

This file has been cleaned of potential threats.

If you confirm that the file is coming from a trusted source, you can send the following SHA-256 hash value to your admin for the original file.

3a8b2aadb4b90fcb99ec3514521d4df6ae1bd12d0d6d7c82c17b6ea3c3bb36df

To view the reconstructed contents, please SCROLL DOWN to next page.

The text that follows is a TRANSLATION
O texto que segue é uma TRADUÇÃO

Desmatamento evitado na Amazônia Brasileira: Simulação do efeito da Reserva de Desenvolvimento Sustentável do Juma

Please cite the original article:
Favor citar o trabalho original:

Yanai, A.M.; P.M. Fearnside, P.M.L.A. Graça & E.M. Nogueira. 2012. Avoided deforestation in Brazilian Amazonia: Simulating the effect of the Juma Sustainable Development Reserve. *Forest Ecology and Management* 282: 78-91. doi: 10.1016/j.foreco.2012.06.029

Preprint disponível em: <http://philip.inpa.gov.br>

Desmatamento evitado na Amazônia Brasileira: Simulação do efeito da Reserva de Desenvolvimento Sustentável do Juma

Aurora Miho Yanai^a, Philip Martin Fearnside^a, Paulo Maurício Lima de Alencastro Graça^a; Euler Melo Nogueira^a

^a Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA, Av. André Araújo, N° 2936, CEP 69060-000, Manaus, Amazonas, Brasil.

Tel.: +55 92 3643 1822; fax: +55 92 3642 8909.

E-mail: {yanai, pmfearn, pmlag, euler}@inpa.gov.br

RESUMO

A Reserva de Desenvolvimento Sustentável do Juma, localizada no estado do Amazonas, foi a primeira área protegida no Brasil a ser beneficiada com um projeto de Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação (REDD). Entretanto, os benefícios de carbono de projetos de REDD podem ser comprometidos pelo vazamento, ou seja, o deslocamento do desmatamento para fora dos limites da reserva. Através de técnicas de modelagem ambiental é possível simular cenários que representem mudanças de uso e cobertura da terra e assim avaliar as possíveis trajetórias e magnitudes do desmatamento. O objetivo deste estudo foi avaliar a efetividade da reserva do Juma em reduzir o desmatamento e estimar as emissões de carbono projetadas até 2050. Os cenários simulados foram: 1) cenário linha de base, sem a criação da reserva do Juma; 2) cenário com vazamento (CV) onde a criação da reserva ocasionaria um deslocamento espacial no desmatamento e 3) cenário com vazamento reduzido (CVR), onde a quantidade do desmatamento resultante do vazamento é reduzida. Considerando a área de estudo total (reserva do Juma + *buffer* de 120 km) haveria uma redução de 16,0% (14.695 km²) na cobertura florestal até 2050 no cenário linha de base, 15,9% (14.647 km²) no CV e 15,4% (14.219 km²) no CVR em relação ao que havia em 2008. A redução de cobertura florestal dentro da reserva do Juma até 2050 seria de 18,9% (1.052 km²) no cenário linha de base e de 7,1% (395 km²) no CV e CVR. A partir dos cenários simulados, foi estimada uma redução do estoque de carbono na área total de 1,63 Pg C (Pg = 10¹⁵ g = 1 bilhão de toneladas) em 2008 para 1,37 Pg C em 2050 no cenário linha de base e no CV e de 1,38 Pg C no CVR. Na área da reserva do Juma, o estoque de carbono seria reduzido de 0,10 Pg C em 2008 para 0,08 Pg C em 2050 (linha de base) ou 0,09 Pg C (CV e CVR). A reserva do Juma foi eficaz na redução de emissão de carbono até 2050, mas esta redução foi substancialmente menor do que a calculada no projeto REDD do Juma. O vazamento deve ser contabilizado nos projetos de REDD, pois o desmatamento resultante deste efeito pode gerar “ar quente” (crédito de carbono sem adicionalidade). Ao longo do tempo, os benefícios da reserva serão maiores e as perdas por vazamento serão recuperadas.

Palavras-chave: REDD, mudança de cobertura da terra, modelagem, vazamento, áreas protegidas, emissões de carbono.

1. Introdução

As emissões globais de gases do efeito estufa associadas à queima de combustíveis fósseis e mudanças no uso da terra já atingiram 9 Pg C.ano⁻¹ (IPCC, 2007) (1 Pg = 10¹⁵ g = 1 bilhão de toneladas). Emissões por mudanças de uso da terra representam 10-12% (van der Wert et al., 2009) a 17% (IPCC, 2007) das emissões antropogênicas globais. No Brasil, 77% (0,34 Pg C) das emissões de carbono em 2005 foram atribuídas ao setor de mudanças de uso da terra e florestas (MCT, 2010).

Na Amazônia brasileira, historicamente o desmatamento esteve concentrado no “arco do desmatamento” na região sul e leste da floresta, mas recentemente tem avançado para o sul do estado do Amazonas (Becker, 2005; INPE, 2010). Neste sentido, uma das estratégias implementadas para conter o desmatamento nessa região é a criação de áreas protegidas. Essas áreas, além de frear o desmatamento (Ferreira et al., 2005; Nepstad et al., 2006) exercem um papel fundamental na prestação de serviços ambientais relacionados à manutenção da biodiversidade, ciclagem de água e armazenamento de carbono (Fearnside, 2008a; Wunder et al., 2008).

A criação e gestão de áreas protegidas na Amazônia têm um custo elevado (IDESAM, 2009). Em razão disto, mecanismos financeiros têm sido promovidos para obter recursos para a conservação das florestas tropicais, tais como, projetos de Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação (REDD) (Nepstad et al., 2007; Stickler et al., 2009). Mecanismos de REDD são temas de controvérsias consideráveis no que diz respeito à efetividade, impacto social e econômico e o lugar que ocupa na mitigação do aquecimento global (ver revisões feitas por Angelson, 2008; Moutinho et al., 2011; Fearnside, 2011, 2012). Os governos federal e estadual consideram o REDD um importante instrumento de combate ao desmatamento e de valoração da floresta tropical quanto aos seus serviços ambientais, mitigando desse modo as mudanças climáticas (SDS, 2008). O projeto REDD da reserva do Juma foi desenvolvido e validado em 2008 e foi o primeiro projeto de desmatamento evitado no Brasil. O carbono estocado na floresta que está ameaçado pelo desmatamento e a degradação são recompensados através do pagamento às comunidades locais para conservar a floresta (Ghazoul et al., 2010). A abordagem utilizada pelo projeto REDD do Juma para justificar os benefícios do carbono foi baseada na linha de base projetada através do uso de modelos. A “adicionalidade” ou a redução de emissões em relação ao que poderia ocorrer na ausência do projeto é estabelecida através da comparação de resultados monitorados com a linha de base hipotética, a qual é representada pela projeção do desmatamento e emissão de gases de efeito estufa em um cenário sem o projeto. Dependendo da abordagem e dos pressupostos considerados no modelo de simulação, linhas de base projetadas podem ser mais altas ou mais baixas do que as linhas de base que simplesmente extrapolam o desmatamento histórico (Fearnside, 2011; Parker et al., 2009). Há uma preocupação de que projetos de REDD resultem apenas no deslocamento do desmatamento para fora dos limites do projeto, ou seja, o vazamento (Wunder et al., 2008). Isto inclui tanto o vazamento “dentro para fora” (onde os atores se deslocam para áreas fora da reserva) como também vazamento “fora para fora” (onde novos atores migrando para se estabelecerem em áreas de floresta na região são desviados para regiões fora da reserva) (Fearnside, 2009). É importante que este efeito seja mensurado para avaliar o nível de susceptibilidade do projeto e para assegurar se a adicionalidade e permanência do projeto são reais. A credibilidade e viabilidade de um projeto de REDD podem ser seriamente comprometidas por fatores como projeção do desmatamento do cenário linha de base mal dimensionado e ausência da quantificação do efeito de vazamento.

As taxas de desmatamento na Amazônia Brasileira têm oscilado substancialmente ao longo do tempo e entre locais e regiões (e.g., Fearnside, 2005, 2008a). Entre 2004 e

2011 a taxa total do desmatamento reduziu pela metade. A maior parte desta queda foi em áreas de agricultura e pecuária “consolidadas”, tais como, no estado do Mato Grosso, enquanto que esta redução é menor em áreas de “fronteira” que abrange a maior parte da área deste estudo. A redução do desmatamento no período de 2004 a 2008 foi particularmente associada ao preço internacional de exportação de *commodities*, tais como, a soja e a carne, e com a taxa de câmbio entre o Real brasileiro e outras moedas – o valor do real dobrou em relação ao dólar americano entre 2002 e 2007 e manteve valores acima deste nível até meados de 2012, fazendo com que as exportações das *commodities* da Amazônia fossem menos rentáveis e desencorajando o desmatamento. Depois de 2008 a economia começou a se recuperar, mas as taxas de desmatamento continuaram a declinar, presumivelmente refletindo um aumento nas medidas de comando e controle (Hargrave e Kis-Katos, 2011; Assunção et al., 2012). Investimentos em fiscalização estão correlacionados com a redução do desmatamento nos municípios durante este período (Barreto et al., 2011).

O presente estudo foi realizado com o intuito de (1) avaliar o efeito da criação da reserva do Juma sobre o desmatamento e (2) estimar as emissões de carbono nos cenários simulados com e sem a reserva no período de 42 anos de 2008 a 2050. Três cenários foram simulados usando o arcabouço (*framework*) do modelo AGROECO desenvolvido por Fearnside et al. (2009a): Cenário linha de base representando o que poderia acontecer nos próximos anos se a reserva do Juma não fosse criada; Cenário com vazamento (CV) que considera a criação da reserva do Juma e o efeito do vazamento decorrente de sua presença; Cenário com vazamento reduzido (CVR) que considera a criação da reserva e uma diminuição do efeito do vazamento projetado devido à presença da reserva.

O propósito deste estudo é contribuir para o aperfeiçoamento da atual metodologia utilizada nos projetos REDD no estado do Amazonas e avaliar o efeito das áreas protegidas na redução do desmatamento em áreas sob pressão antrópica.

2. Métodos

2.1. Área de estudo

A reserva do Juma foi criada pelo decreto nº 26.009 de julho de 2006 abrangendo uma área de 589.611,3 ha no município de Novo Aripuanã, na porção sul do estado do Amazonas (SDS, 2010). Este estudo compreendeu os limites da reserva e a sua área de entorno (*buffer* de 120 km), totalizando uma área de 9.742.624,8 ha (Fig.1). O objetivo do *buffer* foi incluir na simulação os municípios circunvizinhos (Apuí e Manicoré) e as rodovias (AM-174 e trechos da BR-319 e BR-230), que influenciam o processo de ocupação na região da reserva do Juma. Nesta área há também áreas protegidas (07 Terras Indígenas, 01 reserva de Proteção Integral e 04 reservas de Uso Sustentável) e comunidades que habitam dentro e no entorno da reserva, distribuídas próximas às margens dos rios e das estradas. Estas famílias fazem uso direto dos recursos naturais da reserva (SDS, 2010).

[Fig. 1 aqui]

No interior da reserva do Juma a cobertura florestal está bem conservada e o desmatamento na reserva concentra-se principalmente ao longo da rodovia AM-174 onde ocorrem atividades de extração ilegal de madeira e agricultura familiar pelas comunidades locais (IDESAM, 2009). Outras atividades como a mineração, pecuária e a

pesca predatória também têm contribuído para a perda dos recursos naturais da reserva. O desmatamento acumulado até 2009 na reserva do Juma totalizou 68,3 km², ou seja, 1,2% da área total da reserva (INPE, 2010).

2.2. Etapas da metodologia

A metodologia está dividida nas etapas descritas na Fig. 2. O modelo espacial do desmatamento AGROECO foi usado para a construção dos cenários (Fearnside et al., 2009a) (Fig. S1). Este modelo foi desenvolvido usando o programa DINAMICA EGO (Rodrigues et al., 2007; Soares-Filho et al., 2009).

[Fig. 2 aqui]

Os modelos desenvolvidos no DINAMICA EGO são baseados em autômatos celulares, que consiste nos seguintes elementos: célula (*pixel*), estado, vizinhança e regras de transição (Jacob et al., 2008). A transição de uma célula, de um estado para outro é influenciado pelo estado das células vizinhas (Yeh e Li, 2006). Todas as células são atualizadas simultaneamente a cada passo discreto de tempo (Sirakoulis et al., 2000).

A resolução espacial utilizada foi 250m, portanto, cada célula tinha uma área de 6,25 ha. A projeção cartográfica aplicada foi a UTM (Universal Transversa de Mercator) correspondendo a Zona UTM 20 Sul e Datum WGS 1984

2.3. Elaboração dos dados de entrada

As variáveis de entrada do modelo consistiram de mapas de uso e cobertura da terra, mapa de variáveis estáticas, mapa de atratividade, mapa de fricção, mapa de estradas atuais e planejadas (Tabela 1, Fig. S2) e dos coeficientes dos pesos de evidência.

[Tabela 1 aqui]

2.3.1. Pesos de Evidência e Cálculo do Mapa de Probabilidade de Transição

O método estatístico dos “pesos de evidência” determina a probabilidade de ocorrer um evento dado um ou mais fatores de evidência (Bonham-Carter et al., 1989). Essas probabilidades são usadas no modelo com a intenção de determinar a probabilidade de uma célula mudar de um estado para outro dado uma evidência. As transições consideradas foram:

- **Desmatamento:** Floresta → Desmatamento
- **Regeneração:** Desmatamento → Vegetação secundária
- **Corte da vegetação secundária:** Vegetação secundária → Desmatamento.

Os termos “desmatamento” e “corte da vegetação secundária” diferem quando se referem ao processo de transição, mas quanto ao valor da célula, não há distinção entre as classes “desmatamento” e “corte da vegetação secundária”. Os fatores considerados como evidência neste estudo foram os mapas de variáveis estáticas e os mapas de cobertura da terra e estradas. Assim, a cada iteração o modelo calcula e atualiza o mapa de probabilidade de transição. Esse mapa indica as áreas mais favoráveis para cada tipo de transição com base no método bayesiano de pesos de evidência (Soares-Filho et al., 2002, 2009).

