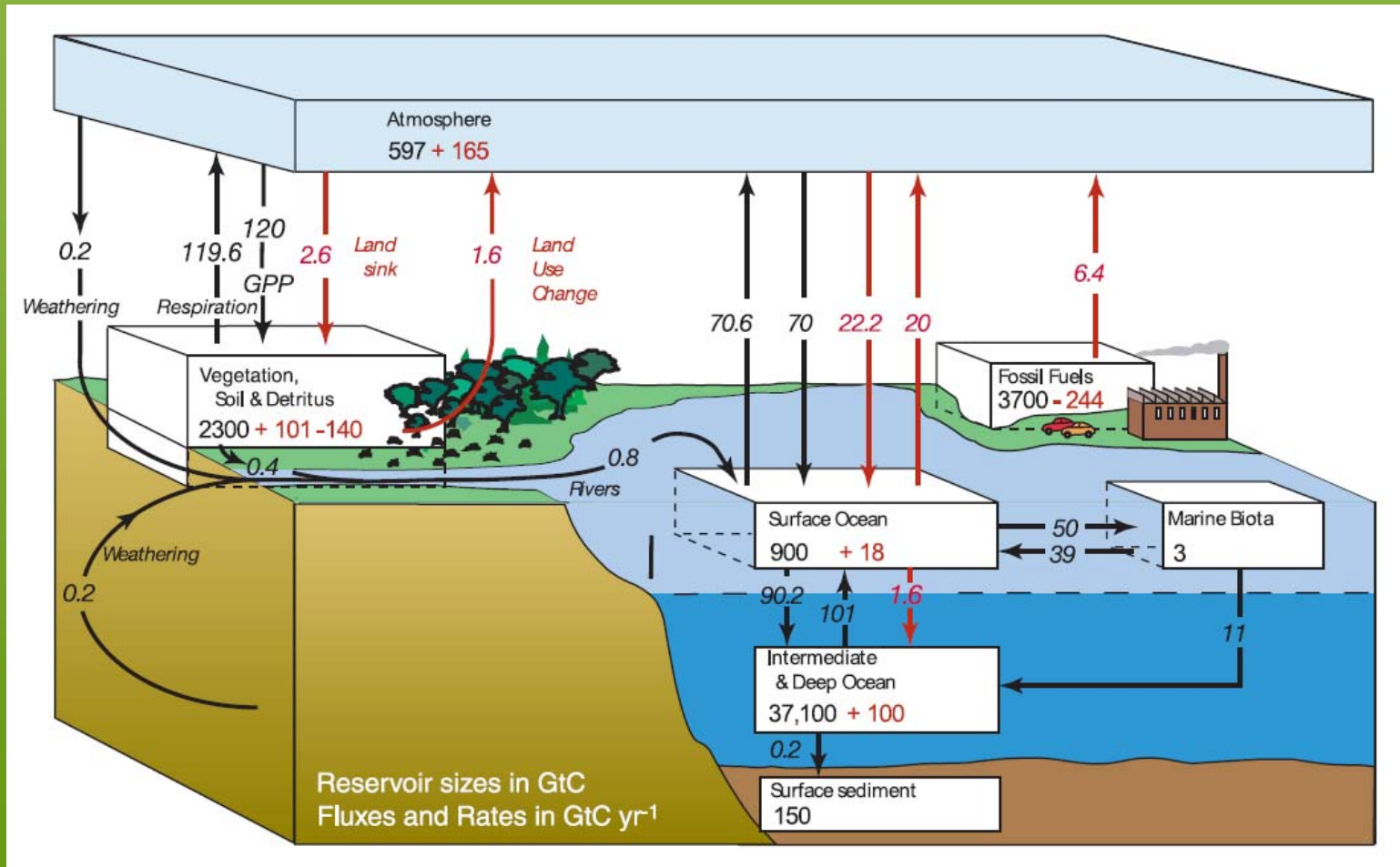


Incertezas no ciclo do carbono nos dias atuais e nos cenários do IPCC

Marcos Heil Costa
UFV

III Conferência Regional sobre Mudanças Globais
São Paulo – SP – 5/11/2007

O Ciclo Global do Carbono



Em preto: ciclo do carbono pré-industrial

Em vermelho: fluxos de origem antropogênica, década de 1990

Incertezas no ciclo futuro do carbono devido a:

1. Incertezas nas emissões

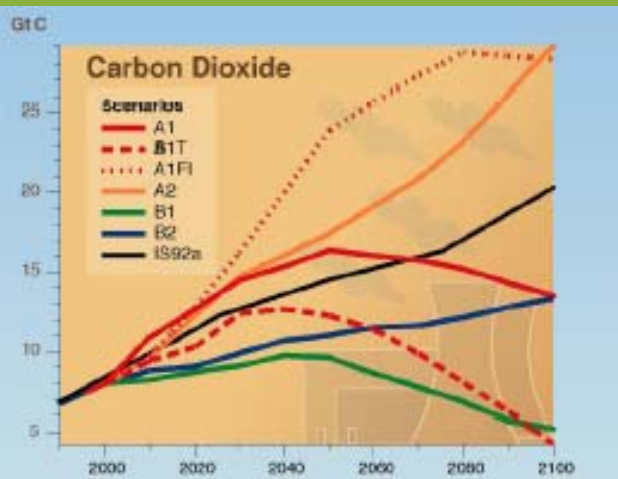
- Por queima de combustíveis fósseis
- Por manufatura de cimento
- Por mudanças no uso do solo

