

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
INSTITUTO DE BIOCÊNCIAS  
CAMPUS BOTUCATU

**DESCOBRINDO OS PROCESSOS DA FOTOSSÍNTESE:  
PRODUÇÃO DE MATERIAL DIDÁTICO PARA O ENSINO  
FUNDAMENTAL II  
E MÉDIO**

**Ana Claudia Macedo**

**Orientação:** Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Angelina Batista  
**Co-orientadora:** Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Gisela Ferreira

Relatório de Instrumentação apresentado ao Departamento de Educação do Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista – UNESP, *Campus* de Botucatu, para a obtenção do título de Licenciado em Ciências Biológicas.

BOTUCATU-SP  
2008

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO  
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - CAMPUS DE BOTUCATU - UNESP  
*BIBLIOTECÁRIA RESPONSÁVEL: Selma Maria de Jesus*

Macedo, Ana Cláudia.

Descobrimo os processos da fotossíntese: produção de material didático para o ensino fundamental II e médio / Ana Cláudia Macedo. – Botucatu : [s.n.], 2008.

Trabalho de conclusão (licenciatura – Ciências Biológicas) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências de Botucatu, 2008

Orientadora: Angelina Batista

Co-orientadora: Gisela Ferreira

1. Educação 4.Multimídia interativa - Estudo e ensino 3. Educação ambiental 4. Material didático

Palavras-chave: Fisiologia vegetal; Fotossíntese; Material didático; Kit multimídia

**“Para sempre é muito tempo. O tempo não para! Só a saudade é que faz as coisas pararem no tempo...”.**

**Mário Quintana**

**Dedico esse trabalho aos meus pais, Paulo e Ruth, que me deram força e não deixaram de acreditar em mim apesar de todas as dificuldades. Aos meus irmãos Ana Paula e Eduardo e ao meu cunhado Marcos, que apesar das brincadeiras sei que também acreditaram muito e torceram por mim. E aos meus queridos sobrinhos, Guilherme, Felipe e Fernanda, que me cederam o seu pai e o seu precioso computador para que esse trabalho fosse concluído.**

## **Agradecimentos**

**Agradeço em primeiro lugar a Deus, por estar presente em minha vida em todos os momentos me dando força para seguir em frente.**

**Agradeço a meus pais Paulo e Ruth, aos meus irmãos Ana Paula e Eduardo por acreditarem em mim e me darem força para concluir mais uma etapa em minha vida.**

**Agradeço ao meu querido cunhado Marcos, pela enorme paciência, dedicação, pelos finais de semanas perdidos para que a produção do kit multimídia estivesse concluída e por ter se dedicado ao estudo do tema mesmo não sendo a área em que atua.**

**Agradeço aos meus amados sobrinhos Guilherme, Felipe e Fernanda, por terem cedido o seu precioso computador e por pacientemente terem me emprestado seu pai aos finais de semanas.**

**Agradeço a minha querida co-orientadora Gisela Ferreira, pela paciência, ajuda, ensinamentos e amizade depositados em mim, que proporcionaram a realização deste trabalho.**

**Agradeço a minha orientadora Angelina Batista, pela ajuda e ensinamentos durante toda a elaboração desse trabalho.**

**Agradeço as minhas “irmãs” da república Jaú Serve, por me ajudarem a não desistir e concluir esse último ano da faculdade, pelas conversas, risadas, festas e desabafos. Com certeza as levarei pelo resto da minha vida.**

**Agradeço a minha amada prima Nádia, pela companhia, carinho, risadas e músicas criadas durante esses anos de convivência.**

**Agradeço aos meus amigos de Jaú, que mesmo longe sei que torceram por mim durante toda a faculdade.**

**Agradeço a minha querida amiga Mariah, pelas trocas de experiências, pelas conversas e força durante todo esse período.**

**Agradeço a minha amiga Amanda, pelos ensinamentos e pelo auxílio nos trabalhos desenvolvidos durante todo esse ano para que eu pudesse me dedicar a esse trabalho.**

**Agradeço a minha querida turma XL Biologia Noturno, pelos momentos que passando juntos nesses cinco anos, pelos trabalhos, risadas, viagens, churrascos e festas. Não esquecerei de vocês jamais.**

**Agradeço a UNESP-Botucatu, docentes e funcionários, por me terem me acolhido tão bem assim que cheguei a essa cidade.**

**A todos vocês obrigada mesmo!**

## SUMÁRIO

	<b>PÁG.</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	07
1.1 Origem do trabalho	07
1.2 Objetivos e Justificativa	08
<b>2 DESENVOLVIMENTO</b>	09
<b>2.1 Fotossíntese</b>	09
<b>2.1.1 História da fotossíntese</b>	09
<b>2.1.2 Introdução</b>	10
<b>2.1.3 A natureza da luz</b>	13
<b>2.1.4 Luz e pigmentos</b>	14
<b>2.1.5 Captação de luz e transporte eletrônico</b>	15
5.1 Organização dos sistemas antena de absorção de luz	15
5.2 Componentes estruturais	16
5.3 Transporte de elétrons	16
5.4 Fotofosforilação	18
<b>2.1.6 Ciclo de Calvin</b>	18
6.1 Vias metabólicas	19
<b>6.1.1 Enzima Málica (NADP<sup>+</sup>)</b>	20
<b>6.1.2 Enzima Málica (NAD<sup>+</sup>)</b>	20
<b>6.1.3 Enzima PEP-carboxiquinase</b>	21
<b>2.1.7 Destino dos produtos da fotossíntese</b>	22
<b>2.2 Produção do material</b>	23
<b>3 CONCLUSÃO</b>	24
<b>4 REFERÊNCIAS</b>	25
<b>APÊNDICE</b>	26

The background of the page is a close-up photograph of several green leaves. The leaves are vibrant green and show signs of being eaten by insects, with several small, dark, irregular holes visible on their surfaces. The lighting is bright, creating a slightly overexposed or 'glowing' effect on the leaves, particularly towards the center and right side of the image. The overall composition is dense and textured.

## **Introdução**



# 1 INTRODUÇÃO

Pela educação, em seu sentido mais amplo, aprendemos a viver em sociedade e somos ensinados a pensar, sentir e agir conforme os padrões do grupo social ao qual pertencemos. Na educação escolar, ou seja, no processo de ensino e aprendizagem, especialmente no ensino de Ciências e Biologia, é comum haver a mera transmissão de conhecimentos.

Para isso, são utilizados como recursos didáticos apenas livros e lousa. Nos últimos tempos, pensadores estão tentando mostrar que não é apenas isso que levará à aprendizagem, mas também a participação ativa do aluno nesse processo por meio de atividades práticas que representam importante elemento para a compreensão dos conteúdos, dos conceitos e das noções fundamentais das disciplinas.

Segundo o Ministério da Educação (1999), o estudo de Ciências e Biologia tem por objetivo revelar o fenômeno da vida e suas inúmeras manifestações e o desenvolvimento de competências que permitam aos alunos lidar com os conhecimentos e questioná-los, gerando assim, nos educandos, autonomia para que possam interagir com o mundo e tomar decisões a respeito de tudo o que os cerca.

O estudo das plantas e principalmente da fotossíntese tem fornecido importantes entendimentos a respeito da produção de matéria orgânica no vegetal. Estudos futuros relacionados a plantas poderão solucionar problemas ambientais ou nos ajudar a enfrentar melhor as questões que se colocam hoje como: a poluição, a falta de alimentos, o efeito estufa, entre outros.

