

IOB 0127 - Fitoplâncton e a Produção Primária

## Luz no ambiente marinho

Profa. Dra. Sônia M. F. Giancesella

### Equipe do curso:

Dra. Flávia M. P. Saldanha Corrêa

Dr. Juan José Barrera Alba

MSc. Melissa Carvalho

# Luz no ambiente marinho

Qual o limite da fotossíntese no oceano?

Luz → essencial para a fotossíntese

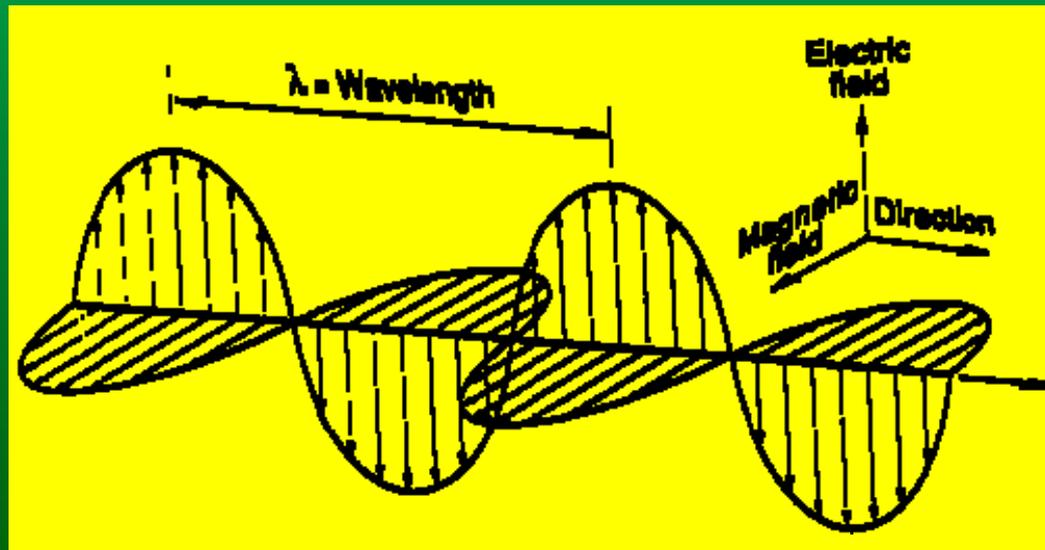
- Aspectos de importância biológica:
  - Quantidade
  - Qualidade
- Ambos sofrem amplas variações:
  - Temporais
  - Espaciais
  - Circunstanciais

Conceitos:

Radiação eletromagnética:

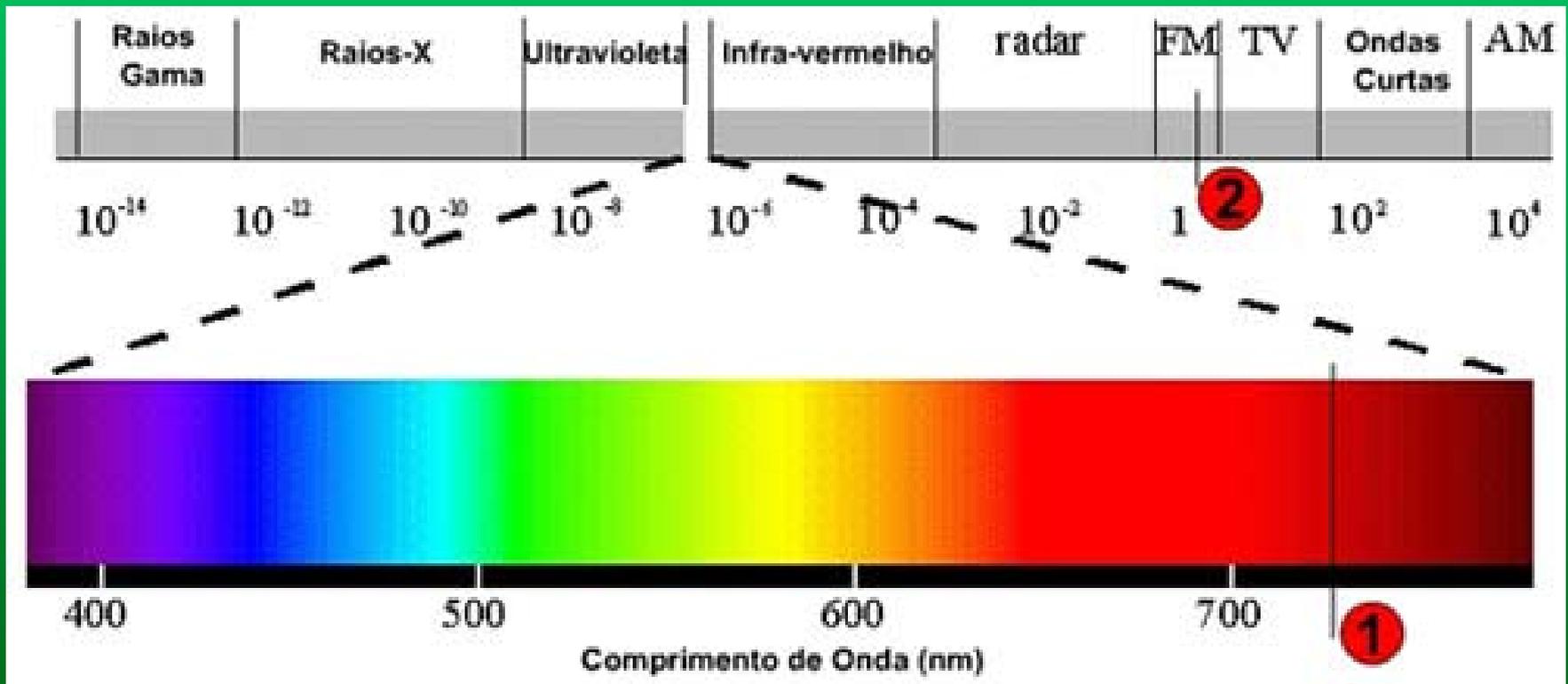
→ campos de ondas elétricas e magnéticas que se movimentam em ângulo reto uma em relação à outra e à velocidade da luz

→ transmitida sem necessidade de contacto material.



# Espectro eletromagnético

O espectro eletromagnético é a distribuição da intensidade da radiação eletromagnética com relação ao seu comprimento de onda ou frequência.



- Faixa infinita de comprimentos de onda: de raios cósmicos a baixas frequências

→ Todos os corpos que estão acima do zero absoluto emitem radiação.

Zero absoluto não existe na natureza (região mais fria do espaço está a  $3^{\circ}\text{K}$  - radiação decorrente do Big-Bang).

Durante o dia → Energia solar atinge a atmosfera, o mar e os continentes, produzindo os ventos, as correntes marinhas e a fotossíntese.

Para entendermos e quantificarmos esses processos:

Quanta Energia atinge a Terra diariamente?

A energia média incidente na superfície da Terra é chamada de constante solar  $S$  e tem o valor:

$$S = 1,368 \text{ KW/m}^2$$

Equivale aproximadamente a  $2 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$

Valor varia com diversos fatores, principalmente com a distância entre Terra e Sol.

Apenas a região entre 200 nm e 3000 nm apresenta Fluxo mais significativo em termos de Energia

# Espectro eletromagnético

Cerca de 40% dessa energia encontra-se na forma visível do espectro de luz.

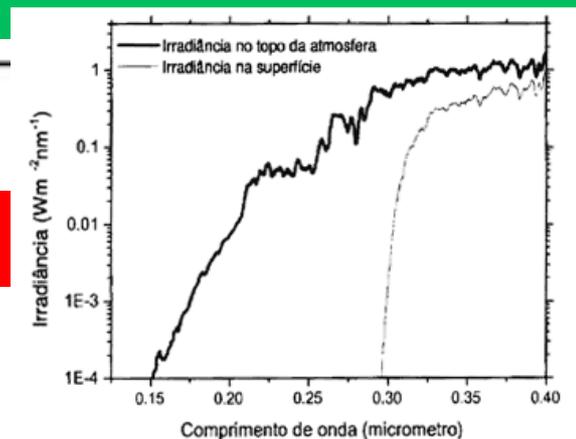
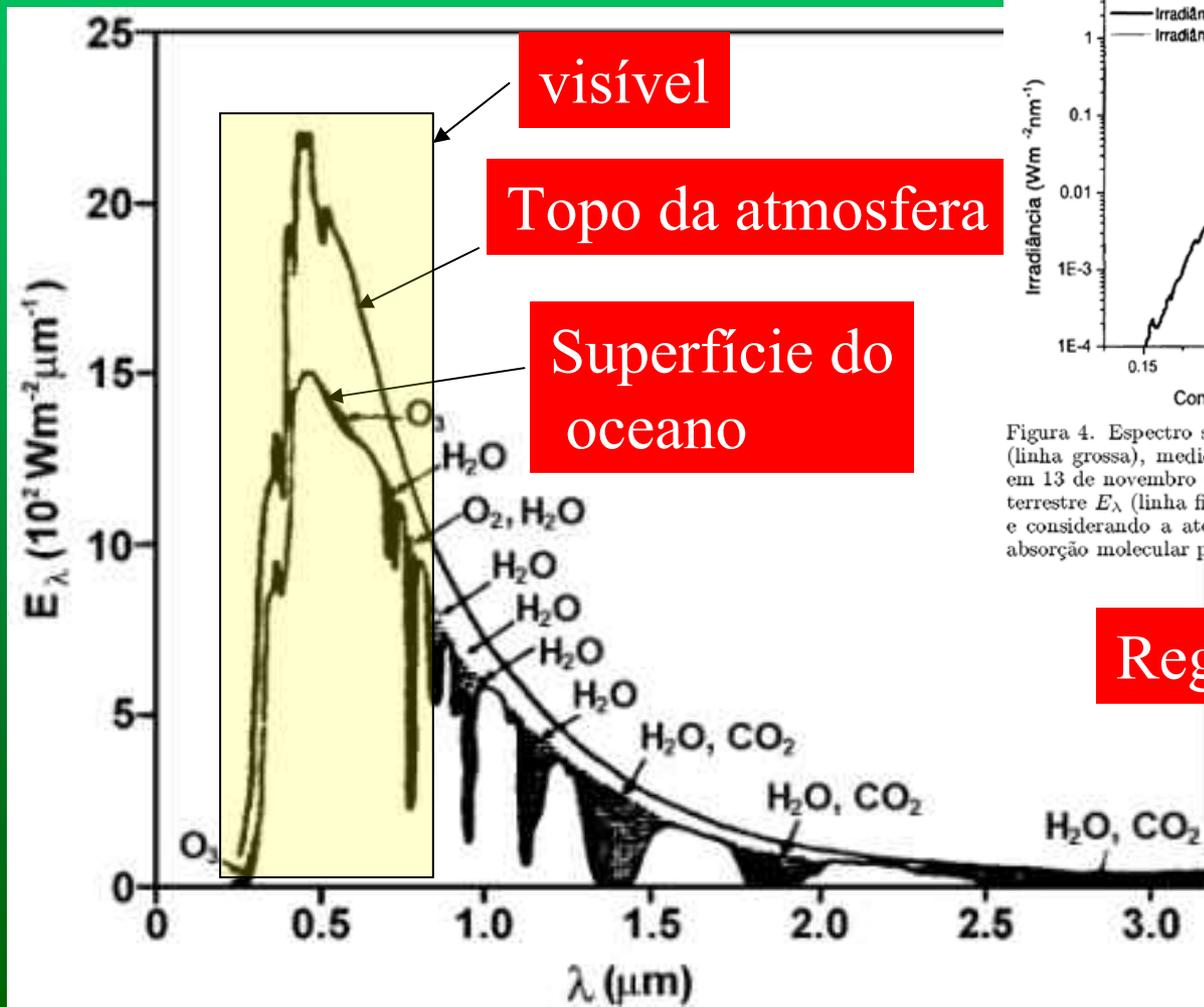