No modelo AGROECO, a transição vegetação secundária → floresta também foi considerada. Essa transição é feita automaticamente no modelo através de um contador de permanência de células de vegetação secundária. Células que permaneceram intactas por 30 iterações (anos) foram automaticamente transformadas em floresta. Para esta transição, não foi necessário utilizar pesos de evidência ou taxas de transição.

O pressuposto do método dos pesos de evidência é que os padrões de predição são condicionalmente independentes (Bonham-Carter et al., 1989). O DINAMICA EGO permite testar essa presunção de independência usando um “functor” ou subrotina, que determina a correlação dos pesos de evidência. Esse functor usa o teste pareado para o mapa categórico, tal como, o coeficiente de Cramer, coeficiente de contingência e Incerteza da Informação Conjunta. Índices com valores abaixo de 0,5 são considerados adequados para representar independência (Agterberg e Bonham-Carter, 2005). Assim, nós testamos a correlação entre os pares de mapa usando o modelo disponível no tutorial do programa DINAMICA EGO (mais informações no material suplementar).

2.4. Cálculo das taxas de transição

As taxas de transição representam a proporção de células que serão transformadas de uma classe para outra, de acordo com transições previamente estabelecidas. Assim, é necessário multiplicar a taxa pelo número de células de uma dada classe para calcular a quantidade de mudança em termos de número de células (taxa bruta). Neste sentido, a taxa de desmatamento de um ano “t” é multiplicada pela extensão de floresta remanescente para um ano “t-1”. Com isso, obtém-se a área a ser desmatada no ano “t” expresso pelo número de células de floresta que será transformada em desmatamento.

O AGROECO usa o conceito de “superfície de floresta fundiária” (SFF), que representa uma faixa de 2 km de cada lado da estrada. Essa faixa, procedente do termo “área fundiária” é usada para descrever a percepção de pequenos proprietários assentados ao longo de rodovia, visto que eles têm o direito de reivindicar a terra desocupada atrás de suas propriedades. Essa percepção não tem bases legais, mas influencia o comportamento (Fearnside et al., 2009a). A área (ha) de “SFF” e de “floresta fora da SFF” são atualizadas a cada iteração de acordo com o incremento de estradas e desmatamento no modelo.

2.4.1. Taxa de desmatamento

As taxas de desmatamento (proporção) foram calculadas através da transferência simultânea de dados entre o DINAMICA EGO e Vensim. O DINAMICA EGO repassa ao Vensim um mapa categórico com as seguintes classes: floresta, estradas, desmatamento, vegetação secundária e SFF. O Vensim, por sua vez, calcula as taxas de desmatamento usando a equação da Tabela 2. Essa equação foi desenvolvida usando dados de desmatamento, floresta e SFF dos mapas de 2003 e 2008 (Tabela S1). Primeiramente foi calculada a razão entre a área média desmatada por ano (2003 e 2008) e a área de floresta na SFF. O valor de 0,02333 foi obtido deste cálculo. Este valor indica que 2,33% da floresta foram desmatadas dentro da SFF neste intervalo de tempo. O cálculo da área de floresta fora da SFF foi feito do mesmo modo, obtendo-se um valor de 0,00023604.

[Tabela 2 aqui]

2.4.2. Taxa de regeneração e corte da vegetação secundária

As taxas de regeneração e corte da vegetação secundária foram constantes (Tabela 2). Isso foi necessário devido à falta de parâmetros e dados para elaboração de uma equação específica para ser utilizada no cálculo dessas taxas. A taxa de corte da vegetação secundária foi estimada com base nos mapas de cobertura da terra de 2003 e 2008. A partir do cruzamento desses mapas, obteve-se a área total de corte da vegetação secundária para o período de cinco anos. Esse valor foi posteriormente dividido pela área de vegetação secundária total (2003) e calculado a média da área de corte da vegetação por ano.

A taxa de regeneração foi estimada de modo semelhante. Através do cruzamento dos mapas de 2003 e 2008 foi obtida a área média regenerada por ano para o intervalo de cinco anos. Esse valor foi posteriormente dividido pelo valor médio da área desmatada que estava presente no mesmo intervalo de tempo.

2.4.3. Taxa de vazamento do desmatamento

Neste estudo, o vazamento ocorreu devido à criação da reserva do Juma; assim, parte do desmatamento que ocorreu dentro da reserva no cenário linha de base foi distribuído para outras áreas fora do seu limite no CV. A estimativa da taxa de vazamento foi obtida a partir da diferença entre o linha de base e CV de 2050 na área da reserva do Juma. Esse valor então dividido pelo número total de iterações a fim de estimar o número de células deslocadas por ano. Diante disso, as taxas de desmatamento sem o efeito do vazamento foram calculadas por meio da equação da “taxa sem vazamento” (Tabela 2).

“Células de corte da floresta (CV)_{ano}” é o número total de células de floresta desmatada num dado ano no cenário com vazamento, “Células vazadas_{ano}” é o número de células que foram desmatadas dentro da reserva do Juma no linha de base e que foram deslocadas para fora da reserva no cenário com vazamento, e “Células de floresta (CV)_{ano}” é o número de células de floresta remanescente num dado ano no cenário com vazamento. Esse valor foi somado ao número de células vazadas para obter a estimativa da floresta remanescente total sem vazamento numa dada iteração. Devido à dificuldade de inserir valores estimados anuais, nós optamos por usar uma taxa média de vazamento reduzido. Essa taxa foi calculada pela diferença entre a média aritmética de taxas simuladas no CV e de taxas calculadas de vazamento reduzido. A taxa resultante (0,000156) foi inserida no cálculo de forma que este valor foi subtraído da taxa simulada de desmatamento a cada ano (Tabela 2).

A taxa de vazamento para regeneração não foi calculada; pois, a formação de vegetação secundária está correlacionada com a área desmatada. Espera-se que, com a redução da área desmatada, haja uma redução na área ocupada pela vegetação secundária. Essa redução na área de vegetação secundária, por sua vez, ocasionaria uma redução no corte da vegetação secundária.

2.5. Funções de transição (*expander* e *patcher*)

As funções de transição determinam como as manchas serão alocadas na paisagem de acordo com as áreas e o número de mudanças previamente determinadas pelo modelo. O *expander* age exclusivamente na expansão de manchas prévias de uma dada classe de cobertura da terra. O *patcher* é responsável pela formação de novas manchas através de mecanismo de semeadura. Esse processo ocorre quando *patcher* seleciona a célula núcleo da nova mancha e então o número específico de células é determinado ao redor da célula núcleo (Soares-Filho et al., 2002).

O modelo divide o número de células a serem modificadas entre as duas funções de transição. Neste caso, foi estabelecido que 30% das células da transição floresta → desmatamento seriam aplicadas na função *expander* e o restante 70% na função *patcher*. Esses valores foram definidos durante o processo de calibração. Diferentes valores das funções de *patcher* e *expander* foram testados para comparar os resultados do padrão espacial de mudança. Os valores que visualmente indicaram o melhor ajuste com o padrão espacial real do desmatamento foram 30% (*expander*) e 70% (*patcher*). Apesar da maior parte das manchas serem formadas pela função *patcher*, essas manchas são geralmente alocadas próximas a áreas previamente desmatadas e próximas a estradas.

2.6. Calibração e validação do modelo

O ajuste dos parâmetros do modelo foi feito no período de 2003-2008. Nesta etapa, o coeficiente dos pesos de evidência e as taxas de transição foram ajustados a fim de obter uma adequação entre o mapa simulado e o mapa de referência (real). Após a etapa de calibração foi feita a validação do modelo. A validação tem o intuito de avaliar se o modelo usado é consistente de acordo com a aplicação pretendida (Rykiel, 1996).

O DINAMICA EGO utiliza o teste *fuzzy* para a comparação similaridade, que é uma modificação do método desenvolvido por Hagen (2003). Esse método considera a localização de uma mudança dentro de uma vizinhança da célula central. Assim, dependendo do tamanho da janela da célula que representa a vizinhança da célula central, a similaridade entre os mapas (real e simulado) pode variar de 0% a 100%, onde 0% de similaridade indica que os dois mapas são completamente diferentes e 100% indica que eles são idênticos (Soares-Filho et al., 2009; Walker et al., 2010).

O resultado do ajuste espacial obtido usando a similaridade de múltiplas janelas foi de 57,1% para o tamanho de janela padrão (5×5 células). Essa porcentagem aumenta conforme o aumento da janela, chegando a 73,8% para um tamanho de janela 11x11 (Fig. S3). Esse método avalia somente o ajuste espacial do modelo. Para verificar o ajuste de acordo com a quantidade de mudança, a comparação foi feita entre o número de células do mapa de cobertura da terra simulado e real. O percentual de erro para cada classe de uso foi de 0,14% (floresta), 4,74% (desmatamento) e 1,33% (vegetação secundária) (Tabela S2).

2.7. Análise da efetividade da reserva do Juma

Os cenários simulados com a reserva do Juma (CV e CVR) foram usados para analisar o avanço do desmatamento dentro e fora da reserva. A análise baseou-se no mapa produzido a cada iteração no modelo. Esse mapa foi cruzado com a máscara da reserva do Juma. Isso fez com que somente a área da reserva fosse visível, sendo a área restante (área do *buffer*) mascarada, assim, o desmatamento dentro da reserva do Juma pôde ser quantificado.

A quantificação do desmatamento na área de entorno da reserva foi feita por meio do cruzamento entre o mapa de cobertura da terra simulado e o *buffer* (10 km). Deste procedimento, obteve-se o número de células de cada classe (floresta, desmatamento e vegetação secundária) na área de entorno da reserva do Juma. O cruzamento foi feito para os 42 mapas simulados no CV e CVR. Os dados foram posteriormente tabulados, e a razão entre o número de células de desmatamento na área do *buffer* e dentro da reserva foi calculada para cada ano. Isso permitiu estimar o quão eficaz foi a reserva do Juma em conter o avanço do desmatamento até 2050. Para avaliar a influência da reserva do Juma na área ao longo da rodovia AM-174, foi usado um *buffer* de 10 km da rodovia

(somente no trecho que corta a reserva). Posteriormente, os mapas simulados de cobertura da terra foram cruzados com o *buffer* para analisar a evolução do desmatamento ao longo da rodovia. Essa análise foi feita para todos os mapas simulados nos três cenários. Desta forma, foi possível avaliar o avanço do desmatamento na área ao longo da rodovia com e sem a presença da reserva do Juma.

2.8. Estimativas de biomassa e emissão de carbono

As estimativas de biomassa média seca pesadas acima e abaixo do solo para cada tipo de floresta foram baseadas em Nogueira et al. (2008). As estimativas para as vegetações não-florestais foram baseadas em Fearnside et al. (2009b) e Olson (1983). As estimativas do estoque inicial de biomassa foram feitas a partir do cruzamento do mapa de vegetação original e o mapa de floresta remanescente de 2008. A partir deste procedimento, a área de floresta remanescente (ha) foi obtida para cada tipo de vegetação. Essa área foi então multiplicada pela biomassa média (por ha) correspondente ao tipo de vegetação. O estoque de carbono foi obtido assumindo que 1 ton (Megagrama = Mg) de biomassa seca contem 0,485 Mg C (Silva, 2007). Para estimar a emissão de carbono a partir do corte da floresta a cada ano, o cruzamento entre o mapa de cobertura da terra “t” e “t+1” foi feito, obtendo-se o número de células de floresta que foram desmatadas de um ano para outro. O mapa resultante de células desmatadas foi cruzado com o mapa de vegetação para identificar a biomassa média e o estoque de carbono das áreas desmatadas. Esse procedimento, assim como, os descritos posteriormente foi feito para os três cenários simulados neste estudo.

2.8.1. Emissão pelo corte da vegetação secundária

A metodologia usada para estimar o carbono e as emissões pelo corte da vegetação secundária foi baseada em Fearnside e Guimarães (1996). Essa abordagem foi escolhida (1) devido à ausência de estudos específicos de biomassa da vegetação secundária para a porção sul do estado do Amazonas e (2) devido à atividade principal nesta região ser a pecuária, similar ao uso da terra nas áreas de Paragominas e Altamira, Pará, estudado por Fearnside e Guimarães (1996). Assim, parte significativa da vegetação secundária formada e cortada seria derivada de pastos abandonados.

No presente estudo, as estimativas de emissão de carbono provenientes do corte da vegetação secundária basearam-se na biomassa média (acima e abaixo do solo) de vegetação secundária com cinco anos de idade estimada por Fearnside e Guimarães (1996). Cinco anos representa o tempo para metade da vegetação secundária de um dado ano ser cortada baseado em estimativas de Almeida et al. (2010), sendo que a metade da vida da vegetação secundária na Amazônia é 4,89 anos.

A média aritmética da biomassa em Paragominas e Altamira ($49,2 \text{ Mg ha}^{-1}$) foi multiplicada pela área (ha) da vegetação secundária cortada por ano e, posteriormente, esse valor foi multiplicado pelo carbono contido na vegetação secundária (0,45) estimado por Silva (2007). Assim, obteve-se a estimativa da emissão líquida anual por corte da vegetação secundária.

2.8.2. Absorção do carbono pela vegetação secundária

Para fins de cálculo de emissão líquida, a absorção de carbono pela vegetação secundária foi determinada pela taxa de crescimento desta vegetação derivada de Fearnside e Guimarães (1996). Presumiu-se que o padrão da estrutura etária da vegetação secundária de Paragominas e Altamira poderia ser aplicado no nosso estudo.

A taxa de crescimento da biomassa total (acima e abaixo do solo) obtido ($8,40 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) foi multiplicado pela área total (ha) da vegetação secundária num dado ano e, posteriormente, esse valor foi multiplicado pelo carbono contido na vegetação secundária (0,45) estimado por Silva (2007). Assim, a estimativa de absorção anual pela vegetação secundária na paisagem foi obtida.

2.8.3. Absorções e emissões de carbono herdadas

Os cálculos de emissões herdadas são necessários, pois a contabilização de emissões de carbono por corte da floresta foi feita somente a partir de 2009 (o primeiro ano da simulação) e as estimativas de absorção de carbono pela vegetação secundária considerou a área total desta vegetação presente em 2009. Portanto, parte da vegetação secundária mapeada em 2008 que permaneceu em outros anos também foi incluída, e o crescimento desta vegetação secundária representa uma absorção herdada. Assim, tanto a absorção quanto a emissão herdada precisam ser estimadas para prevenir um viés nos cálculos de emissões líquidas.

