

Avaliação da influência do *status* de conservação e da precipitação na dinâmica de mosaicos floresta-savana em uma área de transição ao norte da Amazônia utilizando modelo linear de mistura espectral

Fabiana Rita Couto-Santos¹

Flávio Jesus Luizão¹

Arnaldo Carneiro Filho²

¹ Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA/LBA)
Av. André Araújo 2936 Aleixo – 69060-000 – Manaus - AM, Brasil
couto.santos@gmail.com / fluizao@inpa.gov.br

² Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República (SAE-PR)²
Esplanada dos Ministérios Bloco O 8º andar – 70052-900 – Brasília – DF, Brasil
arnaldo.carneiro@presidencia.gov.br

Abstract. Some coupled carbon/climate models are predicting globally significant changes in Amazon carbon and water cycles for the near future, with conversion of forest to savanna like vegetation. Facing this scenario, we estimate the forest-savanna mosaic extensions and directions of changes within 20 years in a transitional area in Northern Brazilian Amazonia, and investigated if conservation status and rainfall changes have influenced the mosaic dynamics. Applying spectral linear mixture model to a Landsat-5-TM time series, we identify protected savanna enclaves within a strictly protected nature reserve (ESEC Maracá) and its outskirts non-protected forest islands and compared their areas among 1986/1994/2006. Forest-savanna mosaic dynamics have being primarily mediated by climate and secondly by disturbance events. The protected savanna enclaves decreased 2.62 ha on average in 20 years with greater reduction rate in higher precipitation regime, whereas the non-protected forest islands remained stable overall, balancing an encroaching onto savanna during humid decades and with *savannization* in reduced rainfall periods. Thus, keeping favorable climate conditions, the ESEC Maracá conservation status will proceed favoring the forest encroaching onto savanna while the non-protected outskirt areas will be resilient to disturbance regimes. However, if confirmed the increase of dry events frequency predicted by climate models for this region, the future changes in extension and directions of forest limits will be affected, disrupting ecological services as carbon stock and local biodiversity.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto, ecótono, dinâmica de vegetação, mudanças climáticas, remote sensing, ecotone, vegetation dynamics, climate change.

1. Introdução

Grande parte dos trópicos sazonais é composta por mosaicos de vegetação de savanas e florestas. Os limites entre estes dois tipos de vegetação são altamente dinâmicos e sua natureza e taxas de mudanças ainda pouco conhecidas (Furley and Ratter 1990). Atividades humanas que promovam mudanças no uso e cobertura da terra associadas à ocorrência de eventos climáticos como *El Niños*, têm tornado as florestas mais susceptíveis ao fogo, levando a um aumento significativo na conversão de áreas de florestas em áreas de savanas ou outras formas de vegetação mais abertas (Nepstad et al. 2008). Por outro lado, as áreas protegidas, desempenham um importante papel na manutenção do balanço clima-vegetação na Amazônia. Atuando como uma barreira ao desmatamento, reduzem a probabilidade de ocorrência do processo de “savanização” (Soares-Filho et al. 2010) previsto pelos modelos climáticos para ocorrerem devido ao aquecimento global (Oyama and Nobre 2003).

O sensoriamento remoto de média a alta resolução espacial apresenta um elevado potencial para mapear a extensão e/ou mudanças na cobertura vegetal utilizando sequência multitemporal de imagens. Apesar disso, ainda são poucos os trabalhos enfocando o monitoramento das mudanças em áreas de limites floresta-savana ao longo do tempo em escala regional utilizando esta ferramenta, em sua maioria concentrados na África e Austrália (ex. Goetze et al. 2006; Tng et al. 2012), com pouca atenção dada às áreas de transição na América do Sul (ex. Eden 1986; Guerra et al. 1998) e, sobretudo na Amazônia Brasileira.

A mistura de reflectâncias de diferentes alvos dentro de um único pixel nas imagens Landsat TM é comum em ambientes heterogêneos como a região Amazônica (Lu et al. 2003) dificultando a classificação dessas áreas pelos métodos tradicionais. Assim, o uso de modelos lineares de mistura espectral (MLME) têm sido amplamente aceitos para capturar essa variação ao nível de sub-pixel e se mostraram promissores na classificação de vegetação e estimativa de biomassa, em detecção de mudanças no uso e cobertura da terra, e no mapeamento e monitoramento de áreas queimadas, desmatadas e de mineração na Amazônia, assim como na determinação de áreas de savanas amazônicas em regiões de limite floresta-savana no estado de Roraima e em outras áreas de Cerrado no Brasil Central (Shimabukuro et al. 1998; Ferreira et al. 2007).