Figura 4. Espectro solar no UV no topo da atmosfera  $E_{\lambda}^{\top}$  (linha grossa), medido pelo experimento ATLAS3-SUSIM em 13 de novembro de 1994, e espectro solar na superfície terrestre  $E_{\lambda}$  (linha fina) calculado utilizando a lei de Beer, e considerando a atenuação por espalhamento Rayleigh e absorção molecular por  $O_2$ ,  $O_3$ ,  $SO_2$  e  $NO_2$ .

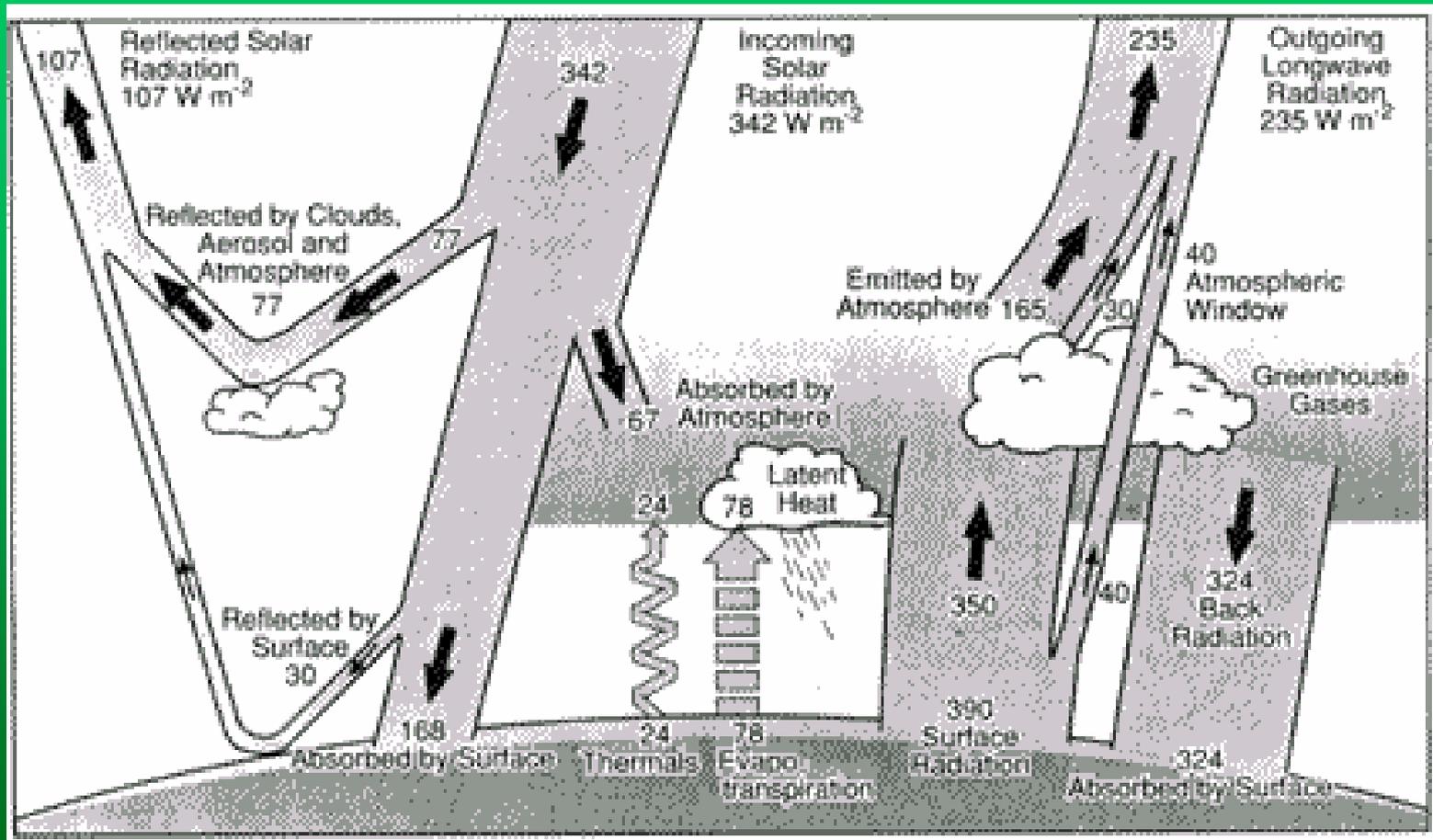
# Luz incidente que atinge a superfície do mar

Apenas cerca de 42% da  $E$  que atinge o topo da atmosfera chega à superfície do oceano.

Perdas:

- Reflexão
- Espalhamento
- Absorção
- Calor

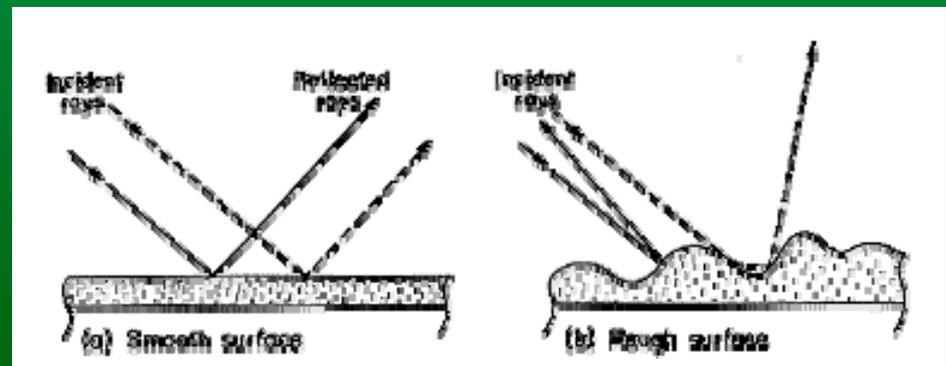
# Balanço de energia solar: verifique quantidades refletidas



**Reflexão** é o processo pelo qual "uma superfície de descontinuidade manda de volta uma parte da radiação incidente para o meio de onde ela veio.

cerca de 1/3 da energia do sol é refletida.  
Importância da reflexão: Se não houvesse reflexão, grande parte do mundo que nos rodeia não seria visível. Se um objeto não emite luz, a única maneira de ser visto é por reflexão.

Tipos de reflexão:  
especular e difusa

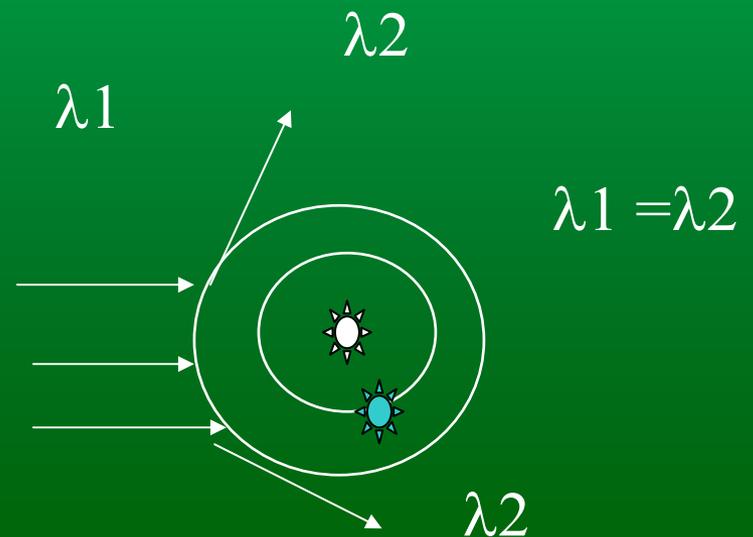


Com a reflexão, não há transformação de energia, mas uma mudança na direção da energia incidente.

O Espalhamento é um tipo particular de Reflexão, em que a superfície é constituída por pequenas partículas ( nuvens, poeira, aerossóis) e a luz não volta toda ao meio de onde veio.



No espalhamento também não há transformação de  $E$ , apenas mudança na distribuição espacial da  $E$



## Albedo:

medida da refletividade de um objeto.

Relação entre EEM Refletida/Incidente .

Expressa como porcentagem, de 0 a 100%. Varia com o  $\lambda$  da radiação, mas pode ser tratado como valor médio. Depende também do ângulo de incidência.

