

**INSTITUTO SUPERIOR DE AGRONOMIA**  
**Licenciatura em Engenharia Agrónoma**

**DISCIPLINA DE**  
**BIOLOGIA FUNCIONAL**

**MÓDULO DE**  
**FISIOLOGIA VEGETAL**

**Ano Lectivo de 2019/2020**

# AULA 1

Ricardo Boavida Ferreira ([rbferreira@isa.ulisboa.pt](mailto:rbferreira@isa.ulisboa.pt))

08 NOV 2019, 6ª feira, 08:30 - 11:00 h, Sala 12

## Apresentação

Normas de funcionamento e de avaliação do Módulo de Fisiologia Vegetal

## Fotossíntese. Reações Fotoquímicas.

### **FOTOSSÍNTESE: Introdução**

Importância da fotossíntese como processo regenerador da matéria orgânica da biosfera.

### **FOTOSSÍNTESE: Reações fotoquímicas da fotossíntese**

Características dos pigmentos captadores da energia luminosa – clorofilas, carotenóides e ficobilinas. A energia luminosa como força motriz da fotossíntese. Absorção da luz e excitação eletrónica. Dissipação da energia das moléculas foto-excitadas. Níveis de energia de excitação da clorofila e sua utilização na fotossíntese. Transferência da energia de excitação entre moléculas de pigmentos: pigmentos primários e pigmentos acessórios. Conceito de “unidade fotossintética” e de “centro de reação”. Cooperação de dois atos fotoquímicos e de dois fotossistemas na fotossíntese oxigénica. Cadeia fotossintética de transporte de eletrões. Fotorredução e fotofosforilação. Fluxos cíclico, acíclico e pseudo-cíclico de eletrões. Estequiometria da fotofosforilação. Heterogeneidade lateral dos tilacóides e difusão do LHC. Excesso de luz - o conceito de fotoinibição.

# Apresentação

**Normas de funcionamento e de avaliação do  
Módulo de Fisiologia Vegetal**

# *Horário das aulas de Biologia Funcional / Fisiologia Vegetal 2019 / 2020*

## ***Práticas:***

*Turma 1:* (alunos sem frequência prática) 4<sup>a</sup> feira, 14:45 - 17:15 h; Laboratório 46 / Sala 33

*Turma 2:* (alunos sem frequência prática) 5<sup>a</sup> feira, 14:45 - 17:15 h; Laboratório 34 / Sala 27

*Turma 1a:* (alunos com frequência prática) 6<sup>a</sup> feira, 14:30 - 17:00 h; Laboratório 34 / Sala 33

## ***Teóricas:***

*Turmas 1 + 2 + 1a:* (todos os alunos) 6<sup>a</sup> feira, 08:30 - 11:00 h; Sala 12



Licenciatura em Engenharia Agronómica (2019-2020)

BIOLOGIA FUNCIONAL (3º Semestre; 6 ECTS)

Área Científica: Biologia

Coordenadora: Leonor Morais ([leonor@isa.ulisboa.pt](mailto:leonor@isa.ulisboa.pt))

Docentes do Módulo Genética:

Leonor Morais - [leonor@isa.ulisboa.pt](mailto:leonor@isa.ulisboa.pt) (Responsável)

Vanda Vieira - [vandavieira@isa.ulisboa.pt](mailto:vandavieira@isa.ulisboa.pt)

Elsa Gonçalves - [elsagoncalves@isa.ulisboa.pt](mailto:elsagoncalves@isa.ulisboa.pt)

Ana Capeta - [anacapeta@isa.ulisboa.pt](mailto:anacapeta@isa.ulisboa.pt)

Docentes do Módulo – Fisiologia:

Ricardo Boavista Ferreira - [ricardo@isa.ulisboa.pt](mailto:ricardo@isa.ulisboa.pt) (Responsável)

Conceição Caldeira - [conceicao@isa.ulisboa.pt](mailto:conceicao@isa.ulisboa.pt)

Lúcia Carvalho - [lucia@isa.ulisboa.pt](mailto:lucia@isa.ulisboa.pt)

**Programa Resumido**

**MÓDULO 1: GENÉTICA (18 de setembro a 21 de outubro)**

**Aulas Teóricas e Práticas:**

Genes e Fenótipos: mutações e efeitos fenotípicos.

Origens das culturas agrícolas: domesticação e melhoramento de plantas.

Sistemas reprodutivos. Sistemas génicos de auto-incompatibilidade.

Princípios básicos da hereditariedade: padrões hereditários.

Métodos de melhoramento em Angiospérmicas.

Genética Quantitativa: características quantitativas na população heterogénea;

decomposição dos valores fenotípicos e genotípicos; herdabilidade em sentido lato

e em sentido restrito; genótipo genético da seleção

**MÓDULO 2: FISILOGIA VEGETAL (04 de novembro a 20 de dezembro)**

**Aulas Teóricas:**

O funcionamento das plantas e as interações com o ambiente. Metabolismo do carbono. Fotossíntese (reações fotoquímicas e reações de assimilação do carbono) e respiração das plantas. Limitações metabólicas e ambientais à produção vegetal. Translocação floémica dos fotoassimilados. Noção de "source" e "sink". Acumulação em órgãos de reserva. Metabolismo do azoto, do enxofre e do fósforo. Ciclo fotossintético do azoto. Absorção e transporte de água na planta - Relações hídricas, balanço hídrico da planta. Sinais, respostas e vias de transdução dos sinais associados ao desenvolvimento. Hormonas clássicas e emergentes.

**Aulas Práticas:**

Determinação do estado hídrico dos tecidos vegetais. Problemas sobre relações hídricas. Taxa de fotossíntese e Problemas. Reação do Hill.

**Regras de Funcionamento**

- As aulas têm início à hora marcada

- É obrigatório o uso de bata para a realização dos trabalhos de laboratório.

- Não é permitida a utilização de calculadoras gráficas nos mini-questionários, testes e exame final.

**Regras de Avaliação**

**1.Obtenção de frequência**

A avaliação contínua nesta Unidade Curricular é **obrigatória**, incluindo os seguintes parâmetros:

- (I) Participação em 80% das aulas (sendo três o número máximo de faltas por cada módulo)
- (II) Os estudantes que alcancem a classificação positiva em cada um dos módulos encontram-se **dispensados do exame final**.

**1.1 MÓDULO 1: GENÉTICA**

- (III) (30%) - 2 ~~questionários~~ teóricos/práticos que decorrem nas aulas práticas de 4ª e 6ª semanas
- (IV) (70%) - teste final do módulo envolvendo todos os temas abordados tanto nas aulas teóricas como nas aulas práticas. O teste final realiza-se no dia **31 de outubro**.
- (V) Os estudantes que alcancem uma média final positiva e, simultaneamente classificações iguais ou superiores a 9 valores em todas as avaliações, estão dispensados do exame final.

**1.2 MÓDULO 2: FISILOGIA VEGETAL**

- (I) (30%) - 3 mini-questionários teórico/práticos a realizar nos 20 min iniciais das seguintes aulas:  
**1ª mini-teste:** 20, 21 e 22/11/2019 abordando a 1ª, 2ª e 3ª aulas teóricas, e 1ª aula prática.  
**2ª mini-teste:** 04, 05 e 06/12/2019 abordando a 4ª e 5ª aulas teóricas e a 2ª e 3ª aulas práticas  
**3ª mini-teste:** 18, 19 e 20/12/2019 abordando a 6ª, 7ª e 8ª aulas teóricas e a 4ª aula prática
- (II) (50%) - teste teórico-prático de final do módulo, no dia **20 de dezembro**. Classificação mínima de 8,50 valores.
- (III) (20%) Trabalho de pesquisa e Apresentação: baseado em artigos de revisão (ex. de revistas: Trends in Plant Science, Annual Review of Plant Physiology and Biochemistry). O trabalho é realizado e apresentado por grupos de 3 ou, no máximo, 4 alunos. Os temas devem ser propostos ao coordenador da disciplina. Cada apresentação deve durar entre 15 e 20 minutos, seguido de uma breve discussão. O ficheiro Power-Point, contendo a apresentação, deve ser enviado ao coordenador da disciplina durante o período de 3 dias que se seguem à apresentação e deverá ter em consideração as críticas e comentários feitos no final da apresentação.

**Área Científica:** Biologia

**Coordenadora:** Leonor Morais ([leomais@isa.ulisboa.pt](mailto:leomais@isa.ulisboa.pt))

**Docentes do Módulo Genética:**

Leonor Morais - [leomais@isa.ulisboa.pt](mailto:leomais@isa.ulisboa.pt) (Responsável)

Vanda Viegas - [vandaviegas@isa.ulisboa.pt](mailto:vandaviegas@isa.ulisboa.pt)

Elsa Gonçalves - [elsgoncalves@isa.ulisboa.pt](mailto:elsgoncalves@isa.ulisboa.pt)

Ana Capeta - [anacapeta@isa.ulisboa.pt](mailto:anacapeta@isa.ulisboa.pt)

**Docentes do Módulo – Fisiologia:**

Ricardo Boavida Ferreira - [rboavida@isa.ulisboa.pt](mailto:rboavida@isa.ulisboa.pt) (Responsável)

Conceição Caldeira - [mcaldeira@isa.ulisboa.pt](mailto:mcaldeira@isa.ulisboa.pt)

Luísa Carvalho - [lcarvalho@isa.ulisboa.pt](mailto:lcarvalho@isa.ulisboa.pt)

**Programa Resumido**

**MÓDULO 1: GENÉTICA (15 de setembro a 21 de outubro)**

**Aulas Teóricas e Práticas:**

Genes e Fenótipos: mutações e efeitos fenotípicos.

Origens das culturas agrícolas: domesticação e melhoramento de plantas.

Sistemas reprodutivos. Sistemas génicos de auto-incompatibilidade.

Princípios básicos da hereditariedade: padrões hereditários.

Métodos de melhoramento em Angiospérmicas.

Genética Quantitativa: características quantitativas na população heterogénea;

decomposição dos valores fenotípicos e genotípico; herdabilidade em sentido lato

e em sentido restrito; ganho genético de seleção

**MÓDULO 2: FISILOGIA VEGETAL (04 de novembro a 20 de dezembro)**

**Aulas Teóricas:**

O funcionamento das plantas e as interações com o ambiente. Metabolismo do carbono. Fotossíntese (reações fotoquímicas e reações de assimilação do carbono) e respiração das plantas. Limitações metabólicas e ambientais à produção vegetal. Translocação floémica dos fotoassimilados. Noção de "source" e "sink". Acumulação em órgãos de reserva. Metabolismo do azoto, do enxofre e do fósforo. Ciclo fotossintético do azoto. Absorção e transporte de água na planta - Relações hídricas, balanço hídrico da planta. Sinais, receptores e vias de transdução dos sinais associados ao desenvolvimento. Hormonas clássicas e emergentes.

**Aulas Práticas:**

Determinação do estado hídrico dos tecidos vegetais. Problemas sobre relações hídricas. Taxa de fotossíntese e Problemas. Reação do Hill.

**Regras de Funcionamento**

- As aulas têm início à hora marcada
- É obrigatório o uso de bata para a realização dos trabalhos de laboratório.
- Não é permitida a utilização de calculadoras gráficas nos mini-questionários, testes e exames finais.

**Regras de Avaliação**

**1. Obtenção de frequência**

A avaliação continua nesta Unidade Curricular é **obrigatória**, incluindo os seguintes parâmetros:

- (i) Participação em 80% das aulas (sendo isto o número máximo de faltas por cada módulo)
- (ii) Os estudantes que alcancem a classificação positiva em cada um dos módulos encontram-se **dispensados do exame final**.

**1.1 MÓDULO 1: GENÉTICA**

- (iii) (20%) - 2 ~~mini-testes~~ teóricos/práticos que decorrem nas aulas práticas da 4ª e 6ª semanas
- (iv) (70%) - teste final do módulo envolvendo todos os temas abordados tanto nas aulas teóricas como nas aulas práticas. O teste final realiza-se no dia **31 de outubro**.
- (v) Os estudantes que alcancem uma média final positiva e, simultaneamente classificações iguais ou superiores a 9 valores em todas as avaliações, estão **dispensados do exame final**.

**1.2 MÓDULO 2: FISILOGIA VEGETAL**

- (i) (20%) - 3 mini-questionários teórico/práticos a realizar nos 20 min iniciais das seguintes aulas:  
**1º mini-teste:** 20, 21 e 22/11/2019 abordando a 1ª, 2ª e 3ª aulas teóricas, e 1ª aula prática.  
**2º mini-teste:** 04, 05 e 06/12/2019 abordando a 4ª e 5ª aulas teóricas e a 2ª e 3ª aulas práticas  
**3º mini-teste:** 18, 19 e 20/12/2019 abordando a 6ª, 7ª e 8ª aulas teóricas e a 4ª aula prática
- (ii) (20%) - teste teórico-prático de final do módulo, no dia **20 de dezembro**. Classificação mínima de 8,50 valores.
- (iii) (20%) Trabalho de pesquisa e Apresentação: baseado em artigos de revisão (ex. de revistas: Trends in Plant Science, Annual Review of Plant Physiology and Biochemistry). O trabalho é realizado e apresentado por grupos de 3 ou, no máximo, 4 alunos. Os temas devem ser propostos ao coordenador da disciplina. Cada apresentação deve durar entre 15 a 20 minutos, seguido de uma breve discussão. O ficheiro Power-Point, contendo a apresentação, deve ser enviado ao coordenador da disciplina durante o período de 3 dias que se seguem à apresentação e deverá ter em consideração as críticas e comentários feitos no final da apresentação.

Pelo menos metade do trabalho apresentado deve estar directamente relacionado com a matéria leccionada nas aulas teóricas.

## **2. Exame final (50%)**

É exigida a realização de exame final aos alunos que **não** tenham obtido uma classificação de frequência positiva em qualquer um dos módulos.

Para admissão a exame final, os alunos têm de ter, obrigatoriamente, frequência ao módulo respectivo. O Exame Final, com classificação mínima de 10 valores, representa **50%** da classificação final do módulo. A avaliação contínua corresponde a **50%**.

### ***Bibliografia recomendada***

#### ***MÓDULO 1: GENÉTICA***

A.J.E.Griffiths, S.R.Wessler, R.C.Lewontin e S.B.Carroll (2009) - Introdução à Genética (9ªEd.) Guanabara ~~Knogon~~. [ISBN: 13: 978-85-277-1497-6]

#### ***MÓDULO 2: FISILOGIA VEGETAL***

- Azcón-Bieto, J. e Talón, M. (eds.) (2000) Fundamentos de Fisiologia Vegetal. McGraw-Hill Interamericana.

- Taiz, L. e Zeiger, E. (2006) Plant Physiology. Sinauer Associates, Inc., Publishers. 4th ed. (ou 2002 3rd Ed).

- Artigos científicos e capítulos de livros fornecidos pelos docentes.

Pelo menos metade do trabalho apresentado deve estar directamente relacionado com a matéria leccionada nas aulas teóricas.

## **2. Exame final (50%)**

É exigida a realização de exame final aos alunos que **não** tenham obtido uma classificação de frequência positiva em qualquer um dos módulos.

Para admissão a exame final, os alunos têm de ter, obrigatoriamente, frequência ao módulo respectivo. O Exame Final, com classificação mínima de 10 valores, representa **50%** da classificação final do módulo. A avaliação contínua corresponde a **50%**.

### ***Bibliografia recomendada***

#### **MÓDULO 1: GENÉTICA**

A.J.E.Griffiths, S.R.Wessler, R.C.Lewontin e S.B.Carroll (2009) - Introdução à Genética (9ªEd.) Guanabara ~~Koogan~~. [ISBN: 13: 978-85-277-1497-6]

#### **MÓDULO 2: FISILOGIA VEGETAL**

- Azcón-Bieto, J. e Talón, M. (eds.) (2000) Fundamentos de Fisiologia Vegetal. McGraw-Hill Interamericana.

- Taiz, L. e Zeiger, E. (2006) Plant Physiology. Sinauer Associates, Inc., Publishers. 4th ed. (ou 2002 3rd Ed).

- Artigos científicos e capítulos de livros fornecidos pelos docentes.



# Plano de Aulas

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	<b>Biologia Funcional - Licenciatura em Eng<sup>a</sup> Agronómica 2019-2020</b>							
2				3 <sup>o</sup> semestre				
3								
4	<b>Horários das Aulas</b>							
5	PRÁTICAS: Turmas 1, 2 e 1a		Turma 1 - (alunos sem frequência prática). 4 <sup>a</sup> feira, 14:45 - 17:15 h			Laboratório 46 / Sala 33		
6			Turma 2 - (alunos sem frequência prática). 5 <sup>a</sup> feira, 14:45 - 17:15 h			Laboratório 34 / Sala 27		
7			Turma 1a - (alunos com frequência prática). 6 <sup>a</sup> feira, 14:30 - 17:00 h			Laboratório 34 / Sala 33		
8	TEÓRICAS: Turmas 1, 2 e 1a		Turmas 1 + 2 + 1a - (alunos sem frequência prática). 6 <sup>a</sup> feira, 08:30 - 11:00 h			Sala 12		
9								
10								
11	N <sup>o</sup> total de alunos inscritos na UC - 99							
12	N <sup>o</sup> de alunos inscritos sem frequência prática -							

45	<b>Mini-questionários teórico/práticos</b>		(20 min no início das aulas das datas indicadas)				
46	20, 21 e 22/11/2019	1 <sup>o</sup>	Matéria das aulas teóricas 1, 2 e 3, e da aula prática 1				
47	04, 05 e 06/12/2019	2 <sup>o</sup>	Matéria das aulas teóricas 4 e 5, e das aulas práticas 2 e 3			<b>Número de Inscrições</b>	<b>Número de Alunos</b>
48	18, 19 e 20/12/2019	3 <sup>o</sup>	Matéria das aulas teóricas 6, 7 e 8, e da aula prática 4			1	56
49						2	24
50						3	14
51	<b>Datas dos Exames:</b>					4	4
52			1 <sup>a</sup> Data de exame: 3 <sup>a</sup> feira, dia 07 de janeiro, entre as 09:30 e as 13:00 h - Sala ????			5	1
53			2 <sup>a</sup> data de exame: 3 <sup>a</sup> feira, dia 21 de janeiro, entre as 09:30 e as 13:00 h - Sala ????				
54			Exame de época especial: 2 <sup>a</sup> feira, dia 03 de fevereiro, entre as 09:30 e as 13:00 h - Sala ????				
55	Em cada data, o exame do Módulo de Genética terá lugar entre as 09:30 e as 11 h e o do Módulo de Fisiologia Vegetal entre as 11:30 e as 13:00 h						
56							
57							
58	<b>Docentes</b>						
59	RBF	Ricardo Boavida Ferreira	<a href="mailto:rferreira@isa.ulisboa.pt">rferreira@isa.ulisboa.pt</a>				
60	MCC	M <sup>a</sup> Conceição Caldeira	<a href="mailto:mcaldeira@isa.ulisboa.pt">mcaldeira@isa.ulisboa.pt</a>				
61	LC	Luisa Carvalho	<a href="mailto:lc Carvalho@isa.ulisboa.pt">lcarvalho@isa.ulisboa.pt</a>				
62							
63							
64							
65							
66			1 <sup>a</sup> Data de exame: 3 <sup>a</sup> feira, dia 07 de janeiro, entre as 09:30 e as 13:00 h - Sala ????				
67			2 <sup>a</sup> data de exame: 3 <sup>a</sup> feira, dia 21 de janeiro, entre as 09:30 e as 13:00 h - Sala ????				
68			Exame de época especial: 2 <sup>a</sup> feira, dia 03 de fevereiro, entre as 09:30 e as 13:00 h - Sala ????				
69							
70							

# Plano de Aulas

14								
15	Dias	Turmas		Sala	Matéria	Docente	Aulas	Mini-Testes
16	06/11/2019	T1 + T1a	4ª feira	46	Relações Hídricas - 1	MCC	Teórica-1	
17	07/11/2019	T2	5ª feira	34	Relações Hídricas - 1	MCC	Teórica-1	
18	08/11/2019	T1, T2, T1a	6ª feira	12	Apresentação; Fotossíntese: Reações fotoquímicas	RBF	Teórica-3	
19	13/11/2019	T1	4ª feira	46	Determinação do estado hídrico dos tecidos vegetais & Problemas sobre relações hídr	MCC	Prática-1	
20	14/11/2019	T2	5ª feira	34	Determinação do estado hídrico dos tecidos vegetais & Problemas sobre relações hídr	MCC	Prática-1	
21	16/11/2019	T1a	6ª feira	34	Determinação do estado hídrico dos tecidos vegetais & Problemas sobre relações hídr	MCC	Prática-1	
22	15/11/2019	T1, T2, T1a	6ª feira	12	Relações Hídricas - 2	MCC	Teórica-2	
23	20/11/2019	T1	4ª feira	46	Taxa de fotossíntese e Problemas	LC	Prática-2	1ª Mini-Teste
24	21/11/2019	T2	5ª feira	34	Taxa de fotossíntese e Problemas	LC	Prática-2	1ª Mini-Teste
25	22/11/2019	T1a	6ª feira	34	Taxa de fotossíntese e Problemas	LC	Prática-2	1ª Mini-Teste
26	22/11/2019	T1, T2, T1a	6ª feira	12	Fotossíntese: Reações de assimilação do CO <sub>2</sub> - 1	RBF	Teórica-4	
27	27/11/2019	T1	4ª feira	46	Reação de Hill	LC	Prática-3	
28	28/11/2019	T2	5ª feira	34	Reação de Hill	LC	Prática-3	
29	29/11/2019	T1a	6ª feira	34	Reação de Hill	LC	Prática-3	
30	29/11/2019	T1, T2, T1a	6ª feira	12	Fotossíntese: Reações de assimilação do CO <sub>2</sub> - 2	RBF	Teórica-5	
31	04/12/2019	T1	4ª feira	46	Atividade <i>in vivo</i> da nitrato redutase	LC	Prática-4	2ª Mini-Teste
32	05/12/2019	T2	5ª feira	34	Atividade <i>in vivo</i> da nitrato redutase	LC	Prática-4	2ª Mini-Teste
33	06/12/2019	T1a	6ª feira	34	Atividade <i>in vivo</i> da nitrato redutase	LC	Prática-4	2ª Mini-Teste
34	06/12/2019	T1, T2, T1a	6ª feira	12	Metabolismo do azoto, do enxofre e do fósforo	LC	Teórica-6	
35	11/12/2019	T1 + T1a	4ª feira	46	Translocação de assimilados e acumulação reservas	MCC	Teórica-7	
36	12/12/2019	T2	5ª feira	34	Translocação de assimilados e acumulação reservas	MCC	Teórica-7	
37	13/12/2019	T1, T2, T1a	6ª feira	12	Factores ambientais, sinais e desenvolvimento	LC	Teórica-8	
38	18/12/2019	T1	4ª feira	46	Apresentações orais dos trabalhos de pesquisa	RBF-Todos	Apresentações	3ª Mini-Teste
39	19/12/2019	T2	5ª feira	34	Apresentações orais dos trabalhos de pesquisa	RBF-Todos	Apresentações	3ª Mini-Teste
40	20/12/2019	T1a	6ª feira	34	Apresentações orais dos trabalhos de pesquisa	RBF-Todos	Apresentações	3ª Mini-Teste
41	20/12/2019	T1, T2, T1a	6ª feira	12	<b>TESTE FINAL DO MÓDULO</b>	RBF		1ª metade da aula - Sala 12
42	20/12/2019	T1, T2, T1a	6ª feira	12	Apresentações orais dos trabalhos de pesquisa	RBF-Todos	Apresentações	2ª metade da aula - Sala 12

### *Nota 1:*

Como os laboratórios 46 e 34 não comportam mais de 24 estudantes, as aulas práticas de 4<sup>a</sup> e 5<sup>a</sup> feiras destinam-se primariamente aos alunos que não têm ainda frequência no Módulo.

Só depois de preenchidos os 48 lugares das turmas práticas de 4<sup>a</sup> e 5<sup>a</sup> feiras serão aceites inscrições de alunos no horário da aula prática de 6<sup>a</sup> feira.



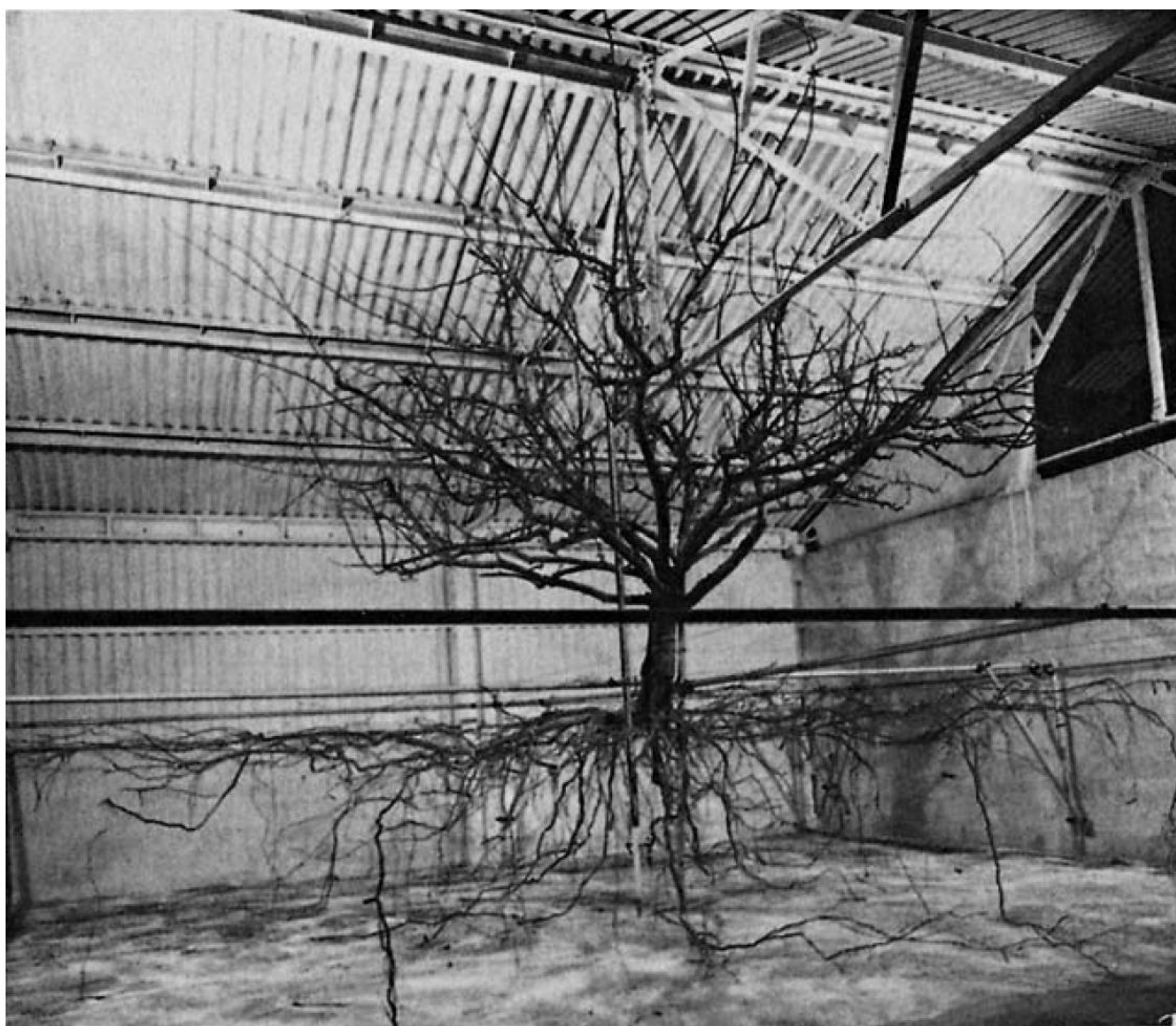
*Nota 2:*

Os protocolos das aulas práticas estão disponíveis no site da disciplina



## O que é a Fisiologia Vegetal?

- É a ciência que estuda o funcionamento das plantas.
- Explica como as plantas são capazes de crescer a partir da luz e moléculas inorgânicas (C, N, P etc), sintetizando moléculas orgânicas e construindo tecidos e órgãos. A água é essencial a todos os processos.
- Explica também como, seguindo um programa de desenvolvimento endógeno, se reproduzem e adaptam ao ambiente.



Root system of 16-year-old Cox's Orange Pippin apple tree on Malling II rootstock.

# Fotossíntese

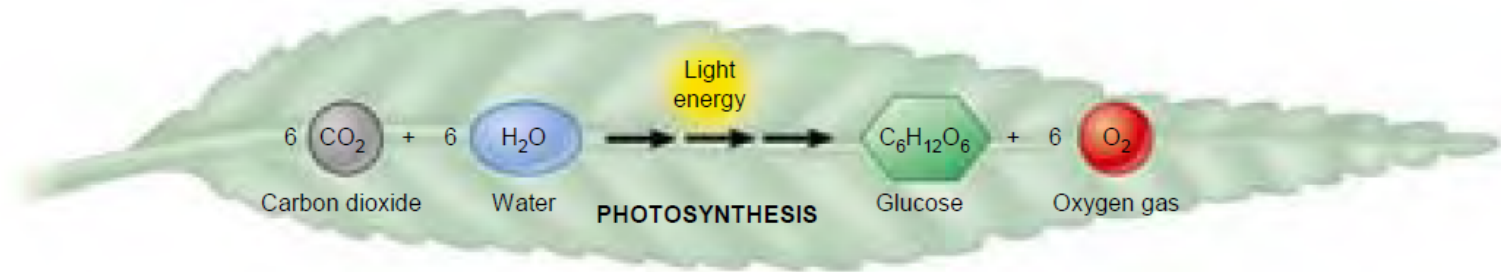
**Fotossíntese. Reacções Fotoquímicas.**

**FOTOSSÍNTESE: Introdução**

**FOTOSSÍNTESE: Reações fotoquímicas da fotossíntese**

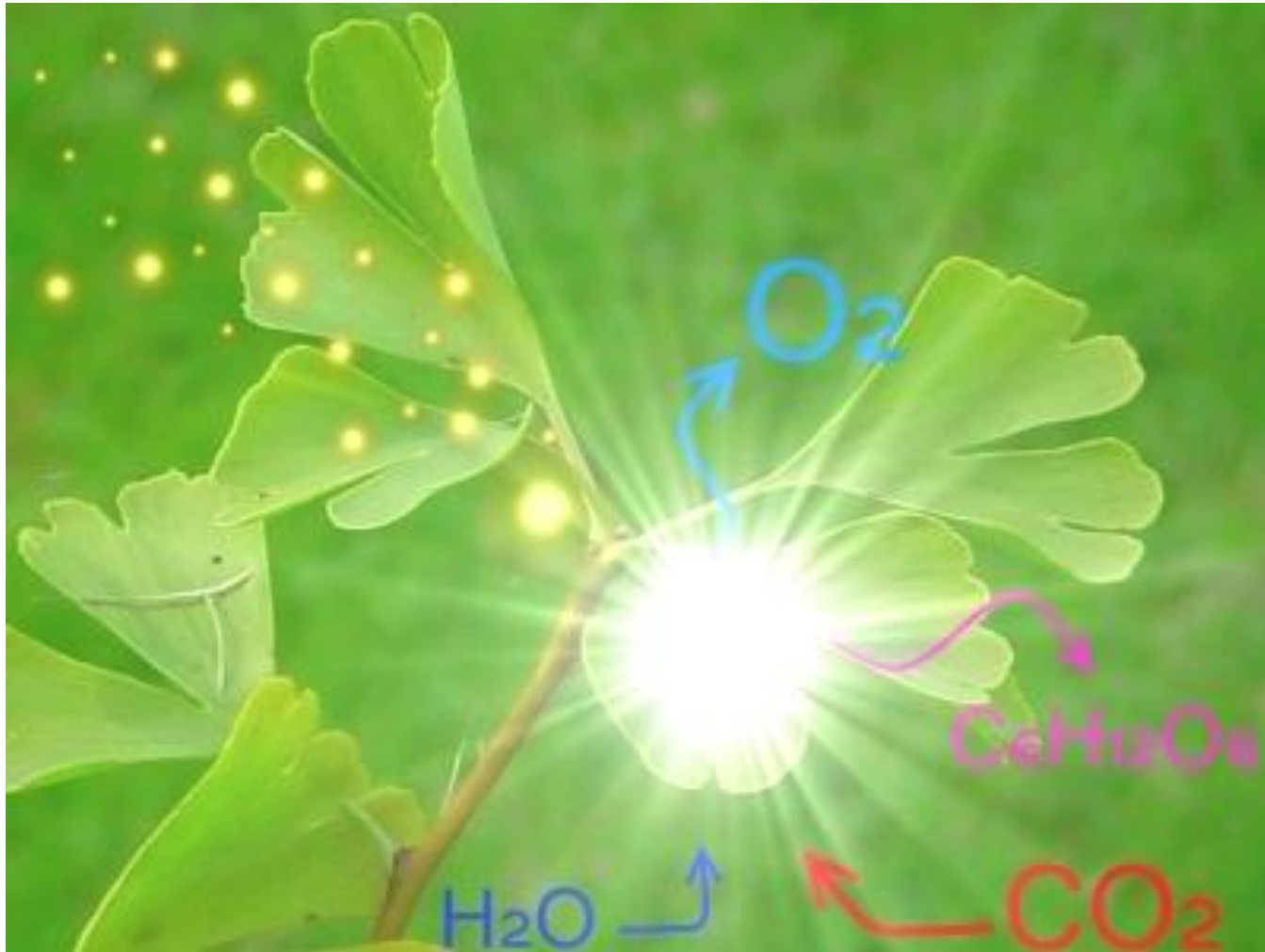
# What is Photosynthesis?

The process of converting light energy (kinetic) into energy stored in the covalent bonds of glucose molecules (potential).



- carried out by photoautotrophs
  - plants, phytoplankton, cyanobacteria (any photosynthetic organism)
- the basis of almost all ecosystems
  - all “food energy” ultimately comes from the sun
  - source of all atmospheric oxygen (O<sub>2</sub>)





A fotossíntese é o processo pelo qual as plantas, algas e algumas espécies de bactérias utilizam a energia radiante, captando-a, transformando-a em energia química e armazenando-a em compostos orgânicos estáveis (fundamentalmente, hidratos de carbono).

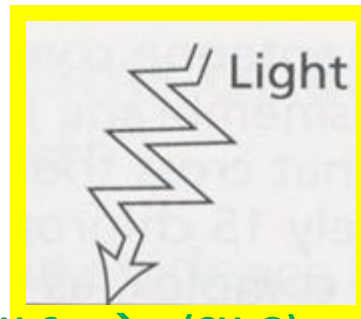
Através da fotossíntese, as plantas produzem

- Hidratos de carbono
- Oxigénio (O<sub>2</sub>)

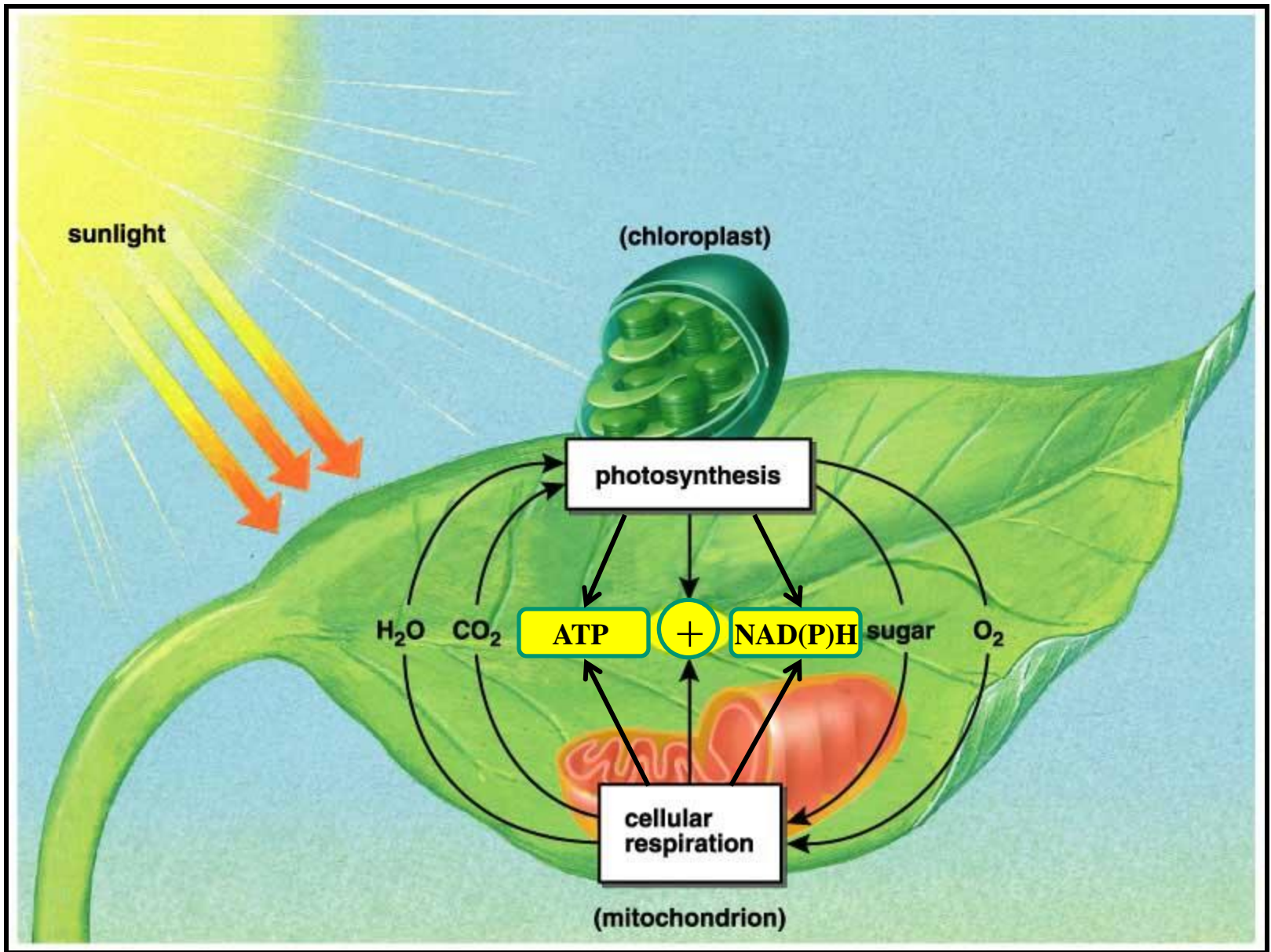
A partir de

- Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)
- Água (H<sub>2</sub>O)
- ATP
- NADPH

A equação global da fotossíntese pode, assim, representar-se por:



$$\Delta G^{0'} = +686 \text{ kcal/mol}$$





# O processo fotossintético engloba dois tipos principais de reações:

## As Reações Fotoquímicas

(por vezes, incorretamente designadas por reações luminosas)

São as reações mais diretamente dependentes da luz.