Diante desse contexto, buscamos investigar a extensão, o tipo e as causas das mudanças da vegetação ocorridas em enclaves de savana da unidade de conservação ESEC Maracá e em ilhas de mata das áreas não protegidas do seu entorno, presentes em uma área de transição ao norte da Amazônia Brasileira. Através da comparação de uma série temporal de 20 anos (1986 a 2006) de imagens-fração do modelo de mistura aplicado à série temporal Landsat-5TM e da análise da tendência de longo prazo da precipitação da região, visamos: (1) quantificar a taxa de mudança (expansão/retração) da vegetação de floresta/savana nessa região, e (2) determinar se os fatores climáticos e *status* de conservação influenciam nesta dinâmica.

2. Metodologia de trabalho

2.1 Área de estudo

A área de estudo foi a Estação Ecológica de Maracá (ESEC Maracá) e seu entorno imediato, localizada na porção centro-norte do estado de Roraima a 120 km da capital Boa Vista (3°15' – 3°35' N e 61°22' – 61°58' W; Figura 1). A ESEC Maracá é uma unidade de proteção integral federal de 101.312 ha composta por 6% de enclaves de savanas encrustadas em uma matriz de 84% de florestas, sem registros de interferência humana desde 1978, enquanto seu entorno predomina uma matriz de savana com presença constante de distúrbios. Sobre um evidente limite biogeográfico e climático, a oeste encontram-se as florestas úmidas amazônicas, e a leste as planícies de savanas como parte do mosaico de ecossistemas de vegetação aberta do complexo de savanas “Rio Branco-Rupununi” (Figura 1). Situada exatamente na transição do subtipo climático savana (Aw) para o subtipo monções (Am), apresenta sazonalidade marcante, com estação seca de outubro a março e estação chuvosa de abril a setembro.

2.2 Pré-Processamento e processamento digital das imagens

Foram selecionadas três cenas 232/58 do Landsat-5 TM adquiridas durante a estação seca: em fevereiro de 1986 e de 1994 e em abril de 2006 (abril incluído como mês seco por apresentar chuva abaixo do esperado em 2006). Com resolução espacial de 30 metros, alta qualidade e baixa porcentagem de cobertura de nuvens, as cenas foram disponibilizadas gratuitamente pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

As imagens selecionadas foram corrigidas geometricamente com a acurácia de 0,2 pixels, aplicando polinômio de primeiro grau (*affine*) com o algoritmo de retificação e o método de reamostragem do vizinho mais próximo. A cena de 2006 foi convertida para UTM com base no mosaico ortorretificado da NASA-GeoCover-2000, e utilizada como referência para co-registrar as imagens dos anos anteriores. Um recorte a partir das coordenadas 660211,452 O e 405496,430 N, 750432,968 O e 344748,134 N feito nas três cenas, delimitou a área total do estudo em 5.480,80 km².

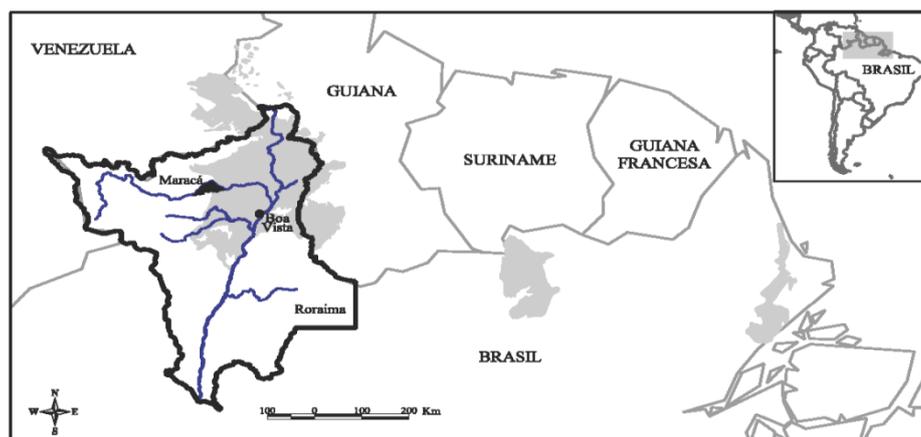


Figura 1. Mapa de localização da ESEC Maracá no limite biogeográfico e climático ao norte da Amazônia. Ecorregião das savanas das Guianas representadas em cinza.

