

Mudanças históricas de uso da terra no Brasil para aplicações climáticas e hidrológicas

Anderson Luis Ruhoff
Alfonso Risso

Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS
Caixa Postal 15029 - 91501-970 – Porto Alegre – RS – Brasil
anderson.ruhoff@ufrgs.br; risso@iph.ufrgs.br

Abstract. Historical land use and land cover changes (LULCC) scenarios are important to simulate adequately climatic and hydrological impacts in the context of climate changes. Considering that the Earth's land cover has been extensively transformed in the past century and due to uncertainties to estimate historical agricultural land use and deforestation evolution, we presented here a historical evolution of land use and land cover classification in the main basins in Brazil, from 1979 to 2010. We used NOAA AVRRH and Terra MODIS images to compute vegetation indices and to apply a decision tree algorithm to create land use and land cover scenarios. The land cover scenarios, available at 1979, 1987/1988, 1992/1993, 2001 and 2009/2010 are reported at spatial resolution of 1-km and describe the evolution of 4 landcover types, including forests, agriculture, pasture/grassland and savannas (cerrados). To validate our findings, we compared the historical remote sensing scenarios to agricultural census and to LANDSAT based land cover maps. The reconstructed scenarios are relevant to understand the impact of land use and land cover changes on in hydrology and the global climate. This research was funded by the The Brazilian Electricity Regulatory Agency (ANEEL).

Palavras-chave: land cover changes, image processing, climate models, hydrological models, mudanças de uso da terra, processamento de imagens, modelos climáticos, modelos hidrológicos.

1. Introdução

As atividades humanas contribuem com diversos tipos de mudanças ambientais, afetando a biosfera e seus ciclos biogeoquímicos globais. Entretanto, grandes partes dessas mudanças ocorrem de maneira difusa no espaço, tais como as mudanças de uso da terra. Essas mudanças atuam de maneira cumulativa, por exemplo, através da emissão de gases estufa, alterações nos ciclos hidrológicos, degradação do solo e mudanças climáticas em diferentes escalas. As mudanças no uso da terra estão entre as mudanças globais mais evidentes, assumindo acentuada importância em áreas tropicais principalmente em função do desmatamento, atingindo dimensões sem precedentes na história humana. Feddema *et al.* (2005) cita que os impactos das mudanças de uso da terra podem ocorrer em duas grandes categorias: (1) *biogeoquímica*, responsáveis por alterações na composição química da atmosfera e (2) *biogeofísica*, que modificam o particionamento do balanço energético terrestre e consequentemente alteram a hidrologia de superfície e as condições climáticas.

A influência das mudanças de uso da terra no sistema climático e hidrológico terrestre foi analisado por diversos autores (Feddema *et al.*, 2005; Folei *et al.*, 2005; Trenbert, 2004). Myhre *et al.* (2013) sugerem que o impacto das mudanças de uso da terra desde 1750 nas forçantes radiativas é de apenas $0,15 \text{ W m}^{-2}$, o que muito baixo comparado às outras forçantes. Por essa razão, geralmente as mudanças de uso da terra são negligenciadas em modelos climático e hidrológicos (Pielke *et al.*, 2011). Entretanto, alguns estudos demonstram resultados contraditórios. Em avaliações de impactos climáticos do desmatamento na Amazônia em diferentes escalas espaciais, alguns estudos indicam um clima mais quente e seco na região (Salazar *et al.*, 2007), enquanto outros sugerem que os modelos climáticos são altamente sensíveis aos processos físicos relacionados às condições de uso da terra (Werth e Avissar, 2002).

Apesar das incertezas quanto aos impactos do desmatamento e das mudanças de uso da terra no ciclo hidrológico, admite-se que estes podem alterar o regime de precipitações (Aragão, 2012) e das vazões dos rios (Bayer, 2014) devido ao importante papel das áreas naturais na

hidrologia de grandes bacias. No contexto climático, as mudanças de uso da terra podem induzir aumentos de temperatura da ordem de 1° a 2° C, com possíveis impactos em teleconexões (Sitch *et al.*, 2005).

No Brasil, as mudanças de uso da terra estão fortemente conectadas à expansão de culturas agrícolas e pastagens, corte e extração de madeira (desmatamento) e expansão de infraestrutura econômica nas regiões Centro-Oeste e Norte (Ruhoff *et al.*, 2014). Considerado a participação do setor primário na composição do produto interno bruto brasileiro e em função de sua potencial área de expansão agrícola, as mudanças de uso da terra no Brasil assumem grande importância no contexto de mudanças climáticas e hidrológicas, principalmente nos biomas de Cerrado e de Floresta Amazônica.