As emissões herdadas foram calculadas a partir dos dados de desmatamento do PRODES (1997, 2003 e 2008) e a partir da biomassa média da floresta (acima e abaixo do solo) baseado em Nogueira et al. (2008).

Os cálculos basearam-se em estudos feitos por Fearnside (2002, 2003a), que usou um cenário de três requeimas ao longo de um período de 10 anos, considerando que o pasto é normalmente requeimado no intervalo de 2-3 anos a fim de impedir o estabelecimento de plantas invasoras. Neste cenário, o percentual de carbono emitido pode ser consideravelmente alto. Por isso foi necessário para ajustar os valores de biomassa perdida pelo efeito de requeimas. Essa biomassa foi multiplicada pelo carbono contido na floresta primária (0,485). O valor da emissão herdada obtido foi adicionado às outras fontes de emissão provenientes do corte da floresta e corte da vegetação secundária.

2.8.4. Cálculo do balanço anual de emissões líquidas

As estimativas de emissões líquidas anuais foram obtidas pela diferença entre as fontes de emissão, isto é, a soma de emissões a partir do corte da floresta, corte da vegetação secundária e emissões herdadas do desmatamento de anos anteriores, menos o sumidouro, proveniente da absorção pela vegetação secundária.

3. Resultados

3.1. Simulação do desmatamento

De modo geral, os resultados da simulação nos três cenários para a área total de estudo foram similares (Fig.3). A redução na cobertura da floresta na área total de estudo (reserva do Juma + *Buffer* de 120 km) foi de 16,0% (linha de base), 15,9% (CV) e 15,4% (CVR), em relação aos valores de 2008. A similaridade nos resultados da linha de base e CV indica que o desmatamento evitado na área da reserva do Juma no CV foi

deslocado para outras áreas de floresta. No CVR houve uma redução no desmatamento de 3,2% em relação ao linha de base e de 2,9% em relação ao CV (Tabela S3).

[Fig. 3 aqui]

Entretanto, quando somente a área da reserva do Juma é considerada, o cenário linha de base projetou uma redução de 18,9% na cobertura florestal em comparação a 2008, enquanto no cenário com a presença da reserva (CV e CVR) essa redução foi de 7,1%. Quando os cenários são comparados, verifica-se que na ausência da reserva do Juma haveria uma redução de 62,5% na cobertura florestal em comparação aos cenários com a reserva (Tabela S4).

Comparando o desmatamento acumulado no mapa inicial (2008) com o mapa simulado final (2050), na área total de estudo, o desmatamento teve um aumento de 533,0% (linha de base), 531,5% (CV) e de 516,1% (CVR). Considerando somente a área da reserva do Juma, esse acréscimo atinge 1.419,3% (linha de base), 551,2% (CV) e de 555,0% (CVR). A área de vegetação secundária na área total de estudo, teve um acréscimo de 414,7% (linha de base), 410,9% (CV) e de 397,7% (CVR). Na área da reserva do Juma, esses valores foram de 5.729,7% (linha de base), 1.627,0% (CV) e 1.500,0% (CVR) (Tabela S3 e Tabela S4).

O desmatamento médio anual na área total de estudo foi similar em todos os cenários: 349,9 km² (linha de base), 348,7 km² (CV) e de 338,5 km² (CVR). Na reserva do Juma, aproximadamente 25,1 km² da cobertura florestal foram desmatadas por ano no cenário linha de base e 9,4 km² no CV e CVR. A área média anual regenerada na área total foi de 106,9 km² (linha de base), 105,5 km² (CV) e de 102,8 km² (CVR). Somente para a reserva do Juma, a área regenerada anualmente foi em média, 9,6 km² (linha de base), 2,2 km² (CV) e 2,1 km² (CVR). A regeneração no CVR e CV foi menor em comparação ao cenário linha de base devido à área desmatada nesses cenários ser menor.

Na área total de estudo 80,5 km² da vegetação secundária foi cortada anualmente no cenário linha de base, 79,3 km² no CV e 77,4 km² no CVR. Na reserva do Juma, a média da área de vegetação secundária cortada anualmente foi de 6,4 km² no linha de base e de 1,2 km² no CV e CVR. É importante ressaltar que a área regenerada anualmente foi superior à área de vegetação secundária cortada. Isto se deve ao fato que não há distinção no modelo entre o valor da célula de desmatamento que é derivado do corte da floresta daquele decorrente do corte da vegetação secundária.

O percentual médio de células de vegetação secundária que permaneceram intactas na área total por 30 iterações e, posteriormente foram transformadas em células de floresta depois desse período foi de 7,2% (22,2 km²) no linha de base, 7,6% (23,2 km²) no CV e de 7,4% (22,4 km²) no CVR. Na reserva do Juma, esses valores foram de 4,8% (0,6 km²) no linha de base, 25,9% (1,9 km²) no CV e 20,3% (1,8 km²) no CVR.

Com a presença da reserva do Juma houve uma redução no desmatamento e no corte da vegetação secundária. Assim, a maior parte da vegetação secundária que estava presente dentro da reserva no início da simulação permaneceu inalterada através do

tempo, resultando numa área regenerada maior no CV e CVR em comparação ao cenário linha de base.

3.2. Avaliação do efeito de vazamento nos cenários projetados

A partir da comparação entre o número de células entre os mapas (2050) no cenário linha de base e CV, o número correspondente de células de vazamento para cada classe foi estimado. Assim, num possível cenário sem vazamento, o número de células de floresta, desmatamento e vegetação secundário no interior da reserva do Juma seria o mesmo que no CV. Por sua vez, na área externa (excluindo a reserva do Juma), o número de células de cada classe deveria ser o mesmo que no cenário linha de base. Baseada nesta informação o percentual de vazamento do desmatamento foi de 92,7% no CV e de 27,6% no CVR. Assim, a simulação no CVR teve uma redução de 65,1% (6.852 células) no vazamento em relação ao que foi simulado no CV (Tabela S5).

3.3. Quantificação do desmatamento dentro e no entorno da reserva do Juma

Os cenários demonstraram que até 2050 o desmatamento acumulado na área de entorno da reserva do Juma foi 2,0 (CV) e 2,1 (CVR) vezes maior do que dentro da reserva. Devido à área desmatada ser maior na área de entorno da reserva, a formação da vegetação secundária também foi maior. A proporção de área ocupada pela vegetação secundária foi 4,0 (CV) e 4,4 (CVR) vezes maior na área de entorno do que dentro da reserva (Fig. 4a e b). A proporção de área ocupada pelas estradas projetadas pelo modelo no entorno da reserva foi de 2,5 (CV) e 2,6 (CVR) vezes maior em comparação a área interna da reserva (Fig. 4c). Nesta área, a maior parte do desmatamento estava ao longo da rodovia AM-174.

[Fig. 4 aqui]

Os resultados da simulação também indicaram que a presença da reserva do Juma inibiu o desmatamento na área ao longo da AM-174 numa faixa de 10 km de cada lado da estrada. Entretanto, essa inibição ocorreu somente no trecho da rodovia dentro da reserva. Ao longo do período de 42 anos houve uma redução na cobertura florestal de 42,5% (581,4 km²) no cenário linha de base, 24,3% (332,8 km²) no CV e de 25,6% (350,6 km²) no CVR. Além disso, detectou-se uma redução no número de estradas secundárias projetadas pelo modelo quando comparado ao cenário linha de base: 39,7% (31,1 km²) para o CV e 34,0% (26,6 km²) para o CVR.

3.4. Estimativas de emissões de carbono e estoques nos cenários simulados

O estoque de carbono presente em 2008 na área total de estudo foi estimado em 1,63 Pg C; considerando somente a reserva do Juma, este estoque foi estimado em 0,10 Pg C. O estoque inicial (2008) estimado para a área total de estudo teve uma redução de 15,7% (0,26 Pg C) no cenário linha de base e no CV e de 15,2% (0,25 PgC) no CVR. Na área

da reserva do Juma as reduções do estoque inicial foram estimadas em 18,6% (0,02 Pg C) na linha de base e de 7,1% (0,01 Pg C) no CV e CVR (Fig. 5).

[Fig. 5 aqui]

A Fig. 6 indica a estimativa de emissão líquida para a área total e a reserva do Juma. Comparando a linha de base e o CVR houve uma redução de 3,3% ($8,5 \times 10^6$ Mg C) nas emissões de carbono. Para o CV e CVR essa redução foi de 2,9% ($7,3 \times 10^6$ Mg C). Se considerar somente a reserva do Juma, a criação da reserva reduziu as emissões de carbono em 61,8% ($11,6 \times 10^6$ Mg C) até 2050.

[Fig. 6 aqui]

4. Discussão

4.4. Projeções do cenário linha de base

A projeção do cenário linha de base até 2050 demonstrou que o desmatamento na reserva do Juma não avançará a tal ponto de comprometer completamente a cobertura florestal da reserva. Isso pode ser justificado pelo fato de que a maior parte do desmatamento simulado foi alocada em áreas onde já havia uma intensa atividade antrópica, tais como, próxima ao município de Apuí e áreas próximas a rodovia BR-230 (Graça et al., 2007). De acordo com o modelo, essas áreas são consideradas mais atrativas ao desmatamento. Portanto, já havia uma tendência histórica que favorecia o desmatamento nessa região, principalmente devido à pressão proveniente da expansão da agricultura e pecuária (Cepal, 2007; Carrero e Fearnside, 2011; Cenamo et al., 2011). Além disso, o crescimento populacional no município de Novo Aripuanã é moderado, sendo que os principais usos da terra estão relacionados com a agricultura de subsistência, atividades de extrativismo florestal e pesca. O desmatamento para a abertura de pastagem ocorre próximo ao município de Apuí e ao projeto de assentamento Acari, o qual está relacionado à população de Apuí (Cenamo et al., 2011).

O cenário linha de base do presente estudo demonstrou que até 2050 haveria uma redução de 18,9% ($1.052,4 \text{ km}^2$) na cobertura florestal da reserva do Juma. Esse resultado difere substancialmente do cenário linha de base usado pelo projeto REDD do Juma (IDESAM, 2009), o qual baseia-se no cenário *business as usual* (BAU) simulado por Soares-Filho et al. (2006) para a Bacia Amazônica (Fig. 7). O modelo desenvolvido por esses autores (SimAmazonia) projetou uma redução na cobertura florestal de 80,7% ($4.512,0 \text{ km}^2$) até 2050 na reserva do Juma. A projeção de desmatamento do SimAmazonia é 4,3 vezes maior do que o desmatamento projetado para o cenário linha de base do presente estudo.

[Fig. 7 aqui]

A razão principal para essa diferença é que o incremento anual do desmatamento simulado por Soares-Filho et al. (2006) para a reserva do Juma foi influenciado pela

área de floresta remanescente presente numa subregião cuja área total era de 1.647.690 km² ou 40% da área de floresta original da Amazônia Brasileira. Esses autores usaram um conceito de subregiões definidas a partir de uma estratificação socioeconômica, onde o estado do Amazonas e partes dos estados do Pará e Mato Grosso com áreas consideráveis de floresta foram agrupadas em uma única subregião. Nesta subregião, aproximadamente 89,9% da cobertura florestal estava intacta na paisagem inicial (2001). A área anual desmatada foi calculada com base na extensão de floresta remanescente desta subregião (i.e., multiplicando a taxa anual, expressa como uma proporção, vezes a área de floresta). Entretanto, a alocação espacial das células desmatadas concentrou-se nas porções nordeste e sudeste da subregião visto que nessas áreas já havia um desmatamento prévio, além disso, nessas áreas o desmatamento seria influenciado pela pavimentação de rodovias como a BR-319, BR-230 e BR-210.

Outra diferença entre o resultado da nossa linha de base e a linha de base usada pelo projeto REDD do Juma é que o projeto REDD exclui certas áreas da reserva, tais como, áreas desmatadas antes do início do projeto, propriedades privadas, áreas sob influência da rodovia AM-174, área de uso comunitário e áreas com vegetação não-florestal (IDESAM, 2009). O documento de concepção do projeto REDD do Juma (<http://www.fas-amazonas.org/pt/secao/projeto-juma>) descreve uma estimativa de redução da cobertura florestal de 65,8% (3.661,5 km²) até 2050.

É importante enfatizar também que o modelo de Soares-Filho et al. (2006) indica um aumento gradual nas taxas de desmatamento da subregião em questão. Esse aumento foi devido à pavimentação da rodovia BR-319 (2012 e 2018) e trechos da rodovia BR-230 (2025) (Soares-Filho et al., 2006). A maior diferença ocorreu depois de 2030, quando o efeito desses eventos no modelo SimAmazonia refletiram na área do Juma. As pavimentações de rodovias associadas à projeção de estradas secundárias contribuíram para o aumento do desmatamento na área da reserva do Juma. O presente estudo não considerou a pavimentação de rodovias, somente considerou a construção das rodovias AM 360 e BR-174. Essas rodovias causaram um aumento moderado na taxa de desmatamento. Deste modo, o efeito dessas rodovias não ocasionou uma alteração drástica na cobertura florestal da reserva do Juma.

A velocidade com que o desmatamento ocorre na reserva do Juma e na área de entorno é a maior diferença entre os resultados da nossa linha de base e a de Soares-Filho et al. (2006). Dado mais tempo, nosso modelo também demonstraria uma perda significativa de floresta. Quando nosso modelo é rodado até o ano de 2100, o resultado é qualitativamente similar ao resultado de 2050 de Soares-Filho et al. (2006) (Fig. S4). Os principais fatores que afetam o valor atribuído às emissões evitadas através da criação da reserva é o prazo das emissões (e de emissões evitadas) e o valor relacionado ao tempo por meio do desconto e da escolha do horizonte de tempo (Fearnside, 2009). Quando o desmatamento reduz significativamente a floresta disponível na área de entorno da reserva, como poderia ocorrer até 2100 em nosso modelo (Fig. S4), os benefícios do carbono que teriam sido perdidos devido ao vazamento ao longo dos anos será recuperado, pois o desmatamento que eliminaria a floresta dentro da reserva no cenário linha de base (sem a reserva) será impedido de ocorrer (Fearnside, 2009).