2. Incertezas nas retroalimentações internas do próprio Sistema Terra

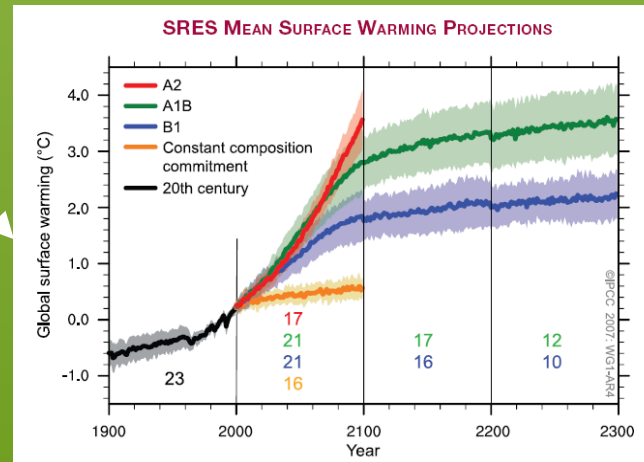
- Oceanos
- Biosfera terrestre

1. Incertezas nas emissões futuras

Cenários de Emissões



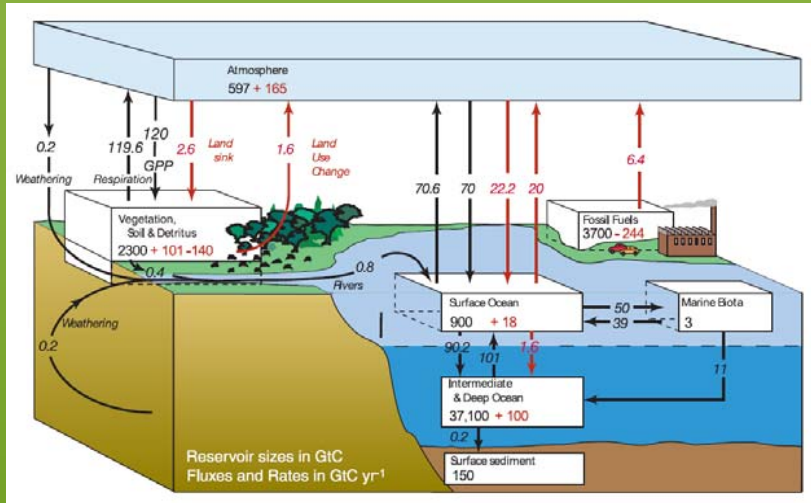
Simulações das Mudanças Climáticas



Relatórios Climáticos



2. Incertezas devido às retroalimentações internas do Sistema Terra



- Oceanos
 - 92.2 Gt-C/ano ↓
 - 90.0 Gt-C/ano ↑
- Biosfera terrestre
 - 122.6 Gt-C/ano ↓
 - 119.6 Gt-C/ano ↑
- Compare com:
 - 6.4 Gt-C/ano
(emissões combustíveis fósseis)
 - 1.6 Gt-C/ano
(emissões desmatamento)

Emissões por queima de combustíveis fósseis + manufatura de cimento + desmatamento:	8 Gt-C/ano	1x
Troca entre atmosfera e oceanos:	90 Gt-C/ano	11x
Troca entre atmosfera e biosfera terrestre:	120 Gt-C/ano	15x

- A troca de CO₂ entre a atmosfera, os oceanos e a biosfera terrestre:
 - dependem do clima
 - devem variar de acordo com as mudanças climáticas
- 1% de variação na assimilação de carbono pela biosfera terrestre (0,6 Gt-C/ano) correspondem a 7,5% das emissões totais da década de 1990 (8 Gt-C/ano)

Algumas definições:

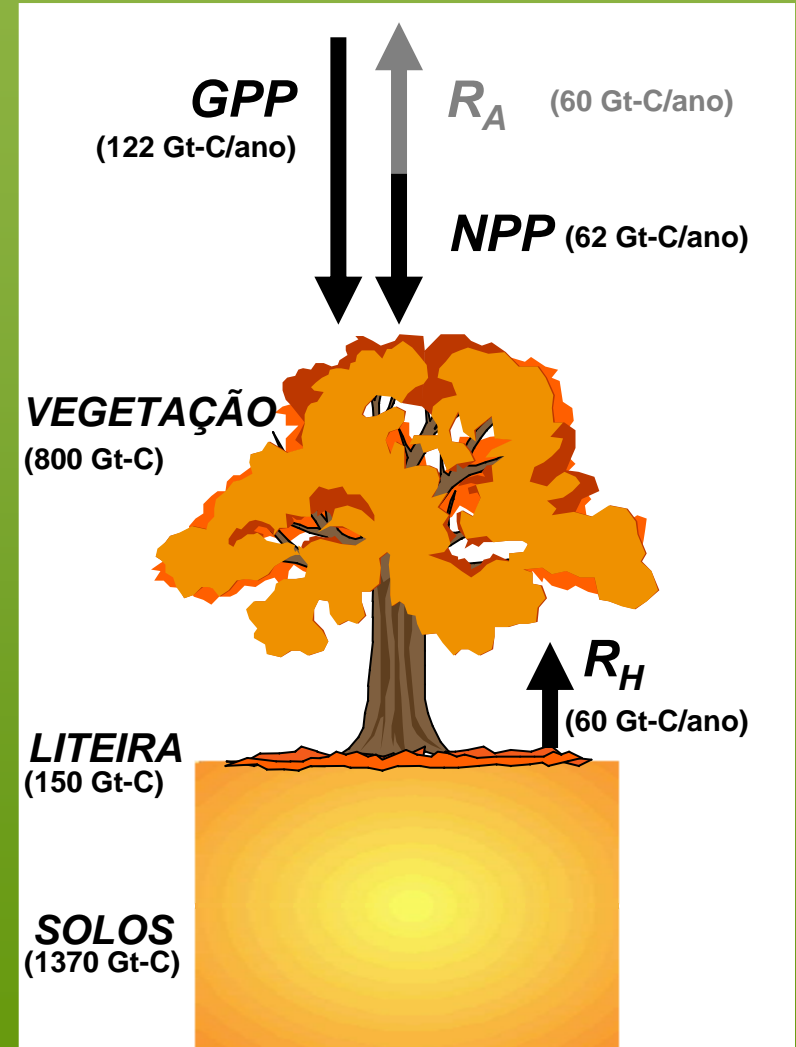
*Produção Primária Bruta (PPB ou GPP) –
Respiração de manutenção anual –
Respiração anual de crescimento =*

Produção Primária Líquida (PPL ou NPP)

- *NPP é a taxa de sequestro de C pela vegetação viva*
- *NPP é toda a comida que comemos, as fibras que vestimos, a madeira que usamos, o biocombustível que abastecemos*

$$NEE = R_H - NPP$$

NEE: troca líquida do ecossistema



Como o fluxo de carbono entre a biosfera e a atmosfera variam com o clima?

- a. Fertilização por CO₂
- b. Precipitação
- c. Temperatura

a. Fertilização por CO₂

- Efeito fisiológico do aumento do CO₂:
 - Aumento do CO₂ faz a reação de fotossíntese ficar mais eficiente para plantas C3
 - Modelos tendem a superestimar o efeito de fertilização em relação a experimentos FACE
 - Limitações nutricionais e genéticas podem explicar a diferença
- Efeito estrutural do aumento do CO₂:
 - Como consequência da fertilização por CO₂, as plantas, principalmente árvores, aumentam IAF e biomassa
 - Aumento do IAF aumenta a interceptação de luz, aumentando ainda mais a assimilação de carbono

b. Precipitação

- Aumento na precipitação faria a assimilação de carbono (NPP) aumentar
- Aumento na precipitação faria a decomposição de carbono (R_H) aumentar
- Efeito no balanço de carbono (NEE) provavelmente nulo

c. Temperatura

- Efeito do aumento da temperatura no NPP variável de acordo com a latitude
 - Negativo nos trópicos
 - Positivo nas latitudes boreais
- Efeito do aumento da temperatura na R_H positivo
- Efeito líquido do aumento de temperatura na NEE no sentido de aumentar as emissões de carbono

Resumo: Como o fluxo de carbono entre a biosfera e a atmosfera variam com o clima?