## 1.1 ORIGEM DO TRABALHO

No terceiro ano do ensino médio, pela influência de uma ótima professora, apaixonei-me pela botânica, e ao entrar na Universidade já sabia o que queria fazer na minha vida profissional. Já no primeiro ano, ao entrar em contato com morfologia vegetal, confirmei minhas expectativas; tinha encontrado realmente algo que me encantava.

Porém, o contato com a Fisiologia Vegetal demorou um pouco devido à organização do currículo, mas já nas primeiras aulas sabia que essa era a área da Botânica que queria seguir. Imaginar os processos acontecendo nos seres vegetais, às vezes tão pequenos e insignificantes para alguns, era perfeição demais.

A idéia da produção do material didático sobre a fotossíntese veio das aulas dadas na graduação nas quais havia a dificuldade de visualização dos processos vitais que ocorrem no interior do vegetal. Além disso, os livros didáticos no Ensino Fundamental II e Médio tratam, geralmente, de forma superficial esse conteúdo.

A proposta de concretização e visualização do processo de fotossíntese veio com este trabalho de instrumentação para o ensino de Ciências e Biologia. Nele foi produzido material didático sobre os processos da fotossíntese na forma de texto didático e de kit multimídia no qual, por meio de animação, podem ser visualizadas as trocas gasosas e a movimentação das moléculas no interior do cloroplasto vegetal.

Com isso, esperamos que os alunos possam ter uma compreensão melhor de um assunto de difícil visualização.

## 1.2 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA

O presente trabalho teve por objetivo a elaboração de um material didático na área de Fisiologia Vegetal, envolvendo o processo da fotossíntese, destinado a professores de Ciências e Biologia do Ensino Fundamental II e Ensino Médio, respectivamente, além de ampliar os recursos didáticos disponíveis na área de Botânica.

O estudo de fotossíntese tem esbarrado em algumas dificuldades devido ao assunto ser tratado em livros didáticos sem atualização recente e, por isso, não apresentam os últimos os avanços científicos na área de Fisiologia Vegetal. Segundo Souza e Almeida (2002), outro problema é a simplicidade com que o processo da fotossíntese é tratado interferindo na compreensão pelos alunos sobre a importância do assunto e de suas relações com o ambiente a nossa volta.

A proposta se justifica também pela falta de material didático sobre fotossíntese, voltado para o Ensino Fundamental II e Médio na forma de CD no qual os alunos pudessem visualizar os processos como eles acontecem.

A close-up photograph of several green leaves, likely from a plant like a chili pepper, showing signs of insect damage. The leaves are vibrant green with prominent veins. Several small, dark, circular holes are visible on the leaf surfaces, indicating where insects have eaten. The background is dark and out of focus.

***Desenvolvimento***

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 FOTOSSÍNTESE

#### 2.1.1 História da fotossíntese

O importante papel da fotossíntese não havia sido reconhecido até um período relativamente recente. Na Grécia antiga, Aristóteles e outros filósofos observaram que os processos da vida dos animais eram dependentes de alimentos consumidos e acreditavam que as plantas retiravam todo seu alimento do solo (RAVEN et al., 2001).

Há mais de três séculos, o médico Jan Baptist van Helmont (1577-1644), através de um experimento biológico totalmente planejado, forneceu a primeira evidência de que o solo sozinho não tinha capacidade de alimentar as plantas. Ele cultivou em um vaso de cerâmica uma pequena árvore de salgueiro, onde adicionava apenas água. Ao final de cinco anos, o salgueiro havia adquirido um peso de 74,4kg, enquanto o peso do solo havia diminuído apenas 57g. Com isso, van Helmont concluiu que as substâncias das plantas eram produzidas a partir da água e não do solo, no entanto essas conclusões ainda não eram totalmente corretas (RAVEN et al., 2001).

Já no final do século XVIII, o cientista inglês Joseph Priestley (1733-1804) relatou que “acidentalmente havia encontrado um método de restaurar o ar que tinha sido prejudicado pela queima de velas”. Ele colocou um ramo de hortelã (vivo) no ar em que uma vela havia sido consumida e descobriu que outra vela poderia ser acesa nesse mesmo ar. Com isso, ele afirmou que o “agente empregado pela natureza com o propósito restaurador era a vegetação” (RAVEN et al., 2001).

As experiências de Priestley não pararam por aí, logo demonstrou que o ar “restaurado” pela vegetação não era “totalmente inconveniente a um camundongo”. Com os experimentos desse cientista foram oferecidas as primeiras explicações lógicas de como era possível o ar manter-se “puro” e capaz de suportar a vida, uma vez que ele é utilizado na respiração dos animais e na queima de chamas intocáveis. Segundo Priestley, “nenhuma planta cresce em vão... mas limpa e purifica a nossa atmosfera” (RAVEN et al., 2001).

Atualmente, poderíamos explicar os experimentos de Priestley dizendo que as plantas consomem  $\text{CO}_2$  produzido pela combustão ou liberado pelos animais e que os animais absorvem o  $\text{O}_2$  liberado pelas plantas.

Somente em 1779, o médico holandês Jan Ingenhousz (1730-1799) confirmou os trabalhos de Priestley, demonstrando que o ar poderia sim ser “restaurado”, mas apenas na presença de luz do sol e pelas partes verdes das plantas. Ele sugeriu também uma possível equação geral da fotossíntese, que foi amplamente aceita, na qual os carboidratos originavam-se da combinação de moléculas de água e átomos de carbono, provenientes do dióxido de carbono, e que o oxigênio era liberado pelo  $\text{CO}_2$  na forma de gás (RAVEN et al., 2001).

Logo após, Cornelius Bernardus van Niel, um jovem pesquisador da Universidade de Stanford, derrubou a equação proposta por Ingenhousz propondo que a água e não o dióxido de carbono era a fonte de oxigênio na fotossíntese. Van Niel conseguiu provar isso através de um estudo no qual ele avaliava a atividade de

diferentes tipos de bactérias fotossintetizantes e em um grupo particular delas, as bactérias sulfurosas púrpuras, descobriu que o carbono era reduzido a carboidratos e não havia liberação de oxigênio durante a fotossíntese (RAVEN et al., 2001).

Para confirmar a teoria de van Niel, em 1937, Robin Hill demonstrou que expondo à luz cloroplastos isolados os mesmos eram capazes de produzir oxigênio na ausência de dióxido de carbono. Esta liberação de O<sub>2</sub> dirigida pela luz na ausência de CO<sub>2</sub> foi chamada de reação de Hill (RAVEN et al., 2001).

Mas foi só em 1941 que ocorreu a evidência mais convincente de que O<sub>2</sub> liberado provinha da água. Quando pesquisadores utilizaram isótopos de oxigênio (<sup>18</sup>O<sub>2</sub>) para descobrir o caminho do oxigênio presente na molécula de água e evidenciaram que ele era eliminado pela planta sob a forma gasosa. A partir dessas experiências foi proposta a equação da fotossíntese que usamos até hoje (RAVEN et al., 2001).

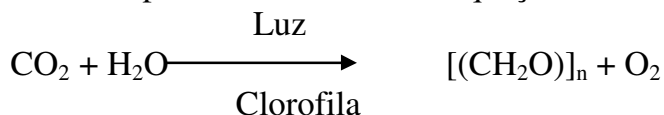
Para acrescentar descobertas em relação ao processo da fotossíntese, na década de 40, os pesquisadores Calvin, Benson, Bassham e uma equipe de colaboradores descobriram a via metabólica através do qual o CO<sub>2</sub> é fixado pelos vegetais e produzem carboidratos. Os pesquisadores utilizaram isótopo radioativo do carbono, (<sup>14</sup>CO<sub>2</sub>) para a descoberta da via metabólica, que foi a primeira a ser inteiramente com o uso de isótopos radioativos (KERBAUY, 2004).