Observações ecológicas feitas em diferentes escalas espaciais podem implicar em resultados extremamente diferenciados; quanto mais grosseira for a resolução espacial usada na modelagem, maior a chance de haver erros decorrentes de distorções e perdas de informações (Yeh e Li 2006). Os modelos construídos no DINAMICA EGO

são baseados em mecanismos de autômatos celulares, onde o estado de uma célula é determinado em função das células vizinhas e as probabilidades espaciais de uma célula mudar de um estado para outro é calculado para cada célula de acordo com as transições especificadas no mapa de cobertura da terra. Então, dependendo da resolução espacial utilizada, a alocação das células nas áreas mais favoráveis para cada transição pode ser modificada no mapa de probabilidade, consequentemente a dinâmica da paisagem dos cenários simulados será diferente.

Os mapas de entrada utilizados no modelo de Soares-Filho et al. (2006) tinham uma resolução espacial de 1 e 2 km, e os mapas simulados tinham resolução espacial de 1 km. IDESAM (2009) menciona que a dificuldade de ter usado cenários com células de 1×1 km é que o tamanho original dos atributos não corresponde com a realidade da área, o que dificulta delimitar a área de floresta com potencial para gerar créditos de carbono por REDD.

Embora a resolução espacial usada no atual estudo ter sido de 250m, foi possível detectar perda de informações. Por exemplo, áreas de vegetação secundária mapeadas com imagens de Landsat-5 TM com resolução espacial de 30m foram suprimidas quando as imagens foram degradadas para 250m.

Projeções feitas pelo modelo SimAmazonia (Soares-Filho et al., 2006) foram importantes para demonstrar as possíveis trajetórias da floresta Amazônica em escala regional. Entretanto, é importante enfatizar que o uso desse tipo de abordagem numa escala local, como no caso de uma reserva, pode ser perigoso para estimar as reduções de emissão de carbono em projetos de REDD, pois pode superestimar as taxas de desmatamento.

Se o cenário linha de base superestima a taxa de desmatamento na área do projeto, somente parte da intervenção seria de fato adicional, e o comprador do serviço ambiental pagaria por uma redução do desmatamento que não é real (e.g., Wunder et al., 2008).

4.5. Efetividade e vazamento na reserva do Juma

De maneira geral, estudos que avaliam a efetividade de áreas protegidas comparam o impacto de atividades antropogênicas (desmatamento, queimadas, exploração madeireira, caça e pesca predatória) dentro e fora dos limites da reserva (Bruner et al., 2001; Ewers e Rodrigues, 2008). Assim, se a pressão antropogênica é menor dentro da reserva em comparação com a área de entorno, isso significa que a restrição de uso desta área tem um impacto positivo para a conservação (Ewers e Rodrigues, 2008). Entretanto, a redução do desmatamento dentro da reserva pode posteriormente contribuir para a aceleração do desmatamento em outras áreas importantes para a conservação da biodiversidade localizadas próximas a reserva (efeito de vazamento). Neste contexto, estratégias para quantificar e prevenir o vazamento em projetos de REDD tem sido propostas no contexto de mitigação das mudanças climáticas (mais detalhes em Wunder, 2008).

No presente estudo, devido às características estocásticas dos modelos baseados em autômatos celulares (que produz variações em cada simulação) e o fato da taxa média de vazamento ter sido obtida pelo CV, não foi possível similar um cenário 100% sem vazamento. Pode-se observar também que o desmatamento oriundo do vazamento não se concentrou na área de entorno da reserva (*buffer* de 10 km). Nessa faixa, as áreas

desmatadas no CV e CVR foram similares; portanto, presume-se que o desmatamento derivado do efeito do vazamento foi alocado em outras áreas da paisagem.

Cenários com vazamento foram simulados com outros estudos (Aguiar, 2006; Vitel, 2009). Na simulação feita por Aguiar (2006) usando o arcabouço de modelagem CLUE, a demanda por terra (taxa de desmatamento) foi constante. Portanto, a criação de áreas protegidas não influenciou as taxas globais de desmatamento, e somente induziu o deslocamento do desmatamento para outras áreas que não tinham nenhum tipo de restrição de uso (100% de vazamento). Aguiar (2006) argumenta que cenários com vazamento podem de fato ocorrer, pois os efeitos de decisões políticas locais podem refletir em ações não necessariamente benéficas a outras áreas. Isso, entretanto, depende da percepção dos atores em relação às restrições e oportunidade criadas pelas políticas públicas. Vitel (2009), usando o modelo AGROECO simulou diferentes cenários com e sem a criação de reservas de uso sustentável e proteção integral no município de Lábrea (sudoeste do Amazonas). Este estudo demonstrou que, com a criação de reservas de proteção integral, o desmatamento que ocorreria nessas áreas na ausência da reserva seria deslocado para áreas dentro da reserva de uso sustentável que é considerada uma das categorias de reserva mais vulneráveis ao desmatamento. Assim, áreas protegidas que tem uma maior restrição de uso como as reservas de proteção integral e terras indígenas, tendem a serem mais eficazes em comparação as reservas de uso sustentável (Clark et al., 2008). Por outro lado, um maior apoio político para a criação de reservas de uso sustentável dá a elas um papel importante na conservação devido a necessidade para a expansão substancial de áreas protegidas antes que o aumento da pressão do desmatamento torne a criação de reservas impraticável (Fearnside, 2003b).

As projeções elaboradas no presente estudo demonstraram que a maior parte do desmatamento dentro da reserva do Juma foi alocada próxima as estradas (estradas secundárias e da rodovia AM-174 que atravessa a reserva) e em áreas previamente desmatadas. Esse resultado está de acordo com análises feita por Brandão Jr. et al. (2007) relacionando o desmatamento com estradas oficiais e não-oficiais na Amazônia. Esses autores observaram que o desmatamento decai exponencialmente com o aumento da distância das estradas. Souza Jr. et al. (2005) sugerem que a identificação de áreas susceptíveis a expansão de estradas ilegais pode ser um critério importante na priorização de criação de áreas protegidas.

4.6. Estimativas de emissão de carbono nos cenários projetados

IDESAM (2009) estimou o estoque na reserva do Juma em 2006 em 0,07 Pg C. O presente estudo estimou um estoque de 0,10 Pg C em 2008. A diferença é devido ao fato que a estimativa do estoque de carbono usado por IDESAM (2009) foi uma média baseada no relatório do MCT (2004) e o estudo de Nogueira et al. (2008), enquanto no presente estudo, a estimativa de cada tipo de floresta foi baseada somente em Nogueira et al. (2008). O relatório do MCT (2004) subestima a biomassa por várias razões (Fearnside, 2008b). Áreas com vegetação não florestal, propriedades particulares (áreas com título legal), áreas próximas de comunidades e áreas de influência da rodovia AM-174 foram excluídas da contabilização do estoque de carbono feitos por IDESAM (2009), enquanto que no presente estudo, toda a cobertura florestal da reserva, bem como a vegetação não florestal, foi incluída na contabilização.

Na área total de estudo, a média anual das emissões simuladas foram de $6,10 \times 10^6$ Mg C (linha de base), $6,07 \times 10^6$ Mg C (CV) e $5,90 \times 10^6$ Mg C (CVR). Esses

valores correspondem a 6,9% (linha de base), 6,8% (CV) e 6,7% (CVR) das emissões por combustíveis fósseis no Brasil em 2005 ($88,7 \times 10^6$ Mg C) (MCT, 2010). Na área da reserva do Juma, a média anual de emissões no cenário linha de base corresponde a 0,5% ($0,45 \times 10^6$ Mg C) das emissões por combustíveis fósseis no Brasil em 2005. No cenário com a criação da reserva a emissão correspondeu a 0,2% ($0,17 \times 10^6$ Mg C) das emissões brasileiras por combustíveis fósseis.

Fearnside (2008c) estimou as emissões por desmatamento em 2007 na Amazônia Brasileira em $162,5 \times 10^6$ Mg C (11.224 km^2). Essa estimativa da taxa de desmatamento foi baseada somente em cenas do Landsat-TM consideradas críticas (74 imagens) nesse período (INPE, 2010). As médias anuais das emissões simuladas no presente estudo correspondem a 3,8% (linha de base), 3,7% (CV) e 3,6% (CVR) das emissões de carbono para Amazônia em 2007. Para a reserva do Juma, esses valores correspondem a 0,3% (linha de base) e 0,1% (CV e CVR).

Enfatizamos que as incertezas inerentes às estimativas de biomassa da floresta e as emissões correspondentes por hectare desmatado (ver material suplementar) são separadas das que são inerentes na simulação da forma como o desmatamento procede com e sem a reserva (ver material suplementar). A magnitude e a locação do desmatamento nos cenários simulados são importantes para esclarecer a importância de como as taxas de desmatamentos são calculadas (por exemplo, o cenário linha de base usado no projeto REDD do Juma versus nosso modelo), e em identificar o papel de fatores, tais como, o vazamento dos benefícios climáticos da reserva ao longo do período de tempo considerado. Essas conclusões não mudariam se a verdadeira biomassa das florestas da área fosse diferente das estimativas que nós usamos. As simulações do desmatamento têm incertezas quanto à escolha da estrutura do modelo e na quantificação dos parâmetros, mas nós acreditamos que as nossas escolhas se comparam bem com outros modelos, tal como, o que foi usado pelo projeto REDD do Juma.

No caso do nosso modelo, as taxas de desmatamento refletem padrões de comportamento da área de estudo do período de 2003-2008, sendo que este não foi um período de medidas de controle significativo. Desde 2008, essa parte da Amazônia não priorizou a fiscalização. Isso pode mudar no futuro em qualquer direção. A incerteza futura inclui a importância quanto às preocupações ambientais no desenvolvimento de políticas na Amazônia.

Um revés significativo para a sustentabilidade da floresta Amazônica ocorreu em 2011 e 2012, incluindo repetidas vitórias do “bloco dos ruralistas” (representantes de grandes proprietários) enfraquecendo o “Código Florestal” Brasileiro (a necessidade de manutenção da lei de 1965 na definição de áreas de florestas em propriedades privadas) e restringindo a autoridade de agências federais responsáveis pela aplicação da legislação ambiental e da criação de áreas protegidas (ver Fearnside, 2010; Metzger et al., 2010; IPEA, 2011; CBDFDS, 2012). Incertezas inerentes a pressupostos referentes aos níveis futuros de governança devem ser consideradas na interpretação dos resultados deste ou de qualquer outro modelo que represente a mudança de uso ao longo de períodos de décadas. Projeções do desmatamento produzidas por modelos estocásticos são representações simplificadas de um sistema complexo e, portanto, os resultados devem ser vistos apenas como possíveis possibilidades. O modelo AGROECO foi desenvolvido com o intuito de auxiliar na compreensão das mudanças na cobertura da terra na região Amazônica. Assim, apesar das limitações do modelo, os cenários podem contribuir para avaliar a metodologia utilizada atualmente nos projetos REDD no estado do Amazonas.

Como mencionado no início, à posição do REDD na mitigação das mudanças climáticas é um tópico extremamente controverso. Os resultados do presente estudo serão sem dúvidas interpretadas de forma diferenciada pela ala opositora. Defensores anti-REDD podem concluir que os benefícios de carbono do projeto REDD do Juma são irrealisticamente elevados para reserva ao longo do período do projeto, demonstrando que o REDD deveria ser excluído da concessão de créditos da Convenção das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, enquanto que os proponentes do REDD apontariam para os avanços na modelagem do desmatamento do nosso estudo e para a indicação dos benefícios climáticos ao longo do horizonte de tempo como argumento em favor desta forma de mitigação.

5. Conclusão

As projeções demonstraram uma redução nas emissões de carbono pelo desmatamento devido à presença da reserva do Juma. No entanto, devido o horizonte de tempo usado na modelagem (2050), os benefícios do carbono devem ser modestos e são substancialmente menores daqueles calculados pelo projeto REDD do Juma. Isso indica a necessidade de aumentar a cautela na modelagem de linha de base para o cálculo dos benefícios de carbono para projetos de REDD se a geração de “ar quente” (credito sem adicionalidade) é para ser evitada.

Com o aumento do desmatamento na região, a reserva do Juma terá um papel cada vez mais importante na estocagem de carbono e na manutenção de outros serviços ambientais. A quantidade e o tempo do vazamento devem ser considerados e quantificados; para o horizonte de tempo de 42 anos considerado neste estudo, o vazamento reduziria o benefício do carbono líquido da reserva, mas os benefícios da reserva seriam maiores num horizonte de tempo maior.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), à Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM), ao Conselho Nacional do Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq: Proc. 305880/2007-1; 573810/2008-7; 575853/2008-5) e ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia dos Serviços Ambientais da Amazônia (INCT-Servamb) pelo suporte financeiro e logístico para a realização desta pesquisa. A Fundação Amazonas Sustentável pelo apoio logístico para a realização do trabalho de campo. Nós agradecemos ao Britaldo Soares-Filho por nos ajudar a compreender o modelo SimAmazonia. Quatro revisores anônimos que forneceram comentários importantes.

Referências

- Agterberg, F.P., Bonham-Carter G.F., 2005. Measuring the performance of mineral-potential maps. *Natural Resources Research* 14, 1-17.
- Aguiar, A.P.D., 2006. Modeling land use change in the Brazilian Amazon: Exploring intraregional heterogeneity. Tese de doutorado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo, Brasil.
- Almeida, C.A., Valeriano, D.M., Escada, M.I.S., Rennó, C.D., 2010. Estimativa de área de vegetação secundária na Amazônia Legal Brasileira. *Acta Amazonica* 40, 289-302.