Fonte de variação	Resposta do sistema		
$\text{CO}_2 \uparrow$	NPP \uparrow	$R_H -$	NEE \downarrow
P \uparrow	NPP \uparrow	$R_H \uparrow$	NEE $-$
T \uparrow	NPP $-$	$R_H \uparrow \uparrow$	NEE $\uparrow \uparrow$
Resumo: $\text{CO}_2 \uparrow$ T \uparrow	NPP \uparrow	$R_H \uparrow \uparrow$	NEE $\uparrow \uparrow$

$$\text{NEE} = R_H - \text{NPP}$$

NPP: fixação de carbono

R_H : emissão de carbono

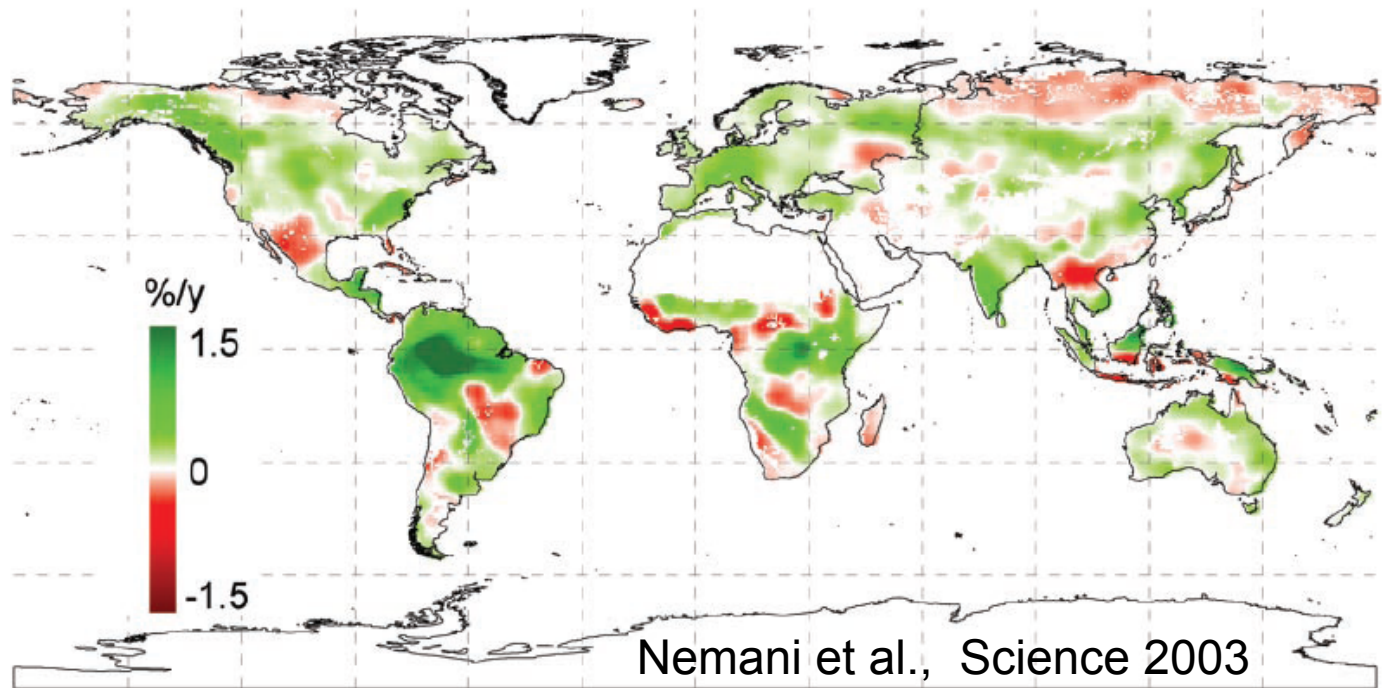
NEE < 0 implica em sequestro de carbono

Variações no ciclo do carbono não-relacionadas à queima de combustíveis fósseis

- (Reconstrução para as décadas de 1980-1990
- Monitoramento atual)
- Cenários futuros do IPCC

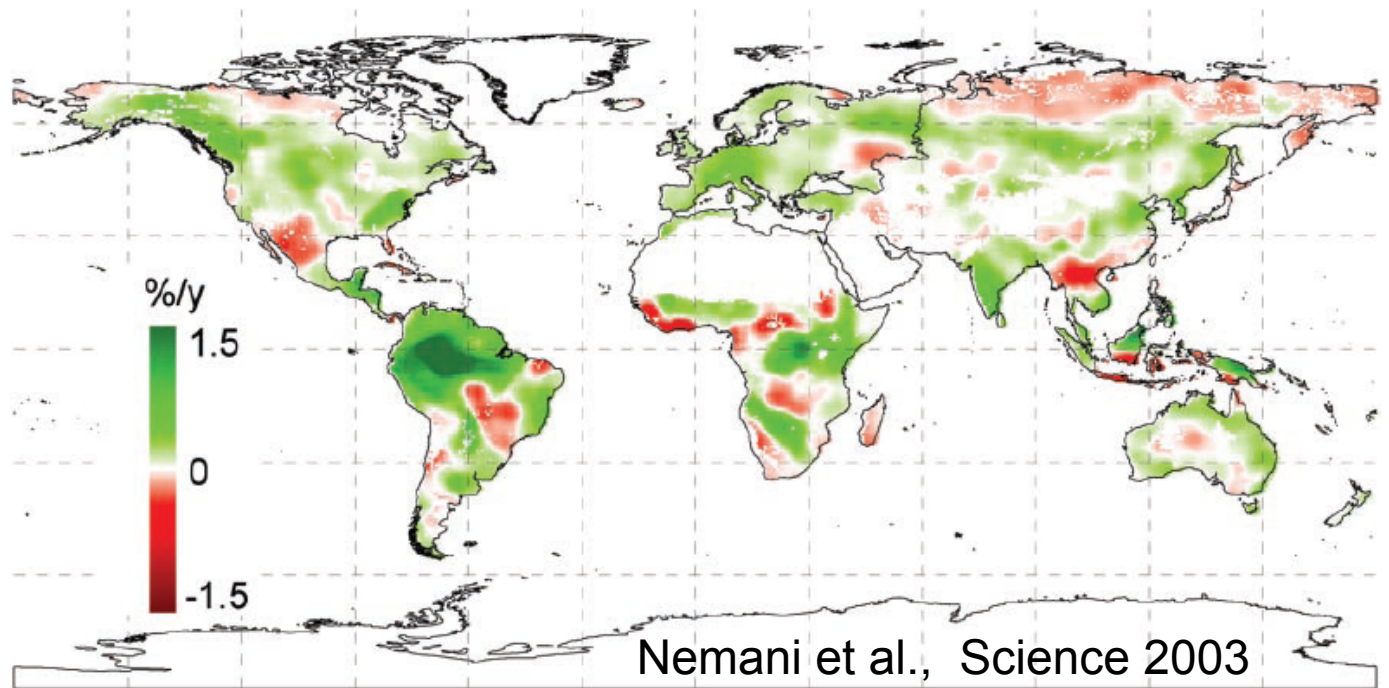
(Reconstrução para 1982-1999

Fig. 2. Spatial distribution of linear trends in estimated NPP from 1982 to 1999. NPP was calculated with mean FPAR and LAI derived from GIMMS and PAL data sets.



