

ESTADO-DA-ARTE DA SIMULAÇÃO DA TAXA DE FIXAÇÃO DE CARBONO DE ECOSISTEMAS TROPICAIS

MARCOS HEIL COSTA, EDSON LUÍS NUNES, MÔNICA CARNEIRO ALVES SENNA
HEWLLEY MARIA ACIOLI IMBUZEIRO

Universidade Federal de Viçosa (UFV), Departamento de Engenharia Agrícola,
Viçosa – MG

mhcosta@ufv.br, elnunes@vicosa.ufv.br, monica@vicosa.ufv.br, hewlley@vicosa.ufv.br

Recebido Abril 2008 - Aceito Março 2009

RESUMO

Este trabalho avalia o estado-da-arte de modelos de simulação da taxa de fixação de carbono, ou produção primária líquida (NPP), de ecossistemas tropicais em duas configurações diagnósticas (simulação em sítios micrometeorológicos e simulação forçada por dados climáticos e por produtos de sensoriamento remoto) e uma prognóstica (simulação por um modelo acoplado clima-vegetação). Os resultados indicam que os modelos de estimativa de NPP atingiram capacidade de fazer estimativas não-viesadas de valores médios regionais de NPP, tanto no modo diagnóstico, quanto no modo prognóstico, com erros inferiores a 5%, enquanto o valor esperado do erro em cada sítio é inferior a 10% no modo diagnóstico e inferior a 20% no modo prognóstico. Os modelos estado-da-arte são capazes de monitorar a taxa de fixação de carbono por ecossistemas tropicais de maneira rotineira, sendo esperados baixos erros para essas estimativas.

Palavras-chave: Produção Primária Líquida, Modelagem, Florestas Tropicais.

ABSTRACT: STATE-OF-THE-ART OF THE SIMULATION OF CARBON FIXATION RATES BY TROPICAL ECOSYSTEMS

This work evaluates the state-of-the-art of the simulation of carbon fixation rates, or net primary production (NPP) by tropical ecosystems in two diagnostic configurations (simulation at micrometeorological sites and simulation forced by climate datasets and remote sensing products) and one prognostic (simulation by a coupled climate-biosphere model). The results indicate that the NPP simulation models are capable of unbiased estimates of average regional values of NPP, both in diagnostic and in prognostic mode, with errors smaller than 5%, while the expected value of the error in each site is smaller than 10% in the diagnostic mode and smaller than 20% in the prognostic mode. State-of-the-art models are capable of routinely monitoring the net primary production of tropical ecosystems, with low errors expected for these estimates.

Keywords: Net Primary Production, Modeling, Tropical Forests

1. INTRODUÇÃO

O cenário mais provável nas próximas décadas apresenta fortes modificações no meio ambiente global, incluindo aumento da concentração atmosférica de CO₂ e outros gases-traço, mudanças climáticas e intensificação dos impactos causados pela ação do homem. É esperado que essas mudanças causem importantes modificações na composição, estrutura e distribuição dos ecossistemas pelo planeta. Desta forma, um

monitoramento preciso das mudanças na biosfera terrestre tem se tornado extremamente importante, pois detectar a variabilidade interanual e as tendências de longo prazo na estrutura dos ecossistemas permitirá identificar antecipadamente mudanças na biosfera que, do contrário, passariam despercebidas até o início de uma transformação do bioma.

Além do monitoramento da biosfera, também é importante ter capacidade preditiva do seu estado futuro. A vegetação é o espelho do clima, com o qual interage de

maneira bi-direcional (Foley et al., 2000). Assim, é esperado que mudanças no clima afetem a distribuição e estrutura da vegetação em diversos pontos do planeta.

A composição e estrutura de um ecossistema dependem basicamente da taxa de fixação de carbono e da sua taxa de mortalidade. A taxa de fixação de carbono em um ecossistema, ou produção primária líquida (NPP, Net Primary Production), é o fluxo líquido de carbono da atmosfera para as plantas, e é igual à diferença entre a fotossíntese bruta (GPP, Gross Primary Production) e a respiração autotrófica dos ecossistemas (R_A), integrada ao longo do tempo ($NPP = GPP - R_A$). A NPP também pode ser relacionada à troca líquida do ecossistema (NEE) e à respiração heterotrófica dos ecossistemas (R_H) pela relação $NEE = NPP - R_H$. A NPP é sensível a vários fatores de controle, incluindo aspectos relacionados ao clima, topografia, solos, planta, características microbianas, distúrbios, e impactos antropogênicos (Field et al., 1995).

