

DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id4909>

Crescimento e produção de biomassa em soja exposta ao ozônio

Francisco Ricardo da Silva ^[1], Patricia Bulbovas ^[2] 

[1] azimutecbio@gmail.com. AzimutEco, Brasil. [2] pbulbovas@hotmail.com. Universidade Guarulhos (UNG), Brasil.

RESUMO

As queimadas na Amazônia emitem quantidade significativa de gases para a atmosfera, os quais são responsáveis pela formação de ozônio, um poluente altamente oxidante que pode causar efeitos negativos à produção agrícola. O presente trabalho teve como objetivo avaliar o crescimento (altura, diâmetro do caule, número de folhas e de vagens) e acúmulo de biomassa (peso seco de raiz, vagens e grãos) da cultivar “Tracajá” de *Glycine max* L. (soja) plantada, rotineiramente, em áreas amazônicas. Para tanto, foram realizados dois experimentos em que as plantas de soja foram mantidas no ambiente do Parque Estadual das Fontes do Ipiranga (PEFI), afetado por ozônio, e em casa de vegetação com ar filtrado. Os resultados mostraram os efeitos do ozônio no crescimento e produção de biomassa de soja. A Análise de Componentes Principais (ACP) indicou forte associação dos valores de altura, diâmetro do caule, número de folhas e vagens com as unidades amostrais da casa de vegetação. Diferenças estatísticas foram observadas no acúmulo de biomassa entre as plantas mantidas sob os dois tratamentos, sendo que a biomassa das sementes foi a variável mais afetada. Assim, a produtividade de soja “Tracajá”, cultivada em locais atingidos por ozônio na região amazônica, possivelmente vem sendo afetada por esse poluente.

Palavras-chave: Biomassa. Crescimento. *Glycine max*. Ozônio.

Biomass growth and production in ozone exposed soybeans

ABSTRACT

*Amazon burned emits significant amount of gases to atmosphere, which are responsible to ozone formation, a strong oxidative pollutant, which cause negative effects on agriculture yield. This study aimed evaluate growth (height, diameter stem, number of leaves and pods and biomass (dry weight of roots, pods and seeds) of the *Glycine max* L. cv. ‘Tracajá’ (soybean), routinely cultivate in Amazonian areas. Two experiments were made, where soybean was maintained under ambient air at Parque Estadual das Fontes do Ipiranga (PEFI), contaminated by ozone, and in greenhouse under filtered air. The results showed the ozone effects in the soybean growth and biomass yield. The Principal Components Analysis (PCA) indicated strong association of greenhouse units with height, stem diameter, and number of leaves and pods values. Statistical differences were observed in biomass values between plants maintained under both treatments. The seeds biomass was more affected. Thus, the ‘Tracaja’ soybean yield, cultivated in regions contaminated by ozone in Amazonian, probability, has been affected by this pollutant.*

Keywords: Biomass. *Glycine max*. Growth. Ozone.

1 Introdução

As mudanças no uso da terra, em função do considerável avanço da agricultura e pecuária na Amazônia, têm sido responsáveis por emissões significativas de gases e partículas para a atmosfera, uma vez que se tem feito uso indiscriminado de queimadas, uma das estratégias para criar ou manter áreas de cultivo e pastagem (ARTAXO *et al.*, 2013; HODGSON *et al.*, 2017; VAN MARLE *et al.*, 2017).

Durante a queima da biomassa vegetal grandes quantidades de compostos químicos como óxidos de carbono (CO e CO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x), amônia (NH₃), hidrocarbonetos (HC) e compostos orgânicos voláteis (VOC) são emitidos à atmosfera. Estes compostos interferem nos processos atmosféricos e levam à formação de ozônio (O₃). A emissão desses gases faz com que as concentrações de O₃ atinjam níveis que podem ser danosos à floresta e às culturas agrícolas, mesmo a centenas de quilômetros das áreas queimadas (AVNERY *et al.*, 2011; ARTAXO *et al.*, 2013; VAN MARLE *et al.*, 2017; ZANG *et al.*, 2017).

Em relação às culturas agrícolas, pesquisas realizadas nos Estados Unidos, Europa e Ásia têm mostrado que o ozônio reduz não somente a quantidade, mas também a qualidade da produção (FISHMAN *et al.*, 2010; AVNERY *et al.*, 2011; SUN; FENG; ORT, 2014; TAI; MARTIN, 2017; ZANG *et al.*, 2017; BAILEY *et al.*, 2019).