- Angelsen, A., 2008. Moving ahead with REDD: Issues, options and implications. CIFOR, Bogor, Indonesia.
- Assunção, J., Gandour, C.C., Rocha, R., 2012. Deforestation Slowdown in the Legal Amazon: Prices or Policies? Climate Policy Initiative (CPI) Working Paper, Pontífica Universidade Católica (PUC), Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 37 pp.
<<http://climatepolicyinitiative.org/publication/deforestation-slowdown-in-the-legal-amazon-prices-or-policie/>>, acesso em 08.06.2012.
- Barreto, P., Brandão Jr., A., Martins, H., Silva, D., Souza Jr., C., Sales, M., Feitosa, T., 2011. Risco de Desmatamento Associado à Hidrelétrica de Belo Monte. Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia (IMAZON), Belém, Pará, Brasil. 98 pp.
<http://www.imazon.org.br/publicacoes/livros/risco-de-desmatamento-associado-a-hidreletrica-de-belo-monte/at_download/file>, acesso em 08.06.2012.
- Becker, B.K., 2005. Geopolítica da Amazônia. Estudos Avançados 19, 71-86.
- Bonham-Carter, G.F., Agterberg, F.P., Wright, D.F., 1989. Weights of evidence modeling: a new approach to mapping mineral potential, in: Agterberg, F. P., Bonham-Carter, G. F. (Eds.), Statistical Applications in Earth Sciences. Geological Survey of Canada, Paper 89-9, Ottawa, Canada, pp. 171-183.
- Brandão Jr., A.O., Souza Jr., C.M., Ribeiro, J.G.F., Sales, M.H.R., 2007. Desmatamento e estradas não-oficiais da Amazônia. Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Santa Catarina, Brasil. pp. 2357-2364.
<<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.15.19.47/doc/2357-2364.pdf>>, acess em 07.07.2010.
- Bruner, A.G., Gullison, R.E., Rice, R.E., Fonseca, G.A.B., 2001. Effectiveness of Parks in Protecting Tropical Biodiversity. Science 291, 125-128.
- Carrero, G.C., Fearnside, P.M., 2011. Forest clearing dynamics and the expansion of land holdings in Apuí, a deforestation hotspot on Brazil's Transamazon Highway. Ecology and Society 16(2), 26. <<http://www.ecologyandsociety.org/vol16/iss2/art26/>>
- CBDFDS, 2012. Código Florestal e a Ciência: o que nossos legisladores ainda precisam saber. Comitê Brasil em Defesa das Florestas e do Desenvolvimento Sustentável (CBDFDS), Brasília, Distrito Federal, Brasil. 115 pp.
<<http://www.ipam.org.br/download/livro/Codigo-Florestal-e-a-Ciencia-o-que-nossos-legisladores-ainda-precisam-saber/618>>, acesso em 08.06.2012.
- Cenamo, M.C., Carrero, G.C., Soares, P.G., 2011. Reduções de emissões do desmatamento e degradação florestal (REDD+): Estudo de oportunidades para a região sul do Amazonas. Instituto de Conservação e Desenvolvimento Sustentável do Amazonas (IDESAM), Série Relatórios Técnicos nº 1, Manaus, Amazonas, Brasil.
<http://www.idesam.org.br/documentos/pdf/sul_amazonas_versao_final.pdf>, acesso em 14.05.2011.

- Cepal, 2007. Análise Ambiental e de Sustentabilidade do Estado do Amazonas. Colección Documentos de proyectos, no. 126, Comissão Econômica para América Latina e Caribe (CEPAL), Santiago, Chile.
<<http://www.eclac.org/publicaciones/xml/1/29161/LC-W126.pdf>>, acesso em 14.05.2010.
- Clark, S., Bolt, K., Campbell, A., 2008. Protected areas: an effective tool to reduce emissions from deforestation and forest degradation in developing countries? Working Paper, UNEP World Conservation Monitoring Centre, Cambridge, U.K.
<http://quin.unep-wcmc.org/climate/pdf/Clark_et_al_2008_PA_deforn.pdf>, acesso em 03.05.2010.
- Ewers, R.M., Rodrigues, A.S.L., 2008. Estimates of reserve effectiveness are confounded by leakage. *Trends in Ecology and Evolution* 23, 113-116.
- Fearnside, P.M., 2002. Fogo e emissão de gases de efeito estufa dos ecossistemas florestais da Amazônia brasileira. *Estudos Avançados* 16, 99-123.
- Fearnside, P.M., 2003a. A Floresta Amazônica nas Mudanças Globais. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), Manaus, Amazonas, Brasil. 134 pp.
- Fearnside, P.M., 2003b. Conservation Policy in Brazilian Amazonia: understanding the dilemmas. *World Development* 31, 757-779.
- Fearnside, P.M., 2005. Deforestation in Brazilian Amazonia: history, rates and consequences. *Conservation Biology* 19, 680-688.
- Fearnside, P.M., 2008a. The roles and movements of actors in the deforestation of Brazilian Amazonia. *Ecology e Society* 13(1), 23.
- Fearnside, P.M., 2008b. Quantificação do serviço ambiental do carbono nas florestas amazônicas brasileiras. *Oecologia Brasiliensis* 12, 743-756.
- Fearnside, P.M., 2008c. Deforestation in Brazilian Amazonia and global warming. *Annals of Arid Zone* 47, 355-374.
- Fearnside, P.M., 2009. Carbon benefits from Amazonian forest reserves: leakage accounting and the value of time. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 14, 557-567.
- Fearnside, P.M., 2010. Código Florestal: As perdas invisíveis. *Ciência Hoje* 46(273), 66-67.
- Fearnside, P.M., 2011. Brazil's Amazon Forest in mitigating global warming: unresolved controversies. *Climate Policy* 12 (1), 70-81.
- Fearnside, P.M., 2012. The theoretical battlefield: Accounting for the climate benefits of maintaining Brazil's Amazon forest. *Carbon Management* 3(2), 145-148.

- Fearnside, P.M., Guimarães, W.M., 1996. Carbon uptake by secondary forests in Brazilian Amazonia. *Forest Ecology and Management* 80, 35-46.
- Fearnside, P.M., Graça, P.M.L.A., Keizer, E.W.H., Maldonado, F.D., Barbosa, R.I., Nogueira, E.M., 2009a. Modelagem de desmatamento e emissões de gases de efeito estufa na região sob influência da Rodovia Manaus-Porto Velho (BR-319). *Revista Brasileira de Meteorologia* 24, 208-233.
- Fearnside, P.M., Righi, C.A., Graça, P.M.L.A., Keizer, E.W.H., Cerri, C.C., Nogueira, E.M., Barbosa, R.I., 2009b. Biomass and greenhouse-gas emissions from land-use change in Brazil's Amazonian "arc of deforestation": The states of Mato Grosso and Rondônia. *Forest Ecology and Management* 258, 1968-1978.
- Ferreira, L.V., Venticinque, E., Almeida, S., 2005. O desmatamento na Amazônia e a importância das áreas protegidas. *Estudos Avançados* 19, 157-166.
- Ghazoul, J., Butler, R.A., Mateo-Vega, J., Koh, L.P., 2010. REDD: a reckoning of environment and development implications. *Trends in Ecology and Evolution* 25, 396-402.
- Graça, P.M.L.A., Yanai, A.M., 2008. Análise da dinâmica espacial de vegetação secundária na região de Samuel (RO), a partir de dados multitemporais de Landsat-TM no período de 1998 a 2007. *Anais da Conferência do Subprograma de Ciência e Tecnologia SPC&T Fase II/PPG7, Belém. Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Pará, Brasil.* pp. 56-59.
- Graça, P.M.L.A., Maldonado, F.D., Fearnside, P.M., 2007. Detecção de desmatamento em novas áreas de expansão agropecuária no sul do Amazonas utilizando imagens CBERS-2. *Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Santa Catarina, Brasil.* pp. 917-924. <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.10.22.21/doc/917-924.pdf>>, acesso em 27.05.2010.
- Hagen, A., 2003. Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps. *International Journal of Geographical Information Science* 17, 235-249.
- Hargrave, J., Kis-Katos, K., 2011. Economic causes of deforestation in the Brazilian Amazon: a panel data analysis for the 2000s. Discussion Paper Series n.17, University of Freiburg, Freiburg, Germany. 30 pp. <http://www.vwl.uni-freiburg.de/iwipol/discussion_papers/DP17_Hargrave_Kis-Katos%20-%20Economic%20Causes%20of%20Deforestation%20in%20the%20Brazilian%20Amazon.pdf>, acesso em 09.06.2012.
- IDESAM, 2009. Projeto de Redução de Emissões de GEE Provenientes do Desmatamento na Reserva de Desenvolvimento Sustentável do Juma, Amazonas, Brasil. Documento de Concepção do Projeto (DCP), versão 5.1. Instituto de Conservação e Desenvolvimento Sustentável do Amazonas (IDESAM), Manaus, Amazonas, Brasil. <http://www.idesam.org.br/documentos/pdf/PDD_Projeto%20Juma_portugues.pdf>, acesso em 15.05.2010.

- INPE, 2010. Projeto PRODES – Monitoramento da Floresta Amazônica por Satélite. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, São Paulo, Brasil. <<http://www.obt.inpe.br/prodes/index.html>>, acesso em 10.06.2010.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis: Summary for Policymakers - Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. WMO/UNEP, Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- IPEA, 2011. Código Florestal: Implicações do PL1876/99 nas Áreas de Reserva Legal. Comunicados IPEA, nº 96, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), Rio de Janeiro, Brasil. 23 pp. <http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/comunicado/110616_comunicadoipea96.pdf>, acesso em 08.06.2012.
- Jacob, N., Krishnan, R., Prasada Raju, P.V.S.P., Saibaba, J., 2008. Spatial and Dynamic Modeling Techniques for Land Use Change Dynamics Study. XXIth International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Beijing. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Beijing, China. p. 3734. <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.155.2641&rep=rep1&type=pdf>>, acesso em 27.07.2011.
- MCT, 2004. Ministério de Ciência e Tecnologia. Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa – Relatórios de Referência. Emissões e remoções de dióxido de carbono por conversão de florestas e abandono de terras cultivadas. Ministério de Ciência e Tecnologia, Brasília, Distrito Federal, Brasil. 271 pp. <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/21455.html>>, acesso em 05.09.2011.
- MCT, 2010. Segunda Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), Brasília, Distrito Federal, Brasil. 520 pp. <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/326751.html>>, acesso em 05.09.2011.
- Metzger, J.P., Lewinsohn, T., Joly, C.A., Verdade, L.M., Rodrigues, R.R., 2010. Brazilian law: full speed in reverse. *Science* 329, 276-277.
- Moutinho, P., Martins, O.S., Christovam, M., Lima, A., Nepstad, D., Crisostomo, A.C., 2011. The emerging REDD+ regime of Brazil. *Carbon Management* 2, 587-602.
- Nepstad, D.C., Schwartzman, S., Bamberger, B., Santilli, M., Ray, D., Schlesinger, P., Lefebvre, R., Alencar, A.A., Prinz, E., Fiske, G., Rolla, A., 2006. Inhibition of Amazon deforestation and fire by parks and indigenous lands. *Conservation Biology* 20, 65-73.
- Nepstad, D., Soares-Filho, B.S., Merry, F., Moutinho, P., Rodrigues, H.O., Bowman, M., Schwartzman, S., Almeida, O., Rivero, S., Bowman, M., 2007. Custos e Benefícios da Redução das Emissões de Carbono do Desmatamento e da Degradação (REDD) na

- Amazônia Brasileira. WHRC, IPAM, UFMG, Brasília, Distrito Federal, Brasil.
<<http://www.ipam.org.br/biblioteca/livro/id/128>>, acesso em 20.03.2010.
- Nogueira, E.M., Fearnside, P.M., Nelson, B.W., Barbosa, R.I., Keizer, E.W.H., 2008. Estimates of forest biomass in the Brazilian Amazon: New allometric equations and adjustments to biomass from wood-volume inventories. *Forest Ecology and Management* 256, 1853-1867.
- Olson, J.S., Watts, J.A., Allison, L.J., 1983. Carbon in live vegetation of major world ecosystems. Oak Ridge National Laboratory/Union Carbide, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A.
- Parker, C., Mitchell, A., Trivedi, M., Mardas, N., 2009. The Little REDD+ Book. Global Canopy Programme, Oxford, U.K.
<http://unfccc.int/files/methods_science/redd/application/pdf/the_little_redd_book_dec_08.pdf>, acesso em 19.03.2010.
- Rodrigues, H.O., Soares-Filho, B.S., Costa, W.L.S., 2007. Dinamica EGO, uma plataforma para modelagem de sistemas ambientais. *Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Florianópolis. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Santa Catarina, Brasil. pp. 21-26
<<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.06.17.59/doc/3089-3096.pdf>>, acesso em 07.07.2011.
- Rykiel Jr., E.J., 1996. Testing ecological models: the meaning of validation. *Ecological Modelling* 90, 229-244.
- SDS, 2008. Plano Estadual de Prevenção e Combate ao Desmatamento no Amazonas. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável do Amazonas (SDS), Manaus, Amazonas, Brasil.
<http://www.fundoamazonia.gov.br/FundoAmazonia/export/sites/default/site_pt/Galeria_s/Arquivos/Publicacoes/Plano_Estadual_do_Amazonas.pdf>, acesso em 1.06.2010.
- SDS, 2010. Plano de gestão da Reserva de Desenvolvimento Sustentável do Juma. Série Técnica Planos de Gestão. Volumes I e II. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável do Amazonas (SDS), Novo Aripuanã, Amazonas, Brasil.
<<http://www.ceuc.sds.am.gov.br/downloads/category/9-planosdegestao.html>>, acesso em 23.06. 2010.
- Silva, R.P., 2007. Alometria, estoque e dinâmica da biomassa de florestas primárias e secundárias na região de Manaus (AM). Tese de doutorado. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, Amazonas, Brasil, 135 pp.
- Sirakoulis, G.Ch., Karafyllidis, I., Thanailakis, A., 2000. A cellular automaton model for the effects of population movement and vaccination on epidemic propagation. *Ecological Modelling* 133, 209-223.
- Soares-Filho, B.S., Pennachin, C.L., Cerqueira, G.C., 2002. DINAMICA – a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. *Ecological Modelling* 154, 217-235.

