

Desmatamento da Amazônia: O DETER pode ser utilizado como preditor das taxas anuais de desmatamento geradas pelo PRODES?

Luis Eduardo P. Maurano¹
Maria Isabel Sobral Escada¹
Camilo Daleles Rennó¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Divisão de Processamento de Imagens - DPI
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{maurano,isabel,camilo}@dpi.inpe.br

Abstract: The National Institute for Space Research- INPE, developed two operational systems to monitor deforestation in the Legal Amazon: PRODES and DETER. PRODES is an annual inventory of primary forest loss and is based on Landsat image analysis, its main objective is to estimate the annual rate of deforestation. DETER provides daily *Alert* of deforestation and forest degradation for law enforcement based on MODIS sensor images. Although these systems have been developed to meet different goals, a frequent question arises about the possibility of predicting the PRODES rate based on DETER data. Considering this question, a regression analysis was developed combining DETER data, aggregated for a period of one year, and the annual rate produced by PRODES, for the period of 2005 to 2016. The regression analysis resulted in a high coefficient of determination of 0.87, and in an average error estimated of 18.5%. However, the error can be larger. In 2015, the PRODES rate was overestimated in 40.7%. This result shows that the use of the regression to estimate deforestation rate has to be done carefully. Despite of it, DETER data can be used as a predictor of PRODES trends for the Legal Amazon extent, with the data aggregated on an annual basis. In the analyzes of the states, the results varied and DETER showed to be good at predicting rates for Mato Grosso state, with a coefficient of determination of 0.95, but it wasn't good at predicting deforestation rates for Pará state, with coefficient of determination of 0.55.

Palavras-chave: mapeamento e monitoramento de desmatamento, detecção de desmatamento em tempo real, DETER, PRODES, sensoriamento remoto.

1. Introdução

Desde 1988, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) realiza o inventário anual de perda de área de cobertura florestal primária na Amazônia Legal através de mapeamento da dinâmica do desmatamento por corte raso com uso de imagens de satélites da classe Landsat (resolução espacial de 30 m e 16 dias de revisita), a partir do qual se calcula a taxa de desmatamento anual na Amazônia Legal. Este levantamento é feito pelo Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia por Satélites (PRODES), conduzido no âmbito do Programa Amazônia (INPE, 2016).

O PRODES processa anualmente cerca de 215 imagens do satélite Landsat ou de sensores com características similares e identifica regiões de corte raso, onde ocorreu a supressão completa da cobertura florestal, em áreas maiores que 6,25 hectares. Normalmente uma estimativa da taxa é divulgada no mês de dezembro, baseada em um subconjunto de cenas consideradas prioritárias (~100 cenas) e a consolidação da taxa, após processamento de todas as cenas, é divulgada no primeiro semestre do ano seguinte.

As informações geradas pelo PRODES são usadas pelo governo brasileiro para o estabelecimento de políticas públicas. Esses dados também tem ampla penetração na sociedade civil e embasam políticas bem sucedidas como a Moratória da Soja (Rudorff et al. 2011) e o TAC (Termo de Ajuste de Conduta) da Carne (Nepstad et al. 2014), entre outras iniciativas. A Figura 1 apresenta a série histórica dos dados produzidos pelo PRODES desde 1988.