O MLME (Shimabukuro and Smith 1991), foi aplicado utilizando as bandas 3, 4 e 5 do Landsat-TM5. Para determinar as imagens fração vegetação, solo e sombra, três *endmembers* foram selecionados. A imagem fração solo foi escolhida para detectar variações naturais dos enclaves de savana do interior da ESEC Maracá, e a fração vegetação para as áreas das ilhas de mata do seu entorno. As imagens fração passaram pela classificação digital para determinar as áreas de florestas/não-florestas de interesse. O algoritmo de segmentação utilizado foi o de crescimento de regiões com os limiares de similaridade e área de 30 e 2 respectivamente (Almeida-Filho and Shimabukuro 2002). Para classificação das regiões, foi aplicado o algoritmo não supervisionado ISOEG com os limiares de 75% e 99% para as imagens-fração sombra e vegetação respectivamente. Uma edição matricial baseada em análise visual comparando as áreas classificadas às imagens originais em composição colorida e à imagem de alta resolução do Quickbird comprovou a acurácia da classificação. Ao final destes processos foi possível identificar e localizar os polígonos de savana (enclaves) do interior da ESEC e os polígonos de florestas (ilhas de mata) do seu entorno.

2.3 Análise multitemporal

Todos os enclaves de savanas detectados tiveram suas áreas calculadas em ha para as cenas de cada ano. Para avaliar a dinâmica ocorrida devido às variações naturais das ilhas de mata, as áreas com presença de desmatamento detectados de 1997 a 2006 pelo “Programa de cálculo de desmatamento da Amazônia – PRODES” foram excluídas, e apenas as ilhas acima de 5 ha medidas. Para avaliar as mudanças ocorridas ao longo dos 20 anos avaliados nos enclaves de savana no interior da ESEC e nas ilhas de mata no seu entorno, foi feita uma análise multitemporal comparando a área total dos polígonos ao longo dos anos através da análise de variância não-paramétrica Kruskal-Wallis (KW), seguido do teste de comparações múltiplas. A taxa de mudança (retração/expansão) da área em 20 anos foi calculada a partir da diferença na área total de cada polígono entre os anos de 2006 e 1986. Taxas de mudanças parciais também foram calculadas para os diferentes períodos de amostragem (1994-1986 e 2006-1994) e comparadas através do teste não-paramétrico Wilcoxon pareado (V).

2.4 Dados Pluviométricos

Para investigar a tendência climática em longo prazo na região, foram compilados dados pluviométricos da estação climatológica de Boa Vista/RR de 1910 a 2008 e da estação meteorológica da ESEC Maracá de 1986 a 2010. Uma análise de tendência linear ajustada à equação $\hat{Y} = ax + y_0$ foi aplicada aos dados de precipitação da série temporal, com sua significância estatística avaliada pelo teste de Mann-Kendall (Tau). A magnitude da variação

foi considerada muito forte quando \geq ao desvio padrão, forte quando $\geq 50\%$ do desvio padrão e fraca quando $< 50\%$ do desvio padrão (Satyamurty et al. 2009). Tendências anuais e sazonais foram consideradas separadamente. Análises visuais das médias móveis de 10 anos foram utilizadas para detectar padrões de mudanças parciais na precipitação sendo as séries particionadas em sub-séries a partir das análises visuais e comparadas entre os períodos específicos pelo teste não-paramétrico de Wilcoxon (W). Todas as análises foram realizadas no software livre R 2.13.0.

3. Resultados

O MLME aplicado às imagens Landsat5-TM facilitou a detecção de mudanças nos mosaicos floresta-savana. Por realçar os tipos de cobertura vegetal presentes na área, permitiu uma melhor caracterização das áreas alvo, cuja distribuição é apresentada pelo mapa temático do ano de 2006, resultante da classificação por região das imagens-fração geradas pelo modelo de mistura (Figura 2).

