcar para as principais regiões produtoras de Minas Gerais utilizando o modelo da Zona Agroecológica.

3.4 *Yield Gap* por clima e manejo

Yield gap ou quebra/lacuna de produtividade é um termo que vem sendo amplamente estudado e aplicado a fim de identificar fatores responsáveis pela quebra de produção das culturas. Para Sentelhas et al., (2016), *yield gap* pode ser definido através da relação existente entre os diferentes tipos e níveis de produtividade de uma cultura agrícola e os fatores que a determinam, podendo ser de ordem genética, climática e de manejo agrícola. Para o absoluto entendimento deste termo, é de suma importância compreender os tipos e níveis de produtividades que podem ser alcançados em um cultivo agrícola. Nesse sentido, pode-se citar Bhatia et al., (2008) e Battisti et al., (2012), que definiram a produtividade em três tipos, baseado no seu nível e fatores atuantes, sendo a produtividade potencial, atingível e real.

A produtividade potencial (PP) compreende a máxima produtividade que uma cultura pode obter em seu local de cultivo sem nenhuma restrição de ordem hídrica, nutricional e fitossanitária, sendo influenciada apenas pela interação da cultura (genótipo e população de plantas) com as condições ambientais (radiação solar, temperatura e fotoperíodo e concentração de CO₂) (Sentelhas et al., 2016). Por se tratar de uma produtividade obtida em condições de campo sem nenhuma restrição, a PP torna-se uma busca teórica, pois deve-se considerar que obter uma produtividade sem qualquer restrição em condições de campo é algo praticamente impossível. Desse modo, para obtenção da PP é necessário o uso de ferramentas como os modelos de simulação que após a devida calibração represente o máximo potencial de produtividade da cultura, ou experimentos de campo sem qualquer restrição de acordo com as condições de planta e local de cultivo (Sentelhas et al., 2015).

O segundo nível é a produtividade atingível (PA), que é a produtividade que é influenciada diretamente pelos fatores determinantes que condicionam a PP e pelos fatores limitantes, de ordem hídrica, ou seja, déficit hídrico, e em alguns casos incluir limitação nutricional (Lobell et al., 2009). Isto é, a PP é penalizada pelo déficit hídrico dando origem a PA, que sofre influência da precipitação pluviométrica (quantidade e distribuição), do tipo de solo e de sua capacidade de água disponível, da evapotranspiração, da inclinação do solo de cultivo e da sensibilidade do genótipo ao déficit hídrico (Gilbert et al., 2011; Battisti et al., 2015), e assim como a PP a PA é uma produtividade teórica pois depende de condições ótimas de manejo.

O último nível é a produtividade real (PR), que é definida como a produtividade obtida a campo pelo produtor rural e é condicionada pelos fatores determinantes da PP, limitantes da PA e pelos fatores redutores influenciados pelo manejo agrícola adotado no cultivo, como pragas, doenças e plantas daninhas (Sentelhas et al., 2016). A Figura 2 ilustra de forma hipotética os três níveis de produtividade de uma cultura de acordo com Sentelhas et al., (2015).

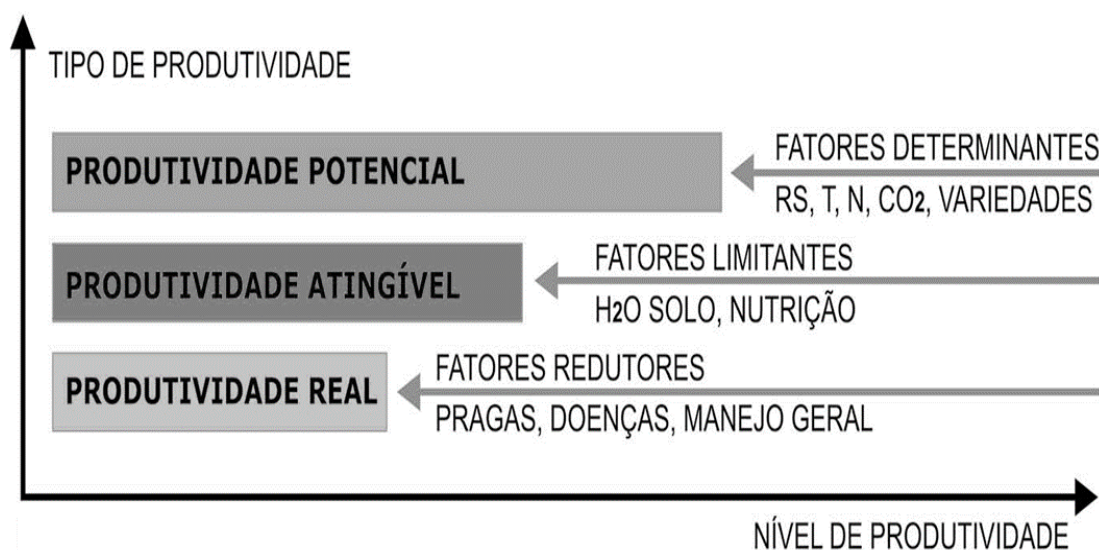


Figura 2. Tipos e níveis de produtividade de uma cultura agrícola de acordo com seus fatores determinantes, limitantes e redutores. RS = radiação solar; T = temperatura; N = fotoperíodo. Fonte: Adaptado de Sentelhas et al., (2015).

Contudo, diante dos conceitos expostos, a produtividade dos cultivos agrícolas obtida em condições de campo, em áreas comerciais, dependerá exclusivamente da interação dos fatores determinantes, limitantes e redutores. Entretanto, esses fatores associados as condições de clima e toda sua variabilidade podem ser gerenciados pelos agricultores a fim

de minimizar o *yield gap*. Nesse cenário, pode se incluir os manejos de época de semeadura, escolha do local de cultivo, preparo e correção do solo, controle fitossanitário e entre outras práticas agrícolas. Segundo Sentelhas et al., (2016), a diferença entre a PP e a PA define o *yield gap* ocasionado por déficit hídrico, enquanto a PA e PR determina o *yield gap* ocasionado por fatores de manejo agrícola da cultura cultivada. Sendo o déficit hídrico responsável por 73,8% das quebras de produtividades de soja nas regiões produtoras do Brasil e o manejo agrícola inadequado responsável por 26,2% da quebra de produtividade geral (Battisti & Sentelhas, 2015)

3.5 Solo: nível nutricional e resistência a penetração

O aumento do rendimento dos grãos de soja nos últimos anos se deve as melhorias nos ambientes de produção, associado com o potencial produtivo das cultivares, e se tratando de ambiente de produção, a intensa busca por melhores condições de solo, estruturação, equilíbrio químico, biológico e entre outros aspectos, vem se destacando e mostrando a extrema importância. De acordo com a Embrapa (2020), esse aumento na produtividade da cultura da soja, que pode atingir o dobro das produtividades atuais, exige adubações equilibradas de acordo com a necessidade da cultura.

A disponibilidade dos nutrientes para as culturas é afetada pelas condições de solo e clima, e o pH do solo de cultivo, é um dos principais fatores que afetam diretamente a disponibilidade nutricional. Como apresentado na Figura 3, a melhor variação de pH em H₂O para uma melhor disponibilização dos nutrientes e insolubilização do alumínio tóxico é entre 6,0 e 6,8 e 5,4 a 6,0 em CaCl₂ (Embrapa, 2020).

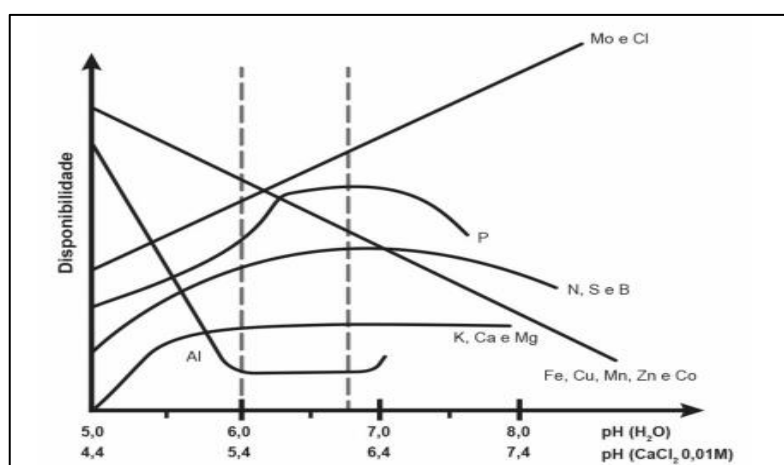


Figura 3. Relação entre o pH e a disponibilidade de nutrientes no solo.
Fonte: Adaptado de Malavolta (1980).

Nota-se que pH abaixo de 6,0 (H₂O) e 5,4 (CaCl₂) é diretamente influenciado pela presença de alumínio tóxico no solo o que influencia negativamente o desenvolvimento radicular das culturas, e em solos ácidos verifica-se a fixação de fósforo por ferro e alumínio formando compostos insolúveis não aproveitável para as plantas, e os teores de cálcio, magnésio e potássio são baixos. Em contrapartida, solos alcalinos com pH acima de 7,0 ocorre uma deficiência na disponibilidade de fósforo devido a formação de fosfato de cálcio que não é aproveitável pelas plantas, e ocorre o aumento do teor de cálcio, magnésio e potássio e uma deficiência de micronutrientes, exceto o molibdênio (Malavolta, 1980)

A cultura da soja tem maior exigência nutricional pelos macronutrientes nitrogênio, fósforo e potássio, porém isso não diminui a importância dos outros macronutrientes e os micronutrientes, os quais são exigidos para o pleno desenvolvimento e produção da cultura. A absorção de nutrientes pela cultura é determinada pela genética da cultivar, por fatores edáficos e ambientais que estão relacionados a produção de matéria seca total, e a concentração dos nutrientes na planta (Embrapa, 2020). Na Tabela 2 são apresentadas as quantidades médias de nutrientes acumuladas pela matéria seca e exportadas para os grãos de soja e a quantidade de nutrientes exportadas para os grãos de soja para a produção de uma tonelada de grãos.

Tabela 2. Quantidade de nutrientes acumulados na matéria seca da planta e exportados para os grãos, e quantidade exportadas para a produção de uma tonelada de grãos.

Partes da Planta	Nutrientes acumulados e exportados para os grãos										
	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	kg ha ⁻¹						g ha ⁻¹				
Grãos	187	16,6	61	10	9	9,5	10,6	39	223	135	142
Restos Culturais	83	6,8	104	66	28	4,9	177	29	1062	545	116
Total	270	23,4	165	76	37	14,4	283	68	1285	680	258
% Exportada	69	71	37	13	24	66	38	58	17	20	55
Partes da Planta	Nutrientes exportados para produção de 1 tonelada de grãos										
	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	kg t ⁻¹ de grãos						g t ⁻¹ de grãos				
Grãos	54	4,8	18	2,8	2,5	2,8	31	11,5	65	39	41
Restos Culturais	24	2,0	30	19,3	8,2	1,4	51	8,3	310	159	34
Total	78	6,8	48	22,1	10,7	4,2	82	19,8	375	198	75

Fonte: Adaptado de Embrapa (2020).

É importante ressaltar que a quantidade de nutriente absorvido pela planta não resulta necessariamente em alta produção de grãos, pois a absorção dos nutrientes geralmente é proporcional ao acúmulo de matéria seca total, mas o que define um aumento significativo na produtividade da cultura é a quantidade de nutrientes que são exportados para os grãos de soja (Embrapa, 2020). Pode-se observar na Tabela 2, que uma quantidade considerável de nutrientes fica nos restos culturais, que posteriormente serão decompostos e mineralizados, ficando disponíveis para a cultura sucessora. As maiores exportações de nutrientes para os grãos são de fósforo, nitrogênio, enxofre e cobre.

A avaliação do estado nutricional da cultura da soja através da análise foliar não apresenta um padrão de coleta de folhas, bem como um padrão de índices de referências em relação ao nível nutricional encontrado, pois coletas do trifólio com e sem pecíolo de acordo com Embrapa (2008), possuem referências de interpretação distintas. Os níveis de nutrientes em folhas com e sem pecíolo se diferem, principalmente, pela função que o nutriente exerce na planta. Por exemplo, o K é encontrado em maiores quantidades no pecíolo do que no limbo foliar, assim como o N, P, Cu, Fe, Mn e Zn são encontrados com maiores teores no limbo foliar (Kurihara, 2004), porém a faixa de suficiência dos nutrientes adotadas para a cultura são as mesmas independentemente do tipo de material vegetativo amostrado.

Algumas alternativas vêm sendo encontradas para a determinação do nível nutricional com base em banco de dados e produtividade final da cultura. Sako et al., (2020), determinaram nível inferior, superior e a média dos teores dos nutrientes para a cultura da soja para produtividades igual e acima de 5400 kg ha⁻¹, a partir de áreas amostradas pelo banco de dados do Comitê Estratégico Soja Brasil (Cesb), que são áreas com níveis tecnológicos de produtividade acima da média nacional. Na Tabela 3, são apresentados os níveis de referências para as análises foliares conforme as referências da Embrapa (2008) e Sako et al., (2020), que serão utilizados para avaliação da condição nutricional das áreas avaliadas.

Além da fertilidade, o uso intensivo do solo para o desenvolvimento das atividades dos cultivos agrícolas, trouxe como fator importante no manejo a compactação do solo, pois vem se tornando cada vez mais um fator limitante para altas produtividades. Na medida em que o solo vai sofrendo alterações e sendo submetido ao uso agrícola, as propriedades físicas vão sofrendo alterações desfavoráveis que influenciam negativamente no desenvolvimento vegetal (Spera et al., 2004). De acordo com Mantovani (1987), entende-se por compactação do solo a relação entre a porosidade e densidade de um solo associado

com a resistência a penetração (RP). Ainda segundo este autor, o volume de um solo é caracterizado pelo volume de partículas minerais e orgânicas e pelo volume de poros entre as partículas deste solo, e o volume dos poros é preenchido com água e ar. Desta forma, quando há a compactação do solo a proporção do volume total de poros não é apropriada para proporcionar um máximo desenvolvimento de uma cultura bem como um manejo eficiente em condições de campo (Mantovani, 1987).

