

Oceanografia por Satélites

Introdução ao uso de Satélites Oceanográficos

Paulo S. Polito, Ph.D.

polito@usp.br

Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo
<http://los.io.usp.br>
Laboratório de Oceanografia por Satélites

1 Motivação

- Transporte e Armazenamento de Calor

2 Transporte de Calor - Dados de Satélites

- Introdução
- Radiação de Ondas Longas e Ondas Curtas
- Calor Latente e Sensível
- Fluxo pela Superfície

3 Calor Armazenado - Dados de Satélites

- Armazenamento de Calor
- Aquecimento Global?
- Métodos: *In-Situ* e Satélites
- Análises

Roteiro

1 Motivação

- Transporte e Armazenamento de Calor

2 Transporte de Calor - Dados de Satélites

- Introdução
- Radiação de Ondas Longas e Ondas Curtas
- Calor Latente e Sensível
- Fluxo pela Superfície

3 Calor Armazenado - Dados de Satélites

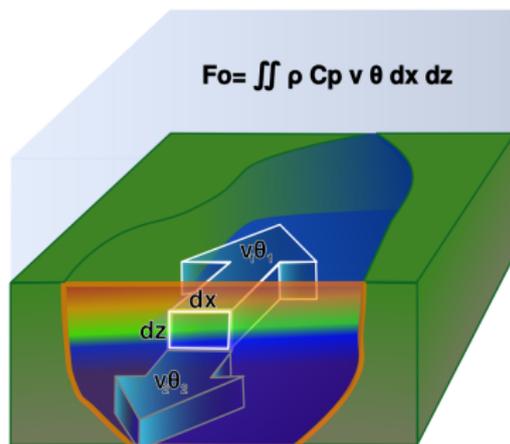
- Armazenamento de Calor
- Aquecimento Global?
- Métodos: *In-Situ* e Satélites
- Análises

Cálculo do Transporte de Calor nos Oceanos

Pode ser efetuado por vários métodos:

- 1 Método Residual, baseado em medidas **meteorológicas** na atmosfera. O fluxo oceânico é a diferença entre o que se mede no topo e no interior da atmosfera.
- 2 Método Direto, baseado em medidas *in-situ* de temperatura e velocidade das correntes no oceano. Embora seja o mais preciso, padece da falta de dados.
- 3 Método Tradicional, baseado no balanço de calor pela superfície. Utiliza medidas obtidas majoritariamente por satélites e portanto será explorado neste curso.

Método Direto



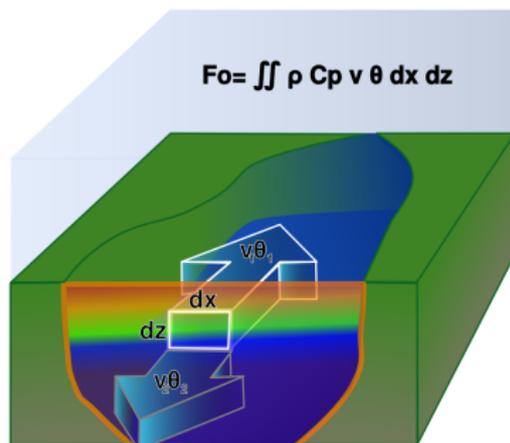
Idealmente...

- Perfis de temperatura são coletados da superfície até o fundo cruzando a bacia de costa a costa.
- A velocidade geostrófica absoluta é medida calculada no perfil todo.
- O vento na superfície permite o cálculo do transporte de Ekman junto à superfície.

Porém...

- Perfis raramente vão até o fundo; a velocidade obtida não é absoluta; seções cruzando a bacia toda são raras; dados não sinópticos.

Método Direto



Idealmente...

- Perfis de temperatura são coletados da superfície até o fundo cruzando a bacia de costa a costa.
- A velocidade geostrófica absoluta é medida calculada no perfil todo.
- O vento na superfície permite o cálculo do transporte de Ekman junto à superfície.

