

**CENTRO UNIVERSITÁRIO SÃO JOSÉ**  
**CURSO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS**

MARCOS PAULO GONÇALVES DA SILVA

PROFESSOR - ORIENTADOR DANIEL MEDINA CORRÊA SANTOS E  
PROFESSORES - COORIENTADORES LUCIENE CAMPOS SÃO LEÃO E DANIEL  
DE OLIVEIRA LEAL

**O IMPACTO DO AUMENTO DE CO<sub>2</sub> NO METABOLISMO DE PLANTAS C<sub>3</sub> E C<sub>4</sub>**

Rio de Janeiro

2023.2

## **O IMPACTO DO AUMENTO DE CO<sub>2</sub> NO METABOLISMO DE PLANTAS C<sub>3</sub> E C<sub>4</sub>**

### **THE IMPACT OF INCREASED CO<sub>2</sub> ON THE METABOLISM OF C<sub>3</sub> AND C<sub>4</sub> PLANTS**

#### **Nome do autor**

Marcos Paulo Gonçalves da Silva graduando do Curso de Ciências Biológicas do Centro Universitário São Jose.

#### **Orientadores**

Prof. Dr. Daniel Medina Corrêa Santos do Centro Universitário São José.

Prof. Dra. Luciene Campos São Leão do Museu Nacional/ Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Prof. Dr. Daniel de Oliveira Leal do Museu Nacional/ Universidade Federal do Rio de Janeiro.

#### **RESUMO**

O CO<sub>2</sub>, junto com outros gases, é responsável pela obstrução da reflexão dos raios ultravioletas transmitidos pelo sol, os quais permanecem retidos na atmosfera e assim são absorvidos pela superfície terrestre. A alta concentração desses compostos tem acarretado diversos problemas para o globo, como o efeito estufa antropogênico e o aquecimento global. Por outro lado, por ser um componente indispensável para processo de fotossíntese, a alta concentração deste composto pode impactar no metabolismo e biomassa de plantas. Dessa forma, o estudo tem como objetivo descrever como as plantas dos grupos C<sub>3</sub> e C<sub>4</sub> respondem em função do aumento na concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera, por meio de levantamentos de artigos científicos, publicados entre os anos 2000 a 2022, tendo como palavras chaves “efeito estufa”, “gases do efeito estufa”, “CO<sub>2</sub>”, “plantas C<sub>3</sub>” “plantas C<sub>4</sub>” e “fotossíntese”, na base de dados do Google acadêmico e scholar, destacando a ativação e ausência da via de fotorrespiração, além dos fatores condicionantes, como a temperatura e recursos hídricos. Com isso, o aumento da emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera pode causar alterações climáticas, elevando a temperatura ambiente a níveis mais altos, assim, reduzindo o ciclo de desenvolvimento e aumentando a respiração em plantas. Em plantas do grupo C<sub>3</sub>, o aumento da concentração deste composto tem impulsionado o processo de conversão de energia química em açúcares simples, aumentando a biomassa da planta, de acordo com experimentos controlados, baseados na concentração de CO<sub>2</sub> anual na atmosfera. No entanto, fatores como a temperatura elevada e falta de recursos hídricos, podem resultar na baixa produtividade em razão da ativação da via de fotorrespiração. Ademais, o desgaste do potencial da RuBisCO e RuBP, enzimas responsáveis pelo processo de fixação do CO<sub>2</sub>, também acaba por se tornar um dos fatores limitantes. Diferentemente das plantas do grupo C<sub>3</sub>, as plantas do tipo C<sub>4</sub> mantém constante suas taxas fotossintéticas, isto é, sem variação significativa no seu crescimento em razão da atuação de uma enzima específica, a PEPcase, a qual apresenta uma maior afinidade com o CO<sub>2</sub>. Tendo nota que as atividades antropogênicas vêm aumentando a emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera e a vegetação tem reduzido as

taxas desse componente gasoso, tanto as plantas que agregam o grupo C3 quanto às C4 são responsáveis pela redução dos níveis de concentração desse composto atmosférico por meio da fotossíntese, e conseqüentemente, ajudam no equilíbrio climático.

**Palavras-chave:** Efeito estufa; Fotossíntese; Dióxido de carbono; Grupos metabólicos de plantas.

## **ABSTRACT**

CO<sub>2</sub>, together with other gases, is responsible for obstructing the reflection of ultraviolet rays transmitted by the sun, which remain retained in the atmosphere and are thus absorbed by the Earth's surface. The high concentration of these compounds has caused several problems for the globe, such as the anthropogenic greenhouse effect and global warming. On the other hand, as it is an indispensable component for the photosynthesis process, the high concentration of this compound can impact the metabolism and biomass of plants. Therefore, the study aims to describe how plants in groups C3 and C4 respond to the increase in the concentration of CO<sub>2</sub> in the atmosphere, through surveys of scientific articles, published between the years 2000 and 2021, with the key words "greenhouse effect", "greenhouse gases", "CO<sub>2</sub>", "C3 plants" "C4 plants" and "photosynthesis", in the Google academic and scholar database, highlighting the activation and absence of the photorespiration pathway, in addition to the conditioning factors, such as temperature and water resources. As a result, increased CO<sub>2</sub> emissions into the atmosphere can cause climate change, raising the ambient temperature to higher levels, thus reducing the development cycle, and increasing respiration in plants. In plants in the C3 group, the increased concentration of this compound has boosted the process of converting chemical energy into simple sugars, increasing the plant's biomass, according to controlled experiments, based on the annual concentration of CO<sub>2</sub> in the atmosphere. However, factors such as high temperature and lack of water resources can result in low productivity due to the activation of the photorespiration pathway. Furthermore, the erosion of the potential of RuBisCO and RuBP, enzymes responsible for the CO<sub>2</sub> fixation process, also ends up becoming one of the limiting factors. Unlike plants in the C3 group, plants of the C4 type maintain their photosynthetic rates constant, that is, without significant variation in their growth due to the action of a specific enzyme, PEPcase, which has a greater affinity with CO<sub>2</sub>. Considering that anthropogenic activities have been increasing the emission of CO<sub>2</sub> into the atmosphere and vegetation has reduced the rates of this gaseous component, both plants that add groups C3 and C4 are responsible for reducing the concentration levels of this atmospheric compound through photosynthesis, and consequently, help in climate balance.

**Keywords:** Greenhouse effect; Photosynthesis; Carbon dioxide; Plant metabolic groups.

## INTRODUÇÃO

O dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) assim como o vapor de água, metano, óxido nítrico, ozônio e clorofluorcarbonetos são gases depositados na atmosfera terrestre responsáveis pela absorção de grande parte da energia ultravioleta transmitida pelo sol, e a sua distribuição na forma de energia infravermelha, mantendo o equilíbrio entre a energia solar transmitida e a refletida (JUNGUES et al., 2018). Esses gases, denominados de gases do efeito estufa (GEE), mesmo em concentrações menores comparado aos outros gases também liberados na atmosfera, como o oxigênio (O<sub>2</sub>), apresentam grande influência sobre problemáticas relacionadas a fenômenos climáticos, como o efeito estufa (PIMENTEL, 2010).

O efeito estufa é um fenômeno natural e importante para a manutenção da vida na terra, pois mantêm a temperatura do planeta habitável as condições de sobrevivência humana. No entanto, com o constante crescimento da atividade industrial desde o ano de 1750, com o uso de máquinas movidas a vapor e de combustíveis fósseis, além do crescimento da agricultura, queima da matéria orgânica, cultivo, desmatamento e geração de energia elétrica, a grande emissão de CO<sub>2</sub>, aerossóis e outros gases têm proporcionado um grande impacto no equilíbrio da atmosfera terrestre, e na temperatura média global, aumentando a quantidade de energia dissipada, resultando no efeito estufa antropogênico e, conseqüentemente o aquecimento global (XAVIER & KERR, 2004; ARTAXO, 2014).