(Reconstrução para 1982-1999

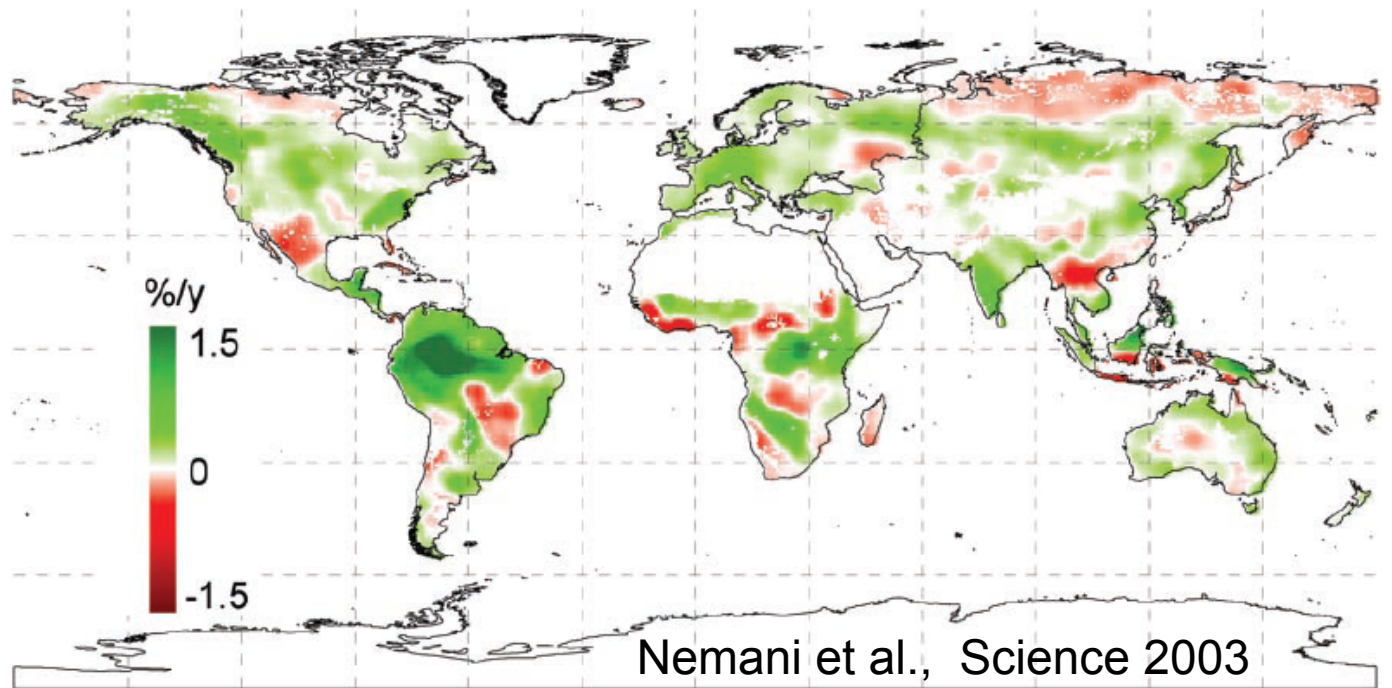
Fig. 2. Spatial distribution of linear trends in estimated NPP from 1982 to 1999. NPP was calculated with mean FPAR and LAI derived from GIMMS and PAL data sets.



- Vegetação sequestra carbono – e está sequestrando cada vez mais intensamente!

(Reconstrução para 1982-1999

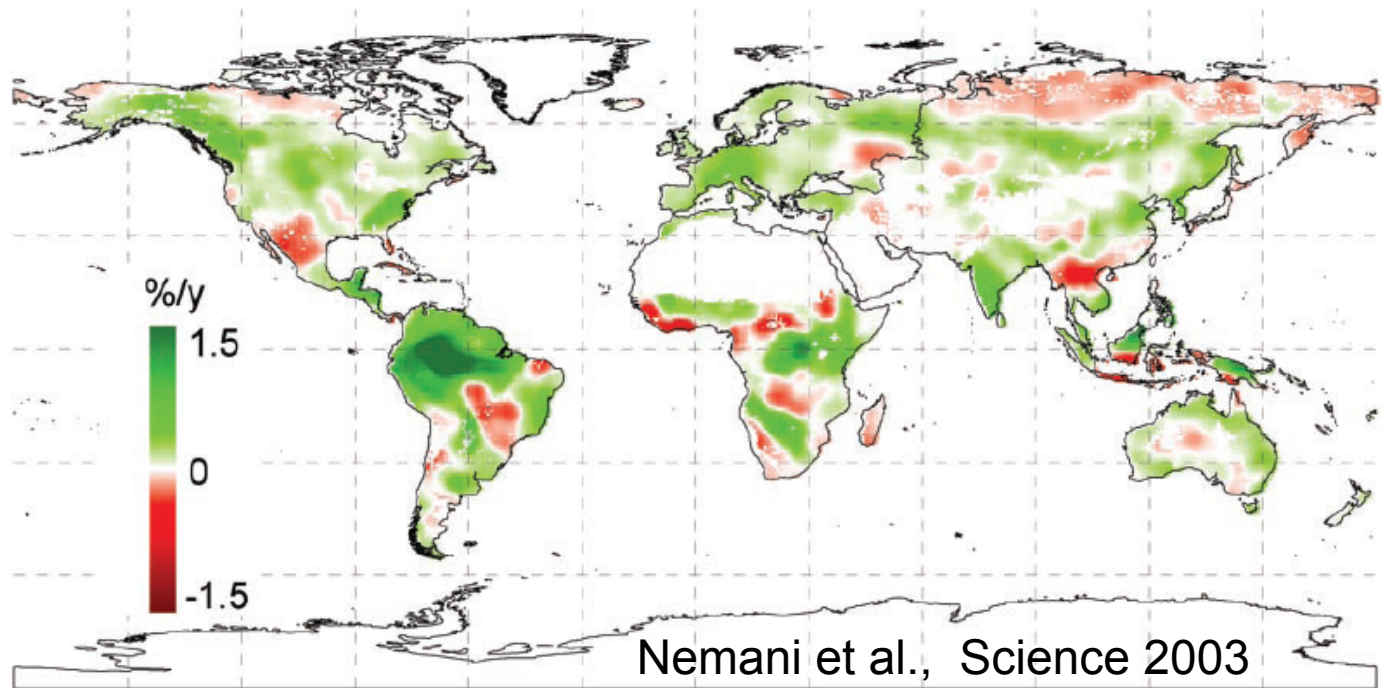
Fig. 2. Spatial distribution of linear trends in estimated NPP from 1982 to 1999. NPP was calculated with mean FPAR and LAI derived from GIMMS and PAL data sets.