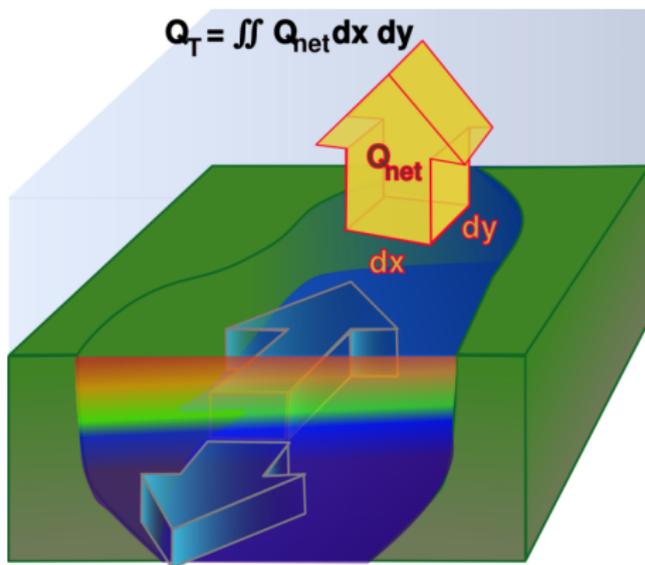
Porém...

- Perfis raramente vão até o fundo; a velocidade obtida não é absoluta; seções cruzando a bacia toda são raras; dados não sinópticos.

Roteiro

- 1 Motivação
 - Transporte e Armazenamento de Calor
- 2 Transporte de Calor - Dados de Satélites
 - Introdução
 - Radiação de Ondas Longas e Ondas Curtas
 - Calor Latente e Sensível
 - Fluxo pela Superfície
- 3 Calor Armazenado - Dados de Satélites
 - Armazenamento de Calor
 - Aquecimento Global?
 - Métodos: *In-Situ* e Satélites
 - Análises

Método Tradicional



- O que entra ou sai pela seção x-z deve ser balanceado pelo fluxo de calor pela superfície x-y mais o que fica retido.
- As componentes de Q_{net} vem de dados de vários satélites.
- Os satélites não medem todas as variáveis, há muitas parametrizações; resultados finais sensíveis aos erros nas componentes.
- A idéia é calcular valores médios do transporte meridional de calor na bacia e/ou globais.

Balço de Calor pela Superfície

$$Q_{net} = Q_i + Q_b + Q_l + Q_s = \nabla_H F_o + \frac{\partial HS}{\partial t}$$

Q_{net} : fluxo de calor através da interface;

Q_i : fluxo de radiação solar de ondas curtas;

Q_b : fluxo de radiação de ondas longas;

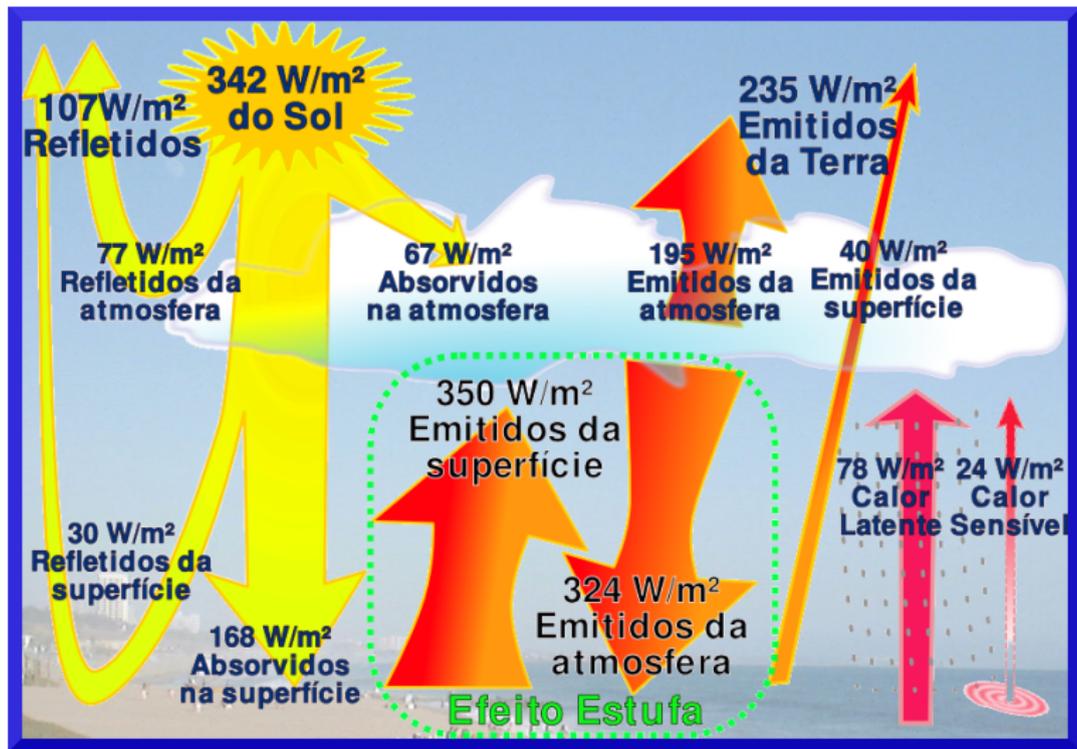
Q_l : fluxo de calor latente;