O processo de compactação de um solo tem início quando há uma pressão sob este acarretando uma quebra dos agregados e aumento na densidade do solo, e quando ocorre essa quebra dos agregados, conseqüentemente, tem-se uma redução dos poros, influenciando negativamente as trocas de O₂ e CO₂, limitando o movimento de água e nutrientes, com diminuição das taxas de infiltração de água (Mantovani, 1987). Esses fatores implicam negativamente no desenvolvimento radicular das culturas. É importante ressaltar que a estrutura física do solo sofre alterações de acordo com práticas de manejo do solo e das culturas, podendo ser temporárias ou permanentes, e diante disso, observar os manejos e a evolução da estrutura do solo é um fator importante para um desenvolvimento sustentável dos sistemas de produção agrícola (Lima, 2004).

Tabela 3. Níveis nutricionais sugeridos como referência pela Embrapa (2008) e Sako et al., (2020) para análise de folhas para a cultura da soja.

Elemento	Embrapa (2008)			Sako et al., (2020)		
	Baixo	Suficiente	Alto	Inferior	Superior	Média
.....g kg ⁻¹						
N	<36,8	36,8 a 46,9	>46,9	47,4	52,3	49,9
P	<2,3	2,3 a 3,4	>3,4	3,1	3,6	3,3
K	<17,3	17,3 a 25,7	>25,7	18,7	24,8	21,7
Ca	<6,8	6,8 a 11,8	>11,8	5	8,1	6,5
Mg	<2,9	2,9 a 4,7	>4,7	2,5	3	2,7
S	<2,1	2 a 3	>3	1,4	1,9	1,7
.....mg kg ⁻¹						
B	<33	33 a 50	>50	35,4	48,9	42,2
Cu	<6	6 a 11	>11	9,2	21,2	15,2
Fe	<59	59 a 120	>120	111,3	221,9	166,6
Mn	<28	28 a 75	>75	33,1	55,6	44,3
Zn	<31	31 a 58	>58	42,9	59,4	51,1

A compactação do solo, em muitas das vezes, é influenciada pelo tráfego de máquinas agrícolas, principalmente em sistemas de plantio direto, provocando a compactação superficial do solo (Silva et al., 2000) e reduzindo consideravelmente a produtividade final das culturas (Beutler & Centurion, 2003). Em estudos feitos por Cintra & Mielniczuk (1983), foi observado que há uma redução de 50 % no comprimento radicular de várias culturas quando a RP do solo é superior a 1,10 MPa, medida realizada em solos Latossolo Vermelho Distroférico; e Mielniczuk et al., (1985) verificaram em estudos em vasos, com Latossolo Vermelho Distroférico, que quando a RP do solo foi de 2,35 MPa, houve uma redução de 86 % no comprimento radicular da cultura da soja. A RP é a medida mais utilizada para caracterização da compactação do solo, em que o limite crítico de 2,0 MPa tem sido adotado para o impedimento do desenvolvimento radicular das culturas (Tormena et al., 1998).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Descrição de local, clima e manejo agrícola das áreas

O estudo foi realizado em 13 áreas de cultivo de soja em lavouras comerciais sob sistema de plantio direto, de cinco produtores rurais, localizadas nos municípios de Avelinópolis (Latitude: -16.44° ; Longitude: -49.72° ; Altitude: 500 m), Heitoraí (Latitude: -15.69° ; Longitude: -49.75° ; Altitude: 500 m), Trindade (Latitude: -16.61° ; Longitude: -49.52° ; Altitude: 500 m) e São Luiz do Norte (Latitude: -14.89° ; Longitude: -49.3° ; Altitude: 500 m, área 9, 10, 11 e 12; Latitude: -14.7° ; Longitude: -49.23° ; Altitude: 500 m, área 13), no estado de Goiás na safra 2019/2020 (Figura 4).

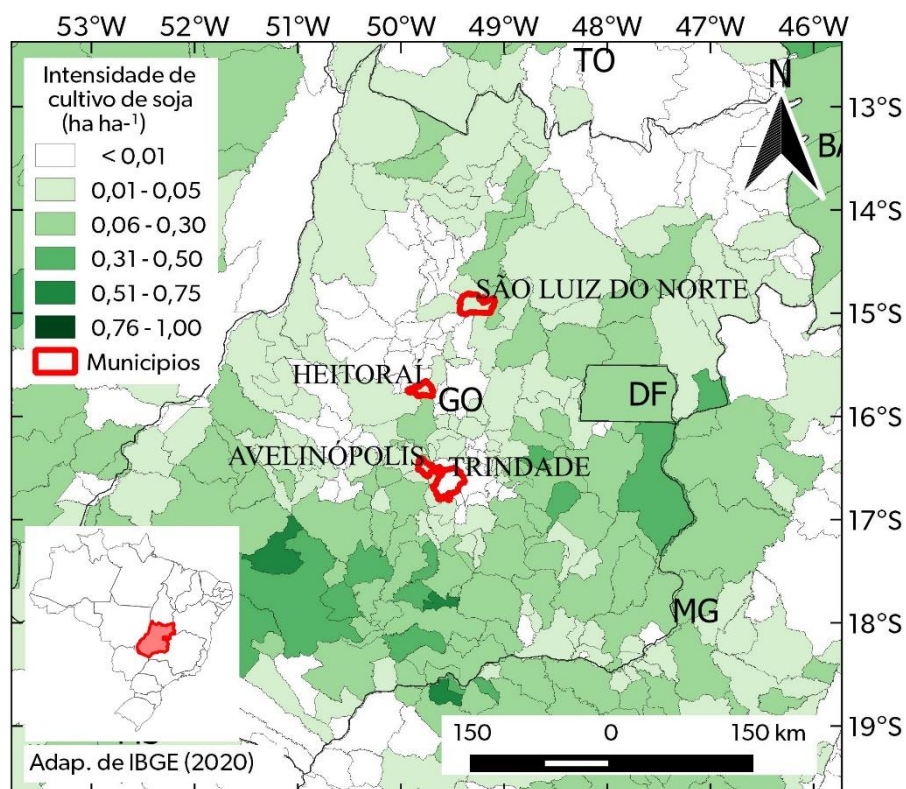


Figura 4. Localização do estado de Goiás no Brasil, com destaque para a localização dos municípios das áreas de lavoura comercial de soja utilizadas no estudo e a intensidade de cultivo de soja a nível municipal.

Segundo a classificação de Köppen as regiões estudadas se enquadram na classificação Aw, ou seja, clima tropical com estação seca de inverno (Alvares et al., 2013). Durante o ciclo da cultura foram observadas condições climáticas de temperatura do ar e precipitação pluvial distintas em função das datas de semeadura entre as áreas (Tabela 4) e em função do grupo de maturação, hábito de crescimento e duração do ciclo das cultivares, em que de acordo com Taglapietra et al., (2018), cultivares com grupo de maturação (GM) $\leq 6,9$ são classificadas como médio e $GM > 7,0$ como longas. Os dados de cultivares, data de semeadura e colheita das áreas estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4. Cultivar, grupo de maturação (GM), data de semeadura e colheita, dias de duração do ciclo, hábito de crescimento (HB) e local de cultivo das cultivares utilizadas no experimento.

Área	Cultivar	GM	Data		Dias Ciclo	HB	Local de Cultivo	
			Semeio	Colheita				
1	ADV 4672	7,2	15/11/2019	28/02/2020	105	Indeterminado	Avelinópolis/GO	
2	ADV 4672		16/11/2019	29/02/2020	105		Avelinópolis/GO	
3	ADV 4672		18/11/2019	02/03/2020	105		Avelinópolis/GO	
4	NIDERA 6906	6,9	28/11/2019	09/03/2020	100		Heitorai/GO	
5	NIDERA 7709	7,7	26/11/2019	24/03/2020	105		Heitorai/GO	
6	NIDERA 7709		26/11/2019	18/03/2020	105		Heitorai/GO	
7	ADV 4341	7,4	13/11/2019	02/03/2020	110		Trindade/GO	
8	ADV 4341		18/11/2019	07/03/2020	110		Trindade/GO	
9	NIDERA 7901	7,9	02/12/2019	31/03/2020	120		São Luiz do Norte/GO	
10	NIDERA 7901		15/12/2019	13/04/2020	120		São Luiz do Norte/GO	
11	NIDERA 7300	7,3	26/11/2019	15/03/2020	110		São Luiz do Norte/GO	
12	NIDERA 8338	8,3	12/12/2019	15/04/2020	125		Determinado	São Luiz do Norte/GO
13	NIDERA 7667	7,6	07/12/2019	31/03/2020	115		Indeterminado	São Luiz do Norte/GO

A adubação de base para a semeadura e as adubações que foram feitas a lanço das áreas, foi realizada de acordo com os resultados obtidos das análises de solo que estão descritos na Tabela 5, sendo que para a determinação do nutriente fósforo foi utilizado o método do extrator Melich. Nas áreas 1 e 2, localizadas no município de Avelinópolis, utilizou-se a adubação com 330 kg ha⁻¹ da formulação NPK 06-30-15, e na área 3, no mesmo município, utilizou-se 250 kg ha⁻¹ da formulação NPK 06-30-15. Na área 4, no município de Heitorai, a adubação foi feita com 350 kg ha⁻¹ da formulação NPK 04-30-10, e nas áreas 5 e 6, no mesmo município, utilizou-se 300 kg ha⁻¹ da formulação NPK 04-30-10.

Tabela 5. Resultados das análises de solo realizadas nas áreas de estudo três meses antes da data de semeadura da soja, utilizada como referência para determinação da adubação pelos produtores rurais.

Áreas	pH	Ca	Mg	K	P	S	Cu	Fe	Mn	Zn	B	Ca+Mg	Al	H+Al	CTC	S.B
	(CaCl ₂)	cmol _c /dm ³			mg/dm ³							cmol _c /dm ³				
1	5,2	2,8	1,2	0,3	7,7	5,7	5,1	36,0	20,6	5,8	0,2	4,0	0,0	1,6	5,9	4,3
2	4,6	2,4	1,2	0,5	8,2	7,8	2,1	65,0	12,3	4,8	0,4	3,6	0,2	3,2	7,3	4,1
3	5,3	2,6	1,4	0,9	13,5	6,2	3,1	33,0	22,0	5,1	0,1	4,0	0,0	1,7	6,6	4,9
4	5,5	2,8	1,6	0,2	16,7	2,0	1,1	266,7	39,5	14,6	0,1	4,4	0,0	1,6	6,2	4,6
5	5,4	3,2	1,2	0,2	9,1	2,9	1,0	230,4	68,5	15,8	0,0	4,4	0,0	1,6	6,2	4,6
6	5,3	2,4	1,6	0,3	25,7	3,9	1,3	233,4	52,9	20,3	0,1	4,0	0,0	1,5	5,8	4,3
7	4,6	2,4	0,8	0,2	3,1	2,5	3,9	48,9	20,8	4,2	0,3	3,2	0,0	2,5	5,9	3,4
8	5,1	2,8	1,4	0,2	4,0	3,1	6,1	41,0	26,5	5,1	0,3	4,2	0,0	2,6	7,0	4,4
9	5,0	2,0	1,5	0,3	15,0	7,0	5,0	70,0	25,0	-	0,4	3,5	0,1	-	7,7	3,8
10	4,8	2,2	1,6	0,7	7,5	3,9	2,1	61,3	13,6	2,9	0,2	3,8	0,0	2,8	7,3	4,5
11	5,3	2,2	1,4	0,2	9,4	3,9	1,1	183,5	17,9	1,6	0,1	3,6	0,0	2,6	6,4	3,8
12	6,5	3,4	2,6	0,1	4,3	3,4	2,8	58,6	99,2	2,8	0,2	6,0	0,0	1,8	7,9	6,1
13	5,4	2,8	2,2	0,2	3,4	10,8	1,4	40,6	12,5	1,5	0,3	5,0	0,0	4,2	9,4	5,2

Áreas	Sat.	Sat. Al			Ca:Mg	Ca:K	Mg:K				H+Al	Argila	Silte	Areia
	B(V)	(m)	C.O.T	M.O				Ca	Mg	K				
	%		g/kg					CTC/%				g/kg		
1	72,7	0,0	13,8	23,8	2,3	11,0	4,7	47,8	20,5	4,4	27,3	160,0	60,0	780,0
2	56,0	4,7	15,6	26,9	2,0	5,1	2,6	33,0	16,5	6,5	44,0	200,0	60,0	740,0
3	74,3	0,0	19,2	33,1	1,9	2,8	1,5	39,3	21,2	13,9	25,7	160,0	80,0	760,0
4	74,3	0,0	12,2	21,0	1,8	12,2	7,0	45,0	25,7	3,7	25,7	380,0	160,0	460,0
5	74,3	0,0	11,8	20,3	2,7	14,6	5,5	51,5	19,3	3,5	25,7	440,0	180,0	380,0
6	74,0	0,0	11,3	19,4	1,5	8,7	5,8	41,6	27,7	4,8	26,0	420,0	140,0	440,0
7	57,6	0,0	12,3	21,3	3,0	12,1	4,0	40,7	13,6	3,4	42,4	320,0	120,0	560,0
8	62,7	0,0	11,0	18,9	2,0	16,6	8,3	40,2	20,1	2,4	37,3	400,0	160,0	440,0
9	45,0	-	-	35,0	1,3	6,6	5,0	26,0	19,5	3,9	-	475,0	175,0	395,0
10	61,5	0,0	7,5	12,9	1,4	3,3	2,4	30,3	22,0	9,1	38,6	240,0	694,0	66,0
11	59,1	0,0	11,4	19,7	1,6	14,4	9,2	34,6	22,0	2,4	40,9	320,0	60,0	620,0
12	77,3	0,0	10,4	18,0	1,3	23,8	18,2	42,8	32,7	1,8	22,7	460,0	120,0	420,0
13	55,3	0,0	7,0	12,1	1,3	14,5	11,4	29,8	23,4	2,1	44,7	280,0	40,0	680,0

Já nas áreas 7 e 8, localizadas no município de Trindade, a adubação de base foi realizada com 200 kg ha⁻¹ da formulação NPK 11-52-00 com 1% de Ca e 6% de S, e ainda 140 kg de KCl. Na área 9, localizada no município de São Luiz do Norte, a adubação de base

realizada foi de 380 kg ha⁻¹ da formulação NPK 11-52-00 com 1% de Ca e 6% de S; já nas áreas 10, 11, 12 e 13, localizadas no mesmo município, a adubação de base realizada foi de 320 kg ha⁻¹ da formulação NPK 05-32-00 com 6% de S e 0.3% B, incluindo 150 kg KCl. Na Tabela 6 estão descritos a quantidade de cada nutriente fornecido na adubação de base.