O cultivo sob concentrações elevadas de ozônio prejudica o crescimento, o acúmulo de biomassa e o rendimento de culturas, sendo que essa sensibilidade pode diferir entre as espécies cultivadas e entre as cultivares da mesma espécie (BAILEY *et al.*, 2019). Assim, compreender as respostas das espécies agrícolas em relação ao aumento das concentrações de ozônio tem implicações importantes para avaliar a produtividade futura (FISHMAN *et al.*, 2010; BERNARCCHI *et al.*, 2011; TAI; MARTIN, 2017).

A soja é a quarta cultura agrícola mais importante do mundo, no que diz respeito à produção de grãos e área ocupada (BERNARCCHI *et al.*, 2011; SUN; FENG; ORT, 2014; BAILEY *et al.*, 2019). No Brasil, é o cultivo de grãos mais importante, sendo plantada em diferentes regiões (MELLO FILHO *et al.*, 2004). No mundo, a soja é uma das espécies agrícolas mais amplamente estudada em relação às respostas ao ozônio, e os resultados dessas pesquisas mostram que ela possui grande sensibilidade a este poluente (SIGHT *et al.*, 2010; BERNARCCHI *et al.*, 2011; BULBOVAS *et al.*, 2014).

Na América do Sul, especialmente no Brasil, trabalhos que envolvem o ozônio e a redução da produção agrícola são bastante escassos, em especial em relação às cultivares de soja plantadas na região sul da Amazônia, local onde tal poluente vem registrando altas concentrações, (AVNERY *et al.*, 2011; ARTAXO *et al.*, 2013; BULBOVAS *et al.*, 2014), sendo encontrados na literatura apenas os trabalhos de Bulbovas *et al.* (2007; 2014) relacionados a este tema.

Baseado neste conhecimento, formulou-se a hipótese de que a cultivar de soja “Tracajá”, plantada em regiões amazônicas, sofre alteração de crescimento e acúmulo de biomassa sob o ozônio troposférico. O objetivo do trabalho foi avaliar o crescimento (altura, diâmetro do caule, número de folhas e de vagens) e o acúmulo de biomassa (peso seco de raiz, vagens e sementes) da cultivar “Tracajá” de *Glycine max* (soja) exposta ao ozônio troposférico.

2 Método da pesquisa

Para a avaliação do crescimento e acúmulo de biomassa da cultivar de soja “Tracajá” foram realizados dois experimentos. Neles foram avaliados o crescimento (altura, diâmetro do caule, número de folhas e de vagens) e o acúmulo de biomassa (peso seco de raiz, vagens e sementes).

O cultivo das plantas de soja foi realizado a partir de sementes doadas pela Embrapa Soja, Londrina, PR. Elas foram semeadas em vasos com capacidade de 6 l, contendo substrato comercial Plantimax (Eucatex-Brasil) e vermiculita (proporção 3:1). A irrigação das plantas foi realizada segundo modelo proposto por Arndt e Schweizer (1991). Para cada um dos experimentos, foram usados 24 vasos, cada um contendo uma planta. Parte desses vasos (n=12) foi mantida em casa de vegetação com ar filtrado (CV), totalmente isenta de poluentes; a outra parte foi colocada sob o ar ambiente do Parque Estadual das Fontes do Ipiranga (PEFI). A escolha desse Parque fundamentou-se no fato de que estudos com plantas bioindicadoras mostraram ser este um local intensamente afetado pelo ozônio (DAFRÉ-MARTINELLI *et al.*, 2011; DIAS *et al.*, 2011).

Após 14 dias da germinação das sementes, quando as plantas de soja tinham em média 15 cm de altura e três folhas, foram iniciadas as medidas de altura, diâmetro do caule e número de folhas. Quando surgiram as vagens, estas também passaram a ser contadas. Estas medidas foram tomadas semanalmente. Quando foi observado que

as plantas pararam de crescer, cessou-se a tomada dos dados de crescimento. Com o findar do ciclo de vida das plantas foram retiradas as raízes, as vagens e as sementes produzidas por cada uma delas. Este material permaneceu em estufa à 60°C até atingir peso constante para obtenção dos valores de biomassa. Ainda, para avaliar a qualidade das sementes, foram pesadas separadamente 20 sementes de cada planta.

Com as medidas semanais de crescimento, foram calculadas as taxas de crescimento relativo (TCR) em altura, diâmetro do caule, número de folhas e de vagens, usando-se a Equação (1):

$$TCR = \frac{(L_{nf} - L_{ni})}{\text{tempo}} \quad (1)$$

O tempo foi considerado em dias (no caso deste trabalho, sete dias, uma vez que as medidas foram semanais). L_{ni} é o logaritmo natural do valor da variável analisada obtido ao fim de uma semana e L_{nf} é o logaritmo natural do valor da variável analisada obtido no início da semana.