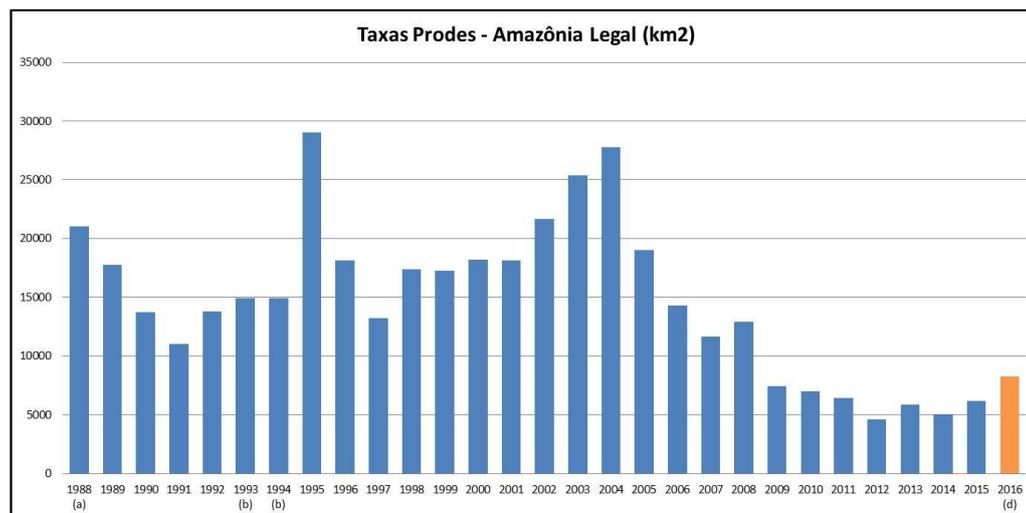


Figura 1: Série histórica produzida pelo PRODES 1988 - 2016. A taxa estimada em 2016 corresponde a um valor preliminar.

Os dados do PRODES não são suficientes para dar suporte às ações de prevenção e, principalmente, de fiscalização, devido ao tempo que levam para serem produzidos e por incluírem apenas as áreas de corte raso. Por isso, a partir de 2004, o INPE criou o Sistema de Detecção de Desmatamento em Tempo Real (DETER) para monitoramento contínuo e rápido do desmatamento e da degradação florestal. O sistema foi criado para atender ao Plano de Ação para a Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAm) do Governo Federal, iniciado em 2003 (INPE, 2008).

O DETER utiliza imagens do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) a bordo dos satélites Terra e Aqua e apresentam resolução espacial de 250 m. Os dados MODIS têm como principal característica a alta resolução temporal, que possibilita recobrir toda Amazônia Legal a cada dois dias. No entanto, devido a sua resolução espacial, estas imagens permitem detectar somente desmatamentos com áreas de tamanho superior a 25 ha.

O DETER mapeia tanto áreas de corte raso quanto áreas de degradação florestal, porém, não faz a distinção entre elas. Atualmente, o sistema fornece diariamente dados de Alertas de alteração da cobertura florestal ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e ao Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio). A cada trimestre estes dados são publicados na Internet (INPE, 2016).

Apesar do DETER não ser um instrumento adequado para medir de forma precisa a área desmatada e, assim, estimar sua taxa, a cada finalização do calendário anual do desmatamento (chamado de ano PRODES), que vai de 01 de agosto do ano corrente a 31 de julho do ano seguinte, é possível obter o dado agregado do DETER para o período de 12 meses. Como o dado agregado do DETER fica disponível cerca de quatro meses antes da divulgação da taxa oficial de desmatamento produzida pelo PRODES, uma questão recorrente, formulada pelas ONGs, sociedade civil e por diversos órgãos governamentais é sobre a possibilidade de estimar a taxa de desmatamento do PRODES ou pelo menos definir uma tendência desta taxa, a partir dos dados consolidados do DETER para o ano de referência do PRODES.

Para responder a essa pergunta, esse trabalho se propôs analisar os dados produzidos pelo DETER nos últimos 12 anos, comparando suas informações agregadas em períodos de 12 meses, com as taxas oficiais produzidas pelo PRODES. Essas análises foram realizadas para toda a extensão da Amazônia Legal e para os estados do Mato Grosso e Pará, que

historicamente tem mais contribuído para as taxas de desmatamento. No PRODES 2016, estes dois estados contribuíram com 18% e 39% do total de desmatamento, respectivamente.