Tabela 6. Quantidade de nutrientes aplicados durante o cultivo da soja na forma incorporada e a lanço para as diferentes áreas.

Áreas	N	P	K	Ca	S	B
kg ha ⁻¹						
1	20	99	50	-	-	-
2	20	99	50	-	-	-
3	15	75	38	-	-	-
4	14	105	35	-	-	-
5	12	90	30	-	-	-
6	12	90	30	-	-	-
7	22	104	81	2	12	-
8	22	104	81	2	12	-
9	42	198	-	4	23	-
10	16	102	87	-	19	1
11	16	102	87	-	19	1
12	16	102	87	-	19	1
13	16	102	87	-	19	1

4.2 Análise de solo e folhas

A coleta de solo para análise foi realizada aproximadamente três meses antes do plantio da cultura da soja. Na área foram coletados 20 pontos, em “zigue-zague”, na profundidade de 0-20 cm, usando uma furadeira adaptada para a coleta como recomendado pela Embrapa (2012). Diante dos resultados obtidos nas análises, a recomendação da adubação de plantio foi realizada pelo engenheiro agrônomo responsável pelas áreas de cultivo de acordo com a recomendação de fertilidade do solo e nutrição da soja da Embrapa (2007).

As folhas foram coletadas para análise quando as plantas estavam no início do florescimento (R1). Foram amostradas a terceira folha (3º trifólio) com pecíolo a partir do ápice da haste principal de 30 plantas coletadas aleatoriamente nas áreas estudadas. As folhas foram acondicionadas em sacos de papel e posteriormente colocadas em estufa para secagem há uma temperatura de 65 °C até peso constante (Embrapa, 2000). Após a secagem, as folhas e o pecíolo foram moídos em um moinho para obtenção de uma amostra homogênea para a análise, e em seguida as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e enviadas para o laboratório de análise de solos e foliar da Universidade Federal de Goiás, para determinação do teor de nutrientes.

4.3 Dados Climáticos

Para cada região de estudo foram obtidos dados climáticos na escala diária do período de 01/09/2019 à 30/04/2020, incluindo temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, radiação solar e chuva. O banco de dados climáticos foi montado a partir das bases climáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet, 2020), Sistema de Monitoramento Agrometeorológico (Agritempo, 2020) e dados localizados de chuva obtido na Agência Nacional de Águas (ANA, 2020), considerando a maior proximidade com a área de estudo.

4.4 Análise de Compactação do Solo

A análise de resistência a penetração no solo foi realizada utilizando medidor eletrônico denominado penetrômetro (PenetroLOG®). A análise foi conduzida quando o solo se encontrava em sua capacidade de campo, a qual foi considerada após um elevado volume de chuva capaz de repor a água no solo, realizada no final do período chuvoso, sendo no dia 03/03/2020 para as áreas 1, 2, 3, 7 e 8 e no dia 11/04/2020 para as áreas 4, 5, 6, 9, 10, 11, 12 e 13. Para cada área foram coletados 10 pontos aleatórios.

A profundidade medida foi de 0 a 60 cm. Após a medição, os dados dos pontos coletados foram exportados através de um programa de computador fornecido pela fabricante do aparelho para análise dos dados coletados. Os dados foram analisados considerando os limites de resistência a penetração (MPa) com base em Arshad et al., (1996), classificada em: muito baixa: $0,01 < RP < 0,1$ MPa; baixa: $0,1 < RP < 1,0$ MPa; moderada:

1,0 < RP < 2,0 MPa; alta: 2,0 < RP < 4,0 MPa; muito alta: 4,0 < RP < 8,0 MPa; e extremamente alta: RP > 8,0 MPa, aplicando ainda um limite crítico de 2,2 MPa (Beutler et al., 2006).

4.5 Modelo de Simulação de Produtividade

Para a estimativa da produtividade potencial e atingível da cultura da soja e a determinação da eficiência agrícola e climática das áreas cultivadas foi utilizado o Modelo da Zona Agroecológica – FAO. Para obtenção das simulações os dados de entrada foram os dados climáticos, data de semeadura e colheita, duração do ciclo do cultivar plantada e a produtividade real obtida a campo, a partir da informação obtida pelo produtor. Com esses dados, obtivemos a produtividade potencial da cultura (em condições ótimas de cultivo sem déficit hídrico) e produtividade atingível (considerando o déficit hídrico durante o desenvolvimento da cultura).

A eficiência agrícola (EA, %) foi obtida através da razão entre a produtividade real (PR, kg ha⁻¹) e a produtividade atingível (PA, kg ha⁻¹), em que a PR foi obtida através de entrevista com os produtores rurais das áreas estudadas para obtenção dos dados de colheita. Para a obtenção da estimativa da produtividade atingível (PA), considerou-se a penalização da produtividade potencial (PP, kg ha⁻¹) da cultura pelo déficit hídrico em cada fase de desenvolvimento da cultura (Eq. [1]):

$$PA = \left[1 - Ky * \left(1 - \frac{ETR}{ETc} \right) \right] * PP \quad [1]$$

em que: Ky é o coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico, sendo 0,05 para a fase de semeadura a estabelecimento (V2) 0,15 para estabelecimento a R1, 0,4 para R1 a R5, 0,75 para R5 a R6, e 0,1 para R7 a R8 (Battisti, 2016), em que: V2 é a primeira folha trifoliolada completamente desenvolvida, R1 é o início do florescimento, R5 é o início do enchimento de grão, R6 é o grão cheio ou completo, R7 é o início da maturação e R8 é a maturação completa. A evapotranspiração potencial da cultura (ETc) foi obtida pelo produto da evapotranspiração de referência (ETo), determinada pelo método Penman-Monteith (Allen et al., 1998), e o coeficiente de cultura (Kc), para cada fase da cultura. Foram de 0,56 entre a semeadura e estabelecimento (V2), aumentando de 0,56 para 1,50 entre estabelecimento e início do florescimento (R1), de 1,5 entre R1 e final do enchimento de grão (R6), reduzindo

de 1,50 para 0,90 na maturação (R7 – R8). Já a evapotranspiração real (ETR) foi calculada pelo balanço hídrico sequencial de cultura (Thorntwaite & Mather, 1955), adotando uma capacidade de água disponível no solo (CAD) de acordo com a textura do solo das áreas estudadas. A CAD (Tabela 7) foi determinada pela equação de pedrotransferência (Lopes-Assad et al., 2001) considerando a profundidade máxima de raiz de 80 cm. Para a área 10 foi considerada uma profundidade máxima de 60 cm dado a limitação física do solo pela presença de horizonte R.

Tabela 7. CAD (capacidade de água disponível) das áreas estudadas de acordo com a textura do solo.

Área	CAD _{total} (mm)	CAD (mm) por cm	Área	CAD _{total} (mm)	CAD (mm) por cm
1	63	0,78	8	93	1,16
2	68	0,85	9	117	1,46
3	66	0,82	10	124	2,07
4	105	1,40	11	117	1,46
5	112	1,31	12	117	1,46
6	105	1,32	13	117	1,46
7	106	1,33			

A PP foi estimada pelo método da Zona Agroecológica (Doorenbos & Kassam, 1994), conforme a seguinte sequência de cálculos (Eq. [2]):

$$PP = \frac{PPBp * C_{IAF} * C_R * C_c * ND}{(1 - 0,01 * U\%)} \quad [2]$$

em que: PPBp é a produtividade bruta de matéria seca para uma cultura padrão (kg ha⁻¹ dia⁻¹), C_R é a correção da taxa de respiração, igual a 0,5 quando a temperatura média do ar (Ta °C) for igual ou superior a 20 °C e 0,6 quando Ta < 20 °C (Doorenbos & Kassam, 1979), C_c é a correção para a parte colhida, obtida pela relação da matéria seca do grão pela matéria seca total da planta, utilizando o valor de 0,53 (Battisti et al., 2018), U% com valor de 13% representa a umidade residual no grão para a cultura da soja (Doorenbos & Kassam, 1994); ND é o número de dias do ciclo da cultura, que variou de acordo com cada área estudada através da data de semeadura e colheita (Tabela 3), e C_{IAF} a correção do índice de área foliar

obtida ao longo do ciclo, conforme metodologia e valores de índice de área foliar obtidos em Battisti et al., (2018), seguindo a Eq. [3]:

$$C_{IAFi} = \frac{IAFi}{5} \quad [3]$$

em que: IAFi é o índice de área foliar do dia (i) ao longo do ciclo. Os valores de C_{IAF} foram limitados ao valor máximo de 1.

Para obtenção da PPBp foi realizado a soma das produtividades potenciais padrão para período de céu limpo (PPBc) e de céu nublado (PPBn), obtidas por (Eq. [4] e [5]):

$$PPBc = \left[(107,2 + 8,604 * Qo) * cTc * \frac{n}{N} \right] \quad [4]$$

$$PPBn = \left[(31,7 + 5,234 * Qo) * cTn * \left(1 - \frac{n}{N} \right) \right] \quad [5]$$

em que: Qo é a irradiação solar global extraterrestre ($MJ m^2 .dia^{-1}$), cTc e cTn são fatores de correção para a temperatura do ar em dias de céu claro e nublado, n é a insolação diária ($horas dia^{-1}$), obtida pela equação inversa de Ångström–Prescott a partir da radiação solar incidente e N é o fotoperíodo ($horas dia^{-1}$). As equações citadas estão disponíveis em (Pereira et al., 2002).

As simulações foram realizadas de acordo com as datas de semeaduras adotadas no manejo das áreas estudadas, e a partir dos valores de PA e dos valores de PR, obtidos a campo, determinaram-se as EA (Eq. [6]), e de PP e PA o valor de eficiência climática (EC) (Eq. [7]):

$$EA = \left(\frac{PR}{PA} \right) * 100 \quad [6]$$

$$EC = \left(\frac{PA}{PP} \right) * 100 \quad [7]$$

Foram determinados o *yield gap* por déficit hídrico (Yw) através da diferença entre PP e PA e o *yield gap* por manejo agrícola (Ym) através da diferença entre PA e PR.

4.6 Relação entre *yield gap* e nível nutricional foliar

A partir dos valores dos teores nutricionais foliar e de *yield gap* por manejo (PA – PR), avaliou-se a relação entre esses dois fatores utilizando um modelo linear (Eq. [7]), desenvolvido no programa EXCEL®. Nesse modelo a variável eficiência agrícola foi considerada como o resultado, sendo explicada pelo nível nutricional foliar de cada um dos nutrientes (Eq. [8]):

$$\text{Eficiência agrícola} = a + b * x_n \quad [8]$$

em que: a e b são coeficientes ajustados e x os teores foliares dos n nutrientes, como por exemplo, nitrogênio, potássio, cobre, boro e enxofre.

4.7 Análises estatísticas

Os resultados obtidos foram analisados através de estatística descritiva, organizados em tabelas com descrição das PP, PA e PR, obtidas através do modelo de simulação e pelo produtor nas áreas cultivadas, além da descrição do *yield gap* ocasionado por déficit hídrico e por manejo, dos resultados nutricionais, incluindo desvio padrão e coeficiente de variação e a variação nutricional de uma área para a outra. A análise de EA foi correlacionada com os teores nutricionais individualmente de cada nutriente, identificando quais nutrientes influenciam em uma maior EA.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise de *yield gap* por clima e manejo

A PP é influenciada pela interação entre as condições climáticas (radiação solar, temperatura e fotoperíodo) e cultura (genótipo, ciclo e população de plantas) sem limitação hídrica e/ou nutricional e fitossanitária (Sentelhas et al., 2015). Ao avaliar os resultados obtidos pelo modelo de simulação de produtividade, foi possível notar que a maior produtividade potencial (PP) estimada, de 8740 kg ha⁻¹, ocorreu para a área 1, localizada no município de Avelinópolis, GO, seguida das áreas 2 e 3 localizadas no mesmo município, com PP de 8688 kg ha⁻¹ e 8699 kg ha⁻¹ (Tabela 8), de acordo com as condições agrometeorológicas da região. Já a menor PP foi obtida na área 12 localizada no município de São Luiz do Norte, GO, com uma produtividade de 7703 kg ha⁻¹.