Envolvem a captação da energia da luz, a emissão dos eletrões e o movimento destes ao longo da cadeia de transporte de eletrões.

As reações fotoquímicas conduzem à formação de:

- ATP, a partir de ADP e Pi;
- Redução do NADP<sup>+</sup> a NADPH;
- Libertação do O<sub>2</sub> a partir da H<sub>2</sub>O.

Equação global das reações fotoquímicas:



Ocorrem nas membranas dos tilacóides.

## As Reações de Assimilação do CO<sub>2</sub>

(por vezes, incorretamente designadas por reações às escuras)

O NADPH e o ATP produzidos pelas reações fotoquímicas constituem as fontes de potencial redutor e de energia necessários à via dos fosfatos de pentose, responsável pela síntese de hidratos de carbono a partir do CO<sub>2</sub> (ciclo de Calvin).

Equação global das reações de assimilação do CO<sub>2</sub> :



Ocorrem no estroma dos cloroplastos.

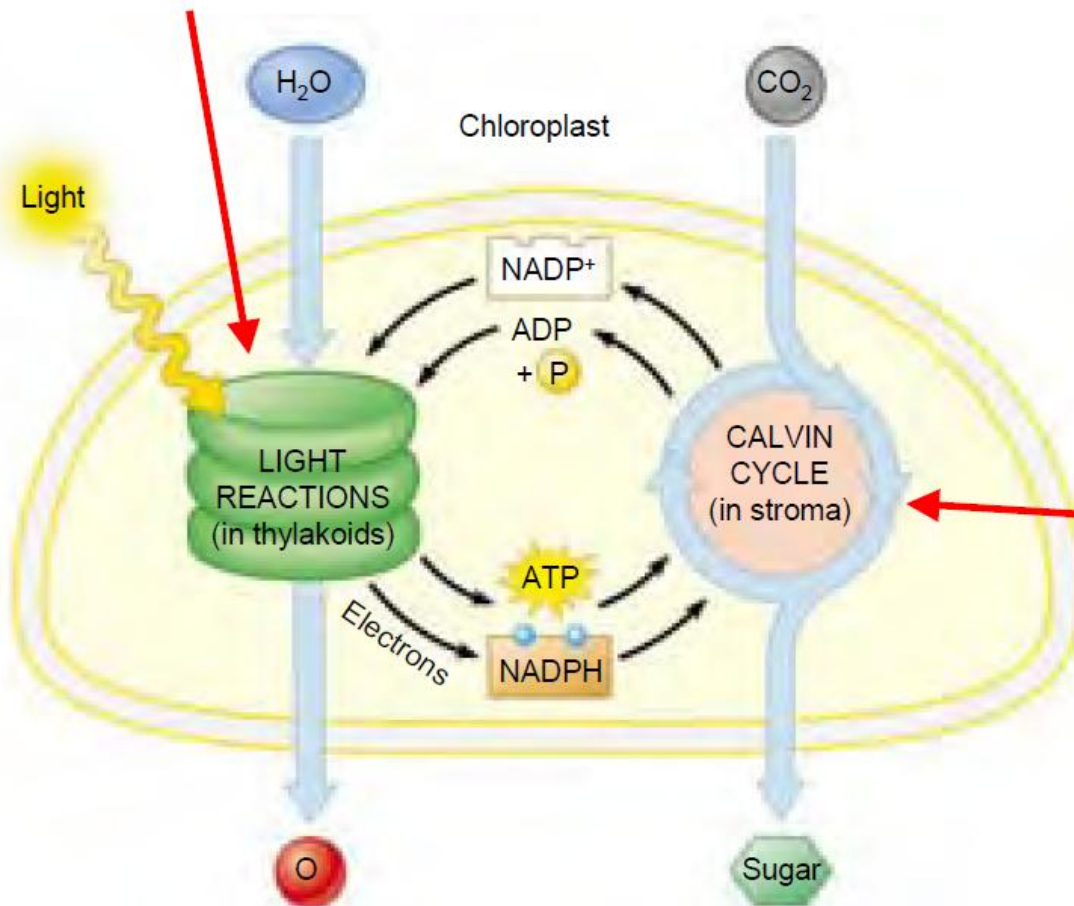
# Photosynthesis consists of 2 sets of Reactions

## The light-dependent or “Light” Reactions:

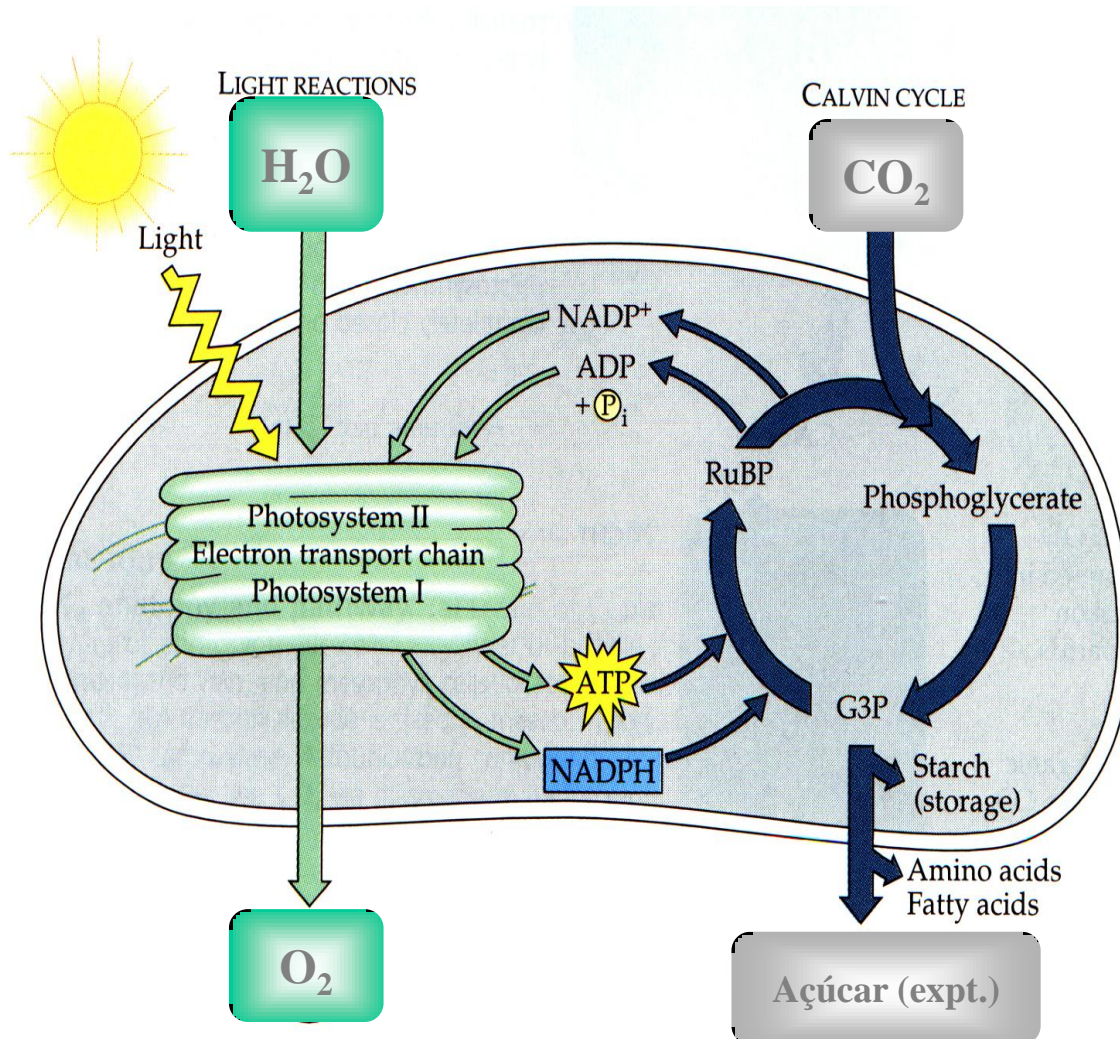
- convert sunlight energy into chemical energy (stored in ATP & NADPH)

## “Dark” Reactions (Calvin cycle):

- use chemical energy from light reactions to make glucose



# Nas **Reacções Fotoquímicas** é produzido potencial reductor (NADPH) e energia (ATP), utilizados na redução do $\text{CO}_2$ em Hidratos de Carbono



São, portanto, o NADPH e o ATP que estabelecem, a nível bioquímico, a ligação entre as membranas dos tilacóides e o estroma do cloroplasto.

Relações semelhantes existem entre os cromatóforos das bactérias fotossintéticas, ou os tilacóides das cianobactérias, e os respectivos citoplasmas.

Nas plantas verdes, o CO<sub>2</sub> é normalmente utilizado na síntese de hidratos de carbono, embora em certos casos possam predominar outros produtos finais como lípidos, aminoácidos ou derivados do glicolato.

No caso das plantas superiores e algas, o dador de electrões da fotossíntese é a água (fotossíntese oxigénica). Assim, todo o oxigénio libertado durante a fotossíntese destes organismos provém da água.

Contudo, as bactérias fotossintéticas podem usar outros dadores de electrões, como o H<sub>2</sub>S, originando enxofre como produto:



A maioria dos electrões são utilizados na produção do NADPH necessário à síntese dos hidratos de carbono, embora uma pequena quantidade seja desviada para outros aceitadores terminais de electrões, como o nitrato ou o sulfato.

# Reacções Fotoquímicas da Fotossíntese



# Os Pigmentos Fotossintéticos

Uma característica comum a todas as células com capacidade fotossintética é a de possuírem estruturas membranosas, providas de pigmentos, capazes de absorver e de canalizar a energia luminosa.

Tipos de organismos fotossintéticos (e respectivos sistemas membranosos):

- Procaríotas: cianobactérias e bactérias fotossintéticas

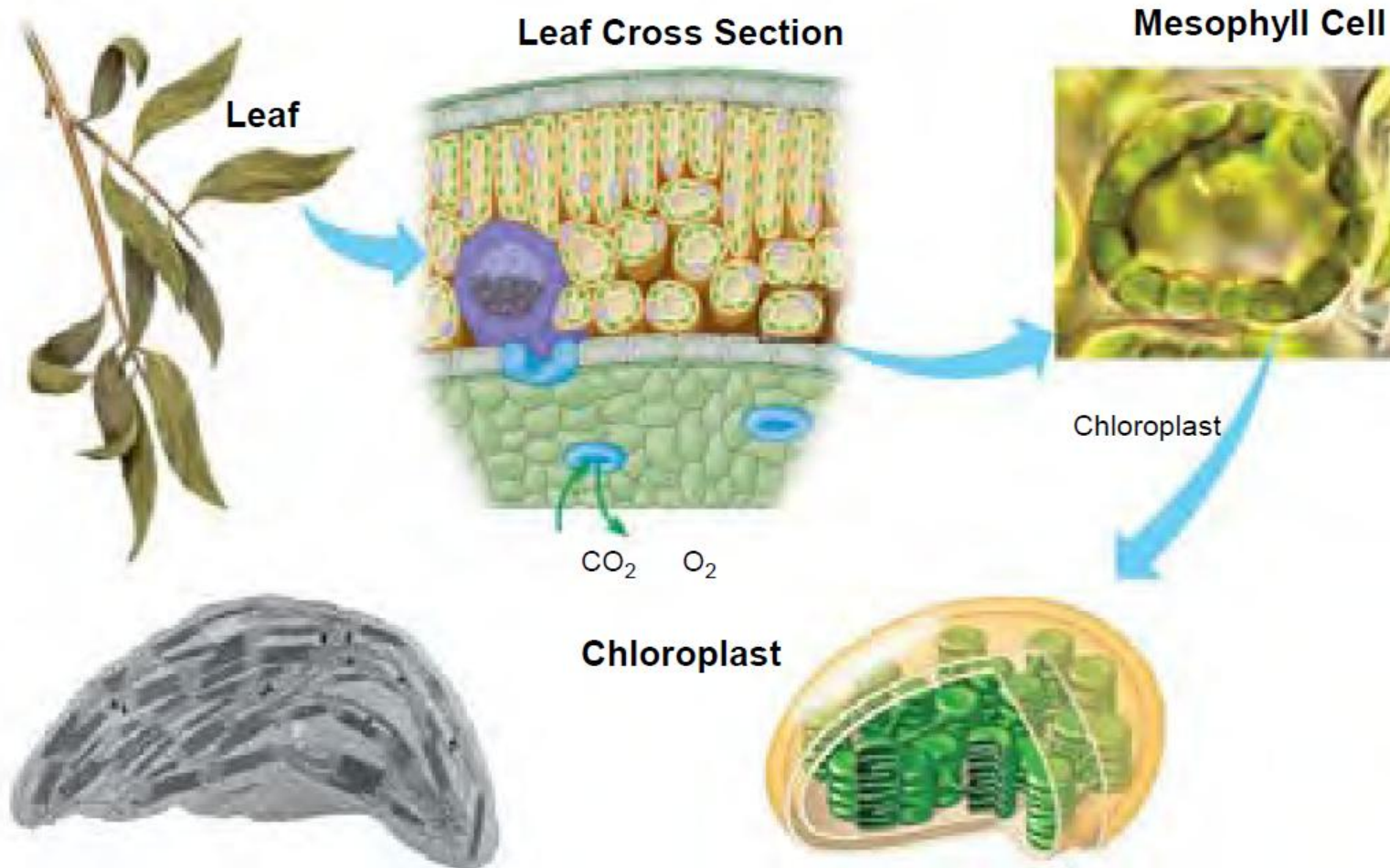
Alguns procaríotas, se bem que desprovidos de núcleo, mitocôndrios e plastídeos, apresentam capacidade fotossintética. É o caso de

- Cianobactérias, antigamente designadas algas verde-azuladas, com sistemas membranosos semelhantes aos tilacóides dos cloroplastos, os quais se encontram dispersos no citoplasma, isolados ou agrupados aos pares.
- Bactérias fotossintéticas, com diversos tipos de sistemas membranosos, como:
  - Estruturas semelhantes aos tilacóides dos cloroplastos, dispersas e isoladas no citoplasma;
  - Invaginações da membrana plásmica;
  - Vesículas globosas envolvidas por membrana, os cromatóforos.

- Eucariotas: plantas e algas

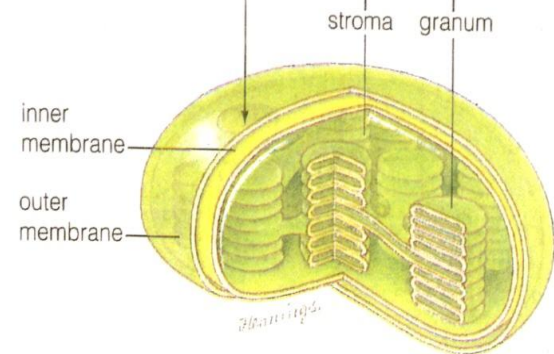
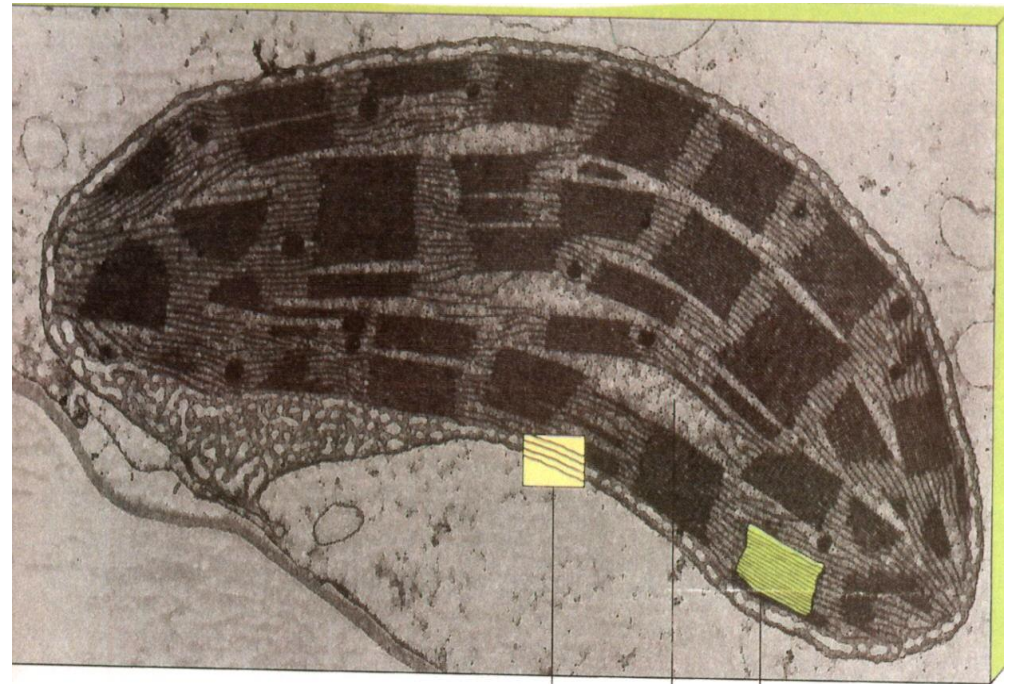
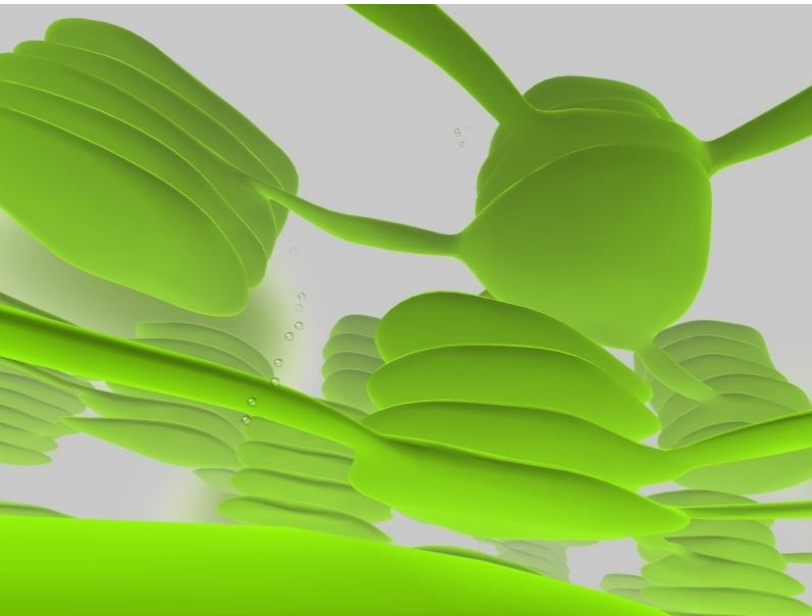
Os organismos eucariotas com capacidade fotossintética possuem esta actividade nos cloroplastos. A estrutura dos cloroplastos reflecte o estágio de evolução do organismo. Assim, a estrutura do cloroplasto aumenta de complexidade dos eucariotas mais primitivos (que apresentam tilacóides isolados no seu interior) até aos mais evoluídos (que apresentam grana bem diferenciado).

# Photosynthesis occurs in Chloroplasts



## A fotossíntese tem lugar nos **cloroplastos** das células do mesófilo

Estes possuem membranas especializadas (os **tilacóides**), onde se dão as Reacções Fotoquímicas, e o **estroma**, uma região aquosa onde ocorrem as reacções de redução do  $\text{CO}_2$  (Ciclo de Calvin).





# The Chloroplast

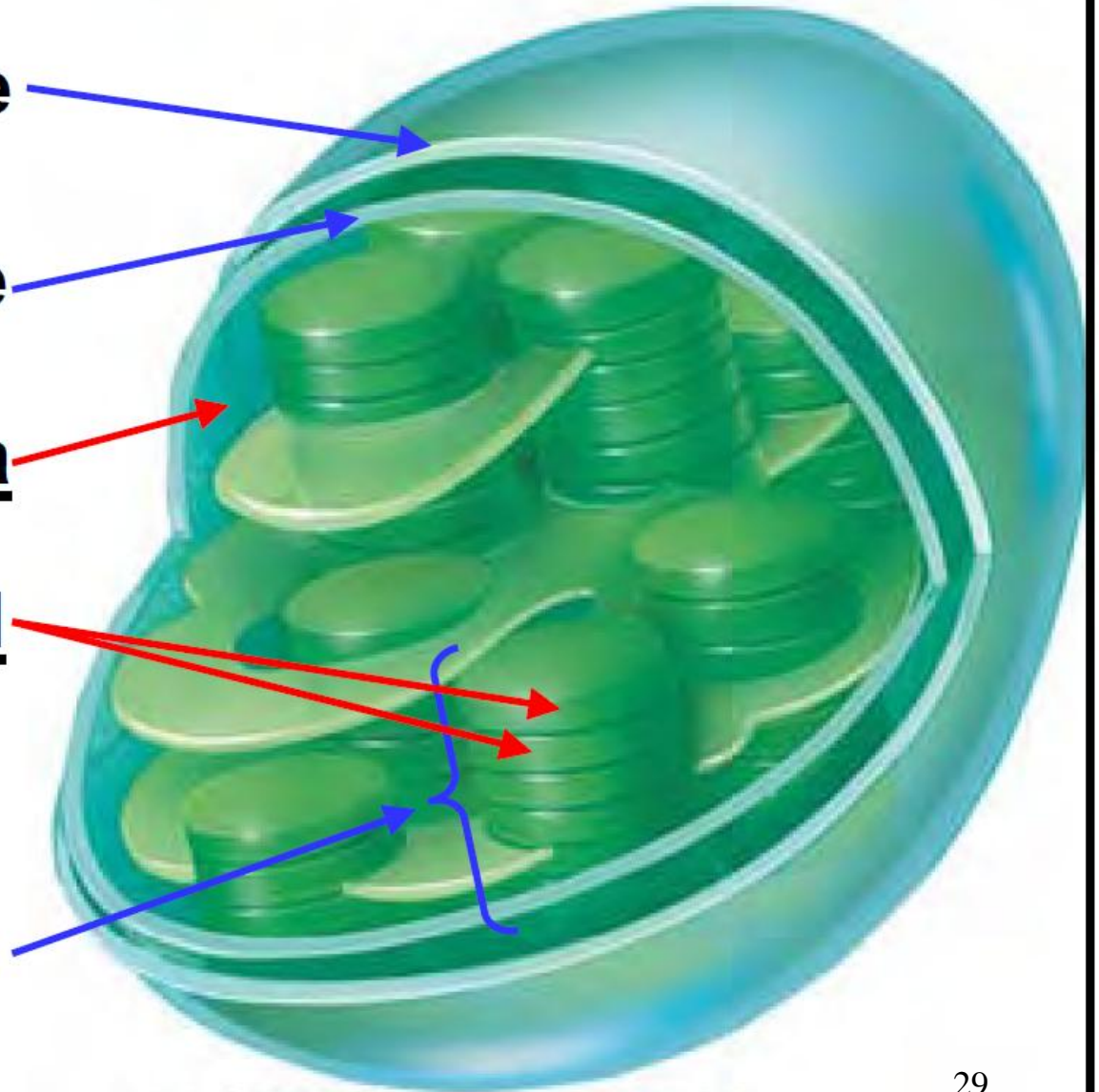
outer membrane

inner membrane

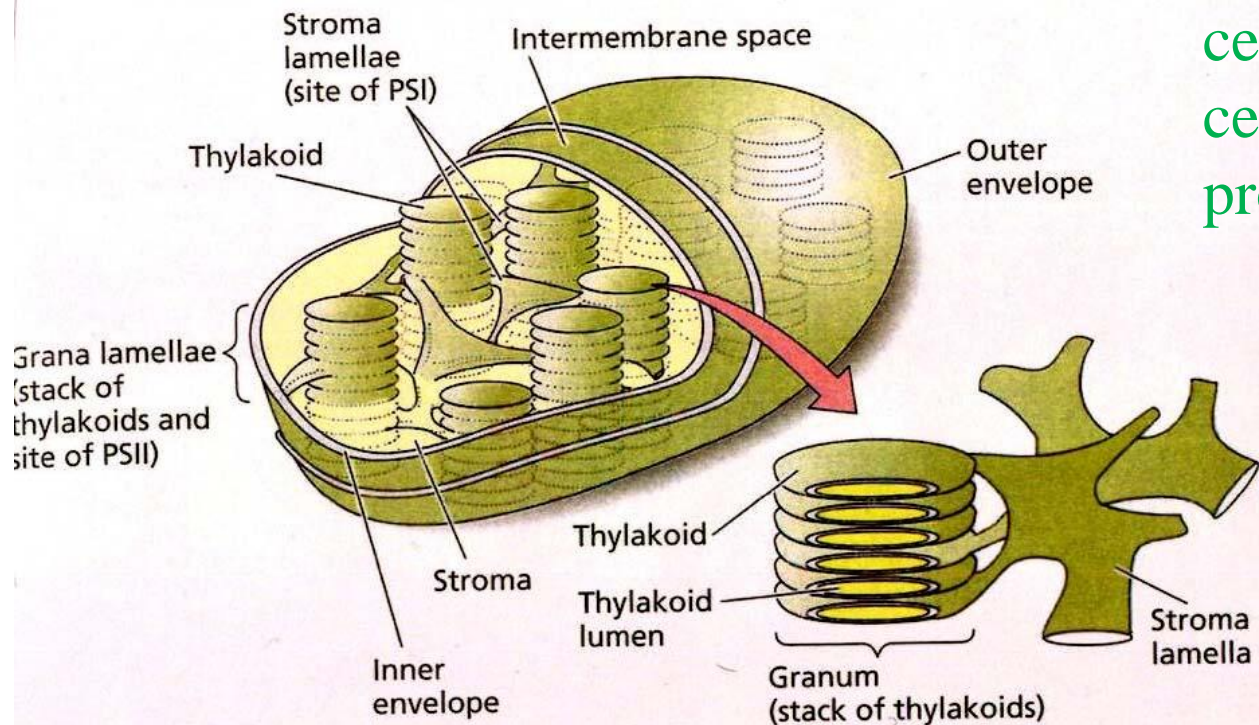
stroma

thylakoid

granum



A maior parte dos tilacóides aparecem ‘empilhados’, constituindo as lamelas de **grana**. Existem, também, tilacóides não empilhados – lamelas do estroma



Os cloroplastos ocupam cerca de 20% do volume celular e 75% do volume protoplásmico.

O aparelho de captação de energia luminosa da fotossíntese consiste num complexo de lípidos e proteínas embebidos nas membranas dos tilacóides dos cloroplastos, ou na membrana plásmica das bactérias fotossintéticas, e de um grupo de moléculas coloridas de captação da luz, os cromóforos ou pigmentos fotossintéticos, intimamente associadas a essas membranas. São os pigmentos fotossintéticos os principais responsáveis pela captação e conversão da energia luminosa em energia química.

#### Tipos de pigmentos fotossintéticos:

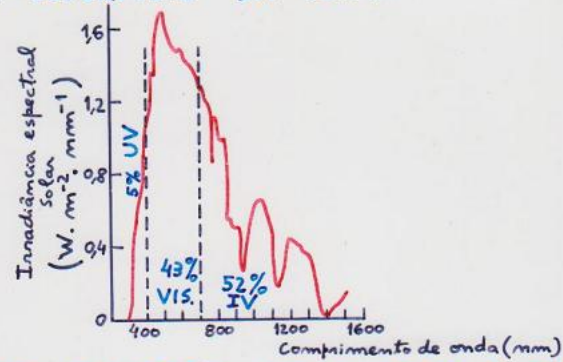
-Classificados quanto à sua natureza química:

- Clorofilas
- Carotenóides
- Ficobilinas

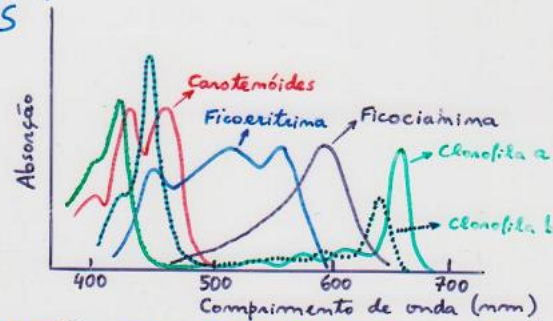
- Classificados quanto à sua função:

- Pigmento primário ou fundamental – É a molécula que fornece, por acção da energia da luz, electrões à cadeia fotossintética de transporte de electrões
- Pigmentos acessórios, auxiliares ou antena

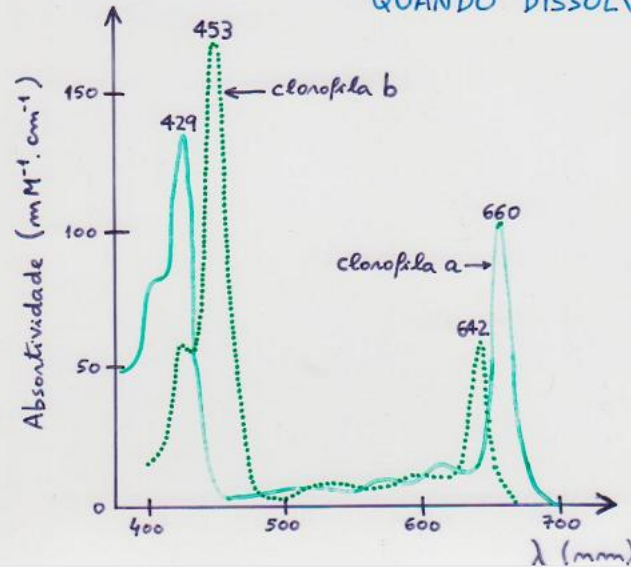
## A - DISTRIBUIÇÃO ENERGÉTICA DA RADIAÇÃO SOLAR NA SUPERFÍCIE DA TERRA



## B - ESPECTRO DE ABSORÇÃO DOS PRINCIPAIS PIGMENTOS FOTOSSINTÉTICOS



## C - ESPECTROS DE ABSORÇÃO DAS CLOROFILAS a E b, QUANDO DISSOLVIDAS EM ÉTER.

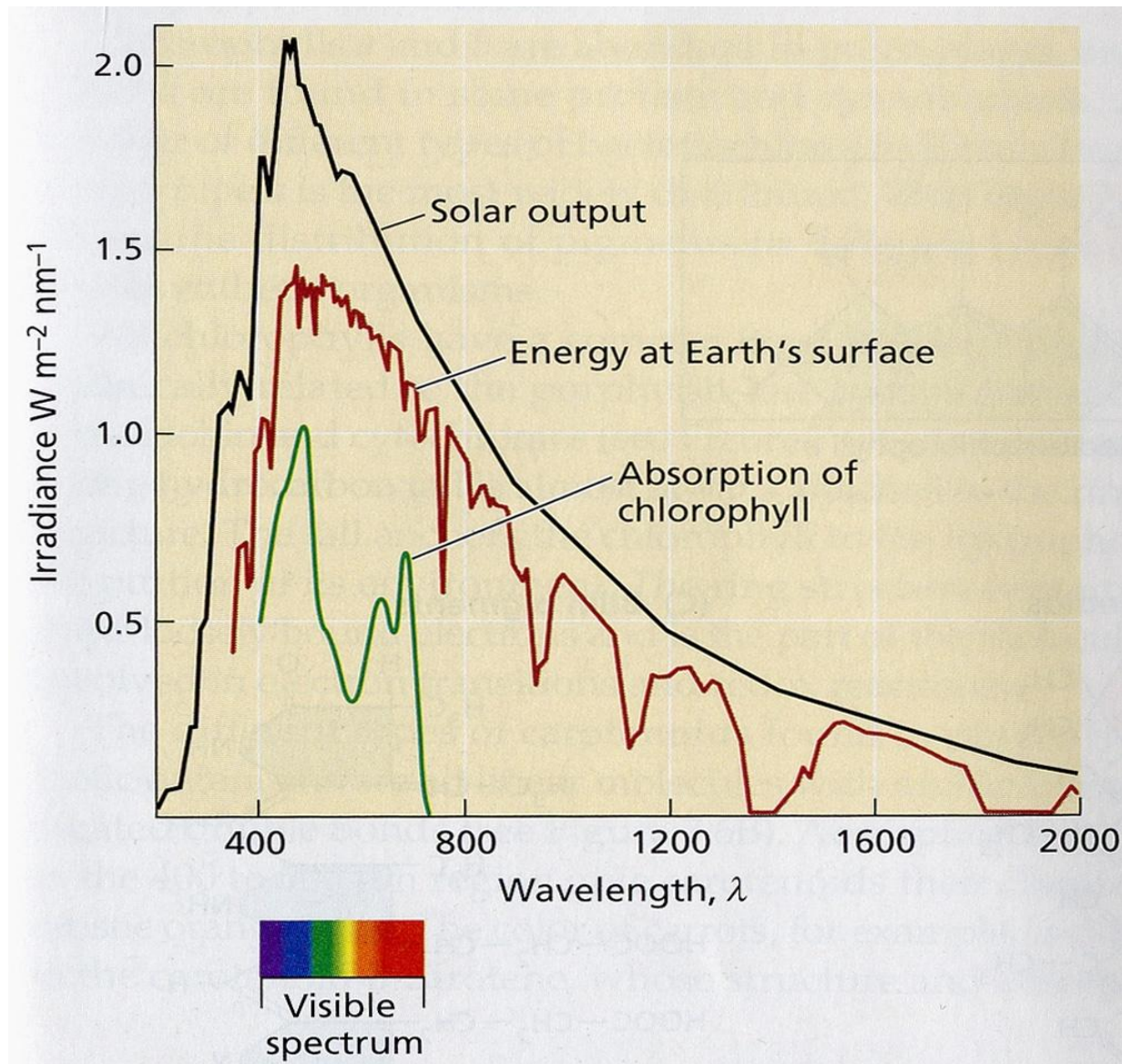


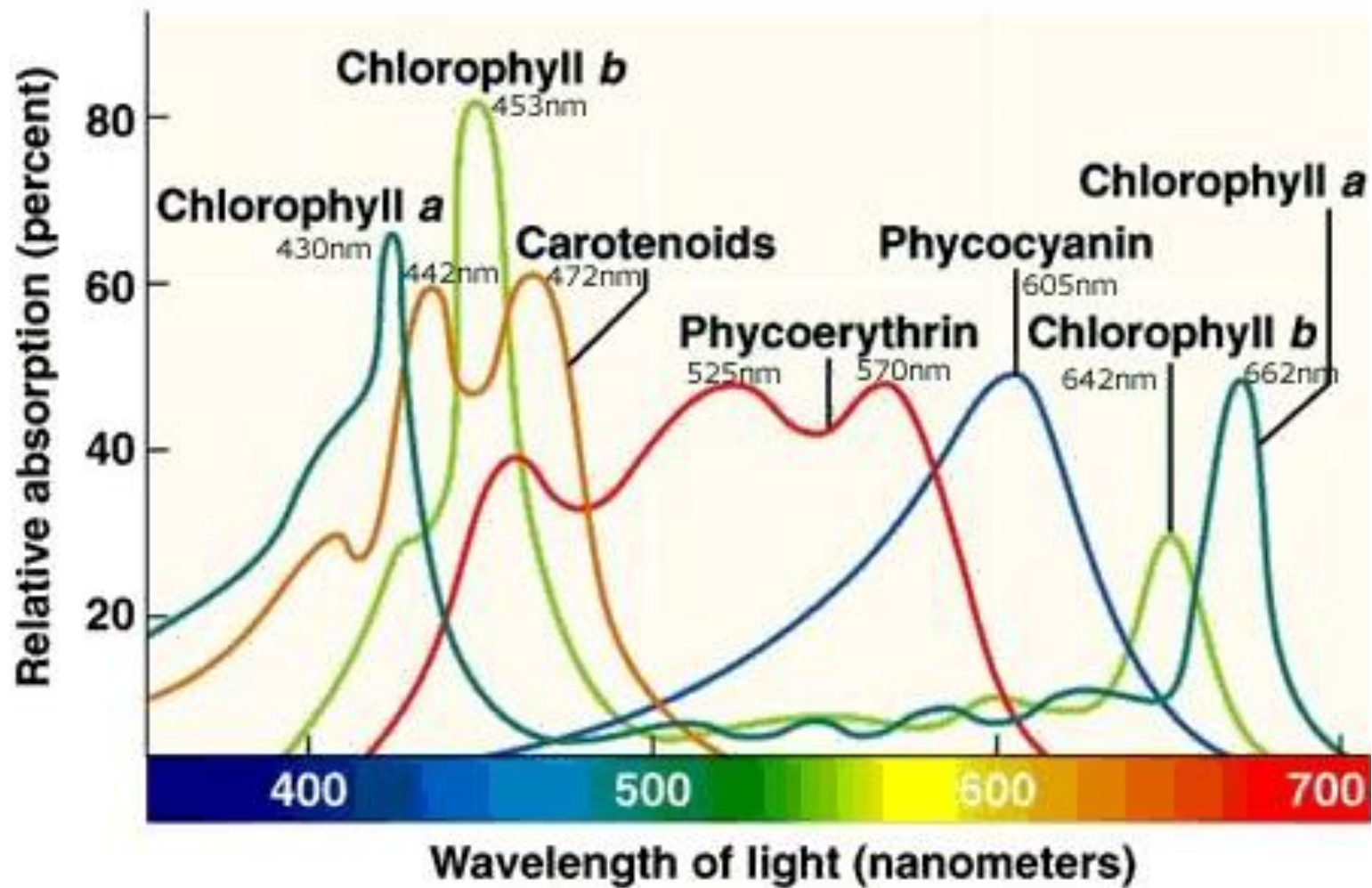
PICOS DE ABSORÇÃO  
in vivo:

- 640 nm
- 650 nm
- 662 nm
- 670 nm
- 677 nm
- 684 nm



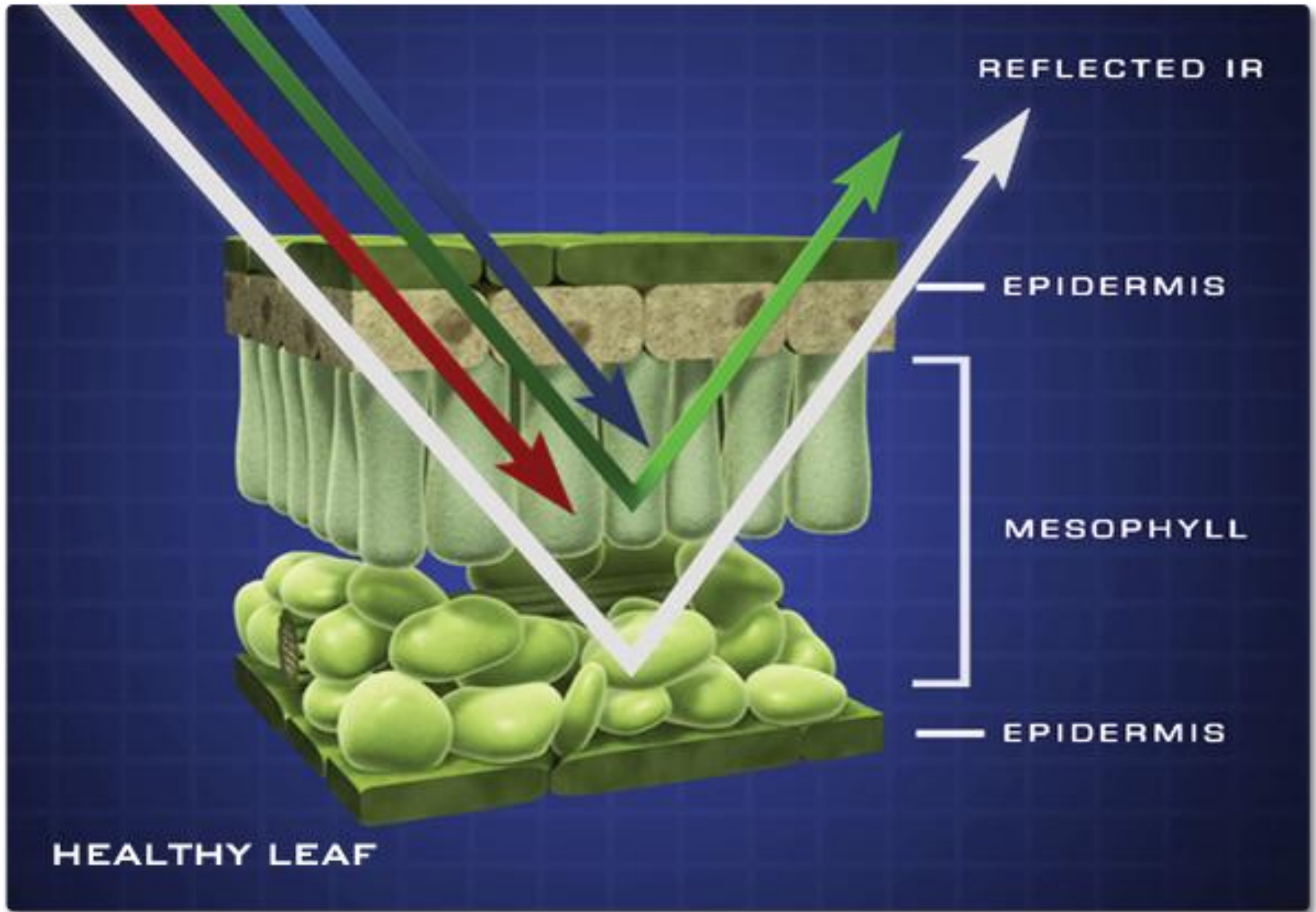
# A energia luminosa é a força motriz da fotossíntese





**Porque é que a natureza seleccionou plantas verdes?**

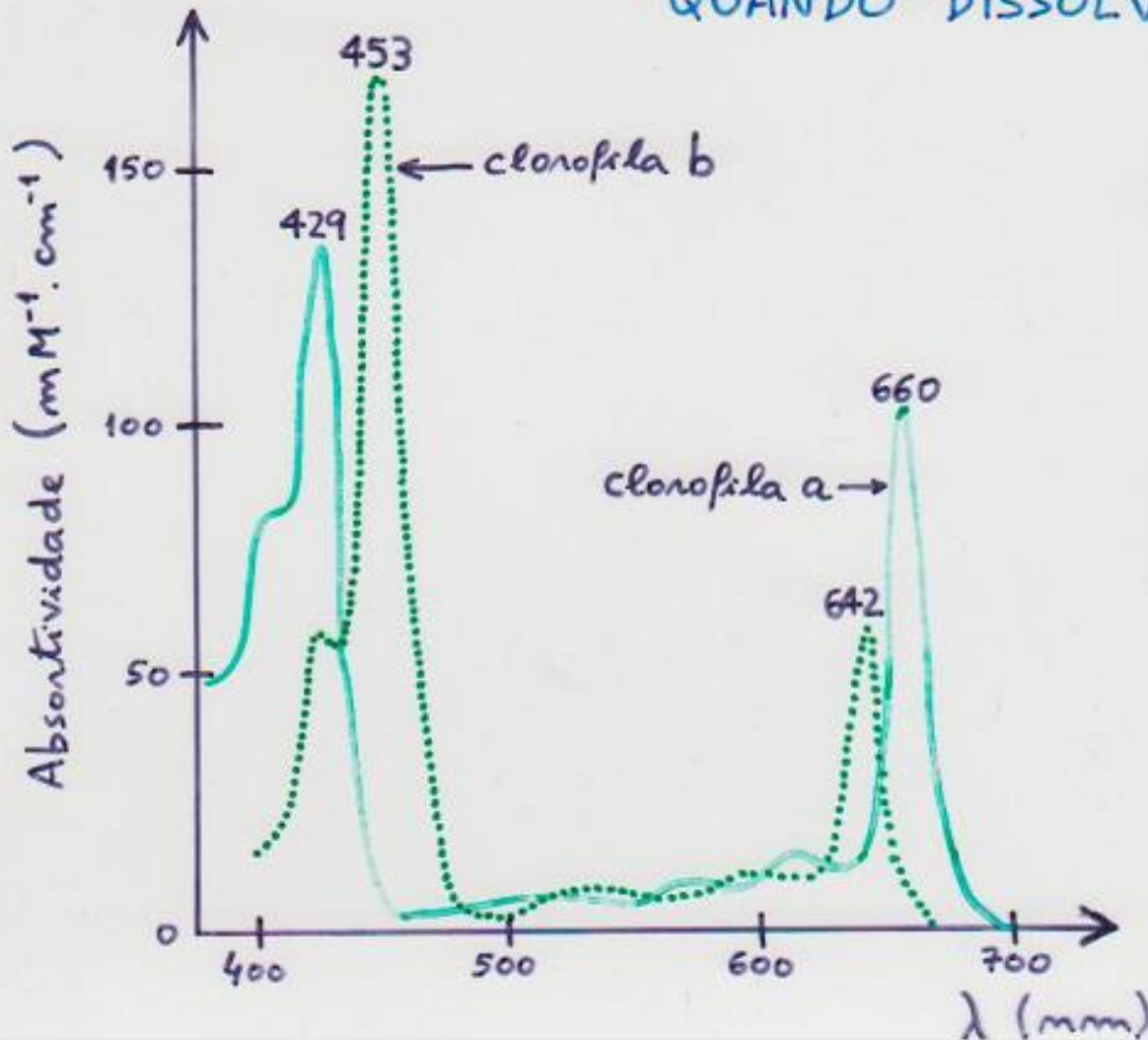
**O caso de *Halobacterium halobium*, um fóssil vivo.**





As plantas são verdes porque contêm clorofilas.  
Mas porque é que as clorofilas são verdes?

C - ESPECTROS DE ABSORÇÃO DAS CLOROFILAS a E b,  
QUANDO DISSOLVIDAS EM ÉTER.



PICOS DE ABSORÇÃO  
in vivo :

- 640 nm
- 650 nm
- 662 nm
- 670 nm
- 677 nm
- 684 nm

## Tipos de pigmentos fotossintéticos:

-Classificados quanto à sua natureza química:

- Clorofilas
- Carotenóides
- Ficobilinas

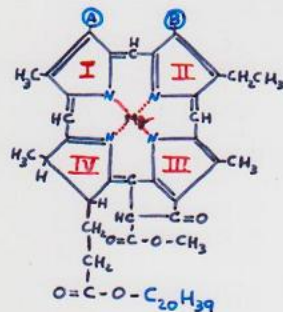
- Classificados quanto à sua função:

- Pigmento primário ou fundamental – É a molécula que fornece, por acção da energia da luz, electrões à cadeia fotossintética de transporte de electrões
- Pigmentos acessórios, auxiliares ou antena

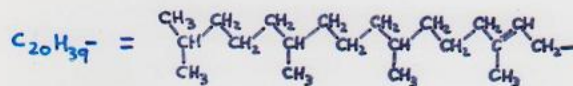
Uma característica comum a todos os pigmentos fotossintéticos é a de possuírem, na sua estrutura, sistemas de ligações duplas conjugadas – estes sistemas permitem a excitação de alguns dos seus electrões pelos fotões da luz.

# CLOROFILAS

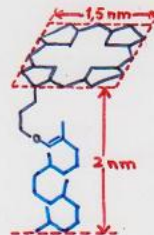
A - ESTRUTURA DAS MOLECÚLAS DE CLOROFILA a, b, e d.



- Ⓐ = {  
 -CH=CH<sub>2</sub> nas clorofilas a e b.  
 -CHO na clorofila d.
- Ⓑ = {  
 -CH<sub>3</sub> na clorofila a.  
 -CHO na clorofila b.



B - ESQUEMA DA MOLECÚLA DE CLOROFILA a MOSTRANDO O PLANO DO ANEL PORFIRÍNICO PERPENDICULAR AO PLANO DA MOLECÚLA DE FITOL.

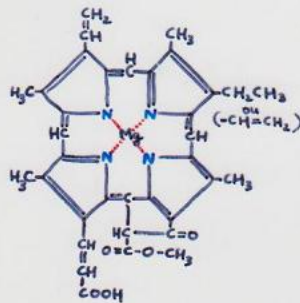


Clorofila a: C<sub>55</sub>H<sub>72</sub>O<sub>5</sub>N<sub>4</sub>Mg

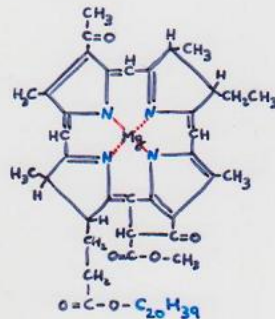
Clorofila b: C<sub>55</sub>H<sub>70</sub>O<sub>6</sub>N<sub>4</sub>Mg

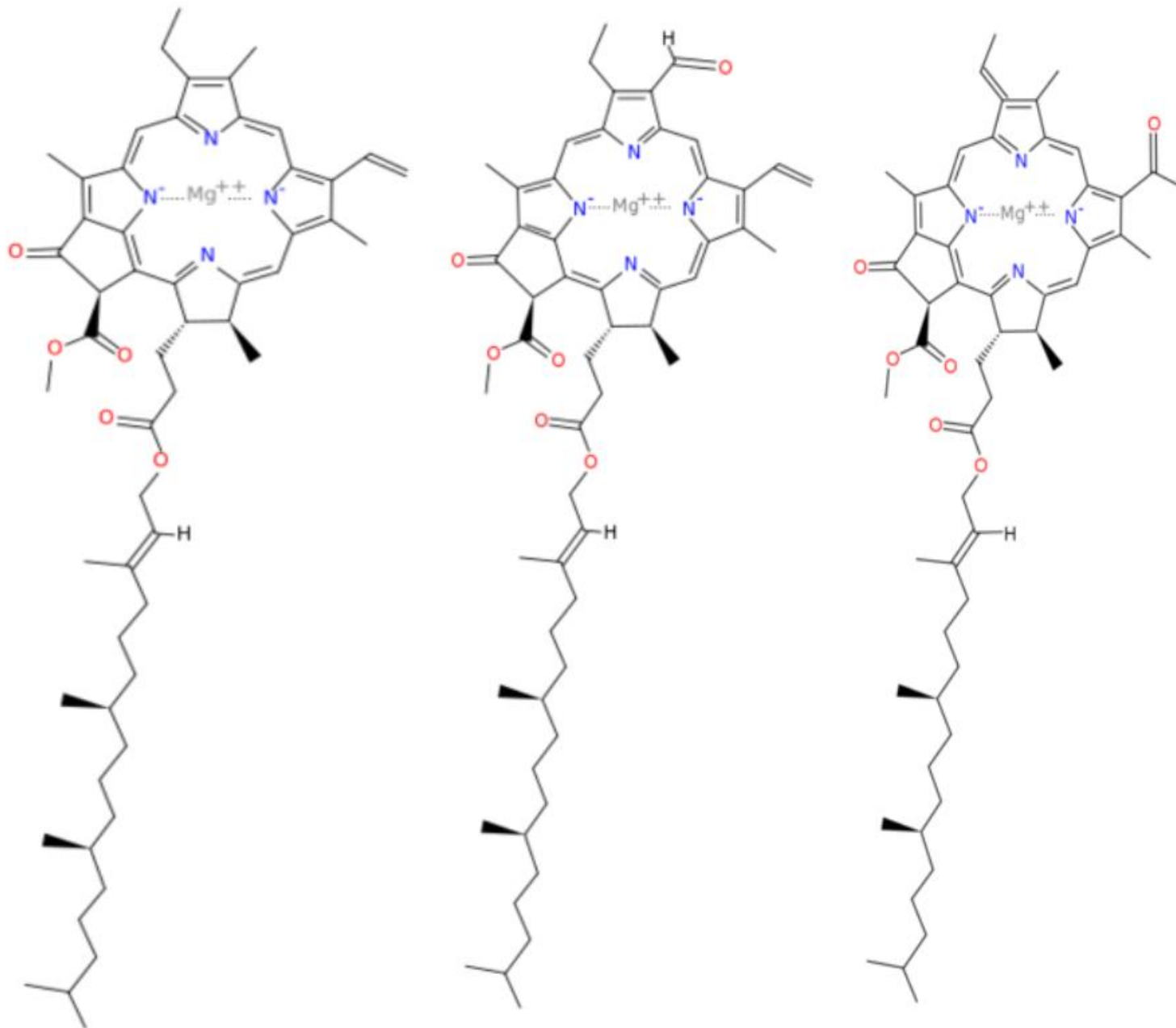
Fitol: C<sub>20</sub>H<sub>39</sub>OH

C - ESTRUTURA DA MOLECÚLA DE CLOROFILA c.



D - ESTRUTURA DA MOLECÚLA DE BACTERIOCLOROFILA a.





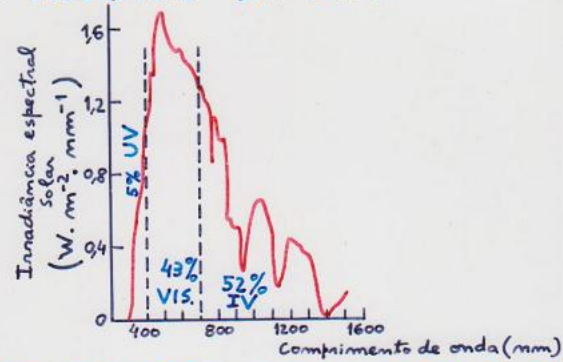
Structure of chlorophyll *a*, chlorophyll *b*, and bacteriochlorophyll, respectively.



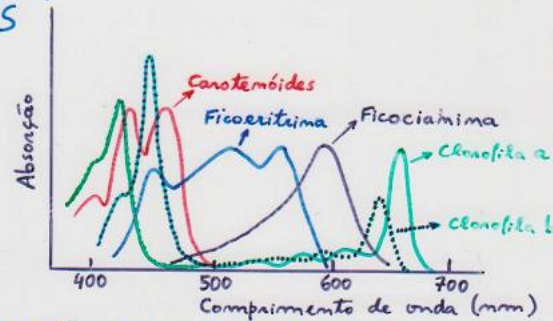
- Clorofila a** : encontra-se em todos os organismos que libertam  $O_2$  na fotossíntese — portanto, em todas as plantas superiores, algas, e outras plantas verdes não superiores como pteridófitas, briófitas, etc. Exceptuando as bactérias, a sua distribuição é universal.
- Clorofila b** : encontra-se, conjuntamente com a clorofila a, em todas as plantas verdes, incluindo as algas. Só nas cianobactérias e algumas algas vermelhas existe apenas a clorofila a.
- Clorofila c** : encontra-se, conjuntamente com a clorofila a, nas diatomáceas, nas algas castanhas, e nos dinoflagelados.
- Clorofila d** : encontra-se, conjuntamente com a clorofila a, em certo número de algas vermelhas.
- Bacterioclorofilas a, b, c, d** : encontram-se nas bactérias fotossintéticas.
- $\beta$ -caroteno** : é o principal caroteno dos tecidos vegetais.
- $\alpha$ -caroteno** : nos tecidos vegetais, acompanha normalmente o  $\beta$ -caroteno, em proporções variáveis.
- $\gamma$ -caroteno** : é o principal caroteno das bactérias sulfurosas verdes, ocorrendo nas plantas mas em quantidades vestigiais.
- luteína** : é a principal xantófila das folhas verdes e das algas verdes e vermelhas.
- fucoxantol** : é a xantófila mais abundante nas algas castanhas e nas diatomáceas.
- ficocianinas** : ficobilinas importantes nas algas vermelhas, ocorrendo também em certo número de cianobactérias.
- ficocianinas** : ficobilinas importantes nas cianobactérias, ocorrendo também nas algas vermelhas.



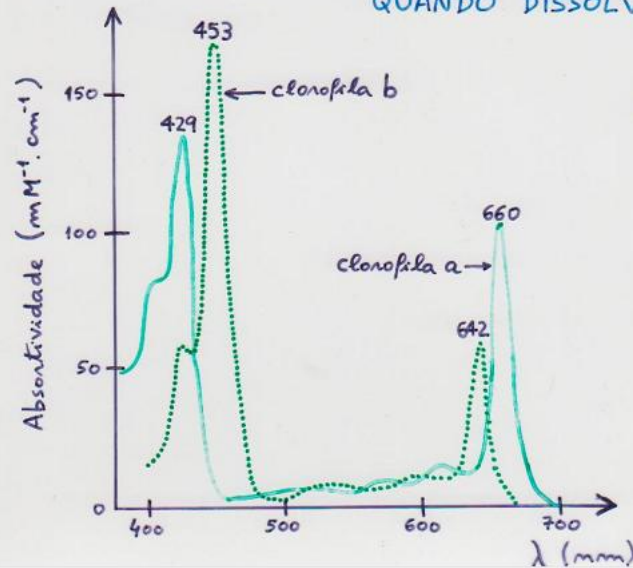
## A - DISTRIBUIÇÃO ENERGÉTICA DA RADIAÇÃO SOLAR NA SUPERFÍCIE DA TERRA



## B - ESPECTRO DE ABSORÇÃO DOS PRINCIPAIS PIGMENTOS FOTOSSINTÉTICOS



## C - ESPECTROS DE ABSORÇÃO DAS CLOROFILAS a E b, QUANDO DISSOLVIDAS EM ÉTER.

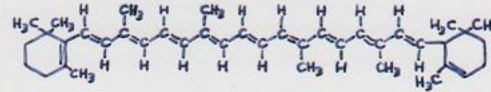


PICOS DE ABSORÇÃO  
im vivo :

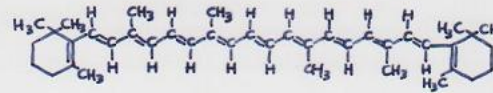
- 640 nm
- 650 nm
- 662 nm
- 670 nm
- 677 nm
- 684 nm

# A-CAROTENÓIDES

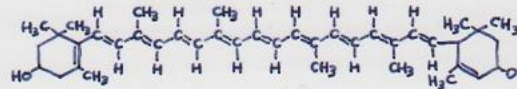
$\alpha$ -caroteno



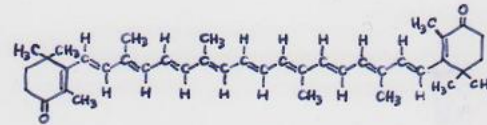
$\beta$ -caroteno



luteína

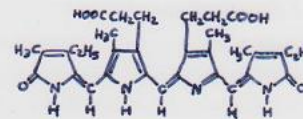


clorelaxantina

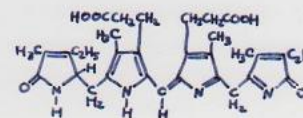


# B - FICOBILINAS

ficocianina



ficoeritrina



**Clorofila a** : encontra-se em todos os organismos que libertam  $O_2$  na fotossíntese — portanto, em todas as plantas superiores, algas, e outras plantas verdes não superiores como pteridófitas, briófitas, etc. Exceptuando as bactérias, a sua distribuição é universal.

**Clorofila b** : encontra-se, conjuntamente com a clorofila a, em todas as plantas verdes, incluindo as algas. Só nas cianobactérias e algumas algas vermelhas existe apenas a clorofila a.

**Clorofila c** : encontra-se, conjuntamente com a clorofila a, nas diatomáceas, nas algas castanhas, e nos dinoflagelados.

**Clorofila d** : encontra-se, conjuntamente com a clorofila a, em certo número de algas vermelhas.

**Bacterioclorofilas a, b, c, d** : encontram-se nas bactérias fotossintéticas.

**$\beta$ -caroteno** : é o principal caroteno dos tecidos vegetais.

**$\alpha$ -caroteno** : nos tecidos vegetais, acompanha normalmente o  $\beta$ -caroteno, em proporções variáveis.

**$\gamma$ -caroteno** : é o principal caroteno das bactérias sulfurosas verdes, ocorrendo nas plantas mas em quantidades vestigiais.

**luteína** : é a principal xantófila das folhas verdes e das algas verdes e vermelhas.

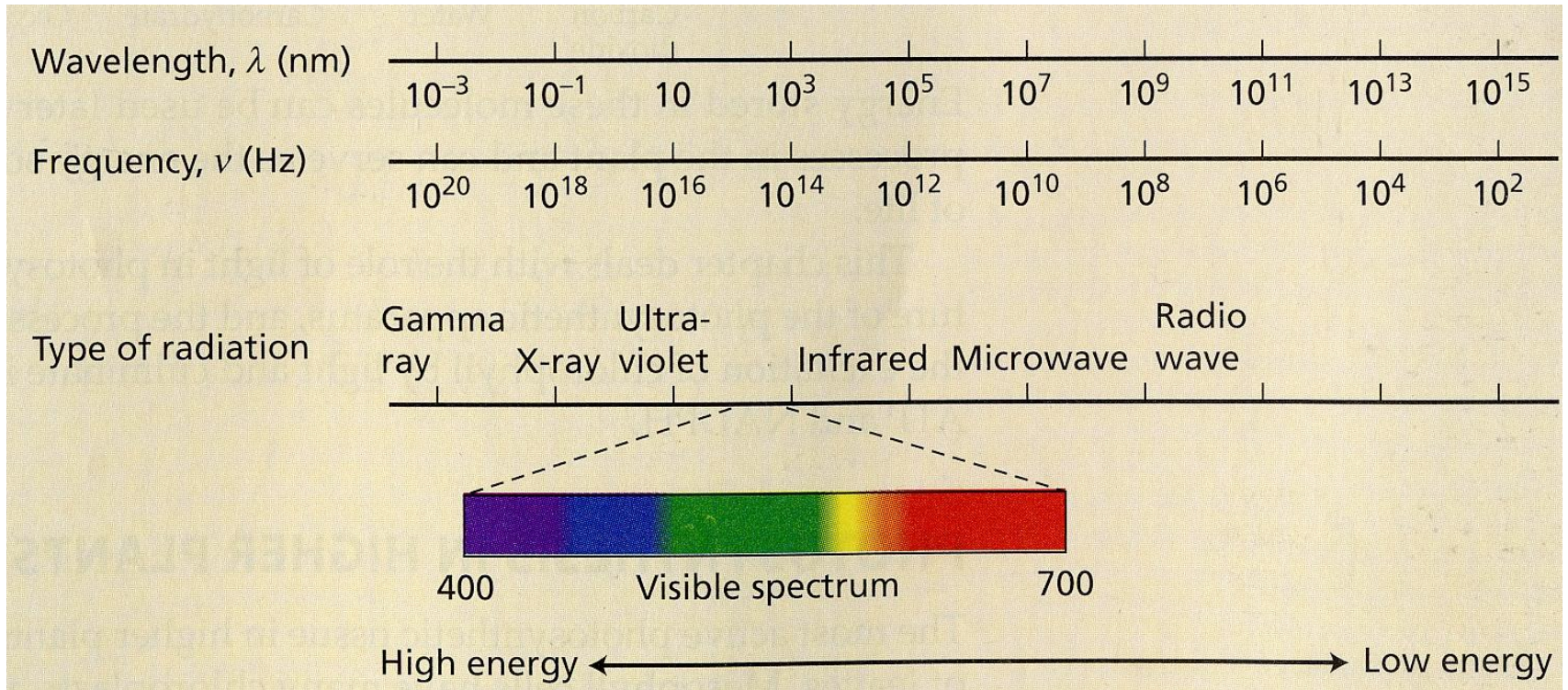
**fucoxantol** : é a xantófila mais abundante nas algas castanhas e nas diatomáceas.

**ficocianinas** : ficobilinas importantes nas algas vermelhas, ocorrendo também em certo número de cianobactérias.

**ficocianinas** : ficobilinas importantes nas cianobactérias, ocorrendo também nas algas vermelhas.

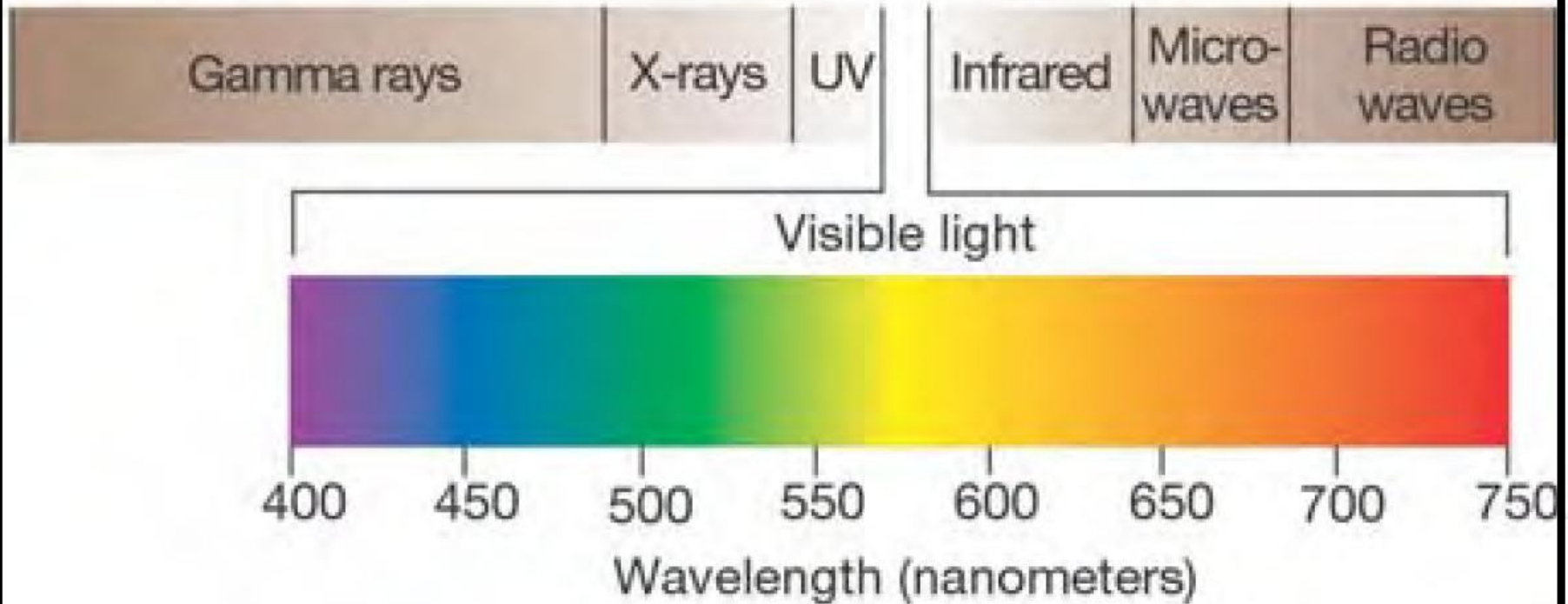


As plantas absorvem luz nos comprimentos de onda visível:  
**Azul (430 nm) e Vermelho (660 nm)**



# The Pigments absorb “Visible” Light

(a) Visible light (“rainbow colors”)



## Chlorophyll a & b:

- the major pigments (absorb red, blue..., reflect green)

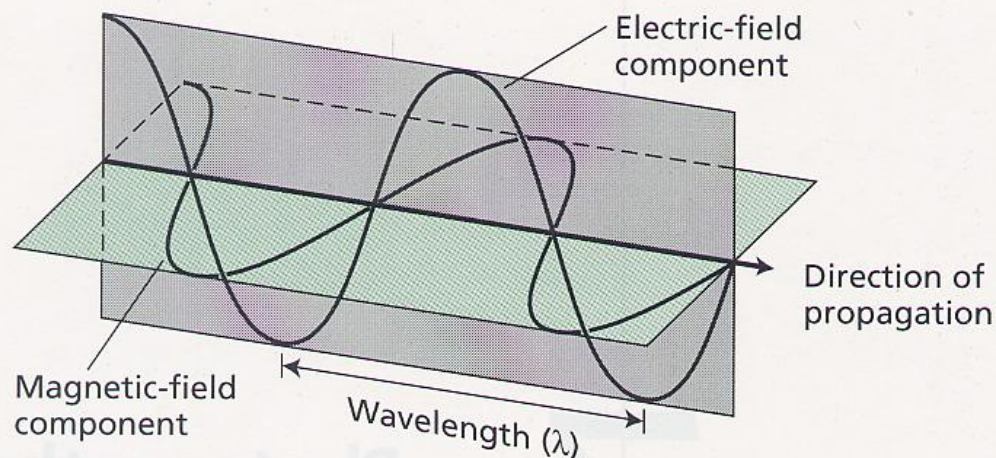
## Carotenoids (e.g., $\beta$ -carotene)

- accessory pigments (absorb green, blue, reflect red, yellow)



A **luz solar** é energia electromagnética (isto é, tem propriedades de uma onda), em que a velocidade ( $c$ ) é igual ao produto do comprimento de onda ( $\lambda$ ) pela frequência ( $\nu$ ):

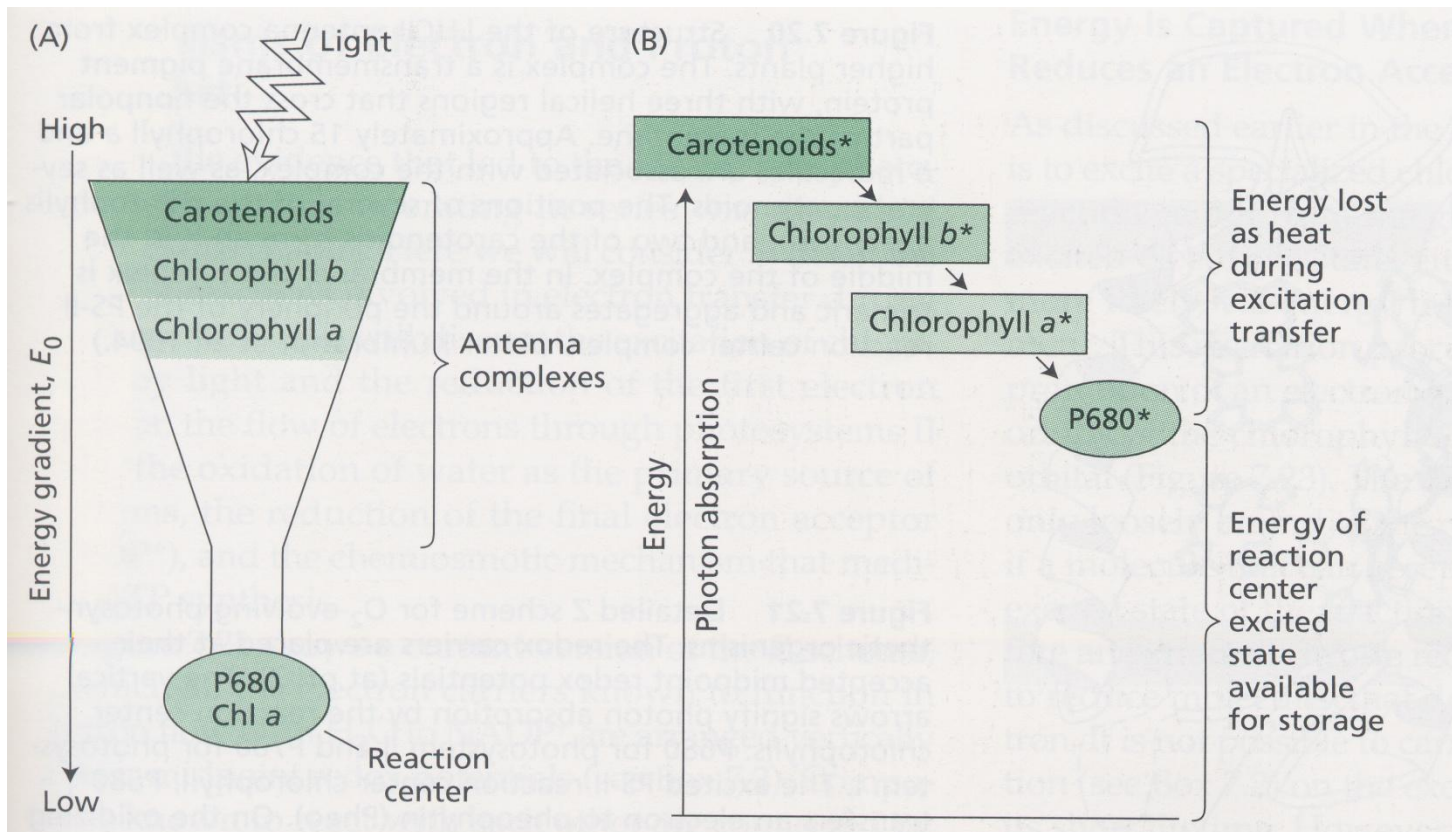
$$c = \lambda \times \nu \quad (c = 3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1})$$

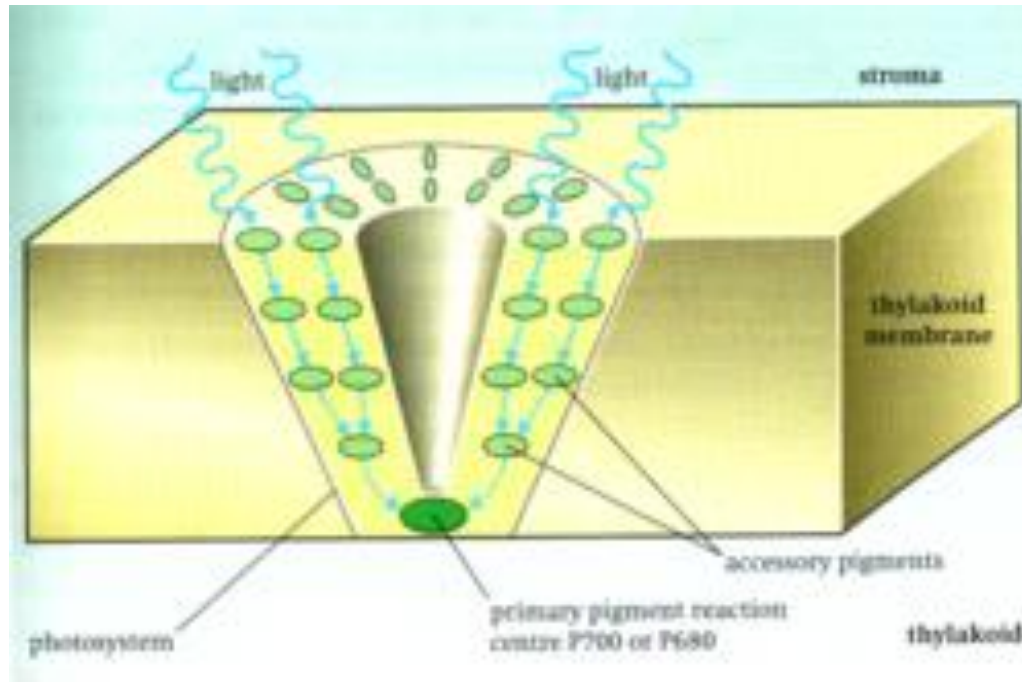


**Figure 7.1** Light is a transverse electromagnetic wave, consisting of oscillating electric and magnetic fields that are perpendicular to each other and perpendicular to the direction of propagation of the light. Light moves at a speed of  $3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ . The wavelength ( $\lambda$ ) is the distance between successive crests of the wave.