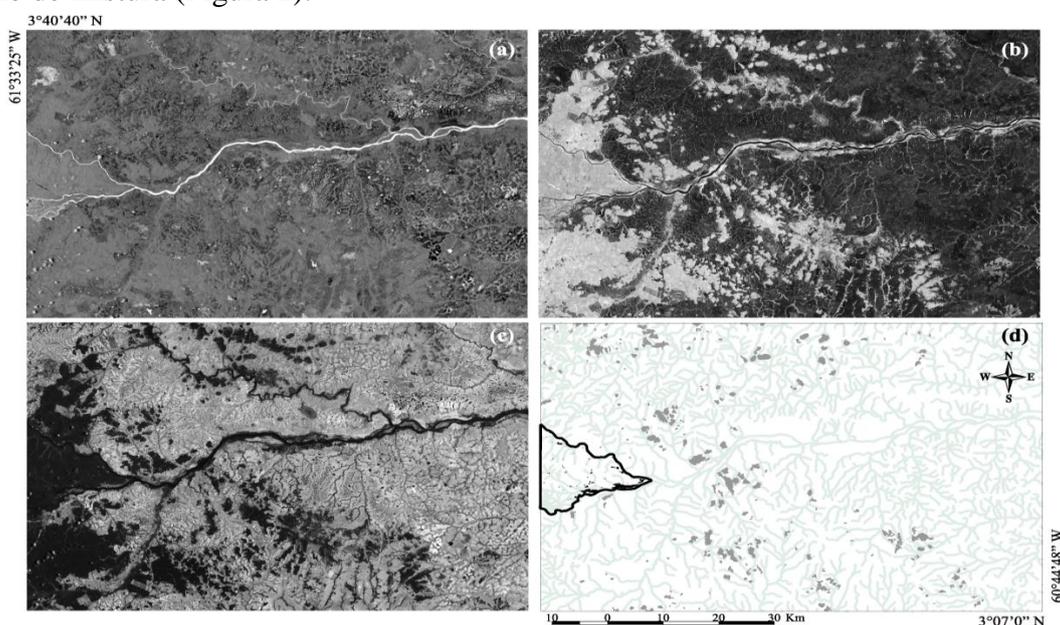


Figura 2. Recorte da cena 232/58 de 2006 com a área de estudo realçada pelas imagens-fração (a) sombra, (b) vegetação, (c) solo, geradas pelo MLME; e (d) mapa temático resultante, com enclaves de savana (■) do interior da ESEC Maracá e ilhas de mata (■) em seu entorno. Linha espessa negra representa o limite da ESEC Maracá, e demais linhas a hidrografia.

3.1 Dinâmica da área protegida

No interior da ESEC Maracá foi detectado um total de 96 enclaves de savana, sendo que 19% deles surgiram entre os anos de 1994 ($n = 9$) e 2006 ($n = 9$). A área total de savana variou significativamente ($KW = 30,36$; $gl = 2$; $p < 0,01$) de 746 ha em 1986, para 666 ha em 1994 chegando a 550 ha no ano de 2006. A significância da redução ocorrida na primeira década, assim como a redução total de aproximadamente 26% (196 ha) nos 20 anos amostrados foi confirmada pelo pós-teste ($p < 0,05$).

A taxa de mudança média dos enclaves de savana no período total de amostragem (1986 a 2006) foi de -2,62 ha ($\pm 0,96$ EP; Figura 3). A taxa de mudança parcial foi significativamente maior ($V = 2134$; $p < 0,01$) no período de 1994 a 2006 (-1,40 ha $\pm 0,83$ EP) comparado à primeira década de amostragem (-1,20 ha $\pm 0,55$ EP). Nos 20 anos amostrados, a maioria dos enclaves (88%) reduziram em média -3,10 ha ($\pm 1,07$ EP). Apenas 3% permaneceram estáveis e 9% avançaram em média 1,30 ha ($\pm 0,91$ EP).