Considerando que o papel das mudanças de uso da terra não se resume apenas às forçantes radiativas, podendo alterar significativamente os ciclos biogeoquímicos e biogeofísicos (Pielke *et al.*, 2011; Feddema *et al.*, 2005), buscou-se analisar as mudanças de uso da terra nas principais bacias hidrográficas brasileiras (delimitadas de acordo com a área de drenagem de 221 usinas hidrelétricas) entre 1970 e 2010. Nesse contexto, foram elaborados cinco cenários de uso da terra para os anos de 1979, 1987/1988, 1992/1993, 2001 e 2009/2010, com a identificação das classes florestas, cerrados, agricultura, pastagens, áreas urbanas e corpos hídricos. Os cenários serão utilizados para avaliar os efeitos dessas mudanças do uso da terra nos regimes climáticos e hidrológicos das grandes bacias hidrográficas brasileiras.

2. Metodologia de pesquisa

2.1. Cenários de uso da terra de 1979 e 1987/1988

Para a elaboração dos cenários de uso da terra foram utilizados dados dos sensores NOAA AVHRR com resolução espacial de 4 km para o ano de 1979 e 1 km para os anos de 1987/1988. Os cenários foram elaborados com base em séries temporais de índices de vegetação (NVDI), utilizando o algoritmo árvore de decisão C4.5 (Quinlan, 1993), com critérios similares aos utilizados pelo NOAA AVHRR e Terra MODIS em mapas de uso da terra para os anos de 1992/1993 e 2001 e 2009, respectivamente. Para o ajuste da árvore de decisão no ano de 1979 foram coletadas 10.724 amostras a partir de 55 imagens LANDSAT TM obtidas entre os anos de 1982 e 1985, enquanto que para o ano 1987/1988 foram obtidas 14.709 amostras a partir de 72 imagens LANDSAT obtidas entre os anos de 1985 e 1988. Em função da baixa resolução espacial e radiométrica dos dados, as classes de áreas urbanas e corpos hídricos não foram mapeadas. Essas classes foram obtidas a partir de outras fontes de dados. A **Figura 1** apresenta a distribuição das amostras das classes na área de interesse para os anos de 1979 e 1987/1988.

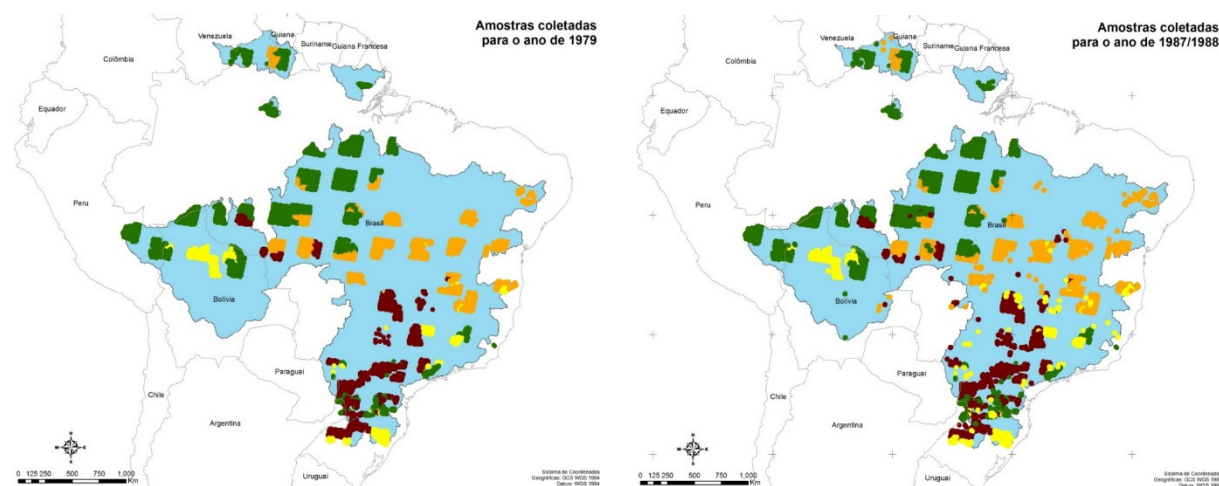


Figura 1. Seleção de amostras de uso da terra a partir de imagens LANDSAT TM para classificação de imagens NOAA AVHRR por árvore de decisão para os anos de 1979 e 1987/1988.

2.2. Cenários de uso da terra de 1992/1993, 2001 e 2009/2010

Para a elaboração dos cenários de uso da terra para os anos de 1992/1993, 2001 e 2009/2010, os mapas de uso da terra produzidos a partir de imagens NOAA AVHRR (dados disponíveis em <https://lta.cr.usgs.gov/GLCC>) (Hansen *et al.*, 2000) e imagens MODIS produto MCD12Q1 (dados disponíveis em <http://reverb.echo.nasa.gov/>) (Friedl *et al.*, 2010) foram reclassificados a partir da legenda de 17 classes definida pelo IGBP. A **Tabela 1** apresenta a agregação das classes da legenda do IGBP. Outras classes, como áreas arbustivas abertas ou fechadas, foram classificadas de acordo com a localização e a vegetação predominante.