2. Metodologia de Trabalho

A metodologia desenvolvida neste trabalho foi executada em três etapas e contou com análises realizadas para recortes que incluíram toda a extensão da Amazônia Legal e para os estados do Mato Grosso e Pará. Para responder às questões sobre a possibilidade de predição das taxas de desmatamento do PRODES com os dados agregados do DETER, foram realizadas análises de regressão e de tendência entre os dados, baseadas na diferença anual entre os dois conjuntos de informação. Essas etapas são listadas e descritas a seguir:

1. Agrupamento dos dados do DETER para períodos de um ano. Nessa etapa, os dados do DETER foram agregados para a base anual, de acordo com o calendário do PRODES, que vai de 01 de agosto do ano corrente a 31 de julho do ano seguinte, gerando 12 anos de dado, entre 2005 e 2016. Esses dados foram agregados para toda a extensão da Amazônia e para os estados do Mato Grosso e Pará;
2. Análise de regressão entre os dados anuais do DETER e do PRODES. As análises foram realizadas a partir do emprego de técnicas estatísticas de regressão linear, em que os dados do PRODES foram utilizados como variável dependente e os dados do DETER como variável explicativa. Foram realizadas para toda a extensão da Amazônia Legal e para também para os estados do Mato Grosso e Pará;
3. Análise de tendência a partir de medidas de correlação entre a diferença dos agregados anuais de desmatamento do DETER e do PRODES utilizando o teste de correlação não paramétrico de *Spearman*. Essa análise foi realizada no pacote estatístico **R** para as duas escalas de análise - Amazônia Legal e estados do Mato Grosso e Pará.

3. Resultados e Discussão

3.1 Análises dos dados agregados do DETER e PRODES

Os dados anuais do DETER, resultantes da fase de agrupamento de dados na base anual são apresentados na Tabela 1 juntamente com as taxas produzidas pelo PRODES.

Tabela 1: Taxas PRODES e dados consolidados do DETER em km².

AMZ	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
DETER ^a	12315	10940	4974	8147	4375	2295	2679	2051	2765	3029	5121	5971
PRODES	19014	14286	11651	12911	7464	7000	6418	4571	5891	5012	6207	8267 ^b

Obs: ^a Dados consolidados entre 01 de agosto e 31 de julho; ^b dados preliminares

Na Tabela 1, pode-se verificar diferenças consideráveis nos valores de área dos dois sistemas, que se devem principalmente a dois fatores: a pequena capacidade de detecção de polígonos de tamanho inferior a 25 ha pelo DETER e; a inclusão de áreas de degradação florestal no mapeamento de Alertas pelo DETER.

A impossibilidade de detectar grande parte dos polígonos de desmatamento de tamanho inferior a 25 ha, que contribui com 30% a 60% do total de áreas desmatadas no período de análise (Valeriano, 2016), faz com que o DETER subestime a área desmatada, enquanto que a inclusão de áreas de degradação faz com que a área desmatada seja superestimada.

A quantidade de áreas de degradação florestal detectadas é variável ao longo do tempo, entretanto, alguns estudos indicam que há uma correlação positiva entre degradação florestal e desmatamento (Matricardi et al, 2010, Pinheiro, 2015). Outros fatores podem contribuir, em menor proporção, com esta alta variabilidade temporal da área degradada detectada, como a distribuição de nuvens, a forma dos polígonos de degradação/desmatamento e aspectos

relacionados com os procedimentos de mapeamento e outras características das imagens utilizadas.

3.2 Análise de Regressão dos dados do DETER e PRODES

Os resultados da análise de regressão realizada entre os dados do DETER e do PRODES são apresentados na Tabela 2, para o recorte da Amazônia Legal e também para os recortes dos estados do Mato Grosso e Pará. As Figuras 2 e 3 apresentam os gráficos de dispersão e os modelos obtidos para as três regiões avaliadas.

Tabela 2: Estatística da regressão para a Amazônia Legal, MT e PA.