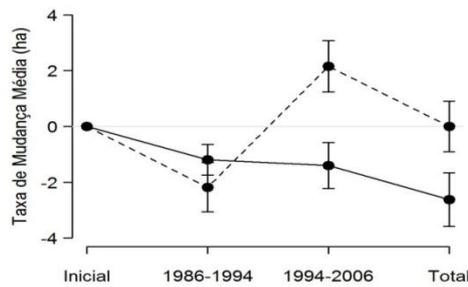


Figura 3. Taxa média de mudança total (1986-2006) e parcial das ilhas de savana da ESEC Maracá (—) e das ilhas de mata do entorno (----). Barra de erro = erro padrão da média.

3.2 Dinâmica da área não protegida

Foram detectadas 314 ilhas de mata na área do entorno da ESEC Maracá, sendo 79 delas retiradas da amostragem por apresentarem desmatamento. Assim, um total de 235 ilhas de mata foi considerado para análise; destas 7% surgiram entre os anos de 1994 ($n = 9$) e 2006 ($n = 7$). Não houve mudança substancial na área total das ilhas do entorno da ESEC Maracá ao longo dos anos ($KW = 1,54$; $gl = 2$; $p = 0,46$). Com uma área total inicial de 12.055 ha em 1986, as ilhas de mata sofreram uma pequena redução de 3,1% nos primeiros 8 anos e um posterior avanço de 4,5% na segunda década amostrada, totalizando um avanço não significativo de 1,3% (162 ha) em 20 anos. Como consequência dessa estabilidade, a taxa de mudança média das ilhas de mata de 1986 a 2006 foi quase nula (0,004 ha \pm 0,90 EP) com aproximadamente a mesma porcentagem de ilhas avançando (52,5%) e retraindo (47,5%) a uma taxa média semelhante de 6,96 ha (\pm 0,93 EP) e -7,70 ha (\pm 1,21 EP) respectivamente, em 20 anos. Entretanto uma diferença significativa ($V = 15699$; $p < 0,001$) entre as taxas de mudança parciais foi detectada entre os períodos amostrais, com a taxa média de -2,18 ha (\pm 0,89 EP) de 1986 a 1994 e de +2,16 ha (\pm 0,92 EP) entre 1994 e 2006 (Figura 3).

3.3 Dinâmica da pluviosidade

Em 98 anos, a tendência climática em longo prazo da estação climatológica de Boa Vista registrou uma tendência positiva fraca mas não significativa ($p \leq 0,05$) de aumento tanto da pluviosidade anual total (Figura 4a), quanto das estações chuvosa e seca separadamente de 145, 75 e 61 mm ano⁻¹ respectivamente. Apesar da tendência linear não ser significativa, oscilações em escalas multianuais, apresentaram uma tendência de aumento do início do século até a década de 50 (1910 a 1954), seguida de uma redução no regime de pluviosidade até o início dos anos 90 (1955 a 1992), voltando a aumentar a partir deste ano (1993 a 2008), sendo significativas as variações entre a segunda e terceira sub-série ($W = 144$; $p \leq 0,03$).

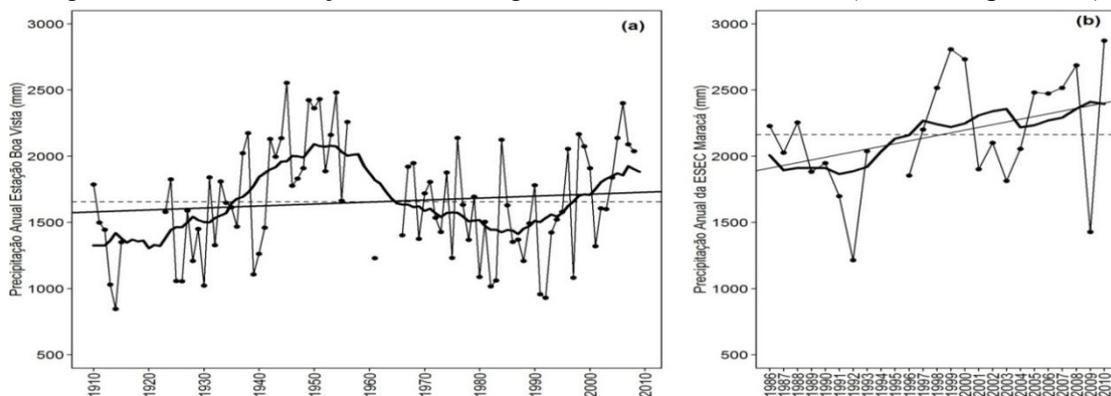


Figura 4. Precipitação anual em (a) Boa Vista nos últimos 98 anos e na (b) ESEC Maracá, nos últimos 24 anos (—●—). Linha de tendência linear de longo prazo baseada na equação ($y=ax+y_0$) (—). Precipitação média dos anos amostrados (----). Médias móveis de 10 anos (—).