## 2.1.2 Introdução

O termo fotossíntese significa, literalmente, “síntese utilizando a luz”. Os organismos capazes de realizar esse processo promovem a conversão e o armazenamento de energia solar em moléculas orgânicas. Essas moléculas são produzidas a partir de dióxido de carbono e água com liberação de moléculas de oxigênio (TAIZ & ZEIGER, 2004).

As moléculas orgânicas produzidas na fotossíntese são ricas em energia, que está armazenada nas ligações químicas e poderá ser utilizada como fonte, para impulsionar os processos celulares do vegetal (TAIZ & ZEIGER, 2004).

O processo pode ser representado através da equação:



Porém, a simplicidade dessa equação não expressa a complexidade do processo fotossintético, que envolve reações de absorção, conversão e bioquímica. Uma das reações de extrema importância são as chamadas reações redox, reações de redução e oxidação que vão ser fundamentais em uma das etapas fotossintéticas (KERBAUY, 2004). Nas reações de redução, uma substância ganha elétrons e nas de oxidação elas perdem elétrons para outra substância.

Nas reações redox, as substâncias que ganham elétrons são chamadas agentes oxidantes e aquelas que perdem são chamadas de agente redutores. Os elétrons vão ser

sempre transferidos de um agente redutor para um agente oxidante, assim, uma oxidação sempre estará acompanhada de uma redução.

O processo fotossintético é constituído por três fases. Na primeira delas, ocorre à absorção de luz por um pigmento especializado, a chamada clorofila; na segunda há conversão dessa luz em compostos de alta energia, ATP e NADPH; e na última fase esses compostos são utilizados para a síntese orgânica nas reações de fixação do carbono (TAIZ & ZEIGER, 2004).

Para que o processo se realize há a necessidade de um maquinário fotossintetizante formado pelas folhas e seus componentes. Para a fotossíntese, suas principais funções são interceptar a luz, realizar trocas gasosas eficientes, principalmente com a aquisição do CO<sub>2</sub> da atmosfera e realizar a circulação das moléculas orgânicas geradas (KERBAUY, 2004).

Uma folha típica é composta por células dispostas compactamente formando as epidermes superior e inferior, que são impermeabilizadas por uma cutícula e entre elas encontra-se o mesofilo (KERBAUY, 2004).

O mesofilo é a parte fundamental de tecido, caracterizando-se pela abundância de cloroplastos e um sistema de espaços intercelulares. Ele pode ser relativamente homogêneo ou dividido em paliçádico e lacunoso. O primeiro é formado por células alongadas podendo apresentar uma ou mais camadas. Já o lacunoso possui células com formato irregular que deixam espaços aéreos entre si quando se dispõem (KERBAUY, 2004).

Na epiderme, nas duas ou em uma delas, encontramos estômatos que são pequenas estruturas formadas por duas células estomáticas (células-guarda), que delimitam uma fenda (ostíolo), duas ou mais células anexas adjacentes (células subsidiárias) e uma câmara subestomática, a qual está em conexão com os espaços intercelulares (TAIZ & ZEIGER, 2004).

As trocas gasosas (gás carbônico, oxigênio e vapor d'água) entre os tecidos e o meio ocorrem principalmente através dos estômatos. O mecanismo de abertura e fechamento estomático está diretamente ligado ao processo fotossintético e sua intensidade vai depender principalmente do grau de abertura dos mesmos (TAIZ & ZEIGER, 2004).

Fazendo parte do maquinário da fotossíntese temos uma organela conhecida como cloroplasto, e é nessa organela que ocorrerá a fotossíntese propriamente dita. Os cloroplastos possuem seu próprio DNA, RNA e ribossomos e um complexo sistema de transporte de metabólitos. Muitas proteínas são produzidas no próprio cloroplasto, enquanto outras codificadas pelo DNA do núcleo e transportada para dentro dessa organela (TAIZ & ZEIGER, 2004).

Os cloroplastos possuem um envelope constituído por duas membranas lipoprotéicas, sendo a membrana externa lisa e a interna composta por um sistema complexo de membranas voltado para o interior da organela. Esse sistema de membranas é conhecido como tilacóide e é nele que toda a clorofila está contida e onde ocorrem as reações luminosas da fotossíntese.

Os tilacóides são encontrados em forma de vesículas achatadas e empilhadas e o conjunto destas conhecido como granum. As vesículas dos tilacóides se comunicam entre si através de conexões entre as membranas e acredita-se que formam um sistema único interconectado por um lúmen único contínuo, característica importante para uma

das etapas da fotossíntese, o transporte de elétrons e para a síntese de ATP (KERBAUY, 2004).

Essas estruturas estão imersas no estroma, uma matriz fluida que preenche os espaços internos dos cloroplastos e que abriga enzimas, co-fatores e substratos utilizados nas reações de fixação do carbono, a terceira etapa da fotossíntese, que acontecem ali (KERBAUY, 2004).

As plantas podem sofrer adaptações em relação à quantidade de cloroplastos dependendo da intensidade luminosa do meio, uma planta mantida em sombreamento possuirá muitos mais tilacóides do que uma sob condições de sol, uma vez que elas precisam da mesma quantidade de luz para conseguir realizar os processos fotossintéticos.

Os cloroplastos podem ser encontrados no mesofilo e na bainha vascular e é isso que diferencia as plantas chamadas de  $C_3$  e  $C_4$ . Existem diferenças anatômicas entre elas e em um corte transversal de uma folha típica de planta  $C_3$  revela cloroplastos apenas no mesofilo já as plantas  $C_4$  eles podem ser encontrados tanto nas células do mesofilo como nas células da bainha vascular (TAIZ & ZEIGER, 2004).

As células do mesofilo e da bainha vascular apresentam diferenças em suas propriedades bioquímicas e fisiológicas. A bioquímica é fortemente integrada a adaptações anatômicas especiais e esta por ser tão diferenciada tem duas conseqüências fisiológicas importantes. A primeira é que o  $CO_2$  pode ser concentrado nas células da bainha vascular com reduzida perda por difusão, a parede dessas células são espessas e apresentam uma baixa permeabilidade de gases (KERBAUY, 2004).

A segunda é que a maior parte das células do mesofilo situa-se imediatamente adjacente a células da bainha, sendo conectadas por plasmodesmas. Essa disposição das células possibilita uma cooperação eficiente e dinâmica ao desempenharem as tarefas fotossintéticas específicas (KERBAUY, 2004).

As espécies de plantas  $C_3$  são em sua grande maioria as dicotiledôneas e as espécies  $C_4$  são as plantas tropicais e subtropicais e ocorrem em 18 famílias de plantas superiores, incluindo culturas importantes como milho, soja, cana-de-açúcar assim como a maioria das ervas daninhas (KERBAUY, 2004).

Acredita-se que a principal evolução que levou ao surgimento das plantas  $C_4$  tenha sido a progressiva redução da concentração de  $CO_2$  no ambiente em combinação com o estresse hídrico e altas temperaturas. Essas condições limitaram extremamente a aquisição de  $CO_2$  em plantas com fotossíntese  $C_3$  e favoreceram as  $C_4$ , uma vez que elas são adaptadas a condições ambientais onde a irradiância e a temperatura são elevadas ainda apresentando uma boa tolerância ao estresse hídrico (KERBAUY, 2004).