	Regressão*	Erro padrão	R ²	Valor-P	Erro máx. relativo**
AMZ	$P = 1,21 \cdot D + 2524,93$	1678,29	0,87	<0,001	40,7%
MT	$P = 0,86 \cdot D + 178,93$	444,58	0,95	<0,001	34,5%
PA	$P = 1,69 \cdot D + 1172,21$	1121,88	0,55	0.006	74,5%

* P = Taxas PRODES (km²); D = dados consolidados do DETER (km²)

** Erro máximo observado relativo à taxa PRODES

O coeficiente de determinação (R²) para a Amazônia Legal foi de 0,87, que mostra uma forte relação linear entre os dados do DETER e as taxas do PRODES. Entretanto, a predição de taxas a partir da equação gerada deve ser utilizada com cautela, pois, embora o erro padrão seja moderado (1.678 km², ou 18,5% em relação à taxa média anual), ele pode atingir erros máximos bastante elevados, podendo levar a conclusões, ações ou a formulação de políticas públicas inapropriadas. No caso das análises realizadas, considerando toda a Amazônia Legal, observou-se para o ano de 2015 que a estimativa baseada no dado do DETER superestimou a taxa PRODES em 40,7%.

Na análise para os estados do Mato Grosso e Pará, foram observadas diferenças importantes. Enquanto o estado do Mato Grosso apresentou um coeficiente de determinação (R²) de 0,95, estatisticamente significativo, com erro médio de 445km² (ou 20% em relação a taxa média anual) e erro máximo de 34,5%, o estado do Pará apresentou um coeficiente (R²) de 0,55, também significativo, com um erro médio de 1.122 km² (ou 29% em relação a taxa média anual) e erro máximo de 74,5%. Esses resultados mostram que as predições de taxas baseadas nos dados do DETER são muito mais confiáveis para o estado do Mato Grosso do que para o estado do Pará. É possível que o melhor ajuste obtido para o estado do Mato Grosso seja em decorrência do tamanho dos polígonos de desmatamento encontrados naquele estado, maiores nesse estado do que no estado do Pará (Valeriano, 2016).