Mas a luz também é uma partícula, chamada **fotão**. A energia de um fotão ou *quantum de energia electromagnética* (plural *quanta*) é  $E = h \nu$ , em que  $h$  é a constante de Planck ( $6,6 \times 10^{-34} \text{ J.s}$ )

A absorção da luz é feita pelos pigmentos fotossintéticos, essencialmente clorofilas e carotenóides, que se encontram associados em **Unidades Fotossintéticas** que possuem **Complexos Antena e Centro de Reacção**

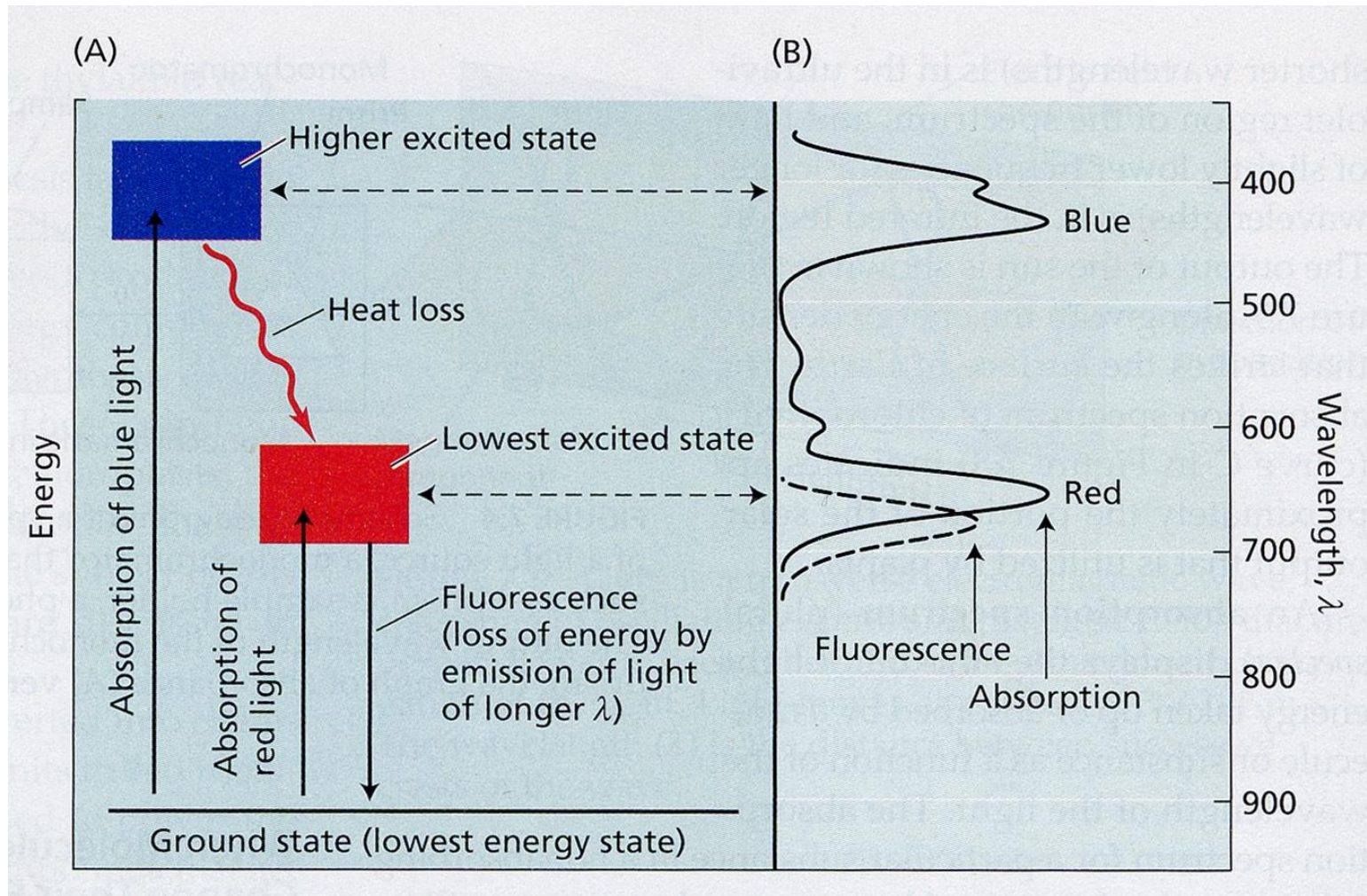




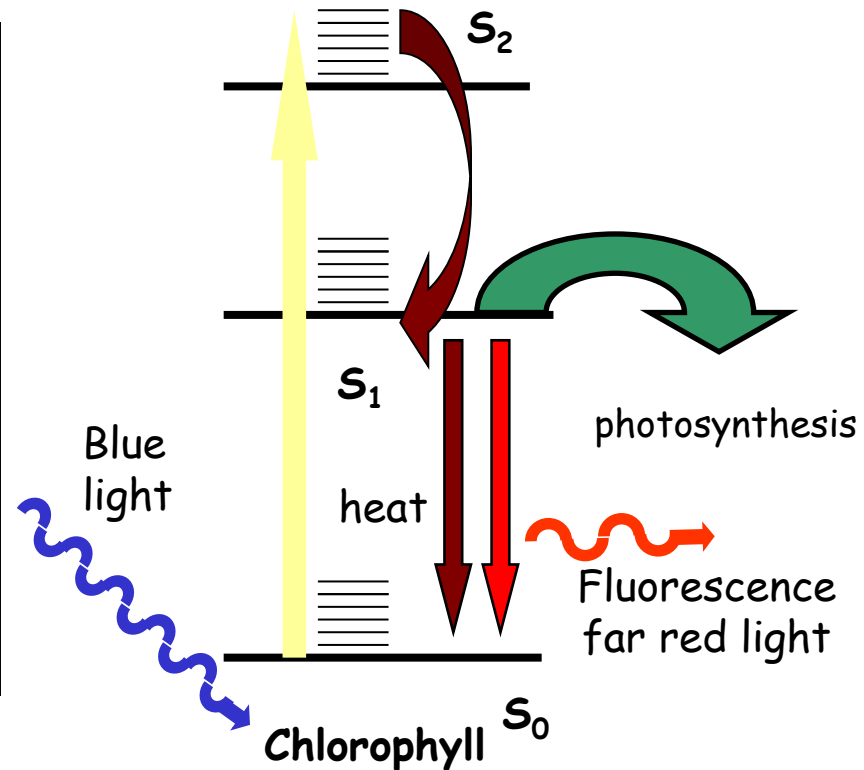
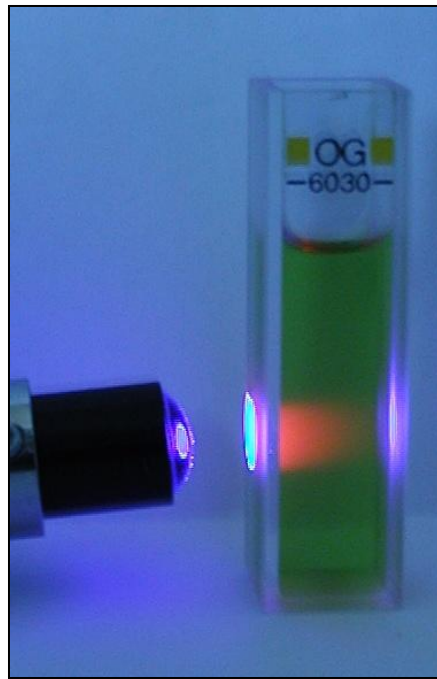
A Photosystem: A **light-harvesting** cluster of photosynthetic pigments present in the thylakoid membrane of chloroplasts.



A luz absorvida pelos pigmentos é (i) utilizada nas **reações fotoquímicas** (a maior parte), (ii) perdida sob a forma de **calor** ou (iii) reemitida sob a forma de **fluorescência**

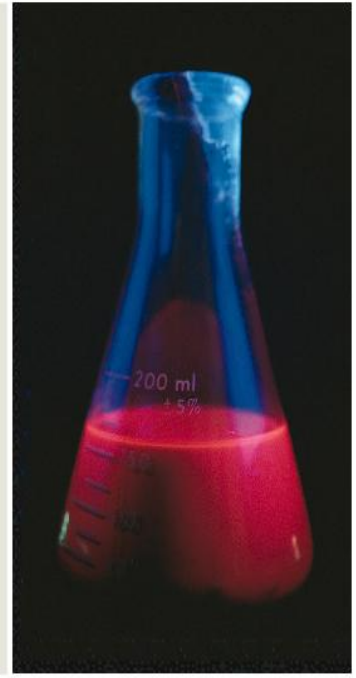
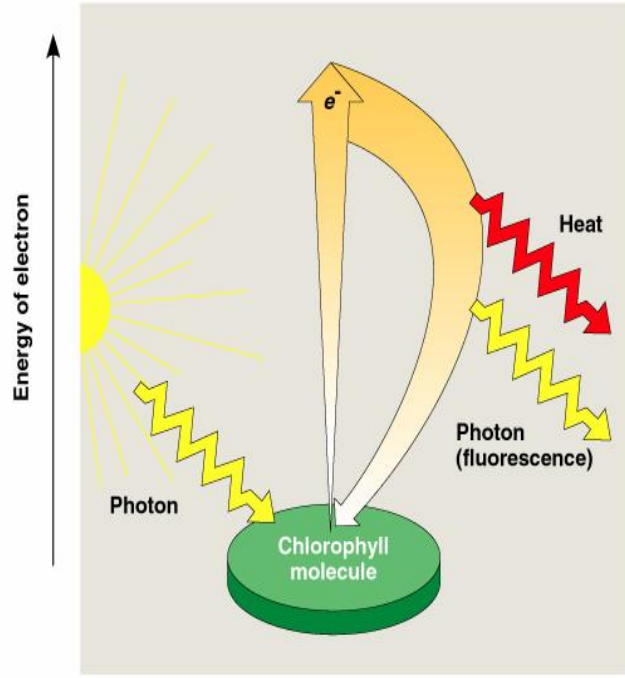
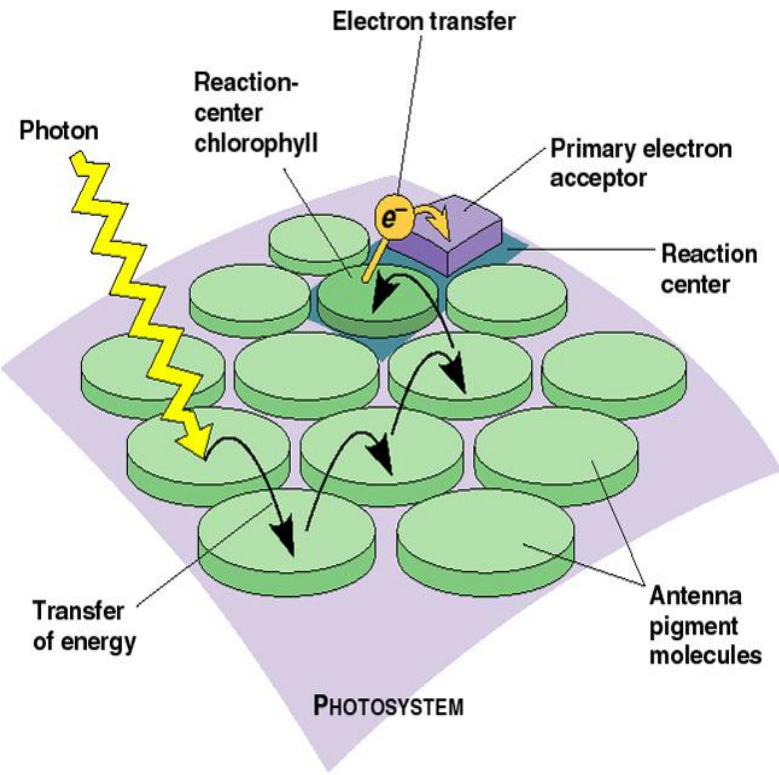


Cerca de 1% da luz absorvida pelas folhas é reemitida como fluorescência vermelha, a qual é um excelente 'barômetro' da proporção de luz usada na fotossíntese e perdida como calor.



A **fluorescência da clorofila** pode ser medida hoje em dia com aparelhos portáteis, dando-nos uma ideia da situação de stresse a que as plantas estão submetidas



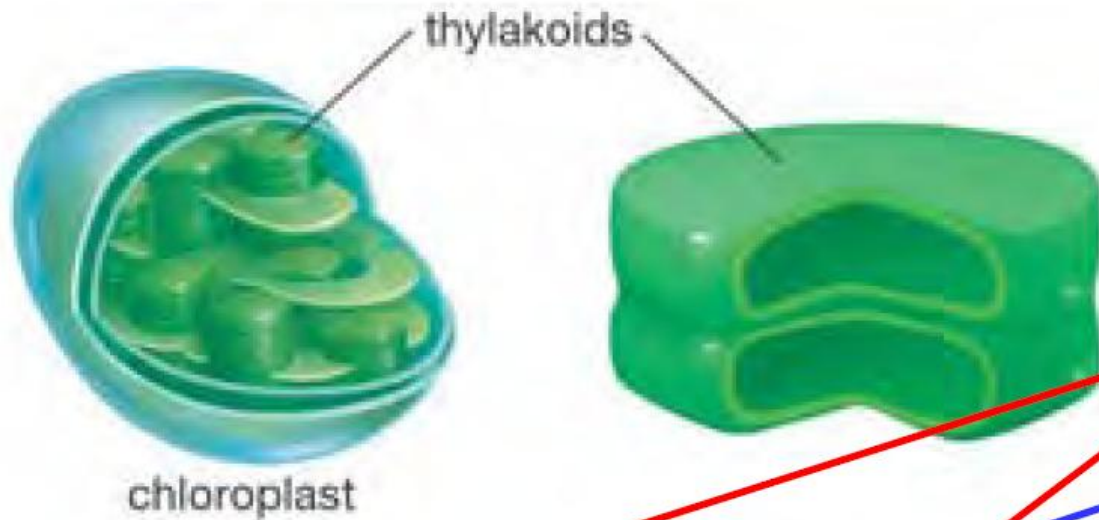


(a)  
©1999 Addison Wesley Longman, Inc.

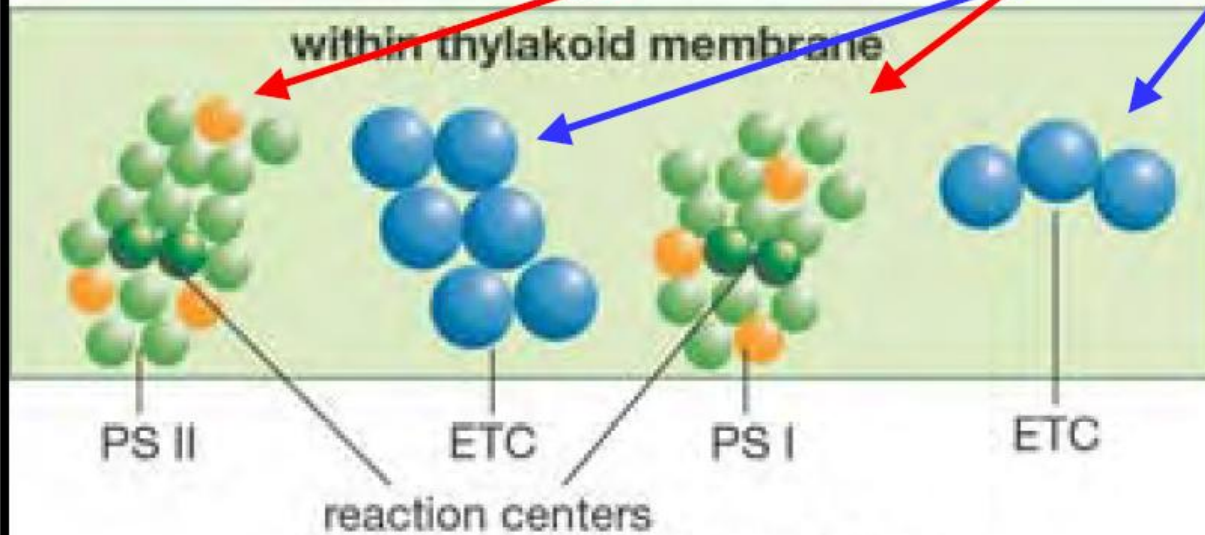
(b)

©1999 Addison Wesley Longman, Inc.

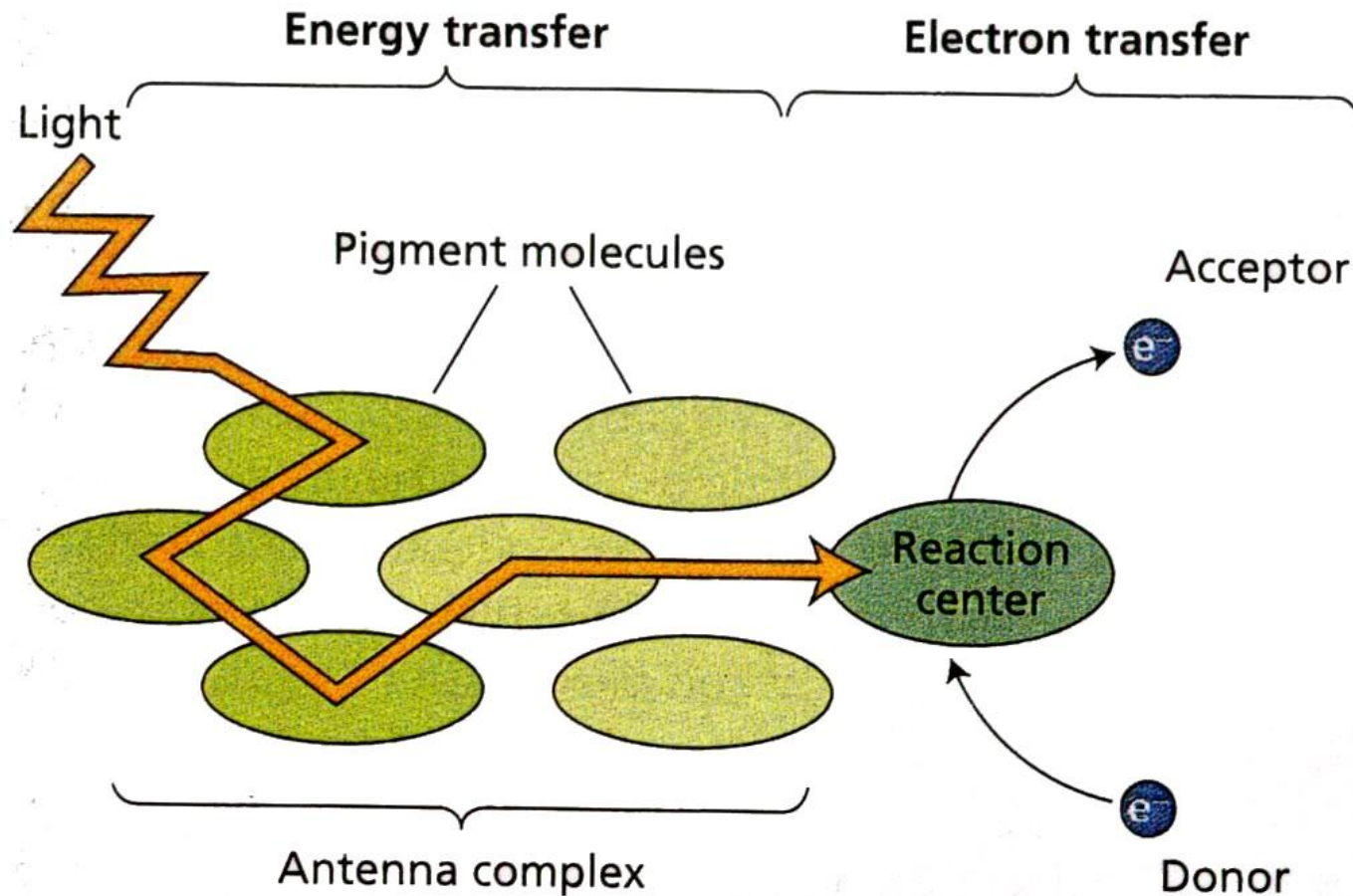
# Light Reactions occur in Thylakoids



A variety of light-absorbing pigments & electron transport proteins are embedded within the thylakoid membrane

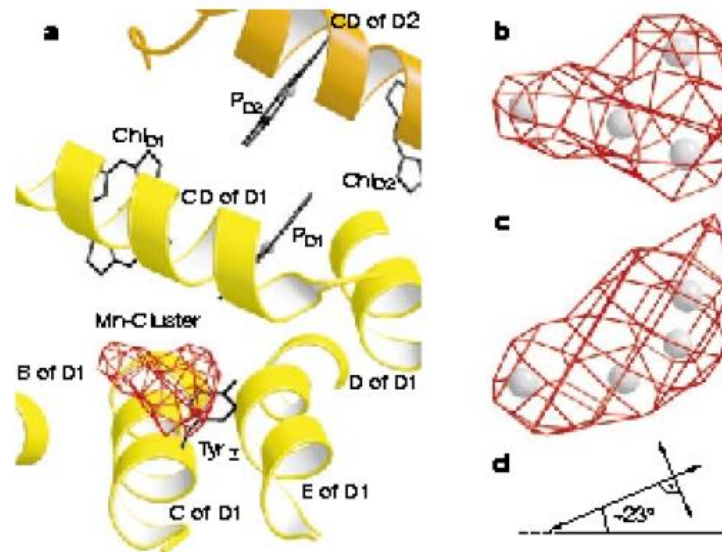


A luz absorvida pelos pigmentos antena (entre 200 e 300 moléculas) é canalizada para o Centro de Reacção. A molécula de clorofila do Centro de Reacção transfere, então, um electrão para uma molécula aceitadora de electrões, dando início à **cadeia de transporte de electrões**



## Water splitting reaction

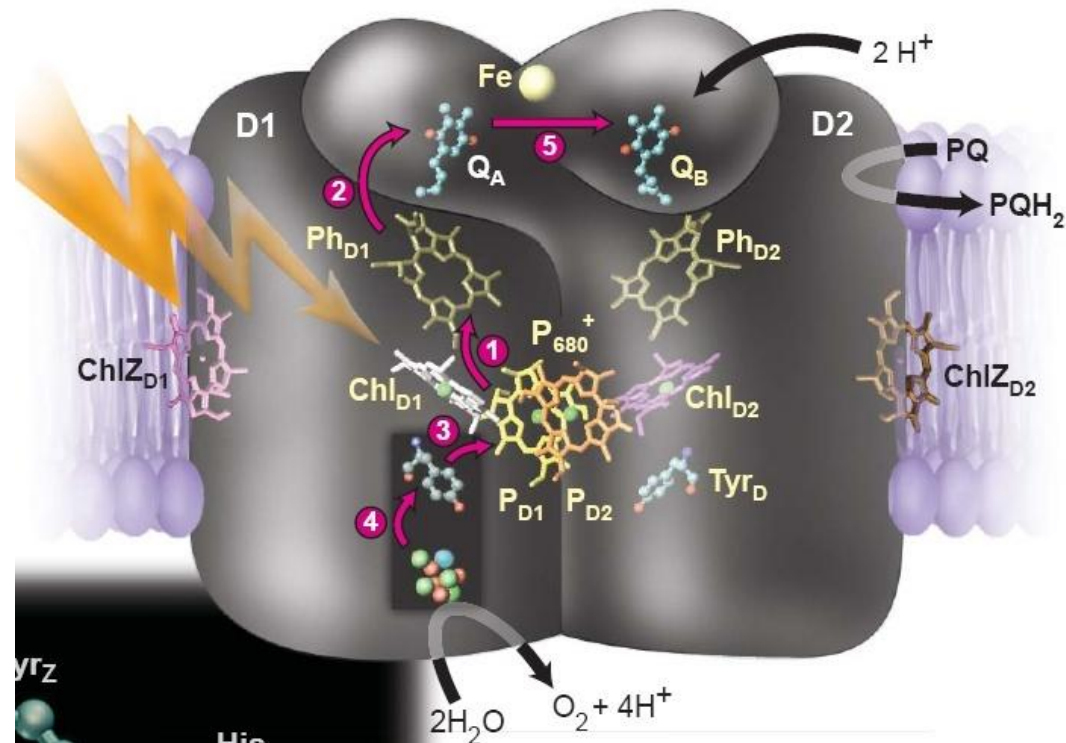
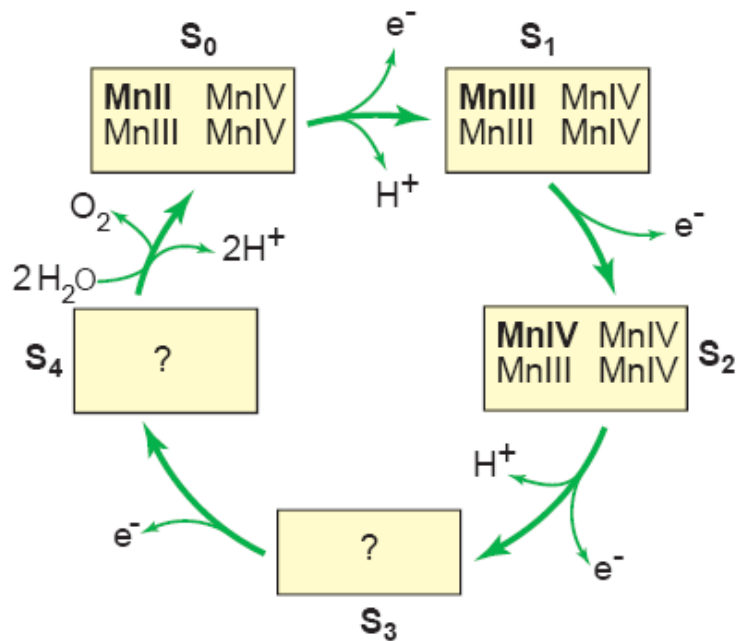
- The photo-excited  $P_{680}^+$  is reduced by a tyrosine residue, Tyr<sub>z</sub>.
- Tyr<sub>z</sub><sup>+</sup> in turn abstracts an electron from the Mn cluster.
  - Located 7 Å from the Mn cluster.
- Four photon absorption steps lead to 4Mn being oxidised to 4Mn<sup>+</sup>.
  - Highly electropositive.
  - Spontaneously accepts 4 electrons from H<sub>2</sub>O ( $E_{m,7}$  of the O<sub>2</sub>/2H<sub>2</sub>O couple is 810 mV).
  - **Most electropositive reaction in nature.**
- Centre-to-centre distance from the Mn cluster to the P<sub>680</sub> chlorophylls is 18.5 Å to P<sub>D1</sub> & 25.1 Å to P<sub>D2</sub>.





## Water splitting reaction

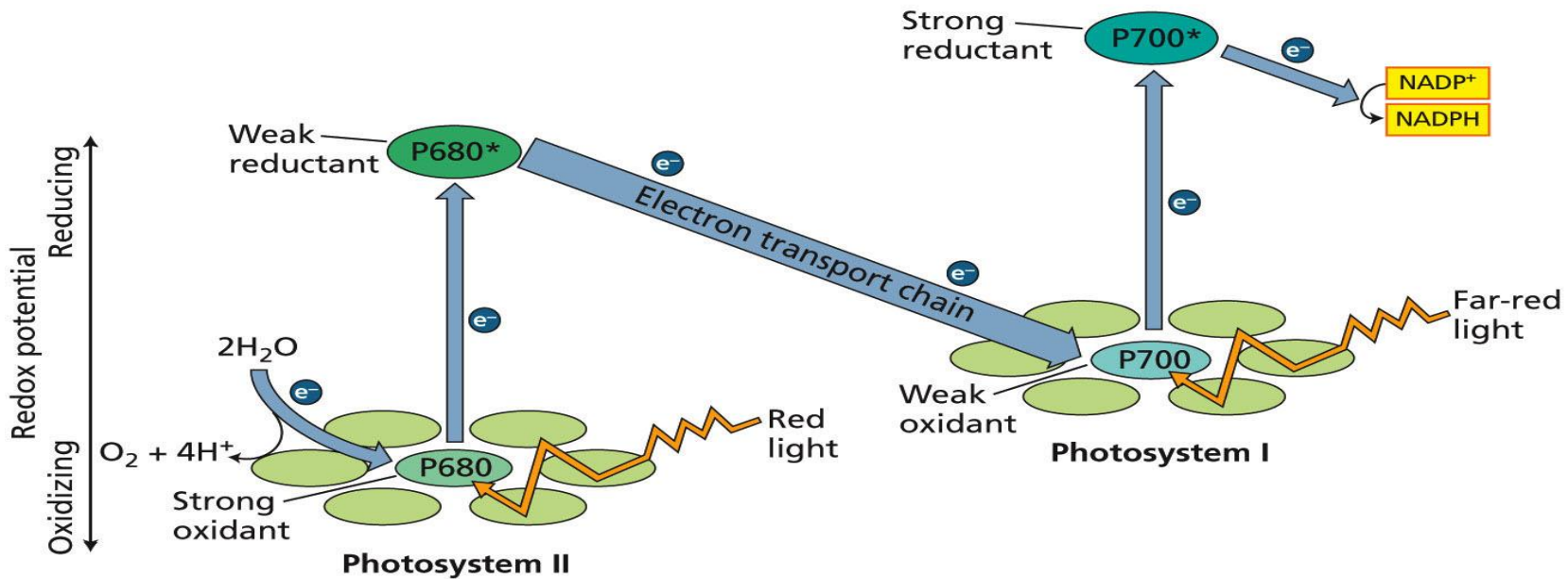
- The enzyme accumulates four positive charge-equivalents
- Deprotonation occurs to compensate the charge accumulation on some steps, before oxidizing  $2\text{H}_2\text{O}$  and releasing  $\text{O}_2$ .
- The valence of the Mn ions increases on the S0 to S1 to S2 steps;
- Less certain for the S3 & S4 steps.





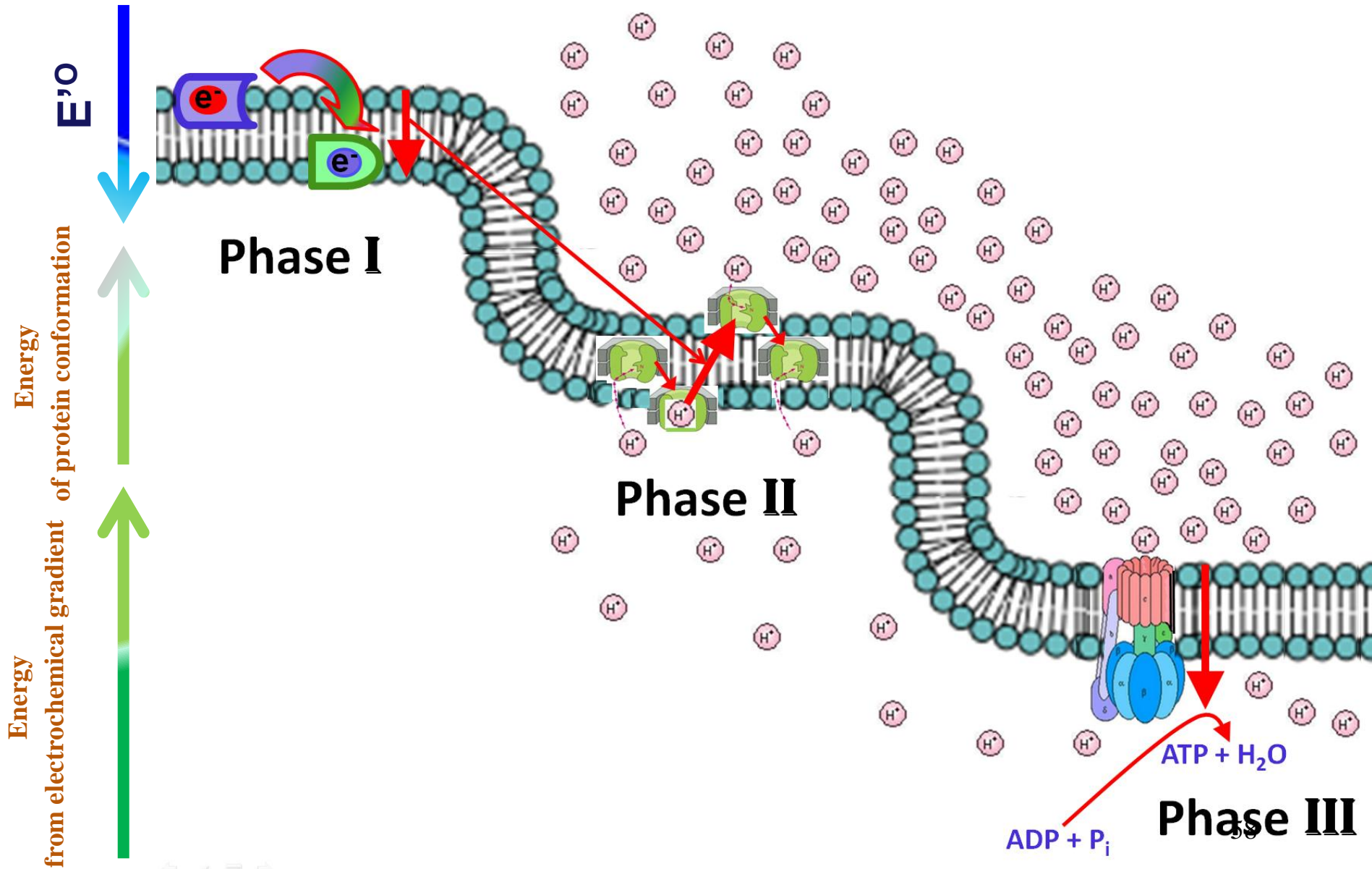
# Esquema em Z

A luz vermelha (680 nm) absorvida pelo Fotossistema II (PSII) produz um composto **oxidante forte** que oxida a água. A luz vermelha (700 nm) absorvida pelo Fotossistema I (PSI) produz um composto **redutor forte** que reduz o **NADP<sup>+</sup>** a **NADPH**

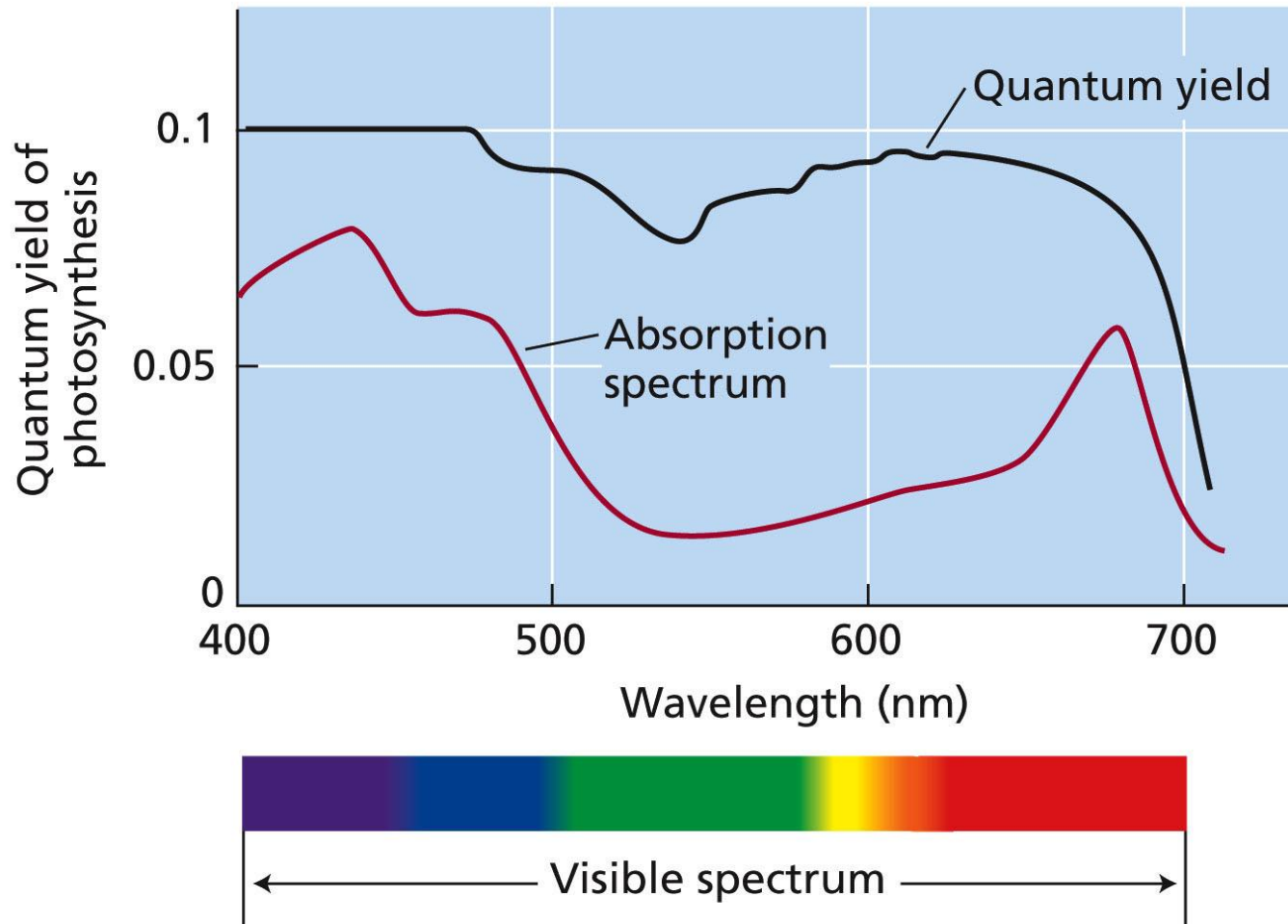


# The photosynthetic electron transport chain at work

## The spontaneous synthesis of ATP



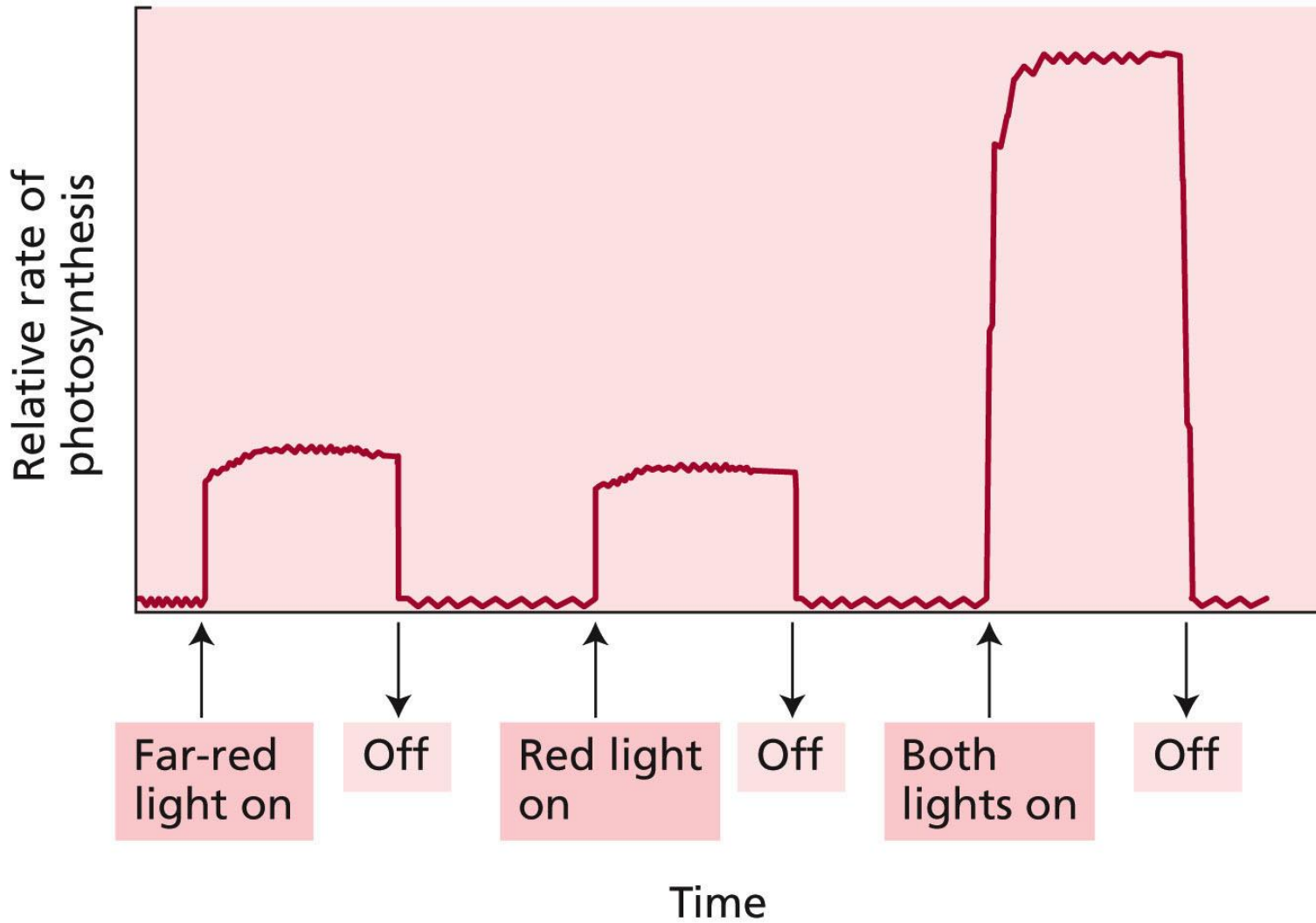
A queda no vermelho (*Red drop*) resulta de o PSII não funcionar para comprimentos de onda acima de 680 nm



PLANT PHYSIOLOGY, Fourth Edition, Figure 7.12 © 2006 Sinauer Associates, Inc.