Regiões cobertas de neve: albedo até 90%.

Oceano: baixo albedo.

Marte- não tem atmosfera:  
baixo albedo



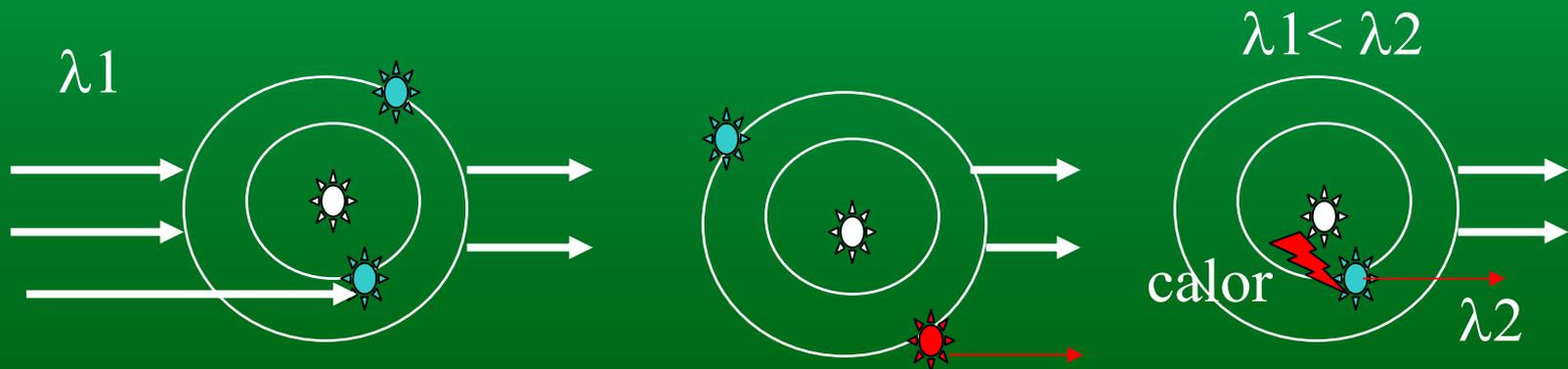
**Absorção** é o processo pelo qual a radiação incidente é total ou parcialmente retida por uma substância.

Quando a atmosfera absorve energia o resultado é uma transformação irreversível da radiação numa outra forma de energia. Esta energia é transformada de acordo com a natureza do meio.

A E dos fótons que atinge o átomo pode ser transformada total ou parcialmente em calor, que fica retido na atmosfera.

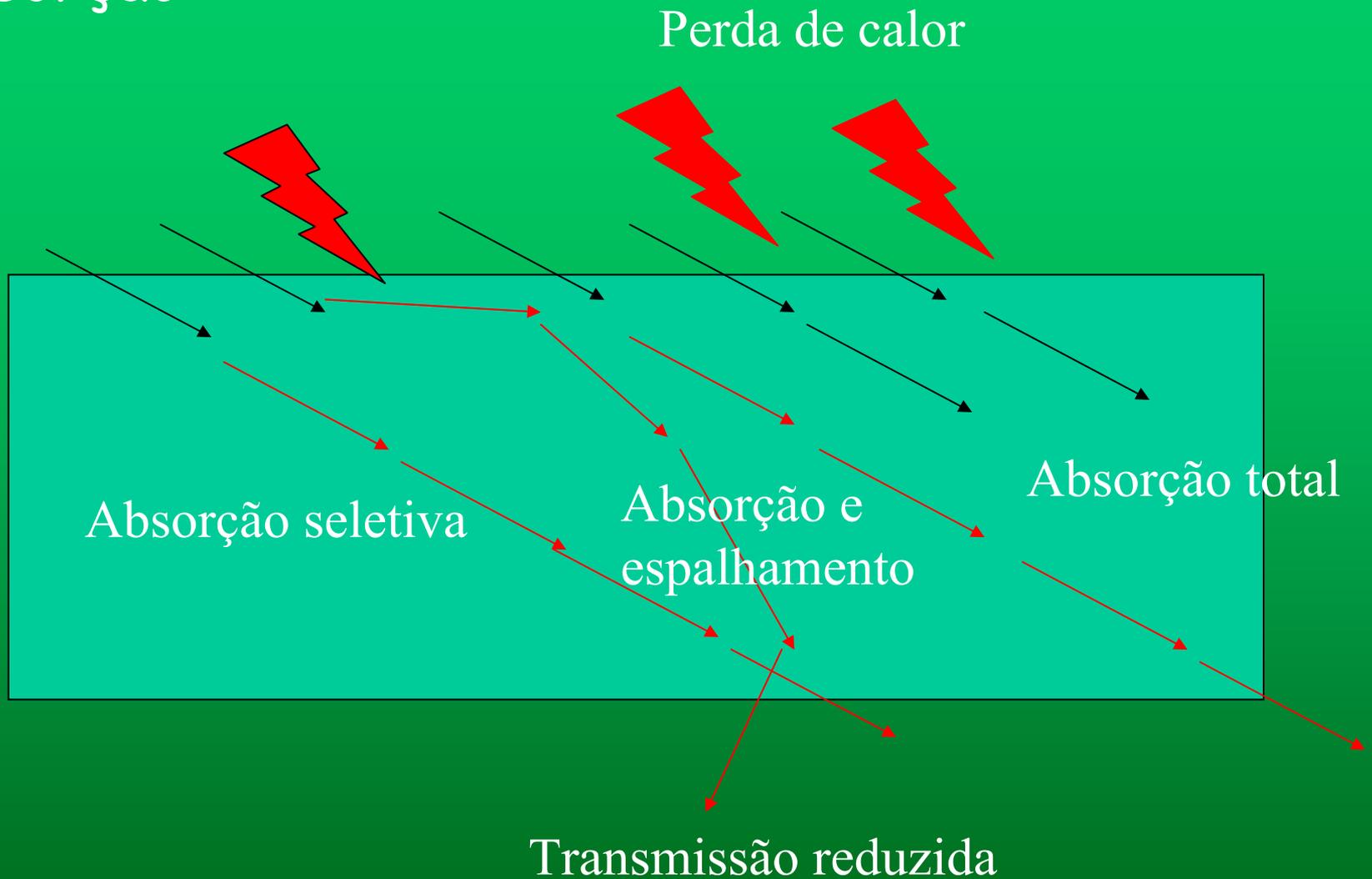
A outra parte pode ser espalhada, refletida ou refratada.

Ocorre alteração o comprimento de onda, portanto, mudança na qualidade da energia



Variação qualitativa da radiação

# Absorção



**Absorção:** vapor de  $H_2O$ ,  $O_3$ ,  $CO_2$ , Metano

**Transmissão** é o processo pelo qual a radiação se propaga através de um meio.

Medida como Transmitância

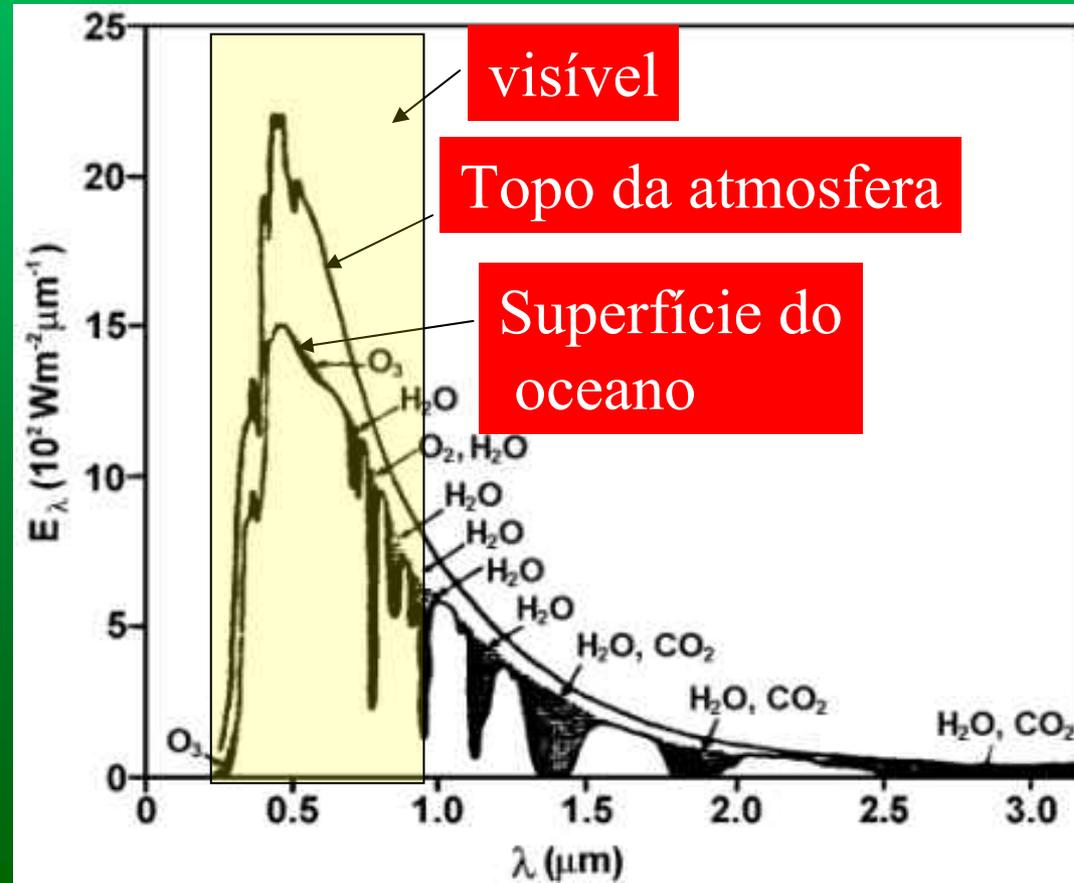
é a razão da radiação transmitida em relação à radiação total incidente.