Q_s : fluxo de calor sensível.

$\nabla_H F_o$: divergente horizontal do fluxo de calor;

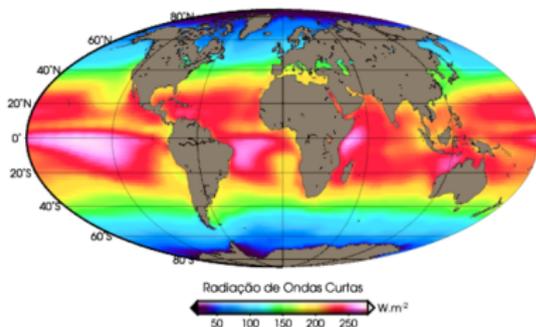
$\partial HS / \partial t$: derivada temporal do calor armazenado;

Balço de Calor no Sistema Oceano-Atmosfera



Fluxo de Radiação de Ondas Curtas (Q_i)

Média anual (SRB)



Fórmula tradicional baseada na cobertura de nuvens, variáveis medidas pelos satélites:

$$Q_i = (1 - \alpha) Q_C (1 - 0.62C + 0.0019\theta_N)$$

Como medir:

- 1 Pirômetros: precisos, mas impraticável para grandes áreas;
 - 2 Satélites: Cobertura global, resolução espacial etc.
- Q_C : radiação solar incidente para céu limpo.
 - C : média mensal fracional da cobertura de nuvens.
 - α : albedo.
 - θ_N : elevação do Sol ao meio dia.

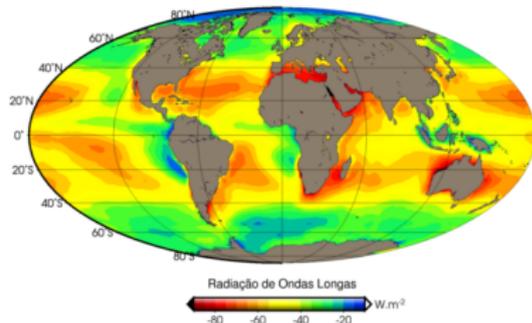
Fluxo de Radiação de Ondas Curtas (Q_i)

O que afeta a radiação que chega na superfície do mar?

- Q_c : taxa de energia do sol que chega acima da atmosfera: “constante” solar (1365 a 1372 W.m^{-2}).
- Radiação espalhada ou absorvida e re-irradiada pela atmosfera, nuvens, etc. Esta contribuição se torna mais importante em altas latitudes;
- Albedo ou reflectância: característica da superfície. Razão entre a radiação refletida e a incidente (%). Depende da elevação do sol e do estado do mar;
- Nuvens: espalham, refletem e absorvem a radiação;
- Absorção na atmosfera (sem nuvens): depende da elevação do sol e da composição da atmosfera (moléculas de gás, poeira, vapor d'água, etc).