O dióxido de carbono por ser composto químico constituído de dois átomos de oxigênio e um de carbono, pode ser liberado de forma natural através do processo de respiração presente em todos os seres vivos, ou de forma antropogênica, isto é, em virtude da ação humana. Esse gás emitido na atmosfera, assim como o O<sub>2</sub>, permite o que conhecemos como fluxo respiratório, onde por meio destes compostos é possível manter constante a troca gasosa para a manutenção da vida no planeta (MARTINEZ et al., 2015). Ademais, por outro lado, além de fornecer as condições ideais para a sobrevivência dos seres aeróbios, o CO<sub>2</sub> possibilita o fornecimento de energia para as plantas através da fotossíntese, que

visa a conversão da energia luminosa em energia química, atuando na manutenção do meio vegetal (MOREIRA, 2013).

Dessa forma, a alta concentração deste composto tem impactado no desenvolvimento e distribuição de plantas, em específico as plantas que agregam o grupo C3, elevando suas taxas fotossintética e biomassa (WALTER et al., 2010). No entanto, por outro lado, vale ressaltar que mesmo em decorrência do aumento da biomassa em plantas do grupo C3 em virtude da alta concentração de CO<sub>2</sub>, o aumento da emissão deste composto pode elevar a temperatura global a níveis altos, proporcionando um ambiente desfavorável ao seu desenvolvimento, reduzindo o metabolismo dentro deste grupo, diferentemente das plantas do grupo C4, que mesmo sob a alta emissão do CO<sub>2</sub> na atmosfera, a taxa metabólica não sofre alterações significativas em razão de uma enzima específica presente neste grupo, assemelhando-se as plantas do grupo (GONZÁLES, 2014).

Dessa forma, o estudo tem como objetivo descrever como as plantas dos grupos C3 e C4 respondem em função do aumento na concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Procurando destacar a aceleração do processo de carboxilase pela RuBisCO, e a diminuição do processo de oxigenase, além da ativação da via de fotorrespiração ao aumento de temperatura e falta de recursos hídricos em plantas C3, e abranger a ausência de fotorrespiração em plantas C4, em virtude da atividade fotossintética.

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

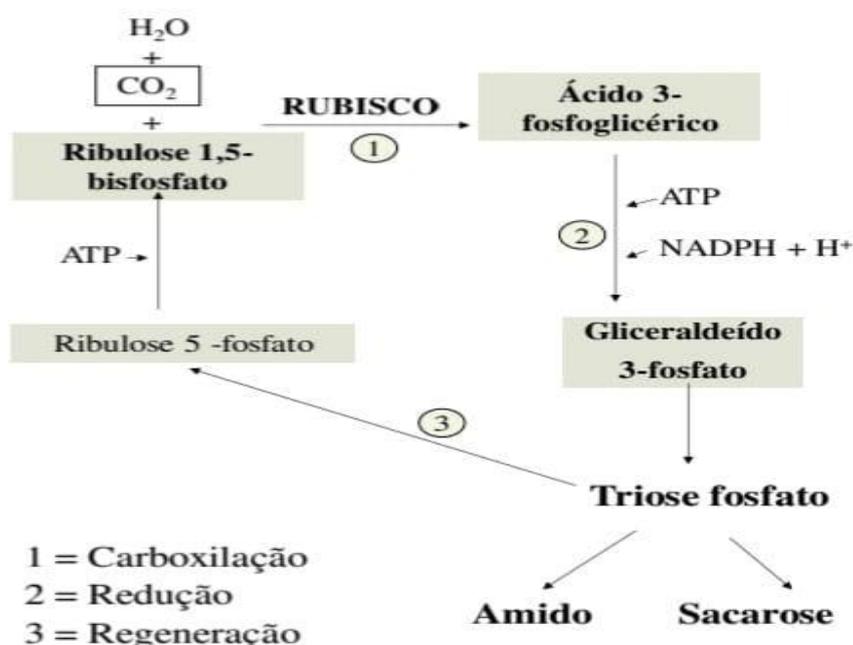
A atmosfera é uma grande massa de ar que circula todo globo terrestre responsável pela manutenção de vida na terra, como a respiração celular e crescimento vegetal (ALMEIDA et al., 2018). Nitrogênio (N), oxigênio (O<sub>2</sub>), argônio (Ar), são alguns dos gases presentes na atmosfera, os quais apresentam-se em quantidades mais elevadas comparadas ao dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), o vapor de água (H<sub>2</sub>O), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), clorofluorcarbonetos (CFCs) e ozônio (O<sub>3</sub>), que também são liberados no meio, porém em menor quantidade (PIMENTEL, 2010). Esses gases mesmo em menores taxas, apresentam grande influência sobre questões envolvendo fenômenos climáticos, como o efeito estufa antropogênico e o aquecimento global (GIODA, 2018).

O efeito estufa, é um fenômeno natural responsável pela dissipação da energia luminosa proveniente do sol em energia infravermelha. Na medida em que a energia solar entra em contato com superfície terrestre, ela vai reemitir essa energia na forma infravermelha para o espaço, a qual será absorvida pelos gases do efeito estufa, que obstruem a passagem, e assim dissipada em todas as direções, com uma parte retida na atmosfera e a outra perdida para o espaço (JUNGES et al., 2018). Essa energia retida cria um “cobertor”, que aquece a terra em dias frios mantendo a temperatura em níveis consideráveis a sobrevivência humana (JUNGES et al., 2018). No entanto, as atividades antrópicas desempenhadas pelo homem, como o desmatamento, produção de energia, atividades industriais, a queima de combustíveis e matéria orgânica, além da agropecuária e cultivo, vem aumentando a concentração desses compostos na atmosfera (XAVIER & KERR, 2004).

A elevada emissão desses compostos atmosféricos, principalmente o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que é responsável por cerca de 25% do efeito estufa antropogênico, tem impactado de forma progressiva a saúde humana, clima e a vegetação do planeta. O acúmulo excessivo desse composto na atmosfera resulta na dissipação excessiva de energia infravermelha, e com isso uma maior obstrução da saída da energia para o espaço, elevando a temperatura terrestre e, conseqüentemente o aquecimento global (FREIRE et al., 2012; MONTALVÃO et al.,

2016). Ademais, o CO<sub>2</sub> assim como o O<sub>2</sub>, permite o que conhecemos como fluxo respiratório, onde por meio destes compostos é possível manter constante a troca gasosa para a manutenção da vida no planeta, que além de fornecer as condições ideais para a sobrevivência dos seres aeróbios possibilita o fornecimento de energia através da fotossíntese (PIMENTEL et al., 2010; MARTINEZ et al., 2015).

A fotossíntese, além de ser um processo fundamental para a manutenção do meio vegetal, é compartimentado em duas etapas cruciais, a etapa fotoquímica, que consiste na conversão da energia luminosa em energia química, e a etapa bioquímica, que consistem no processamento do dióxido de carbono por meio da atuação dos caracteres químicos produzidos na primeira etapa (MOREIRA, 2013). Na fase fotoquímica, a energia luminosa transmitida pelo sol é convertida em moléculas químicas, ATP e NADPH, para atuar no ciclo de Calvin Benson na segunda etapa da fotossíntese, a etapa bioquímica. Nessa etapa, essas moléculas atuam na fosforilação da molécula resultante do processo de fixação do CO<sub>2</sub> pela ribulose 1,5 bifosfato carboxilase/oxigenase (RuBisCO), enzima responsável pelo início do ciclo de Calvin Benson e pela produção de toda a biomassa terrestre, em seu receptor, a ribulose 1,5 bifosfato (RuBP), como podemos observar na figura 1 (GONZÁLEZ, 2014).