Radiação transmitida/Radiação Incidente

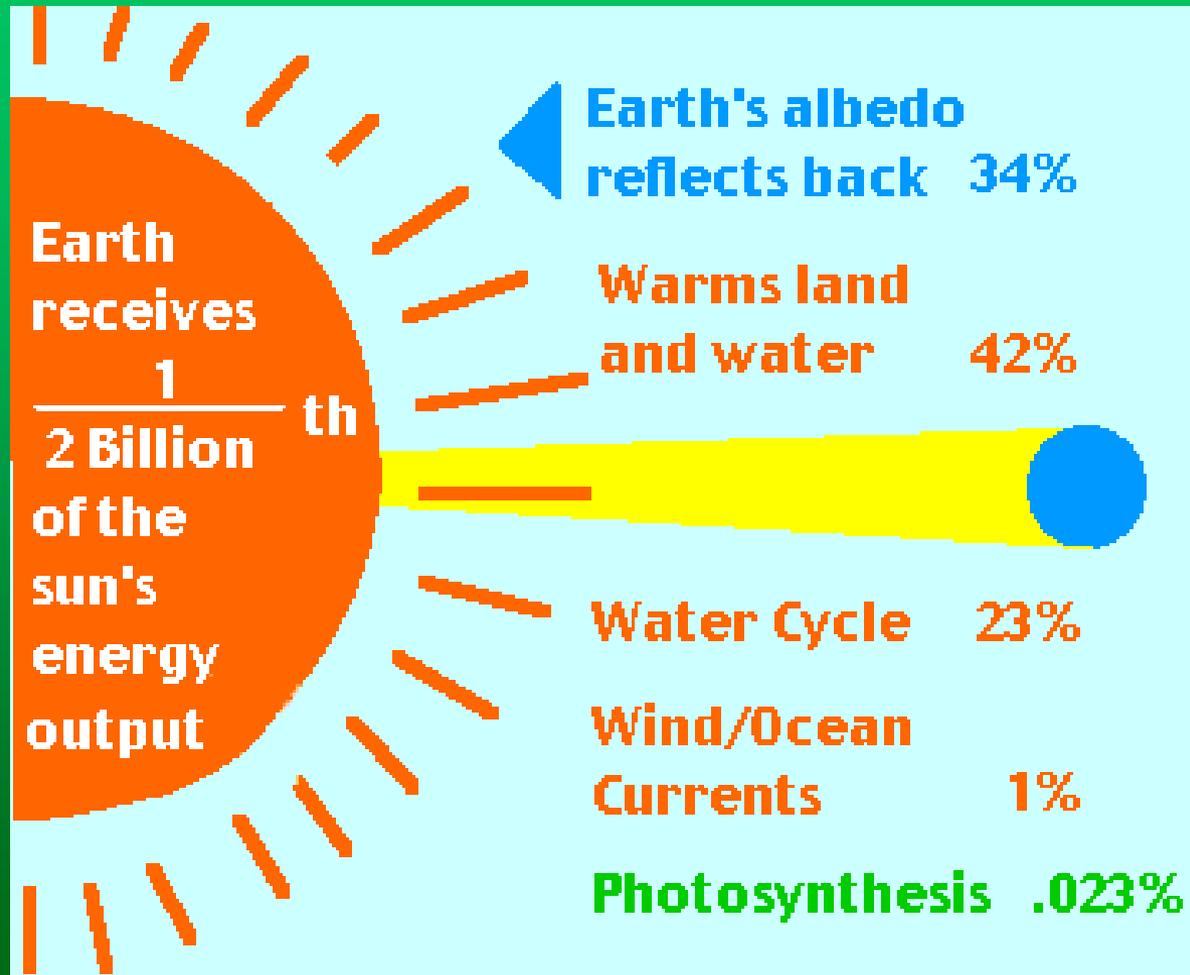
# Que são janelas atmosféricas?

As janelas atmosféricas ocorrem quando partículas e gases não absorvem a radiação. A luz visível é uma das faixas em que este fenômeno geralmente ocorre.

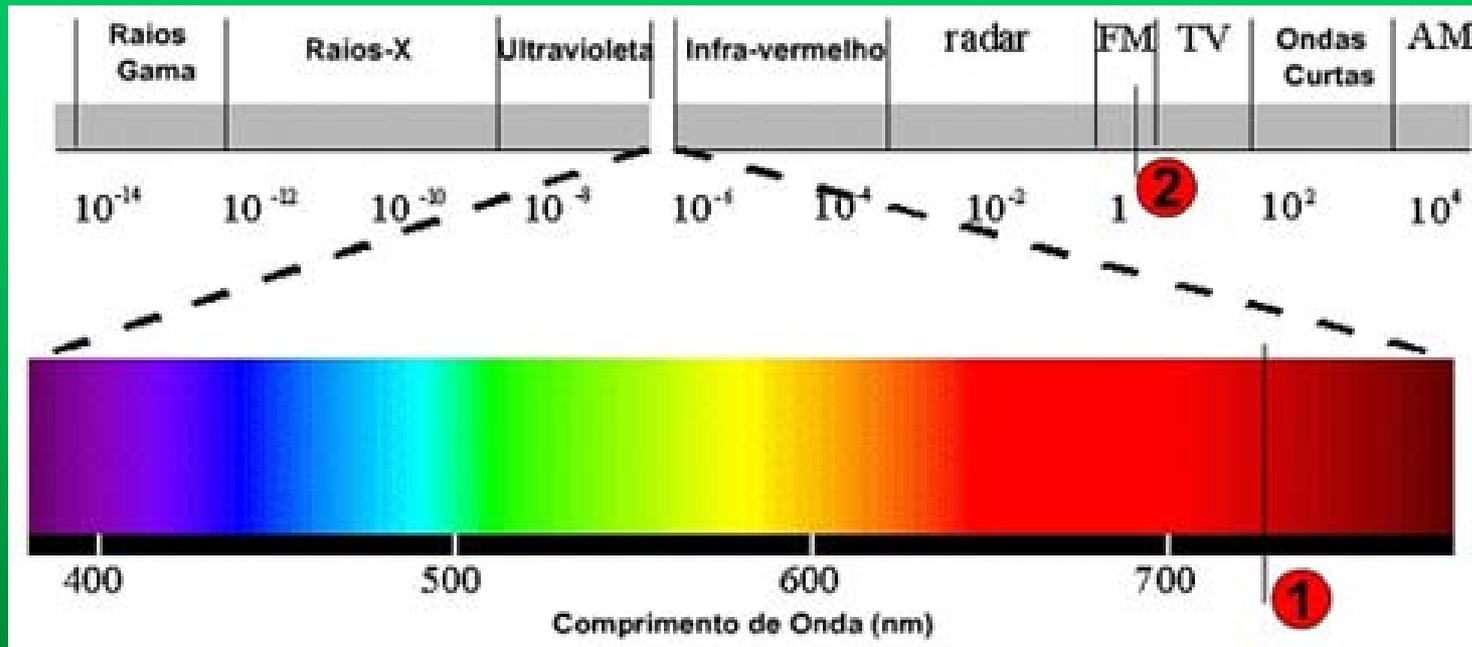
Portanto,  
são regiões de  
Alta  
Transmitância



# Caminho da Luz incidente que atinge a superfície da Terra



Apenas a faixa do visível pode ser utilizada pela fotossíntese (*PAR - Photosynthetic Active Radiation*):



380 - 700 nm: visível

< 380 nm :Ultra-violeta (UV)

➤ 700 nm: infravermelho próximo (IVP)

O visível corresponde a  $\approx 47-51\%$  da radiação total incidente (Vollenweider, 1974).

# Radiação Fotossinteticamente Ativa

- Fotossíntese - confinada à zona eufótica (ou fótica, até 1% da luz incidente).
- PAR - chega a pouco mais de 100 m de profundidade nas águas muito transparentes (e pobres em fitoplâncton). Volume de água insignificante perto do volume total de água no oceano (zona de consumo).

100 m iluminados

Zona disfótica: algumas centenas de m

5000m

escuridão

# Variações da radiação total incidente

Função da:

- latitude
- estação do ano
- hora do dia
- cobertura de nuvens
- composição da atmosfera ( $MS$ ,  $O_3$ , etc).

# Variações da radiação total incidente

- Latitude

Local	Equivalente aprox. Hem. Sul	Latitude	Radiação total anual (kcal/cm <sup>2</sup> )
Miami	São Paulo	25°	156
Washington	Buenos Aires	38°	124
New York	Bahia Blanca	40°	100
Fairbanks	Base Brasileira Penins. Antártica	64°	76
Sptizbergen	Mar de Ross-Antártica	79°	60

Fonte: Kimbal (1935) (mod.).

A 64° N ( Base Bras. Antártica) a radiação é aproximadamente 50% à de 25° N (São Paulo).

# Variações da radiação total incidente

- Estação do Ano

- Variação na elevação solar \*
- Pequena nos trópicos e subtropicais.
- Grande em altas latitudes.

	Miami 25° N ≈ São Paulo	Nova York 40 ° N	Fairbanks 64° N
Março, 22	456	284	221
Junho, 21	514	435	522
Setembro, 20	476	299	120
Dezembro, 20	283	93	4
Solstício (I/V)	55%	21%	0,8 %

Média semanal (cal)

Fonte: Kimbal (1935).

# Variações da radiação total incidente

- Hora do dia:

Varia com a inclinação do sol  
(ex: curva do actinógrafo).

- Cobertura de nuvens

- Condições atmosféricas (poeira em suspensão, vapor de água, etc.)

Pausa!