Fluxo de Radiação de Ondas Longas (Q_b)

Média mensal (SRB)



Irradiada pela superfície do mar **menos** recebida pela atmosfera



$$Q_b = \epsilon \sigma T_w^4 (0.39 - 0.05e^{\frac{1}{2}}) (1 - kc^2) + \dots$$

$$\dots + 4\epsilon \sigma T_w^3 (T_w - T_a)$$

- ϵ : emitância do mar: 0.98.
- σ : const. Stefan-Boltzmann: $5.67 \times 10^{-8} W.m^{-2}K^{-4}$;
- T_w e T_a : temp. da água e do ar;
- e : pressão de vapor;
- k : coeficiente de cobertura de nuvens;
- c : fração de cobertura de nuvens.

Fluxo de Radiação de Ondas Longas (Q_b)

O que afeta esta componente da radiação?

- ϵ : emitância da sup. do mar: 0.98.
- e : pressão de vapor. Reduz a perda de Q_b pois o vapor d'água irradia radiação de ondas longas de volta para o mar;
- Nuvens: reduzem Q_b ;
- Diferença de temperaturas: resposta da atmosfera à radiação do mar devido à umidade. Importante em regiões de correntes de borda oeste;

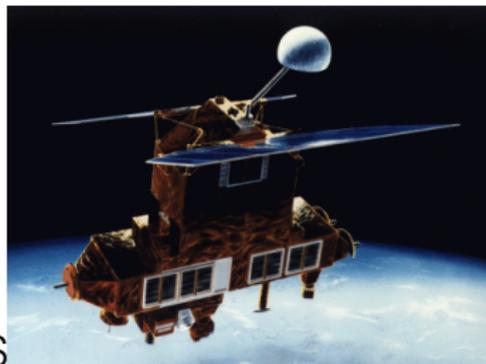
Como Q_i e Q_b são Obtidos por Satélites?

A estimativa de Q_i e Q_b é feita pela medição do global do albedo, fluxos e energia incidente do Sol através dos satélites:

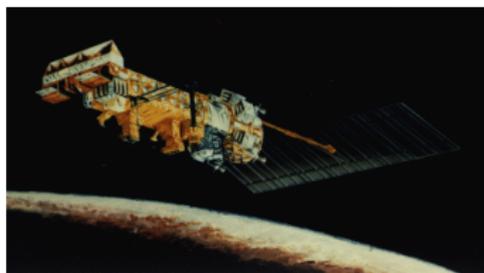
- Earth Radiation Budget Satellite (ERBS);
- NOAA-9 e NOAA-10.

Medidas de radiância e nuvens por satélites meteorológicos de vários países e processados pelo:

- International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP).



ERBS

NOAA
LOS
Laboratório de Oceanografia por Satélites

Importância do Calor Latente

- Calor trocado durante a mudança de estado.
- A atmosfera recebe $\sim 3/4$ de sua energia através do calor latente liberado pela precipitação.
- Aproximadamente $\sim 2/3$ da precipitação se dá nos trópicos.



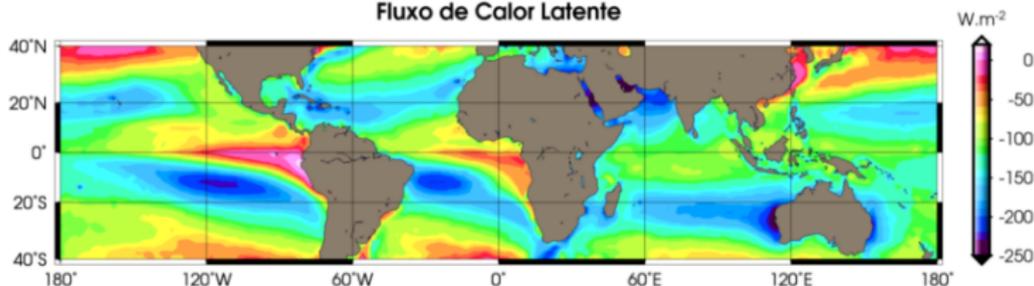
O fluxo de calor latente representa a maior fonte de perda de energia pelos oceanos devido à evaporação, principalmente em:

- Correntes quentes de contorno oeste onde há fortes ventos alísios carregando ar seco continental: Corrente do Golfo e Kuroshio;
- Regiões Polares: regiões sem cobertura de gelo, devido ao vento forte e ao ar polar extremamente seco.