Tabela 1. Simplificação das classes de uso da terra definidas pelo IGBP para utilização em modelos climáticos e hidrológicos, aplicadas aos mapas de uso da terra elaborados a partir de imagens NOAA AVHRR e Terra MODIS.

Legenda IGBP	Legenda dos mapas finais
Corpos d'água	Corpos d'água
Áreas permanentemente alagadas	
Florestas aciculares perenes	
Florestas latifoliadas perenes	
Florestas aciculares decíduas	
Florestas latifoliadas decíduas	Florestas
Florestas mistas	
Savanas lenhosas	
Savanas	Cerrado
Campos	Pastagem
Agricultura	
Mosaico de vegetação natural e agricultura	Agricultura
Áreas urbanas	Áreas urbanas

2.3. Consistência espacial e temporal dos cenários de uso da terra entre 1970 e 2010

A partir do processo de pós-classificação dos cenários de uso da terra buscou-se estabelecer uma consistência espacial e temporal entre as classes de uso da terra e possíveis transições ente classes. O processo de pós-classificação baseou-se em técnicas baseadas em análises locais (específicas) de (i) variações nas estatísticas dos índices de vegetação (NDVI), (ii) tendências observadas nos censos agropecuários, (iii) imagens LANDSAT TM e ETM e (iv) operações booleanas, conforme ilustrado na **Figura 2**.

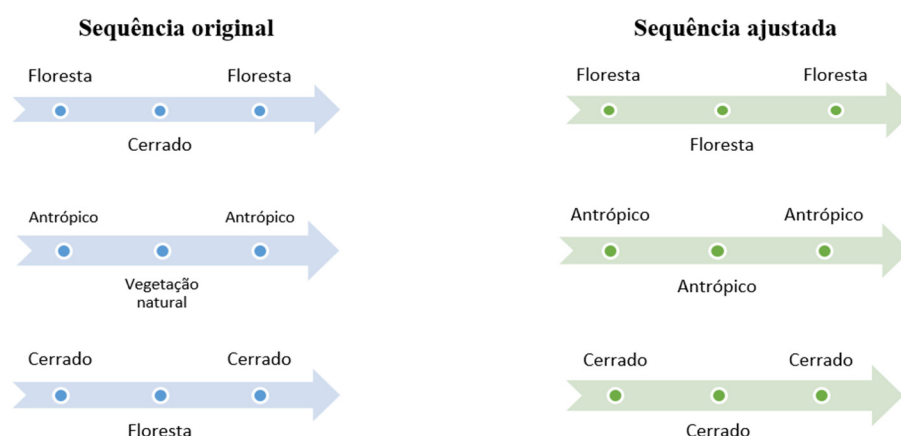


Figura 2. Exemplos de regras booleanas para consistência temporal e espacial das transições entre diferentes classes dos cenários de uso da terra entre 1979 e 2010.

2.4. Validação dos cenários de uso da terra

Para a validação dos resultados, optou-se pela comparação dos cenários obtidos através de imagens de sensoriamento remoto com os dados históricos de censos agropecuários (Leite *et al.*, 2012) e mapas de uso da terra na Bacia do Ji-Paraná (Ballester *et al.*, 2012).

3. Resultados e discussão

3.1. Evolução do uso da terra entre 1979 e 2010

A **Figura 3** apresenta as áreas ocupadas por classe de uso da terra, enquanto a **Figura 4** apresenta a evolução espacial do uso da terra, para os anos de 1979, 1987/1988, 1992/1993, 2001 e 2009/2010. Observa-se durante o ano de 1979 a predominância de áreas agrícolas e pastagens nas regiões Sul e Sudeste. No ano de 1987/1988, a fronteira agrícola expande-se para os Estados de Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Goiás, enquanto que no ano de 1992/1993 essa expansão concentra-se no norte do Estado de Goiás, sul do Estado de Tocantins e oeste da Bahia. Nos anos de 2001 e 2009, áreas como o Centro-Oeste apresentam uma intensificação dos processos agrícolas, enquanto as áreas localizadas ao sul da Bacia Amazônica apresentam altas taxas de conversão de florestas para áreas de pastagens e agricultura.