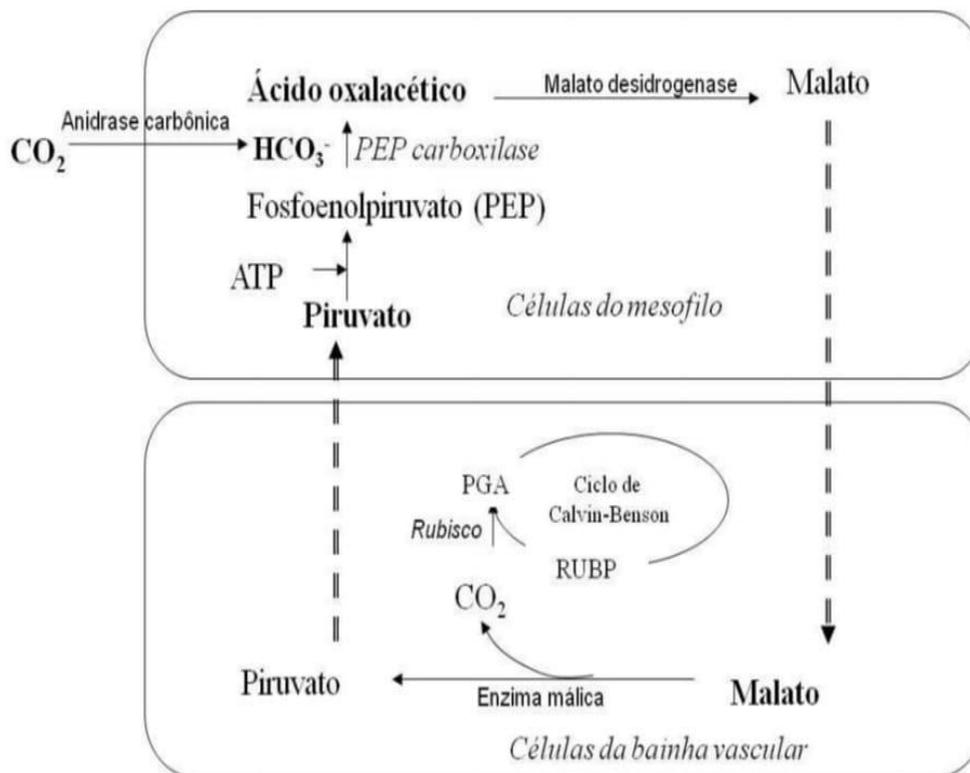


**FIGURA 1** – Etapas do ciclo de Calvin Benson.

**FONTE:** KLUGE et al., 2015

O ciclo de Calvin Benson corresponde a um ciclo fechado, esclarecido durante a década de 1950 pelo bioquímico norte-americano Melvin Calvin, o qual consiste na fixação e redução do CO<sub>2</sub> por meio de um conjunto de reações que visam a síntese de açúcares simples (GONZÁLEZ, 2014). Este ciclo, é compartimentado em três etapas, sendo a primeira etapa definida pela carboxilação do CO<sub>2</sub>, a segunda pela redução PGA (ácido fosfoglicérico) e a última pela regeneração do receptor de RuDP (ribulose-1,5-difosfato) ou RuBP (MOREIRA, 2013; KLUGE et al., 2015). Nesse ciclo o CO<sub>2</sub> é catalisado pela Rubisco, e combinado com RuBP formando dois compostos com três carbonos, o ácido fosfoglicérico ou PGA, a qual, posteriormente, é fosforilada e reduzidas pelos componentes finais da fase fotoquímica, o ATP e NADPH, resultando no glicerídeo-3-fosfato (PGAL) ou triose fosfato, que tem como principal propriedade a regeneração da RuDP para o ciclo contínuo, e a produção de moléculas mais complexas, tais como os lipídeos, sacarose, amido e a glicose (MOREIRA, 2013; KLUGE et al.,2015).

Por outro lado, vale frisar que essa fase vai depender do grupo a qual o organismo se insere, pois apesar da semelhança no desempenhar da primeira etapa da fotossíntese e no comprimento do ciclo de Calvin Benson, plantas com metabolismo C<sub>4</sub>, assim descritas devido a produção de um composto orgânico com 4 carbonos, o ácido oxalacético, são caracterizadas pela atuação de uma enzima catalisadora específica, a PEP carboxilase ou PEPcase e, seu receptor, a PEP ou fosfoenolpiruvato, antes do processo de fixação pela RuBisCO no ciclo de Calvin Benson, caracterizando a via C<sub>4</sub>, como podemos observar na figura 2 (KLUGE et al., 2015).



**FIGURA 2** – Via fotossintética em plantas C4.

**FONTE:** KLUGE et al., 2015

Essa via foi evidenciada pelos cientistas Hatch e Slack no ano de 1966, e com isso, constatou-se que diferentes das plantas do tipo C3, além das células do mesófilo, esse grupo de plantas possuem células vizinhas interligadas a esse meio, as células da bainha vascular (GONZÁLEZ, 2014). Nessa via, O  $\text{CO}_2$  é fixado pela PEP carboxilase no seu receptor nas células mesofílicas, formando um composto com 4 carbonos, o ácido oxaloacético, o qual é reduzido posteriormente a malato pela enzima malato desidrogenase, e em seguida transportado para o interior das células das bainhas onde é descarboxilado e oxidado pela enzima málica, liberando  $\text{CO}_2$ , que é fixado pela RuBisCO, seguindo o padrão de reação das plantas do tipo C3, enquanto a outra parte é convertida em piruvato para a regeneração da PEP mantendo o fluxo contínuo (KLUGE et al., 2015).

A PEPcase, por possuir uma certa capacidade de diferenciação entre o  $\text{CO}_2$  e o  $\text{O}_2$ , acaba por minimizar em níveis consideráveis as chances de ativação da via de fotorrespiração, via caracterizada pela fixação do  $\text{O}_2$ , porém com um custo energético muito mais alto e pouco eficiente em comparação com a fotossíntese

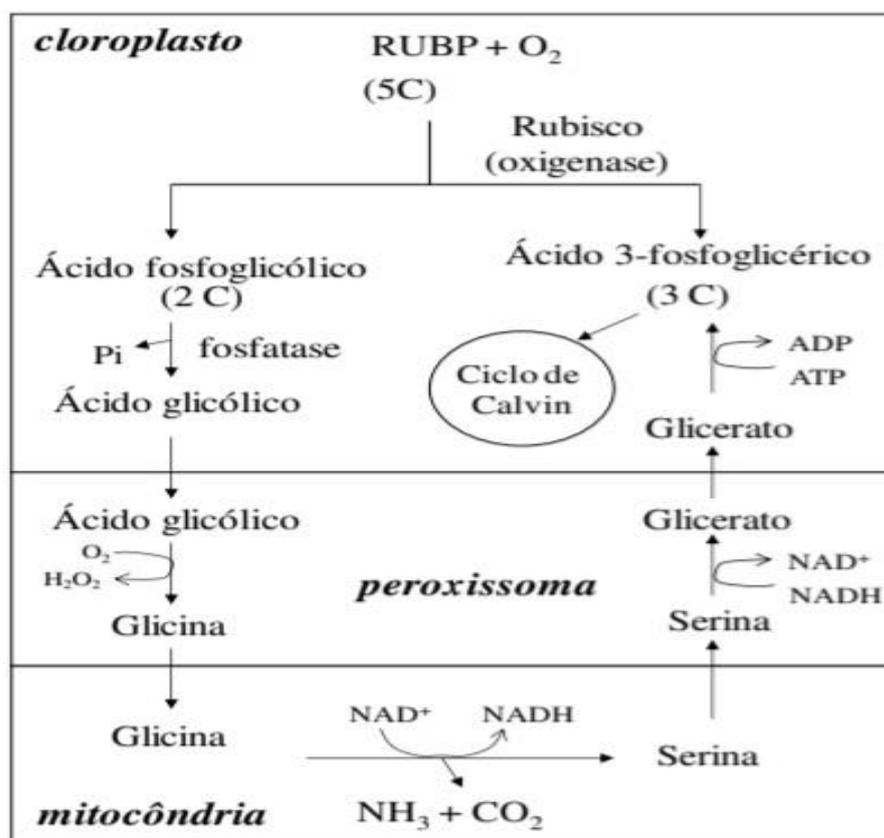
(KLUGE et al., 2015). Diferentemente da RuBisCO, a qual por não apresentar um mecanismo que diferencie o CO<sub>2</sub> do O<sub>2</sub>, ambos os componentes atmosféricos podem ser apresentados a RuDP, iniciando o ciclo da carboxilase, com a fixação do CO<sub>2</sub> e a liberação de O<sub>2</sub>, ou a oxigenase, com fixação do O<sub>2</sub> e a liberação do CO<sub>2</sub>, isto é a via de fotorrespiração, principalmente no grupo C3 (MOREIRA, 2013; ALMEIDA et al., 2020, pág. 107 e 108).