Além de diferenças nas folhas e na localização dos cloroplastos as plantas  $C_3$  e  $C_4$  possuem diferenças fisiológicas. A primeira delas se trata do primeiro composto que irá reagir com o  $CO_2$ , nas plantas  $C_3$  esse composto é a RuBP encontrada no estroma do cloroplasto do mesofilo, já em plantas  $C_4$  será a PEP (ácido fosfoenol pirúvico) composto por três carbonos e encontrado no mesofilo. Por apresentarem diferentes compostos que reagem com o  $CO_2$  o primeiro composto formado também será diferente, nas plantas  $C_3$  o composto formado é o 3-PGA e nas  $C_4$  é o AOA (ácido oxalacético).

As enzimas de carboxilação, ou seja, enzimas que fixam o  $\text{CO}_2$  também são diferentes em  $\text{C}_3$  e  $\text{C}_4$ , nas  $\text{C}_3$  a enzima é a rubisco e se localiza no estroma do cloroplasto e nas  $\text{C}_4$  temos a PEPcase( fosfoenolpiruvato carboxilase), que incorpora  $\text{CO}_2$  na forma ácida( $\text{HCO}_3^-$ ), encontrada no citoplasma do mesofilo e a rubisco presente nos cloroplastos da bainha, que incorpora  $\text{CO}_2$  na forma de óxido( $\text{CO}_2$ ). Apesar das  $\text{C}_4$  possuírem duas enzimas de carboxilação, a PEPcase é muito mais eficiente do que a rubisco uma vez que ela só tem afinidade pelo  $\text{CO}_2$  e a rubisco podendo se combinar tanto com  $\text{CO}_2$  como com  $\text{O}_2$ .

As formas de entrada do  $\text{CO}_2$  também se diferem, nas plantas  $\text{C}_3$  o gás carbônico entra por difusão atingindo o estroma do cloroplasto onde irá acontecer sua fixação já em  $\text{C}_4$  entra inicialmente até o mesofilo por difusão e depois através da ação da PEPcase, que incorpora esse  $\text{CO}_2$  num transportador para que assim ele possa atingir a bainha vascular. Ao chegar à bainha o  $\text{CO}_2$  é cedido a rubisco para que esse gás possa ser utilizado no ciclo de Calvin. Esse transporte de  $\text{CO}_2$  do mesofilo até a bainha vascular possui um gasto de energia e essa é proveniente da luz.

Outra diferença entre  $\text{C}_3$  e  $\text{C}_4$  é a localização do sistema vascular. Em plantas  $\text{C}_3$  a produção do carboidrato por ser no mesofilo precisa atravessar uma barreira, a bainha vascular, até chegar ao feixe vascular e isso irá gerar um gasto de ATP proveniente dos carboidratos produzidos. Já nas  $\text{C}_4$  isso não ocorre, uma vez que o carboidrato é produzido na bainha vascular podendo ser translocado para o feixe vascular sem gasto de energia.

A temperatura e a luz são fatores ambientais que serão diferentes nas  $\text{C}_3$  e  $\text{C}_4$ . A temperatura para que ocorra a fotossíntese máxima é de  $25^\circ\text{C}$  nas  $\text{C}_3$  e em  $\text{C}_4$  é de  $35^\circ\text{C}$ . Já a combinação de luz e concentração de  $\text{CO}_2$  será um motivo de saturação da fotossíntese, em plantas  $\text{C}_3$  ocorre à saturação com cerca de  $1/3$  da radiação solar máxima e em  $\text{C}_4$  essa saturação não ocorre.

A saturação em plantas  $\text{C}_3$  pode ser explicada pela forma de entrada do  $\text{CO}_2$ , por entrar por difusão até o estroma onde ocorrerá o ciclo de Calvin, mesmo havendo luz suficiente para que ocorra a fotossíntese a concentração de  $\text{CO}_2$  irá limitar esse processo. Porém, em plantas  $\text{C}_4$  isso não ocorre já que a entrega de  $\text{CO}_2$  para ser utilizado no ciclo de Calvin é através do uso da energia da luz como já tratado acima, com isso quanto mais luz mais transporte de  $\text{CO}_2$  para o cloroplasto da bainha vascular.

Outra diferença importante entre  $\text{C}_3$  e  $\text{C}_4$  é a relação  $\text{CO}_2$ : ATP:  $\text{NADPH}_2$ . Na produção de carboidratos em plantas  $\text{C}_3$  por mol de  $\text{CO}_2$  são utilizados  $3\text{ATP} + 2\text{NADPH}_2$  gastos no ciclo de Calvin e em  $\text{C}_4$  por mol de  $\text{CO}_2$  são gastos  $5\text{ATP} + 2\text{NADPH}_2$ , gastos  $3\text{ATP}$  e  $2\text{NADPH}_2$  no ciclo de Calvin e  $2\text{ATP}$  no transporte metabólico do  $\text{CO}_2$ .

### **2.1.3 A natureza da luz**

O Sol emite constantemente para o espaço uma radiação e é nesse espectro de radiação que a luz visível está inserida. Este é conhecido como espectro



eletromagnético e conta também com radiações do tipo ultravioleta, raios X, raio gama, raios infravermelho, entre outros (KERBAUY, 2004).

Essas radiações podem ter dois comportamentos: um de partícula, quando absorvida ou emitida por um corpo e um ondulatório, ao se propagar pelo espaço. Quando essas partículas assumem propriedades ondulatórias, apresentam mudanças regulares e repetidas em sua propagação, isso é o que chamamos de comprimento de onda e cada uma delas contará com um (KERBAUY, 2004).

A radiação de cada comprimento de onda terá uma quantidade específica de partículas de energia nela associada, que são conhecidas como fótons e a energia carregada por eles é chamada de quantum. A energia dos fótons é inversamente proporcional ao seu comprimento de onda, por isso quanto menor o comprimento de onda, maior será a sua energia (RAVEN et al., 2001).

Cada fóton tem uma relação direta com os elétrons, ou seja, se o nível de energia do fóton de um comprimento de onda for compatível com o do elétron ocorrerá à excitação do mesmo, essa excitação será de extrema importância nos processos que ocorrem durante a fotossíntese (RAVEN et al., 2001).

A luz funciona como uma ponte entre a energia do fóton e a energia química, sendo assim um fóton pode excitar apenas um elétron. Porém esse evento é do tipo tudo-ou-nada, ou seja, se o nível de energia do fóton de determinado comprimento de onda é compatível com o do elétron ocorre à excitação e provavelmente dando continuidade a reação, se não o for, nada ocorre, significando que aquele comprimento de onda não pode ser absorvido e assim não exercendo uma ação (KERBAUY, 2004).

Os comprimentos de onda mais importante para o processo fotossintético são encontrados na banda da luz visível e através de uma experiência utilizando-se da passagem de luz por um prisma, o físico Isaac Newton conseguiu separá-la em espectro de cores visíveis, demonstrou com isso que a luz visível consistia de numerosas cores diferentes, variando do violeta numa extremidade do espectro até o vermelho na outra (KERBAUY, 2004).

Os vegetais conseguem utilizar a luz principalmente nos comprimentos de onda azul (730nm) e vermelho (660nm). O azul possui um comprimento de onda maior e com isso menor é a sua energia, já o vermelho possui um comprimento de onda menor e maior energia (KERBAUY, 2004).