Tabela 8. Produtividade potencial (PP), atingível (PA), real (PR) e *yield gap* por déficit hídrico (Yw) e manejo (Ym) para a cultura da soja nas regiões estudadas.

Área	Local	PP	PA	PR	Yw	Ym
.....kg ha ⁻¹						
1	Avelinópolis, GO	8740	5137	3420	3603	1717
2	Avelinópolis, GO	8688	5294	3420	3394	1874
3	Avelinópolis, GO	8699	5365	3480	3334	1885
4	Heitoraí, GO	8165	5868	4080	2298	1788
5	Heitoraí, GO	8499	5980	3240	2520	2740
6	Heitoraí, GO	8299	5947	3840	2351	2107
7	Trindade, GO	8670	6115	3540	2555	2575
8	Trindade, GO	8523	6147	3720	2376	2427
9	São Luiz do Norte, GO	7868	4631	4200	3236	431
10	São Luiz do Norte, GO	7864	4757	3540	3107	1217
11	São Luiz do Norte, GO	8303	4775	3492	3528	1283
12	São Luiz do Norte, GO	7703	4565	3316	3137	1249
13	São Luiz do Norte, GO	7971	4741	3467	3230	1273
	Média	8307	5332	3597	2975	1736

Observando as condições da área com menor PP, nota-se que foi a área que recebeu a maior quantidade de radiação solar durante o ciclo da cultura, 2425 MJ m⁻² ciclo⁻¹ de radiação solar (Tabela 9), ao longo dos 125 dias de ciclo. A temperatura não se diferenciou das demais áreas, porém a semeadura dessa cultivar foi realizada no dia 12/12/2019. Para a região de estudo, o máximo de horas de luz ao longo do ano ocorre entre os dias 20 e 21 de dezembro e, após esse período a quantidade de radiação solar decresce. Nessa data de semeadura, no período de máxima radiação solar, a planta não se encontrava ainda no seu período de máximo índice de área foliar para uma máxima absorção e aproveitamento da radiação solar. Uma vez que para a cultura da soja atingir altas produtividades, a planta precisa ter alta eficiência na interceptação de radiação solar para ter a conversão da radiação interceptada em biomassa, e conseqüentemente, uma alta partição da biomassa para os grãos (Embrapa, 2018).

Tabela 9. Dados climáticos determinantes das produtividades observados durante o ciclo da cultura da soja.

Área	Tmax	Tmed	Tmin	Precipitação	Déficit Hídrico		Radiação Solar
					R1 - R6	S - R8	
					mm		
	°C		mm ciclo ⁻¹			MJ m ⁻² ciclo ⁻¹	
1	29	25	20	636	169	205	2109
2	29	25	20	637	158	196	2095
3	29	25	20	646	152	195	2084
4	29	24	20	676	108	185	2318
5	29	24	20	618	101	159	1997
6	30	25	20	652	103	177	2225
7	30	25	20	767	125	153	2197
8	30	25	20	725	111	154	2176
9	31	25	21	560	119	226	2328
10	31	25	21	551	120	198	2329
11	31	25	22	476	126	247	2153
12	31	25	21	551	130	214	2425
13	31	25	21	543	111	204	2220

Segundo Zanon et al., (2015), o maior índice de área foliar para a soja com crescimento determinado e indeterminado ocorre nos estágios reprodutivos R1 (início da formação de vagens) e R5.1 (início de formação dos grãos), respectivamente. Em estudos feitos pelo mesmo autor e outros colaboradores, cultivares modernas com o grupo de maturação maior que 5,5 apresentam redução no índice de área foliar máximo à medida que a data de semeadura é atrasada, e isso independe do hábito de crescimento e do grupo de maturação. Analisando a data de semeadura da área 12, no período de maior radiação solar fornecida ao sistema produtivo, a cultivar ainda se encontrava no estágio vegetativo, com baixo índice de área foliar, influenciando em uma baixa interceptação de radiação solar pela planta, o que reduz a fotossíntese total ao longo do período reprodutivo, reduzindo produtividade.

Outro fator relevante analisando as áreas em que se obteve PP abaixo de 8000 kg ha⁻¹, sendo todas localizadas no município de São Luiz do Norte, GO, é de que há uma semelhança na data de semeadura, a qual ocorreu no mês de dezembro. Mas a área 11, localizada nesse mesmo município, que foi semeada no dia 26/11/2019, obteve uma PP de 8303 kg ha⁻¹, próxima a média da PP das demais áreas, de 8307 kg ha⁻¹. Além disso, é uma cultivar com duração do ciclo de 110 dias, e apresentou a maior produtividade potencial devido há um maior índice de área foliar, uma maior interceptação de radiação solar e assim uma alta partição de biomassa em grãos. A semelhança das baixas PPs se dá pela data de semeadura, todas realizadas no mês de dezembro, e pelo ciclo da cultivar, todas classificadas como longo (Tabela 4).

A produtividade atingível (PA) é obtida através da depreciação da produtividade potencial pelo déficit hídrico que ocorre ao longo do ciclo da cultura. A área 1, localizada no município de Avelinópolis, GO, sofreu a maior penalização pelo déficit hídrico, com um *yield gap* de 3603 kg ha⁻¹ (Tabela 8), equivalente a 41% de quebra de produtividade relativa à água. Dogan et al., (2007) verificaram em estudos com soja, que quando há a ocorrência de déficit hídrico nas fases reprodutivas R3 (início da formação das vagens), R5 (início do enchimento dos grãos) e R6 (fase de grãos cheios), as perdas de produtividade na cultura são mais significativas do que quando há a ocorrência de déficit hídrico em outras fases do ciclo de desenvolvimento da cultura. O déficit hídrico na área 1 totalizou 205 mm (Tabela 9) durante as fases de semeadura até R8, e durante as fases reprodutivas de R1-R6, foi de 169 mm.

A área de maior perda por déficit hídrico (área 1, Tabela 8) apresenta textura predominantemente arenosa com a capacidade máxima de água disponível de 63 mm, menor valor verificado entre as áreas, o que justifica a maior penalização e perda de produtividade ocasionada pelo déficit hídrico. Esse mesmo padrão se manteve para as áreas 2 e 3, localizadas no mesmo município, com textura do solo semelhante a área 1 com capacidade de água disponível de 68 mm e 66 mm, respectivamente, com um *yield gap* por déficit hídrico acima de 3000 kg ha⁻¹.

Na área 11, o *yield gap* relativo à água resultou em uma redução de 42% da PP, com um *yield gap* de 3528 kg ha⁻¹, considerando que foi a região com menor precipitação hídrica, de 476 mm durante o ciclo para a cultivar de 110 dias (Tabela 9). O déficit hídrico dessa área foi de 247 mm, em que nas fases de R1-R6 totalizou 126 mm. Segundo Alvares et al., (2013), a região do município de São Luiz do Norte, GO, em que está situada a área, tem uma precipitação pluviométrica que varia entre 1600 a 1900 mm ano⁻¹. Porém, a média de precipitação das cinco áreas localizadas neste município foi de 536 mm, do período de 25/11/2019 a 15/04/2020.

Ao observar a data de semeadura destas áreas, a área 11 foi a única em que a semeadura foi realizada no mês de novembro, e isso resultou em um déficit hídrico de 90 mm na fase de estabelecimento da cultura até R1 (Tabela 9). Já as áreas 4, 6 e 8, localizadas respectivamente nos municípios de Heitorai, GO (4 e 6) e Trindade, GO (8), obtiveram as menores quebras de produtividades relativas à água, respectivamente, com um total equivalente a 28%, com *yield gap* de 2298 kg ha⁻¹, 2351 kg ha⁻¹ e 2376 kg ha⁻¹, e um déficit hídrico da semeadura até R8 igual a 185 mm, 177 mm e 154 mm (Tabela 9).

As maiores produtividades reais (PR), aquelas obtidas a campo considerando todo o manejo agrícola adotado durante o cultivo, foram observadas na área 9 (4200 kg ha⁻¹), área 4 (4080 kg ha⁻¹), área 6 (3840 kg ha⁻¹) e área 8 (3720 kg ha⁻¹) (Tabela 8). A área 9 faz parte das áreas do município de São Luiz do Norte, GO, que obtiveram as menores precipitações durante o ciclo das cultivares de soja, mas com a maior precipitação, 560 mm, se comparada as quatro outras áreas localizadas no mesmo município.

Esse resultado indica que o manejo agrícola adotado nesta área, desde a data de semeadura, tratos culturais, até a colheita, foram fatores determinantes para minimizar a quebra de produtividade relativa a manejo, já que ela foi equivalente à 9% da PA. Isso indica que a área 9 possui uma eficiência agrícola (EA) de 91% (Figura 5), sendo está a relação entre PR e PA, demonstrando quanto o manejo agrícola é eficiente para amenizar as perdas

decorrentes das condições climáticas, principalmente déficit hídrico. Esses valores mostram que o manejo tem papel importante na produtividade da soja, levando uma redução de diferença entre os locais e amenizando os efeitos do clima, ou seja, o manejo atua como um controlador da produtividade (Battisti et al., 2018). Já as áreas 10, 11, 12 e 13, que obtiveram menores precipitações pluviométricas durante o ciclo da cultura, obtiveram uma quebra relativa à manejo de 26% para a área 10, e 27% para as demais áreas, respectivamente, com uma EA de 74% e 73% (Figura 5). Esses valores indicam que o manejo agrícola adotado consegue minimizar a quebra de produtividade da região devido ao déficit hídrico.

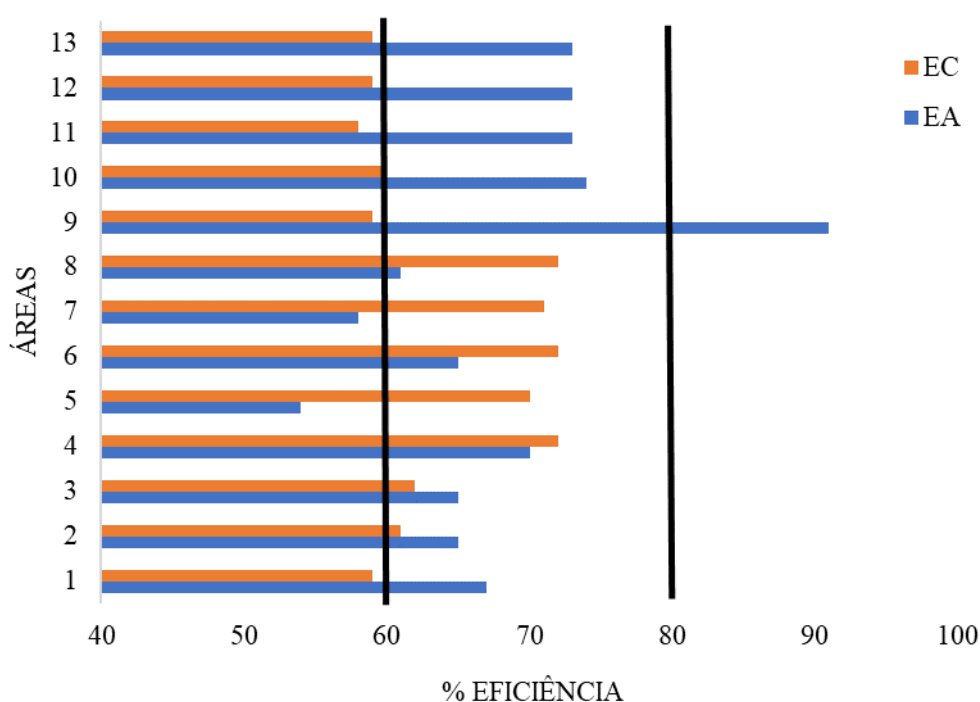


Figura 5. Eficiência agrícola (EA) e climática (EC) para as áreas de estudo. As linhas pretas traçadas na figura indicam a EA sugerida por Sentelhas et al., (2015) e Battisti et al., (2018).

Alguns autores relatam que, para maximizar o uso dos recursos do ambiente com um bom retorno econômico, para a cultura da soja, o valor ideal de EA deve atingir pelo menos 80% (Sentelhas et al., 2015). Para Battisti et al., (2018), a EA abaixo de 60 % é considerada baixa e entre 60 % e 80 % é considerada intermediária, e em regiões em que a EC é baixa < 60 %, sendo as condições climáticas fator limitante, o rendimento da soja será afetado negativamente mesmo sob todas as condições de manejo agrícola, principalmente em cultivos em solo raso. Diante disso, nota-se na Figura 5, que as maiores EA foram na região de São Luiz do Norte, GO, em que a precipitação foi menor que as outras áreas, mas

que o manejo agrícola adotado se torna fator determinante para a produção de soja da região. Nestas áreas com maior EA, houve melhoria do manejo agrícola adotado nas lavouras, como com a correção da fertilidade do solo, uso de cultivares mais tolerantes as condições climáticas da região, uso do plantio direto, qualidade de plantio e colheita, entre outras práticas benéficas ao aumento da EA (Sentelhas et al., 2015; Battisti et al., 2018).

Em contrapartida, a menor EA, de 54%, foi obtida na área 5 localizada no município de Heitorai, GO, com *yield gap* relativo a manejo de 46% (Figura 5). Esses resultados indicam que a EA foi baixa em relação as outras áreas, e é necessário que haja uma melhoria nas práticas agrícolas adotadas, com adoção de tecnologias que visam a mitigação dos efeitos de quebra de produtividade relativa ao manejo agrícola. Está área em questão, foi semeada com uma cultivar de 105 dias de ciclo, com um regime hídrico total equivalente a 618 mm (Tabela 9), com uma resistência a penetração (RP) do solo média de 1,097 MPa em 60 cm, em um solo de textura média, com uma CAD de 112 mm, satisfazendo a necessidade da cultura, porém insuficientes pela baixa tecnologia e práticas de manejo adotadas. Em estudos feitos em sistemas de manejo e compactação do solo na cultura da soja, Varquez et al., (1989) constataram que a produtividade máxima da cultura estava associada a resistência a penetração de 1,57 a 1,59 MPa (camada de 0-35 cm), mas com decréscimos quando a RP aumenta.