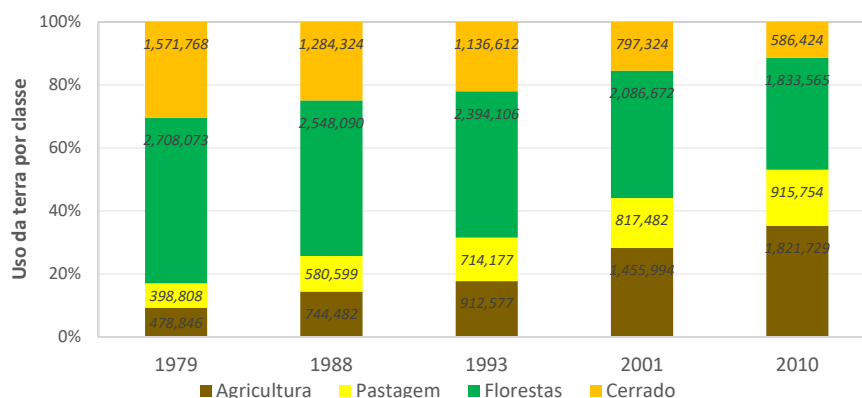


Figura 3. Evolução percentual dos cenários de uso da terra nas bacias hidrográficas brasileiras entre 1979 e 2010. Os valores em itálico apresentados correspondem a área total ocupada por cada classe de uso da terra (em km²).

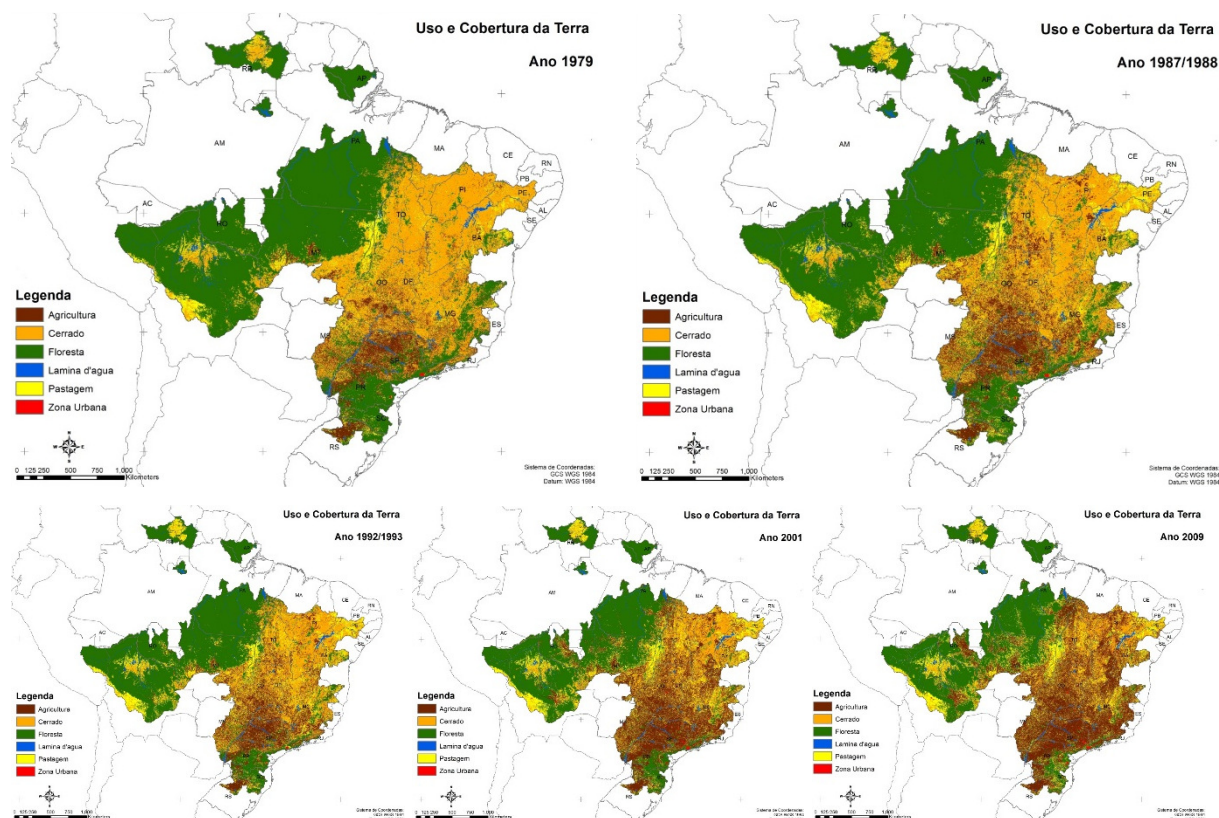


Figura 4. Evolução dos cenários de uso da terra na área de drenagem das usinas hidrelétricas brasileiras entre 1979 e 2009/2010 obtidos através de classificação de imagens dos sensores NOAA AVHRR e Terra MODIS.