#### **2.1.4 Luz e pigmentos**

A luz para que seja utilizada pelos vegetais precisa primeiramente ser absorvida. As substâncias que realizam essa absorção são denominadas de pigmentos. Alguns deles absorvem todos os tipos de comprimento de onda da luz, mas a grande maioria deles absorve apenas determinados comprimentos e acabam refletindo os que não são absorvidos (RAVEN et al., 2001). Todos os pigmentos ativos no processo da fotossíntese são encontrados nos cloroplastos (TAIZ & ZEIGER, 2004).

Os pigmentos mais importantes para esses seres vivos são a clorofila e os carotenóides e esses são encontrados organizados nas membranas dos tilacóides. Esses

pigmentos possuem a função de melhorar a absorção de luz e transferir energia para os centros de reações da fotossíntese (KERBAUY, 2004).

As moléculas de clorofila são formadas por um anel de porfirina ao qual se liga um hidrocarboneto de 20 carbonos chamado de fitol. As plantas possuem diferentes tipos de clorofila e elas diferem entre si nos detalhes da sua estrutura molecular e nas suas propriedades específicas de absorção de luz. A clorofila *a* é encontrada em todos os eucariontes fotossintetizantes e é essencial na composição dos complexos de antenas principalmente nos centros de reação (KERBAUY, 2004).

A clorofila *b* é conhecida como pigmento acessório, um pigmento que não participa diretamente da passagem da energia da fotossíntese, mas serve para ampliar a faixa de luz que será utilizada no processo. Quando a clorofila *b* absorve luz, a energia é transmitida para a molécula de clorofila *a*, que então a transforma em energia química (RAVEN et al., 2001).

Os carotenóides, que fazem parte do segundo grupo de pigmentos abundantes, podem desempenhar duas funções distintas na fotossíntese: participam da absorção de luz atuando como pigmento acessório e desempenham um papel essencial na proteção do aparato fotoquímico, protegendo as membranas fotossintéticas que podem ser facilmente danificadas (KERBAUY, 2004).

Quando as moléculas de clorofila absorvem luz dos comprimentos de onda do azul e do vermelho, os fótons de luz irão impulsionar os elétrons para orbitais com níveis de energia maior no interior da molécula diz-se com isso que o elétron foi excitado. Porém, esse processo ocorre numa breve fração de tempo e os elétrons voltam ao estado basal dissipando a energia absorvida (KERBAUY, 2004).

A dissipação da energia pode se dar de três formas. A primeira é quando a energia é dissipada na forma de luz, fenômeno conhecido como fluorescência, a segunda é a transferência da energia da excitação de uma molécula de clorofila para outra, permitindo uma rápida migração de energia entre os pigmentos e a terceira é a dissipação da energia em reações nas qual o elétron excitado é doado a uma molécula receptora, desencadeando reações de oxidorredução.

## **2.1.5 Captação da luz e transporte eletrônico**

### **5.1 Organização dos sistemas antena de absorção de luz**

Os sistemas de antena estão associados aos centros de reações e sua função é enviar energia eficientemente para os mesmos. Os sistemas variam consideravelmente em diferentes organismos, mas acredita-se que em plantas superiores há milhares de pigmentos como clorofila *a*, clorofila *b* e os carotenóides por centro de reação (TAIZ & ZEIGER, 2004).

O mecanismo físico pelo qual a energia de excitação é transferida da clorofila que absorve luz ao centro de reação é a ressonância, ou seja, a energia excitada é transferida de uma molécula para outra. As antenas canalizam essa energia para o centro de reação, mas até atingir o centro um pouco dessa energia é perdida, porém o

sistema sacrifica parte da energia para que quase todos os quanta possam ser aprisionados no centro de reação (TAIZ & ZEIGER, 2004).

## 5.2 Componentes estruturais

As estruturas que participam do transporte de elétrons da fotossíntese são: o fotossistema I, o fotossistema II, o complexo citocromo  $b_6f$  e o complexo ATP sintase e eles encontrados nas membranas dos tilacóides. Os fotossistemas I e II são grandes complexos formados por várias unidades de proteínas e pigmentos. Cada um deles possui um centro de reação que se liga a um complexo de captação de luz, os sistemas de antenas (KERBAUY, 2004).

O centro de reação do fotossistema II é denominado de P680 e o do fotossistema I é chamado de P700. Os fotossistemas operam de forma simultânea e em série durante o processo da fotossíntese. A conexão entre eles é feita pelo complexo citocromo  $b_6f$  e por dois carreadores móveis: a plastoquinona que carrega os elétrons do fotossistema II para o complexo citocromo e a plastocianina que leva os elétrons do complexo citocromo  $b_6f$  para o fotossistema I (KERBAUY, 2004).

O fotossistema II é constituído por um complexo transmembrana formado por cerca de 22 proteínas. Seu núcleo possui subunidades protéicas denominadas de D1 e D2 que atravessam as membranas dos tilacóides. Essas subunidades contêm o centro de reação do fotossistema II, o P680; um elemento transportador dos elétrons para o interior do fotossistema, o  $Mn^{+2}$ ; uma molécula mediadora dos elétrons, a tirosina; uma molécula receptora de elétrons, a feofina e sítios de ligação para ancorar a molécula carreadoras de elétrons, a plastoquinona, denominados de quinona A ( $Q_A$ ) e quinona B ( $Q_B$ ) (KERBAUY, 2004).

O complexo citocromo  $b_6f$  é uma grande proteína com múltiplas subunidades e possui três moléculas por onde os elétrons poderão passar que são: 2Fe-2S, Cit  $B_6$  e o Cit F. Após esse trajeto, os elétrons são recebidos por uma molécula carreadora, a plastocianina, que carregam os mesmos para o fotossistema I.

Já o fotossistema I possui em sua estrutura cerca de 13 proteínas no complexo transmembrana. O interior desse fotossistema é um dímero de proteínas semelhantes e seu centro de reações é o P700. Como no fotossistema II, ele também possui moléculas por onde passaram os elétrons e são elas:  $A_0$ , uma molécula de clorofila modificada;  $A_1$ , uma quinona (Vitamina K1); um aglomerado de ferro-enxofre, o 4Fe-4S e a ferredoxina, uma molécula receptora de elétrons que se encontra no estroma (KERBAUY, 2004).

## 5.3 O transporte de elétrons

O transporte de elétrons, antigamente chamado de esquema Z, todos os carreadores de elétrons que atuam no fluxo de elétron, desde a água até o  $NADP^+$ , estão organizados verticalmente, daí o nome, que, porém caiu em desuso, sendo atualmente chamado simplesmente de transporte de elétrons.

O transporte de elétrons terá início com a fotólise da água, presente no lúmen do tilacóides, e é expressa pela seguinte reação química:

$2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$  na qual a partir de duas moléculas de água são removidos quatro elétrons gerando uma molécula de  $\text{O}_2$  e quatro íons de hidrogênio. Esse processo ocorre devido o estado oxidado da clorofila *a* do centro de reação, o estado excitado do fotossistema através da captura de luz e a presença de Mn no lúmen.

Os  $4\text{H}^+$  produzidos da fotólise da água são liberados no lúmen do tilacóide e transferidos posteriormente para o estroma pela ATP sintase e contribuirão para a formação do ATP, o  $\text{O}_2$  é liberado para a atmosfera e os quatro elétrons serão transportados para dentro do fotossistema II.

Os elétrons não conseguem desempenhar esse papel sozinho por isso a presença do  $\text{Mn}^{+2}$  é tão importante no lúmen e é ele que transporta os elétrons do lúmen para o interior do fotossistema e ao receber os elétrons é oxidado a  $\text{Mn}^+$ . Ao entrar no fotossistema com os elétrons ele transfere os mesmos para uma molécula mediadora, a tirosina, a qual entrega os elétrons ao P680 e o  $\text{Mn}^{+2}$  retorna ao lúmen para receber os próximos elétrons provenientes da fotólise da água.