Fluxo de Calor Latente

Média mensal (TRMM)

Fluxo de Calor Latente



$$Q_l = \rho C_e L u (q_s - q_a)$$

- ρ : densidade do ar;
- u : vento em m.s^{-1} ;
- L : calor latente;

- C_e : coeficiente de transferência de calor latente (LKB);
- q_s : 98% da umidade específica de saturação (via vapor integrado);
- q_a : umidade específica (via vapor integrado).

Importância do Calor Sensível

- Transferência de calor por contato mecânico entre dois meios a temperaturas diferentes.
- O processo de transferência de calor sensível entre o oceano e atmosfera ocorre em duas etapas:
 - 1 O calor da água é inicialmente transferido para o ar por **condução** quando moléculas de água colidem com as do ar na superfície.
 - 2 O ar esquenta e circula para cima devido a **convecção**.
- Como o ar é um mau condutor de calor, a **convecção** é a forma mais eficiente de transferência de calor sensível do mar para o ar.

Fluxo de Calor Sensível

$$Q_s = \rho C_p C_h U (T_w - (T_a + \gamma z))$$

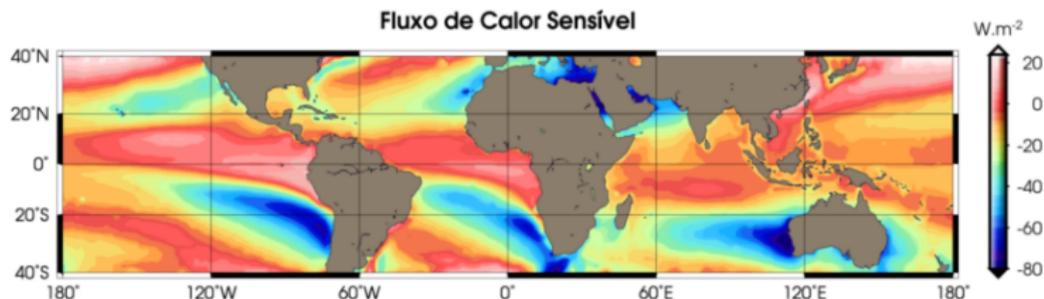
- γ : *adiabatic lapse rate* ou gradiente térmico adiabático.

- C_h : coeficiente de transferência de calor sensível (LKB);
- C_p : calor específico à pressão constante;
- T_w : temperatura da superfície do mar;
- T_a : temperatura do ar (parametrizada);

Utiliza-se **bulk fórmulas** para estimar o fluxo de calor sensível com dados de vento e temperatura da superfície do mar.

Mapas de Calor Sensível

Média mensal (TRMM)



Fluxo negativo: do oceano para a atmosfera, $T_w > T_a$

- Região das correntes de borda oeste dos oceanos por serem correntes quentes sob ar frio;
- Médias latitudes: devido à ação de fortes ventos combinados à diferença de temperaturas na interface;

Fluxo positivo: da atmosfera para o oceano, $T_w < T_a$

- Regiões equatoriais porque em média a temperatura do ar é superior ao do oceano.

Como Q_l e Q_s são Obtidos por Satélites?

- Umidade: parametrizada através do vapor integrado na coluna d'água medido por radiômetros de micro-ondas, SSM/I, TRMM.
- Vento: medido por escaterômetros ou radiômetros de micro-ondas, QuikSCAT, ERS, SSM/I, TRMM;
- TSM: medida por radiômetros de micro-ondas ou infravermelho, SSM/I, TRMM, AVHRR;

Algoritmos empíricos (LKB) são utilizados para estimar fluxos de calor, massa e momentum na superfície do mar.