Durante o período experimental, dados referentes às variáveis climáticas (temperatura e umidade relativa) e aos poluentes (dióxido de nitrogênio e ozônio) foram monitorados, inicialmente, por uma estação móvel da CETESB, e depois com termohigrógrafos e monitores Horiba Ambient O₃ monitor APOA-360 e Horiba Ambient NOx monitor APNA-360 CE, mantidos dentro do PEFI.

As diferenças entre os tratamentos foram avaliadas por meio de análise de variância não paramétrica, seguida de testes de comparações múltiplas (Kruskal-Wallis), utilizando-se o programa Sigma Stat. Também foi realizada análise de componentes principais (ACP) para avaliar as respostas das variáveis em relação aos tratamentos, utilizando-se programa PCOrd 6.0 para Windows.

3 Resultados da pesquisa

As exposições das plantas de soja aconteceram nos períodos de abril a junho dos anos de 2007 e 2008 (1° e 2° experimentos, respectivamente) e tiveram, em média, duração de 120 dias.

Os valores médios de temperatura e umidade relativa foram semelhantes nos dois experimentos (20 e 21°C, 79 e 81%, respectivamente), com valores mínimo e máximo de temperatura de 13 e 35°C, e de umidade relativa de 26 e 98%, entre os dois experimentos (Tabela 1).

Os poluentes apresentaram valores médios mais altos no período do 2° experimento (NO₂ = 52 µg/m³,

O₃ = 91 µg/m³ e AOT40 = 3039 ppb.h). A média horária máxima de ozônio ocorreu, no entanto, durante o período do 1° experimento (Tabela 1). Neste mesmo período, a concentração de ozônio ultrapassou oito vezes o valor de 160 µg/m³ – considerado como padrão de qualidade do ar pelo CONAMA (Resolução CONAMA n° 3, de 28/06/90; CETESB, 2016), e três vezes durante o 2° experimento.

A AOT40 faz referência a um índice de qualidade do ar relativo à exposição acumulada de ozônio acima de 40 ppb. Chega-se a este índice, para um determinado período, por meio da soma de todas as concentrações horárias de ozônio acima de 40 ppb, após a subtração dessa concentração limite. Este índice é bastante utilizado na Europa e indica níveis críticos de ozônio, que podem causar danos à vegetação e perda de produtividade agrícola (FUHRER; SKÄRBY; ASHMORE, 1997; CETESB, 2017). O valor de AOT40 trimestral de 3000 ppb.h (6.000µg/m³.h) é associado a uma redução de 5% na produção agrícola e é considerado o nível crítico aceitável pela *Internacional Cooperative Programme on Effects of Air Pollution on Natural Vegetation and Crops*. A CETESB adota o valor de referência das concentrações de ozônio preconizadas pela Organização Mundial da Saúde (OMS), que indica a AOT40 de 3000 ppb de ozônio, acumulados durante o período de três meses, como Valor de Referência para Proteção da Produtividade Agrícola (VRPP; CETESB, 2016). Assim, no período do 2° experimento, as plantas de soja estiveram expostas a concentrações próximas ao limite de VRPP estabelecido pela CETESB.

Tabela 1 – Valores médios de temperatura (T, °C), umidade relativa (UR, %), dióxido de nitrogênio (NO₂, mg/m³), e média das concentrações máximas horárias diárias de ozônio (O₃, mg/m³) com seus respectivos valores mínimo e máximo (entre parêntesis), e exposição acumulada de ozônio acima de 40 ppb (AOT40, ppb.h), registrados no Parque Estadual das Fontes do Ipiranga (PEFI), no período dos dois experimentos realizados

Parâmetros	1° experimento	2° experimento
T (°C)	20 (13 – 34)	21 (15 – 35)
UR (%)	79 (26 – 98)	81 (58 – 96)
NO ₂ (mg/m ³)	20 (1 – 135)	52 (5 – 457)
O ₃ (mg/m ³)	52 (8 – 270)	91 (15 – 151)
AOT40 (ppb.h)	1952	3039

Fonte: dados da pesquisa

Os valores da taxa de crescimento relativo de altura, diâmetro do caule, número de folhas e de

vagens, obtidos nos dois experimentos, não mostraram diferenças significativas entre os tratamentos ar filtrado da casa de vegetação e ambiente do PEFI (Figura 1).