Diversos modelos têm sido desenvolvidos para a simulação da NPP de ecossistemas. Neste artigo, esses modelos serão divididos em dois grupos, de acordo com os seus objetivos, diagnósticos ou prognósticos.

Os modelos, que visam o diagnóstico ou monitoramento da NPP dos ecossistemas, fazem uso de observações de variáveis atmosféricas e, eventualmente, de observações de parâmetros relacionados à estrutura dos ecossistemas. Os modelos podem ser forçados por variáveis meteorológicas observadas localmente, de alta resolução temporal, ou então por bases de dados de variáveis climáticas, com resolução temporal mensal e boa distribuição espacial, como a base de dados do CRU – Climate Research Unit, University of East Anglia (New et al., 2000) ou a reanálise do NCEP/NCAR – National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (Kalnay et al., 1996), dentre muitos outros. Os parâmetros relacionados à estrutura dos ecossistemas, normalmente incluem o índice de área foliar (LAI) e a fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pelo dossel (FAPAR), parâmetros esses estimados a partir de sensores de média resolução (1 km) como o AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) e o MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer).

Já os modelos que visam o prognóstico da NPP dos ecossistemas fazem uso apenas de modelos de simulação, sem serem forçados por observações diretas. Neste caso, será dado destaque aos modelos acoplados clima-biosfera, que são forçados apenas por suas condições de contorno, como radiação solar no topo da atmosfera, temperatura da superfície do mar e composição atmosférica.

Neste artigo avalia-se a capacidade atual de simulação da NPP de ecossistemas tropicais, usando dois grupos de algoritmos: um orientado a monitoramento da dinâmica da vegetação, e outro orientado à previsão da dinâmica da vegetação

associado à previsão climática. Avaliaremos o comportamento de três modelos de NPP forçados por observações: SITE (Santos e Costa, 2004), RATE (Nunes, 2008), e IBIS (Foley et al., 1996; Kucharik et al. 2000), e um modelo de NPP acoplado a um modelo climático (CCM3-IBIS, Delire et al., 2003).

2. DESCRIÇÃO DOS MODELOS E DAS SIMULAÇÕES

Todos os modelos testados são do tipo mecanístico, em que os principais processos relacionados à assimilação e dinâmica do carbono no ecossistema são explicitamente simulados, em maior ou menor grau de complexidade, de acordo com cada modelo. O processo central envolvido, em todos os modelos, é a captura da radiação fotossinteticamente ativa pelas folhas do dossel e conversão em carboidrato. Nesse processo, as fases clara e escura da fotossíntese, e a respiração autotrófica são simuladas independentemente. Segue-se a alocação do carboidrato sintetizado nos principais reservatórios do ecossistema (folhas, raízes, troncos e galhos), a mortalidade desses reservatórios e finalmente a sua respiração heterotrófica. De acordo com a complexidade do modelo, há variações na forma como eles tratam ou não a dinâmica de carbono no longo prazo, mas os modelos são bastante semelhantes no processo central (síntese de carbono) avaliado neste trabalho. A principal diferença entre os modelos é que o algoritmo RATE permite a assimilação dos parâmetros de índice de área foliar (LAI) e fração absorvida da radiação fotossinteticamente ativa (FAPAR) obtidos por sensoriamento remoto, enquanto os demais obtêm esses parâmetros por simulação.

Os modelos são forçados por seis tipos de variáveis meteorológicas: radiação de onda curta incidente, radiação de onda longa incidente, temperatura e umidade do ar, módulo da velocidade horizontal do vento, e precipitação. Conforme a configuração, esses dados são fornecidos por estação meteorológica, por dados de reanálise, ou calculados por um modelo atmosférico. O intervalo de integração dos modelos (e portanto, o intervalo em que os dados de entrada devem estar disponíveis) varia de 1 hora no caso do SITE, RATE e IBIS a 15 minutos, no caso do CCM3-IBIS.