As espécies de plantas que agregam o grupo C3 representam a maior porcentagem de toda vegetação terrestre, e com isso, é a população mais numeroso em comparação as demais, em razão do seu constante crescimento sob a alta emissão de CO<sub>2</sub> no ambiente (MARTINEZ et al. 2015). Dessa forma, este grupo de plantas, que formam um composto orgânico com 3 carbono, tendem a responder de forma mais eficiente quando expostas a alta concentração de CO<sub>2</sub>. No entanto, para que este grupo possa desenvolver-se em meio a alta concentração deste composto atmosférico de forma significativa necessitam de um meio adaptado para o seu desenvolvimento, com o clima úmido e temperaturas amenas, em vista que, em ambientes secos e com temperaturas elevadas, a taxa metabólica dessas plantas tendem a diminuir com a aumento da fotorrespiração (LI et al., 2015).

Em plantas do grupo C4, a taxa metabólica continuará a mesma em ambientes com alta temperatura, pois são caracterizadas por apresentarem uma enzima específica para a fixação do CO<sub>2</sub> e por um melhor desenvolvimento sobre ambientes áridos e som temperaturas altas, mantendo elevada a razão CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>, eliminando a fotorrespiração (BUCKERIDGE et al., 2016). Ademais, essas plantas também são caracterizadas pela separação espacial entre as fases, onde as reações dependentes da luz acontecem nas células do mesófilo e o ciclo de Calvin Benson nas bainhas do feixe vascular, mantendo suas taxas fotossintéticas constante, inibindo a fotorrespiração nesse grupo (MOREIRA, 2013).

A fotorrespiração é uma via metabólica assim como a fotossíntese, no entanto, somente é ativada quando a concentração de O<sub>2</sub> é maior que a de CO<sub>2</sub> no interior dos cloroplastos e, envolve os peroxissomas e as mitocôndrias no processo. A ribulose-1,5-bifosfato carboxilase/oxigenase por não apresentar um mecanismo que diferencie o CO<sub>2</sub> do O<sub>2</sub>, ambos os componentes atmosféricos podem ser apresentados a RuDP, iniciando o ciclo da carboxilase, com a fixação do CO<sub>2</sub> e a

liberação de O<sub>2</sub>, ou a oxigenase, com fixação do O<sub>2</sub> e a liberação do CO<sub>2</sub>, como podemos observar na figura 3 (MOREIRA, 2013; ALMEIDA et al., 2020, pág. 107 e 108). Além desse fator, a temperatura também influencia de certo ponto no início da oxigenase, em vista que dependo de qual grupo a espécie de planta se enquadra, temperaturas superiores a 28° C acaba por beneficiar o início da via de fotorrespiração (MARENCO et al., 2014).



**Figura 3** – Via metabólica da fotorrespiração

**Fonte:** (KLUGE et al.,2015).

Na medida em que o O<sub>2</sub> é fixado pela RuBisCO, duas moléculas são geradas, uma com três carbonos, o ácido fosfoglicérico que é convertido em açúcares e RuBP para o ciclo contínuo, e uma com dois carbonos, o ácido fosfoglicólico. Essa molécula com dois carbonos não pode ser fixada no ciclo de calvin, e com isso, dentro dos cloroplastos esse composto é dividido ácido glicólico e fosfato, que posteriormente é transportado para o interior dos peroxissomos, onde pode ser completamente reduzido ou transformado em glicina por transaminação,

em razão do O<sub>2</sub> absorvido nesse ambiente. Essa glicina é transportada dos peroxissomos para as mitocôndrias, onde temos a junção de duas dessa mesma molécula, resultando em uma molécula de serina com a liberação do CO<sub>2</sub> para o meio no processo. Sob a forma de serina, esse composto pode adentrar o metabolismo dos aminoácidos, ou pode ser convertido em glicerato, sendo estes, posteriormente fosforilado nos cloroplastos, e retornar o ciclo de Calvin Benson (MOREIRA, 2013; KLUGE et al., 2015).

As crassuláceas, que correspondem as plantas CAM, assim como as C<sub>4</sub>, também são caracterizadas pela ausência da ativação desta via, isto é, a via de fotorrespiração, e isso, é decorrente por meio da atuação da enzima PEP carboxilase e, também por apresentarem um melhor desempenho sob climas áridos com temperaturas elevadas (ALMEIDA et al., 2020). No entanto, apesar da semelhança bioquímica entre estes grupos, as plantas CAM ao invés de separarem as reações dependentes de absorção do CO<sub>2</sub> no espaço como as plantas do grupo C<sub>4</sub> fazem, elas separam no tempo, fixando o CO<sub>2</sub> durante a noite através dos estômatos, onde a incidência de calor é menor, e durante o dia, para não perder água para o meio, tornando esse grupo ainda mais eficiente para lidar com a perda de água. Essa estrutura de troca gasosa, os estômatos, é fechada, em virtude da elevação da temperatura, e o gás no interior dos cloroplastos é descarboxilado iniciando o ciclo de Calvin e evitando a ativação da via de fotorrespiração (MOREIRA, 2013; KLUGE et al., 2015).

## **METODOLOGIA**

Para o desenvolvimento da pesquisa utiliza-se da metodologia de abordagem qualitativa (PEREIRA et al., 2018), cujos procedimentos favorecem os objetivos propostos, por meio da revisão literária de artigos científicos relativos ao processo de fotossíntese, gases do efeito estufa e o impacto do aumento das emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera e no metabolismo de plantas.

Dessa forma, ao longo do ano de 2023, foi realizado levantamentos de artigos científicos, entre os anos de 2000 e 2021, na base de dados eletrônicos do Google acadêmico e scholar, por meio de palavras chaves como “efeito estufa”, “gases do efeito estufa”, “CO<sub>2</sub>”, “plantas C3” “plantas C4” e “fotossíntese”.

Os dados obtidos dos trabalhos selecionados foram estruturados e dissertados de forma abrangente, clara e objetiva, respeitando o tema proposto, além de utilizar imagens ilustrativas dos ciclos de carboxilase e oxigenasse, além da elaboração de uma tabela comparativa entre os grupos de plantas para elucidar a compreensão dos resultados.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao longo do estudo foram levantados 29 artigos científicos acadêmicos, coerentes com os objetivos propostos, além de consultas em sites sobre a emissão de CO<sub>2</sub>, como o instituto de energia e meio ambiente, o international energy agency (IEA) e o country economy. Nos quais, dentre os materiais consultados, os assuntos pertinentes abordavam a esquematização do ciclo fotossintético nos diferentes grupos metabólicos de plantas, além da caracterização dos mesmo e, como respondem em decorrência do aumento na concentração do CO<sub>2</sub>. Ademais, além disso, também foram selecionados artigos que abordassem temáticas sobre fenômenos climáticos, emissão de gases do efeito estufa, efeito estufa antropogênico e experimentos com plantas do grupo C3 e C4.