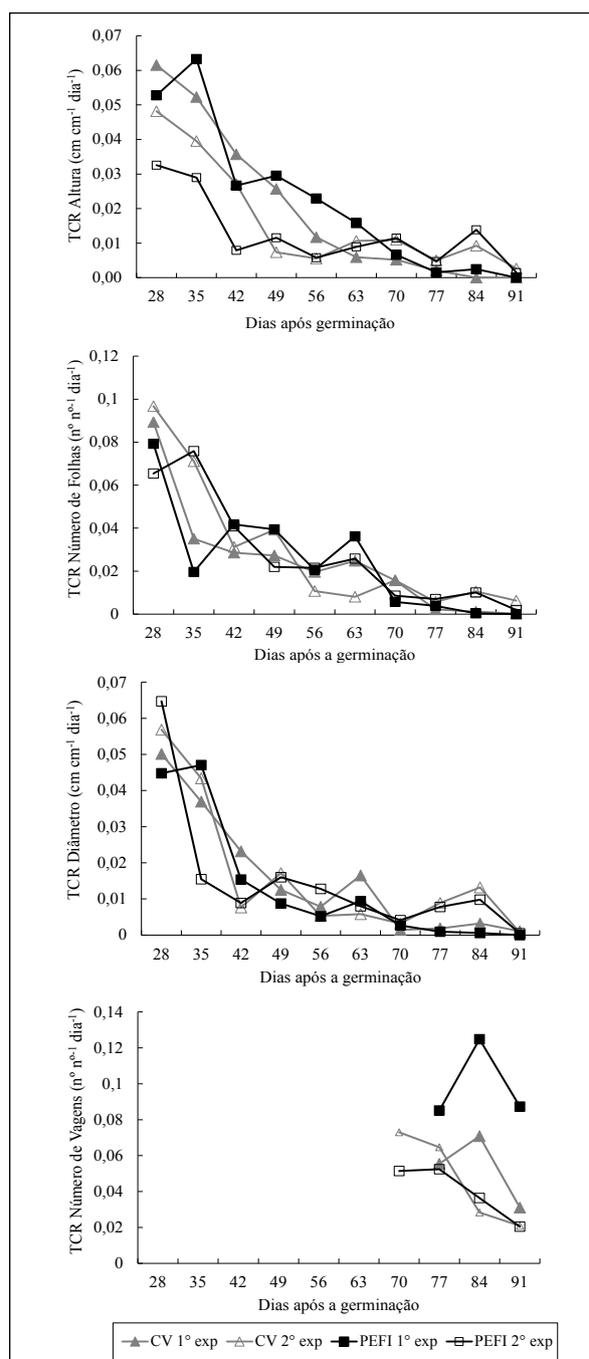
Já os resultados de biomassa apontaram diferenças estatísticas. A biomassa das raízes das plantas mantidas no ambiente do PEFI, durante o 2° experimento, foi significativamente maior em relação às plantas que cresceram sob ar filtrado da casa de vegetação. O incremento observado da biomassa de raízes foi de 44% (Figura 2). Ao contrário desse resultado obtido, estudos mostram que altas concentrações de ozônio podem provocar a diminuição da biomassa de raízes em plantas de soja, apesar de esses estudos também mostrarem que a perda da biomassa é mais expressiva na parte aérea da planta (JOUNDÉ *et al.*, 2008; BERNARCHI *et al.*, 2011; BETZELBERGER *et al.*, 2012).

Por outro lado, as plantas mantidas na casa de vegetação com ar filtrado apresentaram valores significativamente maiores de biomassa de vagens. A redução da biomassa de vagens das plantas mantidas no PEFI foi de 48% (Figura 2, na página seguinte). A soja que cresceu no ambiente do PEFI também apresentou redução tanto na quantidade como na qualidade das sementes. A biomassa de sementes foi menor 51% e 54%, durante o 1° e 2° experimento, respectivamente, e a biomassa de 20 sementes reduziu 34% durante o 2° experimento (Figura 2).