Os dados climáticos da ESEC Maracá confirmaram a tendência linear de aumento não significativa da precipitação de 1986 a 2010 para os dados anuais (472 mm ano^{-1} – Figura 4b). Já as análises sazonais apontaram a tendência de aumento concentrada na estação chuvosa com a variação de 457 mm ano^{-1} em 24 anos considerada muito forte e significativa ($\tau = 0,35$; $p = 0,02$), enquanto na estação seca quase não houve variação no período amostrado (15 mm ano^{-1}). Análises das oscilações da ESEC Maracá confirmaram o mesmo padrão apresentado pelas últimas décadas da série temporal de Boa Vista, com um baixo regime de precipitação de 1986 a 1994 seguido de um aumento significativo de 1995 a 2010 ($W = 30$; $p \leq 0,05$).

4. Discussão

Na ESEC Maracá, a ausência de distúrbios associados, tais como fogo e desmatamento, apontados como um dos principais fatores ecológicos responsáveis pela retração dos limites savanas-florestas nos trópicos (House et al. 2003) proporcionou o avanço de florestas sobre savanas nos últimos 20 anos nas condições climáticas atuais, confirmando a hipótese de que o status de conservação interfere positivamente na dinâmica dos mosaicos floresta-savana ao norte da Amazônia Brasileira. Para áreas de transição da América do Sul, simulações de modelos também apontam essa tendência, sugerindo que sob as condições climáticas atuais e na ausência de fogo as florestas tropicais deveriam expandir linearmente cerca de 200 km em 1.000 anos sobre o domínio de savana atualmente observado (Hirota et al. 2010).

O aumento de atividades antrópicas, para atender a crescente demanda por áreas agriculturáveis e para pecuária, tem promovido mudanças no uso e cobertura da terra, levando a alterações nas áreas florestais da Bacia Amazônica (Davidson et al. 2012). Todavia, as ilhas de mata das áreas com distúrbios do entorno da ESEC Maracá permaneceram estáveis ao longo dos 20 anos amostrados. Essa relativa estabilidade dos limites em médio prazo corrobora outros estudos em áreas de transição no estado de Roraima e para região do Rupununi ao sul da Guiana (Eden 1986).

A hipótese de que variações de precipitação influenciam na dinâmica floresta-savana das áreas avaliadas ao norte da Amazônia também foi confirmada. Na área protegida, as taxas de retração de savanas dando espaço a florestas foram intensificadas em períodos com ocorrência de aumento de precipitação. Já na área não protegida, apesar do avanço de florestas sobre savanas predominar no período mais úmido, a ocorrência de savanização prevaleceu em períodos de precipitação reduzida, como previsto por Oyama e Nobre (2003) para esta região.

A variabilidade das chuvas em escala de longo prazo é resultado de complexas interações influenciadas pelo efeito do desmatamento, por alterações nos níveis de CO_2 na atmosfera e na temperatura da superfície dos oceanos, entre outros (Costa and Foley 2000). A tendência linear de precipitação foi positiva e significativa apenas para a estação chuvosa da ESEC Maracá a partir de 1986, mas suficiente para favorecer a retração das savanas na unidade de conservação. Entretanto, mais importante do que a tendência unidirecional, foi o sinal interdecadal com alternâncias entre períodos secos e úmidos que, negativamente correlacionado com alterações de longo prazo da temperatura da superfície do Oceano Pacífico, aquecem as águas do leste do Pacífico e provocam redução da precipitação ao norte da Bacia Amazônica em sua fase positiva, e o oposto na fase negativa (Marengo 2004).

Essa variabilidade interdecadal do regime de chuvas tem apontado efeitos diretos sobre a estrutura e a dinâmica das florestas tropicais, com a produtividade e a mortalidade de espécies florestais respondendo quase imediatamente às tendências climáticas de curto e médio prazo (Malhi and Wright 2004).