- Vegetação sequestra carbono – e está sequestrando cada vez mais intensamente!
- Sequestro de carbono pela floresta amazônica **aumentou** de 1,4 Pg-C no período 1982-1999, ou 77 Tg-C/ano (esses números podem estar subestimados).

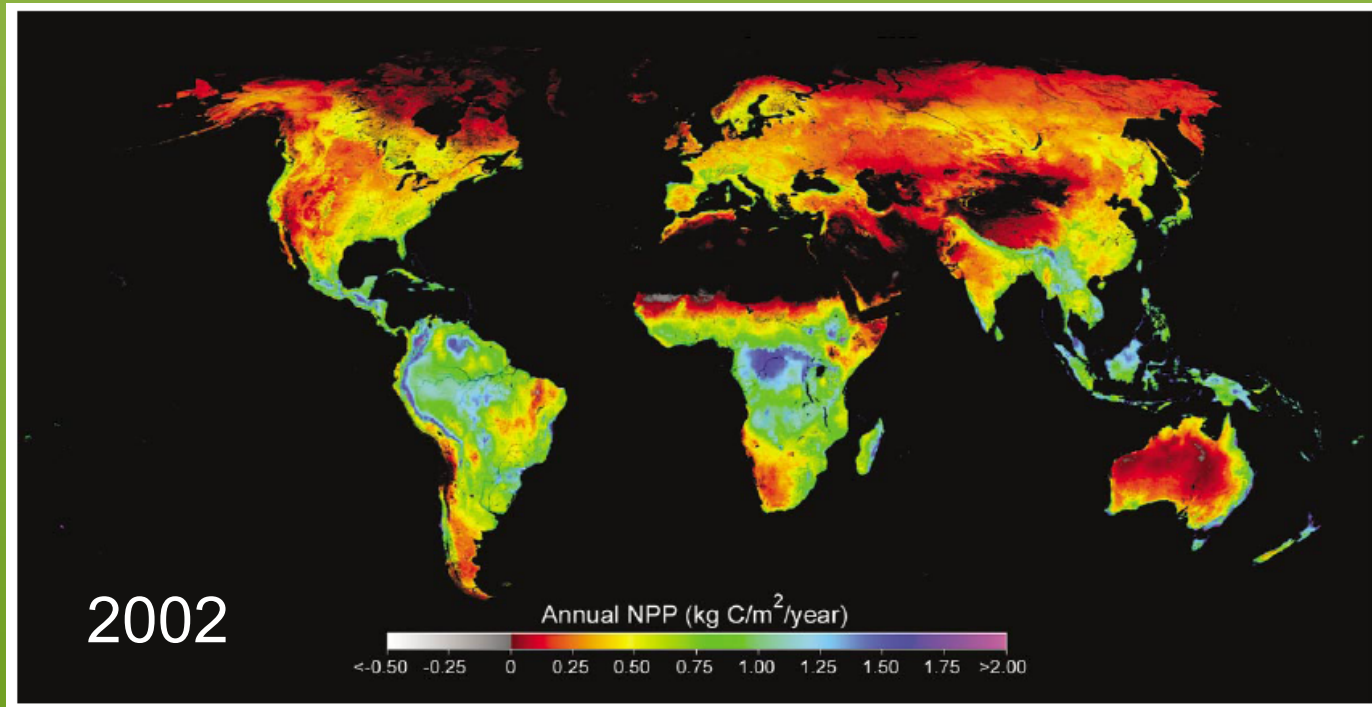
(Reconstrução para 1982-1999

Fig. 2. Spatial distribution of linear trends in estimated NPP from 1982 to 1999. NPP was calculated with mean FPAR and LAI derived from GIMMS and PAL data sets.



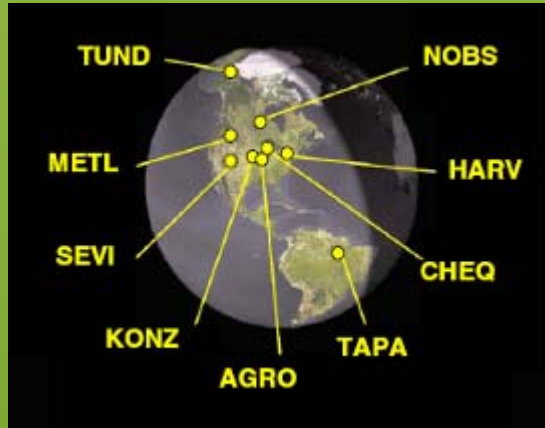
- Vegetação sequestra carbono – e está sequestrando cada vez mais intensamente!
- Sequestro de carbono pela floresta amazônica **aumentou** de 1,4 Pg-C no período 1982-1999, ou 77 Tg-C/ano (esses números podem estar subestimados).
- Emissões brasileiras pela queima de combustíveis fósseis: 59 Tg-C/ano (1991)

Monitoramento atual

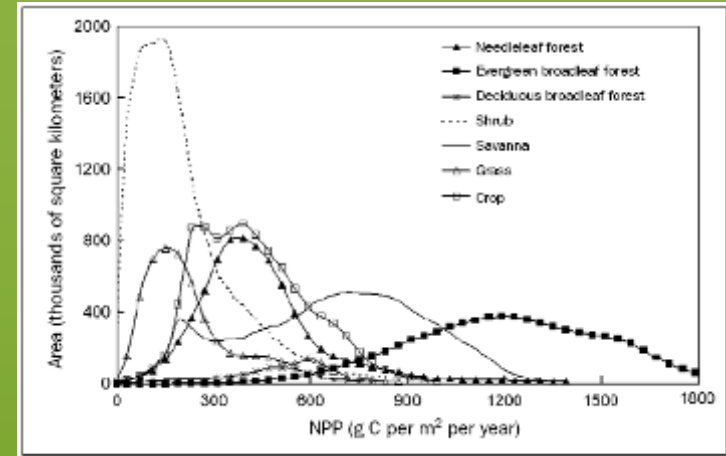


- Produto MOD-17 operacional desde 1999, produzindo valores anuais à resolução de 1 km
- Média de longo prazo do NPP global 54 Pg-C