- Soares-Filho, B.S., Alencar, A., Nepstad, D., Cerqueira, G. C., Vera Diaz, M., Rivero, S., Solórzano, L., Voll, E., 2004. Simulating the response of land-cover changes to road paving and governance along a major Amazon highway: the Santarém-Cuiabá corridor. *Global Change Biology* 10, 745-764.
- Soares-Filho, B.S., Nepstad, D., Curran, L.M., Cerqueira, G.C., Garcia, R.A., Ramos, C.A., Voll, E., Mcdonald, A., Lefebvre, P., Schlesinger, P., 2006. Modelling Conservation in the Amazon Basin. *Nature* 440, 520-523.
- Soares-Filho, B.S., Rodrigues, H.O., Costa, W.L., 2009. Modeling Environmental Dynamics with Dinamica EGO. Centro de Sensoriamento Remoto. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.
<http://www.csr.ufmg.br/dinamica/tutorial/Dinamica_EGO_guidebook.pdf>, acesso em 03.09.2010.
- Souza Jr., C.M., Brandão Jr., A.O., Anderson, A., Veríssimo, A., 2005. O avanço das estradas endógenas na Amazônia. O estado da Amazônia. IMAZON, Belém, Pará, Brasil.<<http://www.imazon.org.br/publicacoes/o-estado-da-amazonia/avanco-das-estradas-endogenas-na-amazonia>>, acesso em 27.05.2010.
- Stickler, C.M., Nepstad, D., Coe, M.T., McGrath, D.G., Rodrigues, H.O., Walker, W.S., Soares-Filho, B.S., Davidson, E.A., 2009. The potential ecological costs and cobenefits of REDD: A critical review and case study from the Amazon region. *Global Change Biology* 15, 2803-2824.
- van der Werf, G.F., Morton, D.C., DeFries, R.S, Olivier, J.G.J., Kasibhatla, P.S., Jackson, R.B., Collatz, G.J., Randerson, J.T., 2009. CO₂ emissions from forest loss. *Nature Geoscience* 2, 737-738.
- Vitel, C.S.M.N., 2009. Modelagem da dinâmica do desmatamento de uma fronteira em expansão, Lábrea, Amazonas. Dissertação de mestrado. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, Amazonas, Brasil, 121 pp.
- Walker, W.S., Stickler, C.M., Kellndorfer, J.M., Kirsch, K.M., Nepstad, D., 2010. Large-area classification and mapping of forest and land cover in the Brazilian Amazon: a comparative analysis of ALOS/PALSAR and Landsat data sources. *Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 3, 594-604.
- Wunder, S., 2008. How do we deal with leakage, in: Angelsen, A. (Ed.), *Moving Ahead with REDD: Issues, Options and Implications*. CIFOR, Bogor, Indonésia, pp. 65-75.
- Wunder, S., Börner, J., Tito, M.R., Pereira, L., 2008. Pagamentos por serviços ambientais: perspectivas para a Amazônia Legal. Série Estudos, 10. Ministério do Meio Ambiente (MMA), Brasília, Distrito Federal, Brasil.
<<http://www.ipam.org.br/biblioteca/livro/id/373>>, acesso em 27.05.2010.
- Yeh, A.G.O., Li, X., 2006. Errors and uncertainties in urban cellular automata. *Computers, Environment e Urban Systems* 30, 10-28.

Legenda das Figuras

Fig. 1. Localização da área de estudo. O limite da área de estudo total está destacada pelo *buffer* em forma circular

Fig. 2. Fluxograma indicando as etapas deste estudo

Fig. 3. Mapas da paisagem em 2050 nos três cenários: linha de base, CV e CVR. Mapas na posição superior demonstram a paisagem na área total da simulação e mapas na posição inferior destacam a reserva do Juma.

Fig. 4. Área desmatada e regenerada dentro e fora da reserva do Juma até 2050 no **(a)** cenário com vazamento (CV), **(b)** cenário com vazamento reduzido (CVR) e **(c)** área ocupada por estradas dentro da reserva do Juma e na área de entorno até 2050.

Fig. 5. Estimativa do estoque de carbono presente em 2008 e após 42 anos (2050) nos três cenários na área total de estudo e na reserva do Juma.

Fig. 6. Estimativa da emissão líquida até 2050 para cada cenário na área total de estudo e na reserva do Juma.

Fig. 7. Mapas na posição superior indicam o cenário *business as usual* elaborado por Soares-Filho et al. (2006) usado como linha de base no projeto REDD do Juma; mapas na posição inferior indicam o cenário linha de base do presente estudo.

Tabela 1

Mapas elaborados e inseridos no modelo AGROECO como dados de entrada.

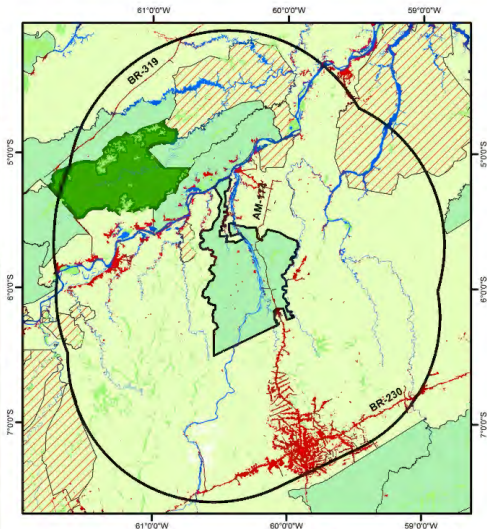
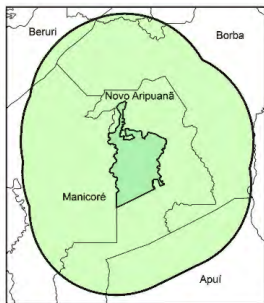
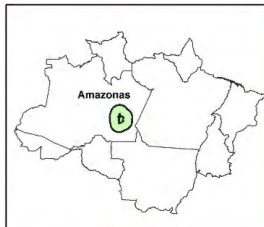
Dados de entrada	Fonte	Descrição dos métodos
Mapa de cobertura da terra (2003 e 2008) *	PRODES (INPE, 2010)	O mapa (2003) foi elaborado a partir da reclassificação de dados da tabela de atributos do mosaico do Amazonas (2008). Assim, o desmatamento acumulado até 2003 foi agrupado em uma única classe (desmatamento). O desmatamento que ocorreu após 2003 foi agrupado com a classe “floresta”. A mesma metodologia foi usada para construir o mapa de cobertura da terra de 2008. O mapeamento da vegetação secundária foi feito usando a metodologia desenvolvida por Graça e Yanai (2008). Posteriormente, a classe “vegetação secundária” foi incorporada no mapa categórico de cobertura da terra por meio do uso de expressões algébricas no DINAMICA EGO (Fig. S2).
Mapa de variáveis estáticas	▪ Distância aos rios (PRODES); ▪ Altitude e Declividade (SRTM); ▪ Vegetação e Solo (IBGE); ▪ Áreas protegidas (SDS, Greenpeace e ISA); ▪ Distância as estradas principais e secundárias (atualizada a partir do mapa de estradas do CSR/UFGM);	O operador “ <i>create cube map</i> ” foi usado para compilar esses diferentes mapas em um único arquivo. O cálculo de distância no DINAMICA EGO é feito por um “ <i>functor</i> ”, o qual recebe como entrada um mapa categórico e produz um mapa com faixas de distância (distância mais curta) entre as células de cada classe (Soares-Filho et al., 2009).
Mapa de fricção e atratividade	Neste estudo, as áreas de floresta sem reservas foram susceptíveis a construção de estradas, seguido das reservas de uso sustentável, reservas de proteção integral e terras indígenas.	O mapa de fricção é usado para obter o percurso de menor custo para a construção de novas estradas. O custo é proporcional ao valor da célula. O mapa de atratividade auxilia o cálculo das células destinos para a construção de estradas de acordo com as medidas de atração determinadas no mapa de atratividade (Soares-Filho et al., 2004, 2006, 2009). Esses mapas auxiliam o desempenho do módulo construtor de estradas. Assim, as estradas são automaticamente simuladas de acordo com o nível de atratividade e do custo para sua construção.

* O mapa de 2003 foi usado na calibração e o mapa de 2008 na simulação dos cenários até 2050.

Tabela 2. Equações usadas neste estudo.

Taxas	Equações e valores usados
Desmatamento_{ano} *	$= \frac{(SFF_{ano} \times 0,02333) + (Floresta\ Fora\ da\ SFF_{ano} \times 0,00023604)}{(SFF_{ano} + Floresta\ Fora\ da\ SFF_{ano})}$
Regeneração_{ano} *	Constante = 0,0134
Corte da vegetação secundária_{ano} *	Constante = 0,125
Taxa sem vazamento_{ano}	$= \frac{(Células\ de\ corte\ da\ floresta\ (CV)_{ano} - Células\ vazadas_{ano})}{(Células\ de\ floresta\ (CV)_{ano} + Células\ vazadas_{ano})}$
Desmatamento_{ano} para CVR*	$= Desmatamento\ taxa_{ano} - 0,000156$

*Equações inseridas no programa Vensim.



Projeção:
UTM Zona 20S – Datum WGS1984

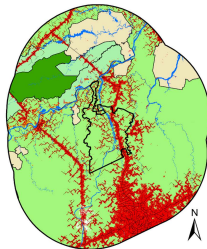
0 15 30 60 90 120 km





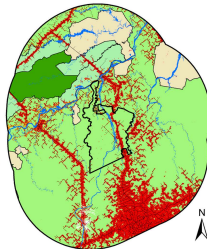
Cenário linha de base

2050



Cenário com vazamento

2050



Cenário com vazamento reduzido

2050

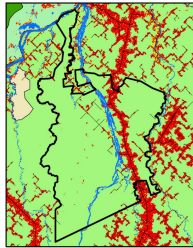
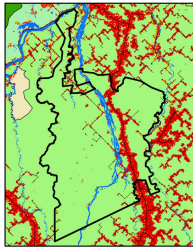
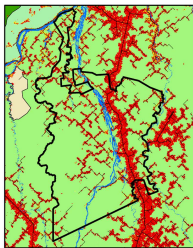
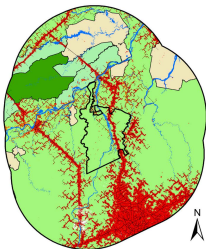
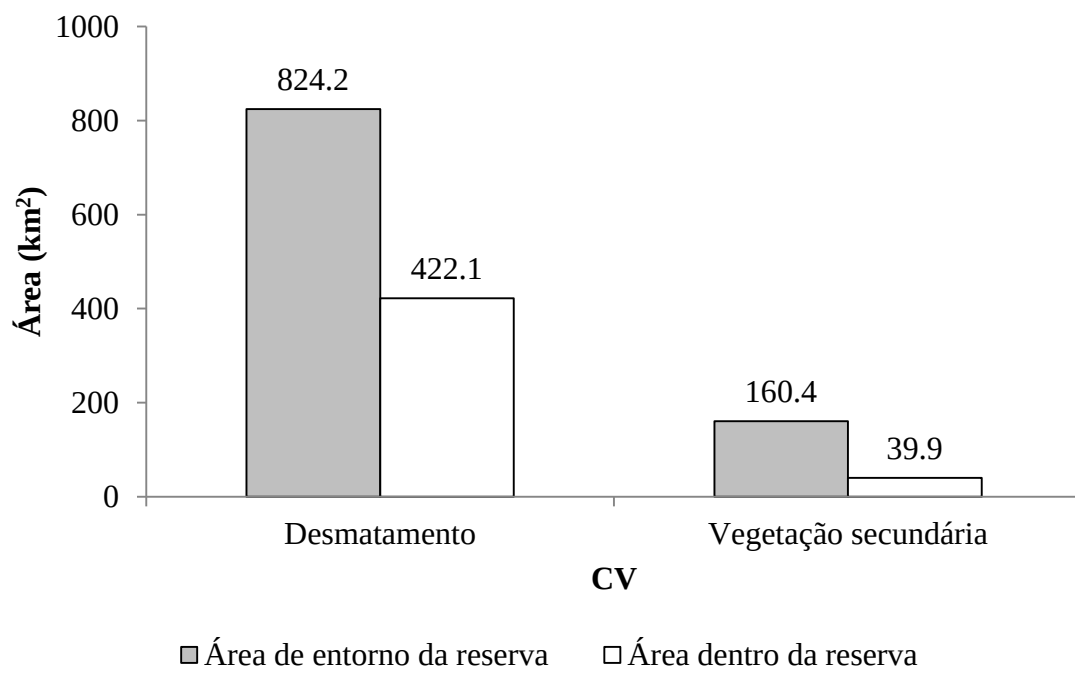
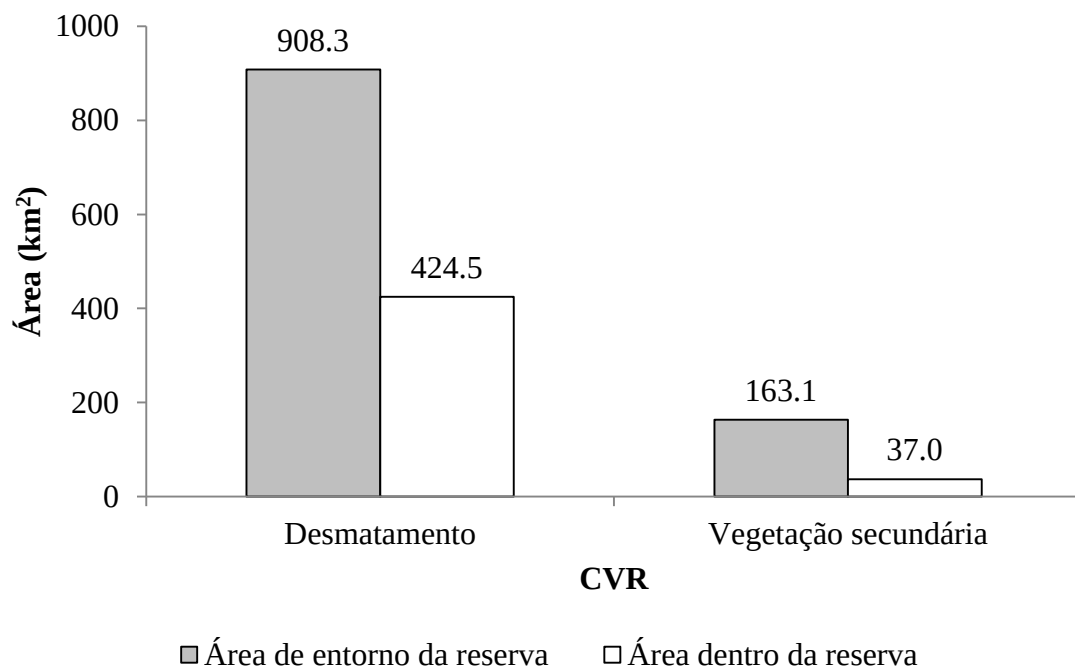


Fig.4

(a)



(b)



(c)