2.1. SITE

O SITE (Simple Tropical Ecosystem Model) é um modelo simplificado de dinâmica de vegetação de ecossistema tropical, desenvolvido por Santos e Costa (2004), que incorpora vários processos: balanço de radiação solar e infravermelha, processos aerodinâmicos, fisiologia vegetal e transpiração do dossel, balanço de água interceptada pelo dossel, transporte de massa e energia na atmosfera, fluxo de calor e água no solo e

balanço de carbono, mas que possui a complexidade necessária para representar os processos biofísicos envolvidos no ciclo do carbono terrestre.

O SITE é um modelo estruturado com uma camada de dossel e duas camadas no solo, onde a primeira camada do solo é próxima à superfície com uma profundidade de até 10 cm e a segunda camada, onde se encontram distribuídas as raízes, possui uma profundidade de até 5 m. O modelo é forçado com base nos dados médios horários das observações meteorológicas das variáveis de temperatura do ar, umidade específica do ar, velocidade horizontal do vento, radiação de onda curta incidente, radiação de onda longa incidente e precipitação, medidos acima do dossel.

Neste estudo foram feitas simulações com o modelo SITE forçado por dados de estações meteorológicas (doravante chamado de SITE-EM) para avaliar a estimativa de NPP em um sítio instalado na Floresta Nacional de Tapajós K67, localizado

no município de Belterra-PA, no período de 2002 a 2004, e em um sítio de Mata Atlântica instalado na área de preservação permanente BA712 da Aracruz Celulose SA, localizado no município de Teixeira de Freitas-BA, no período de 2005 a 2007 (Tabela 1). Os sítios experimentais estão descritos em mais detalhe na Seção 3.

Além dessas simulações para estes dois sítios, foram feitas simulações com o modelo SITE forçado por dados meteorológicos assimilados a partir dos dados de re-análise do NCEP, doravante denominado SITE-RA, conforme descrito por NUNES (2008) para os mesmos períodos.

2.2. RATE

O algoritmo RATE (Regional Algorithm for Monitoring the Carbon assimilation of Terrestrial Ecosystems) proposto por Nunes (2008) para monitoramento e quantificação da NPP

Tabela 1 – Descrição dos sítios experimentais onde foram obtidas medições de NEE e NPP. EM – Estação meteorológica, que inclui os dados horários de radiação solar incidente, temperatura e umidade do ar, velocidade do vento e precipitação.

Sítio	Cidade	Coordenadas	Período	Vegetação	Dados disponíveis	Fonte	Modelo avaliado
Flona Tapajós K67	Belterra – PA	55,04° W; 2,86° S	2004	Floresta tropical amazônica	EM; NPP	Turner et al. (2006)	SITE-EM, SITE-RA, RATE, IBIS-EM, IBIS-RA
BA712	Teixeira de Freitas – BA	39,67° W; 17,29° S	2006	Mata atlântica	EM; NPP	Nunes (2008)	SITE-EM, SITE-RA, RATE, IBIS-EM, IBIS-RA
Flona Tapajós K67	Belterra – PA	55,02° W; 2,86° S	2001	Floresta tropical amazônica	NPP	Vieira et al. (2004)	RATE
UFAC	Rio Branco – AC	68,03° W; 10,12° S	2001, 2002	Floresta tropical amazônica	NPP	Vieira et al. (2004)	RATE
ZF-2	Manaus – AM	60,18° W; 2,97° S	2001, 2002	Floresta tropical amazônica	NPP	Vieira et al. (2004)	RATE
Caxiuanã	Melgaço – PA	Várias parcelas entre 1°41'S e 1°46'S e entre 51°30' W e 51°23' W	Longo-prazo	Floresta tropical amazônica	NPP	Malhi et al. (2009)	CCM3-IBIS
Flona Tapajós K67	Belterra – PA	Várias parcelas entre 2°50'S e 3°18'S; entre 55°05' W e 54°55' W	Longo-prazo	Floresta tropical amazônica	NPP	Malhi et al. (2009)	CCM3-IBIS
Manaus	Manaus – AM	Várias parcelas entre 2°20'S e 2°38'S; entre 60°15' W e 59°58' W	Longo-prazo	Floresta tropical amazônica	NPP	Malhi et al. (2009)	CCM3-IBIS

pelos ecossistemas terrestres de Florestas Tropicais da América do Sul, é capaz de fornecer estimativas temporais e espaciais da taxa de fixação de carbono. O algoritmo foi implementado a partir de dados assimilados de sensoriamento remoto de cobertura do solo, LAI e FAPAR do MODIS, de dados de variáveis meteorológicas assimiladas a partir de dados de reanálise fornecidos pelo NCEP, e de um modelo mecanístico de produtividade fotossintética, baseado no modelo SITE.