Com isso, foi elaborado uma tabela com as principais características dos grupos metabólicos, C3 e C4, além do grupo CAM, como objetivo de tornar claro os pontos que favorecem ou não o aumento da produtividade em plantas do grupo C3 em relação ao aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera e, também elucidar a baixa variabilidade na biomassa de plantas do grupo C4 em decorrência de fatores fisiológicos, como podemos observar na tabela 1.

**Tabela 1** – Grupos de plantas C3, C4 e CAM.

Parâmetros	Grupos		
	C3	C4	CAM
Fase bioquímica	Sem separação	Entre as células do mesófilo e as células da bainha vascular.	Entre o dia e a noite
Adaptações	Clima úmido e temperaturas amenas.	Clima árido e quente, com temperaturas elevadas.	Clima extremamente árido e quente, com temperaturas elevadas.
Fotorrespiração	Presente	Ausente	Ausente
Enzima fixadora	Rubisco	PEPcase e Rubisco	PEPcase e Rubisco
Estômatos	Abertos durante o dia e fechados durante a noite	Abertos durante o dia e fechados durante a noite	Fechados durante o dia e abertos durante a noite

**Fonte:** (HAMIM, 2005; KLUGE et al., 2015 & PEIXOTO et al., 2020)

Sendo assim, em plantas do grupo C3 pode-se constatar características que favorecem o seu desenvolvimento sob a alta emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera em comparação com as do grupo C4, que mesmo apresentando uma maior eficiência no processo de fixação do CO<sub>2</sub>, em razão de uma enzima específica, a PEPcase, as taxas metabólicas desse grupo não sofrem alterações significativas, além dos locais de ocorrência do processo de fixação do CO<sub>2</sub>, e as adaptações ambientais.

No entanto, ao decorrer do levantamento, observou-se poucos dados referente ao impacto que o aumento de CO<sub>2</sub> pode resultar no metabolismo de plantas do grupo C4, e isso pode estar relacionado ao fato em que este grupo apresenta características semelhantes ao grupo CAM, sendo ambos pouco afetados pelo aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera, diferentemente das plantas do grupo C3, as quais apresentam variações significativas sob o impacto da alta concentração de CO<sub>2</sub>.

O aumento da produtividade em plantas do grupo C3, parte do princípio da fixação direta pela RuBisCO, a qual sob o acúmulo excessiva de CO<sub>2</sub> na atmosfera tende a aumentar a atividade de carboxilase dentro do ciclo de Calvin Benson, destacado na figura 1, acelerando o processo de fixação, redução e regeneração. Esse efeito decorrente da ação do aumento da concentração de CO<sub>2</sub> sobre as plantas, é conhecido e denominado por muitos autores como fertilização por CO<sub>2</sub>, onde quanto maior a exposição ao CO<sub>2</sub>, maior será o resultado metabólico dentro do grupo (PIMENTEL, 2010).

Por outro lado a eficácia do efeito fertilizante em plantas do grupo C3, vai depender da capacidade de assimilação do CO<sub>2</sub> pela RuBisCO, a qual por ser bifuncional, isto é, apresentar tanto a atividade de carboxilase, quanto à de oxigenase, pode limitar o metabolismo da planta pela incapacidade de distinguir o CO<sub>2</sub> do O<sub>2</sub>, e assim resultar na perda do CO<sub>2</sub> para a fotorrespiração, com a fixação do oxigênio (MOREIRA, 2013; GONZÁLEZ, 2014; KLUGE et al., 2015).

Com isso, o efeito de fertilização por CO<sub>2</sub> momentâneo causado pelo aumento de CO<sub>2</sub> na atmosfera pode ser reduzido ou até mesmo anulado, em vista que a alta concentração deste composto pode impedir o refluxo da energia solar. O aumento da concentração de CO<sub>2</sub> acompanhada do aumentando a temperatura

ambiente, pode resultar na diminuição da disponibilidade de água no solo, ativando a via de fotorrespiração, com o fechamento dos estômatos para evitar a perda de água, e o aumento da concentração e disponibilidade do O<sub>2</sub> no interior dos cloroplastos, diminuindo a carboxilase e conseqüentemente o crescimento das plantas dentro do grupo C<sub>3</sub> (OLIVEIRA et al., 2002; PIMENTEL, 2010; WALTER et al., 2010; MARENCA et al., 2014).

Como o grupo C<sub>3</sub> é caracterizado por apresentar um melhor desempenho sob um ambiente úmido e com temperaturas amenas, ambientes estressantes com temperaturas elevadas e pouca disponibilidade de água, pode contribuir também para a ativação da via de fotorrespiração, fomentando mais um impacto do aumento de CO<sub>2</sub> na atmosfera, a qual pode resultar na elevação da temperatura, e assim reduzir a produtividade neste grupo. Em vista que, plantas cuja via metabólica não seja favorecida pelo meio ofertado, como altas temperaturas e pouca disponibilidade da água, a via da fotorrespiração pode ser ativada em decorrência do fechamento dos estômatos para evitar a perda de água pelo meio (GONZÁLEZ, 2014).

Outro fator muito discutido por outros autores durante o levantamento, é a capacidade de regeneração do receptor da RuBisCO, a RuBP, a qual por alguma interferência na cadeia transportadora de elétrons, ou até mesmo pela incapacidade de catalisar todo o processo por meio da ineficiência em distinguir ambos os componentes atmosféricos pela ribulose-1,5-bifosfato carboxilase/oxigenase, pode não concluir sua fase regenerativa, e com isso, as taxas metabólicas podem ser reduzidas por não acompanhar a aceleração do processo de carboxilase (PIMENTEL, 2011 apud PIMENTEL et al., 2007; GALMÉS et al., 2016).

Ao contrário das plantas do tipo C<sub>3</sub>, as plantas do Grupo C<sub>4</sub>, garantem uma maior eficiência no processo de fixação pela RuBisCO, sendo o grupo que melhor lida com a alta concentração de CO<sub>2</sub>. Essa eficiência somente foi possível devido ao desenvolvimento de uma enzima específica, a PEP carboxilase, a qual fará a seleção do componente atmosférico nas células do mesófilo, antes da fixação pela RuBisCO, no ciclo de Calvin Benson, nas células da bainha vascular, impedindo a ativação da via de fotorrespiração neste grupo, garantindo uma maior eficiência fotossintética (KLUGE et al., 2015).

No entanto, apesar da ausência de fotorrespiração e eficiência fotossintética destacada neste grupo, C4, o resultado metabólico continua constante mesmo sob a alta emissão de CO<sub>2</sub>. Sendo assim, seus resultados metabólicos não vão sofrer variações significativas, uma vez que a PEPcase precisa selecionar o composto para depois ser finalmente convertido em açúcares dentro do ciclo de Calvin Benson. Alguns estudos apontam que algumas espécies desse grupo podem resultar na ativação da via de fotorrespiração, mas a variabilidade de ocorrência é mínima assim como o aumento das taxas fotossintéticas desse grupo sob a alta exposição ao CO<sub>2</sub> (BRAGA et al., 2021). Sendo assim, é necessário mais estudo com este grupo para validar esses dados e entender melhor a sua rota.

A fotorrespiração por ser uma via que envolve mais de uma organela no processo fixação do O<sub>2</sub> e, conversão da molécula resultante em um composto que possa ser fixado pela RuBisCO, gasta muita energia no processo com objetivo recuperar parte do CO<sub>2</sub> perdido para a oxigenasse, reduzindo as taxas metabólicas e a biomassa da planta no processo. Tanto a oxigenase quanto a carboxilase, são processos que necessitam da ação da RuBisCO como mediadora, já que ela não apresenta um mecanismo que diferencie o CO<sub>2</sub> do O<sub>2</sub>, podendo ambos os componentes atmosféricos serem apresentados a RuBP (MOREIRA, 2013; AIMEIDA et al., 2020, pág. 107 e 108).