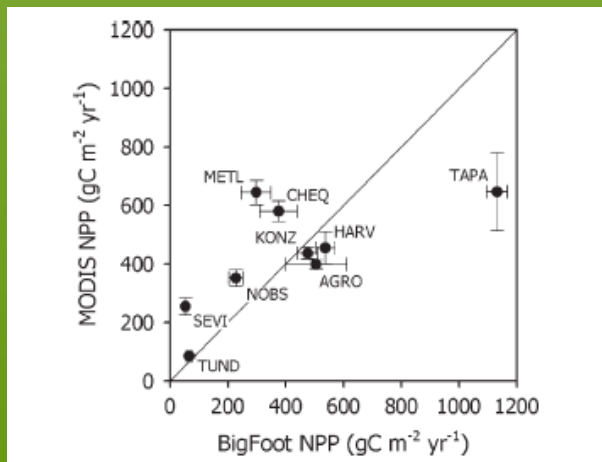
Validação do produto de NPP MOD-17



Turner et al. 2006



Running et al. Bioscience, 2004

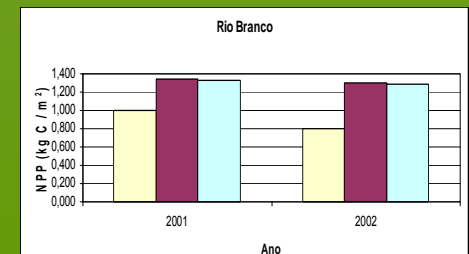
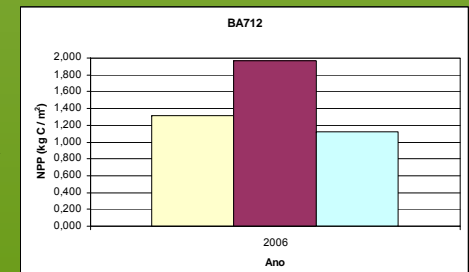
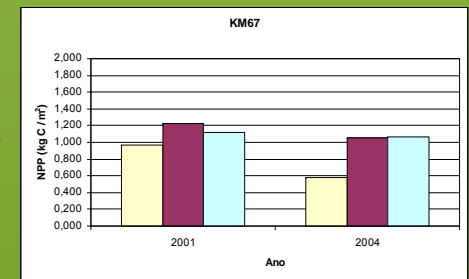
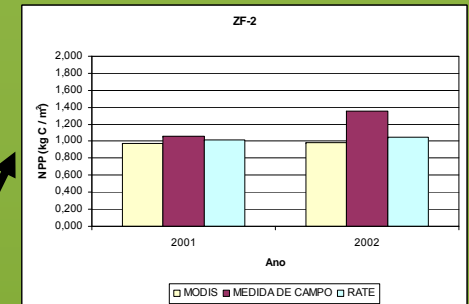
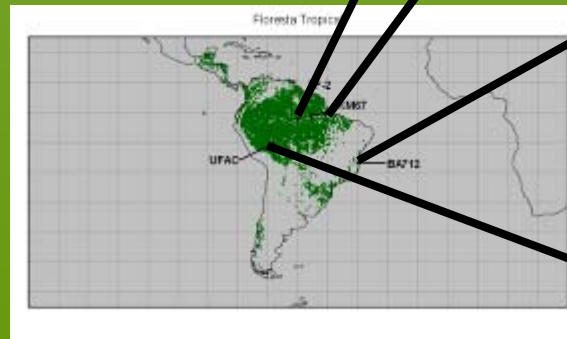
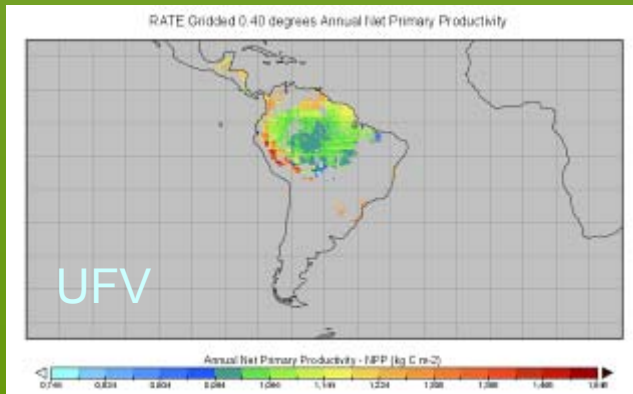


Turner et al. 2006

- Produto de NPP MOD-17 tem um EPE de $\sim 250 \text{ g m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$
- Maior parte do NPP planetário provém de florestas tropicais
- NPP estimado na floresta tropical é subestimado de $\sim 50\%$
- Resultados de Nemani et al. 2003 podem estar subestimados também

Monitoramento de NPP – novos produtos

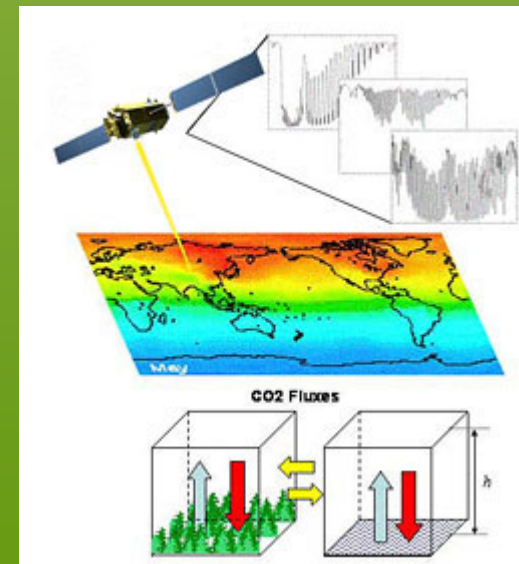
- Novo algoritmo desenvolvido na UFV baseia-se nos mesmos princípios do MOD-17, mas corrige várias das suas deficiências
- No momento funciona apenas para floresta tropical na América do Sul
- Supera o MOD-17 em 6 de 7 testes
- Reduz a incerteza consideravelmente
- Previsão de rodar operacionalmente a partir de 2008



Monitoramento do balanço de carbono



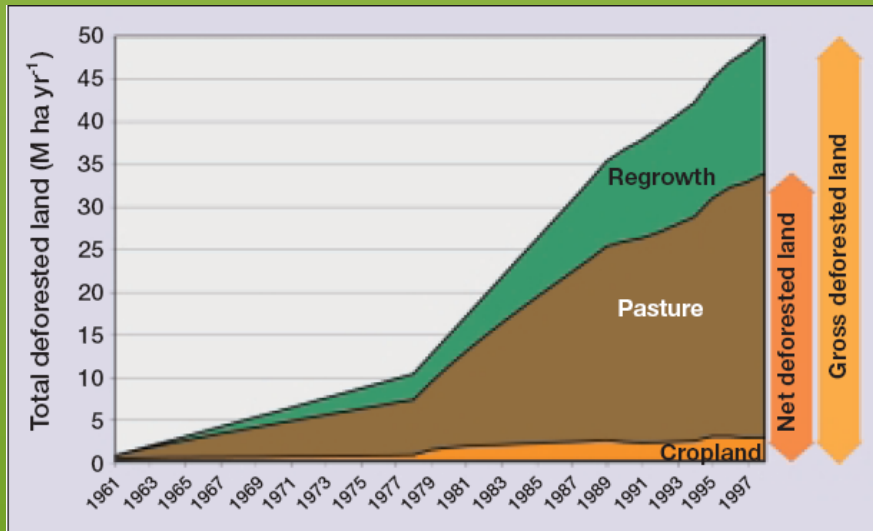
- Lançamento previsto para 2008
- Visa obter uma distribuição geográfica das fontes e sumidouros de CO₂
- Não medirá as fontes ou sumidouros de carbono diretamente, mas sim a média da concentração de CO₂ na coluna atmosférica
- Fontes e sumidouros serão calculados por modelagem inversa