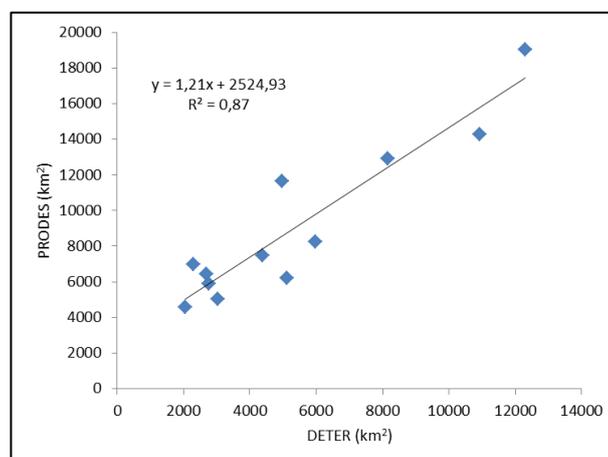


Figura 2: Modelo de regressão para a Amazônia Legal

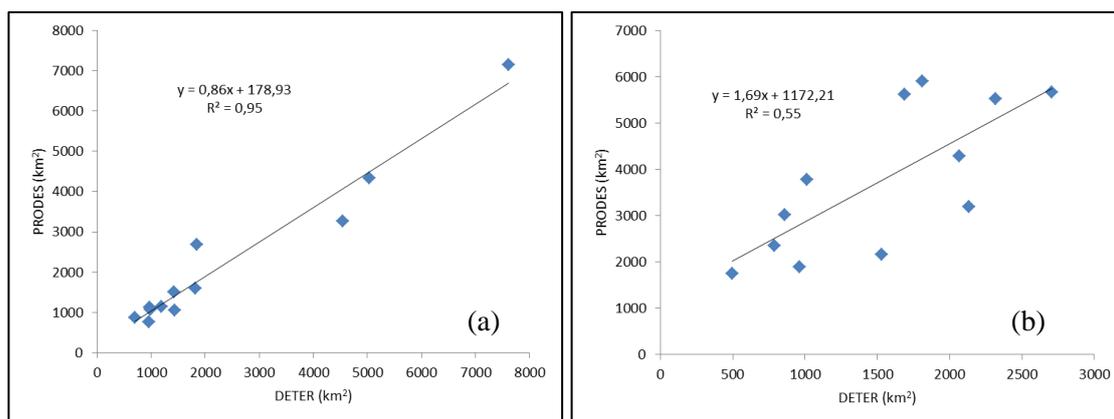


Figura 3: Modelo de regressão para os estados (a) Mato Grosso e (b) Pará

Apesar dos bons ajustes da equação apresentados, para o estado do Mato Grosso e também para a região da Amazônia Legal, o uso do dado do DETER como preditor da taxa de desmatamento, pode levar a erros consideráveis. Dessa forma, é recomendável que essas previsões sejam utilizadas para avaliar tendências, adiando ações e políticas para o controle e fiscalização do desmatamento, quando for o caso. Na próxima seção, são apresentadas algumas análises complementares para avaliação de tendências, baseadas na diferença do desmatamento entre dois anos consecutivos.

3.3 Análise de tendência da diferença de áreas entre o DETER e PRODES

O aumento da taxa de desmatamento tem sido uma preocupação constante dos órgãos fiscalizadores e ambientais, sendo de grande importância que sua estimativa seja feita o mais cedo possível, para que ações de combate ao desmatamento possam ser planejadas e executadas. Como os dados anuais do DETER tem a possibilidade de serem produzidos com maior rapidez do que os dados do PRODES, são constantes os questionamentos sobre a possibilidade do uso da variação anual dos dados consolidados do DETER como indicadores de tendência de aumento ou diminuição da taxa do PRODES. Assim, neste trabalho, as diferenças absolutas entre os dados consolidados do DETER e as taxas do PRODES foram estimadas para verificar se a variação de área encontrada no DETER, entre dois anos consecutivos, pode ser utilizada para prever a variação de taxa do PRODES nos mesmos anos. As variações da área consolidada total do DETER e da taxa do PRODES são apresentadas na Figura 4.

Observa-se na Figura 4, que em dois casos o sinal apresentando foi diferente no DETER e no PRODES. No período de 2010/2011, por exemplo, pode-se verificar que o DETER apresentou sinal positivo (384 km^2), apontando um aumento do desmatamento em 2011 em relação a 2010, enquanto o PRODES apresentou sinal negativo (-582 km^2), registrando uma redução da taxa em relação ao ano de 2010. Já em 2013/2014, o DETER também apresentou sinal positivo sinalizando aumento do desmatamento (264 km^2), enquanto o PRODES apresentou sinal negativo (-879 km^2) indicando redução da taxa quando comparada com ano anterior.