O algoritmo RATE foi utilizado para o período de 2000 a 2006 para avaliar a estimativa de NPP nos sítios K67, ZF-2, UFAC e BA712 (Tabela 1) (Nunes, 2008).

2.3. IBIS

O modelo de biosfera IBIS (Integrated Biosphere Simulator) compõe uma nova geração de modelos de biosfera global, sendo denominado modelo dinâmico da vegetação global, que considera as mudanças ocorridas na composição e estrutura da vegetação em resposta às condições ambientais. Este modelo compreende diversos processos, incluindo as interações entre a superfície e a atmosfera, ciclos de carbono e nutrientes e dinâmica da vegetação (Foley et al., 1996; Kucharik et al., 2000). É um dos poucos modelos a incorporar diversos processos do ecossistema em uma única estrutura, incluindo: troca de energia, água e dióxido de carbono entre solo, plantas e atmosfera; processos fisiológicos das plantas e organismos do solo, incluindo fotossíntese e respiração; crescimento e competição entre plantas; ciclo de nutrientes (C, N) e processos físicos do solo.

O modelo segue uma hierarquia conceitual e inclui submodelos (ou módulos) organizados de acordo com a escala temporal: processos de superfície (transferência de energia, água, carbono e momentum), biogeoquímica do solo (ciclo do nitrogênio e do carbono), dinâmica da vegetação (competição das plantas por luz, água e nutrientes), fenologia (baseada no desenvolvimento medido por graus-dia).

As simulações realizadas pelo IBIS, para obtenção de NPP, foram divididas em dois grupos de acordo com os diferentes tipos de dados de entrada para o modelo. No primeiro grupo, foram realizadas simulações utilizando dados das estações meteorológicas (IBIS-EM) para os sítios K67 e BA712. No segundo grupo, as simulações utilizaram os dados de reanálise do NCEP (IBIS-RA) para os sítios K67 e BA712.

2.4. CCM3-IBIS

Neste estudo utilizamos também o modelo acoplado clima-biosfera CCM3-IBIS (Delire et al., 2003). O CCM3 (Community Climate Model) é um modelo de circulação geral da atmosfera, desenvolvido pela Divisão de Clima e Dinâmica

Global do NCAR (National Center for Atmospheric Research) (Kiehl et al., 1998). Foi utilizada a versão 3.6.16, calibrada para a resolução espectral T42 (~2,8° x 2,8°), com 18 níveis na vertical, num sistema de coordenadas híbrido sigma-pressão (sigma próximo à superfície, pressão no topo da atmosfera). A temperatura da superfície do mar foi considerada fixa, de acordo com a média da década de 1990. O IBIS operou na mesma resolução espacial T42, e com a vegetação dinâmica habilitada, assim a estrutura da vegetação e a distribuição dos ecossistemas eram influenciadas pelo clima. Foi utilizada a versão 2.6.4 calibrada para três sítios de floresta tropical amazônica (Imbuzeiro, 2005).

O modelo acoplado CCM3-IBIS simula as interações biofísicas de curto prazo entre a superfície e a atmosfera através das trocas de energia, água, carbono e momentum. Em seguida, simula as retroalimentações de longo prazo entre o ecossistema e o clima, gerando mudanças na cobertura vegetal e nos reservatórios de carbono. Esse tipo de modelagem permite considerar as retroalimentações biogeoquímicas da mudança da cobertura vegetal no clima regional. Durante os últimos anos, o CCM3-IBIS foi recalibrado usando dados de campo do experimento LBA (Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia) e de sensoriamento remoto (Imbuzeiro, 2005; Pereira, 2005; Yanagi, 2006). Os resultados do clima e da dinâmica de vegetação simulados pelo modelo acoplado foram extensivamente validados por Senna et al. (no prelo), indicando excelente desempenho na simulação do clima (precipitação, radiação solar incidente) e dos componentes básicos da dinâmica de vegetação, como a NPP.

Neste experimento realizamos uma simulação com três repetições (ensembles) por um período de 50 anos. Apenas os últimos 20 anos foram considerados na análise; os primeiros 30 anos foram descartados devido ao tempo necessário para o modelo atingir o equilíbrio em relação à umidade do solo e aos reservatórios de carbono. A cobertura vegetal inicial foi derivada do mapa de vegetação potencial obtido por Ramankutty e Foley (1999). Durante a simulação, a concentração atmosférica de CO₂ foi mantida constante em 380 ppmv.