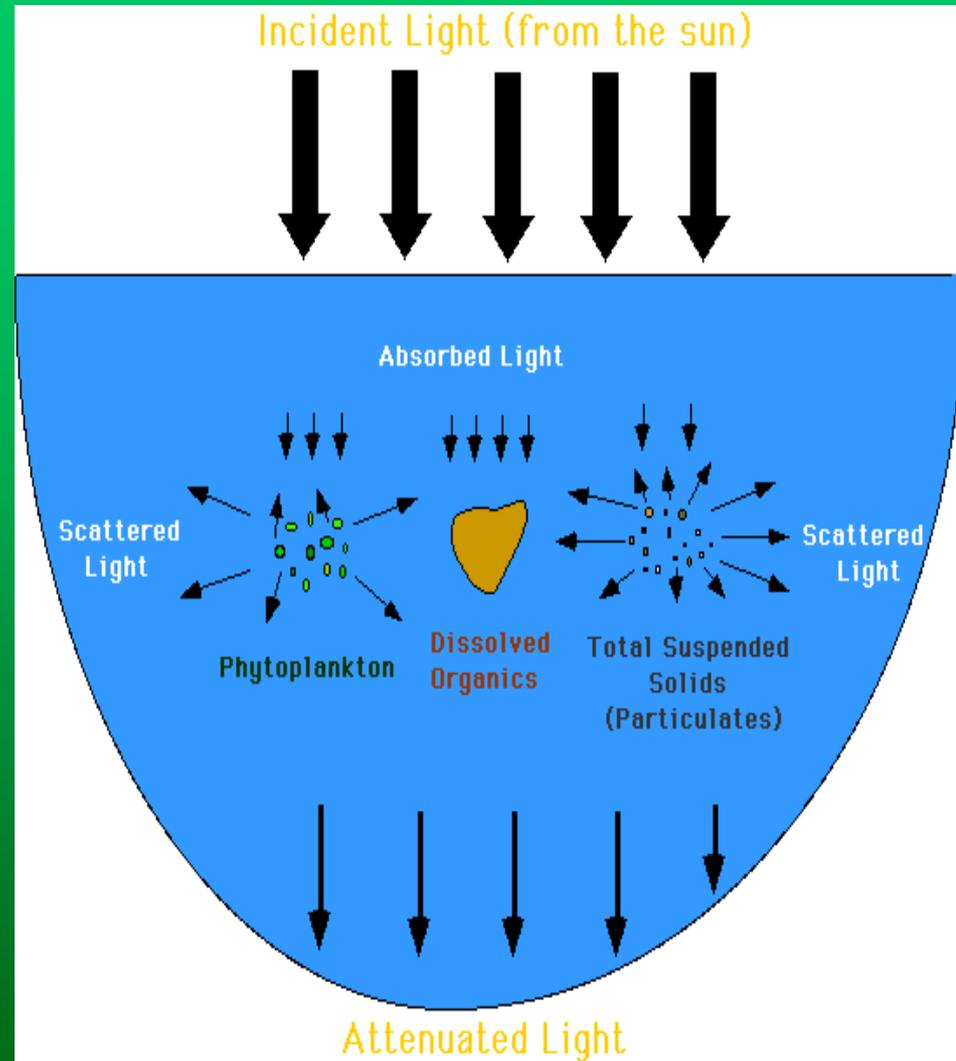
# Radiação subaquática

- Nem toda radiação que atinge a superfície penetra na água: parte é refletida.
- Reflexão é função:
  - da elevação solar (latitude, hora do dia)
  - das condições da superfície (ondas, presença de bolhas)
- Radiação que penetra na água sofre atenuação na coluna de água por dois processos:
  - Absorção
  - Espalhamento

# Radiação subaquática

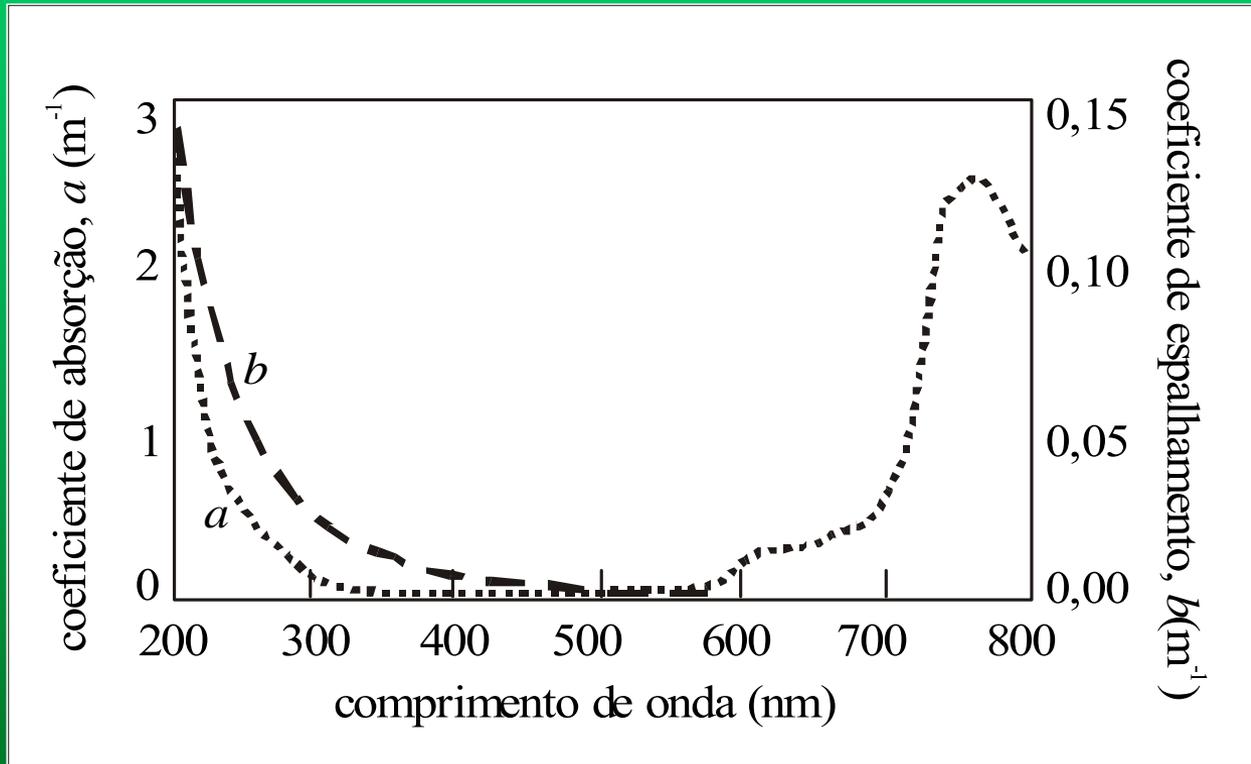
## Atenuação causada:

- pelas moléculas da água,
- pelas substâncias dissolvidas (sais ou substâncias orgânicas - *gelbstoff*)
- pelo material particulado em suspensão (como séston ou fitoplâncton)



# Atenuação por Absorção e Espalhamento

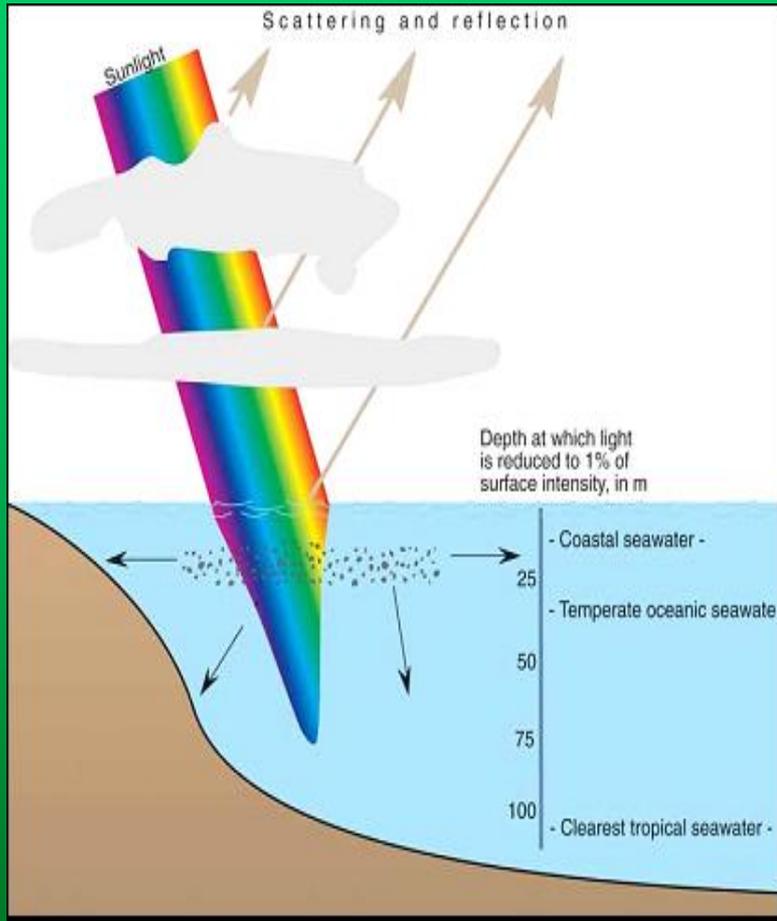
- pelas próprias moléculas da água



Absorção e espalhamento da água pura do mar. Fonte: Mobley, 1994.

- variação: principalmente com a quantidade de partículas em suspensão (séston = plâncton + não vivo)

# Penetração da luz visível na água



O violeta e o vermelho do espectro visível são absorvidos primeiro. O azul e o verde penetram em maiores profundidades.

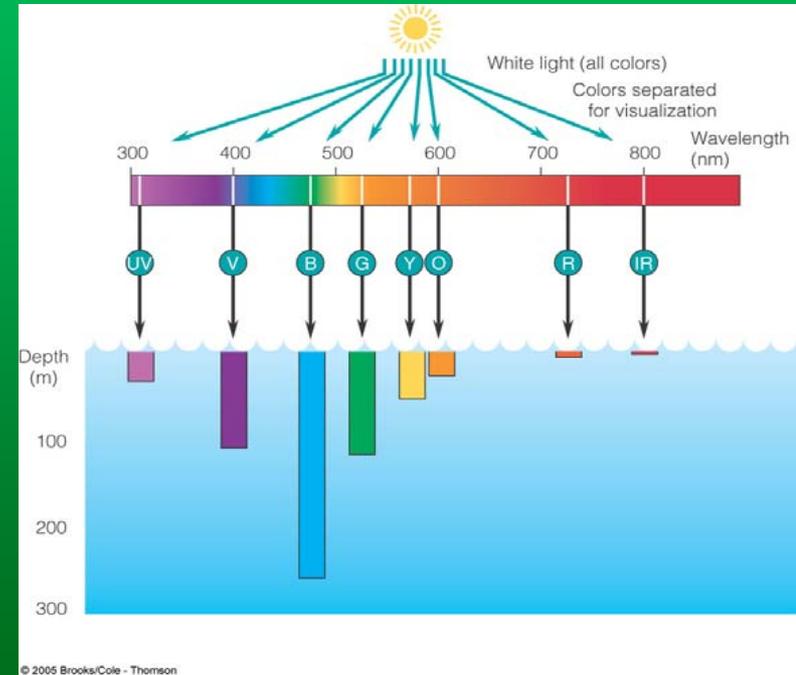
[en.wikipedia.org](https://en.wikipedia.org)

# Radiação sub-aquática

Luz que chega nas diferentes profundidades



"*downward irradiance*"  
(Irradiância descendente)  
( $E_d$ ) → medida mais utilizada em função do tipo de superfície do sensor (geralmente plano), é a fração mais importante para a fotossíntese.