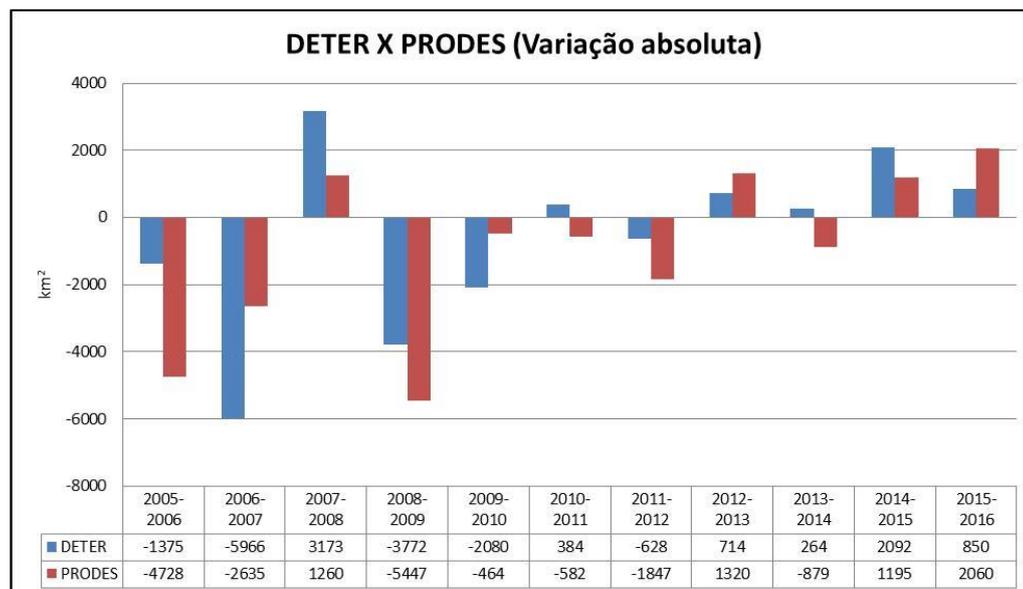


Figura 4: Variação anual dos dados consolidados do DETER e das taxas do PRODES para a Amazônia Legal em km².

A análise de tendência entre a diferença dos dados do DETER e do PRODES, foi realizada por meio do teste de correlação não paramétrico de Spearman. Nessa análise, o objetivo foi avaliar se as diferenças de área estimadas pelo DETER, entre dois anos consecutivos, podem ser utilizadas para prever as variações de taxa do PRODES para o mesmo período. Os resultados desta análise são apresentados na Tabela 3. Considerando-se toda a Amazônia Legal, verificou-se uma correlação de 0,80 o que indica uma forte relação entre os dados do DETER e do PRODES. Isso evidencia que, de modo geral, grandes variações positivas nos dados DETER podem apontar para um aumento nas taxas do PRODES e, da mesma forma, grandes variações negativas nos dados do DETER podem indicar uma diminuição na taxa do PRODES.

Tabela 3: Correlação de Spearman

	Correlação	Valor-P
AMZ	0,80	0,005
MT	0,90	<0,001
PA	0,30	0,371

Para o estado do Mato Grosso, observa-se na Figura 5, que o sinal do DETER acompanhou o sinal da taxa do PRODES em todos os anos analisados. O coeficiente de correlação de Spearman foi estimado em 0,90 (Tabela 3), o que indica uma alta relação entre os dados.

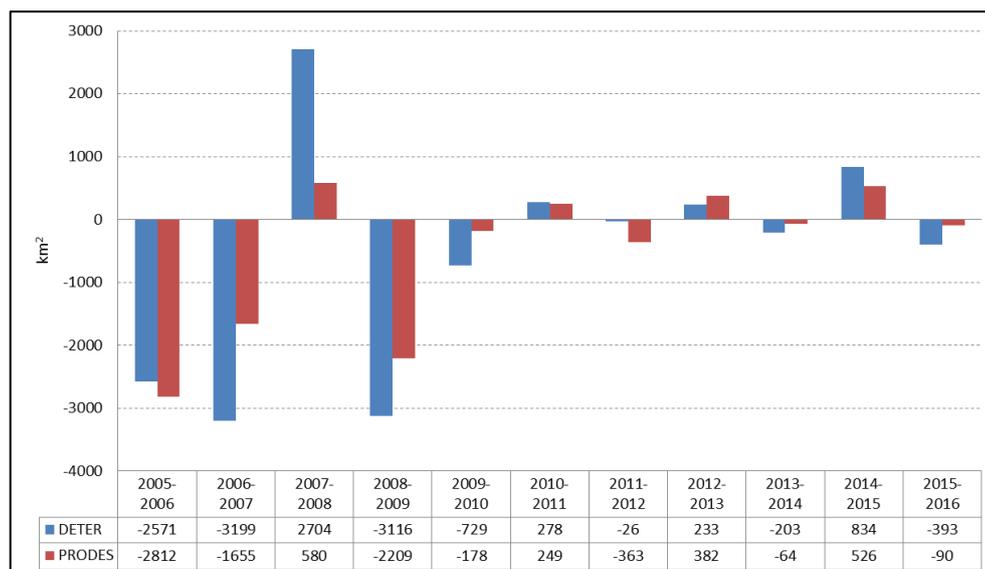


Figura 5: Variação anual dos dados consolidados do DETER e das taxas do PRODES para o MT em km²