3. DADOS OBSERVADOS

As simulações de NPP foram comparadas com observações de NPP obtidas em diferentes pontos da floresta Amazônica e um ponto de Mata Atlântica (Vieira et al. 2004; Turner et al. 2006; Malhi et al. 2009; Nunes, 2008). Procurou-se utilizar observações que fossem consistentes com cada simulação realizada. Assim, quando a simulação era forçada por dados de estações meteorológicas, foram utilizadas medições de NPP obtidas no mesmo ponto em período compatível. Quando a simulação era forçada por dados

climáticos de longo prazo em uma ampla região, para aumentar a representatividade, procurou-se utilizar dados obtidos em diversos anos e em diversos pontos. Finalmente, quando a simulação era feita por um modelo acoplado clima-vegetação, que simula o estado médio da biosfera, procurou-se utilizar dados de NPP que representassem a sua média de longo prazo.

A Tabela 1 mostra os dados usados para validação das simulações. Foram utilizados (a) dois sítios onde havia disponíveis medições de variáveis meteorológicas e NPP (K67 e BA712, único sítio de mata atlântica), para validação de três modelos; (b) três sítios em que havia disponíveis apenas dados de NPP anuais (K67, UFAC, ZF-2), para validação de um modelo (RATE); (c) três sítios com médias de longo prazo de NPP (Caxiuanã, Flona Tapajós e Manaus), na validação do CCM3-IBIS.

As observações de campo consistem em medições da taxa de incremento da biomassa viva em um intervalo de tempo relativamente longo, geralmente um ano. As medições são feitas separadamente nos troncos e folhas. A metodologia geral consiste em demarcar diversas parcelas experimentais no campo. A biomassa dos troncos é medida por meio de alometria pelo menos uma vez por ano, e a taxa de acúmulo é calculada pela diferença nas medições entre um ano e outro. A biomassa de folhas é medida através da integração ao longo de um ano das folhas caídas em cada parcela, enquanto a biomassa de raiz, geralmente é estimada por meio de relações indiretas disponíveis na literatura. Para maiores detalhes, consulte Vieira et al. 2004, Turner et al. 2006, Nunes, 2008 e Malhi et al., (2009).

4. RESULTADOS

A Tabela 2 apresenta os resultados dos modelos forçados por dados de estação meteorológica (SITE-EM, IBIS-EM), para os sítios da Flona Tapajós K67 em 2004 e BA712 em 2006. Os dois modelos utilizados, SITE e IBIS, conseguiram simular a NPP medida com um erro médio de 3,3% (uma medida da posição do erro), enquanto a média do módulo dos erros relativos (uma medida da dispersão do erro) foi de 6,6%. O erro absoluto médio para a Flona Tapajós foi de 4,3%, enquanto para o BA712 foi de 8,9%. Uma causa provável para o maior erro em BA712, é que neste sítio a estação meteorológica estava distante aproximadamente 5 km das parcelas em que a NPP era medida, enquanto na Flona Tapajós a distância média era de 1,5 km.

A Tabela 3 apresenta os resultados dos modelos forçados por dados de reanálise (SITE-RA, IBIS-RA). As simulações neste caso são idênticas às anteriores, exceto pela substituição dos dados da estação meteorológica pelos dados de reanálise do NCEP para o período. Uma comparação entre os resultados da Tabela 3 com a Tabela 2 indica o erro cometido ao se utilizar os campos de reanálise para forçar o modelo. Neste caso, nota-se que as estimativas de NPP aumentaram aproximadamente 20% para o sítio da Flona Tapajós e aproximadamente 10% para o sítio BA712. Essas superestimativas são coincidentes com as superestimativas da radiação solar incidente do NCEP em relação ao medido pela estação meteorológica para esses períodos (NUNES, 2008). Devido ao excesso de radiação solar

Tabela 2 – Resultados dos modelos forçados por dados de estação meteorológica (SITE-EM, IBIS-EM). O modelo SITE foi calibrado para minimizar o erro de NPP na simulação SITE-EM para o sítio km67 em 2004. O modelo IBIS foi rodado usando uma calibração genérica para quatro sítios de floresta tropical.