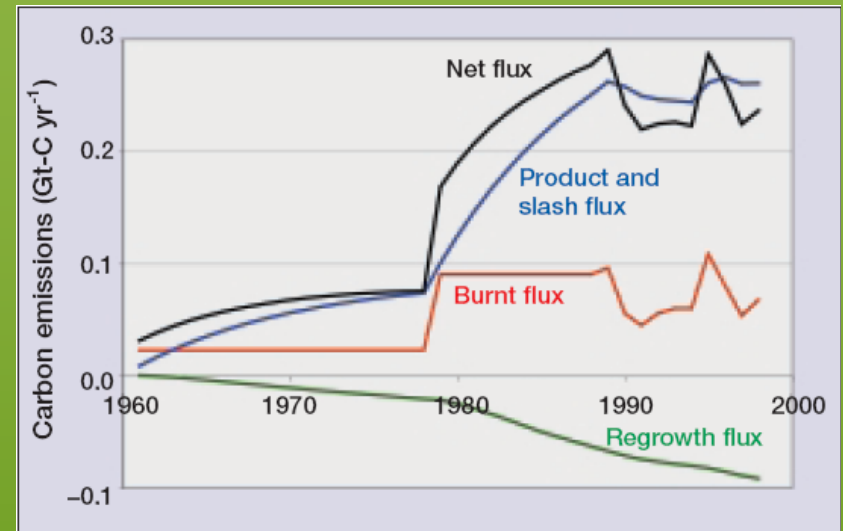
(Comentário

- OCO visa confirmar a hipótese de que alguns países, embora sejam grandes emissores de CO₂ pela queima de combustíveis fósseis, são também grandes sequestradores de carbono pela recuperação de sua vegetação
- Ver Casperson et al. *Science* 2000
Pacala et al. *Science* 2001

A situação não é diferente no Brasil



Desmatamento bruto e líquido na Amazônia 1961-2000



Balanço de carbono da Amazônia devido ao desmatamento e recuperação de áreas abandonadas 1961-2000

Foley, Asner, Costa et al. *Frontiers in Ecology and the Environment* 2007



Previsões para 2100: C⁴MIP

Table 7.4. Impact of carbon cycle feedbacks in the C⁴MIP models. Column 2 shows the impact of climate change on the CO₂ concentration by 2100, and column 3 shows the related amplification of the atmospheric CO₂ increase (i.e., the climate-carbon cycle feedback factor). Columns 4 to 8 list effective sensitivity parameters of the models: transient sensitivity of mean global temperature to CO₂, and the sensitivities of land and ocean carbon storage to CO₂ and climate (Friedlingstein et al., 2006). These parameters were calculated by comparison of the coupled and uncoupled runs over the entire period of the simulations (typically 1860 to 2100). Model details are given in Friedlingstein et al. (2006).

Model ^a	Impact of Climate Change on the CO ₂ Concentration by 2100 (ppm)	Climate-Carbon Feedback Factor	Transient Climate Sensitivity to Doubling CO ₂ (°C)	Land Carbon Storage Sensitivity to CO ₂ (GtC ppm ⁻¹)	Ocean Carbon Storage Sensitivity to CO ₂ (GtC ppm ⁻¹)	Land Carbon Storage Sensitivity to Climate (GtC °C ⁻¹)	Ocean Carbon Storage Sensitivity to Climate (GtC °C ⁻¹)
A. HadCM3LC	224	1.44	2.3	1.3	0.9	-175	-24
B. IPSL-CM2C	74	1.18	2.3	1.6	1.6	-97	-30
C. MPI-M	83	1.18	2.6	1.4	1.1	-64	-22
D. LLNL	51	1.13	2.5	2.5	0.9	-81	-14
E. NCAR CSM-1	20	1.04	1.2	1.1	0.9	-24	-17
F. FRCGC	128	1.26	2.3	1.4	1.2	-111	-47
G. Uvic-2.7	129	1.25	2.3	1.2	1.1	-97	-43
H. UMD	98	1.17	2.0	0.2	1.5	-36	-60
I. BERN-CC	65	1.15	1.5	1.6	1.3	-104	-38
J. CLIMBER2-LPJ	59	1.11	1.9	1.2	0.9	-64	-22
K. IPSL-CM4-LOOP	32	1.07	2.7	1.2	1.1	-19	-17
Mean	87	1.18	2.1	1.4	1.1	-79	-30
Standard Deviation	±57	±0.11	±0.4	±0.5	±0.3	±45	±15