Devido à excitação eletrônica, que está ocorrendo no P680 pela captação de luz, os elétrons que chegaram até ele através da tirosina, são lançados pela clorofila *a* e recebidos pela feofina que imediatamente é oxidada pela  $\text{Q}_A$  que recebe os elétrons e essa por sua vez será oxidada pela  $\text{Q}_B$ . Ligada aos sítios  $\text{Q}_A$  e  $\text{Q}_B$ , temos a plastoquinona que ao receber os elétrons torna-se reduzida a  $\text{PQ}^{-2}$ .

Porém, essa forma reduzida da plastoquinona não é estável e para tornar-se ela precisará de prótons de hidrogênio. Esses prótons serão atraídos do estroma e formará uma molécula estável, a  $\text{PQH}_2$  podendo assim levar os elétrons até o complexo citocromo  $\text{b}_6\text{f}$ . Ao levar os elétrons, a  $\text{PQH}_2$  volta a sua forma reduzida (PQ) e os prótons de hidrogênio seguem para o lúmen.

Já no complexo  $\text{b}_6\text{f}$ , os elétrons podem ser recebidos os quatro elétrons pela molécula  $2\text{Fe-2S}$ , ou por Cit  $\text{b}_6$ , ou serem recebidos tanto por  $2\text{Fe-2S}$  ou Cit  $\text{b}_6$  ao mesmo tempo, sendo os elétrons recebidos aos pares.

Independente do rumo que tomarem os elétrons posteriormente serão recebidos pelo Cit F que reduzirá tanto  $2\text{Fe-2S}$  como Cit  $\text{b}_6$ . Logo após, Cit F será oxidado pela plastocianina, um carreador móvel presente no lúmen, que recebe os elétrons e tem a função de levá-los até o fotossistema I. Ao chegar ao fotossistema I, a plastocianina transfere os elétrons para o P700 e retorna ao lúmen para desempenhar sua função novamente quando outros elétrons chegarem.

O P700, assim como o centro de reação do fotossistema II, ao receber energia de excitação eletrônica das antenas, transfere os elétrons para uma molécula receptora, a  $\text{A}_0$ , que por sua vez transfere os elétrons a uma outra molécula, a  $\text{A}_1$ . Os elétrons continuam um caminho ainda passando pelo  $4\text{Fe-4S}$  e por fim chegando até a ferredoxina. O destino dos elétrons que se encontram na ferredoxina é a redução do  $\text{NADP}^+$ , que se encontra no estroma, em NADPH que será utilizado na terceira fase da fotossíntese.

O transporte de elétrons descrito acima é o que chamamos de transporte acíclico. Porém, é comum ocorrer o transporte cíclico também. Esse transporte ocorrerá porque o  $\text{NADP}^+$ , não pertencente ao tilacóide, não consegue acompanhar a rapidez com que ocorre quebra da água e a passagem dos elétrons.

O transporte cíclico então contará com a participação mais uma vez da quinona móvel ( $\text{PQ}^{+2}$ ). Os elétrons que chegam à Ferredoxina presente no Fotossistema I, com

a falta de NADP<sup>+</sup> para recebê-los, são transportados até o Cit b6, presente no Complexo Citocromo, que por sua vez será oxidado pela Plastoquinona (PQ<sup>+2</sup>) que recebe os elétrons. Para se tornar estável, a plastoquinona, puxa duas moléculas de hidrogênio de estroma e forma a molécula estável PQH<sub>2</sub>.

Já estável a molécula é oxidada pelo 2Fe-2S que receberá os elétrons podendo assim voltar a sua forma instável PQ<sup>+2</sup> e os hidrogênios seguirem para o lúmen. Após chegar no 2Fe-2S, os elétrons seguem o mesmo caminho já mencionado anteriormente passando por Cit F, sendo levados pela plastocianina até o fotossistema I, passando pelo P700, A<sub>0</sub>, A<sub>1</sub>, 4Fe-4S chegando finalmente a ferredoxina que será oxidada pelo NADP<sup>+</sup> que receberá os elétrons tornando-se assim NADPH<sub>2</sub>, importante para o ciclo de Calvin.

Com o transporte cíclico a concentração de hidrogênio no lúmen aumenta ainda mais com isso a produção de ATP também. Quando ocorre esse tipo de transporte o balanço energético difere um pouco de quando ele não ocorre, formam-se 3 ATP em vez de apenas 2ATP. Transporte de elétrons nas plantas C<sub>4</sub> é semelhante ao transporte das plantas C<sub>3</sub>, ocorrendo porém nos cloroplastos da bainha vascular.

## 5.4 Fotofosforilação

Fotofosforilação é a síntese de ATP, utilizado na terceira fase da fotossíntese, promovida pela luz e impulsionada por uma força próton gerada durante o fluxo de elétrons (KERBAYU, 2004).

As membranas celulares são pouco permeáveis aos íons H<sup>+</sup> porém esses prótons podem fluir pelas membranas de um modo controlado por intermédio do complexo ATP sintase, que atravessa as membranas através da subunidade CF<sub>0</sub>, que forma um canal, e projeta-se no estroma com a subunidade CF<sub>1</sub>, porção do complexo onde o ATP é sintetizado (TAIZ & ZEIGER, 2004).

Devido à fotólise da água e a formação da molécula estável PQH<sub>2</sub>, o estroma torna-se mais alcalino, ou seja, menos íons de H<sup>+</sup> e o lúmen mais ácido, ou seja, mais íons de H<sup>+</sup>, com essa diferença de concentração cria-se uma diferença de potencial entre as membranas do lúmen e a do estroma. Com isso há uma mudança na configuração da subunidade CF<sub>1</sub> que se abre para que ocorra um fluxo de H<sup>+</sup> pelo complexo

Com a passagem do H<sup>+</sup> pela subunidade CF<sub>1</sub> o ADP+Pi presente nela se unem formando ATP e a cada três H<sup>+</sup> que passam pela subunidade é formado um ATP. O ATP formado nessa fase será utilizado na terceira fase da fotossíntese e serão necessários três ATPs.

## 2.1.6 Ciclo de Calvin

A formação das moléculas orgânicas tem início com a reação de fixação do CO<sub>2</sub> catalisada por uma enzima conhecida como ribulose bifosfato carboxilase (rubisco), que é fundamental para a aquisição do carbono pelos vegetais. Após fixar o CO<sub>2</sub> atmosférico, a rubisco desencadeia uma rede de reações que geram os carboidratos (KERBAUY, 2004).

A enzima rubisco existe em elevada quantidade nos tecidos fotossintéticos e acredita-se que o enorme investimento das plantas na produção dessa enzima é para garantir a fixação de carbono suficiente para a produção de carboidratos. A rubisco, porém, tem uma peculiaridade de ser uma enzima que apresenta simultaneamente duas funções: catalisa tanto a carboxilação, ou seja, a fixação de CO<sub>2</sub> como a oxigenação, a fixação de O<sub>2</sub> do seu substrato (KERBAUY, 2004). Os dois gases competem pelo sítio ativo da enzima rubisco, porém para o processo fotossintético é interessante que ocorra a carboxilação.