Sítio	Ano	Modelo	NPP (kg-C m ⁻² ano ⁻¹)		
			Valor observado	Valor simulado	Erro relativo
Flona Tapajós K67	2004	SITE-EM	1,055	1,049	-0,6%
Flona Tapajós K67	2004	IBIS-EM	1,055	0,971	-8,0%
BA712	2006	SITE-EM	1,366	1,214	-11,1%
BA712	2006	IBIS-EM	1,366	1,458	6,7%
Média dos erros relativos		–	1,211	1,198	-3,3%
Média do módulo dos erros relativos		–	–	–	6,6%

incidente, todos os valores simulados superestimam os dados observados, e o erro médio é de 12,2%.

A Tabela 4 apresenta os resultados do modelo forçado por dados de reanálise e sensoriamento remoto (RATE). Essas simulações são semelhantes aos apresentados na Tabela 3, exceto que neste caso o modelo RATE tem a sua dinâmica de área foliar e absorção de radiação fotossinteticamente ativa, controlada pela assimilação dos produtos de LAI e FAPAR do MODIS.

Por exemplo, comparando-se os resultados da simulação RATE com SITE-RA (essencialmente o mesmo modelo, exceto pela assimilação dos produtos do MODIS) para o sítio BA712, nota-se que a NPP diminui de 1,355 para 1,305 kg-C m⁻² ano⁻¹, quando os produtos do MODIS são incluídos na simulação. Neste caso, a simulação SITE-RA, como contava com mais

radiação solar incidente, produzia mais NPP e o ecossistema tendia a construir mais folhas. A assimilação dos produtos de LAI e FAPAR tem, portanto, o efeito de evitar que problemas na entrada de dados sejam transferidos para a estimativa de área foliar e fração da radiação solar absorvida.

O modelo RATE simulou a NPP com um erro médio de 3,4%, quando comparado contra sete medidas de campo. Este valor de erro é significativamente menor que o observado na Tabela 3, o que indica que as superestimativas de radiação solar incidente, observadas na Flona Tapajós K67 em 2004 e BA712 em 2006, não são representativas para toda a região.

A Tabela 5 apresenta os resultados do NPP simulados pelo modelo acoplado clima-biosfera (CCM3-IBIS). Nestas simulações, o modelo simula não apenas o clima, mas também

Tabela 3 – Resultados dos modelos forçados por dados de reanálise (SITE-RA, IBIS-RA)

Sítio	Ano	Modelo	NPP (kg-C m ⁻² ano ⁻¹)		
			Valor observado	Valor simulado	Erro relativo
Flona Tapajós K67	2004	SITE-RA	1,055	1,252	19,0%
Flona Tapajós K67	2004	IBIS-RA	1,055	1,169	10,8%
BA712	2006	SITE-RA	1,366	1,355	0,8%
BA712	2006	IBIS-RA	1,366	1,614	18,1%
Média dos erros relativos		–	1,211	1,348	12,2%
Média do módulo dos erros relativos		–	–	–	12,2%

Tabela 4 – Resultados do modelo forçado por dados de reanálise e sensoriamento remoto (RATE)

Sítio	Ano	Modelo	NPP (kg-C m ⁻² ano ⁻¹)		
			Valor observado	Valor simulado	Erro
Flona Tapajós K67	2001	RATE	1,230	1,338	8,8%
Flona Tapajós K67	2004	RATE	1,055	1,255	19,0%
ZF-2	2001	RATE	1,063	1,226	15,3%
ZF-2	2002	RATE	1,356	1,237	-8,8%
UFAC	2001	RATE	1,343	1,307	-2,7%
UFAC	2002	RATE	1,299	1,255	-3,4%
BA712	2006	RATE	1,366	1,305	-4,5%
Média dos erros relativos	–	–	1,245	1,275	3,4%
Média do módulo dos erros relativos	–	–	–	–	8,9%

a cobertura vegetal e os padrões de NPP relacionados. Para melhor representatividade, a Tabela 5 mostra dados de NPP de longo-prazo. O valor absoluto do erro médio obtido foi de 4,3%, enquanto o valor da média dos erros absolutos calculados em cada sítio foi de 16,7%. O máximo valor absoluto do erro obtido nessas simulações foi de 21,8%.

5. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

A Tabela 6 sintetiza os erros na estimativa da NPP obtidos ao rodar os diferentes modelos nas diferentes configurações, isto é, modelos forçados por dados da estação meteorológica, modelos forçados por dados de reanálise e por produtos de sensoriamento remoto, e pelo modelo acoplado clima-biosfera. A análise comparativa dos erros das simulações nos permite chegar a três conclusões.

Em primeiro lugar, observa-se que o valor absoluto da média dos erros obtidos foi muito semelhante, variando

entre 3,3% e 4,7%, o que provavelmente está próximo do limite mínimo deste erro, definido pela incerteza nos dados meteorológicos de entrada e nas próprias medições de NPP. Isso significa que modelos estado-da-arte são capazes de simular a NPP média de um grupo de pontos de maneira não-viesada, não importa como sejam configurados, seja no modo diagnóstico ou no modo prognóstico. Isso se traduz numa forte confiança no resultado desses modelos para valores médios regionais.

Em segundo lugar, a média do valor absoluto dos erros cresce à medida que o modelo vai ficando menos dependente de observações locais. Quando os modelos foram forçados por dados de estação meteorológica, o erro médio foi de 6,6%, crescendo para 8,9% quando o modelo foi forçado por dados de reanálise e produtos de sensoriamento remoto, e atingindo 16,7% no caso do modelo acoplado clima-biosfera. Esses valores indicam que modelos estado-da-arte de NPP têm um erro esperado em cada sítio menor que 10% no modo diagnóstico, e inferior a 20% no modo prognóstico.

Tabela 5 – Resultados do modelo acoplado clima-biosfera (CCM3-IBIS)

Sítio	Modelo	NPP (kg-C m ⁻² ano ⁻¹)		
		Valor observado	Valor simulado	Erro
Manaus (longo-prazo)	CCM3-IBIS	1,01	1,23	21,8%
Flona Tapajós (longo-prazo)	CCM3-IBIS	1,44	1,16	-19,4%
Caxiuanã (longo-prazo)	CCM3-IBIS	1,00	0,91	-9,0%
Média dos erros relativos	–	1,15	1,10	-4,3%
Média do módulo dos erros relativos (erro médio por sítio)	–	–	–	16,7%

Tabela 6 – Síntese dos erros na estimativa de NPP obtidos ao rodar os diferentes modelos nas diferentes configurações

Grupo de modelos	Valor absoluto da média dos erros (%)	Média do valor absoluto dos erros (%)	Máximo valor absoluto do erro (%)
Modelos forçados por dados de estação meteorológica	3,3	6,6	11,1
Modelos forçados por dados de reanálise e sensoriamento remoto	3,4	8,9	19,0
Modelo acoplado clima-biosfera	4,3	16,7	21,8

Em terceiro lugar, o máximo valor absoluto do erro tem um comportamento semelhante à média do valor absoluto dos erros, crescendo à medida que o modelo fica menos dependente de observações locais. Quando os modelos foram forçados por dados de estação meteorológica, o erro máximo foi de 11,1%, crescendo para 19,0% quando o modelo foi forçado por dados de reanálise e produtos de sensoriamento remoto, e atingindo 21,8% no caso do modelo acoplado clima-biosfera.

Resumindo, os modelos estado-da-arte de estimativa de NPP atingiram capacidade de fazer estimativas não-viesadas de valores médios regionais de NPP, tanto no modo diagnóstico quanto no modo prognóstico, com erros inferiores a 5%, enquanto o valor esperado do erro em cada sítio é inferior a 10% na configuração diagnóstica e inferior a 20% na configuração prognóstica.