# Coeficiente de Atenuação

Devido à absorção e espalhamento, a radiação é atenuada em seu caminho em direção ao fundo.

Atenuação é função de um coeficiente de extinção  $C$  de forma que:

$$E_z = E_0 * \varepsilon^{-Cz} \quad , \text{onde}$$

$z$  = profundidade em m

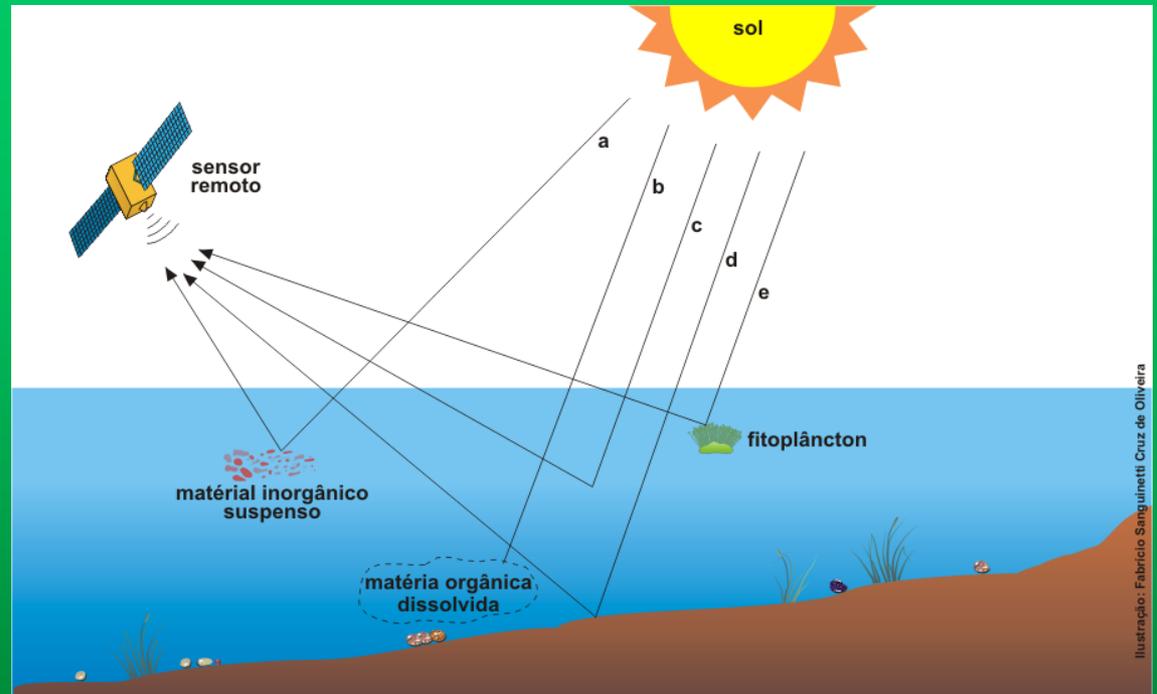
$C$  = coeficiente de extinção

$\varepsilon$  = base do logaritmo neperiano

$E_0$  = irradiância logo abaixo da superfície

$E_z$  = irradiância num plano horizontal na prof.  $Z$

# Variação quantitativa da luz na água



$$C = C_0 + C_s + C_p$$

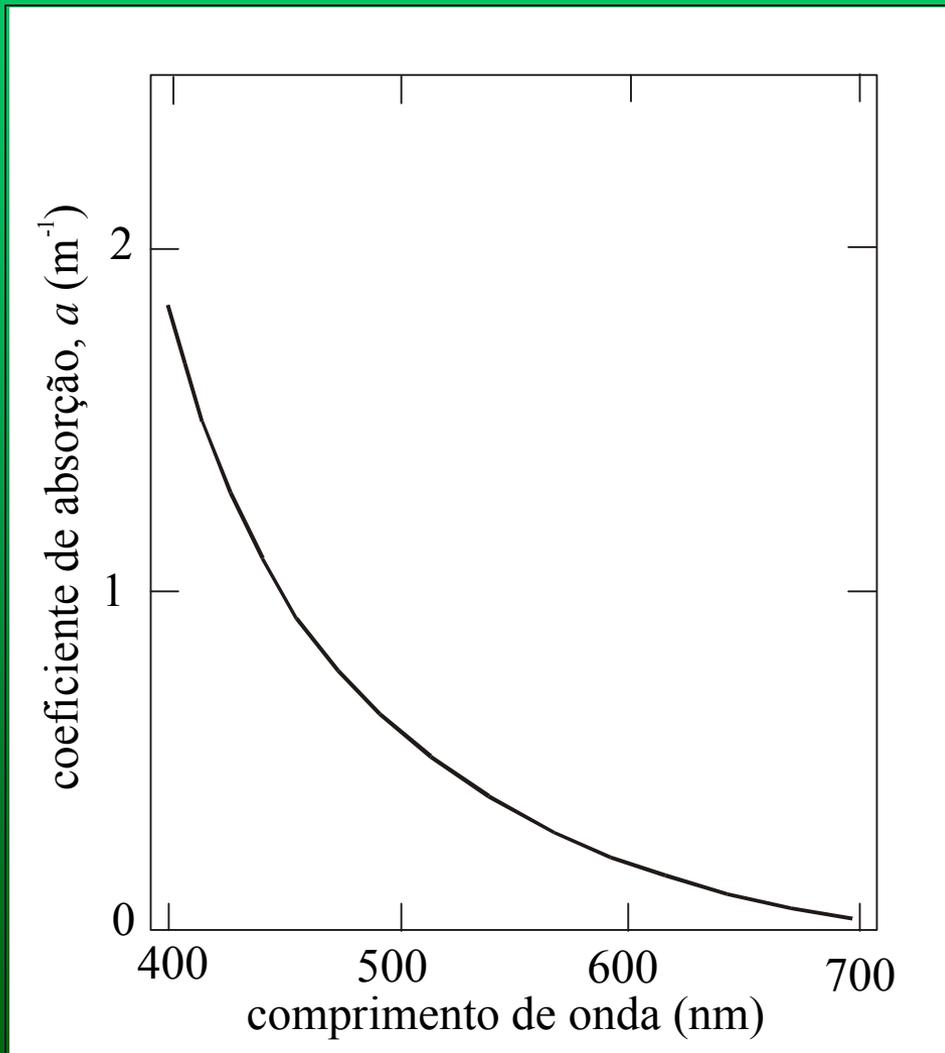
$C$  = Coeficiente de extinção da água do mar

$C_0$  = Coeficiente de extinção da água pura

$C_s$  = Coeficiente de extinção das substâncias em solução

$C_p$  = Coeficiente de extinção do material em suspensão (incluindo plâncton)

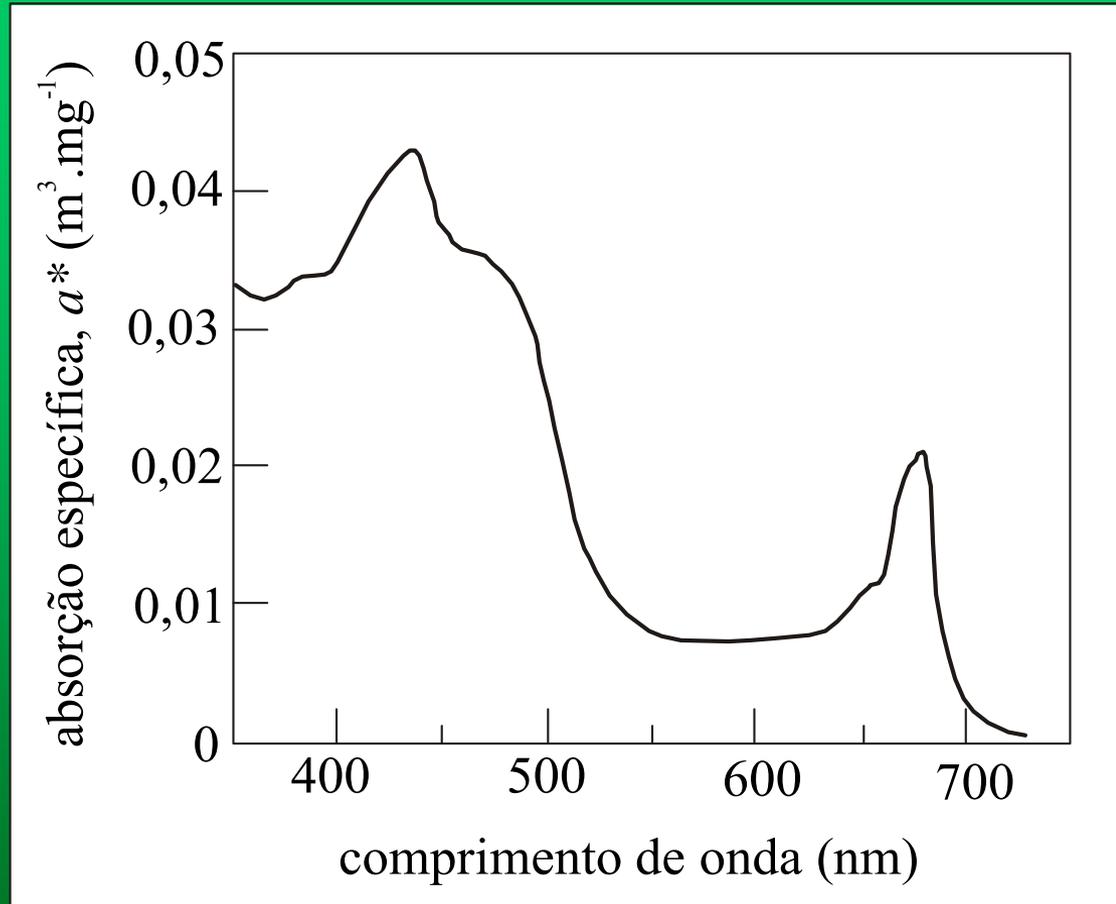
# Variação qualitativa da luz na água



O coeficiente de extinção varia para cada comprimento de onda, em função da quantidade e características do material dissolvido.