Em plantas C4, essa via não é tão evidente como nas do tipo C3, e isto está relacionado ao fato de que as plantas desse grupo apresentam uma enzima específica, a PEP carboxilase, a qual possui uma certa afinidade com o CO<sub>2</sub>, impedindo o início da via de fotorrespiração, além de um sistema adaptado à economia de água, com a abertura mínima dos estômatos, durante períodos de alta temperatura e pouca incidência pluviométrica (GONZÁLEZ, 2014). No entanto, alguns estudos apontam que algumas espécies desse grupo podem resultar na ativação da via de fotorrespiração, mas a variabilidade de ocorrência é mínima assim como o aumento das taxas fotossintéticas desse grupo sob a alta exposição ao CO<sub>2</sub> (BRAGA et al., 2021).

Com isso, podemos destacar que o grau de variação nos resultados metabólicos e o aumento da produtividade em relação a emissão de CO<sub>2</sub>, vai depender da via que a planta segue, podendo estas apresentar um aumento na produtividade, como as do grupo C3, ou manter constante suas taxas, como as do

grupo C4. De acordo com o levantamento literário de Pimentel de 2010, com base nos dados de Long em 2006, a produtividade prevista em ambiente controlado seria de 38 % em arroz, trigo e soja, plantas do grupo C3, enquanto em campo o aumento é de 13% na produtividade desses grupos.

Essas partículas de CO<sub>2</sub> emitidas sob a atmosfera em alta concentração, não somente pode impactar no metabolismo de plantas, mas também pode resultar em alterações climáticas para o globo, como o efeito estufa, aquecimento global, e chuvas constante, em virtude do crescimento das atividades humanas decorrentes desde o início do período antropoceno, onde o homem começou a ser o principal responsável pelo desequilíbrio do ecossistema, proporcionado um ambiente desfavorável a vida (ARTAXO, 2014; ALVES, 2020). Ademais, o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> também pode ter um impacto direto na saúde humana, impedindo o fluxo através do nariz e na garganta, além deixar o indivíduo propício à instalação de doenças imunológicas, como Gripe, rinite alérgica, bronquite e asma, ou até mesmo resultar em danos mais internos, como o bloqueio dos alvéolos pulmonares e Pulmão (MONTALVÃO et al., 2016).

No ano de 2020 foi constatado uma queda de 5,8 % da emissão de dióxido de carbono na atmosfera devido a pandemia, em razão da baixa demanda por petróleo, carvão mineral e outras formas de energia não renováveis, dando espaço ao uso de fontes mais naturais, diminuindo as taxas de emissão em níveis consideráveis, mas, no entanto, apesar desta queda nas emissões globais de CO<sub>2</sub>, a taxa energética permaneceu a mesma, equivalente a 31, 5 Gt, levando a uma maior concentração desse composto químico anual na atmosfera de 412, 2 no ano de 2020 (IEA, 2021). Porém é suficiente para se constatar que as atividades humanas e industriais contribuem para o aumento da emissão deste composto na atmosfera.

Ademais, segundo o portal de dados econômicos e demográficos, country economy (2020), no Brasil, também se observa uma queda considerável neste mesmo período pandêmico, onde foram registrados cerca de 451,8 megatons de CO<sub>2</sub> lançados na atmosfera no ano de 2020, com uma queda de 25,1 megatons, o que é equivalente a uma taxa de 5,28% em relação a 2019, colocando o Brasil entre os países que mais poluem por CO<sub>2</sub> mesmo em decorrência dessa queda. Em 2021 dados do sistema de estimativas de gases do efeito estufa (SEEG) do

observatório do clima destaca um aumento de 12,2 % na emissão de CO<sub>2</sub> no Brasil em comparação com 2020, após o período pandêmico, com o retorno das atividades antrópicas crescente, como a alta no desmatamento e nas atividades nos setores da economia (IEMA, 2022).

Dessa forma, torna-se necessário o uso de tecnologias que atuem na redução do CO<sub>2</sub>, com o objetivo de amenizar a emissão em excesso desse gás. No entanto, a eficiência desses meios tecnológicos requer um maior período de desenvolvimento e investimento, com isso, a utilização de meios naturais para amenizar a redução deste composto químico tem se tornado uma alternativa viável nos dias atuais, pois as plantas atuam como o principal meio de quebra da molécula de CO<sub>2</sub>, assimilando o carbono em benefício próprio para o enriquecimento da biomassa vegetal, liberando o oxigênio no meio, reduzindo assim, a taxa de emissão dos gases do efeito estufa na atmosfera (HUANG et al., 2014).

O feijão, assim como a soja, trigo e arroz são plantas cujo a via metabólica requer um meio favorável ao seu desenvolvimento, onde as taxas de temperatura sejam amenas, e haja uma grande disponibilidade de água para seu cultivo, caracterizando o grupo C<sub>3</sub> (BRAGA et al., 2021). Diferentemente do milho, que assim como a cana de açúcar, são grandes exemplares de organismos cuja via metabólica está bem adaptada a climas com temperaturas elevadas, sendo estes integrantes do grupo C<sub>4</sub> e, assumindo um papel fundamental na adequação do ambiente para o cultivo de cana de açúcar, pois por serem bastante competitivos, evita o péssimo desempenho da cana sob o alto impacto de períodos chuvosos (BARROS & CALADO, 2014; SANTOS et al., 2020).

A partir disso, é evidente que o impacto do aumento do CO<sub>2</sub> resulta em uma maior resposta por parte das plantas que agregam o grupo C<sub>3</sub>, pois as características metabólicas e ambientais destacadas na tabela 1, favorecem o seu desenvolvimento. No entanto, a produtividade em espécies arbóreas e de gramíneas, o potencial de crescimento é muito maior que as leguminosas e arbustivas deste grupo (PIMENTEL, 2010 apud. PIMENTEL et al., 2007). Mas, mesmo assim, ainda apresenta variações muito mais significativas do que as espécies do grupo C<sub>4</sub> e, isso pode ser evidenciado por uma série de experimentos realizados em espécies pertencentes a cada grupo.

Esses experimentos, partem do princípio da submissão de determinadas espécies a exposição ao CO<sub>2</sub> ambiente e/ou duplicado, como podemos destacar no experimento realizado na Embrapa Semiárido de Petrolina com o meloeiro amarelo, planta do grupo C3. Neste experimento, foram utilizadas estufas de topor aberto para cultivo das plantas com a adição de CO<sub>2</sub> ambiente e, com tratamento de 550 ppm de CO<sub>2</sub>, entre março e abril de 2014, onde o clima da região é muito quente e semiárido, mas com fortes chuvas no verão, a fim de observar a variabilidade dessa espécie em função do estresse local. As taxas fotossintéticas foram maiores em plantas sob o tratamento de CO<sub>2</sub> com 550 ppm, no entanto, o crescimento dessas plantas foi afetado negativamente pelo aumento da temperatura resultante do ambiente. Para evidenciar o crescimento das mudas de meloeiro sob a alta concentração de CO<sub>2</sub>, o comprimento das raízes e da área foliar, além do número de folhas e peso do material foram as variáveis analisadas (ARAÚJO et al., 2015).

Ademais, vale ressaltar que além desse experimento que visa a avaliação do crescimento desse grupo sob o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> em um ambiente climático variável, outros consideram a abordagem de tratamentos por meio de indução ao estresse hídrico, com o objetivo de obter dados de variabilidade nas respostas desses grupos metabólicos, como o experimento realizado pelo departamento de Biologia, Bogor Agricultural University, envolvendo plantas do grupo C3 e C4. Esse experimento evidenciou a resposta desses grupos sob a alta concentração de CO<sub>2</sub>, bem como seu desenvolvimento em ambientes com características diferentes, através da análise comportamental de espécies de plantas do grupo C3, o trigo e couve, e as do grupo C4, a *Echinochloa crusgalli*, descrita por P. Beauv., e a *Amaranthus caudatus*, descrita por Carlos Linnaeus, a alta concentração do CO<sub>2</sub>, e como estas respondem ao mesmo sob estresse hídrico (HAMIN, 2005).