A perda significativa de biomassa nas plantas mantidas sob as concentrações de ozônio do ambiente do PEFI foi maior durante o 2° experimento. Neste período, foram observadas maiores concentrações desse poluente. Altas concentrações de ozônio podem levar à perda de produtividade de culturas agrícolas (BERNARCHI *et al.*, 2011; SCHAUBERGER *et al.*, 2019). Isto porque o ozônio entra nas folhas da planta através dos estômatos e reage rapidamente com os componentes do apoplasto, formando Espécies Reativas de Oxigênio (EROs). As EROs reagem com componentes celulares, causando danos às enzimas da fotossíntese, levando a taxas mais baixas de assimilação de carbono. Para evitar danos, as plantas tendem a diminuir a condutância estomática na presença de ozônio, o que causa redução do influxo de dióxido de carbono, que também leva a menores taxas de assimilação de carbono (SUN; FENG; ORT, 2014; ZANG *et al.*, 2017; SCHAUBERGER *et al.*, 2019). Plântulas e plantas de soja “Tracajá” fumigadas com 40 e 80 ppb de ozônio apresentaram baixos valores de

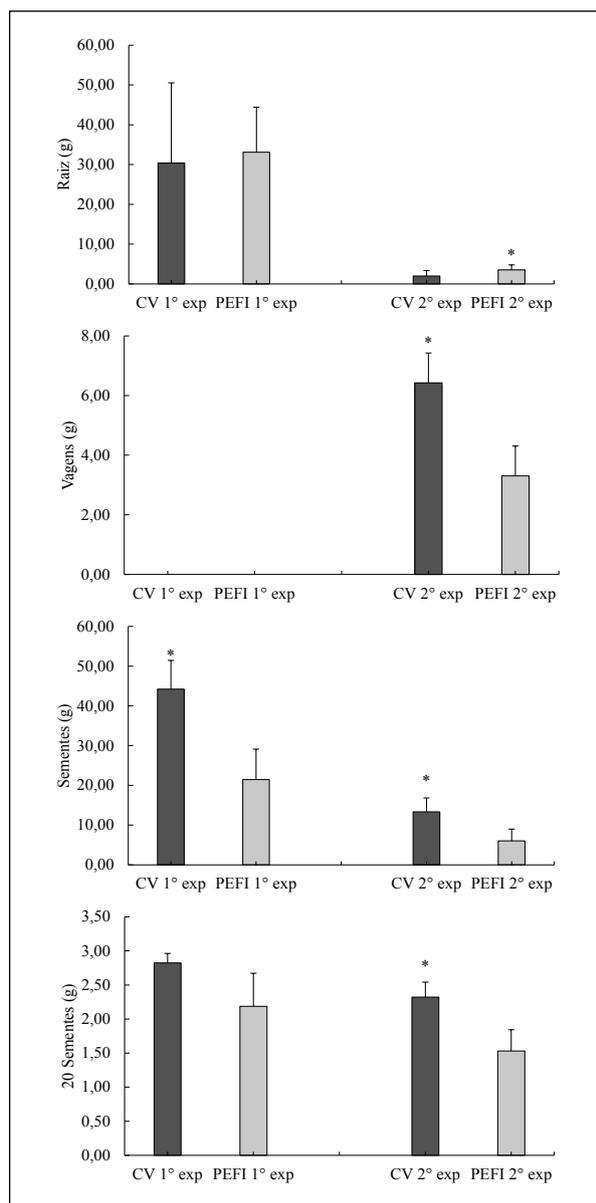
condutância estomática, como também de assimilação de carbono (BULBOVAS *et al.*, 2007; 2014).

Figura 1 – Valores médios das Taxas de Crescimento Relativo (TCR) de altura, diâmetro do caule, número de folhas e vagens de plantas de *Glycine max* ‘Tracajá’ mantidas na casa de vegetação com ar filtrado (CV) e no ambiente do Parque Estadual das Fontes do Ipiranga (PEFI)



Fonte: dados da pesquisa

Figura 2 – Valores médios de biomassa de raiz, vagens, sementes e de 20 sementes obtidos de plantas de *Glycine max* “Tracajá” mantidas na casa de vegetação com ar filtrado (CV) e no ambiente do Parque Estadual das Fontes do Ipiranga (PEFI)



* indica diferença estatística entre CV e PEFI para o mesmo experimento (p < 0,05)

Fonte: dados da pesquisa

Além disso, deve-se considerar que uma parcela do carbono assimilado é investida para reparar os danos induzidos pelo ozônio e aumentar as defesas antioxidantes (SUN; FENG; ORT, 2014; SCHAUBERGER *et al.*, 2019). As mesmas plântulas e plantas de soja “Tracajá” fumigadas com ozônio, que apresentaram baixos valores de condutância estomática e assimilação

de carbono, quando fumigadas com 40 e 80 ppb de ozônio, também mostraram aumento de algumas das defesas antioxidantes, principalmente quando cresceram sob maior concentração desse poluente (BULBOVAS *et al.*, 2007; 2014).

A Análise de Componentes Principais (ACP) mostrou uma clara diferença dos parâmetros de crescimento, como também de biomassa, obtidos das plantas crescendo em ambos os locais de estudo, nos dois experimentos realizados (Figura 3 e Tabela 2).