Ao comparar a área 11 com a área 5 para a PR (Tabela 9), nota-se que mesmo a área 11 tendo um maior *yield gap* relativo ao déficit hídrico, o manejo agrícola se sobressai minimizando essa quebra, tendo assim um *yield gap* relativo a manejo de apenas 27% e uma EA de 73% (Figura 5). Isso mostra que regiões com maior déficit hídrico tendem a apresentar maior EA, embora outros estudos devam ser realizados para validar esta hipótese e entender essa relação com os demais fatores da produtividade. Vale ressaltar que a área 9, que obteve 91% de EA, superou a EA sugerida por Sentelhas et al., (2015), e isso somente é possível quando há melhorias no manejo agrícola da região, adotando-se práticas conservacionistas no manejo do solo, melhorias nos tratos culturais, desde a semeadura até a colheita, dentre outras práticas que visam o uso eficiente do solo, da água e da energia solar fornecida para a cultura (Cardoso et al., 2014).

De acordo com os níveis nutricionais obtidos através da análise de folhas da área 9, os teores de nutrientes estão de acordo com os níveis suficientes recomendados pela Embrapa (2008), em que apenas Mn, Cu e S estão em níveis considerados altos (Figura 6). Isso indica que o manejo de adubação de base adotado na área através dos níveis exigidos

pela análise de solo suplementou as exigências nutricionais da cultura da soja, influenciando assim em uma alta produtividade de acordo com as condições edafoclimáticas da área de cultivo.

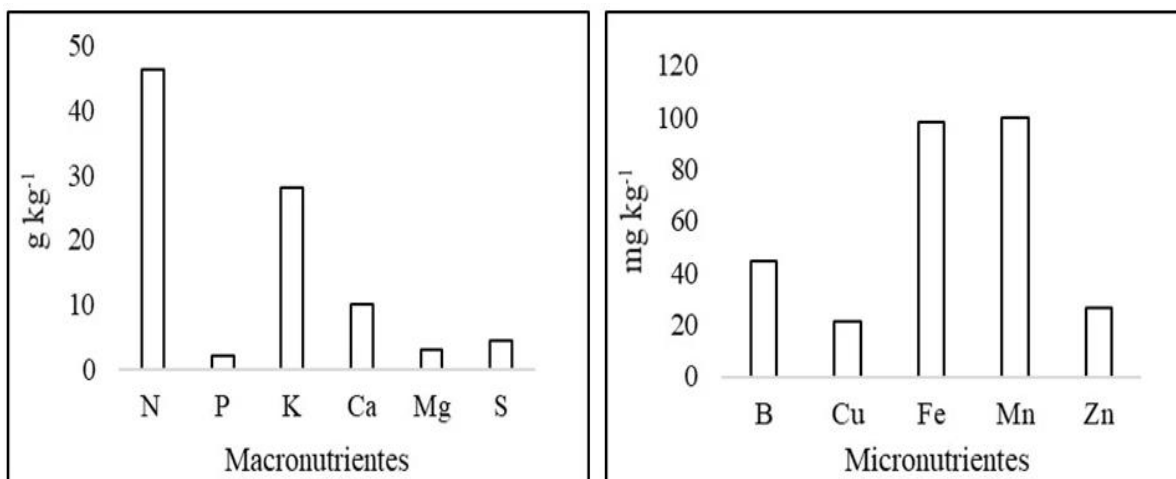


Figura 6. Teor de macro e micronutrientes encontrados no tecido foliar da área 9 .

A eficiência climática (EC), nos mostra em termos quantitativos a redução da produtividade ocasionada pelo déficit hídrico, e é obtida através da relação entre a PA e PP. Ao analisar os dados de EC demonstrados na Figura 5, observa-se que as maiores EC foram encontradas nos municípios de Heitorai, GO (áreas 4, 5 e 6) e Trindade, GO (áreas 7 e 8), com uma média de 71% de EC, com semeadura no período de 13 a 28 de novembro/2019, com uma perda de produtividade de 29% relativa ao déficit hídrico. Porém, é notório que há uma diferença climática considerável entre as regiões, não podendo levar em consideração a data de semeadura, pois as áreas 1, 2 e 3, semeadas de 15 a 18 de novembro/2019 obtiveram EC equivalentes à 59%, 61% e 62%, respectivamente.

Isso indica que tais datas de semeaduras não foram as ideais para o cultivo de soja nesta região para a safra 2019/2020, pois a EC possibilita identificar as melhores datas de semeadura em que há a ocorrência de menores perdas ocasionadas por déficit hídrico (Battisti et al., 2013). Já a menor EC foi obtida na área 11, de 58%, considerando que foi a área que sofreu o maior déficit hídrico em comparação as outras (Tabela 9), porém se sobressai com uma EA de 73%, minimizando assim as perdas ocasionadas por déficit hídrico.

No entanto, melhores práticas de manejo agrícola visando minimizar os impactos negativos decorrentes das variáveis climáticas, que são variáveis incontrolláveis,

são relevantes para o alcance do máximo potencial produtivo da cultura da soja. Práticas de manejo desde a escolha da data de semeadura de acordo com o Zoneamento Agrícola de Risco Climático fornecido pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa) e de acordo com a realidade de cada região produtora; escolha de cultivares tolerantes à ocorrência de déficit hídrico; manejo de adubação de acordo com a exigência da cultura e necessidade de correção do solo; complementação suplementar nutricional via folha para suprir necessidades que não são de fácil correção no solo, bem como um perfil de solo que possibilita o desenvolvimento radicular em profundidade, são alternativas que implicam positivamente a produtividade final da soja e que devem ser levadas em consideração para o crescimento e desenvolvimento sustentável da produção de soja no estado de Goiás.

5.2 Avaliação do estado nutricional

Os resultados dos teores dos nutrientes obtidos através da análise de folha para a cultura da soja estão descritos na Tabela 10. Ao analisar os macronutrientes, é possível observar valores diferentes dos sugeridos pelas referências. Em relação ao nitrogênio (N), nutriente requerido em maiores quantidades pela cultura, nota-se que os níveis encontrados nos tecidos vegetais estão de acordo com os níveis suficientes sugeridos pela Embrapa (2008) e Sako et al., (2020) (Tabela 8). Mas, ao comparar apenas com os valores encontrados por Sako et al., (2020), e observando os teores de N das folhas das áreas analisadas, apenas 38 % das áreas estão com teores maiores que o nível inferior ($47,4 \text{ g kg}^{-1}$) determinado pelos autores para uma produtividade igual à 5400 kg ha^{-1} .

Já o potássio (K), apresentou níveis satisfatórios de acordo com as referências ($2,3$ a $3,6 \text{ g kg}^{-1}$), sem deficiência e excesso, porém, o fósforo (P) refletiu valores que sugerem a deficiência do nutriente na folha da cultura, menores que $2,3 \text{ g kg}^{-1}$ (Embrapa, 2008). O cálcio (Ca) apresentou um valor acima do recomendado pelas referências ($6,8$ a $11,8 \text{ g kg}^{-1}$), sugerindo um excesso do nutriente no tecido foliar da cultura da soja e na Tabela 11 é possível observar a variação que esse nutriente teve dentre as áreas de estudo, com um CV % de 81,1 %, em que apenas sete das treze áreas estudadas estão com níveis de Ca satisfatórios e o restante com níveis considerados altos.

O magnésio (Mg) apresentou valores suficientes como recomendado pelas referências ($2,5$ a $4,7 \text{ g kg}^{-1}$). O enxofre (S), para todas as áreas, também apresentou valores

acima de 3,0 g kg⁻¹, indicando um excesso do elemento na folha de soja. Já em relação aos micronutrientes, também houve uma variação nos resultados apresentados.

Tabela 10. Níveis nutricionais encontrados nas análises de folhas a partir do terceiro trifólio em estágio R1 para a cultura da soja das áreas estudadas.

Área	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
g kg ⁻¹mg kg ⁻¹				
1	40,0	2,1	24,0	20,0	4,0	7,2	14,2	13,0	140,0	110,0	41,9
2	43,7	2,3	26,0	20,0	4,0	7,2	14,3	10,0	99,0	78,0	44,0
3	43,3	1,8	19,6	20,0	4,0	5,1	11,5	5,0	78,0	73,0	31,4
4	52,2	1,9	22,8	20,0	4,0	4,5	11,0	7,5	100,0	12,0	28,4
5	44,9	2,5	19,2	10,0	3,0	6,7	12,2	9,4	100,0	32,0	33,6
6	45,9	2,8	22,0	10,0	3,0	7,0	12,2	9,6	110,0	27,0	34,9
7	38,3	1,7	16,0	20,0	4,0	5,1	24,5	6,7	120,0	61,0	25,7
8	37,0	1,4	15,2	60,0	4,0	4,3	12,0	5,5	88,0	20,0	19,0
9	46,3	2,2	28,0	10,0	3,0	4,4	44,7	21,0	98,0	100,0	26,6
10	47,8	2,0	20,0	10,0	3,0	3,2	57,5	9,0	28,0	57,0	19,2
11	47,1	3,2	28,0	9,0	3,0	3,1	39,2	12,0	110,0	110,0	22,1
12	48,9	2,0	28,4	8,0	3,0	3,9	100,6	9,7	72,0	59,0	34,1
13	51,6	2,0	26,0	7,0	3,0	3,8	57,5	9,3	72,0	89,0	34,4

O nutriente boro (B) se apresentou suficiente (33 a 50 mg kg⁻¹) em apenas quatro áreas, sendo que em uma área apresentou excesso de boro foliar e em oito áreas apresentou níveis considerados baixos, ou seja, deficiência do nutriente na cultura da soja. É importante ressaltar que mesmo que seja requerido em quantidades menores se comparado aos macronutrientes, o nutriente B tem um papel fundamental na produtividade final da cultura da soja.

Além da soja ser uma leguminosa que tem uma alta sensibilidade ao nutriente, o B atua em funções de extrema importância para o melhor desenvolvimento vegetal, dentre elas a divisão e alongação celular, na germinação do pólen, alongação do tubo polínico e fecundação, garantindo a formação do fruto ou semente (Furlani et al., 2001), e com o progresso da deficiência, a alongação dos entrenós fica lenta, ocorre a morte dos pontos de crescimento terminal e a formação de flores é restrita ou inibida (Borkert et al., 1994; Nunes, 2012). Em estudos feitos por Rerkasem et al., (1997), os autores observaram a resposta de

19 cultivares de soja em um solo deficiente em B e diante dessa condição notaram uma queda na produtividade da soja na ordem de 30 % a 60 %, quando comparada ao tratamento com adubação com boro.

O cobre (Cu) apresentou níveis adequados como sugerido pelas referências (6 a 21,2 mg kg⁻¹) em 11 áreas das estudadas, em que apenas duas áreas apresentaram valores menores que 6 mg kg⁻¹, bem como o ferro (Fe) expressou níveis suficientes (59 a 221,9 mg kg⁻¹), ao contrário do manganês (Mn) que apresentou níveis desequilibrados, com deficiência e excesso dentre as áreas de acordo com as referências (28 a 75 mg kg⁻¹), enquanto o zinco (Zn) apresentou níveis baixos em cinco áreas e o restante das áreas com níveis considerados suficientes (31 a 59,4 mg kg⁻¹).

Ao analisar a Tabela 11, têm-se os valores de máxima, média e mínima dos teores de nutrientes das áreas estudadas, bem como o desvio padrão e o coeficiente de variação (CV%). Diante dos dados apresentados, nota-se que o nitrogênio tem o menor CV% de uma área para outra, com 10.4 % de variação e um desvio padrão de 4,7 e o cálcio e o boro apresentaram as maiores variações (CV%) dentre as áreas estudadas, 81,1 % e 86,2%, respectivamente para Ca e B.

Tabela 11. Valores máximos, mínimos, média, desvio padrão e coeficiente de variação (CV) dos teores dos nutrientes das áreas estudadas.

Elemento	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	CV
g kg ⁻¹			σ	%
N	37	52,2	45,2	4.7	10.4
P	1,4	3,2	2,1	0.5	23.0
K	15,2	28,4	23	4.5	19.8
Ca	7	60	17,2	13.9	81.1
Mg	3	4	3,5	0.5	14.8
S	3,1	7,2	5	1.5	30.1
mg kg ⁻¹				
B	11	101	32	27.3	86.2
Cu	5,5	21	10	4.1	41.5
Fe	28	140	94	27.4	29.3
Mn	12	110	64	33.6	52.7
Zn	18,9	44	30	7.9	25.9

Ao correlacionar o teor de N foliar com a EA (Figura 7), obteve-se uma correlação positiva, indicando que quanto maior o teor de N na folha maior é a EA da área cultivada, dentro dos limites avaliados. Os dois pontos fora da linha de tendência da relação entre nível de N e EA, correspondem as áreas 5 e 9, em que obtiveram a menor e a maior EA, porém, em relação ao nível de N da análise foliar (Tabela 10), nota-se que os níveis nutricionais estão de acordo com o nível suficiente sugerido pela Embrapa (2008).