Absorção da matéria orgânica dissolvida ( $a$ ,  $m^{-1}$ ).  
Fonte: Robinson, 1985.

# Variação qualitativa da luz na água



Absorção específica ( $a^*$ ) de uma espécie de fitoplâncton.

Fonte: Adaptado de Mobley, 1994.

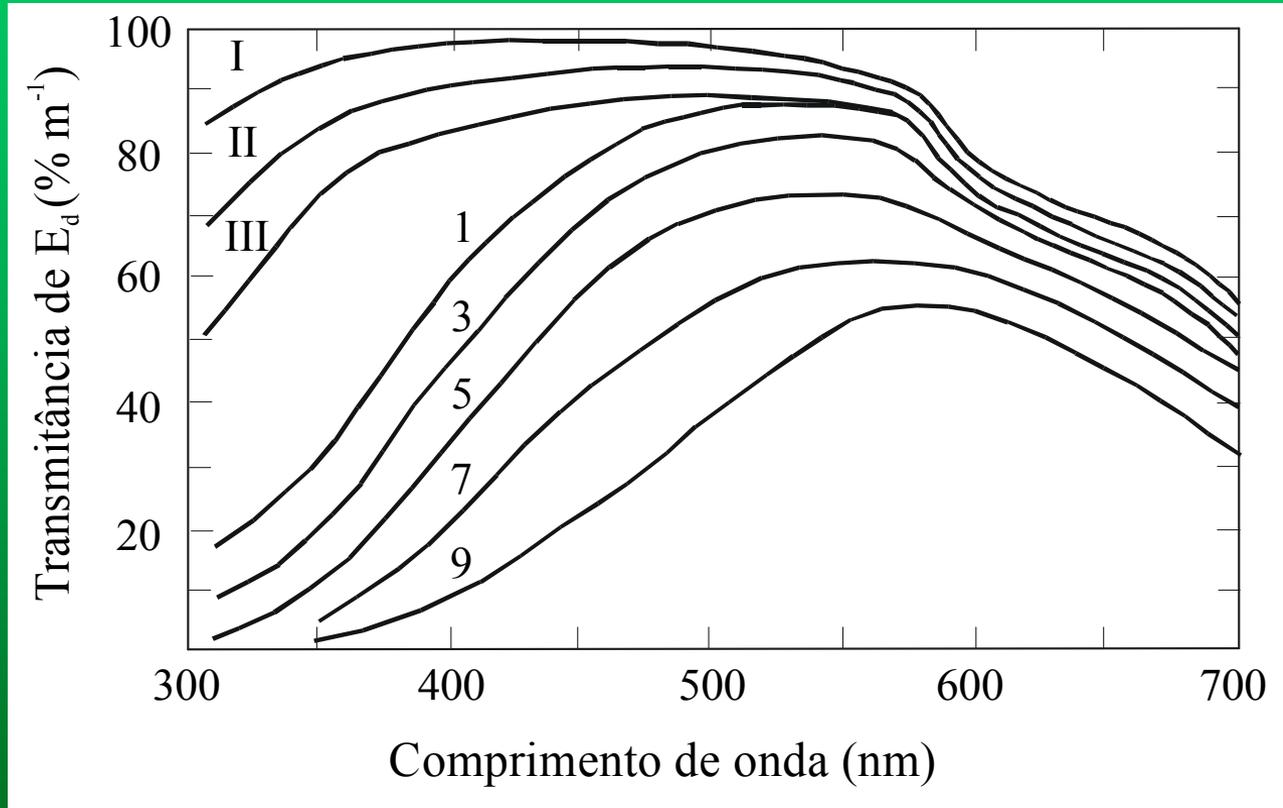
# Qualidade da luz no mar

- A E logo abaixo da película superficial da água é  $\approx$  à do ambiente aéreo.
- Sofre modificações na composição ao longo da zona eufótica.
- Tanto a profundidade como o tipo óptico de água são importantes nestas variações.

Cerca de 50% da energia incidente ( $>750\text{nm}$ ) é convertida em calor em menos de 1 m.

- A 100 m a atenuação seletiva produz um espectro estreito na faixa do verde-azul.

# Tipos ópticos de água de Jerlov (1951)



Fonte: Mobley (1994).

# Qualidade da luz no mar

Água do oceano aberto é  $\approx$  à água pura, portanto, sais exercem pouca influência na qualidade (tipo I a III, Jerlov, 1951) (numeração romana)

Águas costeiras (tipos 1 a 9, ímpares, Jerlov, 1951): luz verde tem a maior transmitância, portanto, fitoplâncton, com pigmentos que absorvem no azul e vermelho (clorofila, carotenóides) não têm muito sucesso no fundo da zona eufótica.

Água tipo 9, luz na faixa do amarelo tem maior penetração.

# Águas Caso 1 e Caso 2

Sistema proposto por Morel e Prieur em 1977 e modificado por Gordon e Morel em 1983→

**Caso 1:** fitoplâncton é o principal responsável pelas variações nas propriedades ópticas da água (oceano aberto).

**Caso 2:** não apenas o fitoplâncton, mas também outras substâncias, como partículas inorgânicas em suspensão e matéria orgânica dissolvida, influenciam as propriedades ópticas da água (regiões costeiras).

# Águas Caso 1 e Caso 2

Importância da classificação -> modelagem e interpretação, que podem ser feitas em função da concentração de clorofila ou das outras substâncias.

Para águas Caso 1, os modelos são mais simples, pois envolvem uma única variável

Para águas Caso 2, devem envolver no mínimo 3 variáveis independentes uma da outra : fitoplâncton, material em suspensão e matéria orgânica dissolvida.

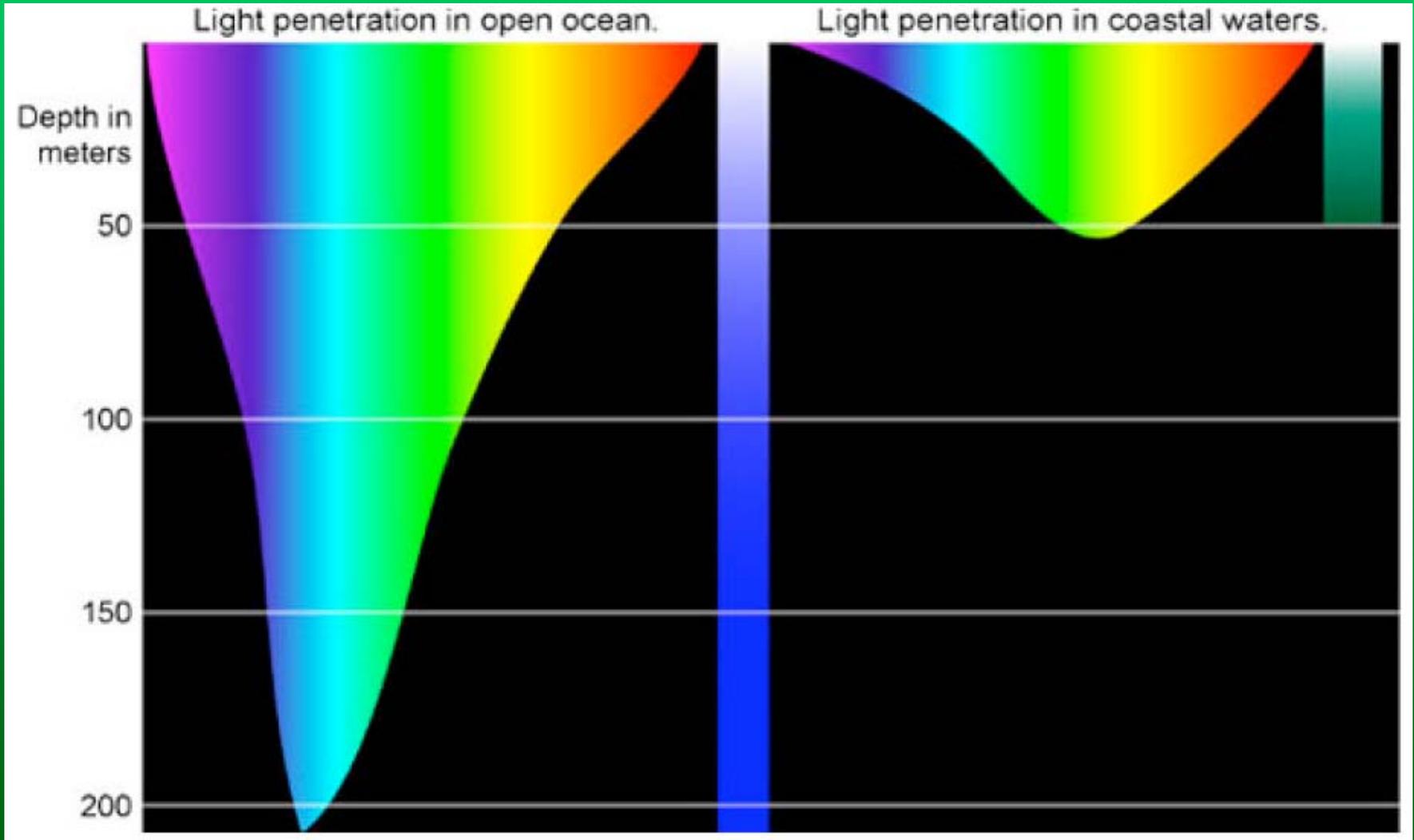
# Águas Caso 1 e Caso 2

- **Regiões costeiras:** *MIS* é muito importante e determina concentração de plâncton (determina a transparência)
- **Regiões oceânicas:** transparência é função da concentração de plâncton, que, por sua vez, é função da concentração de nutrientes.