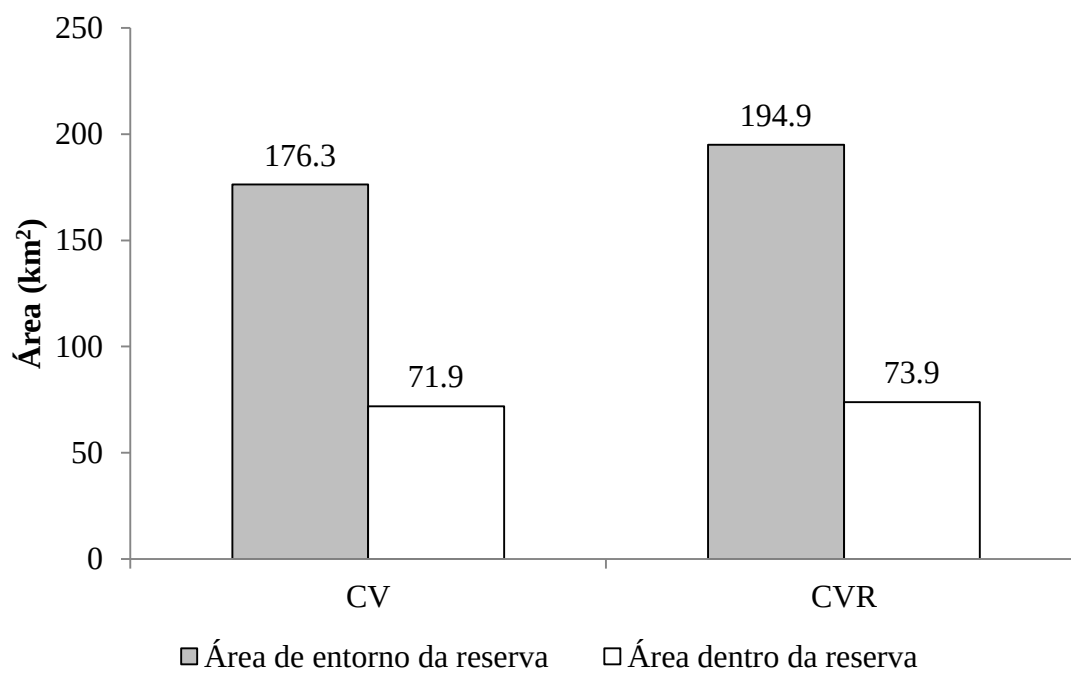


Fig. 5

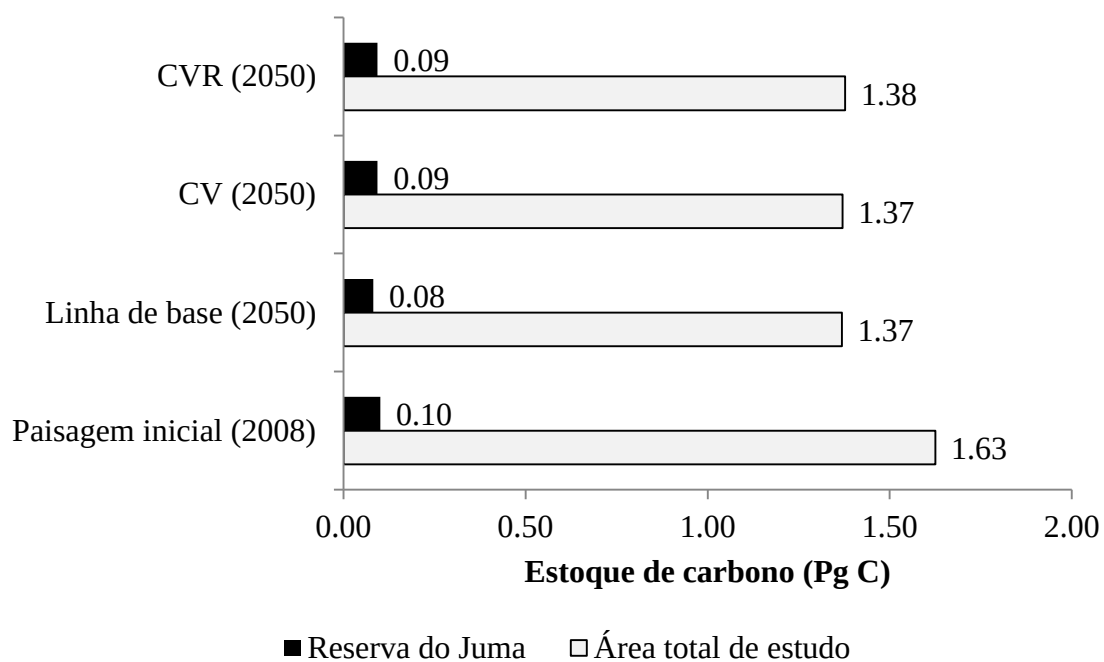
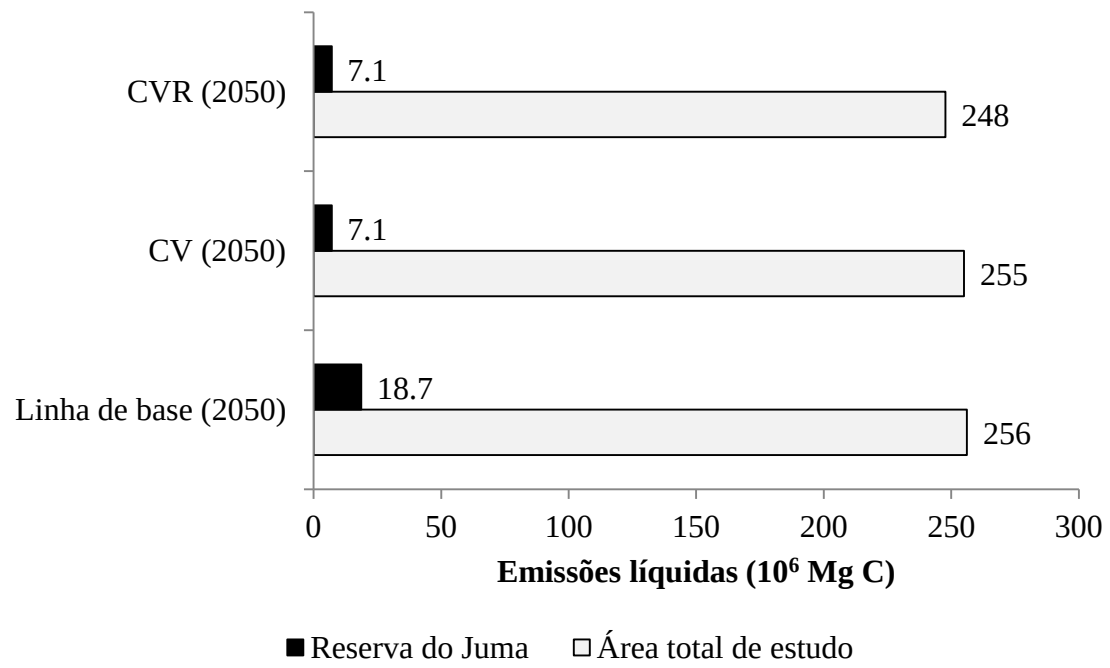
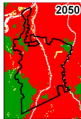
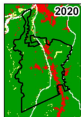


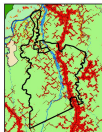
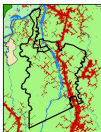
Fig. 6





Reserva do Juma
Desmatamento

Floresta
Não Floresta



2020

2030

2040

2050

Reserva do Juma
Estradas
Reserva de Proteção Integral
Reserva de Uso Sustentável
Terra Indígena
Floresta
Desmatamento
Vegetação secundária
Hidrografia

Material Suplementar

Desmatamento evitado na Amazônia Brasileira: Simulação do efeito da Reserva de Desenvolvimento Sustentável do Juma

Aurora Miho Yanai^a, Philip Martin Fearnside^a, Paulo Maurício Lima de Alencastro Graça^a; Euler Melo Nogueira^a

^a Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA, Av. André Araújo, N° 2936, CEP 69060-000, Manaus, Amazonas, Brasil.

Tel.: +55 92 3643 1822; fax: +55 92 3642 8909.

E-mail: {yanai, pmfearn, pmlag, euler}@inpa.gov.br

15 16 *S1. Escolha do intervalo de tempo no modelo de calibração*

17
18 Para uma simulação de 42 anos, o período (2003-2008) usado para calibrar o
19 modelo foi limitado. Isso implica em incertezas nos resultados simulados,
20 principalmente para os últimos anos da simulação. Os dados de desmatamento estão
21 disponíveis a partir de 2000, mas as taxas de desmatamento anteriores a 2000 para a
22 área de estudo foram muito baixas devido a sua localização isolada. A calibração
23 poderia ter começado em 2000 ao invés de 2003, mas os resultados seriam praticamente
24 iguais ao período que nós escolhemos. A média da taxa de desmatamento (expressa
25 como uma proporção de floresta cortada anualmente) para a reserva do Juma foi uma
26 constante de 0,0003 para o período de 2008 iniciando em 2000, 2001, 2002, ou 2003.
27 Para a área de estudo total a média anual das taxas foram 0,0011 de 2000-2008; 0,0012
28 de 2001-2008; 0,0013 de 2002-2008 e 0,0015 de 2003-2008.

29 30 *S.2. Independência das variáveis no método de pesos de evidência*

31
32 De acordo com a nossa experiência, e de outros que estudaram o desmatamento
33 na Amazônia, as atividades preditoras do desmatamento mais significativas são a
34 distância as áreas previamente desmatadas e a distância as estradas (e.g., Laurance et al.,
35 2002; Ferreira et al., 2005; Soares-Filho et al., 2004). Essas variáveis são altamente
36 correlacionadas, pois a maior parte do desmatamento ocorre próxima às estradas.
37 Entretanto, na Amazônia a construção de novas estradas em áreas sem a existência de
38 desmatamento representa uma característica importante para o processo geral. Essas
39 novas estradas influenciam o desmatamento e são independentes do efeito do
40 desmatamento prévio, portanto, devem ser incluídos no modelo para alcançar resultados
41 realísticos. À distância as estradas são representadas por duas variáveis: estradas
42 principais e estradas secundárias. Para áreas que têm estradas e desmatamento prévio, a
43 inclusão das variáveis distâncias a estradas e ao desmatamento aumentará o peso devido
44 o seu efeito conjunto. Esse peso elevado resulta na simulação de desmatamento de
45 forma concentrada ao longo das estradas, refletindo o padrão do desmatamento real na
46 região. Em outras situações onde os pesos de evidência são usados, tais como,
47 prospecção de minerais, esse efeito elevado deve ser evitado (e.g., Agterberg e Cheng,
48 2002). No desenvolvimento do modelo AGROECO (Fearnside et al., 2009) a tentativa
49 de rodar sem esses pesos como efeito nas estradas e no desmatamento prévio encontrou-
50 se um resultado com padrão de desmatamento difuso de “pipoca” demonstrando
51 claramente não é o padrão normal no mundo real. Desta forma, essas variáveis foram
52 incluídas no nosso modelo baseados na decisão *a priori*. A comparação de pares entre
53 “estradas principais” e “estradas todas” demonstrou alguma correlação (índice de
54 Cramer = 0,63; Incerteza da informação conjunta = 0,53). Para “solo” e “vegetação” o
55 valor do índice de Cramer (0,46) indicou alguma correlação, já o valor da Incerteza da
56 informação conjunta foi de apenas 0,16. No caso das outras variáveis, a independência
57 condicional foi obedecida. Os pesos de evidência influenciam somente a locação do
58 desmatamento, não a quantidade do desmatamento.

59 60 *S.3. Validação do modelo usando a similaridade fuzzy*

61
62 O valor de similaridade *fuzzy* mínima encontrada no presente estudo (73,8% para
63 um tamanho de janela de 11×11 pixels) é aceitável, pois a ideia de usar esse
64 procedimento consiste em não descartar modelos que, apesar de não combinarem

exatamente numa comparação célula-a-célula, apresentam uma boa aproximação espacial nas células vizinhas (Soares-Filho et al., 2002). Além disso, algumas feições reais de desmatamento, como aquelas produzidas por fazendeiros não podem ser reproduzidos na simulação, pois alguns tipos de manchas geométricas não podem ser replicados pelas funções de transição disponíveis atualmente no DINAMICA EGO (Ximenes et al., 2011).

Outros estudos na região Amazônica usaram a similaridade *fuzzy* para validar modelos no DINAMICA EGO. Ximenes et al. (2011) encontraram um índice de similaridade *fuzzy* de 90,4% (11×11 pixels) usando um período de três anos (1997-2000) e com uma resolução espacial de 120 m no município de São Felix do Xingu (estado do Pará) e área de entorno. A aproximação espacial com as células vizinhas (tamanho da janela) foi maior, pois somente a função *expander* foi utilizada no modelo. Maeda et al. (2011) simularam a expansão de atividades agropecuária na margem da bacia hidrográfica do Parque Nacional do Xingu no nordeste do Mato Grosso.

Esses autores calibraram o modelo usando um período de cinco anos (2000-2005) e tamanho de pixel de 100m. Eles encontraram uma similaridade *fuzzy* mínima de aproximadamente 45% (11×11 pixels). Esse estudo utilizou o mesmo período de tempo que o nosso estudo. Ramirez-Gomez (2011) encontrou um valor de similaridade *fuzzy* similar ao obtido no nosso estudo. Esse autor avaliou a influência de fatores ambientais na mudança de cobertura da terra no leste do Suriname usando um modelo espacial de desmatamento. A resolução espacial utilizada foi de 30 m. O valor de 74% foi obtido na similaridade *fuzzy* utilizando um período de quatro anos (2005-2009) com um tamanho de janela de 11×11 pixels.

S.4. Incertezas nas emissões de carbono nos cenários projetados

Estimativas de biomassa e de emissões de gases do efeito estufa têm incertezas consideráveis, e a magnitude desta incerteza não foi quantificada completamente. Isto é um fato para todas (enfatizamos: todas) as estimativas em florestas tropicais. Entretanto, acreditamos que nossas estimativas são mais confiáveis do que outras disponíveis na literatura devido o grande volume de parcelas medidas de 1 ha de floresta (aproximadamente 3.000 parcelas em florestas na Amazônia Brasileira), versus, por exemplo, menos de 90 parcelas dessa floresta no estudo feito por Saatchi et al. (2007). Para árvores com diâmetro à altura do peito (1,3 m acima do solo ou acima da sapopema) maior ou igual a 31,8 cm, a estimativa do volume do fuste da madeira tem um coeficiente de variação (cv) de 0,18 nos tipos florestais que correspondem a 69% do volume de madeira na área de estudo (floresta ombrófila densa de terras baixas), e a faixa de 0,18 a 0,24 para os cinco tipos florestais que correspondem a 99% do volume de madeira, com a média ponderada de 0.19 (baseado em 2.077 parcelas nesses tipos de floresta).