Dessa forma, durante o moderado período de seca do experimento evidencia-se que as espécies do tipo C3 apresentam um baixo rendimento em comparação às do tipo C4, sendo esta prevalecida pelo ambiente. No entanto, sob o dobro de CO<sub>2</sub> e temperatura ambiente, as taxas fotossintéticas das espécies do tipo C3 tendem a ser maiores que as do tipo C4. Em relação a contundência estomática, às C4 apresentam um menor desempenho em relação às do tipo C3 tanto em CO<sub>2</sub>

ambiente quanto em CO<sub>2</sub> duplicado, como são plantas que não realizam a abertura estomática total, a taxa de CO<sub>2</sub> não influencia em seu desempenho. Por outro lado, em ambientes bem irrigados a contundência estomática diminui em todas as espécies (HAMIM, 2005).

A Contundência estomática, é a capacidade que as folhas possuem em realizar trocas gasosas com o meio, sendo assim, na medida em que os estômatos se encontram abertos, temos fluxo de CO<sub>2</sub> e vapor de água para o ambiente (HAMIM, 2005). Como a temperatura e a disponibilidade hídrica, além da concentração de CO<sub>2</sub>, também são fatores que influenciam no resultado metabólico dos vegetais, as plantas aumentam o processo fotossintético, na medida em que reduzem condutância estomática (ARAÚJO et al., 2015 apud Ainsworth e Rogers, 2007). Com isso, a abertura e fechamento dos estômatos está intimamente relacionado ao estado de hidratação da folha, em vista que ele controla a entrada e saída do CO<sub>2</sub>, em virtude das trocas gasosas com o meio (COSTA & MORENCO, 2007).

Plantas do tipo C<sub>3</sub> em condições de extremo calor tendem a fechar os estômatos durante o dia para evitar a perda de água, e isso acaba impedindo o processo de difusão do CO<sub>2</sub>, onde o dióxido de carbono se difunde para dentro e o O<sub>2</sub> para fora. Com isso, quando os estômatos são fechados, o O<sub>2</sub> fica retido no interior das folhas, aumentando sua concentração em relação ao CO<sub>2</sub>, sendo assim fixado pela RuBisCO, a qual sob alta temperatura tem uma menor capacidade de distinguir estes compostos, assimilando o O<sub>2</sub> de forma exacerbada, elevando a fotorrespiração. Diferentemente das plantas do tipo C<sub>4</sub>, as quais estão bem adaptadas a altas temperaturas, pois em decorrência da PEPcase, não necessitam manter os estômatos abertos com frequência, evitando a perda de água, e assim evitando a fotorrespiração.

Um estudo sobre o teor fotossintético e hídrico realizado por Oliveira, e os demais autores, Bovi, Machado, entre outros (2002), em Pupunheira, uma espécie de planta da família das Aceraceae, típicas do estado do Amazonas, destacaram que a falta de disponibilidade de água no solo, isto é, um solo seco, interfere nas taxas de assimilação do CO<sub>2</sub>, assim como no potencial hídrico da folha, reduzindo suas taxas fotossintéticas.

A perda de água é uma das principais problemáticas que interferem no crescimento da planta, principalmente com a abertura frequente das estruturas estomáticas, as quais necessitam manter se abertas em um determinado período para a entrada do CO<sub>2</sub>, fixação do carbono e conversão em glicose. Com isso, as plantas do tipo C<sub>4</sub>, por armazenar uma grande quantidade deste composto atmosférico na bainha vascular por intermédio da enzima PEPcase, evita a perda de água para o meio, eliminando, quase que por completo a fotorrespiração nessa via, pois com o armazenado desse composto em grande quantidade na bainha, a planta fica menos dependente de controlar a abertura e fechamento dos estômatos. Como as plantas do tipo C<sub>4</sub> aproveitam muito mais CO<sub>2</sub> do que as do tipo C<sub>3</sub>, o sistema fotossintético da mesma é mais eficiente, no entanto, observa-se desempenhos relativamente diferentes em relação às duas vias em meio ao ambiente que vivem (BUCKERIDGE et al., 2016)

A eficiência de ambos os grupos, C<sub>3</sub> e C<sub>4</sub>, em relação à conversão de energia luminosa em energia química, também vai depender de outro fator além da disponibilidade de água, o clima a qual está inserido. Estudos como o de Hamin (2005), Buckeridge et al., (2016) e Almeida et al., (2020), evidenciaram que em ambientes mais secos, com intensidade luminosa e temperatura elevada, a via do tipo C<sub>4</sub> respondem de forma mais eficiente, diferentemente das espécies do tipo C<sub>3</sub>, as quais apresentam um melhor desenvolvimento em ambientes mais sombreados, com temperaturas amenas e intensidade luminosa pouco excessiva.

Do ponto de vista fisiológico, as espécies de plantas do tipo C<sub>4</sub> lidam com a água com mais eficiência que as do tipo C<sub>3</sub>. Como destacado, a partir da sua capacidade de armazenar o CO<sub>2</sub> em torna da bainha vascular, o mesmo possui um controle melhor da abertura e fechamento dos estômatos, mantendo os mesmo com uma abertura de médio tamanho, evitando a perda de água durante o dia em que a intensidade luminosa é maior, diferentemente das CAM que apesar de uma abertura de tamanho pequeno dos estômatos, as mesmas mantêm suas estruturas de troca gasosa fechadas durante o dia (LI Y et al., 2015; ALMEIDA et al., 2020, pág. 123 e 124).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo nota que o aumento da emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera deve-se principalmente pela queima de combustíveis fósseis, e que futuramente a tendência é que essa emissão seja ainda maior, em virtude dos avanços tecnológicos, na indústria e agropecuária, torna-se necessário a adoção de métodos que visem a preservação dessa vegetação para a redução desse componente atmosférico, o qual pode não somente causar danos ambientais, mas também afetar a saúde humana, quando emitidos em larga escala, em virtude que as plantas assim como toda a área verde realizam o sequestro desse componente atmosférico reduzindo o impacto do mesmo ao globo.

Com o aumento da emissão de CO<sub>2</sub>, e que alguns grupos de plantas, como as C<sub>3</sub>, tendem a acelerar o processo de fixação pela RuBisCO, resultando em uma maior produtividade, nota-se um grande interesse por parte dos pesquisadores em plantas com fins comerciais durante o levantamento, e isso pode estar relacionado ao fato de interesse econômico no aumento da produção de espécies ornamentais e alimentícias. No entanto, sabe-se que a grande emissão do CO<sub>2</sub> na atmosfera acompanhado de temperatura elevada e pouca disponibilidade de água, resultante da alta concentração de CO<sub>2</sub>, diminui a produtividade dentro deste grupo, com a ativação da via de fotorrespiração, em vista da ausência de uma enzima específica para a fixação do CO<sub>2</sub> e de um sistema fisiológico adaptado a ambientes secos e com pouca disponibilidade de água, como as do tipo C<sub>4</sub>.

As plantas do grupo C<sub>4</sub>, por estarem adaptadas a condições de calor e apresentarem uma enzima específica na fixação do CO<sub>2</sub>, desempenham uma maior eficiência na fixação do CO<sub>2</sub>, no entanto, a variabilidade na biomassa é mínima, pois mesmo sob condições de alta exposição ao CO<sub>2</sub>, assim como condições de estresse, esse grupo não apresentam alterações significativa em seu teor fotossintético, sendo necessário mais estudos com este grupo. Portanto, constata-se que o aumento na concentração de CO<sub>2</sub> aumenta a produtividade em plantas do grupo C<sub>3</sub>, desde que o ambiente esteja favorável ao seu desenvolvimento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, A.; OLIVEIRA, E. R.; SANTOS, J. M.; PEIXOTO, M. & POELKING, V. Livro "Princípios de fisiologia vegetal: teoria e prática" (2020) - Organização Clovis Pereira Peixoto. - 1. ed. - Rio de Janeiro: Pod.