Tabela 2 – Correlação de Person e Kendall das variáveis biológicas com os eixos 1 e 2

Variáveis	Componentes principais	
	Eixo 1	Eixo 2
Altura 1º exp.	0,704	0,052
Altura 2º exp.	0,931	0,194
Diâmetro do caule 1º exp.	0,868	0,060
Diâmetro do caule 2º exp.	0,832	0,080
Número de folhas 1º exp.	0,930	-0,148
Número de folhas 2º exp.	0,556	0,310
Número de vagens 1º exp.	0,955	-0,180
Número de vagens 2º exp.	0,938	0,092
Biomassa de raiz 1º exp.	-0,146	-0,978
Biomassa de raiz 2º exp.	-0,732	-0,016
Biomassa de 20 sementes 1º exp.	0,861	0,038
Biomassa de 20 sementes 2º exp.	0,808	0,055
Varição explicada	70%	19%

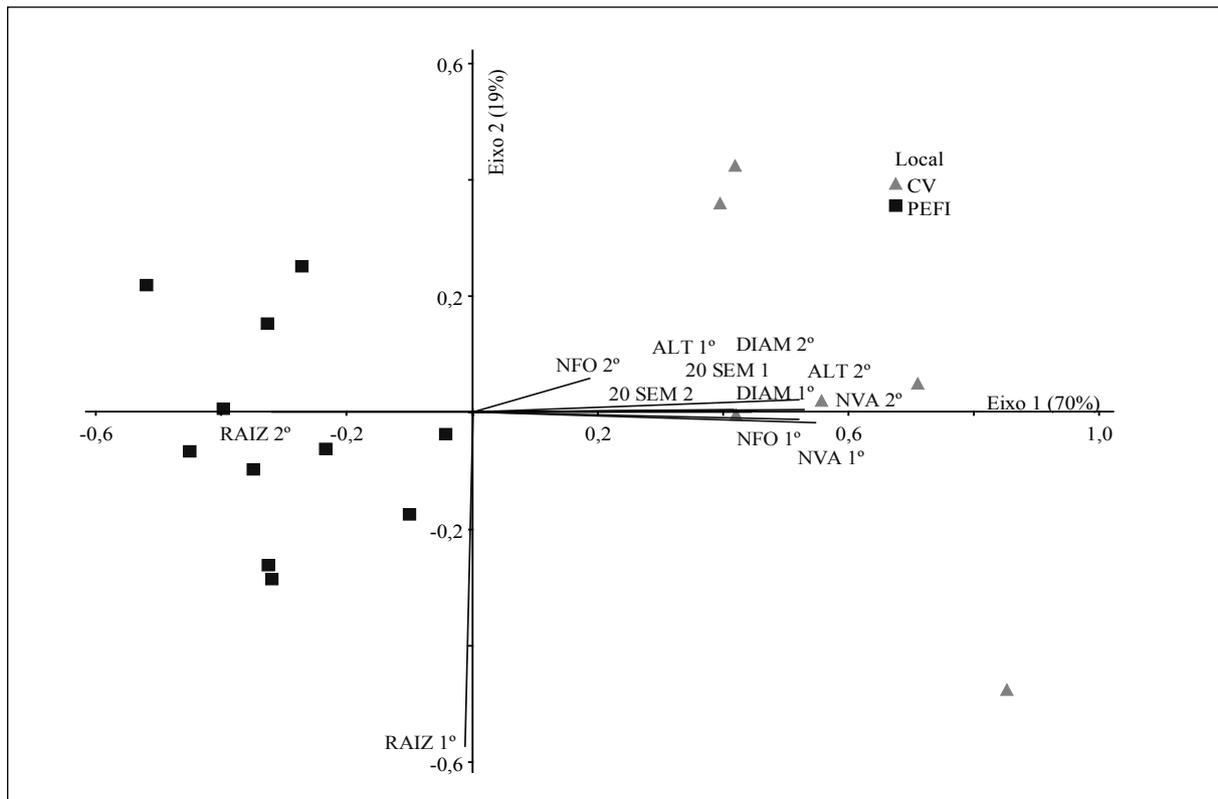
Fonte: dados da pesquisa

A ACP incluiu as variáveis altura, diâmetro do caule, número de folhas e de vagens, biomassa de raiz e de 20 sementes, obtidos dos dois experimentos com *Glycine max* “Tracajá” (Figura 3, na página seguinte).