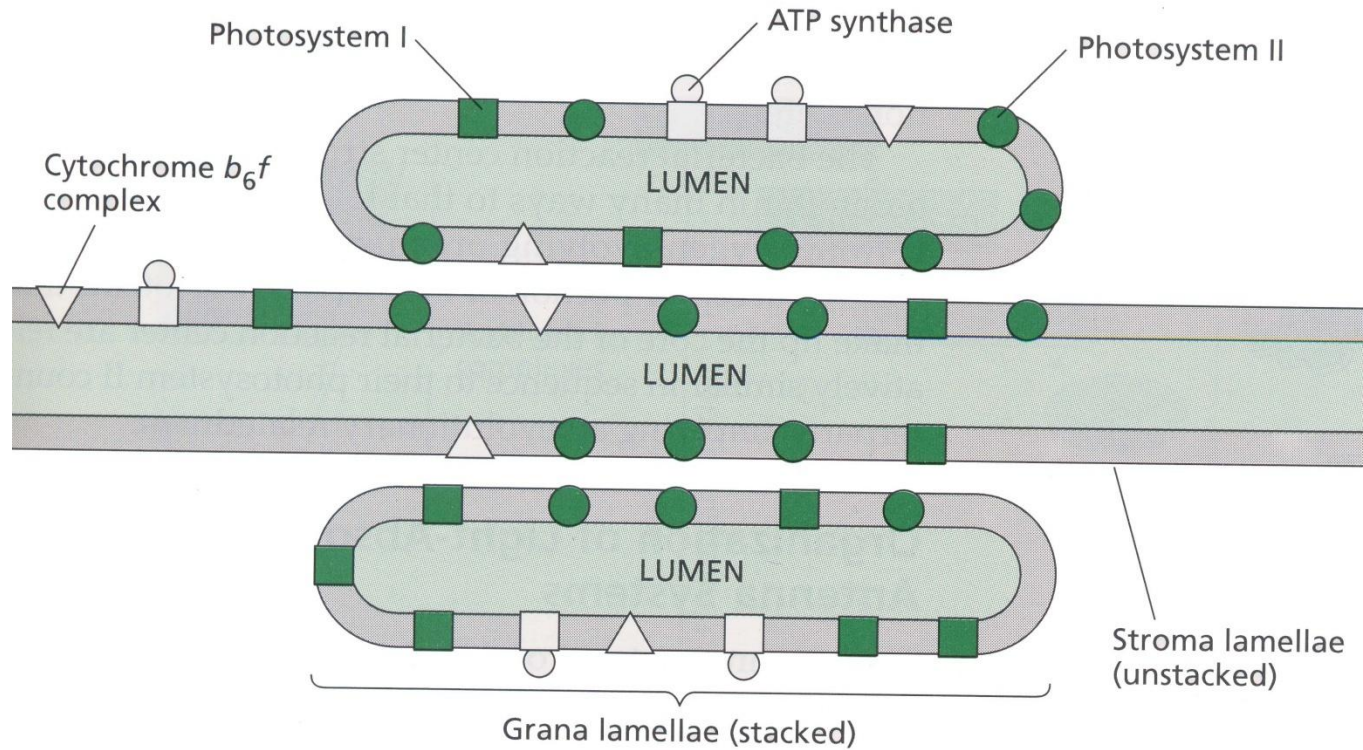
The quantum yield of photosynthesis ( $\phi$ ) is a measure of photosynthetic efficiency expressed in moles of photons absorbed per mole of  $\text{CO}_2$  fixed or  $\text{O}_2$  evolved.

# Efeito de Emerson - efeito sinérgico da luz vermelha e vermelha-longínqua





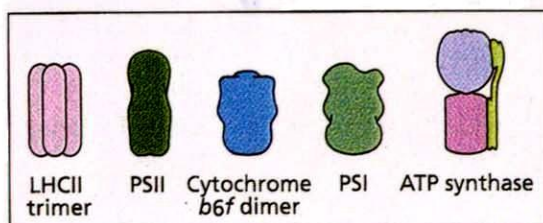
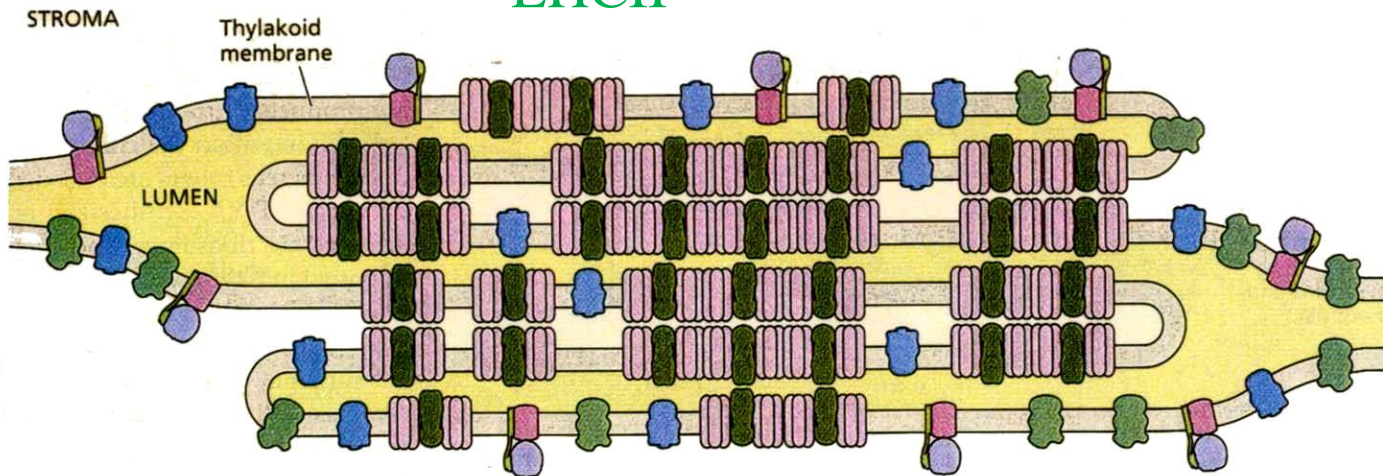
# Os transportadores de electrões estão ‘embebidos’ na membrana dos tilacóides



# Organização dos Fotossistemas nas Membranas Tilacoidais

Os dois fotossistemas encontram-se espacialmente separados na membrana tilacoidal:

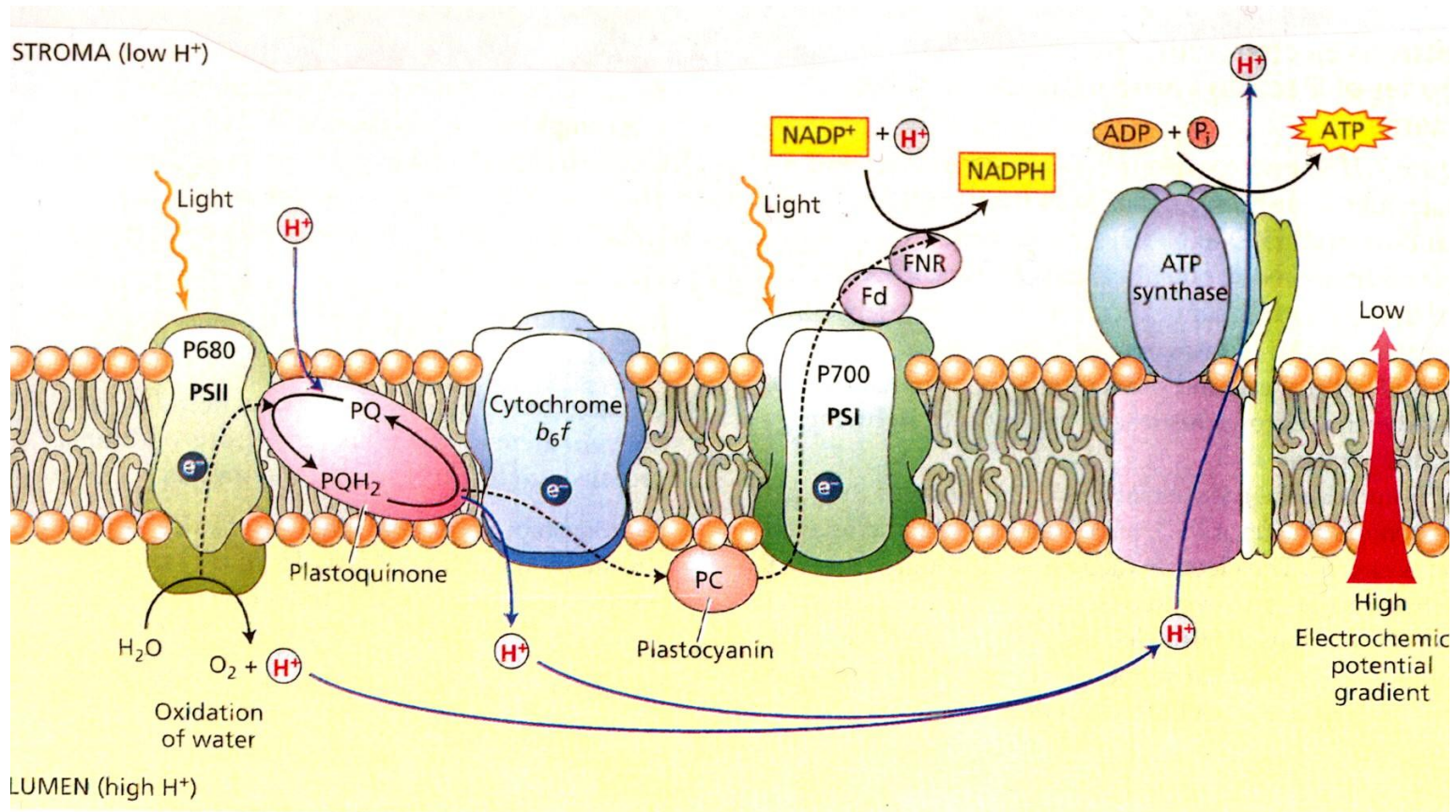
O PSII concentra-se na zona granar e o PSI e a ATP sintase nos tilacóides do estroma.  
Associado ao PSII está o complexo captador de luz LHCII



**FIGURE 7.18** Organization of the protein complexes of the thylakoid membrane. Photosystem II is located predominantly in the stacked regions of the thylakoid membrane; photosystem I and ATP synthase are found in the unstacked regions protruding into the stroma. Cytochrome  $b_6f$  complexes are evenly distributed. This lateral separation of the two photosystems requires that electrons and protons produced by photosystem II be transported a considerable distance before they can be acted on by photosystem I and the ATP-coupling enzyme. (After Allen and Forsberg 2001.)



Durante o **transporte de electrões** entre a água e o  $\text{NADP}^+$  gera-se um gradiente de protões entre o lúmen do tilacóide (pH mais baixo) e o estroma (pH mais elevado)



Os prováveis transportadores de electrões que se movem entre o PSII e O PSI ao longo dos tilacóides são a Plastoquinona e a Plastocianina

## Alguns “links” para filmes sobre as Reacções Fotoquímicas da Fotossíntese

Link 1:

<http://www.youtube.com/watch?v=RFI25vSElaE&feature=related>

Link 2:

<http://www.youtube.com/watch?v=eY1ReqiYwYs&feature=related>

Link 3:

<http://www.youtube.com/watch?v=v590JJV96lc&feature=related>

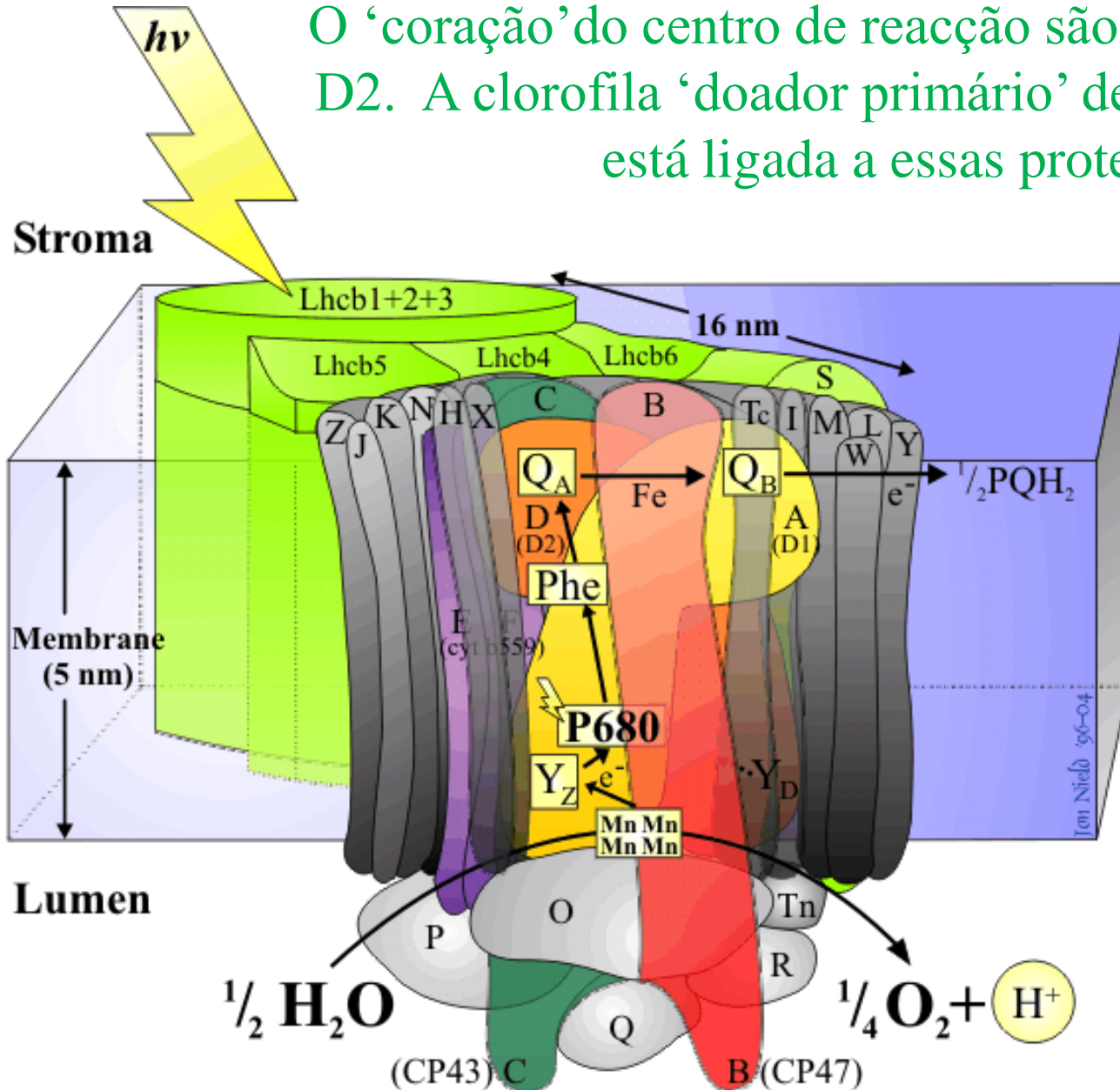
**Link 4:**

<http://highered.mcgraw-hill.com/olcweb/cgi/pluginpop.cgi?it=swf::535::535::/sites/dl/free/0072437316/120072/bio12.swf::Cyclic%20and%20Noncyclic%20Photophosphorylation>

**Link 5:**

[http://www.uic.edu/classes/bios/bios100/lectures/light\\_reaction.htm](http://www.uic.edu/classes/bios/bios100/lectures/light_reaction.htm)

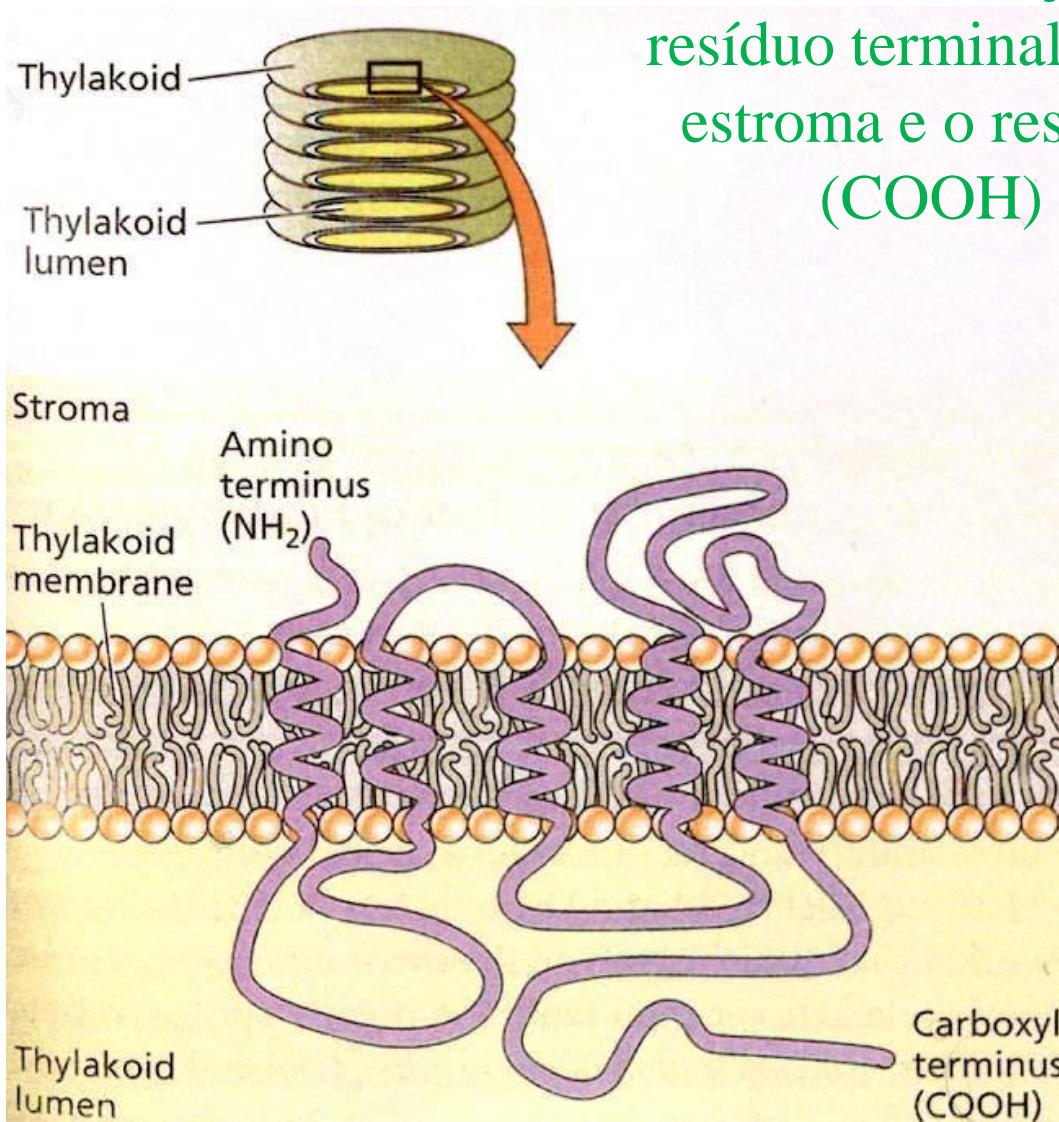
O **PSII** é um supercomplexo de proteínas e clorofila. O ‘coração’ do centro de reacção são as proteínas D1 e D2. A clorofila ‘doador primário’ de electrões (P680) está ligada a essas proteínas



A água é oxidada de acordo com  $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$ , numa reacção catalisada por um sistema multienzimático complexo que contém manganês.



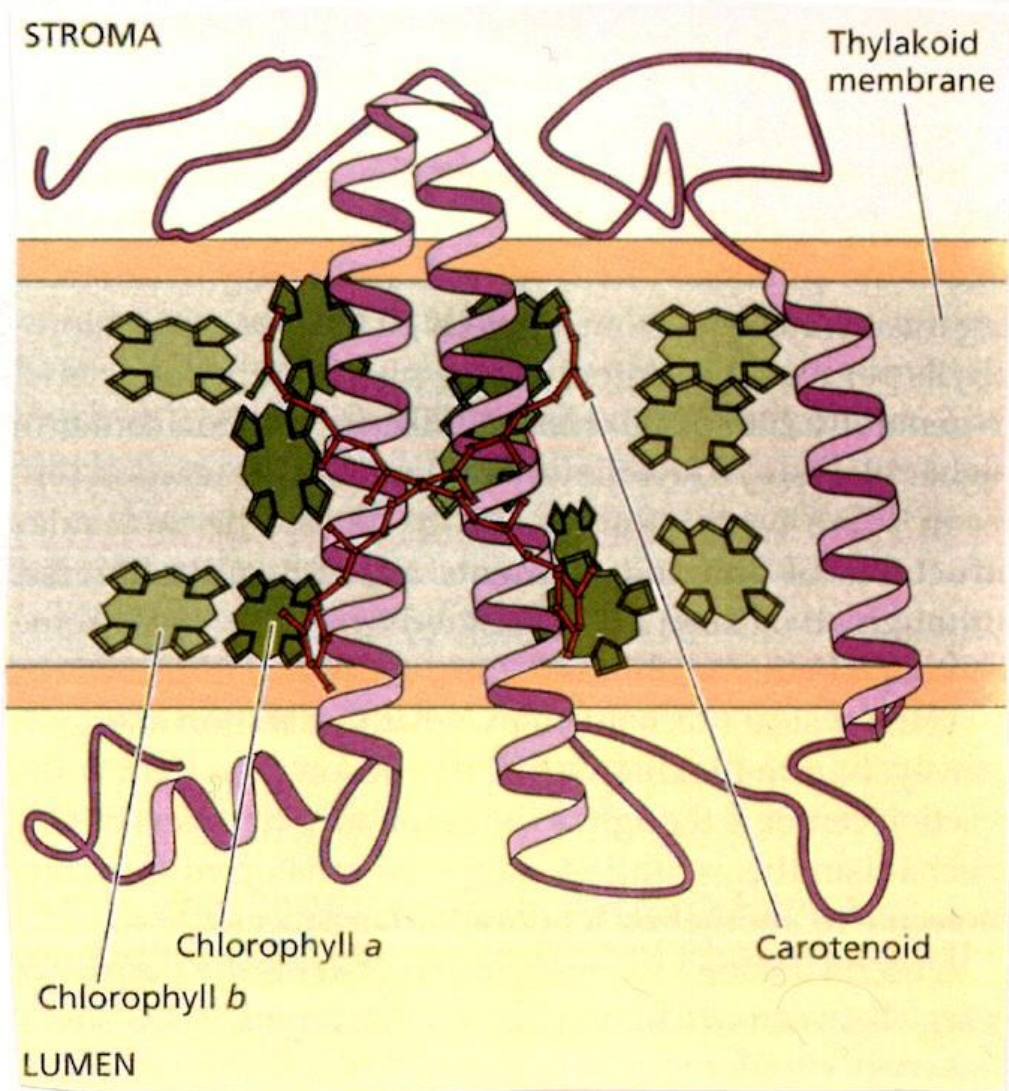
A **proteína D1**, a principal proteína do Centro de Reação do PSII, **P 680**, tem o resíduo terminal amina ( $\text{NH}_2$ ) na zona do estroma e o resíduo terminal carboxilo ( $\text{COOH}$ ) na zona do lúmen.



## O complexo antena LHCII (*light harvesting complex*) é

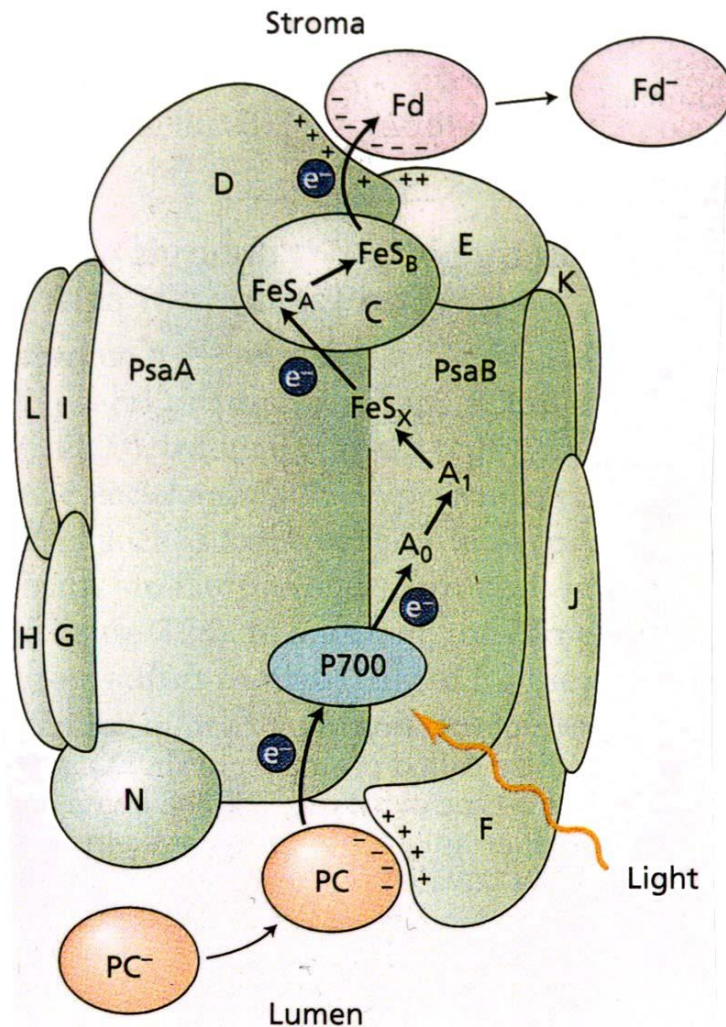
um complexo de proteínas transmembranares, clorofila *a* e *b* e carotenóides associados ao **PSII**.

Esta associação permite otimizar a transferência de energia nos complexos antena e o transporte de electrões nos centros de reacção.





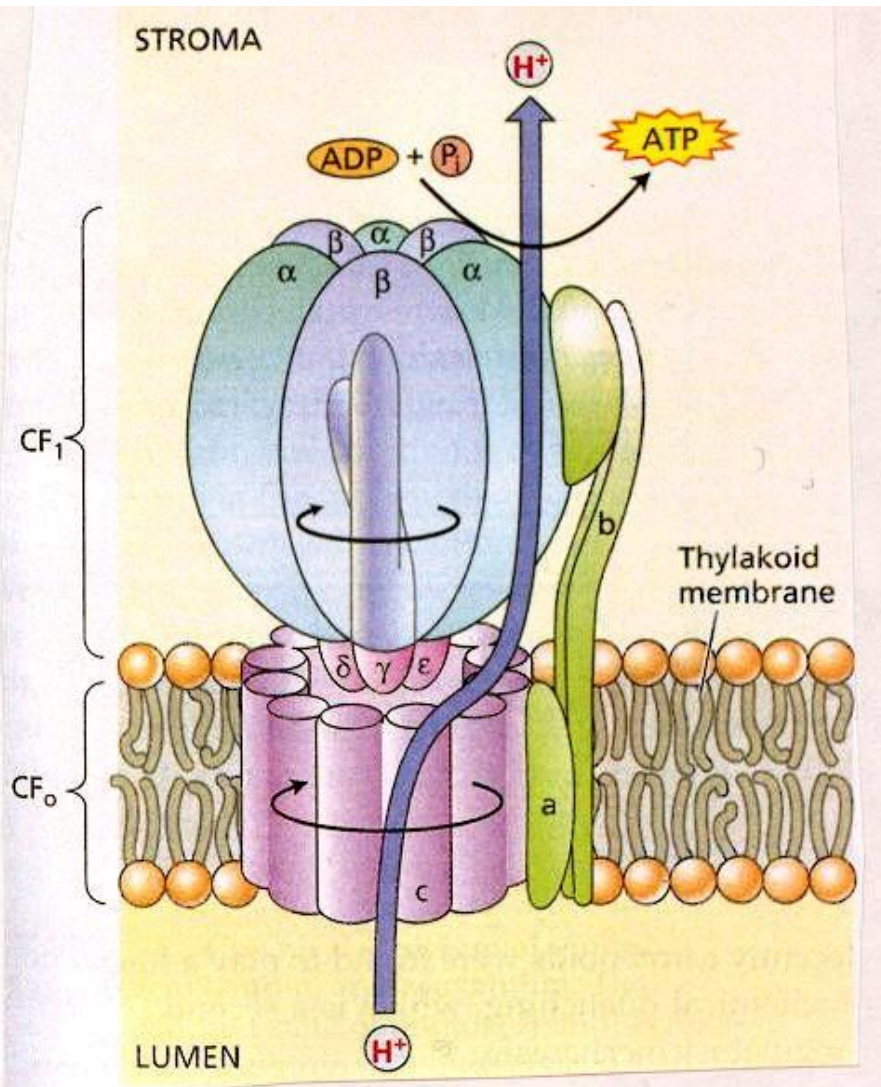
# Fotossistema I (PSI)



Os componentes do complexo do centro de reacção do PSI estão organizados à volta das proteínas PsaA e PsaB.

A Ferredoxina (o composto de maior poder redutor na cadeia) é uma pequena proteína de Fe e S, solúvel em água. Na sua forma reduzida, para além de reduzir o  $\text{NADP}^+$ , é utilizada na redução do nitrito a amónio.

# ATP sintase e Fotofosforilação



É hoje aceite que a fotofosforilação funciona através de um mecanismo quimiosmótico, proposto por Peter Mitchel nos anos 60.

O princípio da teoria quimiosmótica diz que diferenças de concentração de iões e diferenças electroquímicas através de membranas podem ser utilizadas como fontes de energia livre pelas células.

Assim, é a diferença de concentração de protões entre o lúmen e o estroma e o potencial eléctrico transmembranar, que é utilizada na síntese do ATP.

O CFo forma um canal através do qual os protões passam para o estroma. CF1 é a sede de síntese do ATP.

# **O funcionamento da cadeia fotossintética de transporte de electrões**



**Why do the electrons move spontaneously along the ETC ?????**

**How do they move spontaneously from NADH to O<sub>2</sub> in the mETC ?????**

**How do they move spontaneously  
from H<sub>2</sub>O to NADPH in the cETC**

**????**

**Why are protons extruded across  
the membranes, spontaneously and  
against an electrochemical gradient**

**????**

# **Electrons, electronegativity & thermodynamics**

**The spontaneous movement of electrons along the electron transport chains**

# Oxidation-Reduction and Energy-Rich Compounds

**Oxidation** - removal of electron(s) from a substance

**Reduction** – addition of electron(s) to a substance

Energy (**ATP**) is released or consumed during oxidation or reduction reactions

# Oxidation

- Does not imply that oxygen participates in the reaction
- Named because oxygen has a great tendency to accept electrons (strong oxidizing agent)
- This is exploited by cells; oxygen acts as the final electron acceptor in a chain of oxidation-reduction reactions (makes ATP)



# Reduction Potential Difference = $\Delta E^{\circ}$

$$\Delta E^{\circ} = E^{\circ} (\text{acceptor}) - E^{\circ} (\text{donor})$$

- ◆ measured in volts
- ◆ The more *positive* the reduction potential difference is, the easier the redox reaction
- ◆ Energy can be derived from the spontaneous transfer of electrons

◆ The standard reduction potential can be related to standard free energy change by:

$$\Delta G^{\circ'} = - n F \Delta E^{\circ'}$$

where  $n = \#$  electrons transferred =  
1,2,3

$F = 96.5$  kJ/V, called the Faraday constant

- The tendency of a compound to accept or release electrons is expressed quantitatively by its reduction potential,  $E_0'$ .

- In a redox reaction

The substance **oxidized** is the **electron donor**

The substance **reduced** is the **electron acceptor**

# Oxidation-reduction reactions in biological systems

As we have discussed so far transfer of phosphoryl groups as a central feature of metabolism and in energy transfer (due to the tendency of ATP to get hydrolyzed desperately). An equally important reaction mechanism to transfer free energy in biological systems is the transfer of electrons in oxidation-reduction reactions (due to tendency of some atoms to accept electron desperately).

Oxygen is one of the strongest electron acceptors in biological systems, due to its very high electronegativity and hence to its strong oxidizing capacity. Fluorine is the strongest oxidizing agent but it is present in trace amount in living system.

**Oxidizing ability:** capacity to accept electrons depends on the electronegativity of the atom.

**Flow of electrons can be used to do useful work as is done in battery operated motors, the electromotive force (EMF). In living systems, electron flow from various electron carriers to oxygen and the EMF generated is utilized for various energy transduction reactions.**



O CH<sub>4</sub> é rico em energia

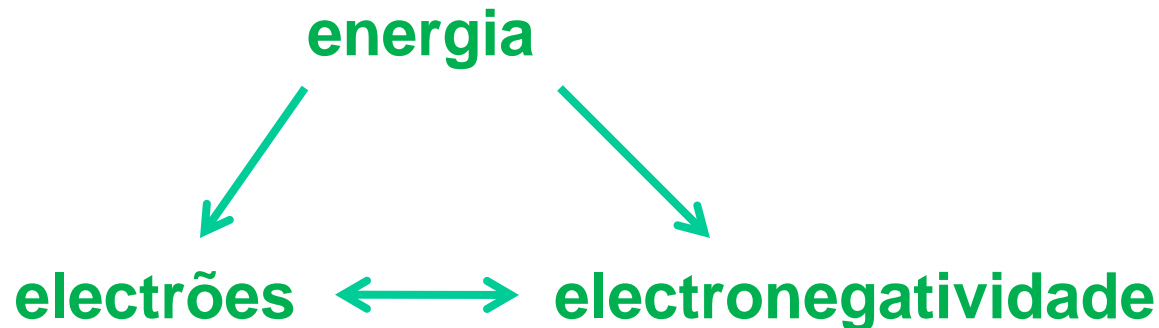
O CO<sub>2</sub> é pobre em energia

Porquê ???

Onde é que os electrões se “acomodam melhor”: junto do C ou junto do O?