As estimativas acima foram feitas apenas para floresta tropical perene, em sítios na Floresta Amazônica e na Mata Atlântica. Pesquisas futuras devem estender a base de dados de validação a outros tipos de vegetação brasileira, a fim de generalizar os resultados. Finalmente, os modelos atingiram um estado-da-arte em que a taxa de fixação de carbono por ecossistemas tropicais pode ser monitorada de maneira rotineira, sendo esperados baixos erros para essas estimativas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DELIRE, C.; FOLEY, J. A.; THOMPSON, S. Evaluating the carbon cycle of a coupled atmosphere-biosphere model. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 17, 1012, doi:10.1029/2002GB001870, 2003.
- FIELD, C. B.; RANDERSON, J. R.; MALMSTRÖM, C. M. Global net primary production: combining ecology and remote sensing. *Remote Sensing of the Environment*, v. 51, p. 74-88, 1995.
- FOLEY, J. A.; PRENTICE, I. C.; RAMANKUTTY, N.; LEVIS, S.; POLLARD, D.; SITCH, S.; HAXELTINE, A. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance and vegetation dynamics. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 10, p.603628, 1996.
- FOLEY, J.A.; LEVIS, S.; COSTA, M. H.; CRAMER, W.; POLLARD, D. Incorporating dynamic vegetation cover within global climate models. *Ecological Applications*, v. 10, p. 1620-1632, 2000.
- IMBUZEIRO, H. M. A. Calibração do modelo IBIS na Floresta Amazônica usando múltiplos sítios. 2005. 67f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.
- KALNAY, E.; KANAMITSU, M.; KISTLER, R. et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 77, p. 437-471, 1996.
- KIEHL, J. T. et al. The National Center For Atmospheric Research Community Climate Model: CCM3. *Journal of Climate*, v. 11, p. 1131-1149, 1998.
- KUCHARIK, C.J.; FOLEY, J.A.; DELIRE, C.; FISHER, V.A.; COE, M.T.; GOWER, S.T.; LENTERS, J.D.; YOUNG-MOLLING, C.; NORMAN, J. M.; RAMANKUTTY, N. Testing the performance of a dynamic global ecosystem model: water balance, carbon balance and vegetation structure. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 14, p.795825, 2000.
- MALHI, Y.; ARAGÃO, L. E. O. C.; METCALFE, D. B.; PAIVA, R.; QUESADA, C. A.; ALMEIDA, S.; ANDERSON, L.; BRANDO, P.; CHAMBERS, J. Q.; COSTA, A. C. L.; HUTYRA, L. R.; OLIVEIRA, P.; PATIÑO, S.; PYLE, E. H.; ROBERTSON, A. L.; TEIXEIRA, L. M. Comprehensive assessment of carbon productivity, allocation and storage in three Amazonian forests. *Global Change Biology*, 2009.
- NEW, M.; HULME, M.; JONES, P. Representing twentieth-century space-time climate variability. Part II: Development of 1901-96 monthly grids of terrestrial surface climate. *Journal of Climate*, v. 13, p. 2217-2238, 2000.
- NUNES, E. L. Algoritmo regional de monitoramento da taxa de fixação de carbono pelas florestas tropicais da América do Sul. 2008. 116f. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) – Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.
- PEREIRA, M. P. S. Interação entre ecossistemas terrestres e a atmosfera na Amazônia: conexões biogeofísicas e biogeoquímicas. 2006. 111f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.
- RAMANKUTTY, N.; FOLEY, J. A. Estimating historical changes in global land cover: croplands from 1700 to 1992. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 13, p. 997-1027, 1999.
- SANTOS, S. N. M.; COSTA, M. H. A simple tropical ecosystem model of carbon, water and energy fluxes. *Ecological Modelling*, v. 176, p. 291-312, 2004.
- SENNA, M. C. A., COSTA, M. H., PINTO, L. I. C., IMBUZEIRO, H. M. A., DINIZ, L. M. F., PIRES, G. F. Challenges to reproduce vegetation structure and dynamics in Amazonia using a coupled climate-biosphere model. *Earth Interactions*, no prelo.
- TURNER, D. P.; RITTS, W. D.; COHEN, W. B.; GOWER, S. T.; RUNNING, S. W.; ZHAO, M.; COSTA, M. H.; KIRSCHBAUM, A. A.; HAM, J. M.; SALESKA, S. R.; AHL, D. E. Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomes. *Remote Sensing of Environment*, 102, 282-292, 2006.
- VIEIRA, S.; DE CAMARGO, P. B.; SELHORST, D.; DA SILVA, R.; HUTYRA, L.; CHAMBERS, J. Q.; BROWN,

- I. F.; HIGUCHI, N.; DOS SANTOS, J.; WOFY, S. C.; TRUMBORE, S. E.; MARTINELLI, L. A. Forest structure and carbon dynamics in Amazonian tropical rain forests. *Ecosystem Ecology*, 140, 468-479, 2004.
- YANAGI, S. N. M. Albedo of an Amazon tropical rainforest: field measurements, remote sensing, modeling, and its influence on the regional climate. 2006. 128f. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) – Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.