A análise resumiu 89% da variabilidade conjunta dos dados em seus dois primeiros eixos de ordenação, sendo o Eixo 1 o que mais contribuiu para a análise (70%) (Figura 3, Tabela 2).

Dez variáveis contribuíram consideravelmente ($r > 0,7$) para a ordenação do Eixo 1: resultados de altura e diâmetro do caule do 1º e 2º experimentos, número de folhas do 1º experimento, número de vagens do 1º e 2º experimentos, biomassa de raiz do 2º experimento e biomassa de 20 sementes do 1º e 2º experimentos. Para o Eixo 2, os valores de diâmetro do caule obtidos no 2º experimento e de biomassa de raiz do 1º experimento foram os mais importantes (Tabela 2).

Figura 3 – Análise de componentes principais (ACP) dos resultados de altura (ALT), diâmetro do caule (DIAM), número de folhas (NFO), número de vagens (NVA), biomassa de raiz (RAIZ) e biomassa de 20 sementes (20 SEM), obtidos em dois experimentos (1° e 2°) com plantas de *Gycine max* “Tracajá”, que cresceram sob o ar filtrado da casa de vegetação (CV) e o ar ambiente do Parque Estadual das Fontes do Ipiranga (PEFI)



Fonte: dados da pesquisa.

No lado positivo do Eixo 1 (Figura 3), foram alocadas todas as unidades amostrais que representam a casa de vegetação, sendo estas altamente associadas aos maiores valores de altura, diâmetro do caule, número de folhas e vagens e biomassa de 20 sementes. As unidades amostrais relativas ao PEFI associaram-se a maiores valores de biomassa de raiz, especialmente àqueles obtidos no 2° experimento.

O resultado da ACP corrobora os resultados apresentados na literatura de estudos realizados com outras cultivares de soja e em outros países, que afirmam que o ozônio é capaz de diminuir o crescimento de plantas de soja e induzir a perda de produtividade agrícola (JOUDE *et al.*, 2008; BERNARCCHI *et al.*, 2011; BETZELBERGER *et al.*, 2012; SUN; FENG; ORT, 2014; TAI; MARTIN, 2017; ZANG *et al.*, 2017; BAILEY *et al.*, 2019; SCHAUBERGER *et al.*, 2019). Além disso, a ACP apoia os resultados de biomassa obtidos no

presente estudo (Figura 2). Assim, a cultivar Tracajá, utilizada em culturas de soja no Brasil, também é afetada por altas concentrações de ozônio.

4 Conclusão

O ozônio, por ser altamente oxidante, é capaz de modificar a fisiologia e bioquímica das plantas, alterando seu crescimento e acúmulo de biomassa. Os resultados do presente estudo não mostraram diferenças estatísticas entre o crescimento das plantas de soja “Tracajá” mantidas na casa de vegetação com ar filtrado e aquelas que cresceram no ambiente do PEFI, contaminado por ozônio. Apesar disso, a ACP mostrou forte associação dos valores de altura, diâmetro do caule, número de folhas e de vagens com as unidades amostrais da casa de vegetação com ar filtrado. Diferenças estatísticas foram observadas no acúmulo de biomassa entre as plantas dos dois

tratamentos, sendo que a biomassa das sementes foi a mais afetada. Assim, a produtividade de soja “Tracajá”, cultivada em locais afetados pelo ozônio na região amazônica, possivelmente, vem sendo afetada por esse poluente.