De acordo com dados do Censo Agropecuário Brasileiro (IBGE, 2016), as áreas antrópicas no Brasil ocupam uma extensão de aproximadamente 2.500.000 km². Essas áreas são definidas como todas as áreas ocupadas por atividades agropecuárias, tais como agricultura permanente e temporária e pastagens naturais e plantadas utilizadas para pecuária. As áreas agrícolas plantadas ocupam pouco mais de 765.000 km², enquanto as áreas de pastagens (naturais e plantadas) apresentam mais de 1.725.000 km². Considerando os cenários de uso da terra elaborados a partir de imagens de sensoriamento remoto, as áreas antrópicas (classes de pastagens e agricultura) ocupavam uma extensão superior a 877.000 km² no ano de 1979, passando para mais de 2.737.000 km² no ano de 2009/2010. Tendo como referência o ano de 1979, as áreas antrópicas apresentaram um crescimento de 1.860.000 km². Essa conversão ocorreu tanto sobre áreas de florestas quanto áreas de cerrado.

Em relação a evolução temporal das áreas florestais na área de estudo, as áreas ocupadas por florestas representavam mais de 2.700.000 km² em 1979, enquanto que em 2009/2010 as áreas florestais representavam pouco mais de 1.800.000 km². Nesse período, mais de 874.500 km² de florestas foram suprimidas. As maiores áreas de desmatamento encontram-se principalmente ao sul e sudeste da Bacia Amazônica. Entretanto, muitos remanescentes florestais (fragmentos florestais) e áreas dos biomas Cerrado e Mata Atlântica também foram suprimidos, o que confirma a intensificação das atividades agropecuárias no período analisado em toda área de estudo. A **Tabela 2** e a **Tabela 3** apresenta a evolução das áreas antropizadas e do desmatamento na área de drenagem das usinas hidrelétricas brasileiras entre 1979 e 2009/2010.

Tabela 2. Evolução do processo de antropização entre os anos de 1979 e 2009 obtidos por classificação de imagens de sensoriamento remoto.

	Área (km ²)				
	1979	1987/1988	1992/1993	2001	2009/2010
Agricultura	478.846	744.482	912.577	1.455.994	1.821.729
Pastagem	398.808	580.599	714.177	817.482	915.754
Antropização	877.654	1.325.081	1.626.754	2.273.476	2.737.483

Tabela 3. Evolução da área desmatada entre os anos de 1979 e 2009 obtidos por classificação de imagens de sensoriamento remoto em comparação com o ano de referência de 1979.

Área desmatada	Área (km ²)			
	1987/1988	1992/1993	2001	2009/2010
Área adicional em relação ao mapeamento anterior	159.983	153.984	307.434	253.107
Área acumulada	159.983	313.967	621.401	874.508

A **Figura 5** apresenta a variabilidade espacial e temporal do processo de antropização e de áreas florestais. Ruhoff *et al.* (2014) apresentam análises da evolução dos cenários de uso da terra para 21 grandes bacias hidrográficas e para a área de drenagem das 221 usinas hidrelétricas brasileiras.

3.2. Validação dos cenários de uso da terra

A **Figura 6** apresenta a comparação do processo de antropização obtidos através de classificação de imagens de sensoriamento remoto e da espacialização dos dados dos censos agropecuários (Leite *et al.*, 2012). Para o período entre 1940 e 1995 foram utilizados os dados dos censos agropecuários brasileiros disponibilizados por Leite *et al.* (2012) com resolução espacial de aproximadamente 17 km. Para os anos de 2000 e 2005 utilizou-se dados de modelos globais baseados em censos agropecuários internacionais com aproximadamente 55 km de resolução espacial (Ramankutty e Foley, 1999).