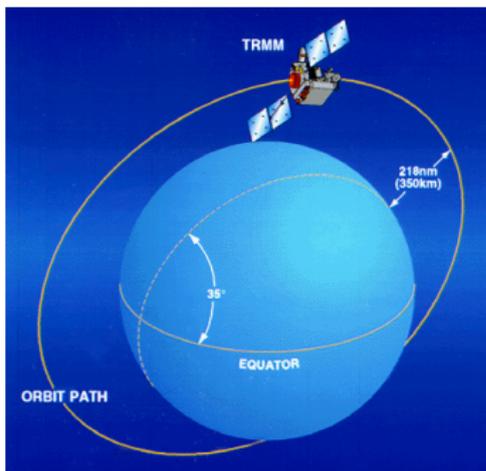


TRMM



QuikSCAT

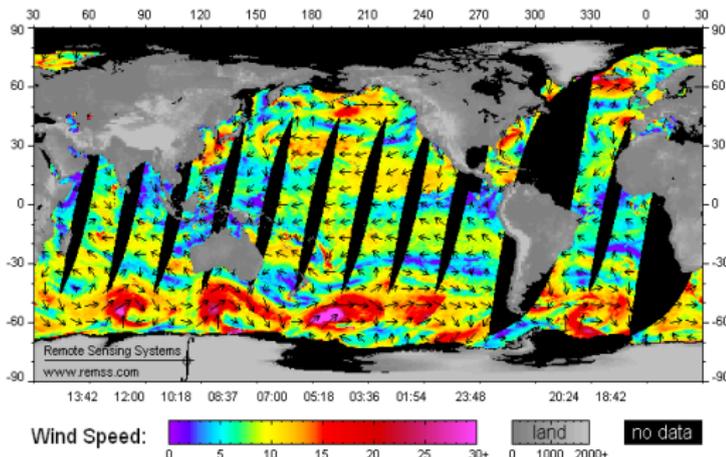
Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)



- Primeiro radiômetro de microondas desenhado especificamente para medir chuva a bordo de um satélite.
- Fornece, na faixa de $\pm 40^\circ$ de latitude, dados de:
 - precipitação,
 - conteúdo líquido nas nuvens,
 - vapor integrado,
 - TSM e
 - vento.
- A resolução do pixel é de 25 km, resolução de 12 horas.
- Os dados são disponíveis desde Dezembro de 1997.
- Particularmente interessante para os países tropicais.

QuikSCAT (Quick Scatterometer)

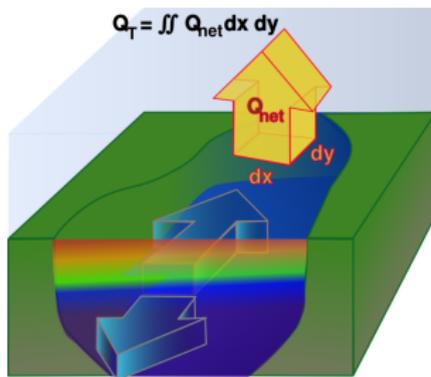
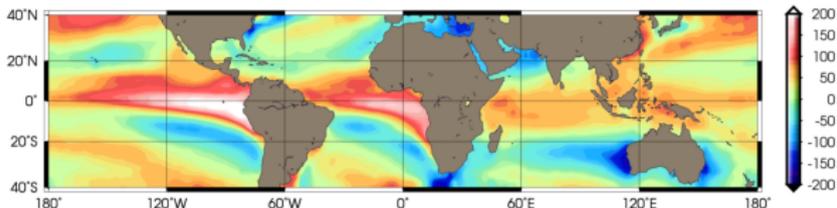
- Escaterômetro de micro-ondas Seawinds lançado a bordo do satélite QuikBird em 1999.
 - Órbita sincronizada com o Sol, período: 101 min, altitude: 800 km;
 - Fornece medidas da magnitude e direção do vento na superfície do mar desde 1999 até o presente numa resolução de 12.5 km.
-
- Precisão: 1 m/s, 20°
 - Usabilidade: 3 m/s a 20 m/s.
 - Cobertura: 100% da Terra em 2 dias.
 - U_{10} do dia 19/03/2008



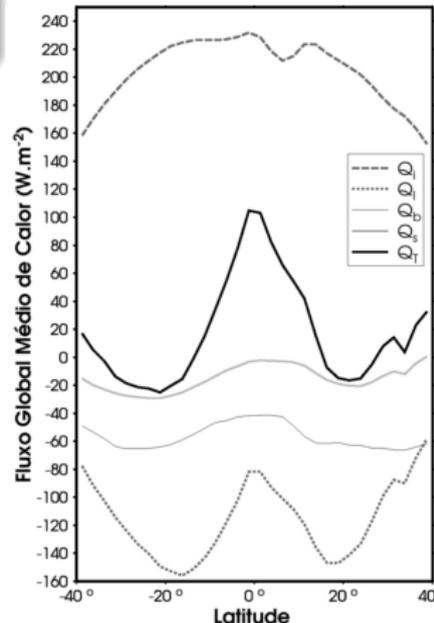
Somando as Componentes...