Porquê ???

$$\Delta G^{\circ'} = - n F \Delta E^{\circ'}$$



**Standard Reduction Potentials of Some Biologically Important Half-Reactions, at 25 °C and pH 7**

Half-reaction	$E'^{\circ}$ (V)
$\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2e^- \longrightarrow \text{H}_2\text{O}$	0.816
$\text{Fe}^{3+} + e^- \longrightarrow \text{Fe}^{2+}$	0.771
$\text{NO}_3^- + 2\text{H}^+ + 2e^- \longrightarrow \text{NO}_2^- + \text{H}_2\text{O}$	0.421
Cytochrome <i>f</i> ( $\text{Fe}^{3+}$ ) + $e^- \longrightarrow$ cytochrome <i>f</i> ( $\text{Fe}^{2+}$ )	0.365
$\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$ (ferricyanide) + $e^- \longrightarrow \text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$	0.36
Cytochrome $a_3$ ( $\text{Fe}^{3+}$ ) + $e^- \longrightarrow$ cytochrome $a_3$ ( $\text{Fe}^{2+}$ )	0.35
$\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2e^- \longrightarrow \text{H}_2\text{O}_2$	0.295
Cytochrome <i>a</i> ( $\text{Fe}^{3+}$ ) + $e^- \longrightarrow$ cytochrome <i>a</i> ( $\text{Fe}^{2+}$ )	0.29
Cytochrome <i>c</i> ( $\text{Fe}^{3+}$ ) + $e^- \longrightarrow$ cytochrome <i>c</i> ( $\text{Fe}^{2+}$ )	0.254
Cytochrome $c_1$ ( $\text{Fe}^{3+}$ ) + $e^- \longrightarrow$ cytochrome $c_1$ ( $\text{Fe}^{2+}$ )	0.22
Cytochrome <i>b</i> ( $\text{Fe}^{3+}$ ) + $e^- \longrightarrow$ cytochrome <i>b</i> ( $\text{Fe}^{2+}$ )	0.077
Ubiquinone + $2\text{H}^+ + 2e^- \longrightarrow$ ubiquinol + $\text{H}_2$	0.045
Fumarate <sup>2-</sup> + $2\text{H}^+ + 2e^- \longrightarrow$ succinate <sup>2-</sup>	0.031
$2\text{H}^+ + 2e^- \longrightarrow \text{H}_2$ (at standard conditions, pH 0)	0.000
Crotonyl-CoA + $2\text{H}^+ + 2e^- \longrightarrow$ butyryl-CoA	-0.015
Oxaloacetate <sup>2-</sup> + $2\text{H}^+ + 2e^- \longrightarrow$ malate <sup>2-</sup>	-0.166
Pyruvate <sup>-</sup> + $2\text{H}^+ + 2e^- \longrightarrow$ lactate <sup>-</sup>	-0.185
Acetaldehyde + $2\text{H}^+ + 2e^- \longrightarrow$ ethanol	-0.197
$\text{FAD} + 2\text{H}^+ + 2e^- \longrightarrow \text{FADH}_2$	-0.219*
Glutathione + $2\text{H}^+ + 2e^- \longrightarrow$ 2 reduced glutathione	-0.23
$\text{S} + 2\text{H}^+ + 2e^- \longrightarrow \text{H}_2\text{S}$	-0.243
Lipoic acid + $2\text{H}^+ + 2e^- \longrightarrow$ dihydrolipoic acid	-0.29
$\text{NAD}^+ + \text{H}^+ + 2e^- \longrightarrow \text{NADH}$	-0.320
$\text{NADP}^+ + \text{H}^+ + 2e^- \longrightarrow \text{NADPH}$	-0.324
Acetoacetate + $2\text{H}^+ + 2e^- \longrightarrow$ $\beta$ -hydroxybutyrate	-0.346
$\alpha$ -Ketoglutarate + $\text{CO}_2 + 2\text{H}^+ + 2e^- \longrightarrow$ isocitrate	-0.38
$2\text{H}^+ + 2e^- \longrightarrow \text{H}_2$ (at pH 7)	-0.414
Ferredoxin ( $\text{Fe}^{3+}$ ) + $e^- \longrightarrow$ ferredoxin ( $\text{Fe}^{2+}$ )	-0.432

In the mitochondrial electron transport chain, the electrons move spontaneously from NADH (or FADH<sub>2</sub> or NADPH) to O<sub>2</sub> because

NADH has:

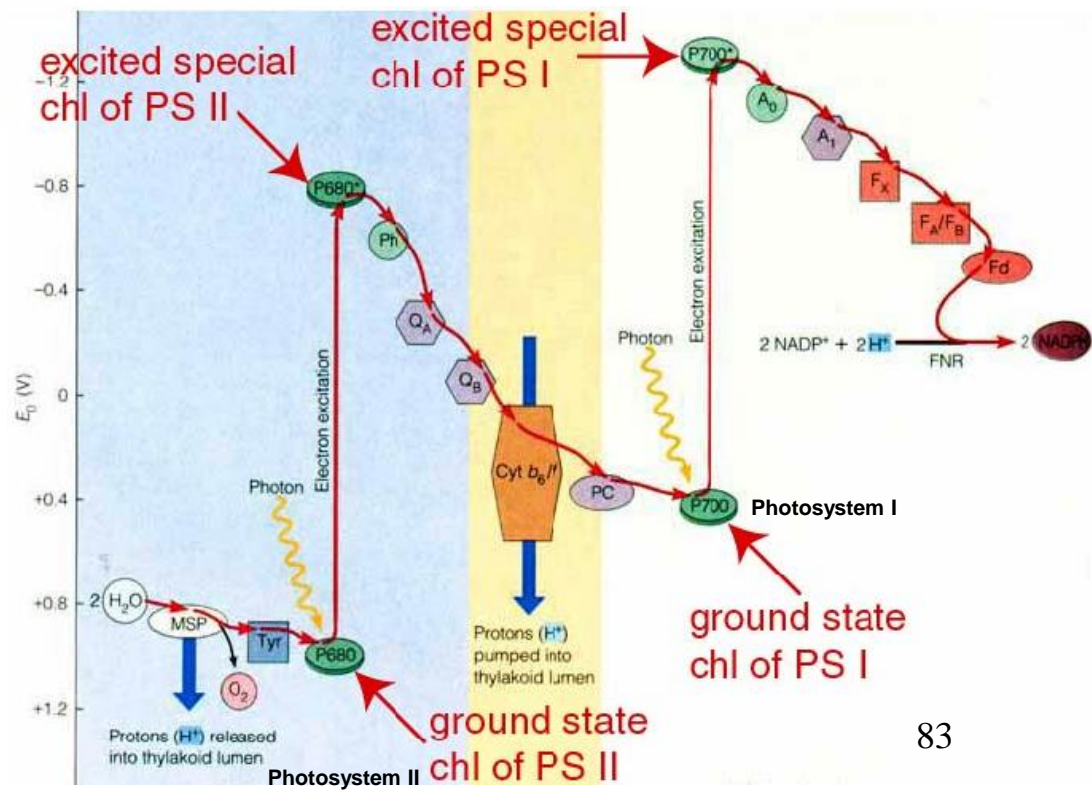
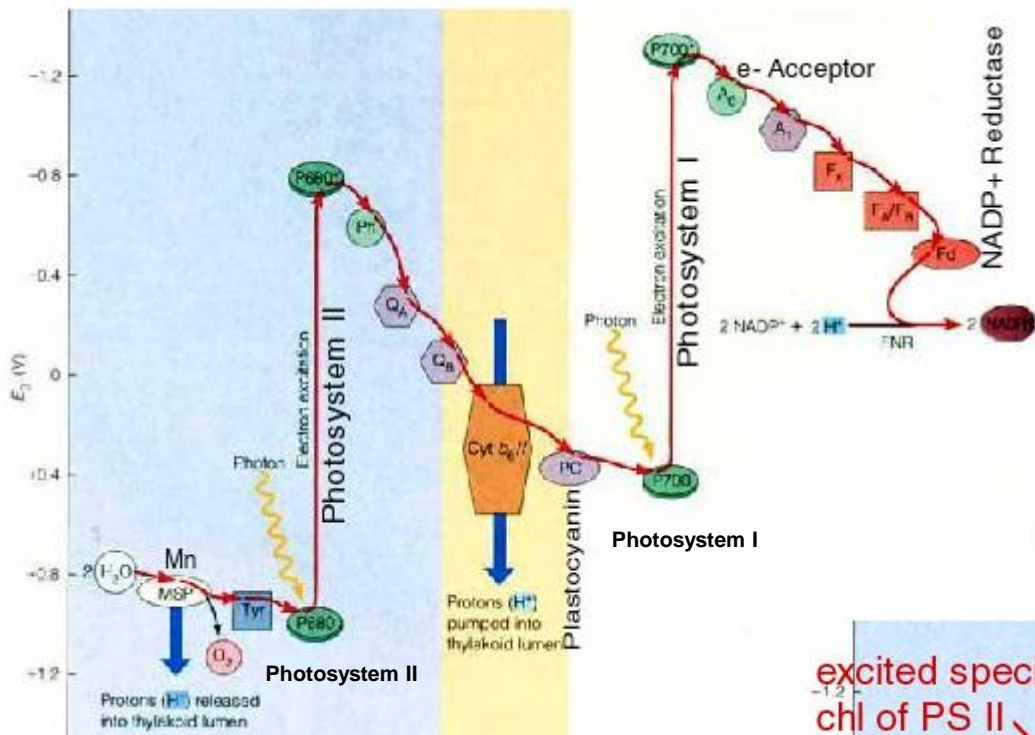
- a lower E'<sup>0</sup> value;
- a great potential to transfer the electrons;
- exhibits low affinity towards electrons, i.e. holds on weakly to electrons;
- has very low electronegativity;
- has very high electropositivity.

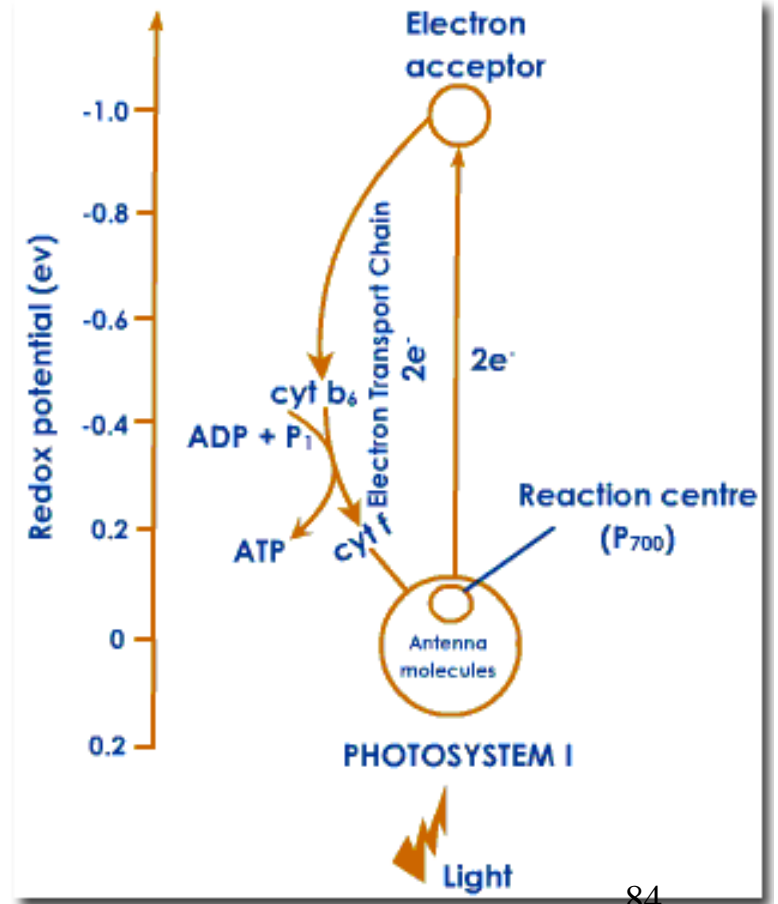
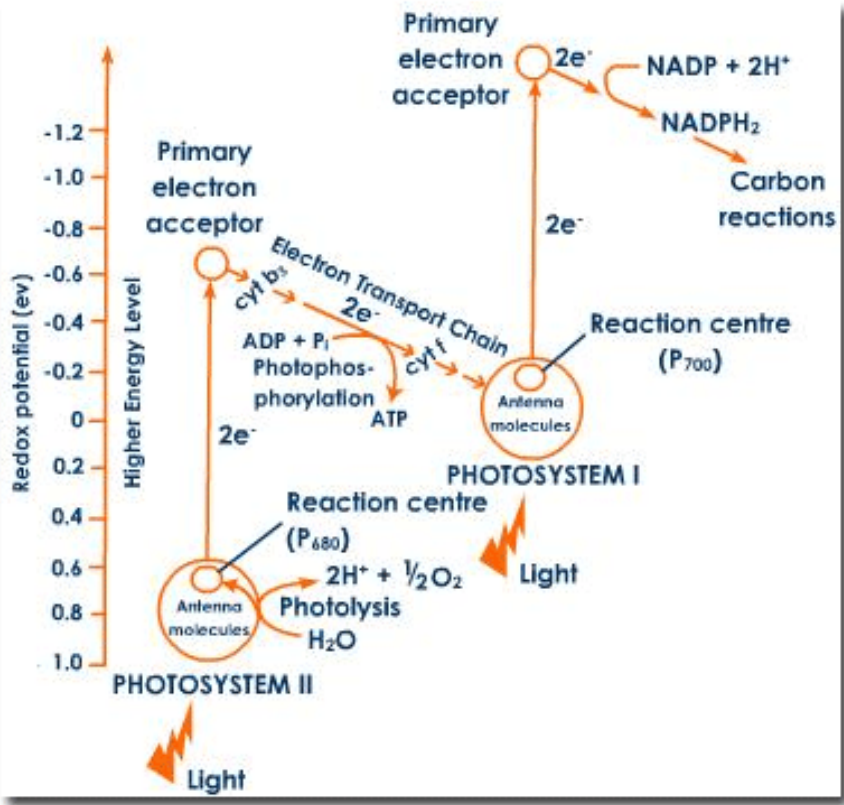
On the contrary, oxygen has:

- a higher E'<sup>0</sup> value;
- a small potential to transfer the electrons;
- exhibits high affinity towards electrons, i.e. holds on to electrons in a very strong manner;
- has very high electronegativity;
- has very low electropositivity.

This is why the electrons move spontaneously (i.e. releasing free energy during the electron transfer) from NADH (or FADH<sub>2</sub> or NADPH) to O<sub>2</sub>.

But how do the electrons move spontaneously in the photosynthetic electron transport chain from NADPH to O<sub>2</sub>?



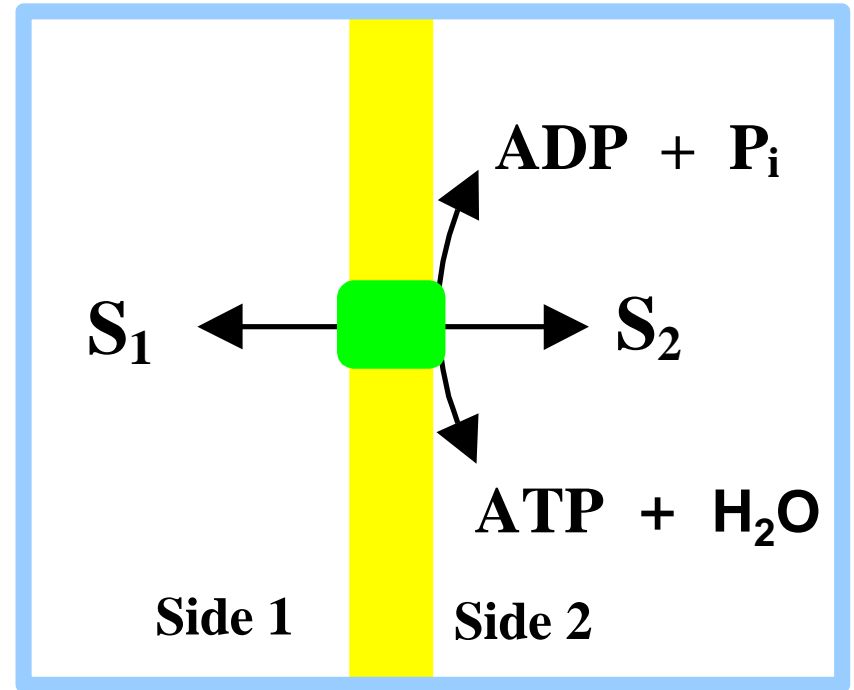
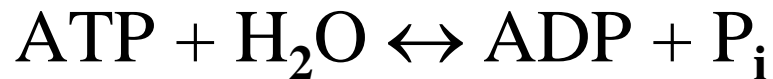


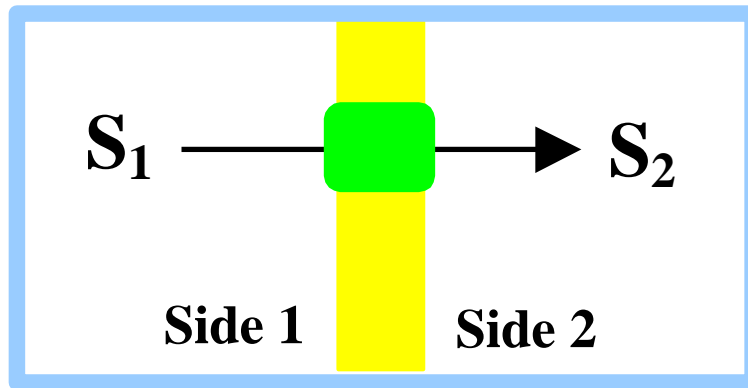


# Energy coupling in ion transport

**Ion Transport** may be coupled to a chemical reaction, e.g., hydrolysis or synthesis of ATP.

It should be recalled that the ATP hydrolysis/synthesis reaction is:



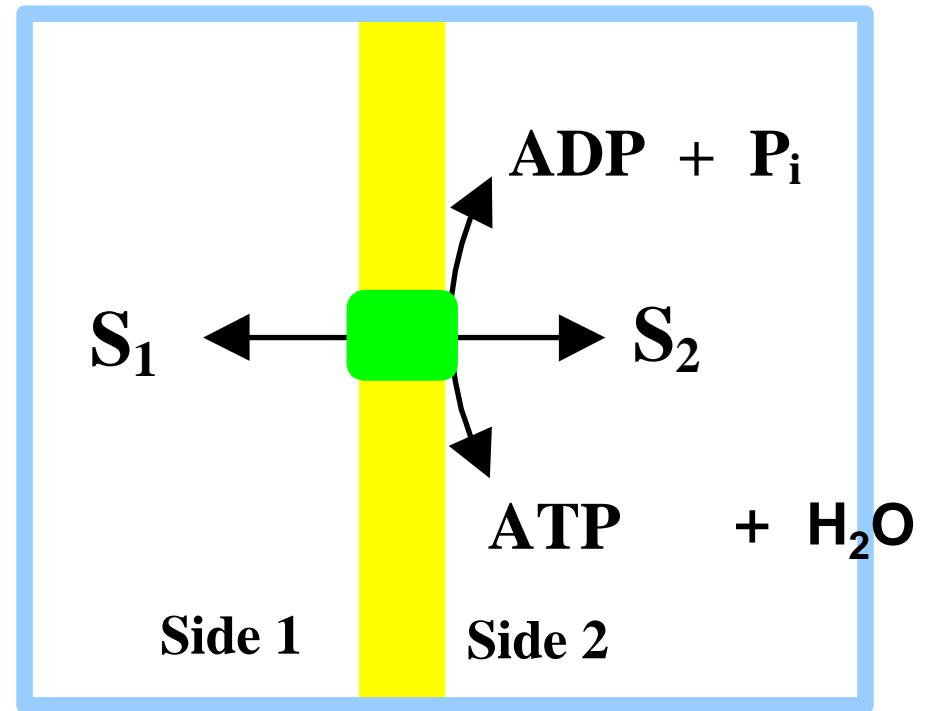


The free energy change (electrochemical potential difference) associated with transport of an ion  $S$  across a membrane from side 1 to side 2 is:

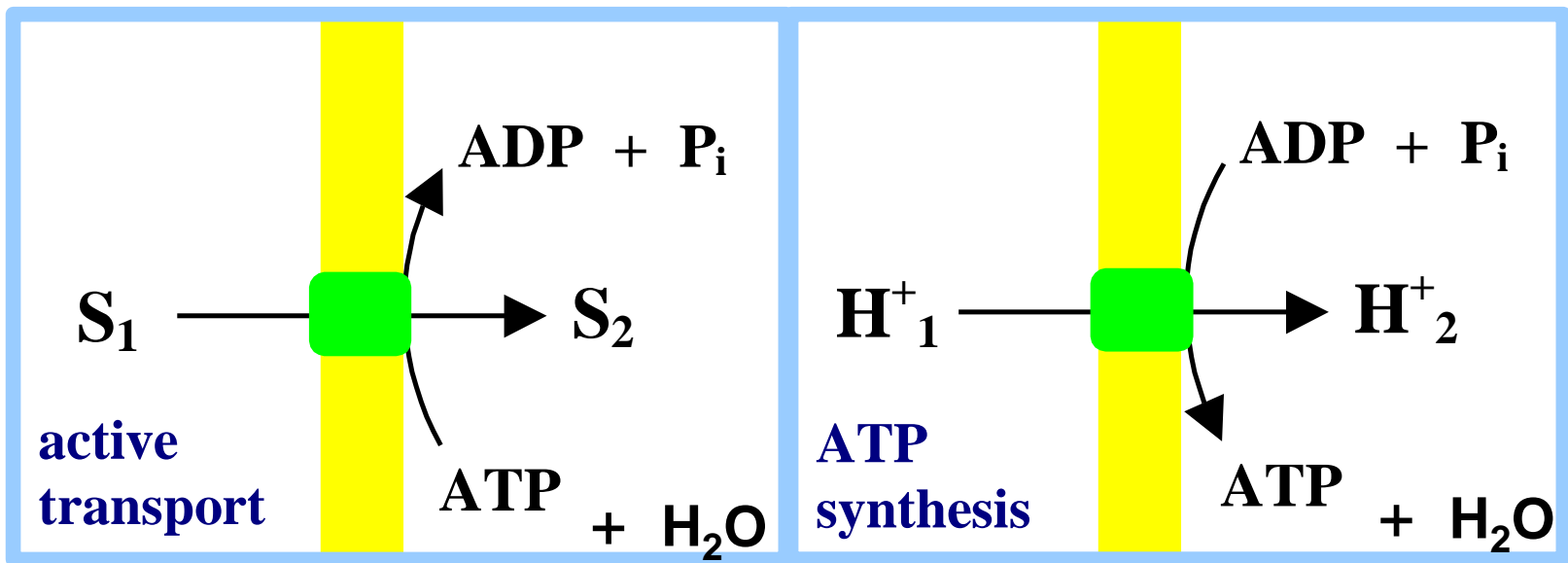
$$\Delta G = R T \ln \left( \frac{[S]_2}{[S]_1} \right) + n F \Delta E^{10}$$

$R$  = gas constant,  $T$  = temperature,  $n$  = charge on the ion,  $F$  = Faraday constant,  $E'_0$  = redox potential.

Since free energy changes are additive, the **spontaneous direction** for the coupled reaction will depend on **relative magnitudes** of:



- ◆  **$\Delta G$  for ion flux** - varies with ion gradient & voltage.
- ◆  **$\Delta G$  for chemical reaction** - negative  $\Delta G^{o'}$  for ATP hydrolysis, positive  $\Delta G^{o'}$  for ATP synthesis;  $\Delta G$  depends also on  $[ATP]$ ,  $[ADP]$ ,  $[P_i]$ .



Two examples:

**Active Transport:** Spontaneous energy released (negative  $\Delta G_1$ ) during movement of electrons between transporters exhibiting increasing  $E'^{\circ}$  values is coupled to (drives) ion flux against an electrochemical gradient (positive  $\Delta G_2$ ).

The process will occur spontaneously if

$$|\Delta G_1| > |\Delta G_2| \quad \text{or} \quad \Delta G_{\text{global}} = \Delta G_1 + \Delta G_2 < 0$$

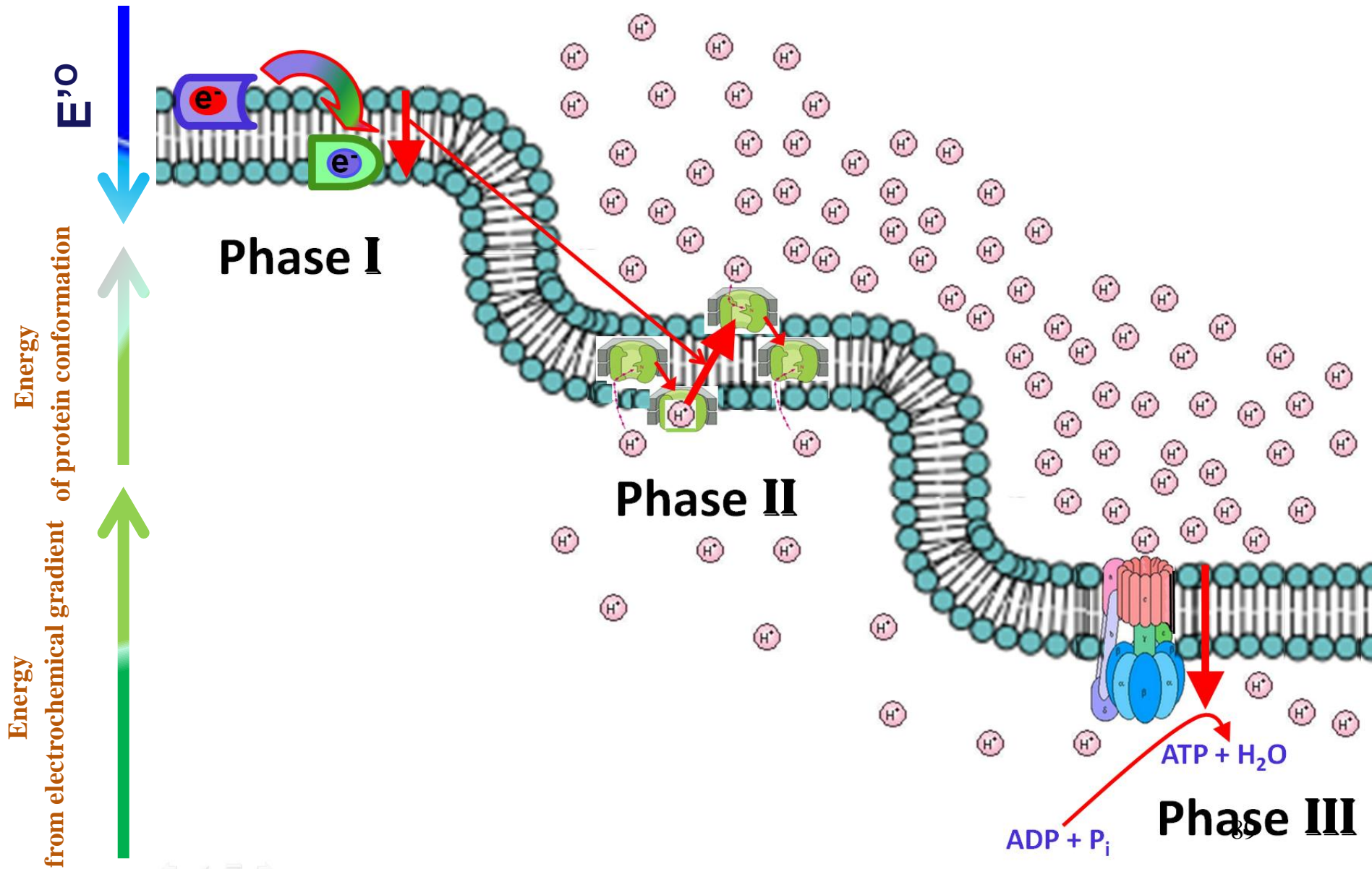
**ATP Synthesis:** Spontaneous  $H^+$  flux (negative  $\Delta G_1$ ) is coupled to (drives) ADP phosphorylation (positive  $\Delta G_2$ ).

The process will occur spontaneously if

$$|\Delta G_1| > |\Delta G_2| \quad \text{or} \quad \Delta G_{\text{global}} = \Delta G_1 + \Delta G_2 < 0$$

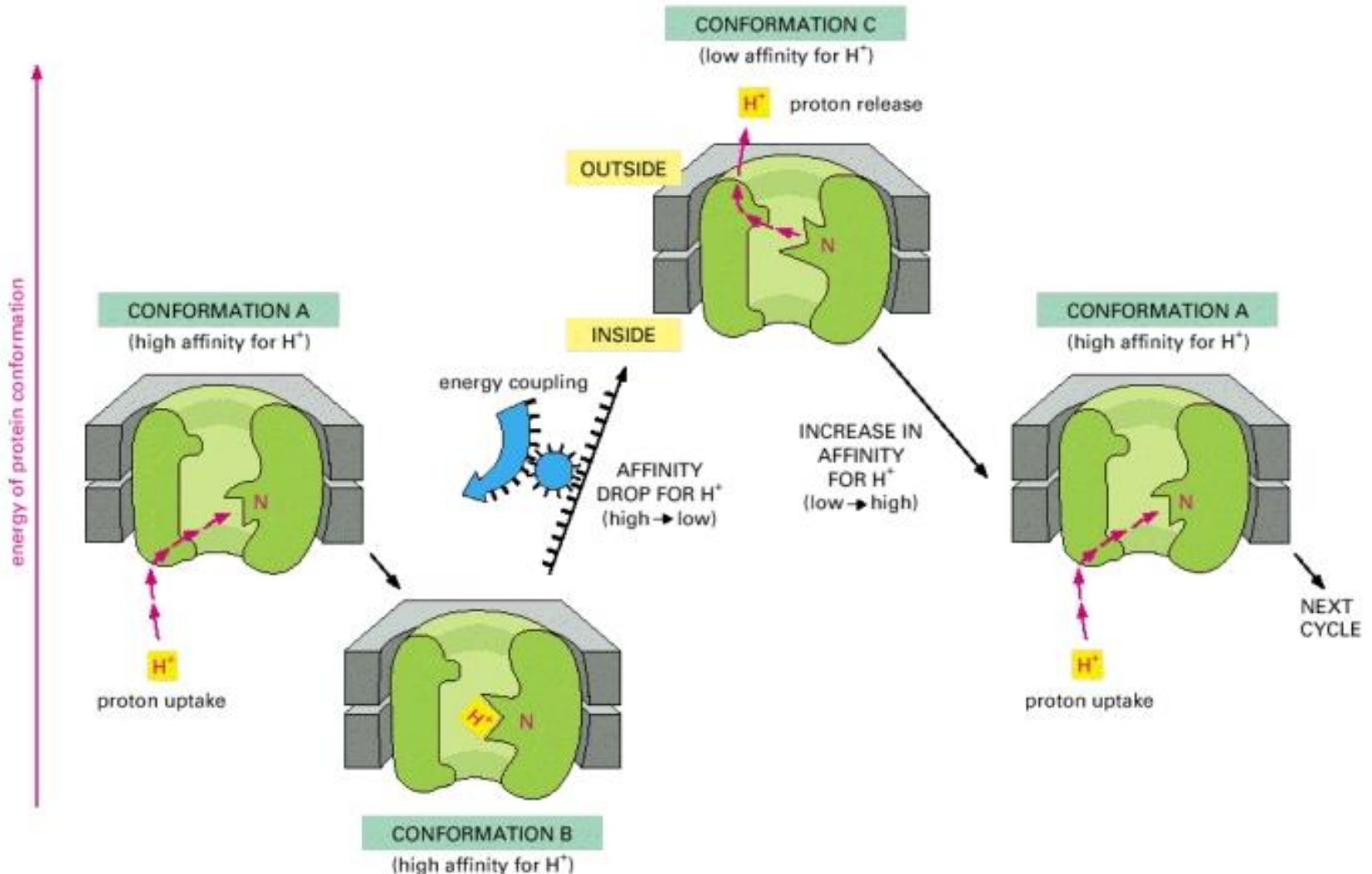
# The photosynthetic electron transport chain at work

## The spontaneous synthesis of ATP





# Modelo proposto para o funcionamento acoplado da translocação de prótons / cadeia de transporte de electrões

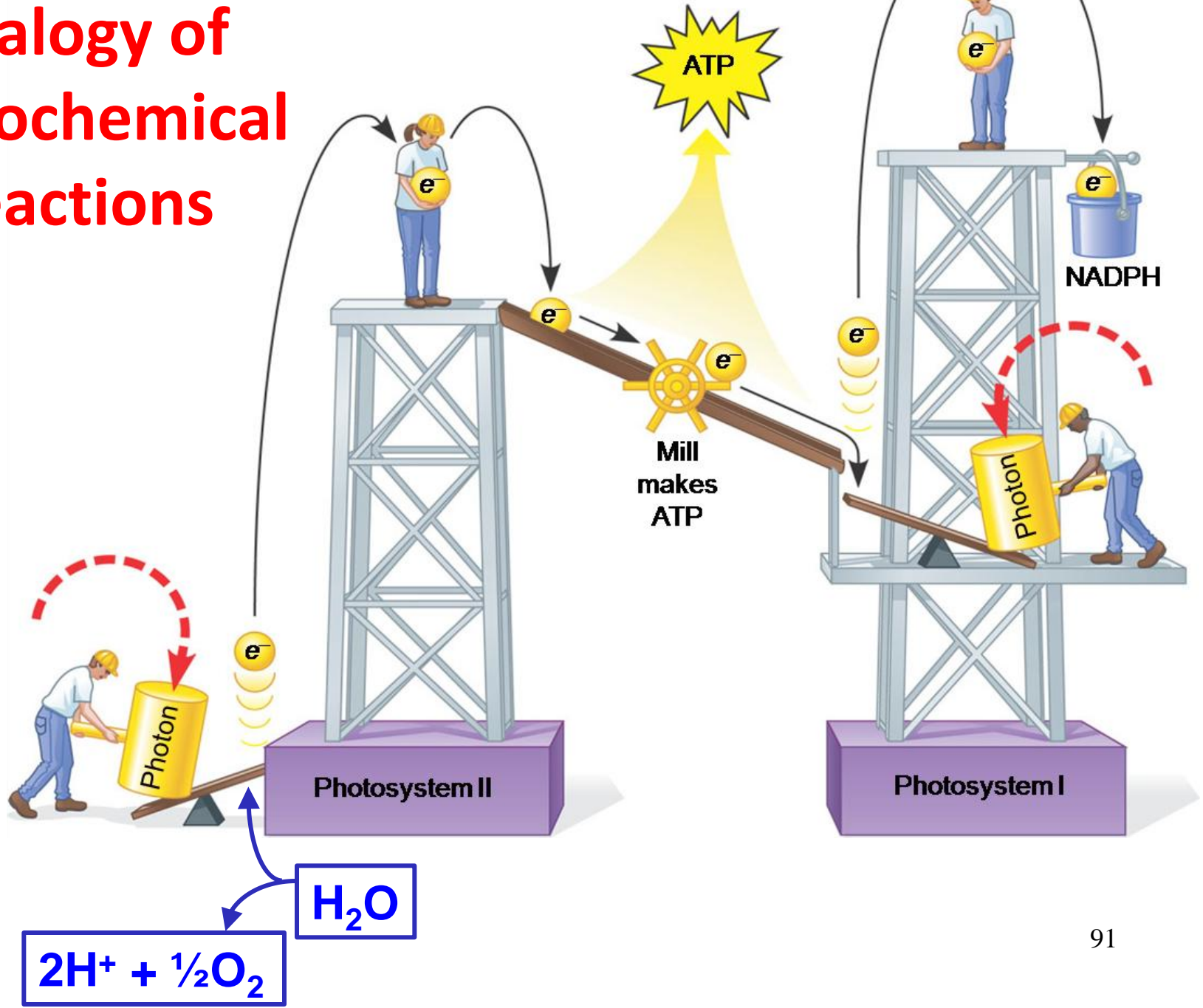


As alterações de conformação A→B e C→A ocorrem com  $\Delta G < 0$  e, por isso, espontaneamente.

As mudanças de conformação B→C são endergónicas ( $\Delta G > 0$ ), requerendo, por isso, o fornecimento de energia para funcionarem de modo espontâneo. Essa energia é libertada e fornecida pelo transporte de electrões ao longo da CTE.

O funcionamento do ciclo global A→B→C→A ... ocorre com  $\Delta G < 0$ , o que faz com que os prótons sejam translocados contra um gradiente electroquímico, da matriz mitocondrial para o espaço perimitocondrial.