O impacto das alterações climáticas globais impulsionadas pela aceleração de emissões de gases do efeito estufa e por mudanças no uso da terra são previstas para ocorrerem devido aos mecanismos de interação vegetação-clima. Por sua sensibilidade climática, essas alterações

podem causar deslocamento das florestas da Amazônia ampliando áreas de transição floresta-savana em um futuro próximo. Considerando que os primeiros sinais dos impactos do clima devem ser sentidos nas áreas de ecótono (Malhi et al. 2008), a dinâmica dos mosaicos floresta-savana em áreas de limite climático com ausência de status de proteção será primeiramente afetada. Em especial seus estoques e fluxo de carbono, uma vez que esses ecossistemas possuem um importante papel no estoque e ciclagem de grandes quantidades de carbono na biomassa e em sua interface com a atmosfera. Uma vez que os fatores climáticos são considerados uma das causas principais de alterações dos limites floresta-savana para esta área de transição ao norte da Amazônia, o sucesso das propostas de conservação para esses ambientes dependerá, não só da manutenção das unidades de conservação já existentes, mas também de ações de mitigação das mudanças climáticas globais para redução da emissão de gases do efeito estufa, evitando assim a perda de florestas devido a variabilidades climáticas.

5. Conclusões

Tanto o *status* de conservação quanto as variações de precipitação demonstraram influenciar a dinâmica dos mosaicos floresta-savana ao norte da Amazônia Brasileira, mediada primariamente pelo clima e secundariamente pela presença de distúrbios. As estratégias de conservação da ESEC Maracá, associadas ao relativo aumento de precipitação da estação chuvosa nas últimas décadas, favoreceram o avanço de florestas sobre savanas a taxa de $0,131 \text{ ha ano}^{-1}$, demonstrando a importância da unidade de conservação na manutenção dos serviços ambientais. Se mantidas constantes essas condições, em 153 anos a maioria dos enclaves de savana da área protegida desapareceria, uma vez que 98% deles possuem tamanho menor do que 20 ha. Entretanto, essa vegetação ainda persistiria pelos próximos 4.000 anos na região leste da ESEC Maracá, considerando a presença de enclaves de maior porte. Já o cenário fora das áreas de proteção dos últimos 20 anos indicou relativa estabilidade dos mosaicos floresta-savana, garantida pela interação entre a variabilidade climática e a presença de distúrbios. A predominância de avanço de florestas em anos com precipitação aumentada (1994–2006), mesmo nas áreas não protegidas, demonstrou a dominância dos efeitos do clima sobre os efeitos dos distúrbios. E a ocorrência de savanização nessas áreas, em períodos de precipitação reduzida (1986–1994), confirma que se a tendência de aumento da frequência eventos climáticos de seca esperada pelos modelos climáticos se confirmarem para essa região, a extensão e a direção de mudanças futuras dos limites florestais do entorno da ESEC Maracá poderão ser afetadas, comprometendo a biodiversidade local e os serviços ambientais.

Agradecimentos

Agradecemos Valadete Duarte pelo suporte no processamento das imagens, à CPRM e INMET pelos dados climáticos cedidos, ao ICMBio pela imagem *QuickBird* disponibilizada e ao INPA pelo apoio logístico. Trabalho financiado pelo Grupo Boticário de Proteção à Natureza (Projeto 0889_20102) e pelo CNPq.

Referências Bibliográficas

- Almeida-Filho, R.; Shimabukuro, Y.E. Digital processing of a Landsat-TM time series for mapping and monitoring degraded areas caused by independent gold miners, Roraima State, Brazilian Amazon. **Remote Sensing of Environment**, v. 79, n. 1, p. 42-50, 2002.
- Costa, M.H.; Foley, J.A. Combined effects of deforestation and doubled atmospheric CO₂ concentrations on the climate of Amazonia. **Journal of Climate**, v. 13, n. 1, p. 18-34, 2000.
- Davidson, E.A.; Araújo, A.C.; Artaxo, P.; Balch, J.K.; Brown, I.F.; Bustamante, M.M.C.; Coe, M.T.; DeFries, R.S.; Keller, M.; Longo, M.; Munger, J.W.; Schroeder, W.; Soares-Filho, B.S.; Souza, C.M.; Wofsy, S.C. The Amazon basin in transition. **Nature**, v. 481, n. 7381, p. 321-328, 2012.