ARTAXO, P. Uma nova era geológica em nosso planeta: o Antropoceno? (2014). Revista USP, São Paulo, n. 103.

ALVES, J. E. D. Antropoceno: a Era do colapso ambiental (2020). Centro de estudos estratégicos da Fiocruz.

ALMEIDA, A.; OLIVEIRA, E. R.; SANTOS, J. M.; PEIXOTO, M. & POELKING, V. Livro "Princípios de fisiologia vegetal: teoria e prática" (2020) - Organização Clovis Pereira Peixoto. - 1. ed. - Rio de Janeiro: Pod.

ARAÚJO et al. Influência do aumento do CO<sub>2</sub> no crescimento inicial e nas trocas gasosas do meloeiro amarelo. 2015. Revista Brasileira de Geografia Física v.08, número especial IV SMUD (2015) 439-453.

BRAGA, F. M.; FERREIRA, E. A.; CABRAL, C. M.; FREITAS, I. C.; MACIEL, J. C.; FREITAS, M. S. S.; ASPIAZU, I.; SANTOS, J. B.; FERNANDES, L. A.; FRAZÃO, L. A.; SAMPAIO, R. A. Crescimento de plantas C<sub>3</sub> e C<sub>4</sub> em resposta a diferentes concentrações de CO<sub>2</sub> (2021). Research, Society and Development, v. 10, n. 7.

BUCKERIDGE, M.; YEPES, A.; PEREIRA DE SOUZA, A.; MARABESI, M. & TONINI, P. P. Comparação entre os sistemas fotossintéticos C<sub>3</sub> e C<sub>4</sub> (2016).

BARROS, J. F. C. & CALADO, J. G. A Cultura do Milho (2014). Departamento de fitotecnia da Universidade Évora, escola de ciências e tecnologia.

COUNTRY ECONOMY. o Brasil aumentou suas emissões de CO<sub>2</sub> (2021).

COSTA, G. F. & MARENCO, R. A. Fotossíntese, condutância estomática e potencial hídrico foliar em árvores jovens de andiroba (*Carapa guianensis*), (2007). Acta amazônica. Vol. 37(2) 2007: 229 - 234.

FREIRE, L. I. F.; GOES, L. F.; ARAGÃO, S. B. C. Efeito estufa: Causas (2012). Universidade de São Paulo. Instituto de química.

GIODA, A. Comparação dos níveis de poluentes emitidos pelos diferentes combustíveis utilizados para cocção e sua influência no aquecimento global (2018). Departamento de Química, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 22451-900 Rio de Janeiro – RJ, Brasil. *Quim. Nova*, v. 41, n. 8.

GONZÁLEZ, F. H. D. Fotossíntese (2014). Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

GALMÉS, J.; CARMEN, H. C.; LAURI, L. & ÜLO N. A compendium of temperature responses of Rubisco kinetic traits: variability among and within photosynthetic groups and impacts on photosynthesis modeling (2016). *Journal of Experimental Botany*, 67(17), 5067–5091.

HUANG, C. H. & TAN, C. S. A review: CO<sub>2</sub> utilization (2014). Department of Chemical Engineering, National Tsing Hua University, Taiwan.

HAMIM. Photosynthesis of C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> Species in Response to Increased CO<sub>2</sub> Concentration and Drought Stress (2005). Department of Biology, Bogor Agricultural University, Jalan Raya Pajajaran, Bogor 16144.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). CO<sub>2</sub> emissions (2021). Global CO<sub>2</sub> emissions rebound by nearly 5% in 2021, approaching the 2018-2019 peak.

INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE. Emissões do Brasil têm maior alta em 19 anos (2022).

JUGUES, A. L.; SANTOS, V. Y.; MASSONI, N. T. Efeito estufa e aquecimento global: Uma abordagem conceitual a partir da física para educação básica (2018). *Experiências em Ensino de Ciências* V.13, No.5.

KLUGE, R. A.; TEZOTTO ULIANA, J. V. & SILVA, P. P. M. Aspectos Fisiológicos e Ambientais da Fotossíntese (2014). *Rev. Virtual Quim.*, 2015, São Paulo.

LI, Y.; MA, X.; ZHAO, J.; XU, J.; SHI, J.; ZHU, X-G.; ZHAO, Y. & ZHANG, H. Developmental Genetic Mechanisms of C<sub>4</sub> Syndrome Based on Transcriptome

Analysis of C<sub>3</sub> Cotyledons and C<sub>4</sub> Assimilating Shoots in *Haloxylon ammodendron* (2015). PLoS ONE, v. 10, n. 2.

MARTINEZ, C. A.; OLIVEIRA, E. A. D.; MELLO, T. R. P.; MARIN, A. L. A. Respostas das plantas ao incremento atmosférico de dióxido de carbono e da temperatura (2015). Revista Brasileira de Geografia Física v. 08, n. VI, São Paulo (SP).

MORENCO, R. A.; ANTEZANA, S. A.; SANTOS, P. R. G.; BRANCO M. A. C.; OLIVEIRA M. F.; SANTOS J. K. Fisiologia de espécies florestais da Amazônia: fotossíntese, respiração e relações hídricas (2014). Rev. Ceres, Viçosa, v. 61.

MONTALVÃO, M. M. S.; XAVIER, L. S.; ALMEIDA, M. S.; GUIMARÃES, T. D.; OLIVEIRA, A. C. A. Efeitos do dióxido de carbono na saúde e no meio ambiente (2016). Faculdade de Alfredo Nasser (Instituto de Ciências da Saúde).

MOREIRA, C. Fotossíntese. Revista de Ciência Elementar (2013). v. 01, n. 01.

OLIVEIRA, M. A. J.; BOVI, M. L. A. MACHADO, E. C.; GOMES, M. A.; HABERMANN, G. & RODRIGUES, J. D. Fotossíntese, condutância estomática e transpiração em Pupunheira sob deficiência hídrica (2002). Scientia Agricola, v.59, n.1, p.59-63.

PIMENTEL, C. Metabolismo de carbono de plantas cultivadas e o aumento de CO<sub>2</sub> e de O<sub>3</sub> atmosférico (2010). Departamento de Fitotecnia, Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 23851-970 Seropédica (RJ).

PEREIRA, A. S.; SHITSUKA, D. M.; PARREIRA, F. J. & SHITSUKA, R. METODOLOGIA DA PESQUISA CIENTÍFICA (2018). 1 Ed. Santa Maria, RS. Universidade Federal de Santa Maria.

SILVA, L. A.; CARVALHO, L. S.; LOPES, W. A.; PEREIRA, P. A. P. & ANDRADE, J. B. Solubilidade e reatividade dos gases (2017). Quim. Nova, Vol. 40, No. 7, 824-832.

SANTOS, J. D. G. J.; SOUZA, K. W.; RAMOS, N. P.; SILVA, C. J.; CORREIA, N. M.; MAY, A. & KINPARA, D. I. Consórcio de Canade-açúcar com Milho: recomendações de manejo para a região do Cerrado (2020). Embrapa, circular técnica 45.

WALTER, L. C.; STRECK, N.A.; ROSA, A. T. & KRUGER, C. A. M. B.; Mudança climática e seus efeitos na cultura do arroz (2010), Santa Catarina.

XAVIER, M. E. R. & KERR, A. S. A análise do efeito em textos paradidáticos e periódicos jornalísticos (2004). Instituto de Física USP, São Paulo SP. Cad. Bras. Ens. Fís., v. 21, n. 3: p. 325-349.