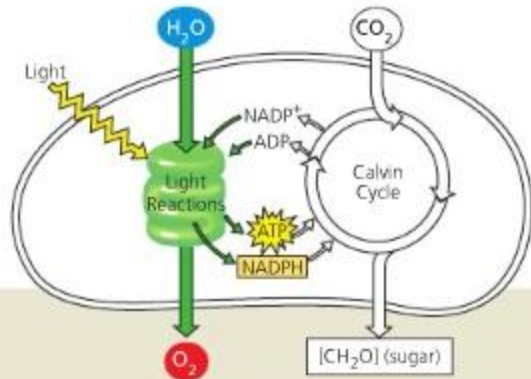
# Analogy of Photochemical Reactions



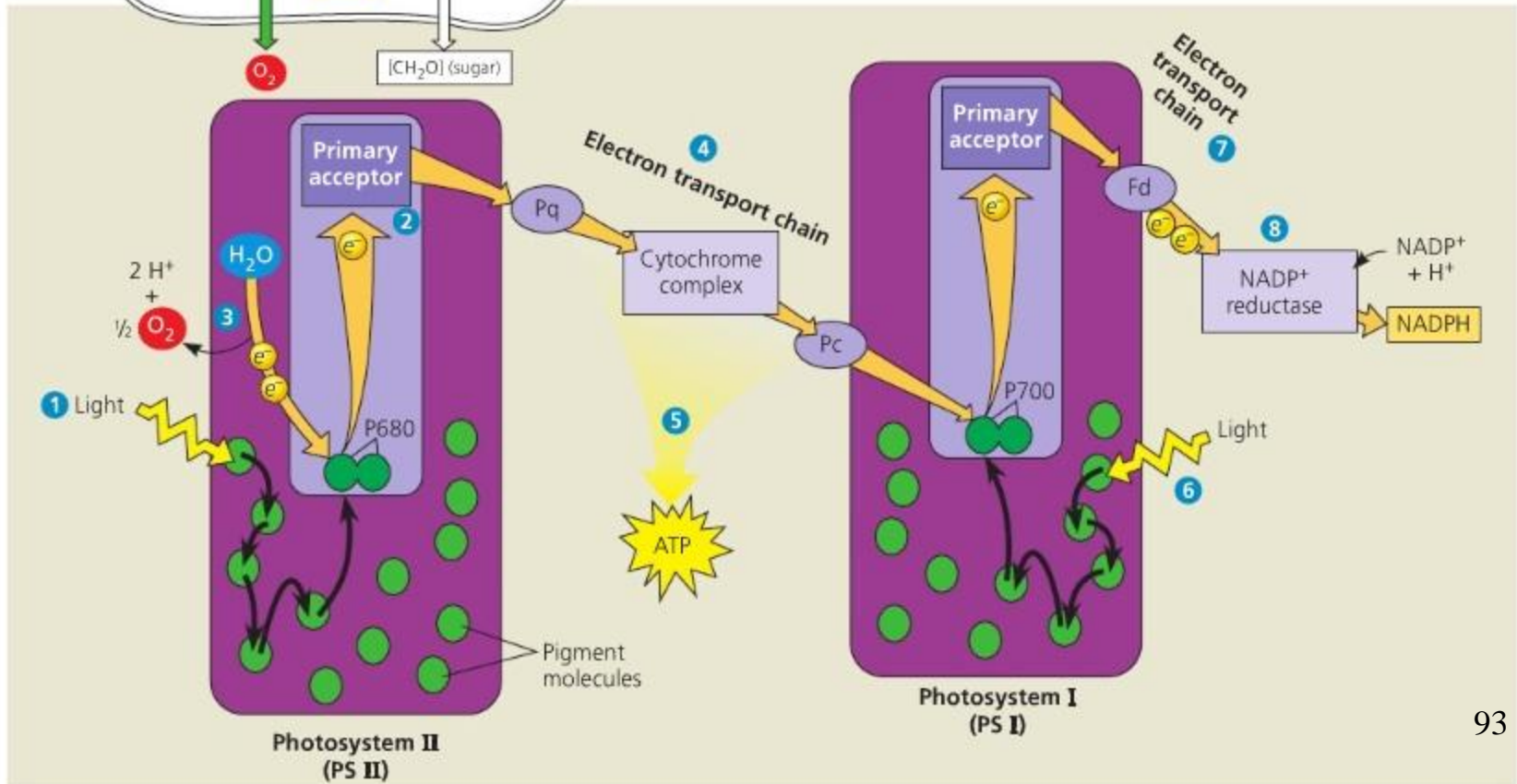
# The electron cycle of aerobic organisms

**O ciclo dos electrões**

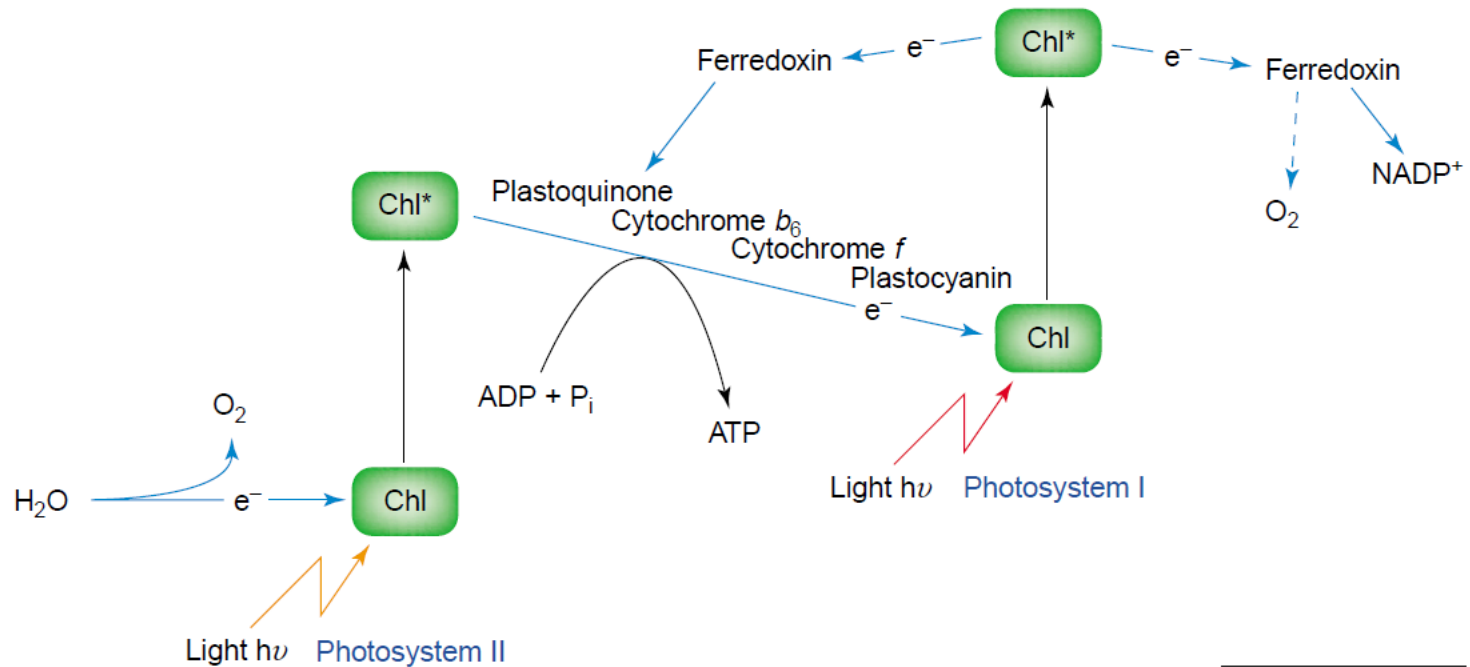
**Um ciclo fútil?**



▼ **Figure 10.13** How linear electron flow during the light reactions generates ATP and NADPH. The gold arrows trace the current of light-driven electrons from water to NADPH.



# Cyclic, pseudocyclic and noncyclic photophosphorylation



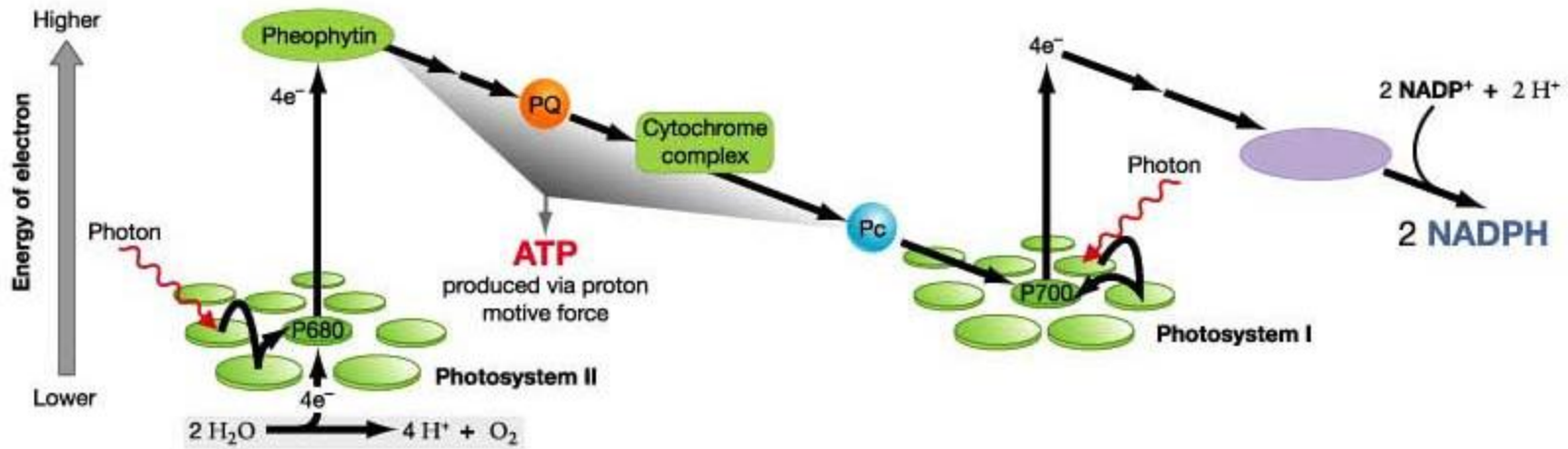
*TRENDS in Plant Science*

Abbreviations: Chl, chlorophyll; Chl\*, the excited state of Chl;  $e^-$ , electron;  $P_i$ , inorganic phosphate.

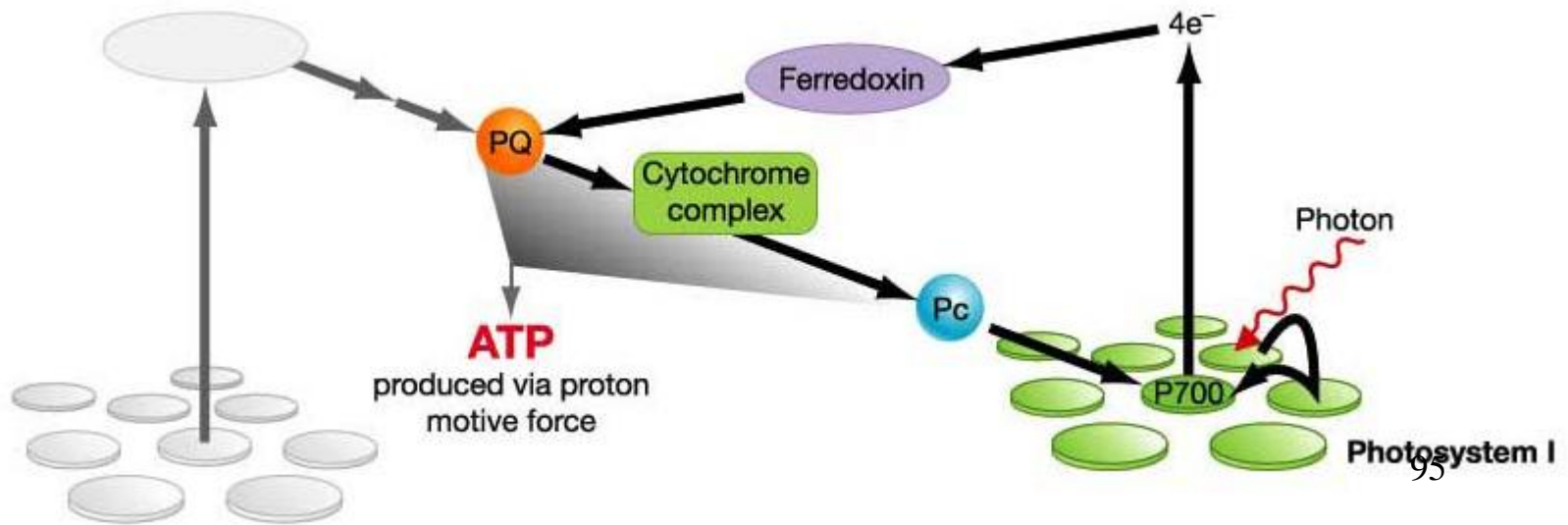
In pseudocyclic photophosphorylation, the terminal electron acceptor is  $O_2$  instead of  $NADP^+$ .



# Non-Cyclic Photophosphorylation



# Cyclic Photophosphorylation



## Cyclic electron transfer

- The main destination of the NADPH produced by non-cyclic electron flow is the Calvin cycle.
  - Fixes CO<sub>2</sub>.
  - Requires three ATP for every two NADPH consumed.
  - This (or other factors) can generate an ATP shortfall.
- Cyclic electron transfer occurs when electrons from ferredoxin are used to reduce plastoquinone.
  - Plastoquinone donates electrons to the bf-complex.
  - The bf-complex pumps protons using the Q-cycle.
  - Probably involves a ferredoxin/PQ oxidoreductase.
- Cyclic electron transfer provides a mechanism for pumping protons (& hence generating ATP *via* ATP synthase) but does not produce O<sub>2</sub> or NADPH.

### Properties of cyclic, noncyclic and pseudocyclic photophosphorylation

	Cyclic	Noncyclic	Pseudocyclic
Requires photosystem I	Yes	Yes	Yes
Requires photosystem II, inhibited by DCMU	No (except to obtain redox poise)	Yes	Yes
Oxygen produced	No	Yes	Yes
Oxygen consumed	No (except to obtain redox poise)	No	Yes
Electron acceptor	None, but cofactors include ferredoxin, flavins, quinones, Marmite™ [5]	NADP <sup>+</sup> , ferredoxin, ferricyanide, quinones	Oxygen, via cofactors including ferredoxin, bypyridyls (viologens), flavins

Abbreviation: DCMU, 3-(3',4'-dichlorophenyl)-1,1'-dimethyl urea.

All three modes of photosynthetic phosphorylation – cyclic, non-cyclic and pseudocyclic – are likely to be at work *in vivo*. Recent results from structural biology and genomics suggest that these three alternative electron-transport pathways seem to operate not only in isolated chloroplasts, but also in real life.

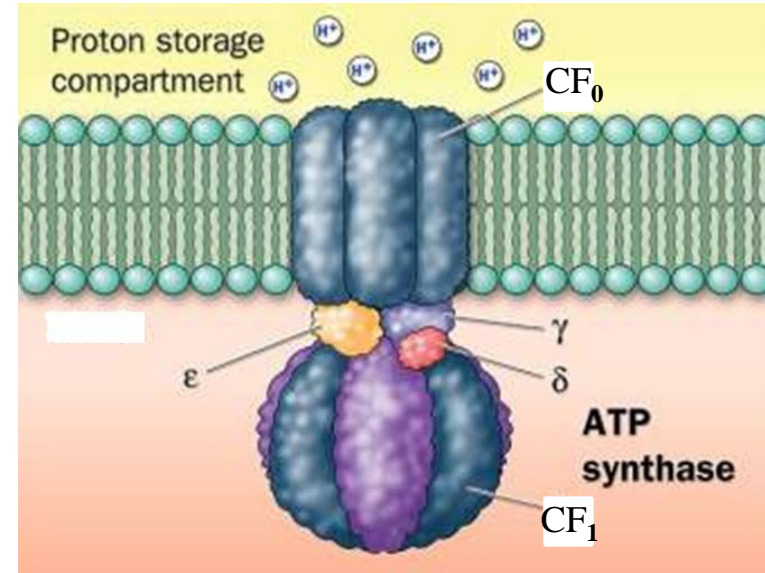
The interplay between the pathways might explain the flexibility of photosynthesis in meeting different metabolic demands for ATP.

## Constituição da ATP sintase

A ATP sintase é constituída por duas fracções proteicas  $CF_0$  e  $CF_1$ :

Fracção  $CF_0$  - suporta e fixa a enzima à membrana do tilacóide; consiste de cinco polipéptidos, revestidos por cadeias laterais hidrofóbicas, formando um canal tubular para a saída de  $H^+$  dos tilacóides.

Fracção  $CF_1$  - localiza-se na superfície exterior do tilacoide, contém o centro catalítico para a fosforilação do ADP a ATP e apresenta uma massa molecular de 360 kDa; é composta por nove subunidades esféricas de cinco tipos diferentes, cada uma das quais consistindo num polipéptido: três subunidades  $\alpha$ , três  $\beta$ , uma  $\gamma$ , uma  $\delta$  e uma  $\epsilon$ . As subunidades  $\alpha$  e  $\beta$  dispõem-se alternadamente na interface com a fracção  $CF_0$ .



## Funcionamento da ATP sintase

A saída dos prótons do lúmen dos tilacóides para o estroma do cloroplasto processa-se através da fracção  $CF_0$  da ATP sintase.

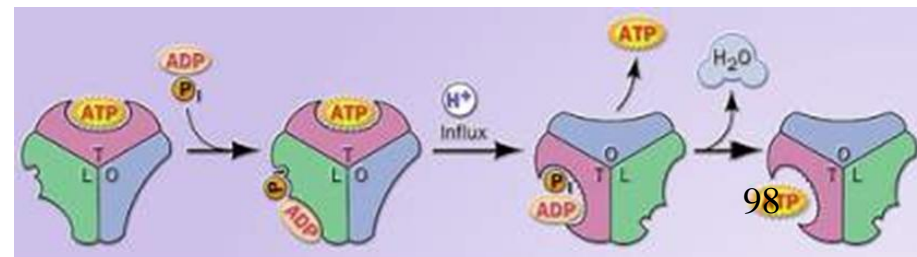
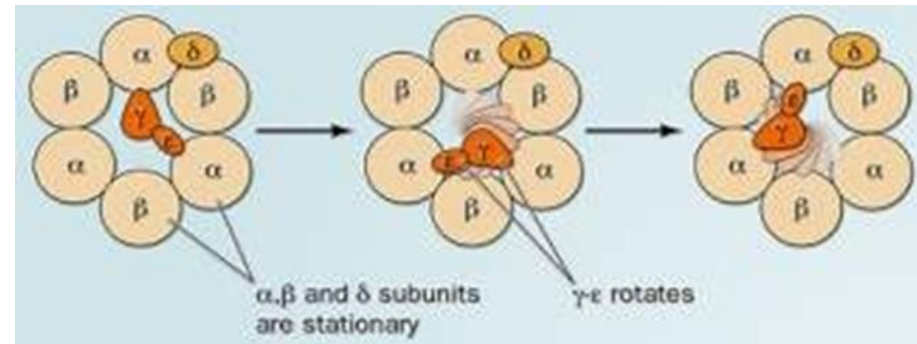
A fosforilação do ADP em ATP ocorre por alteração conformacional concertada das subunidades da fracção  $CF_1$ : Rotação das subunidades móveis  $\gamma$  e  $\epsilon$  em relação às subunidades  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\delta$ , que são fixas;

Movimento dos prótons através da fracção  $CF_0$ , o que induz uma alteração cíclica na conformação das subunidades catalíticas  $\beta$ , que se encontram em 3 estados conformacionais diferentes:

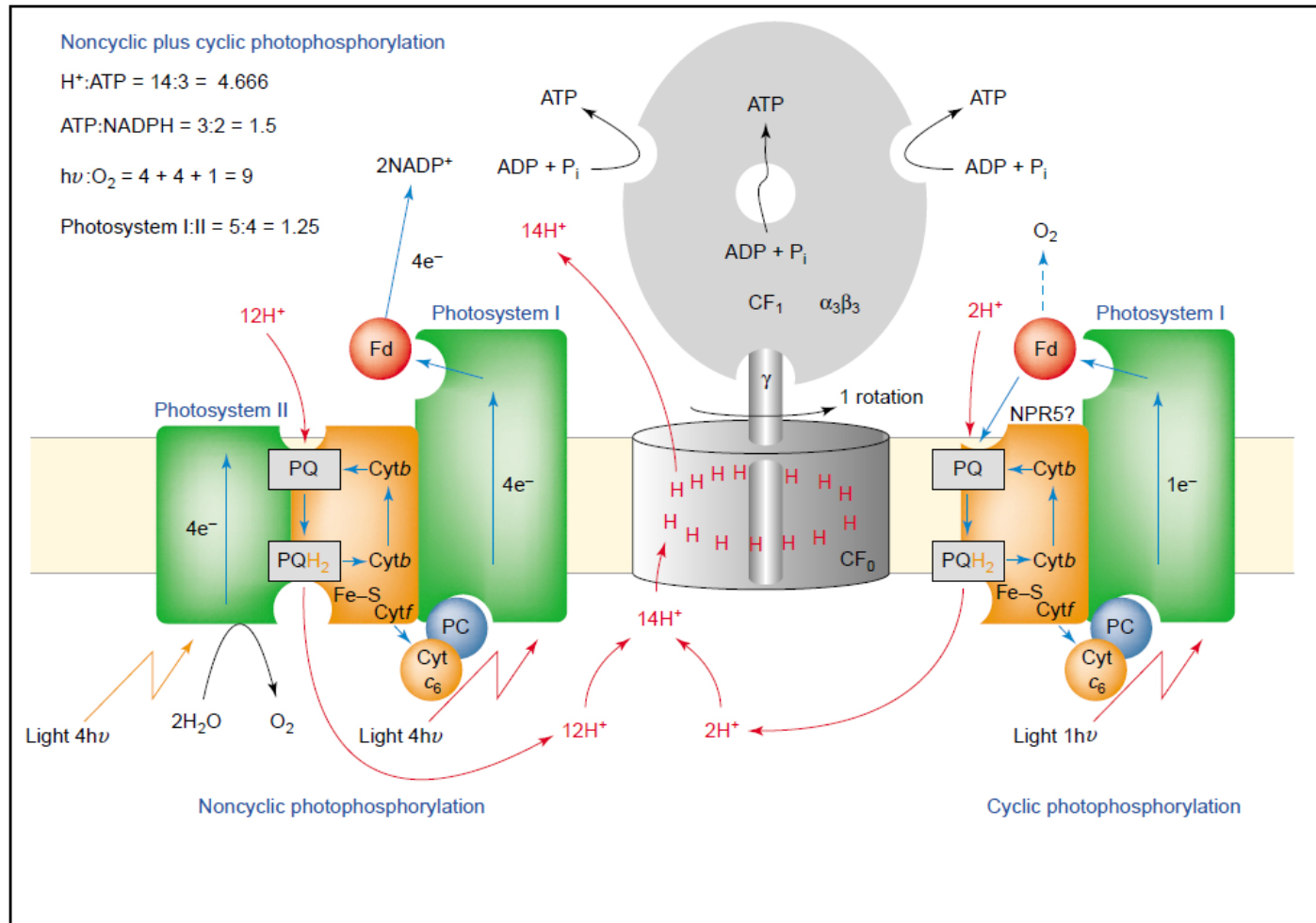
Conformação O: centro activo vazio;

Conformação L: ligação do substrato (ADP) ao centro activo;

Conformação T: transformação do substrato (ADP) em produto (ATP).



# Estequiometria da fotofosforilação



A simplified scheme for noncyclic photophosphorylation giving 12 protons translocated for every four electrons, with combined photosystem-I cyclic phosphorylation translocating two protons per electron. Stoichiometries are depicted for four electrons transferred through the noncyclic chain from H<sub>2</sub>O to NADP<sup>+</sup> and one electron cycled through photosystem I alone. Therefore, H<sup>+</sup>:ATP = 14 and ATP:NADPH = 3:2 when noncyclic and cyclic photophosphorylation are combined. Non-cyclic photophosphorylation alone would give ATP:NADPH = 9:7 ; Abbreviations: cyt, cytochrome; e<sup>-</sup>, electron; Fd, ferredoxin; P<sub>i</sub>, inorganic phosphate; PQ, plastoquinone.

The X-ray structure of beef-heart mitochondrial F<sub>1</sub>-ATP synthase shows a threefold rotational symmetry, with each 120° sector containing a different ligand-binding site associated with the catalytic subunit, β. The shape of each site is determined by the asymmetry of the single γ subunit, which forms a 'bearing' inserted through the central core of the cylindrical α<sub>3</sub>β<sub>3</sub> domain. Rotation of γ within the central axis of F<sub>1</sub> induces sequential conformational changes in each of the three αβ heterodimers; three ATP molecules are made for each 360° rotation of γ. This model is accepted for both chloroplasts and mitochondria, suggesting that oxidative and photosynthetic phosphorylation are not so different, after all.



Does noncyclic photophosphorylation, by itself, makes enough ATP? If we take the mitochondrial model for the ATP synthase and apply it, without modification, to chloroplasts, we arrive at an ATP:NADPH ratio for noncyclic phosphorylation of exactly 3:2. This is because two electrons are required for each NADPH molecule.

Four electrons passing through the complete noncyclic electron transport chain should pump 12 vectorial protons – four released into the lumen by oxidation of water in photosystem II, four bound at the acceptor side of photosystem I, and eight pumped completely across the thylakoid membrane in the Q cycle of the cytochrome  $b_6f$  complex. Twelve protons equate to one  $360^\circ$  rotation of a 12-fold  $CF_0$ . One  $360^\circ$  rotation of  $CF_1\text{-}\gamma$  gives three ATP molecules. Therefore, synthesis of two NADPH molecules accompanies a single turn of  $CF_1\text{-}\gamma$ , and ATP:NADPH = 3:2. This is the worst-case scenario for devotees of cyclic and pseudocyclic photophosphorylation – their reactions are redundant. For conventional, complete photosynthesis in C3 plants, cycles and pseudocycles are out of a job.

One foundation of this view has now been removed. Spinach chloroplast  $CF_0$  has 14-fold, not 12-fold, rotational symmetry. Even mitochondrial  $F_0$  components are far from universally 12-fold: in yeast, they have tenfold symmetry.

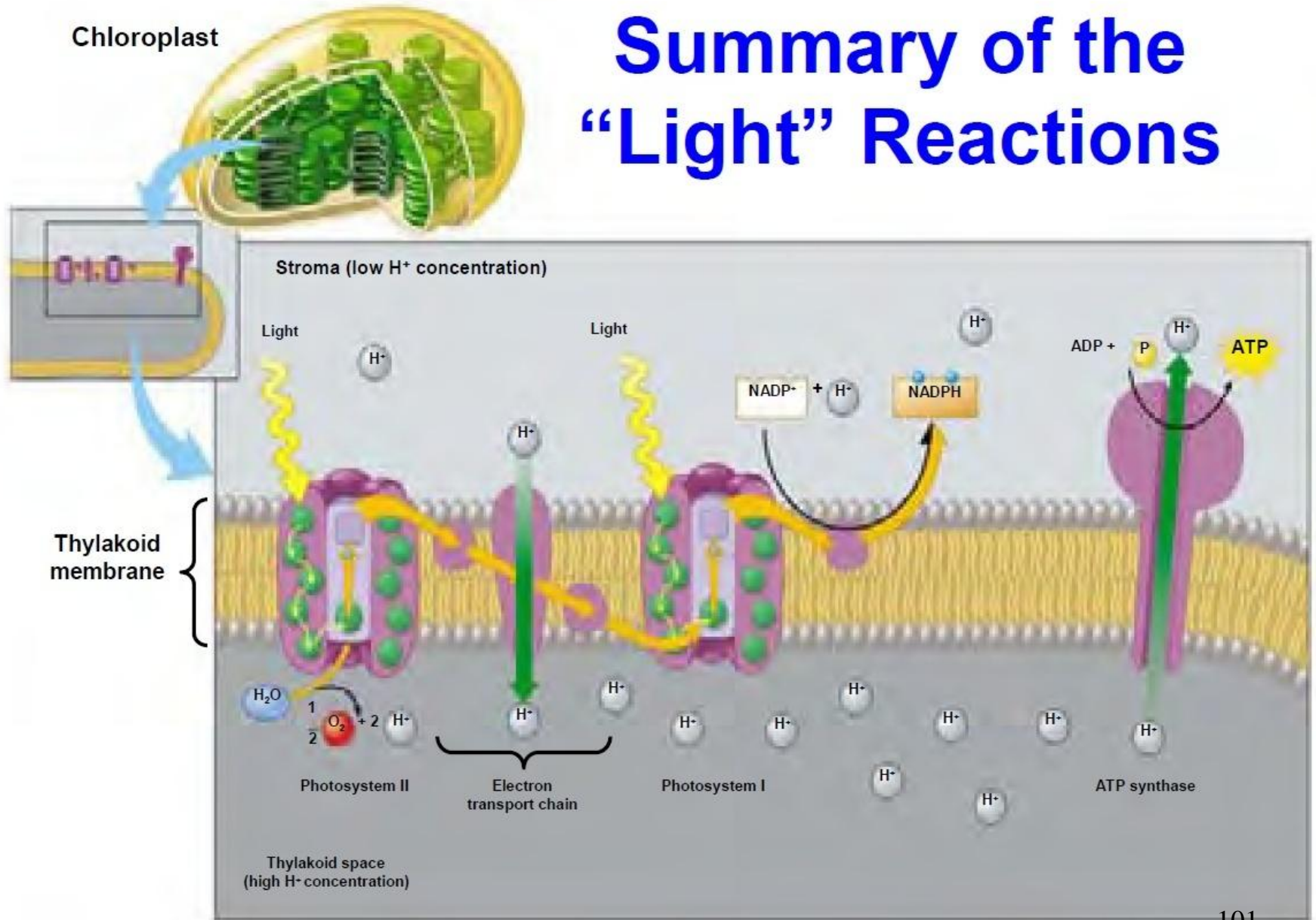
The 12 protons transported by four electrons in the non-cyclic chain must drive a 14-fold  $CF_0$  through 12 of its 14 steps. This will give six-sevenths of a rotation, or  $308^\circ$ . The true ATP:NADPH ratio of noncyclic phosphorylation is then  $(3/2) \times (6/7)$ , or 9:7. In decimal form, and rounded up to seven places, this is 1.2857143. This value would have seemed absurd in the days when it was thought that there were chemical intermediates in photosynthetic and oxidative phosphorylation. An integer was taken for granted, and there were high stakes on whether the answer was one or two. Even 3:2 was regarded as a facile compromise, with no obvious mechanistic basis.

So it seems that something has to supply the additional ATP for  $CO_2$  fixation by the Benson–Calvin pathway, which requires ATP:NADPH = 3:2.

If the answer is pseudocyclic electron transport, 14% of electrons must end up on oxygen and not on  $NADP^+$ .

If the answer is cyclic electron transport and cyclic electron transport pumps two protons for each electron (through the Q cycle operating alone), photosystem I must recycle one electron in five. For maximum efficiency, this would mean that there is 20% more photosystem I than photosystem II. This conclusion is in agreement with recent estimates. Perhaps the  $CF_0$  ring size of 14 is not as anomalous as it first appears.

# Summary of the “Light” Reactions



# O amónio

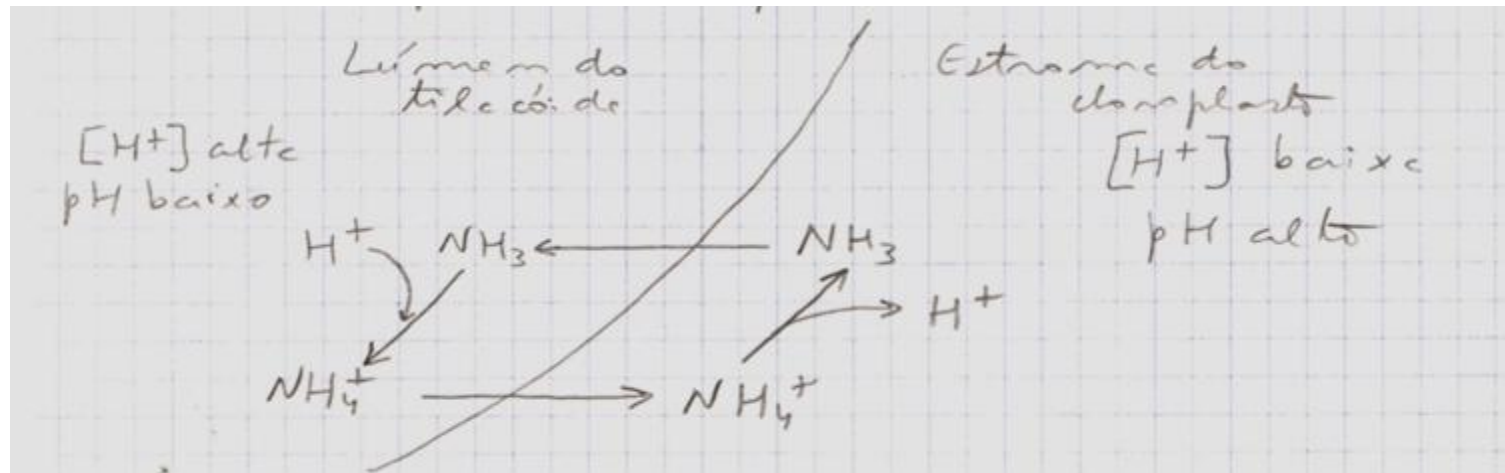
## Porque é que o amónio é tóxico para as células?

Porque desacopla as cadeias de transporte de electrões, do mitocôndrio e do cloroplasto, isto é, permite a continuação do fluxo de electrões sem a correspondente do ATP de acordo com a teoria quimiosmótica, proposta em 1961, por Peter Mitchell.

No mitocôndrio: espaço perimitocondrial,  $[H^+]$  alta, pH baixo; matriz mitocondrial,  $[H^+]$  baixa, pH alto.

No cloroplasto: dentro dos tilacóides,  $[H^+]$  alta, pH baixo; fora dos tilacóides (estroma do cloroplasto),  $[H^+]$  baixa, pH alto.

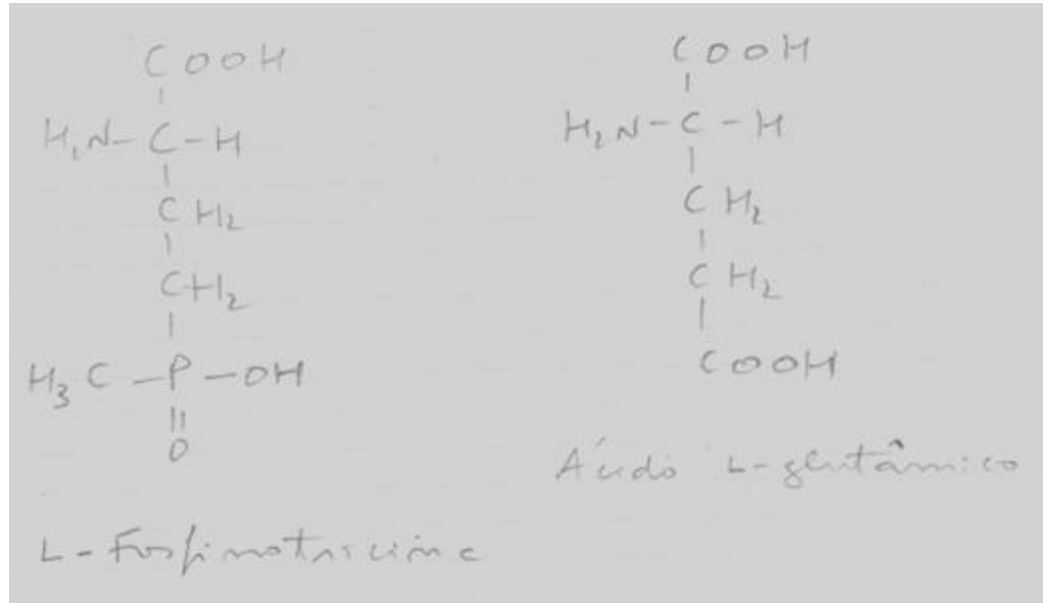
Teoria quimiosmótica: síntese de ATP pela passagem de  $H^+$  do lúmen dos tilacóides ou do espaço perimitocondrial dos mitocôndrios, em resposta ao gradiente de pH.



Amónio ( $NH_4^+$ ) e amoníaco ( $NH_3$ ): a membrana do tilacóide (como a membrana interna do mitocôndrio) é impermeável ao  $H^+$ , mas permeável ao  $NH_4^+$  e ao  $NH_3$ .

Se  $[NH_4^+]$  no mitocôndrio (nas plantas, produzido pela fotorrespiração), citoplasma ou cloroplasto aumenta, a forma  $NH_3$  predomina no estroma do cloroplasto devido ao pH alto. O  $NH_3$  entra no lúmen do tilacóide. Devido ao pH ser aqui relativamente mais baixo, o  $NH_3$  tem tendência para captar um protão, transformando-se em  $NH_4^+$ . Este sai do tilacóide e entra no estroma do cloroplasto, onde o pH é mais alto => o  $NH_4^+$  perde o protão e converte-se em  $NH_3$ . Isto é, o  $NH_3$  entra no tilacóide e sai protonado => desfaz-se o gradiente electroquímico de pH => não ocorre síntese de ATP.

O Basta, um herbicida potente, tem como substância activa a fosfotricina, um análogo estrutural do ácido L-glutâmico.



A fosfotricina é um inibidor da enzima glutamina sintetase (GS), uma enzima que participa no ciclo da glutamato sintase (ou ciclo GS/GOGAT) e que é responsável pela assimilação da grande quantidade de amónio produzido na fotorrespiração. Ao inibir a enzima GS, o amónio acumula-se e mata as plantas pelo mecanismo atrás indicado.

Há uma bactéria do solo, a *Streptomyces hygroscopicus*, que codifica uma enzima, a fosfotricina acetiltransferase (PAT) que metaboliza prontamente a fosfotricina. Um grupo de investigadores da empresa Hoechst transferiram o gene que codifica a PAT desta bactéria para uma outra bactéria, a *Agrobacterium tumefaciens*, que infecta plantas.

Durante a infecção, esta segunda bactéria injecta o seu DNA no hospedeiro, criando uma planta transgénica. Já foi, assim, possível obter plantas modificadas geneticamente (ex. tabaco) que expressam o gene da PAT. Ao serem pulverizadas com o herbicida Basta, estas plantas transgénicas conseguem metabolizar a fosfotricina, não sendo mortas, ao contrário de todas as outras ao seu redor.