- Eden, M.J. Monitoring indigenous shifting cultivation in forest areas of southwest Guyana using aerial photography and Landsat. In: Eden, M.J.; Parry, J.T. (Eds). **Remote Sensing and Tropical Land Management**. Chichester: John Wiley, 1986. p. 255-277.
- Ferreira, M.E.; Ferreira, L.G.; Sano, E.E.; Shimabukuro, Y.E. Spectral linear mixture modelling approaches for land cover mapping of tropical savanna areas in Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 2, p. 413-429, 2007.
- Furley, P.A.; Ratter, J.A. Pedological and botanical variations across the forest-savanna transition on Maracá Island. **The Geographical Journal**, v. 156, n. 3, p. 251-266, 1990.
- Goetze, D.; Hörsch, B.; Porembski, S. Dynamics of forest-savanna mosaics in north-eastern Ivory Coast from 1954 to 2002. **Journal of Biogeography**, v. 33, n. 4, p. 653-664, 2006.
- Guerra, F.; Puig, H.; Chaume, R. The forest-savanna dynamics from multi-date Landsat-TM data in Sierra Parima, Venezuela. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 11, p. 2061-2075, 1998.
- Hirota, M.; Nobre, C.; Oyama, M.D.; Bustamante, M.M.C. The climatic sensitivity of the forest, savanna and forest-savanna transition in tropical South America. **New Phytologist**, v. 187, n. 3, p. 707-719, 2010.
- House, J.I.; Archer, S.; Breshears, D.D.; Scholes, R.J. Conundrums in mixed woody-herbaceous plant systems. **Journal of Biogeography**, v. 30, n. 11, p. 1763-1777, 2003.
- Lu, D.; Moran, E.; Batistella, M. Linear mixture model applied to Amazonian vegetation classification. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, n. 4, p. 456-469, 2003.
- Malhi, Y.; Wright, J. Spatial patterns and recent trends in the climate of tropical rainforest regions. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences**, v. 359, n. 1443, p. 311-329, 2004.
- Malhi, Y.; Roberts, J.T.; Betts, R.A.; Killeen, T.J.; Li, W.; Nobre, C.A. Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon. **Science**, v. 319, n. 5860, p. 169-172, 2008.
- Marengo, J.A. Interdecadal variability and trends of rainfall across the Amazon basin. **Theoretical & Applied Climatology**, v. 78, n. 1-3, p. 79-96, 2004.
- Nepstad, D.C.; Stickler, C.M.; Soares-Filho, B.; Merry, F. Interactions among Amazon land use, forests and climate: prospects for a near-term forest tipping point. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 363, n. 1498, p. 1737-1746, 2008.
- Oyama, M.D.; Nobre, C.A. A new climate-vegetation equilibrium state for Tropical South America. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 23, p. 2199, 2003.
- Satyamurty, P.; Castro, A.A.; Tota, J.; Gularte, L.E.S.; Manzi, A.O. Rainfall trends in the Brazilian Amazon Basin in the past eight decades. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 99, n. 1-2, p. 139-148, 2009.
- Shimabukuro, Y.E.; Smith, J.A. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 29, n. 1, p. 16-20, 1991.
- Shimabukuro, Y.E.; Batista, G.T.; Mello, E.M.K.; Moreira, J.C.; Duarte, V. Using shade fraction image segmentation to evaluate deforestation in Landsat Thematic Mapper images of the Amazon region. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 3, p. 535-541, 1998.
- Soares-Filho, B.; Moutinho, P.; Nepstad, D.; Anderson, A.; Rodrigues, H.; Garcia, R.; Dietzsch, L.; Merry, F.; Bowman, M.; Hissa, L.; Silvestrini, R.; Maretti, C. Role of Brazilian Amazon protected areas in climate change mitigation. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 107, n. 24, p. 10821-10826, 2010.
- Tng, D.Y.P.; Murphy, B.P.; Weber, E.; Sanders, G.; Williamson, G.J.; Kemp, J.; Bowman, D.M.J.S. Humid tropical rain forest has expanded into eucalypt forest and savanna over the last 50 years. **Ecology and Evolution**, v. 2, n. 1, p. 34-45, 2012.