REFERÊNCIAS

- ARNDT, U.; SCHWEIZER, B. The use of bioindicators for environmental monitoring in tropical and subtropical countries. In: ELLENBERG *et al.* (eds). **Biological monitoring: signals from the environment**. Eschborn: Vieweg & Sons, 1991. p. 199-260.
- ARTAXO, P.; RIZZO, L. V.; BRITO, J. F.; BARBOSA, H. M. J.; ARANA, A.; SENA, E. T.; CIRINO, G. G.; BASTOS, W.; MARTIN, S. T.; ANDREAE, M. O. Atmospheric aerosols in Amazonia and land use change: from natural biogenic to biomass burning conditions. **Faraday Discussions**, v. 165, p. 203-235, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1039/c3fd00052d>.
- AVNERY, S.; MAUZERALL, D. L.; LIU, J.; HOROWITZ, L. W. Global crop yield reductions due to surface ozone exposure: 1. Year 2000 crop production losses and economic damage. **Atmospheric Environment**, v. 45, n. 13, p. 2284-96, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.11.045>.
- BAILEY, A.; BURKEY, K.; TAGGART, M.; RUFTY, T. Leaf traits that contribute to differential ozone response in ozone-tolerant and sensitive soybean genotypes. **Plants**, v. 8, n. 7, p. 235, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants8070235>.
- BETZELBERGER, A. M.; YENDREK, C. R.; SUN, J.; LEINSER, C. P.; NELSON, R. L.; ORT, D. R.; AINSWORTH, E. A. Ozone exposure response for U.S. soybean cultivars: linear reductions in photosynthetic potential, biomass, and yield. **Plant Physiology**, v. 160, n. 4, p. 1827-1839, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.112.205591>.
- BULBOVAS, P.; SOUZA, S. R.; ESPOSITO, J. B. N.; MORAES, R. M.; ALVES, E. S.; DOMINGOS, M.; AZEVEDO, R. A. Assessment of the ozone tolerance of two soybean cultivars (*Glycine max* cv. Sambaíba and Tracajá) cultivated in Amazonian areas. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 21, p. 10514-10524, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-014-2934-4>.
- BULBOVAS, P.; SOUSA, S. R.; MORAES, R. M.; LUIZÃO, F.; ARTAXO, P. Plântulas de soja ‘Tracajá’ expostas ao ozônio sob condições controladas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 5, p. 641-46, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007000500005>.
- CETESB. COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. Qualidade do ar no Estado de São Paulo: série relatórios 2016. São Paulo: CETESB, 2009. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/publicacoes-relatorios/>.
- CETESB. COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. Qualidade do ar no Estado de São Paulo: série relatórios 2017. São Paulo: CETESB, 2017. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/publicacoes-relatorios/>.
- DAFRÉ-MARTINELLI, M.; NAKAZATO, R. K.; DIAS, A. P. L.; RINALDI, M. C. S.; DOMINGOS, M. The redox state of Ipomoea nil ‘Scarlet O’ Hara’ growing under ozone in a subtropical area. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 74, n. 6, p. 1645-1652, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2011.06.001>.
- DIAS, A. P. L.; DAFRÉ, M.; RINALDI, M. C. S.; DOMINGOS, M. How the redox state of tobacco ‘Bel-W3’ is modified in response to ozone and other environmental factors in a sub-tropical area? **Environmental Pollution**, v. 159, n. 2, p. 458-465, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.10.020>.
- FISHMAN, J.; CREILSON, J. K.; PARKER, P. A.; AINSWORTH, E. A.; VINING, G. G.; SZARKA, J.; BOOKER, F. L.; XU, X. An investigation of widespread ozone damage to the soybean crop in the upper Midwest determined from ground-based and satellite measurements **Atmospheric Environment**, v. 44, n. 18, p. 2248-2256, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.01.015>.
- FUHRER, J.; SKÄRBY, L.; ASHMORE, M. R. Critical levels for ozone effects on vegetation in Europe. **Environmental Pollution**, v. 97, n. 1-2, p. 91-106, 1997. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(97\)00067-5](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(97)00067-5).
- HODGSON, A. K. *et al.* Near-field emission profiling of tropical forest and Cerrado fires in Brazil during SAMBBA 2012. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 18, p. 5619-5638, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5194/acp-18-5619-2018>.
- MELLO FILHO, O. L.; SEDIYAMA, C. S.; MOREIRA, M. M.; REIS, M. S.; MASSONI, G. A.; PIOVESAN, N. D. Grain yield and seed quality of soybean select for high protein content. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 5, p. 445-451, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2004000500006>.

SCHAUBERGER, B.; ROLINSKI, S.; SCHAPHOFF, S.; MÜLLER, C. Global historical soybean and wheat yield loss estimates from ozone pollution considering water and temperature as modifying effects. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 265, p. 1-15, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.11.004>.

SUN, J.; FENG, Z.; ORT, D. R. Impacts of rising tropospheric ozone on photosynthesis and metabolite levels on field grown soybean. **Plant Science**, v. 226, p. 147-161, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.plantsci.2014.06.012>.

TAI, A. P. K.; MARTIN, M. V. Impacts of ozone air pollution and temperature extremes on crop yields: Spatial variability, adaptation and implications for future food security, **Atmospheric Environment**, v. 169, p. 11-21. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.09.002>.

VAN MARLE, M. J. E. ; FIELD, R. D. ; VAN DER WERF, G. R. ; WAGT, I. A. E. ; HOUGHTON, R. A. ; RIZZO, L. A. ; ARTAXO, P. ; TSIGARIDIS, K. Fire and deforestation dynamics in Amazonia (1973–2014), **Global Biogeochemical Cycles**, v. 31, n. 1, p. 24-38, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016GB005445>.