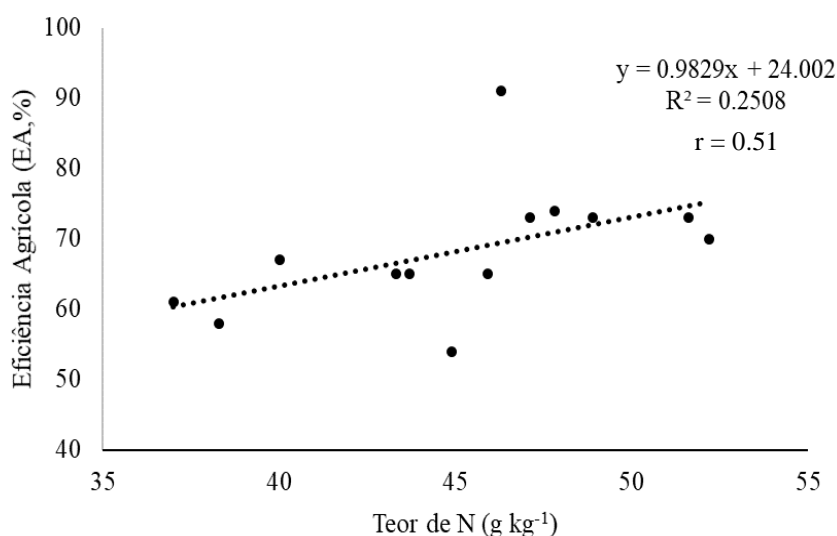


Figura 7. Correlação entre a concentração de nitrogênio na folha e a eficiência agrícola.

Assim como o N apresentou uma correlação positiva com a EA, o K, segundo maior nutriente requerido pela cultura da soja, também se destacou quando correlacionado com a EA. Na Figura 8 é possível observar essa correlação positiva, em que à medida que o teor de potássio na folha da cultura da soja aumenta há um incremento na EA das áreas em questão, com um valor de r maior se comparado com a correlação EA e N.

De acordo com as referências aqui utilizadas para interpretação das análises, Embrapa (2008) e Sako et al., (2020), o nível de K ideal na folha para o suprimento da necessidade da cultura varia de 17,3 a 25,7 g kg⁻¹, ou seja, nas áreas em que o teor de potássio foi menor que o recomendado, nota-se uma EA menor, como exemplo a área 8, com o menor teor de K na folha, 15,2 g kg⁻¹, e com uma EA de 61 %. O potássio, além de atuar na ativação enzimática, atua ativamente na regulação de abertura e fechamento de estômatos, no controle osmótico dos tecidos, regulando a transpiração e entrada de CO₂ e influenciando a fotossíntese (Malavolta, 2006). Isso influencia diretamente na perda de água da planta para o ambiente, e em condições de déficit hídrico, com teores inadequados do nutriente para a

planta, os mecanismos fisiológicos que atuam na eficiência da planta em armazenar água e não a perder para o ambiente ficam comprometidos e assim influenciando negativamente na produtividade final da cultura.

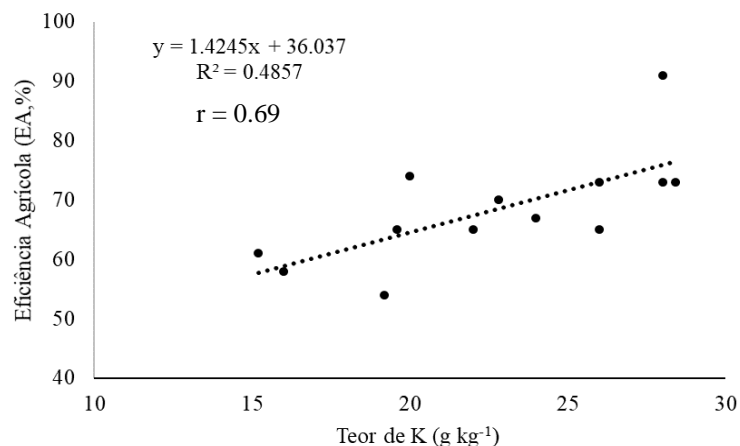


Figura 8. Correlação entre a concentração de potássio na folha e a eficiência agrícola.

Além dessas funções, o fornecimento adequado de K na cultura da soja, segundo Malavolta (1980), promove um aumento da nodulação, do número de vagens por planta, bem como da porcentagem de vagens com grãos, do tamanho da semente e na diminuição de grãos enrugados. Em estudos feitos por Yin & Vin (2004), os autores estimaram para uma variedade de soja cultivada sob sistema de plantio direto que para uma máxima produtividade, a concentração de K foliar ideal foi de 24,3 g kg⁻¹.

O teor do micronutriente Cu na folha da soja também apresentou uma correlação positiva com a EA, mais do que o N e o K, com um $r = 0,74$ (Figura 9). Nota-se que a medida em que a concentração de Cu no tecido foliar da cultura aumenta, a EA tende a aumentar também. O Cu atua em vários processos fisiológicos das plantas, agindo na fotossíntese, respiração, metabolismo de proteínas e especialmente em rotas metabólicas de produção de compostos de resistência a patógenos, dentre elas, a síntese de lignina (Taiz et al., 2017).

Uma das principais funções do Cu de extrema importância para a cultura da soja, é a formação de compostos fenólicos na planta que atuam como mecanismos naturais de defesa contra patógenos, impedindo a penetração destes organismos nos tecidos vegetais, aumentando, conseqüentemente, a resistência da planta a infecções foliares provocadas por esses organismos (fungos, bactérias e insetos), agindo assim como um fungicida natural (Kumar et al., 2017).

Na deficiência desse nutriente, as plantas reduzem o metabolismo de fenóis, que são precursores de lignina, o que confere uma susceptibilidade das plantas ao ataque de doenças (Marschner, 2012).

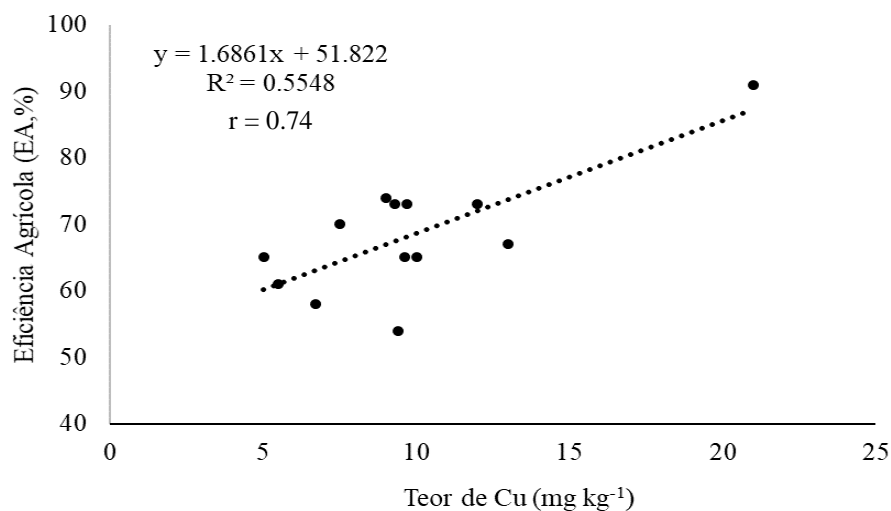


Figura 9. Correlação entre a concentração de cobre na folha e a eficiência agrícola.

Diante dos fatos apresentados, justifica-se que, para esses resultados, que com o aumento da concentração de Cu de acordo com os níveis adequados para um bom desenvolvimento da planta, a presença de Cu confere uma maior sanidade na cultura da soja, diminuindo o *yield gap* provocado por doenças e pragas, devido a capacidade de defesa natural da planta.

O boro é outro micronutriente de extrema importância para o desenvolvimento da soja e que vem se mostrando como fator limitante dos cultivos agrícolas nos solos brasileiros pela sua difícil correção (Santini et al., 2015). Este também apresentou uma correlação positiva com a EA. Nota-se na Figura 10, que assim como os outros nutrientes mencionados anteriormente, a medida em que seu teor no tecido foliar aumenta, a EA segue o mesmo sentido. O B exerce função no desenvolvimento radicular e formação de raízes, por participar do processo de divisão celular (Loué, 1993; Cakmak, 1997). Quando há a ocorrência de deficiência de B em leguminosas, como a soja e feijão, a parede celular dos nódulos responsáveis pela fixação biológica de nitrogênio (FBN) é afetada proporcionando a entrada de oxigênio para o interior dos nódulos diminuindo o processo de FBN (Lukaszewski & Blevins, 1996). Cakmak (1995), em estudos com girassol constatou que

quando há o suprimento necessário de boro para a planta, ocorre a redução de extravasamento celular de potássio, sacarose, compostos fenólicos e aminoácidos.

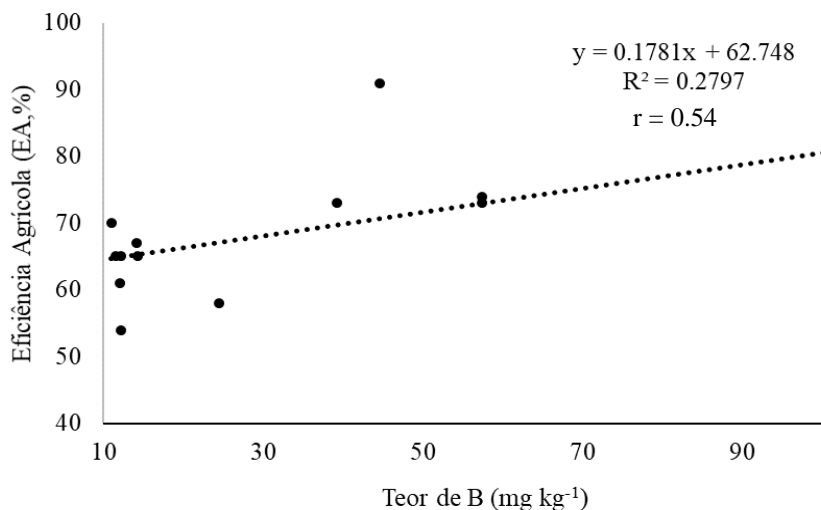


Figura 10. Correlação entre a concentração de boro na folha e a eficiência agrícola.

Em estudos realizados por Riaz et al., (2018), observou-se que em situações de estresse ocasionadas por presença de alumínio no solo, o B tem ação de diminuir os efeitos negativos proporcionados pela presença de alumínio sobre o sistema radicular, além de promover a produção de substâncias de defesas da planta. Varanda et al., (2018), em estudos realizados no Estado do Tocantins, com soja em solos de várzea, observou que com a aplicação de boro foliar para suprir a necessidade da cultura no estágio fenológico R2, proporcionou um aumento de 12 % no número de vagens por planta.

Contudo, o B se torna fator limitante para o cultivo da soja quando em deficiência, pois é responsável e participa de vários processos fisiológicos para o ideal desenvolvimento da cultura, em que Santini et al., (2015) constataram um aumento de produtividade de mais de 15 % com a aplicação desse nutriente quando em situações de deficiência. E assim como as correlações de K, Cu e B se demonstraram positivas com a eficiência dos cultivos agrícolas das áreas estudadas, Sako et al., (2016) definiram que para obtenção de produtividades de soja acima de 4200 kg ha⁻¹, além de outros fatores agrônômicos, o teor de K, Cu e B são decisivos para o aumento de produtividade das áreas cultiváveis de soja, devido as funções fisiológicas e metabólicas que cada um exerce na cultura.

Em contrapartida, o enxofre resultou em uma correlação negativa com a EA, com um $r = -0.50$, como representado na Figura 11. O teor de S foliar em todas as áreas se apresentou acima do recomendado pelas referências, e quanto menor o teor, maior foi a EA das áreas estudadas. A disponibilidade de S para as plantas está diretamente relacionada com o teor de matéria orgânica presente nos solos de cultivo, pois baixos teores de matéria orgânica no solo podem limitar o desenvolvimento da soja, devido à baixa disponibilidade de S no solo e pela alta demanda deste nutriente pela cultura (Neto et al., 2018). Para a cultura da soja, a quantidade exigida de S é semelhante as necessidades exigidas de fósforo e magnésio para o melhor desenvolvimento da cultura (Rezende et al., 2009).

O S é um macronutriente classificado como elemento estrutural desempenhando funções como constituinte de aminoácidos, como cisteína, cistina, metionina, taurina, que atuam na estrutura e metabolismo das plantas, e devido a isso está presente em todas as proteínas vegetais, inclusive enzimáticas e, de forma indireta, está envolvido na formação da clorofila (Takahashi et al., 2011). Tendo assim influência nos processos fundamentais para o crescimento e desenvolvimento da planta, como fotossíntese, respiração celular, resistência ao déficit hídrico, FBN, desenvolvimento radicular e entre outros (Marschner, 2012).

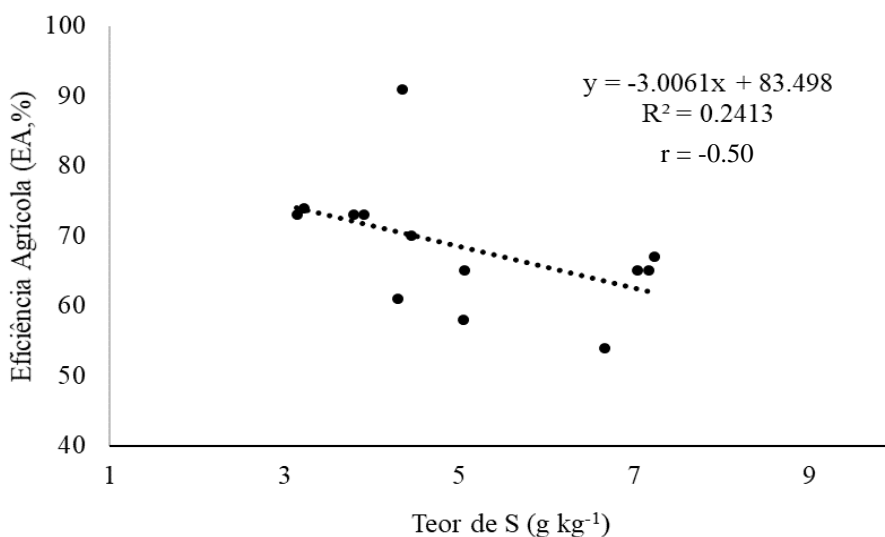


Figura 12. Correlação entre a concentração de enxofre na folha e a eficiência agrícola.