O ciclo de calvin pode ser dividido em três etapas: a carboxilativa, a redutiva e a regenerativa ocorrendo no estroma do cloroplasto onde também se encontram as enzimas. A fase carboxilativa compreende a reação catalisada pela enzima rubisco, a molécula de CO<sub>2</sub> é fixada pela rubisco a um substrato, a pentose *ribulose-1,5-bifosfato* (RubP). Após ser fixada, cada molécula de CO<sub>2</sub> dará origem a um composto instável formado por 6C chamado CETO-ÁCIDO que permanece ligado à enzima. Logo após, essa molécula hidrolisada formando duas moléculas de 3-fosfoglicerato (3PGA) (KERBAUY, 2004).

Na fase redutiva, o 3PGA é convertido a gliceraldeído-3-fosfato (3-PGALD) através de duas reações que utilizam o ATP e o NADPH produzidos na fase dois da fotossíntese. O (3-PGALD) é o primeiro carboidrato gerado (KERBAUY, 2004). A fase regenerativa se processa a partir da formação do 3-PGALD, com a absorção contínua de CO<sub>2</sub> há a necessidade do aceptor RubP seja constantemente regenerado e isso ocorre através de reações que convertem 3-PGALD em ribulose-5-fosfato. A enzima ribulose-5-fosfato quinase catalisa a fosforilação da ribulose-5-fosfato com o ATP regenerando assim o aceptor inicial, a RubP (TAIZ & ZEIGER, 2004).

Realizando um balanço energético do ciclo de Calvin, para a fixação de uma molécula de CO<sub>2</sub> são necessárias duas moléculas de ATP e duas de NADPH<sub>2</sub> para movimentar a fase redutiva do ciclo e uma terceira de ATP exigida na fase final da etapa regenerativa. Porém, ao final das três fases desse ciclo apenas um carbono é liberado, sendo assim serão necessária seis repetições do ciclo para a liberação de uma molécula contendo os seis carbonos que formará os carboidratos tão importantes para o vegetal.

O ciclo de Calvin nas plantas C<sub>4</sub>, por possuírem cloroplastos tanto no mesofilo como na bainha vascular, terá a localização diferente do que nas plantas C<sub>3</sub>. O ciclo irá ocorrer no cloroplasto da bainha da vascular e o CO<sub>2</sub> será transportado até o local por vias metabólicas.

## 6.1 Vias metabólicas

As vias metabólicas das plantas C<sub>4</sub> são três e são definidas pelas enzimas de descarboxilação, ou seja, enzimas que retiram o CO<sub>2</sub> do transportador para que ele possa ser utilizado no ciclo de Calvin. A primeira via é definida pela enzima málica (NADP<sup>+</sup>) sendo o transportador o malato e o seu destino o cloroplasto da bainha. Uma segunda via pode ser definida pela enzima málica (NAD<sup>+</sup>) na qual o transportador é o aspartato e seu destino a mitocôndria.

A terceira via é determinada pela enzima PEP-carboxiquinase, sendo o transportador o aspartato e seu destino o citoplasma. A função de todas essas vias é transportar o  $\text{CO}_2$  adquirido por difusão no mesofilo até a bainha vascular para ser utilizado no ciclo de Calvin para a produção de carboidrato.

### 6.1.1 Enzima Málica ( $\text{NADP}^+$ )

O  $\text{CO}_2$  que entra por difusão no mesofilo irá se combinar com a água forma o composto  $\text{HCO}_3^-$  e é este que irá se combinar com a PEP através da enzima PEPcase dando origem ao AOA. O AOA é transportado para o cloroplasto do mesofilo e lá receberá elétrons do  $\text{NADPH}_2$  reduzindo-se a malato. O malato sendo o transportador dessa via vai para o cloroplasto da bainha vascular onde é hidrolisado pela enzima málica ( $\text{NADP}^+$ ) formando piruvato,  $\text{CO}_2$  e  $\text{NADPH}_2$ .

Esse piruvato formado pela hidrólise do malato, retorna ao mesofilo mais propriamente para dentro do cloroplasto para que lá sofra uma fosforilação, ou seja, combina-se com um ATP formando assim PEP. Essa reação tem por finalidade regenerar o composto PEP para as futuras reações.

O  $\text{CO}_2$  vindo da quebra do malato por sua vez é incorporado pela rubisco a RubP formando um composto instável o CETO-ÁCIDO que logo após se hidrolisa formando duas moléculas de 3-fosfoglicerato (3PGA). O 3PGA é convertido a gliceraldeído-3-fosfato (3-PGALD) através de duas reações que utilizam o ATP e o NADPH produzidos na fase dois da fotossíntese.

Devido a constante absorção de  $\text{CO}_2$  há a necessidade do acceptor RubP seja constantemente regenerado e isso ocorre através de reações que convertem 3-PGALD em ribulose-5-fosfato. A enzima ribulose-5-fosfato quinase catalisa a fosforilação da ribulose-5-fosfato com o ATP regenerando assim o acceptor inicial, a RubP para que o ciclo possa ter continuidade. A cada ciclo de Calvin realizado apenas um carbono é liberado para a formação do carboidrato, por isso serão necessários seis repetições deste ciclo para a formação da molécula toda.

### 6.1.2 Enzima Málica ( $\text{NAD}^+$ )

Assim como na primeira via, o  $\text{CO}_2$  entrará por difusão e através da combinação deste com a água forma o composto  $\text{HCO}_3^-$  que irá se combinar com PEP através da enzima PEPcase formando AOA. O AOA por sua vez reage com o  $\text{NH}_2$  formando assim o aspartato que é o transportador dessa via.

Por ser o transportador, o aspartato vai para o seu destino, a mitocôndria, e sofre uma quebra liberando o  $\text{NH}_2$  recebido no mesofilo e voltando a ser apenas AOA. Esse por sua vez, recebe elétrons do  $\text{NAD}_2$  reduzindo-se a malato. A enzima dessa via, a málica ( $\text{NADP}^+$ ) hidrolisa esse malato resultando em piruvato,  $\text{NAD}_2$  e  $\text{CO}_2$ .

O piruvato resultante da hidrólise se combina com  $\text{NH}_2$  formando um composto estável, a alanina, para poder assim retornar ao mesofilo. No mesofilo esse composto é quebrado em piruvato e  $\text{NH}_2$  novamente e o piruvato segue para o cloroplasto onde é fosforilado, recebe um ATP, e forma PEP para regenerar os compostos do ciclo.

O  $\text{CO}_2$  por sua vez é incorporado pela rubisco a RubP formando um composto instável o CETO-ÁCIDO que logo após se hidrolisa formando duas moléculas de 3-fosfoglicerato (3PGA). O 3PGA é convertido a gliceraldeído-3-fosfato (3-PGALD) através de duas reações que utilizam o ATP e o NADPH produzidos na fase dois da fotossíntese.

Devido a constante absorção de  $\text{CO}_2$  há a necessidade do acceptor RubP seja constantemente regenerado e isso ocorre através de reações que convertem 3-PGALD em ribulose-5-fosfato. A enzima ribulose-5-fosfato quinase catalisa a fosforilação da ribulose-5-fosfato com o ATP regenerando assim o acceptor inicial, a RubP para que o ciclo possa ter continuidade. A cada ciclo de Calvin realizado apenas um carbono é liberado para a formação do carboidrato, por isso serão necessários seis repetições deste ciclo para a formação da molécula toda.

### **6.1.3 Enzima PEP-carboxiquinase**

O  $\text{CO}_2$ , assim como nas outras duas vias, entrando por difusão combina-se com a água formando o composto  $\text{HCO}_3$  e esse através da enzima PEPcase é combinado com PEP formando AOA. O AOA reage com  $\text{NH}_2$  dando origem ao aspartato, o transportador dessa via.