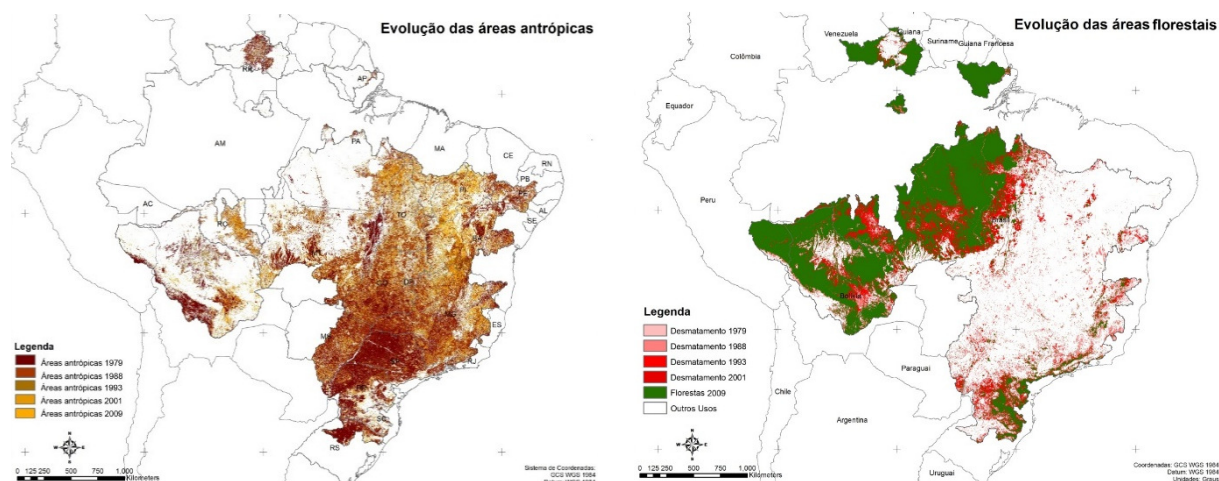


Figura 5. Evolução do processo de antropização (conversão de áreas naturais de florestas e cerrado para áreas agrícolas e pastagens) e de áreas florestais (desmatamento) entre 1979 e 2009/2010.

De acordo com a espacialização dos dados dos censos agropecuários, as áreas ocupadas por processos antrópicos variaram entre 26% em 1980 e 40% em 2005, enquanto que nos mapas de uso da terra obtidos por sensoriamento remoto as áreas antrópicas ocupam aproximadamente 17% em 1979 e 52% em 2009 da área total analisada (aproximadamente 5.261.901 km²). A diferença no total das áreas antrópicas entre os dados de sensoriamento remoto e dos censos agropecuários é de 37% em 1979/1980, 23% em 1988/1990, 13% em 1993/1995 e 17% em 2001/2000, respectivamente.

Observa-se que entre os anos de 1979 e 1992/1993, os dados de antropização obtidos por sensoriamento remoto estão muito subestimados em relação aos dados dos censos agropecuários. Provavelmente isso ocorre em função menor resolução espacial e radiométrica dos dados do sensor AVHRR em comparação com dados do sensor MODIS para mapeamento de áreas agrícolas e de pastagens. Assim, as incertezas no mapeamento de áreas agrícolas e de pastagens tendem a ser maiores quanto mais antigos os dados de sensoriamento remoto (principalmente no ano de 1979, e também nos anos de 1987/1998 e 1992/1993 quando comparados aos mapeamentos dos anos de 2001 e 2009). Entretanto, também se salienta que podem haver inconsistências e incertezas nos dados dos censos agropecuários, o que dificulta a comparação e validação dos mapeamentos multitemporais de uso da terra.

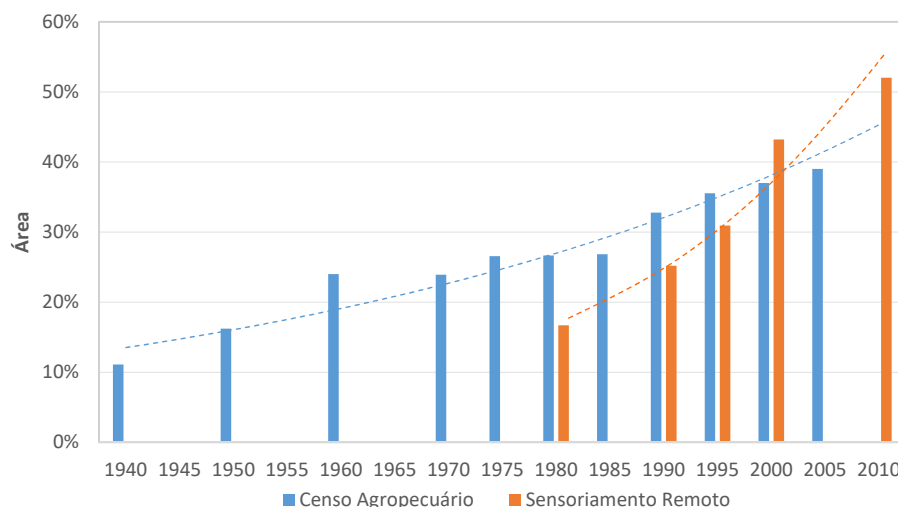


Figura 6. Comparação da evolução do processo de antropização (conversão de áreas naturais de florestas e cerrado para áreas agrícolas e pastagens) entre 1940 e 2010 a partir de dados de censos agropecuários e classificação de imagens de sensoriamento remoto. As linhas pontilhadas correspondem a linhas de tendência ajustadas aos dados.