# The Paradox of Aerobiosis

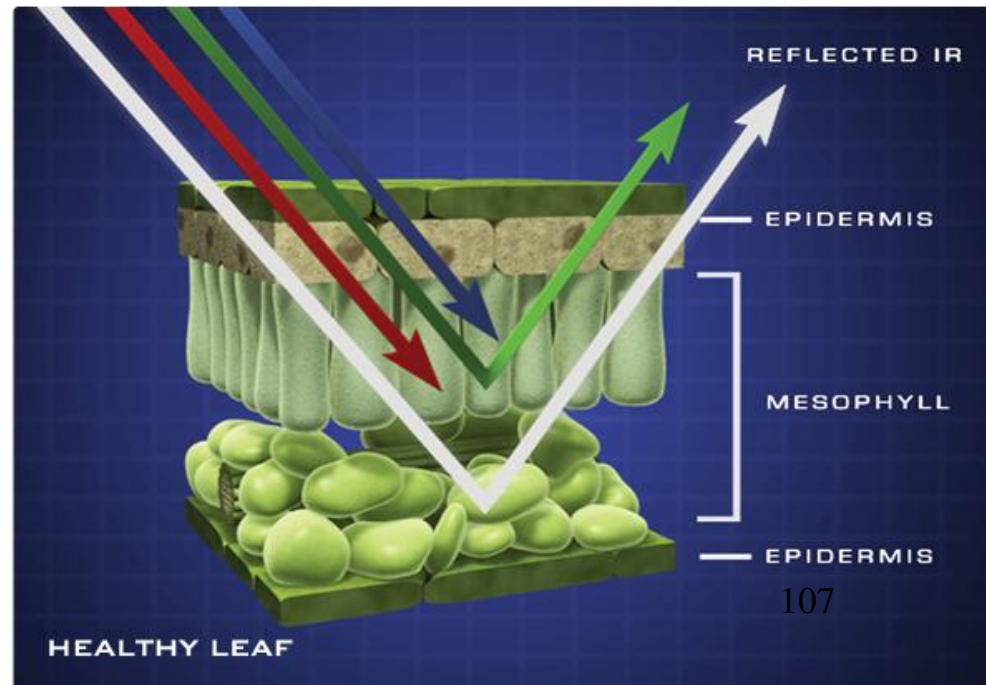
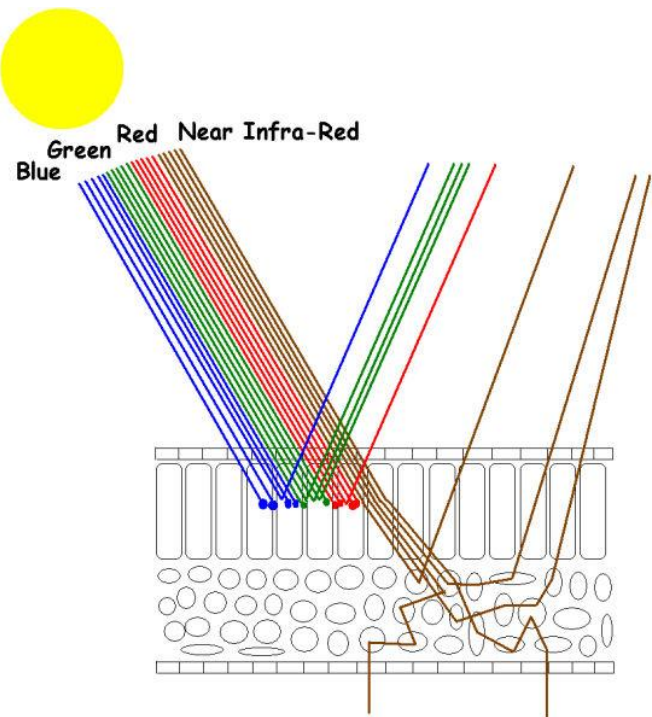
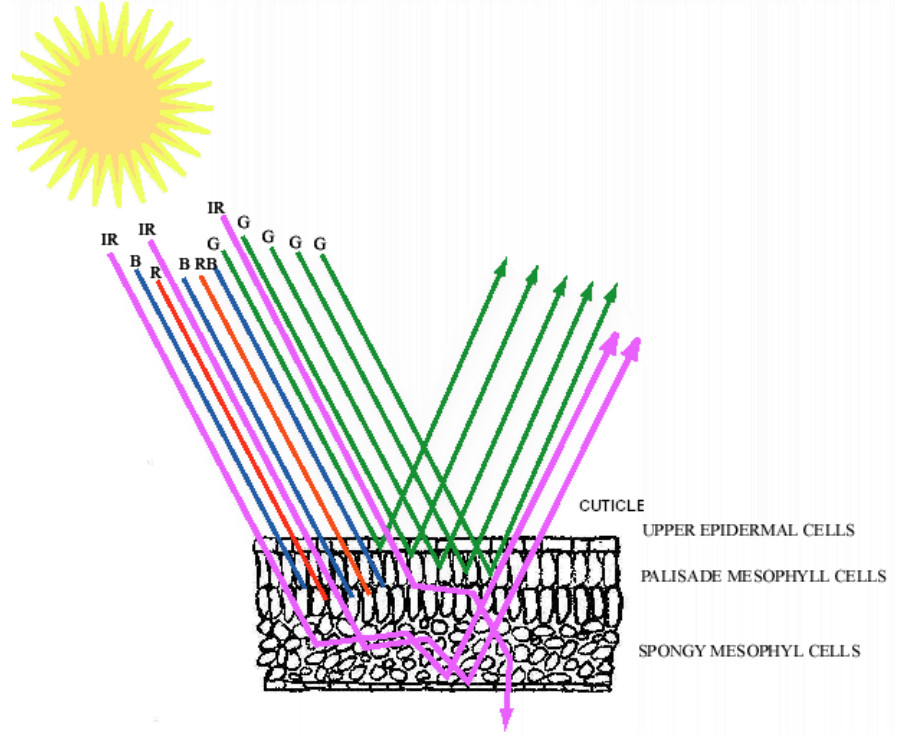
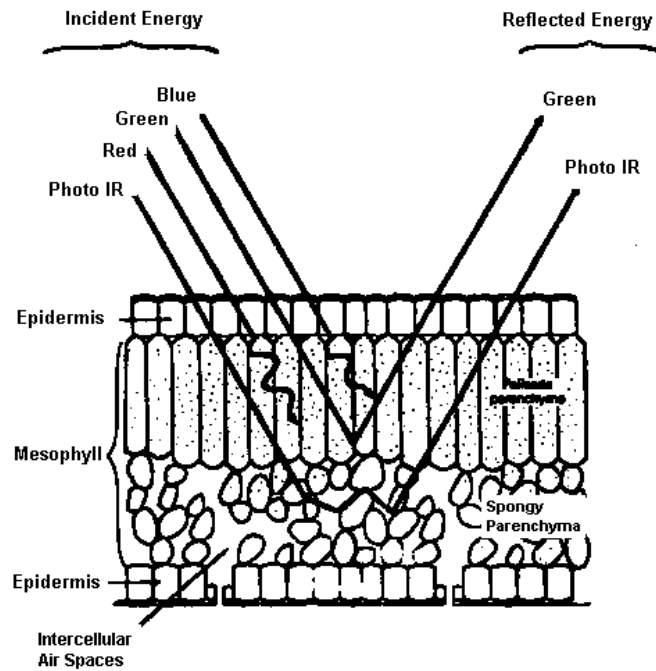
- **Oxygen is essential, but toxic.**
- **Aerobic cells face constant danger from reactive oxygen species (ROS).**
- **ROS can act as mutagens, they can cause lipid peroxidation and denature proteins.**



**Exemplo de uma sequência de acontecimentos que leva à produção de espécies reactivas de oxigénio em plantas**

**Árvores numa tarde de Verão.  
Dia muito quente, seco e com  
intensidade luminosa muito elevada**





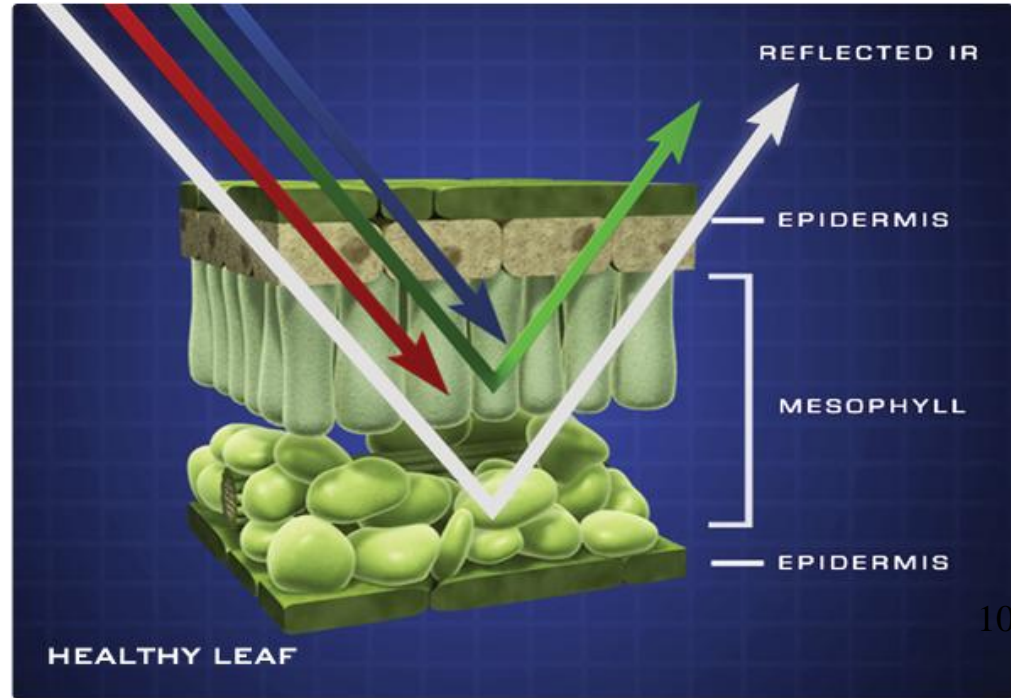
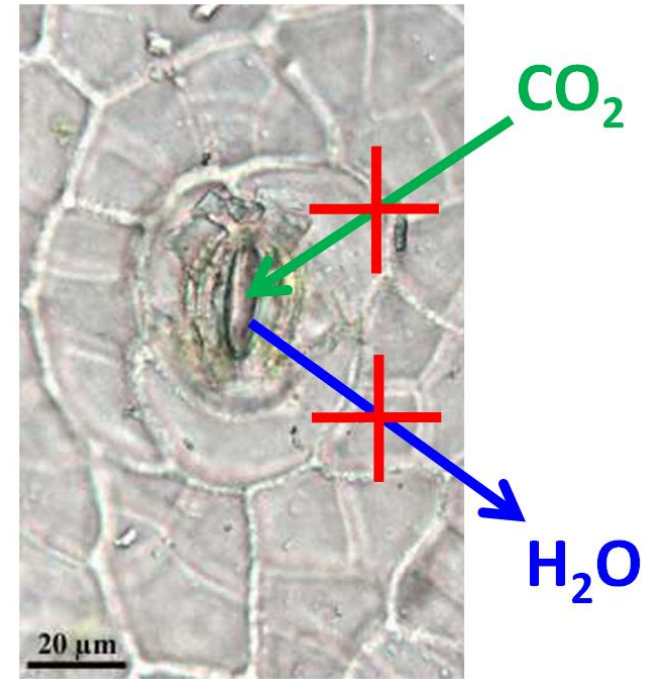
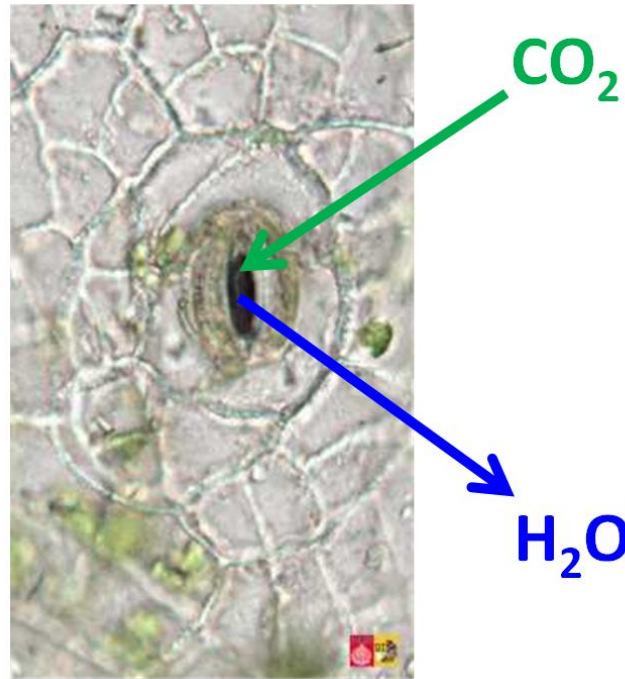


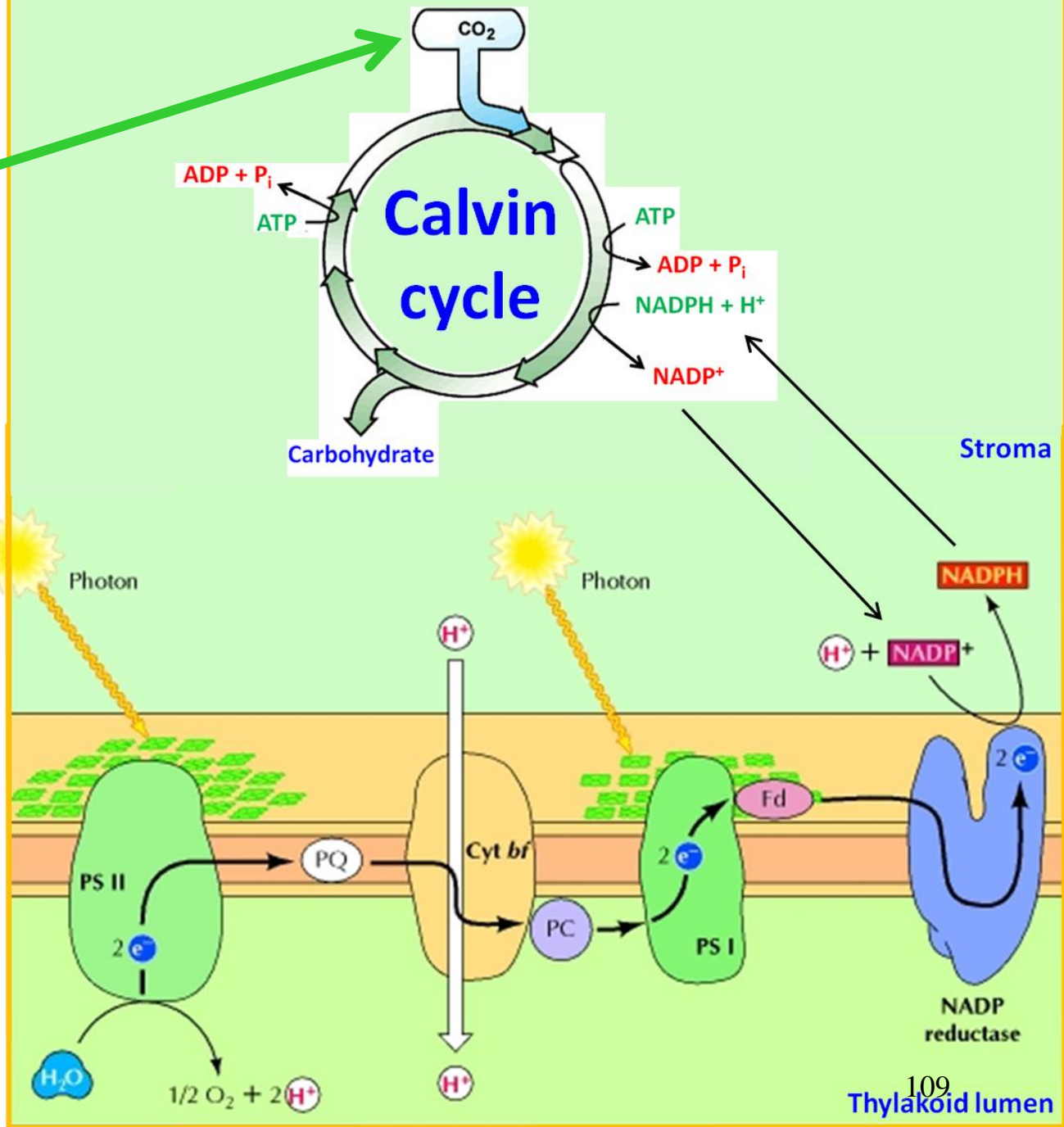
O que acontece com

•H<sub>2</sub>O

•CO<sub>2</sub>

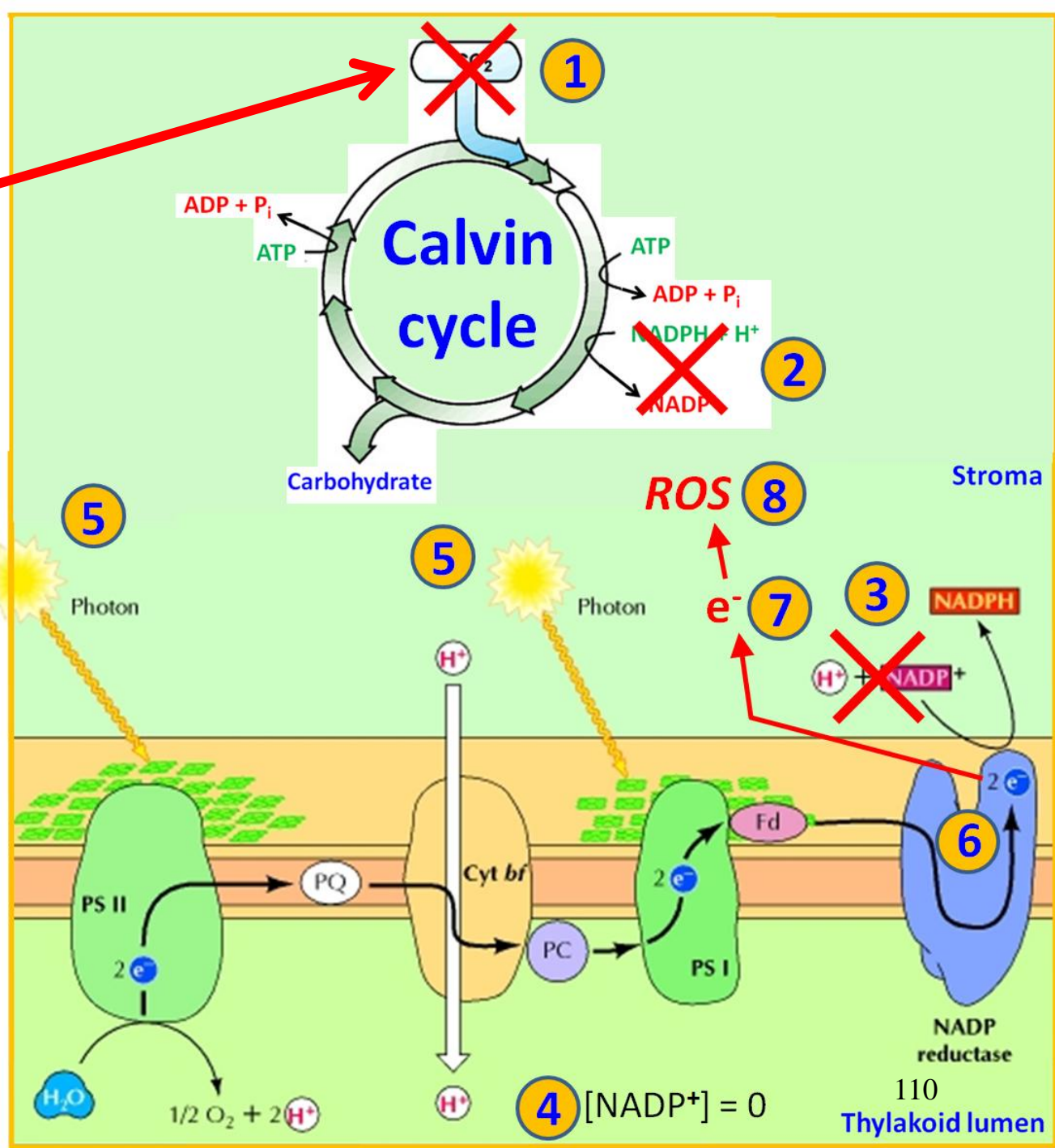
•Fotões de Luz ?





**Fotossíntese:**  
**Funcionamento**  
**normal**

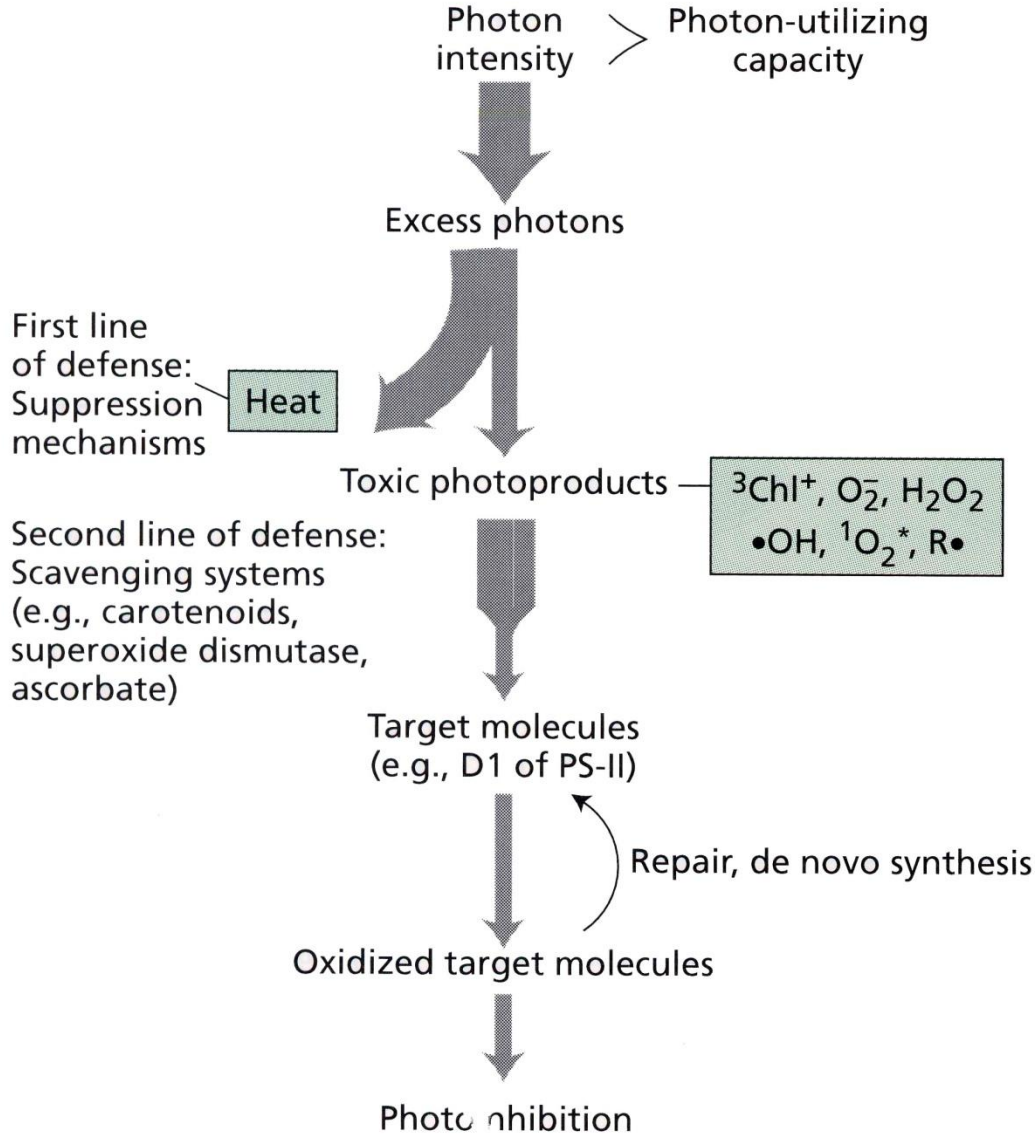




## Fotossíntese:

Funcionamento em condições de temperatura e luminosidade elevadas e de falta de água → Fotooxidação

# Efeitos de Luz em Excesso



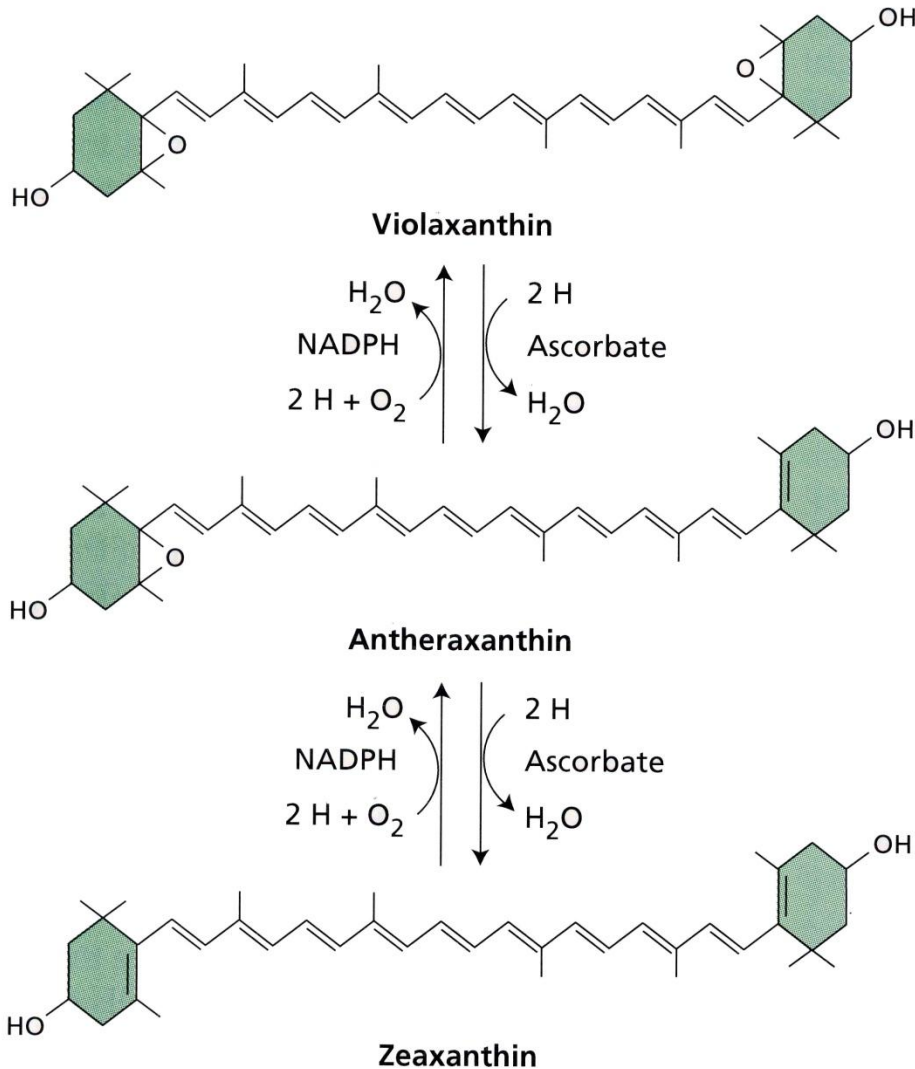
# Ciclo das Xantófilas

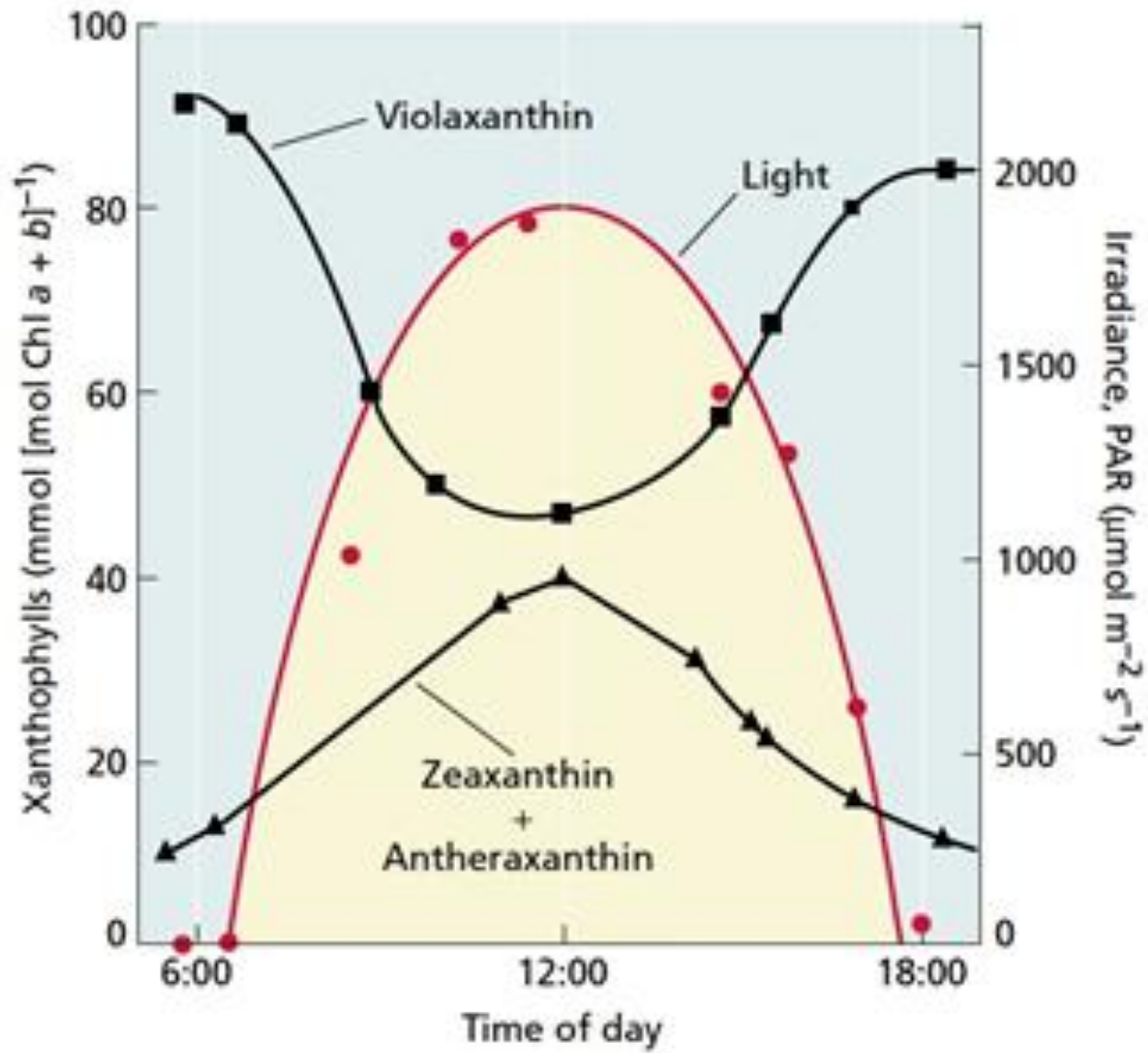
Luz baixa

Luz elevada

EPOXIDATION

DE-EPOXIDATION





# Algumas questões:

- 1 -
  - a) Identifique os dois grupos em que se subdividem os pigmentos fotossintéticos no que diz respeito ao papel que desempenham no processo fotossintético.
  - b) Identifique os três grupos em que se subdividem os pigmentos fotossintéticos no que diz respeito à sua natureza química.
  - c) Por que razão não é correcto designar as reacções de assimilação do  $\text{CO}_2$  por “reacções às escuras”?
  
- 2 -
  - a) Diga quais são os ‘destinos’ da radiação solar que atinge a superfície das folhas?
  - b) Explique como é que a síntese do ATP está associada ao transporte de electrões nas membranas tilacoidais?
  - c) Que funções desempenham os carotenóides no cloroplasto?
  
- 3 – Considere as reacções fotoquímicas da fotossíntese vegetal.
  - a) Quais os dois produtos principais?
  - b) Qual o principal produto secundário?
  - c) Qual a fonte de potencial redutor?
  - d) Qual a fonte de energia?
  - e) Qual a molécula que liberta o electrão que inicia o funcionamento da cadeia de transporte de electrões?
  - f) A passagem dos electrões entre cada dois transportadores é um processo exergónico ou endergónico?  
Porquê?
  
- 4 - Classifique os pigmentos fotossintéticos quanto à sua natureza química e quanto à sua função. Dê um exemplo de cada.
  
- 5 - Tendo em conta o processo fotossintético, diga onde ocorrem e o que produzem:
  - a) As reacções fotoquímicas;
  - b) As reacções de assimilação do  $\text{CO}_2$ .
  
- 6 - Considere as reacções fotoquímicas da fotossíntese. Defina, **sucintamente**, esquema em Z, queda no vermelho e efeito de Emerson.



**7 -** Considere as reacções fotoquímicas da fotossíntese.

- a) Escreva a reacção global das reacções fotoquímicas da fotossíntese;
- b) Usando palavras suas e sem fazer descrições, explique como é possível, do ponto de vista termodinâmico, fazer o transporte sequencial dos electrões da água para um composto com um grande potencial para os ceder.

**8 -** Considere as reacções fotoquímicas da fotossíntese.

- a) Escreva a reacção global das reacções fotoquímicas da fotossíntese;
- b) Usando palavras suas e sem fazer descrições, explique como é possível, do ponto de vista termodinâmico, passar protões do estroma do cloroplasto para o lúmen dos tilacóides, contra um gradiente de potencial electroquímico.

**9 -** Relativamente aos processos fotoquímicos da fotossíntese, responda às seguintes questões, justificando brevemente:

- a) Qual a origem e o destino dos electrões que circulam na cadeia de transporte de electrões?
- b) Onde ocorrem estas reacções?
- c) Qual a fonte de energia que permite a síntese do ATP?
- d) Indique se o CO<sub>2</sub> tem algum papel directo neste processo. Se sim, identifique qual.
- e) Indique se o CO<sub>2</sub> tem algum papel indirecto neste processo. Se sim, identifique qual.

**10 -** Considere as reacções fotoquímicas da fotossíntese.

- a) Como classifica os pigmentos fotossintéticos quanto à sua natureza química?
- b) Identifique os dois principais ingredientes, os dois principais produtos e o principal subproduto destas reacções.
- c) Identifique, pela sequência em que ocorrem, os cinco principais componentes da cadeia de transporte de electrões (CTE) do cloroplasto.
- d) Na CTE do mitocôndrio, os electrões vão do NADH ou do FADH<sub>2</sub> até ao O<sub>2</sub>; na CTE do cloroplasto, os electrões vão da H<sub>2</sub>O até ao NADP<sup>+</sup>. Explique como é possível funcionarem, de modo espontâneo, estes dois movimentos aparentemente antagónicos.

**11 -** Defina, **sucintamente**, os seguintes conceitos relativos às reacções fotoquímicas da fotossíntese:

- a) Fotossistema I;
- b) Efeito de Emerson;
- c) Queda no vermelho.

**12 -** Considere as reacções fotoquímicas da fotossíntese vegetal.

- a) Quais os dois produtos principais?
- b) Qual o principal produto secundário?
- c) Qual a fonte de potencial redutor?
- d) Qual a fonte de energia?
- e) Qual a molécula que liberta o electrão necessário ao desenrolar da cadeia de transporte de electrões?
- f) Identifique os cinco componentes principais da cadeia de transporte de electrões.

**13 -** Relativamente aos processos fotoquímicos da fotossíntese, responda às seguintes questões, justificando brevemente:

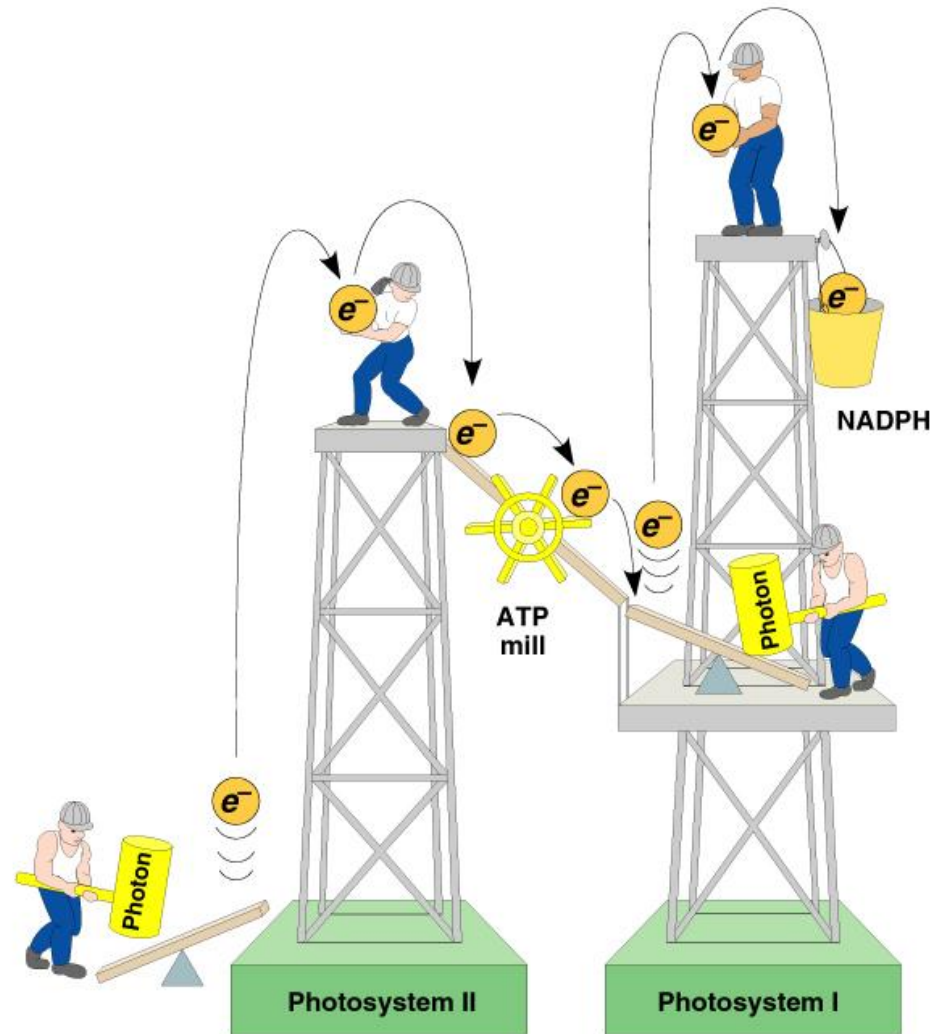
- a) Qual a origem e o destino dos electrões que circulam na cadeia fotossintética de transporte de electrões?
- b) Onde ocorrem estas reacções?
- c) Como se sintetiza o ATP?

**14** -a) Defina fotossíntese.

- b) Escreva a reacção global da fotossíntese e o respectivo valor de  $\Delta G^{\circ}$ . Explique porque esta reacção funciona espontaneamente numa planta.
- c) Escreva a reacção global das reacções fotoquímicas da fotossíntese. Explique porque esta reacção funciona espontaneamente numa planta.
- d) Escreva a reacção global (estequiometricamente certa) das reacções de assimilação do  $\text{CO}_2$  da fotossíntese no caso da síntese de uma molécula de glucose. Explique como esta reacção funciona espontaneamente numa planta.
- e) Preencha a tabela seguinte com as palavras SIM e NÃO. Na última linha (Aceitador terminal de electrões), indique o composto em caso afirmativo.

<b>Propriedades das fotofosforilações cíclica, não-cíclica e pseudocíclica</b>			
	<b>cíclica</b>	<b>não-cíclica</b>	<b>pseudocíclica</b>
<b>Requer fotossistema I</b>			
<b>Requer fotossistema II</b>			
<b>Produção de <math>\text{O}_2</math></b>			
<b>Consumo de <math>\text{O}_2</math></b>			
<b>Aceitador terminal de electrões</b>			

f) O que representa a figura seguinte?



- g) Ao construir um gráfico com esta figura, que unidades colocaria nos eixos das abcissas e das ordenadas?
- h) Faça uma legenda sucinta, mas objectiva, da figura.
- i) Explique o movimento espontâneo dos electrões na parte central da cadeia.
- j) Explique a síntese espontânea do ATP associada à parte central da cadeia.