O aspartato vai para o citoplasma da bainha vascular e através de uma quebra libera o  $\text{NH}_2$  voltando a ser apenas AOA que por sua vez será hidrolisado pela enzima dessa via, a PEP-carboxiquinase liberando o  $\text{CO}_2$ . Após liberar o  $\text{CO}_2$ , o AOA é fosforilado por um ATP do meio tornando-se assim PEP.

Esse PEP não pode voltar ao mesofilo nessa forma, por isso desfosforila (libera o ATP) e torna-se piruvato. O piruvato combina-se com o  $\text{NH}_2$  proveniente da quebra do aspartato formando assim alanina que retorna ao mesofilo e logo libera o  $\text{NH}_2$  voltando a ser apenas piruvato. Esse retorna ao mesofilo mais propriamente para dentro do cloroplasto para que lá ele sofra uma fosforilação formando assim PEP, essa reação ocorre para que possa haver a regeneração dos compostos desta via.

O  $\text{CO}_2$  vindo da quebra do malato por sua vez é incorporado pela rubisco a RubP formando um composto instável o CETO-ÁCIDO que logo após se hidrolisa formando duas moléculas de 3-fosfoglicerato (3PGA). O 3PGA é convertido a gliceraldeído-3-fosfato (3-PGALD) através de duas reações que utilizam o ATP e o NADPH produzidos na fase dois da fotossíntese.

Devido a constante absorção de  $\text{CO}_2$  há a necessidade do acceptor RubP seja constantemente regenerado e isso ocorre através de reações que convertem 3-PGALD em ribulose-5-fosfato. A enzima ribulose-5-fosfato quinase catalisa a fosforilação da ribulose-5-fosfato com o ATP regenerando assim o acceptor inicial, a RubP para que o ciclo possa ter continuidade. A cada ciclo de Calvin realizado apenas um carbono é liberado para a formação do carboidrato, por isso serão necessários seis repetições deste ciclo para a formação da molécula toda.



### **2.1.7 Destino dos produtos da fotossíntese**

Nas plantas, a maior parte do carbono fixado é utilizado para a formação de carboidratos, principalmente sacarose e amido, que são os produtos mais estáveis do processo da fotossíntese. Os carboidratos são essenciais para os vegetais porque além de fornecerem energia para o processo da respiração são componentes estruturais do organismo. As paredes celulares dos vegetais são formadas por celulose, um polímero de glicose que é um carboidrato (KERBAUY, 2004).

Parte dos carboidratos produzidos na fotossíntese é utilizada para satisfazer as necessidades bioquímicas tais como metabolismo respiratório, metabolismo do nitrogênio, entre outros. Mas, uma parte grande pode ser exportada das células fotossintetizantes na forma de sacarose, ou armazenada no próprio cloroplasto na forma de amido e esse destino depende do estágio de desenvolvimento das folhas (KERBAUY, 2004).

As folhas jovens retêm grande parte dos carboidratos para a síntese de seus componentes estruturais podendo até importar carboidratos de outras partes das plantas. Já nas folhas maduras, os carboidratos são exportados através do vaso condutor floema para outras regiões da planta (KERBAUY, 2004).

O amido será acumulado na forma de grânulos no estroma do cloroplasto mas, somente no período luminoso, ao passo que, durante a noite, ele é remobilizado e consumido na respiração. A sacarose por sua vez, na maioria das plantas é a principal forma de transporte e distribuição dos carboidratos para as regiões consumidoras chamadas de drenos representados pelas raízes, ápices caulinares, folhas imaturas e órgãos de reservas (frutos, sementes) e é sintetizada no citossol das células fotossintéticas (KERBAUY, 2004).

## 2.2 Produção do material

O material didático produzido consta de dois elementos: um texto teórico sobre a fotossíntese, abordando todos os aspectos relacionados a esse tema, com a explicação dos processos nos vegetais e um programa multimídia com uma animação sobre os mesmos processos tratados no texto teórico.

Em primeiro lugar foi realizado um levantamento bibliográfico sobre o tema com o objetivo de proporcionar suporte teórico para a elaboração do texto. Para a seleção das referências foram consideradas a autenticidade e clareza das informações encontradas.

Para a confecção do multimídia foi utilizado o mesmo levantamento bibliográfico citado acima baseado no qual foi produzida uma animação com o auxílio do programa computacional Flash. Textos e legendas foram acrescentados para facilitar a visualização do CD.

O kit multimídia pode ser utilizado como suporte para as aulas teóricas sobre o tema, uma vez que mostra os processos em 3D. Ele pode ser utilizado em qualquer computador. Apenas clicando no ícone fotossíntese o processo já é iniciado. Para ampliar a visualização, basta clicar a tecla (Ctrl) juntamente com a tecla da letra F do teclado.



**Conclusão**

### **3 CONCLUSÃO**

O processo de elaboração deste trabalho foi caracterizado pela busca da melhor forma de transmissão do conteúdo proposto como tema da instrumentação. Ao fazê-lo acreditamos contribuir para a melhoria da qualidade das aulas de Fisiologia Vegetal, principalmente da fotossíntese ministrada no Ensino Fundamental II e Médio, possibilitando que os professores dessa área utilizem recursos que enriqueçam sua prática de ensino.

O texto didático produzido teve por finalidade reunir o conteúdo proposto de maneira fácil e sucinta, porém completa. A abordagem do conteúdo na forma de multimídia pode levar o aluno a compreender melhor os processos da fotossíntese além de interagir com uma tecnologia com a qual está acostumado no seu cotidiano.

The background of the page is a close-up photograph of several green leaves. The leaves are vibrant green and show signs of being eaten by insects, with several small, dark, circular holes visible on their surfaces. The lighting is bright, creating a slightly overexposed or high-key effect in some areas, particularly towards the top right. The overall composition is a dense cluster of foliage.

## **Referências**

#### 4 REFERÊNCIAS

BARCELÓ, J et al. **Fisiologia vegetal**. 6° ed. Madrid: Pirâmide, 2003.

BRADY, J. E.; HUMISTON G. E. **Química geral**. Rio de Janeiro: LTC, 1986.

BRASIL. SECRETARIA DE EDUCAÇÃO FUNDAMENTAL. **Parâmetros curriculares nacionais: Ciências Naturais/ Secretaria de Educação Fundamental**. Brasília: MEC/SEF, 1998.

COLL, C. et al. **Psicologia da aprendizagem no ensino médio**. 1° ed. Porto Alegre: Artmed, 2003.

KERBAUY, G. B. **Fisiologia vegetal**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2004.

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO. **Parâmetros curriculares nacionais: ensino médio**. Secretaria da Educação Média e Tecnológica – Brasília: Ministério da Educação, 1999.

PRADO, C.H.B de A.; CASALI, C.A. Fotossíntese. In: **Fisiologia Vegetal: Práticas em Relações Hídricas, Fotossíntese e Nutrição Mineral**. Barueri; Manole, 2006.

PILETTI, C. **Didática Geral- série educação**. 23° ed. São Paulo: Ática, 2000.

RAVEN, P.H.; EVERT, R.F.; EICHHORN, S.E. **Biologia vegetal**. 6° ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2001.

RUSSEL, J. B. **Química geral**. São Paulo: Markrn Books, 1994.

SOUZA, S. de.; ALMEIDA, M.J.P.M. de. A fotossíntese no ensino fundamental: compreendendo as interações dos alunos. **Ciência & Educação**, v.8, n.1, p.97-111, 2002.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3° ed. Porto Alegre: Arimed, 2004.



**Apêndice**