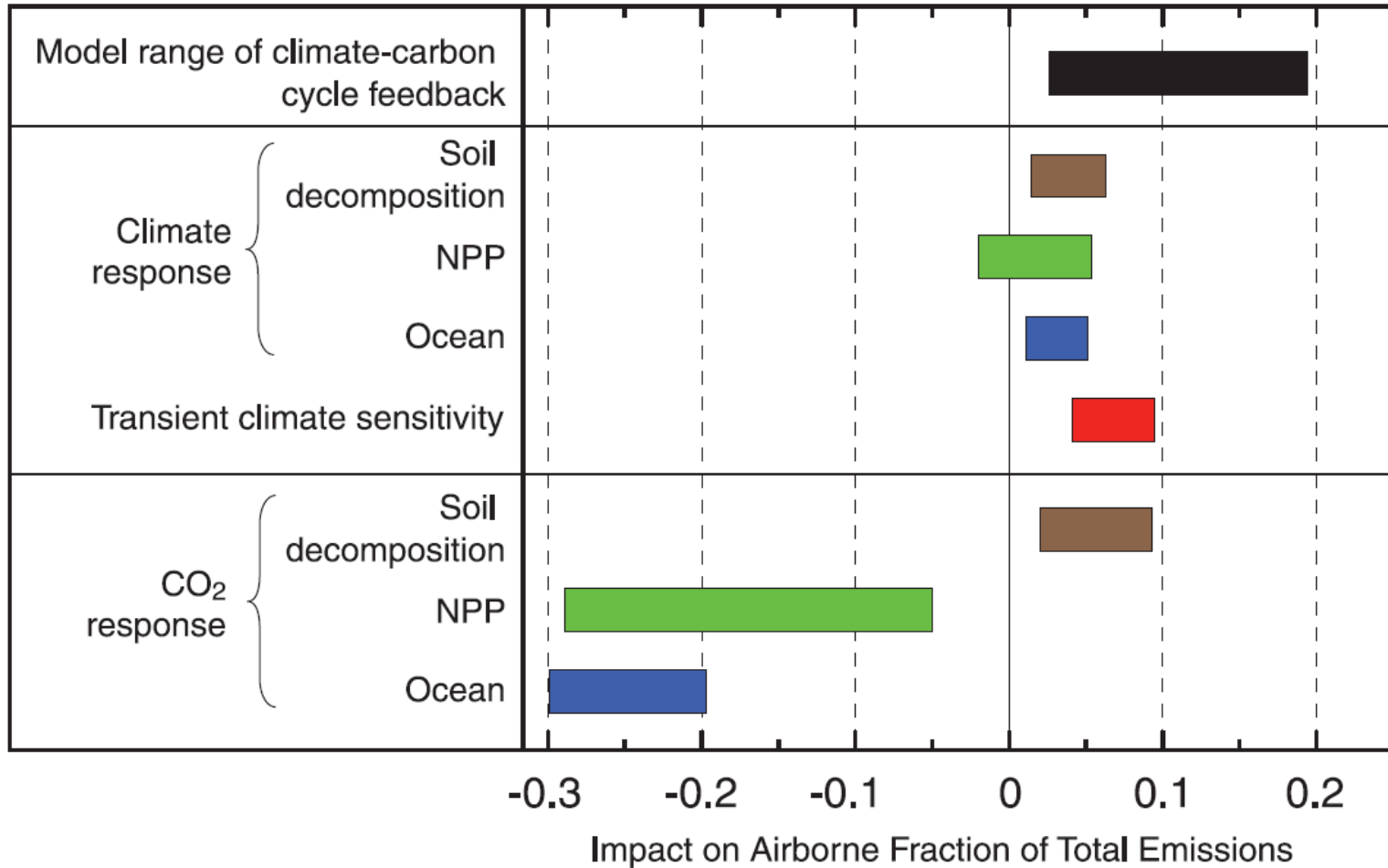
Notes:

^a HadCM3LC: Hadley Centre coupled climate-carbon cycle general circulation model; IPSL-CM2C: Institut Pierre-Simon Laplace; MPI-M: Max Planck Institute for Meteorology; LLNL: Lawrence Livermore National Laboratory; NCAR CSM-1: NCAR Climate System Model version 1; FRCGC: Frontier Research Center for Global Change; Uvic-2.7: University of Victoria Earth System Climate Model; UMD: University of Maryland; BERN-CC: Bern Carbon Cycle Model; CLIMBER2-LPJ: Climate Biosphere Model 2 - Lund Potsdam Jena Terrestrial Carbon Model; IPSL-CM4-LOOP: Institute Pierre-Simon Laplace.

Cenário A2 – Ano 2100

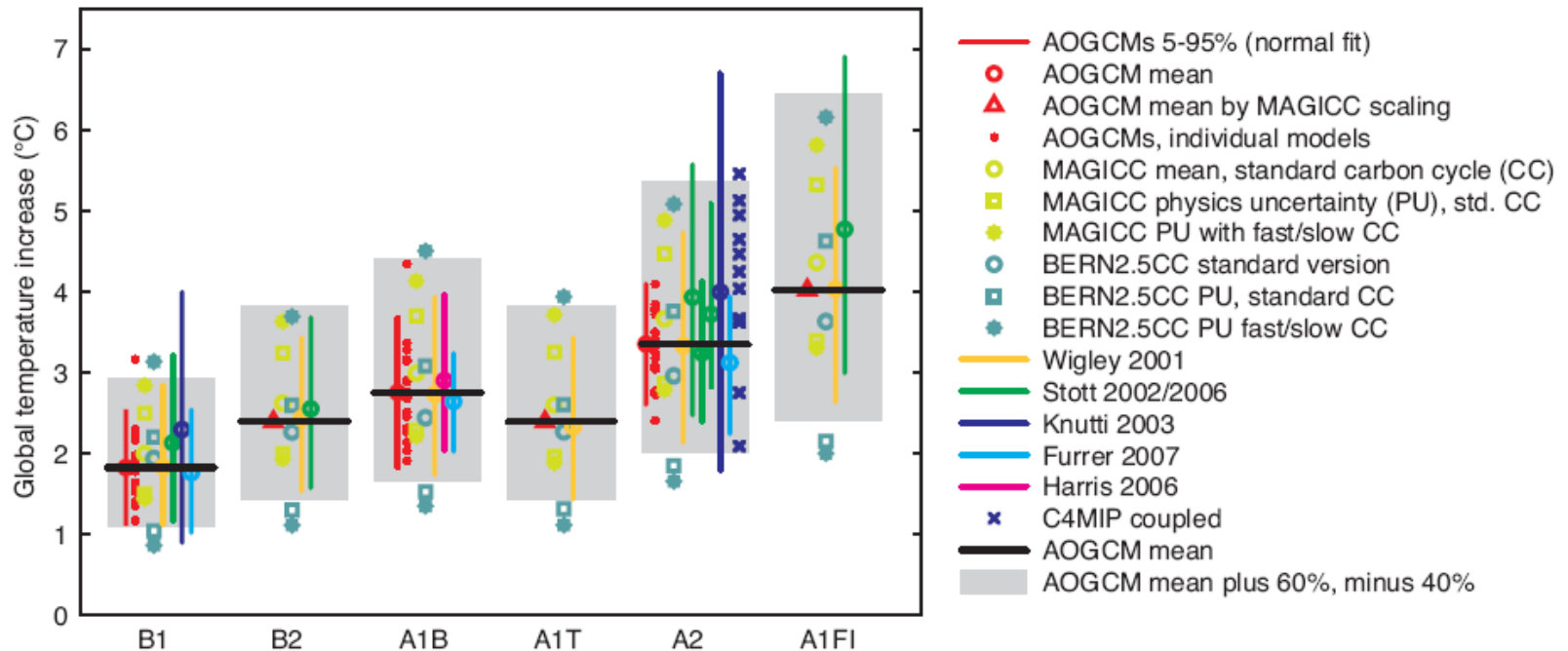
Previsões para 2100: C⁴MIP

Uncertainties in Carbon Cycle Feedbacks



Previsões para 2100

PROJECTED WARMING IN 2090–2099



Resumo e Conclusões

- Quando consideramos o futuro do clima, devemos nos lembrar que a atmosfera não opera isolada, mas acoplada aos oceanos e atmosfera, inclusive com relação ao ciclo do carbono.
- O papel da biosfera não pode ser ignorado ao prever o clima futuro, ou monitorar o balanço de carbono no presente
- Estudos publicados até o momento indicam que os processos ecológicos amplificariam o CO₂ atmosférico e o aquecimento causado pelos gases de efeito estufa