Para avaliar a acurácia dos mapeamentos de uso da terra obtidos a partir de imagens de sensoriamento remoto, comparou-se os dados obtidos com dados de maior resolução espacial na bacia do Ji-Paraná, utilizando-se mapeamentos multitemporais obtidos a partir de imagens LANDSAT TM/ETM (Hanada *et al.*, 2016), referentes aos anos de 1986, 1992, 1996, 1999 e 2001, com legenda de uso da terra compatível com a escala de mapeamento. A **Figura 7** apresenta a comparação entre mapas de uso da terra obtidos a partir de imagens NOAA AVHRR e Terra MODIS e imagens LANDSAT, com diferentes resoluções espaciais.

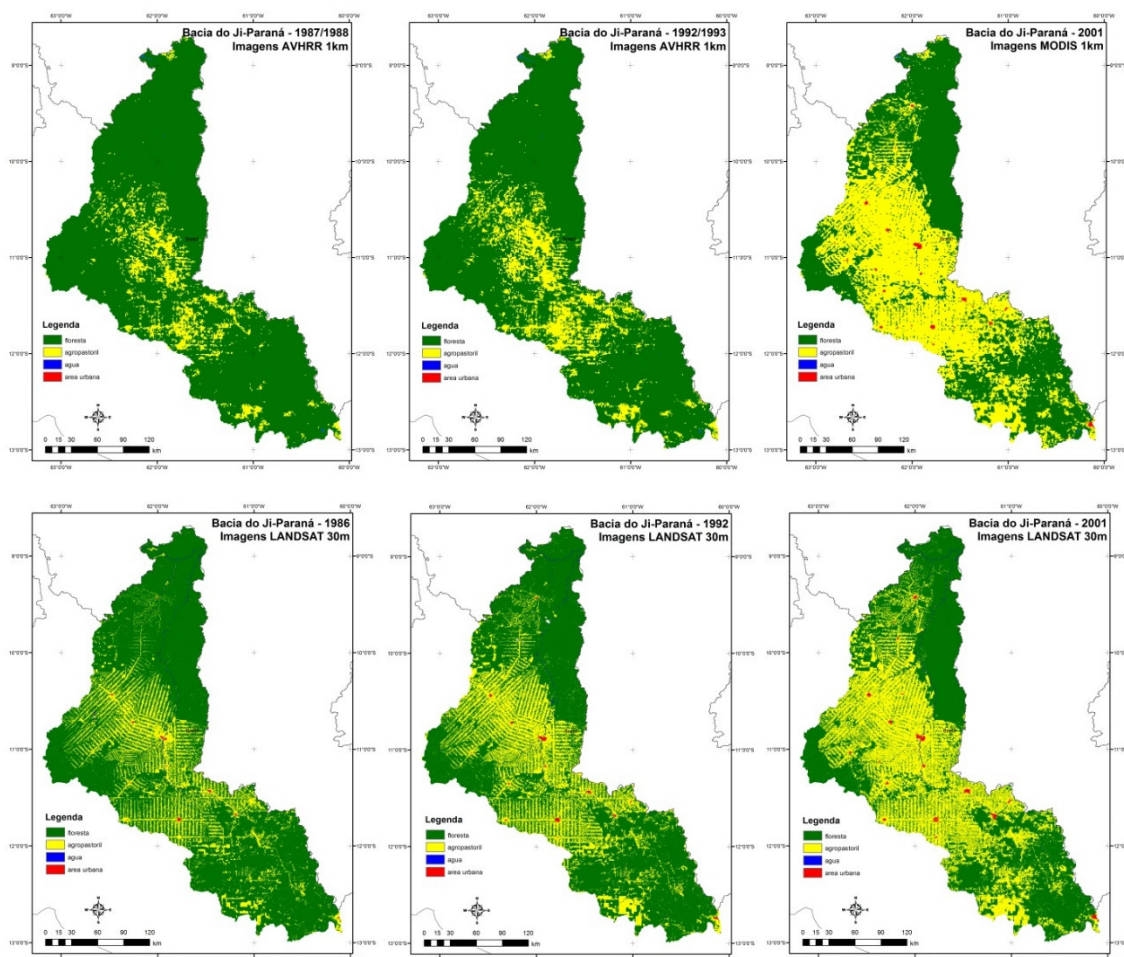


Figura 7. Evolução do uso da terra na Bacia do Ji-Paraná a partir de imagens NOAA AVHRR e Terra MODIS e imagens LANDSAT TM/ETM (Hanada *et al.*, 2016).