Porém, não foi encontrado na literatura possíveis consequências do alto teor de S na folha da cultura da soja e que influencie na produtividade final, pois os estudos estão

voltados para a baixa disponibilidade do nutriente nos solos e pela deficiência do S para as culturas.

5.3 Análise de resistência do solo a penetração

A resposta dos solos das áreas cultivadas à resistência a penetração (RP) variou de uma área para outra (Quadro 1), e as maiores RP foram obtidas nas áreas em que houve a maior ocorrência de déficit hídrico. Ao analisar o Quadro 1, de acordo em que a cor vai variando do verde (menor RP) para o vermelho (maior RP) indica a variação no aumento da RP nas áreas analisadas. A RP tem sido utilizada no meio agrônomo para conhecimento e detecção de camadas compactadas, interferência no desenvolvimento do sistema radicular das plantas e entre outros (Cunha et al., 2002), e é uma propriedade física do solo que influencia diretamente o crescimento de raízes (Tavares Filho & Ribon, 2008).

Além de proporcionar restrição ao crescimento radicular, a compactação afeta a infiltração de água no perfil de solo (Lanzanova et al., 2007), assim como, a condutividade hidráulica, ocasionando perdas diretas nas produtividades dos cultivos agrícolas (Camargo & Alleoni, 1997), e contribuindo para o aumento de *yield gap* relacionado ao manejo agrícola.

Quadro 1. Medidas de resistência a penetração para camadas de 5cm de profundidade, em MPa, com a média de coletas em 10 pontos aleatórios das áreas de estudo da camada de 0 a 60 cm de profundidade.

Área	0 a 5	5 a 10	10 a 15	15 a 20	20 a 25	25 a 30	30 a 35	35 a 40	40 a 45	45 a 50	50 a 55	55 a 60
1	0,1	0,8	1,1	1,3	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,2
2	0,0	0,6	1,0	1,4	1,4	1,3	1,3	1,2	1,1	1,1	1,0	0,9
3	0,0	0,4	0,6	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	0,9	1,0
4	0,1	1,1	1,5	1,6	1,5	1,6	1,3	1,1	1,0	1,0	1,0	0,9
5	0,2	0,9	1,2	1,3	1,4	1,4	1,4	1,3	1,1	1,1	1,0	1,0
6	0,1	0,7	1,4	1,5	1,6	1,6	1,5	1,4	1,2	1,0	0,9	0,8
7	0,1	1,3	1,7	1,9	2,1	2,1	1,8	1,6	1,6	1,4	1,1	1,2
8	0,1	0,6	1,2	1,4	1,8	2,0	2,1	2,1	2,0	1,8	1,7	1,5
9	0,1	0,7	1,4	1,9	1,7	1,5	1,4	1,3	1,3	1,2	1,1	1,0
10	0,1	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6	1,6	1,5	1,3	1,4
11	0,2	1,1	2,0	2,2	2,2	1,9	1,8	1,6	1,4	1,3	1,1	1,0
12	0,2	1,6	2,2	2,6	2,7	2,5	2,2	2,0	2,0	1,7	1,5	1,4
13	0,1	1,1	1,9	2,3	2,6	2,4	2,2	2,1	2,0	1,7	1,6	1,5

Nota-se que as áreas 11, 12 e 13 apresentaram os maiores níveis de RP após a camada de 10 cm, acima de 2,0 MPa, que é o limite crítico para o impedimento do desenvolvimento radicular da cultura da soja. Para as áreas 12 e 13, essa RP se estendeu até a camada de 45 cm e para a área 11, até a camada de 35 cm.

Segundo Bennie et al., (1996) quando se obtém valores acima de 1,0 MPa já ocorre um decréscimo de crescimento radicular, e acima de 2,0 MPa, as raízes perdem de 60% a 80% do seu potencial de crescimento. Porém, para Beutler et al., (2007) há uma redução na produtividade de grãos de soja em solos com RP no intervalo de 1,30 e 1,64 MPa. Considerando os fatores negativos que a RP proporciona aos cultivos agrícolas e analisando os resultados do Quadro 1, além das áreas ditas anteriormente com RP acima de 2,0 MPa, as áreas 7 e 8 também apresentaram resultados semelhantes. Durante o ciclo de cultivo da soja nas áreas 7 e 8, a precipitação pluviométrica foi a maior se comparada as outras áreas, 767 e 725 mm ciclo⁻¹, porém com uma EA de 58 % e 61 %.

A RP do solo é um fator limitante da produtividade da cultura da soja nessas áreas, pois mesmo com um regime hídrico favorável e de acordo com o que uma variedade de soja necessita para completar seu ciclo, o solo dessas áreas não consegue absorver a quantidade de chuva em que é exposto, em termos de infiltração e capacidade de armazenamento, o que implica em condições de déficit hídrico, além de um sistema radicular superficial da cultura por estar implantada em um solo compactado.

E além dessas restrições, em solos compactados, de acordo com Queiroz-Voltan et al., (2000), as raízes das plantas não conseguem utilizar adequadamente os nutrientes disponíveis, pois o desenvolvimento de novas raízes responsáveis pela absorção de água e nutrientes é comprometido. As áreas 11, 12 e 13 foram as que obtiveram as menores precipitações durante o ciclo da soja e os maiores déficits hídricos, e mesmo com uma EA equivalente a 73 % e analisando os resultados de RP obtidos, a compactação do solo nessas áreas também é um fator limitante para uma maior EA.

Estratégias de manejo são necessárias para diminuir a RP desses solos para proporcionar um melhor ambiente de cultivo para a soja, já que a EC dessas áreas é baixa, principalmente em perfil de solo, para obtenção de maior EA nessas áreas de cultivo. De acordo com Sako et al., (2016), para obtenção de produtividades acima de 4200 kg ha⁻¹ de grãos de soja, a RP do solo tem que ser menor que 1,7 MPa até a camada de 30 cm e menor que 1,6 MPa na camada de 40 a 50 cm. Analisando o Quadro 1, nota-se que as áreas

mencionadas anteriormente não se enquadram na RP máxima para obtenção de produtividades acima de 4200 kg ha⁻¹, e é notório em campo pois a produtividade real dessas áreas não foi maior que 3720 kg ha⁻¹.

Dentre essas áreas com maiores RP, a área 11 é a única que apresenta valores nutricionais de B e Ca, nutrientes diretamente ligados ao desenvolvimento radicular das plantas, adequados de acordo com as referências. A diminuição da RP do solo da área 11 pode influenciar positivamente em um maior desenvolvimento radicular, já que os níveis dos nutrientes relacionados com o desenvolvimento radicular da cultura, B e Ca, estão em níveis adequados, e assim há uma maior tolerância ao déficit hídrico, considerando que foi a área com maior déficit hídrico se comparada as outras utilizadas no estudo. Contudo, essa prática de manejo agrícola influenciaria positivamente em uma maior produtividade da cultura da soja nessa área em particular, se sobressaindo ainda mais em relação ao déficit hídrico ocasionado pela condição de precipitação da região.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo verificou-se a nível de fazenda que as áreas em que se obteve as maiores eficiências agrícolas (EA) foram as áreas em que se obteve as menores eficiências climáticas (EC), ou seja, maior condição climática limitante. As condições climáticas ocasionaram os maiores *yield gap* em todas as áreas estudadas, se sobressaindo em relação ao *yield gap* por manejo, indicando o quanto o clima é fator limitante para obter a máxima produtividade da cultura.

Para o *yield gap* por manejo, houve uma correlação positiva entre a EA e os níveis de N, K, Cu e B obtidos na análise de folha, indicando que quanto maior o teor desses nutrientes no tecido foliar, maior será a EA das áreas cultivadas, dentro dos limites medidos nas áreas de estudo. Por outro lado, foi observado correlação negativa entre EA e a concentração de enxofre.

Além do nível nutricional, a resistência a penetração do solo se mostrou um fator limitante para um melhor desenvolvimento da cultura, reduzindo a produtividade em áreas com níveis nutricionais adequado para os principais nutrientes avaliados a nível foliar.

Nesse sentido, estratégias de manejo que visem suprir a necessidade nutricional da cultura da soja, desde o solo e até a complementação via adubação foliar são positivas para o bom desenvolvimento da cultura, bem como estratégias que visem diminuir a compactação dos solos de cultivos, proporcionando um ambiente de produção mais propício com condições que possibilitem as cultivares de soja existentes alcançarem o máximo potencial produtivo. Visto que a média das máximas produtividades atingíveis foi equivalente a 5332 kg ha⁻¹.

7 REFERÊNCIAS

ACOCK, B.; ACOCK, M. Potential for using long-term field research data to develop and validate crop simulators. **Agronomy Journal**, Madison, v.83, p. 56-61, 1991.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. Disponível em: < <https://www.ana.gov.br/monitoramento> > Acesso em: outubro 2020.

AGRITEMPO. **Sistema de monitoramento agrometeorológico**. Disponível em: < <https://www.agritempo.gov.br/agritempo/index.jsp> > Acesso em: outubro 2020.

ALVARES C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**; v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ARSHAD, M. A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. **Soil Science Society of America**, Madison, p.123-141, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE SOJA – APROSOJA. **Levantamento Soja USDA Nº 596**. Disponível em: <https://aprosojabrasil.com.br/wp-content/uploads/2020/01/AprosojaBR.Resumo_USDA_01.2020.pdf> Acesso em: julho 2020.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C.; PILAU, F. G. Eficiência agrícola da produção de soja, milho e trigo no estado do Rio Grande do Sul entre 1980 e 2008. **Ciência Rural**, v.42, p. 24–30, 2012.

BATTISTI, R. **Épocas de semeadura da cultura da soja com base no risco climático e na rentabilidade líquida para as principais regiões produtoras do Brasil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013. doi:10.11606/D.11.2013.tde-27032013-131425. Acesso em: 2020-08-24.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C.; PILAU, F. G.; WOLLMANN, C. A. Eficiência climática para as culturas da soja e do trigo no estado do Rio Grande do Sul em diferentes datas de semeadura. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.43, n.3, p.390-396, 2013.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C. Drought tolerance of Brazilian soybean cultivars simulated by a simple agrometeorological yield model. **Experimental Agriculture**, v.51, p.285–298, 2015.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C.; PASCOALINO, J. A. L.; SAKO, H.; DANTAS, J. P. S.; MORAES, M. F. Soybean Yield Gap in the Areas of Yield Contest in Brazil. **International Journal of Plant Production**, v. 12, p. 159, 2018.

- BHATIA, V. S.; SINGH, P.; WANI, S. P.; CHAUHAN, G. S.; KESAVA RAO, A. V. R.; MISHRA, A. K.; SRINIVAS, K. Analysis of potential yields and yield gaps of rainfed soybean in India using CROPGRO-Soybean model. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.148, p.1252–1265, 2008.
- BENNIE, A. T. P.; WAISEL, Y.; ESHEL, A.; KAFKAFI, U. Growth and mechanical impedance. **Plant Roots**. 2.ed. New York, p.453-470, 1996.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F. Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38, p.849-856, 2003.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. C.; SILVA, A. P. Efeito da compactação na produtividade de cultivares de soja em Latossolo Vermelho. **R. Bras. Ciência do Solo**, 30:787-794, 2006.
- BEUTLER, A. N. et al., Intervalo hídrico ótimo no monitoramento da compactação e da qualidade física de um Latossolo Vermelho cultivado com soja. **Rev. Bras. de Ciência do Solo**, v.31, p.1223-1232, 2007.
- BORKERT, C.M.; YORINORI, J.T.; CORREA-FERREIRA, B.S.; ALMEIDA, A.M.R.; FERREIRA, L.P.; SFREDO, G.J. Seja o doutor da sua soja. In: **Informações Agrônomicas**, Piracicaba, n.66, p.16, 1994.
- BOSI, C.; SENTELHAS, P. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; SANTOS, P. M. Calibração do modelo da zona agroecológica da FAO para a estimativa da produtividade de cultivares do gênero *Urochloa* cultivadas a pleno sol e em sistema silvipastoril. **Anais Congresso Brasileiro de Agrometeorologia**, Lavras-MG, 2015.
- BROOKS, A. Effects of phosphorus nutrition on ribulose 1,5-bisphosphate carboxylase activation, photosynthetic quantum yield and amounts of some Calvin cycle metabolites in spinach leaves. **Australian Journal of Plant Physiology**, Collingwood, v.13, p.221-237, 1986.
- BRUN, J. A. L. **Épocas de semeadura e sua influência no potencial produtivo da cultura da soja em regiões produtoras do estado do Paraná, Brasil**. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2019.
- CABRAL, E.M.A. **Uso de reguladores de crescimento na cultura de soja**. Dissertação - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 72 p, 2019.
- CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**, Ed do autor, Piracicaba, p. 132, 1997.
- CAKMAK, I.; KURZ, H.; MARSCHNER, H. Short -term effects of boron, germanium and high light intensity on membrane permeability in boron deficient leaves of sunflower. **Physiologia Plantarum**, v. 21, p.11-18, 1995.
- CAKMAK, I.; RÖMHELD, V. Boron deficiency-induced impairments of cellular functions in plants. **Plant and Soil**, v.193, p.71–83, 1997.