$$Q_{net} = Q_i + Q_b + Q_l + Q_s = \nabla_H F_o + \frac{\partial HS}{\partial t}$$

Balço de Calor na Superfície



$$Q_T = \iint Q_{net} dx dy$$



Roteiro

- 1 **Motivação**
 - Transporte e Armazenamento de Calor
- 2 **Transporte de Calor - Dados de Satélites**
 - Introdução
 - Radiação de Ondas Longas e Ondas Curtas
 - Calor Latente e Sensível
 - Fluxo pela Superfície
- 3 **Calor Armazenado - Dados de Satélites**
 - Armazenamento de Calor
 - Aquecimento Global?
 - Métodos: *In-Situ* e Satélites
 - Análises

Calor Armazenado Pelos Oceanos

- É a quantidade de energia que eleva a temperatura da coluna d'água de 0K até a temperatura desejada.
-
- Fato interessante: 2,5 m de oceano tem a mesma capacidade calorífica que toda a atmosfera.
 - Portanto pequenas alterações térmicas nos oceanos podem ter consequências climáticas significativas.
 - A estimativa precisa do **calor armazenado oceânico (HS)** é importante para se determinar o **fluxo de calor global**.
 - O uso de satélites altimétricos proporcionou uma oportunidade sem precedentes para se monitorar HS continuamente e em **escala global**.

Porque Analisar HS no Oceano

$$Q_{net} = \nabla_H F_o + \frac{\partial HS}{\partial t} = Q_i + Q_b + Q_l + Q_s$$

- Assumíamos implicitamente que $\frac{\partial HS}{\partial t}$ era zero, ou seja, $HS' = HS - \overline{HS} = 0$.
 - Mas e se HS' estiver variando numa escala de décadas ou séculos, podemos monitorar o processo?
-
- A transferência vertical de calor é dificultada pela estratificação e pela escala de tempo da circulação oceânica.
 - Porém, a capacidade térmica de 1 m^3 água é 4000 vezes maior que a de 1 m^3 de ar \Rightarrow aumento mesurável do calor armazenado na camada superior apesar da mudança de TSM ser pequena.

Duas Estimativas de Calor Armazenado

HS' através de dados *in situ*:

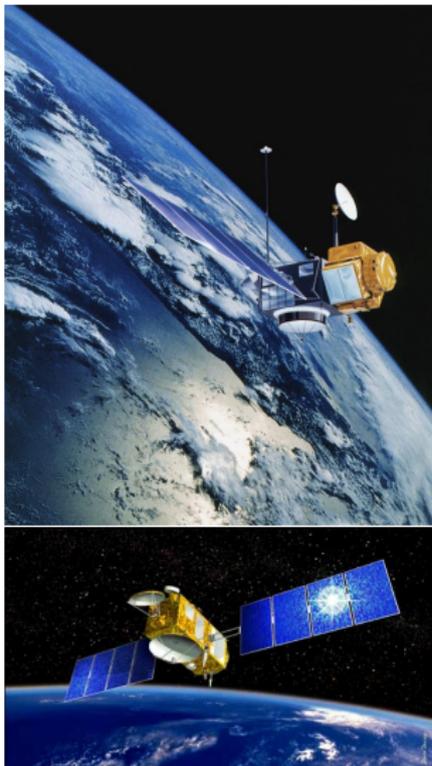
$$HS' = \rho c_p H \Delta T$$

HS' através de satélites:

$$HS' = \frac{\rho c_p}{\alpha} \eta$$

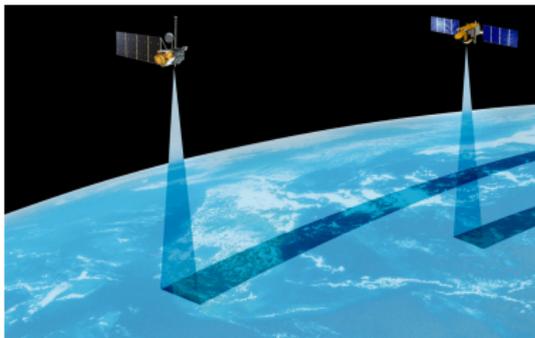
- ρ : densidade da água;
- c_p : calor específico à pressão constante;
- H : profundidade de integração;
- $\Delta T = (T - \bar{T})$: anomalia da temperatura (termistor);
- α : Coeficiente de expansão térmica;
- η : anomalia da altura da superfície (altímetro);

Medidas de Altura da Superfície Através de Altimetros



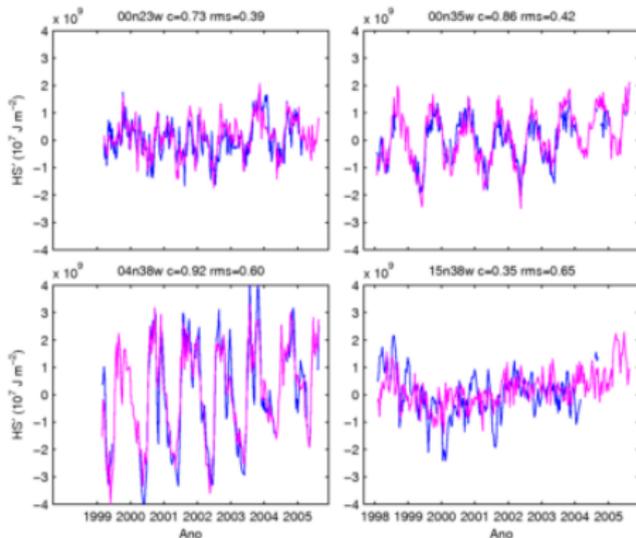
Paulo S. Polito (IOUSP)

- TOPEX/Poseidon e Jason 1.
- 15 anos de dados (1992 a 2008).
- Resolução temporal de ≈ 10 dias.
- Resolução espacial de 7 km ao longo da passagem e de até 315 km entre passagens vizinhas ($1^\circ \times 1^\circ$ em nível 3).
- Precisão de $\eta \leq 2$ cm.

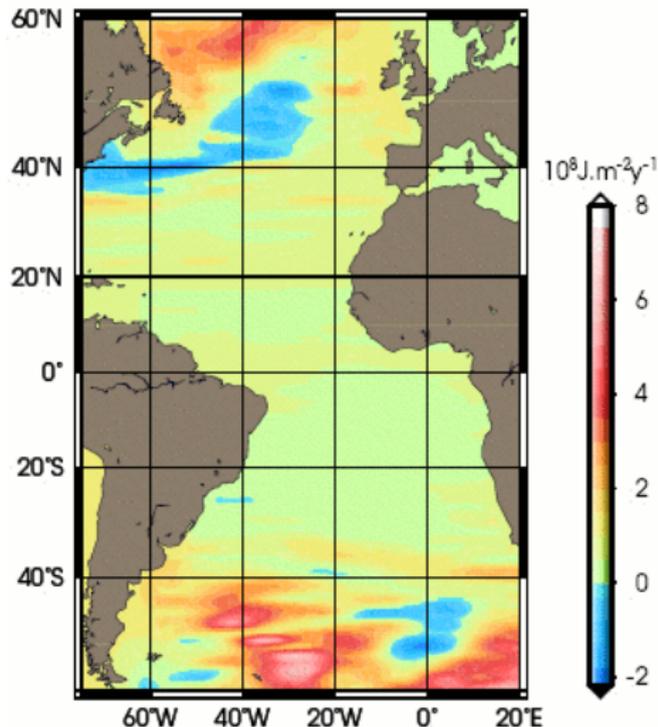


Oceanografia por Satélites

Validação e Tendências



- Correlação entre HS' *in-situ* e de satélites chega a 95%.
- Tendências interanuais significativas são observadas.



Oceanografia por Satélites