As áreas de florestas obtidas a partir de imagens NOAA AVHRR apresentaram-se subestimadas em relação às áreas florestais obtidas a partir de imagens LANDSAT TM em relação aos anos de 1986/1988 (subestimativa de 12%) e 1992/1993 (subestimativas de 18%). Em relação ao ano de 2001, as áreas de florestas obtidas a partir de imagens do sensor Terra MODIS são superestimadas em relação às imagens do sensor LANDSAT ETM (superestimativas de 11%).

Para analisar a concordância entre as imagens calculou-se o índice *kappa*. Para o período 1986/1988 obteve-se índice *kappa* de 0,24, enquanto que para o ano de 1992/1993 obteve-se índice *kappa* de 0,32 e para o ano de 2001 obteve-se índice *kappa* de 0,64, o que demonstra a concordância entre as diferentes classificações. Apesar do problema de escala, observa-se que ambos mapeamentos apresentam o mesmo padrão espacial, confirmando o potencial de mapeamento multitemporal de uso e cobertura da terra a partir de imagens de moderada resolução espacial.

4. Considerações Finais

Neste artigo são apresentados cenários históricos de uso da terra na área de drenagem das 221 usinas hidrelétricas Brasileiras, desde a década de 1970 até os dias atuais. Diversos autores (Pielke *et al.*, 2011; Feddema *et al.*, 2005; Foley *et al.*, 2005) salientam a importância da utilização de cenários de uso da terra consistentes em simulações climáticas e hidrológicas, concluindo que a consideração desses cenários pode melhorar significativamente essas simulações, uma vez que o acoplamento superfície-atmosfera está diretamente relacionado a mudanças de uso da terra, mas apresentando padrões diferentes ao longo do globo terrestre. Os dados obtidos a partir dos sensores NOAA AVHRR e do sensor MODIS permitiram a análise evolutiva de uso da terra no período de 1979 a 2009/2010, representando adequadamente essa na área de estudo de acordo com as limitações do fator de escala. Posteriormente, sugere-se analisar a partir de modelos climáticos e hidrológicos, quais os impactos das mudanças de uso da terra nas principais bacias hidrográficas brasileiras.

Referências bibliográficas

- Aragão, L.E.O.C. The rainforest's water pump. **Nature**, v. 489, p. 217–218. 2012.
- Bayer, D.M. **Efeito das mudanças de uso da terra no regime hidrológico de bacias de grande escala**. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2014.
- Feddema, J.J.; *et al.* The importance of land-cover change in simulating future climates. **Science**, v. 310, p. 1674-1678. 2005.
- Foley, J.A.; *et al.* Global Consequences of Land Use. **Science**, v. 309 (5734), p. 570-574. 2005.
- FRIEDL, M.A.; *et al.* MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets. **Remote Sensing of Environment**, v. 14, p. 168-182. 2010.
- Hanada, L.; *et al.* **LBA-ECO CD-06 Land Use/Land Cover Time Series, Ji-Paraná Basin, Brazil: 1986-2001**. Disponível em <<http://www.daac.ornl.gov>>. Acesso em 15 de novembro de 2016. DOI: 10.3334/ORNLDAAAC/844. 2007
- Hansen, M.C.; *et al.* Global land cover classification at 1 km spatial resolution using a tree approach. **International Journal of Remote Sensing**, v. 21, n. 6, p. 1331–1364, 2000.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Censo Agropecuário Brasileiro**. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em 15 de novembro de 2016.
- Leite, C.L.; *et al.* Historical land use change and associated carbon emissions in Brazil from 1940 to 1995. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 26, p. 1-13. 2012.
- Myhre G.; *et al.* Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: Stocker, T.F.D.; *et al.* **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press. 2013.
- Pielke, R.A.; *et al.* Land use/land cover changes and climate: modeling analysis and observational evidence. **WIRES Climate Change**, v. 2, p. 828-850. 2011.
- Quinlan, J.R. **C4.5: Programs for machine learning**. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann, 1993.
- Ramankutty, N.; Foley, J.A. Estimating historical changes in global land cover: Croplands from 1700 to 1992. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 13, p. 997-1027. 1999.
- Ruhoff, A.L.; *et al.* Cenários de uso do solo. In: Marangon Lima, J.W. et al. (Org.). **Efeitos das mudanças climáticas na geração de energia elétrica**. São Paulo: AES Sul, 2014. Cap. 4, p. 6085-6098, 2009.
- Salazar, L.F.; Nobre, C.A.; Oyama, M.D. Climatic change consequences on the biome distribution in tropical South America. **Geophysical Research Letters**, v. 34. 2007.
- Sitch, S.; *et al.* A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 19. 2005.
- Trenberth, K.E. Rural land-use change and climate. **Nature**, v. 427, p. 213. 2004.
- Werth, D.; Avissar, R. The local and global effects of Amazon deforestation. **Journal of Geophysical Research**, v. 107 (D20). 2002.