Para a reserva do Juma os resultados são similares: a floresta ombrófila densa de terras baixas (cv = 0,18) representa 73% do volume da madeira e três tipos florestais que representam 99% do volume tem coeficiente de variação na faixa de 0,18 a 0,24 com a média ponderada de 0,19 baseado em 1.194 parcelas desses tipos florestais. O multiplicador de conversão desses volumes de madeira em biomassa total, tais como, densidade da madeira, teor de água, a contribuição de árvores menores que o diâmetro mínimo do inventário, ajuste para as diferenças alométricas regionais das equações utilizada para os dados de volume relatados no inventário do RADAMBRASIL, biomassa da copa, raízes, componentes não-arbóreos, biomassa morta (necromassa),

palmeiras, lianas e outros componentes não-arbóreo têm incertezas substanciais. Nossas estimativas têm um número de feições que asseguram uma incerteza menor em relação a outras estimativas de biomassa na Amazônia. Nossas estimativas incluem ajustes baseados em equações alométricas e dados de densidade da madeira de uma região específica associados com o volume de quase todas as espécies de árvores relatadas no inventário do RADAMBRASIL. Nós também temos medidas de biomassa de copa em função da biomassa do fuste de uma região específica, bem como medidas de teor de água na madeira (e.g., Nogueira et al., 2007, 2008a). Assim como em outros estudos, nós utilizamos fontes da literatura para componentes como raízes, biomassa morta (necromassa), palmeiras, lianas e outro componentes não-arbóreos (Nogueira et al., 2008b: Tabela 1).

References

- Agterberg, F.P., Cheng, Q., 2002. Conditional independence test for weights-of-evidence modeling. *Natural Resource Research* 11, 249-255.
- Fearnside, P.M., Graça, P.M.L.A., Keizer, E.W.H., Maldonado, F.D., Barbosa, R.I., Nogueira, E.M., 2009. Modelagem de desmatamento e emissões de gases de efeito estufa na região sob influência da Rodovia Manaus-Porto Velho (BR-319). *Revista Brasileira de Meteorologia* 24, 208-233. English translation available at: <http://philip.inpa.gov.br/publ_livres/mss%20and%20in%20press/RBMET-BR-319_-engl.pdf>
- Ferreira, L.V., Venticinque, E., Almeida, S., 2005. O desmatamento na Amazônia e a importância das áreas protegidas. *Estudos Avançados* 19, 157-166.
- Laurance, W.F., Albernaz, A.K.M., Schroth, G., Fearnside, P.M., Bergen, S., Venticinque, E.M., Costa, C., 2002. Predictors of Deforestation in the Brazilian Amazon. *Journal of Biogeography* 29, 737-748.
- Maeda, E.E., Almeida, C.M., Ximenes, A.C., Formaggio, A.R., Simabukuro, Y.E., Pellikka, P., 2011. Dynamic modeling of Forest conversion: Simulation of past and future scenarios of rural activities expansion in the fringes of the Xingu National Park, Brazilian Amazon. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 13, 435-446.
- Nogueira, E.M., Fearnside, P.M., Nelson, B.W., 2008a. Normalization of wood density in biomass estimates of Amazon forests. *Forest Ecology and Management* 256, 990-996.
- Nogueira, E.M., Fearnside, P.M., Nelson, B.W., Barbosa, R.I., Keizer, E.W.H., 2008b. Estimates of forest biomass in the Brazilian Amazon: New allometric equations and adjustments to biomass from wood-volume inventories. *Forest Ecology and Management* 256, 1853-1867.
- Nogueira, E.M., Fearnside, P.M., Nelson, B.W., França, M.B. 2007. Wood density in forests of Brazil's 'arc of deforestation': Implications for biomass and flux of carbon from land-use change in Amazonia. *Forest Ecology and Management* 248, 119-135.

- Ramirez-Gomez, S.O., 2011. Spatial drivers of deforestation in Suriname. Center for Agriculture Research in Suriname (CELOS). Tropenbos, Paramaribo, Suriname. 42 pp.
- Saatchi, S.S., Houghton, R.A., Dos Santos Alvala, R.C., Soares, J.V., Yu, Y. 2007. Distribution of aboveground live biomass in the Amazon Basin. *Global Change Biology* 13, 816-837.
- Soares-Filho, B.S., Pennachin, C.L., Cerqueira, G.C., 2002. DINAMICA – a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. *Ecological Modelling* 154, 217-235.
- Soares-Filho, B.S., Alencar, A., Nepstad, D., Cerqueira, G.C., Vera Diaz, M., Rivero, S., Solórzano, L., Voll, E., 2004. Simulating the response of land-cover changes to road paving and governance along a major Amazon highway: the Santarém-Cuiabá corridor. *Global Change Biology* 10, 745-764.
- Ximenes, A.C., Almeida, C., Amaral, S., Escada, M.I.S., Aguiar, A.P.D., 2011. Spatial Dynamic Modeling of Deforestation in the Amazon, in: Alejandro Salcido. (Ed.). *Cellular Automata - Simplicity Behind Complexity*. Vienna, Austria: InTech, pp.47-66.

Figure Legends

Fig. S1. Flowchart of the AGROECO model.

Fig. S2. Maps of land cover in the calibration stage (2003) and in the simulation of the scenarios considered in the study (2008).

Fig. S3. Result of the validation comparing the real and simulated maps for 2008.

Fig. S4. Baseline scenario simulated landscape in 2100: total study area (left panel) and Juma reserve (right panel).

Tabela S1

Área desmatada e área de floresta dentro e fora da Superfície de Floresta Fundiária (SFF) usadas para o cálculo da taxa de desmatamento.

Área	Ano	Desmatamento	Floresta	Média (ha)
		Área (ha)	Área (ha)	
Dentro da SFF	2003	120.800	481.925	509.638
(buffer de 2-km das estradas)	2008	180.263	537.350	
Fora da SFF	2003	65.088	8.768.125	8.706.150
(floresta remanescente excluindo a SFF)	2008	75.363	8.644.175	

Tabela S2

Porcentagem de erro entre o número de células no mapa real e simulado (PRODES 2008).

Classe	2008		% erro
	Mapa real - PRODES (células)	Mapa simulado (células)	
Floresta	1.473.485	1.471.491	0,14%
Desmatamento	40.900	42.839	4,74%
Vegetação secundária	4.129	4.184	1,33%

Tabela S3

Área (km²) de floresta total, desmatamento acumulado e vegetação secundária no mapa inicial (2008) e final (2050) nos três cenários para a área total de estudo.

Área de estudo (Classe)	PRODES	Linha de base	Cenário com vazamento (CV)	Cenário com vazamento reduzido (CVR)
	2008 (km ²)	2050 (km ²)	2050 (km ²)	2050 (km ²)
Floresta	92.092,8	77.397,8	77.445,6	77.874,3
Desmatamento acumulado[†]	2.556,3	16.181,2	16.143,2	15.748,5
Vegetação secundária	258,1	1.328,2	1.318,4	1.284,3

[†] O desmatamento acumulado não inclui a vegetação secundária mapeada. Nos mapas simulados, a classe “desmatamento” inclui áreas desmatadas tanto por corte da floresta quanto por corte da vegetação secundária.

Tabela S4

Área (km²) de floresta total, desmatamento acumulado e vegetação secundária no mapa inicial (2008) e final (2050) nos três cenários para a área da reserva do Juma.

Reserva do Juma (Classe)	PRODES	Linha de base	Cenário com vazamento (CV)	Cenário com vazamento reduzido (CVR)
	2008 (km ²)	2050 (km ²)	2050 (km ²)	2050 (km ²)
Floresta	5.573,9	4.521,5	5.179,0	5.179,5
Desmatamento acumulado†	64,8	984,7	422,1	424,5
Vegetação secundária	2,3	134,8	39,9	37,0

†O desmatamento acumulado não inclui a vegetação secundária mapeada. Nos mapas simulados, a classe “desmatamento” inclui áreas desmatadas tanto por corte da floresta quanto por corte da vegetação secundária.

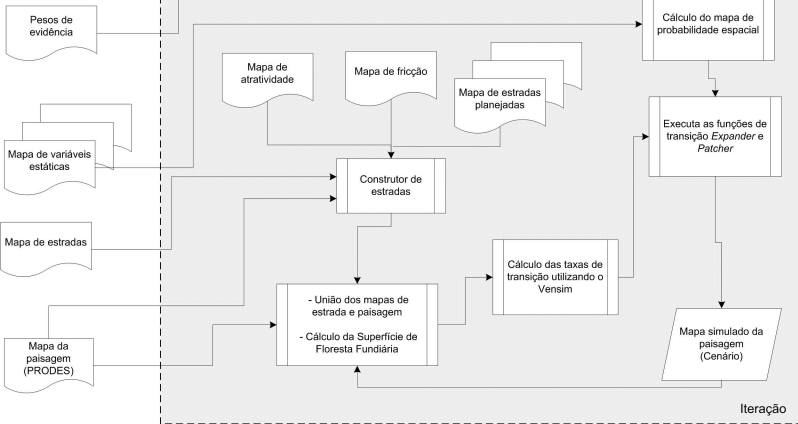
Tabela S5

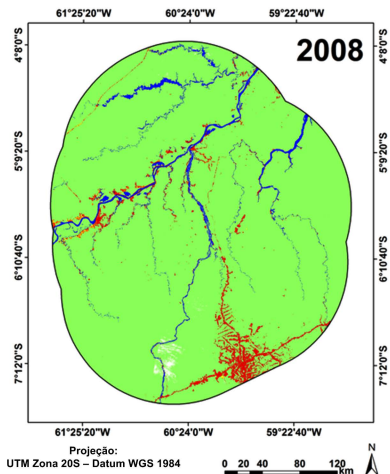
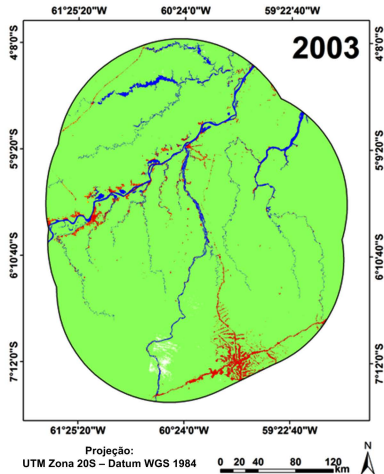
Análise do percentual de vazamento simulado no cenário com vazamento (CV) e o cenário com vazamento reduzido (CVR).

Classes (células) [†]		Cenários – 2050 (células)				
		Linha de base	CV	CVR	100% de vazamento (Linha de base – CV)	
Dentro da reserva do Juma	Floresta	72.344	82.864	82.872	-10.520	
	Desmatamento	15.755	6.753	6.792	9.002	
	Veg. Secundária	2.157	639	592	1.518	
					Cenário com vazamento (CV)	Cenário com vazamento reduzido (CVR)
Fora da reserva do Juma	Floresta	1.166.020	1.156.265	1.163.117	9.755 (92,7%)	2.903 (27,6%)
	Desmatamento	243.144	251.538	245.184	8.394	2.040
	Veg. Secundária	19.094	20.455	19.957	1.361	863

[†] A resolução espacial de uma célula é de 250 m (1 célula = 0,0625 km²).

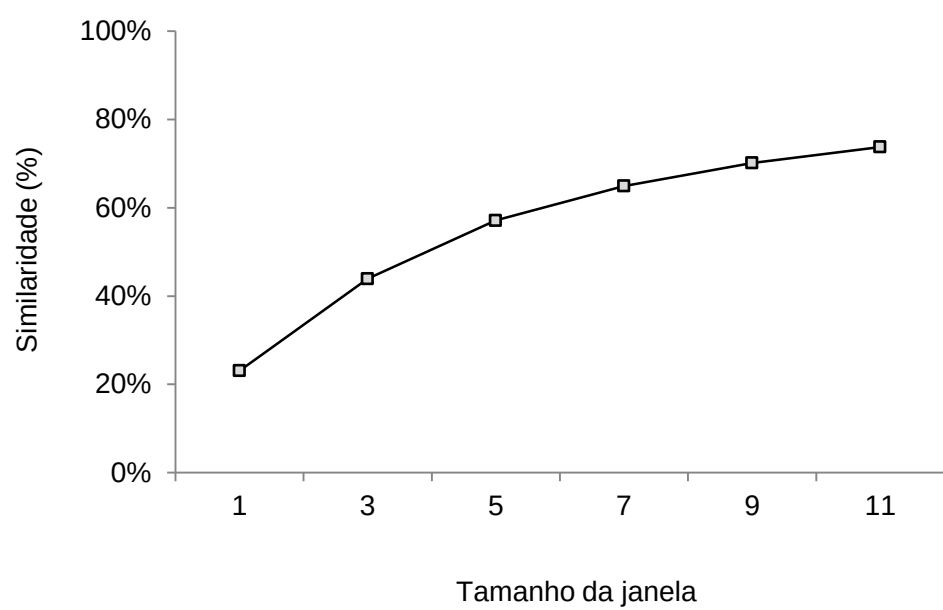
Dados de entrada

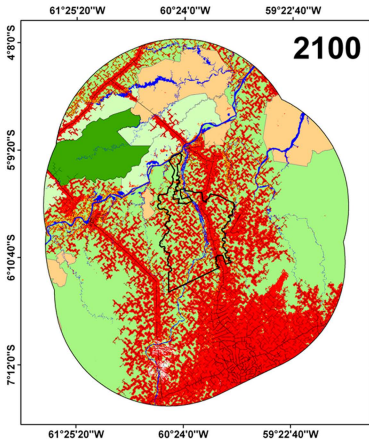




- Desmatamento
- Floresta
- Vegetação secundária

- Hidrografia
- Nuvem





Projeção:
UTM Zona 20S – Datum WGS 1984



Área de estudo

Reserva do Juma

Estradas

Reserva de Uso Sustentável

Reserva de Proteção Integral

Terra Indígena

Desmatamento

Floresta

Vegetação secundária

Hidrografia

Nuvem