- CÂMARA, G.M.S. **Soja: tecnologia da produção II**. Gil Miguel de Sousa Câmara (editor). Piracicaba: G.M.S. Câmara, 2000. 450p.
- CARDOSO, R. A.; BENTO, A. S.; MORESKI, H. M.; GASPAROTTO, F. Influência da adubação verde nas propriedades físicas e biológicas do solo e na produtividade da cultura de soja. **Semina: Ciências Biológicas e da Saúde**. Londrina, v. 35, n. 2, p. 51-60, 2014.
- CARVALHO, A. V. T.; SILVA, T. G. F.; SOUZA, L. S. B.; MOURA, M. S. B. Modificação do modelo original da zona agroecológica da FAO e aplicação na análise da eficiência produtiva da palma forrageira no estado da Bahia: 1ª aproximação. **Revista Brasileira de Geografia Física**, vol.10, P. 940-954, 2017.
- CASAROLI, D.; FAGAN, E. B.; SIMON, J.; MEDEIROS, S. P.; MANFRON, P.A.; NETO, D. D.; LIER, Q. J. V.; MULLER, L.; MARTIN, T. N. Radiação solar e aspectos fisiológicos na cultura de Soja - uma revisão. **Revista da FZVA**, v.14, n.2, p.102-120, 2007.
- CINTRA, F.L.D.; MIELNICZUK, J. Potencial de algumas espécies vegetais para recuperação de solos com propriedades físicas degradadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.7, p.323-327, 1983.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Décimo levantamento da safra de grãos 2019/2020**. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>>. Acesso em: 15 agosto 2020.
- CORRÊA, S. T. R. **Avaliação do modelo LINTUL (Light Interception and Utilization) para estimação da produtividade potencial da cultura da soja**. 2008, 88p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.
- CUNHA, J. P. A. R.; VIEIRA, L. B.; MAGALHÃES, A. C. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes densidades e teores de água. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.10, p.1-7, 2002.
- CUNHA, L. O.; FACCIOLI, G. G. Estimativa de produtividade da cultura do sorgo a partir do método da zona agroecológica (ZAE) no perímetro irrigado Jacarecica. **Caracterização ambiental e hidrológica da bacia hidrográfica do Rio Jacarecica**, Belo Horizonte – MG, Editora Poisson, v.1, p. 134, 2020.
- DEUTSCHE STIFTUNG WELTBEVÖLKERUNG – DSW. **Infoblatt: Bevölkerung und Projektionen**. Disponível em: <https://www.dsw.org/wp-content/uploads/2020/04/Infoblatt_Projektionen.pdf>. Acesso em: 15 agosto 2020.
- DOGAN, E.; KIRNAK, H.; COPUR, O. Deficit irrigations during soybean reproductive stages and CROPGRO-Soybean simulations under semi-arid climatic conditions. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 103, p. 154-159, 2007.
- DOURADO-NETO, D.; TERUEL, D. A.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D. R.; FRIZZONE, J. A.; BACCHI, O. O. S. Principles of crop modeling and simulation: I. Uses of mathematical models in agricultural science. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.55, p. 46-50, 1998.
- EMBRAPA. Fertilidade do solo e nutrição da soja. Londrina: **Embrapa Soja**, 8p. (Circular técnica, n.50), 2007.

EMBRAPA. Cultivo do milho. Sete Lagoas: **Embrapa Milho e Sorgo**. Sistemas de produção. 3ª edição, 2007.

EMBRAPA. Soja no Brasil: calagem, adubação e nutrição mineral. Londrina: **Embrapa Soja**. 148p. (Embrapa Soja. Sistemas de Produção, n.305), 2008.

EMBRAPA. Coleta de solos para análise: orientações. Macapá: **Embrapa Amapá**, 2. ed. atual. rev. 2012.

EMBRAPA. Tecnologias de Produção de Soja – Região Central do Brasil. Londrina: **Embrapa Soja**, 268p. (Embrapa Soja. Sistemas de Produção, n.16), 2013.

EMBRAPA. Índice de área foliar da soja em função da redução da densidade de semeadura. Londrina: **Embrapa Soja**, 19p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, n.17), 2018.

FAGAN, E.B. **A cultura da soja: modelo de crescimento e aplicação da estrubirulina piraclostrobina**. 2007. 84p. Tese – Curso de Agronomia, USP/ESALQ, Piracicaba, 2007.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. Ecofisiologia da soja. **Londrina: Embrapa Soja**, 9 p. (Circular técnica, 48), 2007.

FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L. Soja. In: Monteiro, J.E.B.A. Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola. **Brasília: INMET**, cap. 15, p. 261-278, 2009.

FURLANI, A. M. C.; TANAKA, R. T.; TARALLO, M.; VERDIAL, M. F.; MASCARENHAS, H. A. A. Exigência a boro em cultivares de soja. **Rev. Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 929-937, 2001.

FREITAS, C. H. **Adaptação do modelo da zona agroecológica para a estimação do crescimento e produtividade do eucalipto**. Dissertação - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018.

FREITAS, P. S. L.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C.; COSTA, L. C. Simulação da produtividade do milho pelo modelo CERES-Maiz em função da lâmina e da uniformidade de aplicação de água. **Rev. Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.8, p. 225-232, 2004.

GILBERT, M. E.; HOLBROOK, N. M.; ZWIENIECKI, M. A.; SADOK, W.; SINCLAIR, T. R. Field confirmation of genetic variation in soybean transpiration response to vapor pressure deficit and photosynthetic compensation. **Field Crops Research**, v. 124, p. 85–92, 2011.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – **INMET**. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/>> Acesso em: outubro 2020.

KUMAR, C. J. N.; RAJANGAM, J.; BALAKRISHNAN, K.; BORA, L. Influence of foliar fertilization of micronutrientes on leaf micro nutriente status of mandarin orange in lower pulney hills. **International Journal of Current Microbiology and Applied Science**, v.5, p. 516-522, 2017.

KURIHARA, C. H. **Demanda de nutrientes pela soja e diagnose de seu estado nutricional**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 100p, 2004.

- LANZANOVA, M. E.; NICOLOSO, R. S.; LOVATO, T.; ELTZ, F. L. F.; AMADO, T. J. C.; REINERT, D. J. Atributos físicos do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. **Rev. Bras. de Ciência do Solo**, v.31, p.1131-1140, 2007.
- LIMA, C. L. R. **Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada**. 2004, 70p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.
- LOBELL, D. B.; CASSMAN, K. G.; FIELD, C. B. Crop yield gaps: their importance, magnitudes, and causes. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 34, p. 179–204, 2009.
- LOUÉ, A. Oligo-éléments en agriculture. **Antibes: Nathan**, p. 557, 1993.
- LOPES-ASSAD, M. L.; SANS, L. M. A.; ASSAD, E. D.; ZULLO, J., JR. Relationship between water holding capacity and sand content in Brazilian soils. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, p. 588–596, 2001.
- LUKASZEWSKI, K. M.; BLEVINS, D. G. Root growth inhibition in boron deficient or aluminum-stressed squash may be a result of impaired ascorbate metabolism. **Plant Physiology**, v. 112, p. 1135-1140, 1996.
- MALAVOLTA, E. Elementos de nutrição mineral de plantas. **Editores Agronômica Ceres**, São Paulo, p. 251, 1980.
- MALAVOLTA, E. Elementos de nutrição mineral de plantas. **Editores Agronômica Ceres**, São Paulo, p. 683, 2006.
- MANTOVANI, E. C. Compactação do solo. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.13, p.52-55, 1987.
- MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. **Academic Press**, San Diego, p. 651-889, 2012.
- MIELNICZUK, J.; CARPENEDO, V.; PEDO, F. Desenvolvimento de raízes em solos compactados. **Lavoura Arrozeira**, v.38, p.42-43, 1985.
- NETO, M. E.; BESEN, M. R.; CONEGLIAN, C. F.; MINATO, E. A.; LIMA, R. S.; INOUE, T. T.; BATISTA, M. A. Macro and micronutrient contents in grain and soybean yield [*Glycine max* (L). Merr.] after foliar application of elemental sulfur. **Revista de Ciências Agrárias**, v.41, p.945-952, 2018.
- NUNES, A. S. Nutrição mineral de plantas. Livro-texto **Apostila de Nutrição Mineral de Plantas**. Dourados, p. 134, 2012.
- OLIVEIRA, R. A.; SANTOS, R. S.; RIBEIRO, A.; ZOLNIER, S.; BARBOSA, M. H. P. Estimativa da produtividade da cana-de-açúcar para as principais regiões produtoras de Minas Gerais usando-se o método ZAE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, p.549–557, 2012.
- OMETTO, J.C. Bioclimatologia vegetal. São Paulo, **Editores Agronômica Ceres**, p. 425, 1981.

- PEREIRA, C.R. **Análise do crescimento e desenvolvimento da cultura de soja sob diferentes condições ambientais**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, 282p, 2002.
- QUEIROZ-VOLTAN, R. B.; NOGUEIRA, S. S. S.; MIRANDA, M. A. C. Aspectos da estrutura da raiz e do desenvolvimento de plantas de soja em solos compactados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, p.929-938, 2000.
- RERKASEM, B.; JAMJOD, S. Genotypic variation in plant response to low boron and implications for plant breeding. **Plant Soil**, v. 193, p.169-180, 1997.
- REZENDE, P. M.; CARVALHO, E. R.; SANTOS, J. P.; ANDRADE, M. J. B.; ALCANTARA, H. P. Enxofre aplicado via foliar na cultura da soja [*Glycine Max* (L.) Merrill]. **Ciência e Agrotecnologia**, vol. 33, n. 5, p. 1255-1259, 2009.
- RIAZ, M.; YAN, L.; WU, X.; HUSSAIN, S.; AZIZ, O.; WANG, Y.; IMRAN, M.; JIANG, C. . Boron alleviates the aluminum toxicity in trifoliolate Orange by regulating antioxidante defense system and reducing root cell injury. **Journal of Environmental Management**, v. 208, p. 149-158, 2018.
- SALEM, M. A.; KAKANI, V. G.; KOTI, S.; REDDY, K. R. Pollen-based screening of soybean genotypes for high temperatures. **Crop Science**, v.47, p.219-231, 2007.
- SAKO, H.; ALVES, M.; MORAES, M. F.; TEIXEIRA, W. W. R.; LIMA, R. O.; SHIOZAKI, E. A. Fatores decisivos para se obter produtividade da soja acima de 4.200 kg ha⁻¹. Circular técnica 2, **Comitê Estratégico Soja Brasil**, Sorocaba, p.29, 2016.
- SAKO, H.; SÁ, J.P.D; BATTISTI, R. Ambientes de produção para cultura da soja: Conceitos, elementos de classificação e práticas agrícolas. **Livro em edição**, 2020.
- SENTELHAS, P. C.; BATTISTI, R.; CÂMARA, G. M. S.; FARIAS, J. R. B.; HAMPF, A.; NENDEL, C. The soybean yield gap in Brazil: Magnitude, causes and possible solutions. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 153, p. 1394-1411, 2015.
- SENTELHAS, P. C.; BATTISTI, R.; MONTEIRO, L.; A.; DUARTE, Y. C. N.; VISSÉS, F. A. Yield gap: conceitos, definições e exemplos. **Informações Agronômicas - IPNI**, n. 155, 2016.
- SETIYONO, T.D.; WEISS, A.; SPECHT, J. E.; BASTIDAS, A. M.; CASSMAN, K. G.; DOBERMANN, A. Understanding and modeling the effect of temperature and day-length on soybean phenology under high-yield conditions. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 100, p. 257-271, 2007.
- SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.191-199, 2000.
- SILVA, R.R.; SARTORI, M. G. B.; WOLLMANN, C. A.; Relação entre precipitação pluviométrica e produtividade da cultura de soja, no município de Ibirubá-RS. **Revista do Departamento de Geografia – USP**, v.27, p.296-314, 2014.
- SPERA, S. T.; SANTOS, H. P.; FONTANELI, R. S.; TOMM, G. O. Efeitos de sistemas de produção de grãos envolvendo pastagens sob plantio direto nos atributos físicos de solo e na produtividade. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, p.533-542, 2004.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. A.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed., Porto Alegre: Artmed, 888p. 2017.

TAGLAPIETRA, E.D.; STRECK, N. A.; ROCHA, T. S. M.; RICHTER, G. L.; SILVA, M. R.; CERA, J. C.; GUEDES, J. V. C.; ZANON, A. J. Optimum Leaf Area Index to Reach Soybean Yield Potential in Subtropical Environment. **Agronomy Journal**, v. 110, p. 932-938, 2018.

TAKAHASHI, H.; KOPRIVA, S.; GIORDANO, M.; SAITO, K.; HELL, R. Sulfur assimilation in photosynthetic organisms: molecular functions and regulations of transporters and assimilatory enzymes. **Annual Review of Plant Biology**, vol. 62, p. 157-184, 2011.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.573-581, 1998.

VARANDA, M. A. F; MENEGON, M. Z.; NASCIMENTO, V. L.; CAPONE, A.; BARROS, H. B. Efeitos da aplicação foliar de boro na produtividade de soja na várzea irrigada. **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, Guarapuava-PR, v. 11, p. 15-22, 2018.

VARQUEZ, L.; MYHRE, D.L.; GALLAHER, R.N.; HANLON, E.A.; PORTIER, K.M. Soil compaction associated with tillage treatments for soybean. **Soil Till. Res.**, 13:35-45, 1989.

ZANON, A. J.; RICHTER, G. L.; BECKER, C. C.; ROCHA, T. S. M.; CERA, J. C.; WINCK, J. E. M.; CARDOSO, A. P.; TAGLAPIETRA, E. L.; WEBER, P. S. Contribuição das ramificações e a evolução do índice de área foliar em cultivares modernas de soja. **Bragantia**, v. 74, p. 279-290, 2015.