# Penetração da luz na água

Região oceânica

Região costeira



# Determinação Quantitativa da Luz

Feitas através da Intensidade do fluxo de radiação por área e pelo tempo

- Potência
  - Energia
  - Quanta
- 
- Diferentes unidades, dependendo do uso da medida e instrumento disponível.

# Determinação Quantitativa da Luz

Potência:  $W.m^{-2}$

Ex: Constante solar

## Energia

- Unidades de medida englobam todo o espectro (UV, visível, IR).

Expressa em unidades interconvertíveis:

$$1 \text{ calg} = 4,185 \times 10^7 \text{ erg s} = 4,185 \text{ watt s}$$

$$10^7 \text{ erg s} = 1 \text{ joule}$$

O fluxo de E por unidade de tempo e área também é de interesse para os processos biológicos no mar.

Ex:  $\text{cal g cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$  ou  $\text{cal g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$   
 $1 \text{ cal g m}^{-2} \text{ (sem unidade de tempo)} = 1 \text{ ly}$

**Medida em E** → totalmente dependente da qualidade da luz (i.e. das diferenças espectrais).

# Determinação Quantitativa da Luz

## Quanta

- Mede o número de fótons (ou quanta) de uma dada E para um dado  $\lambda$ :

$$1 \text{ cal.g} = 2.11 \times 10^{15} \text{ \AA} \text{ quanta}$$

$$1 \text{ cal.g} = 3.50 \times 10^{-9} \text{ \AA} \text{ einsteins}$$

Onde  $\text{\AA}$  é o  $\lambda$  em Angstrons

ou

$$1 \text{ einstein} = 6.02 \times 10^{23} \text{ quanta} = 2.86 \times 10^8 \text{ cal.g/\AA}$$

- A E em quanta decresce se o  $\lambda$  aumenta.
- Como o processo fotossintético é quantum dependente (efetuada por fótons)  $\rightarrow$  unidade ideal para a fotossíntese.

# Determinação Quantitativa da Luz

## Níveis de energia da luz visível

$\lambda$ (nm)	Cor	Joules/mol	Kcal/mol	Eletron-volt/mol
700	Vermelho	$17.10 \times 10^4$	40.86	1.77
650	Vermelho -laranja	$18.37 \times 10^4$	43.91	1.91
600	Amarelo	$19.94 \times 10^4$	47.67	2.07
500	Azul	$23.94 \times 10^4$	57.20	2.48
400	violeta	$29.92 \times 10^4$	71.50	3.10

Fótons de luz violeta são mais energéticos que os fótons de luz vermelha.

Para que a fotossíntese ocorra, o pigmento deve absorver a energia de 1 fóton adequado (com  $\lambda$  entre 400 e 700 nm) porque 1  $e^-$  não pode absorver energia de 2 ou mais fótons e vice-versa. Resposta "tudo ou nada".

# Determinação Quantitativa da Luz

## Instrumentação

Dificuldades de medidas de luz:

- condições de tempo (nuvens rápidas)
- condições de mar

Biologista não pode aguardar condições ótimas para realizar experimentos de PP.

# Determinação Quantitativa da Luz

Medidas nas profundidades de incubação

Radiação incidente na superfície

- Instrumentação: importância da calibração dos instrumentos.

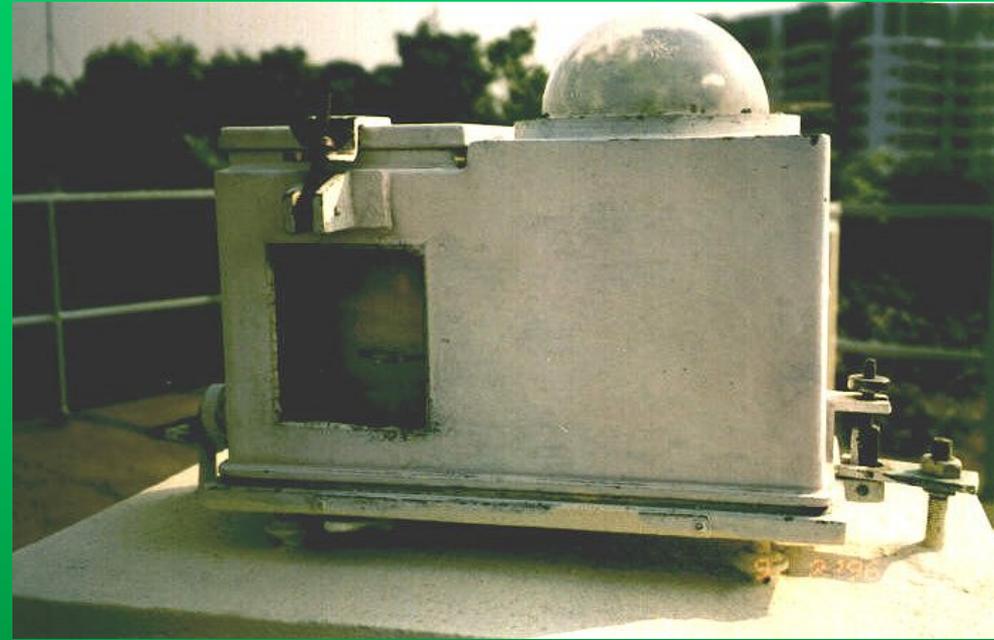
- **Piranômetro:**

Mede a irradiância total (solar mais a do céu) hemisférica recebida por uma superfície plana ( $\text{wm}^{-2}$ ).



## Actinógrafo:

Registra a irradiância total (solar mais a do céu) hemisférica ao longo de um período ( $\text{wm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ).



Registrador  
Campbell-Stokes  
para medir horas de  
brilho solar

# Determinação Quantitativa da Luz

Medidas nas profundidades de incubação  
Radiação incidente na superfície

- **Quantameter:**

Mede a densidade do fluxo de fótons incidente na faixa da PAR (radiação total incidente entre 400 e 700 nm), que atinge uma dada superfície

Unidade de medida:

$\mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$  (microeinstein por m<sup>2</sup> por s)

=  $6,02 \cdot 10^{17}$  quanta (ou fótons) m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>.

1 E =  $6.023 \times 10^{23}$  fótons



# Determinação Quantitativa da Luz

## Radiação emitida pelo corpo d' água

- **Espectroradiômetro:**  
Radiância em intervalos de comprimento de onda. ( $\text{w/m}^2.\text{sr}$ ).
- pode ser aéreo ou sub-aquático



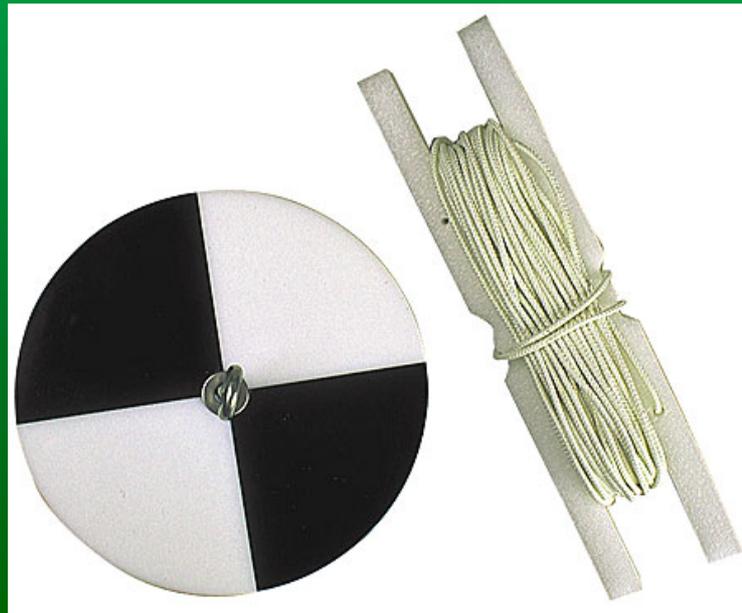
Uso para calibração de imagens de cor da água obtidas por sensoriamento remoto

# Determinação Quantitativa da Luz

Radiação incidente subaquática

- Disco de Secchi:

Instrumento mais simples para caracterizar a transparência da água, desenvolvida pelo cientista italiano Angelo Secchi. Permite estimar a profundidade da zona eufótica.



A magnitude da intensidade da luz no limite da visibilidade do disco é de cerca de 15% da intensidade da subsuperfície. (tabela de Secchi).

Pode variar com condições locais e do observador. Para determinar a profundidade da zona eufótica (estabelecida como  $\approx 1\%$  de luz-limite funcional), multiplica-se a leitura do disco por 2,7.



# Determinação Quantitativa da Luz

## Radiação incidente subaquática

- Quantameter subaquático:



Aparelhos apresentam um valor de calibração para leitura aérea e outro para leitura subaquática.

Permite medir *irradiância descendente*, *irradiância ascendente*, ou *irradiância total*, com esfera integradora.

# Definições

**Comprimento de onda:** distância entre 2 pontos sucessivos numa onda periódica na direção da propagação. Símbolo:  $\lambda$ . Unidade: nm =  $10^{-9}$ .

**Quantidade de energia radiante:** quantidade de energia transferida por radiação. Símbolo: Q. Unidade: J, erg.  
1 erg =  $10^{-7}$ J.

**Fluxo radiante:** Taxa de fluxo de energia radiante por unidade de tempo. Símbolo: F ou  $\Phi$ . Unidade: W ou J.s<sup>-1</sup>.  
Relação:  $q/t$ .

# Definições

**Irradiância:** fluxo radiante incidente sobre um elemento infinitesimal da superfície contendo o ponto em consideração, dividido pela área daquele elemento. Símbolo:  $E$ . Unidade:  $w/m^2$

# Referências

Kirk, J.T.O. 1994. *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems*. Cambridge Univ. Press, New York, 509p.