No estado do Pará, a correlação de Spearman estimada não foi significativa (0,30), como apresentado na Tabela 3, indicando não haver relação entre os dados de variação anual do DETER e do PRODES. A Figura 6 apresenta as variações encontradas nas áreas mapeadas pelo DETER e nas taxas do PRODES para o estado do Pará. Verifica-se que a diferença no sinal ocorre em 4 períodos (2005/2006, 2007/2008, 2008/2009 e 2013/2014) e que, na maior parte dos anos, o valor da diferença estimado pelo DETER comparado com o registro do PRODES, são bastante distintos, ainda que apresentem o mesmo sinal. Neste caso, as análises mostraram que o dado do DETER não pode ser utilizado como preditor da variação das taxas de desmatamento para o estado do Pará. Nessa região, diferentemente do estado do Mato Grosso, os polígonos de desmatamento são menores (Valeriano, 2016), por isso as estimativas podem ser mais afetadas nessa região. Outros fatores como a presença de degradação florestal, que precisam ser investigados com maior detalhe, também podem ter contribuído para esse resultado.

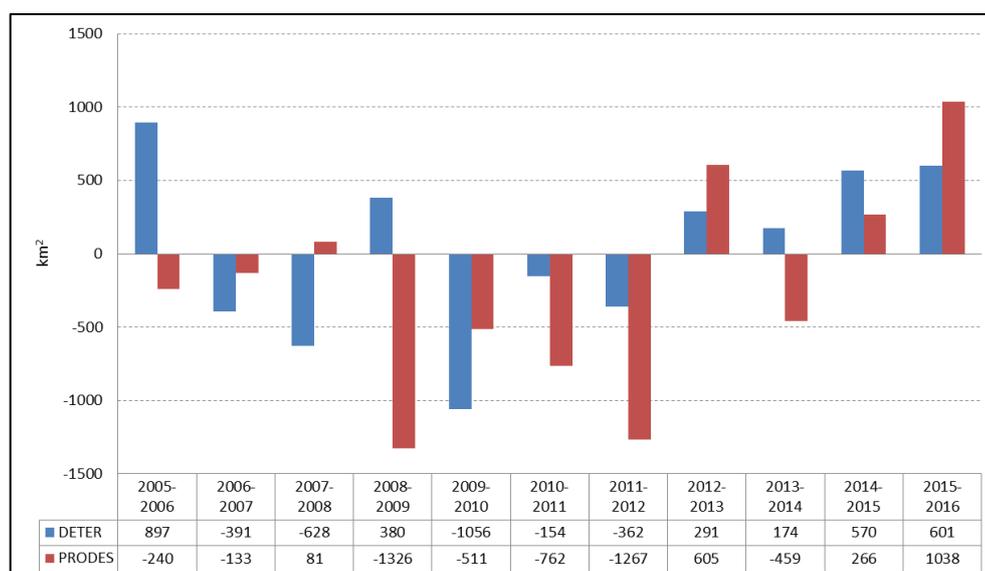


Figura 6: Variação anual dos dados consolidados do DETER e das taxas do PRODES para o PA em km²

4. Conclusões

A pergunta que norteou esse trabalho foi sobre a possibilidade de realizar predições sobre a taxa de desmatamento do PRODES com base nos dados das áreas de alerta do DETER. Esta é uma pergunta frequente dos gestores ambientais de várias instituições, governamentais ou não, que atuam na Amazônia no combate ao desmatamento. Para responder a essa pergunta, dois tipos de análise foram realizados. Uma análise de regressão entre os dados do DETER agregados em períodos de um ano e os dados de taxas anuais de desmatamento computados pelo PRODES para o período de 2005 a 2016. A outra análise realizada foi sobre a variação de área encontrada no DETER, entre dois anos consecutivos, e da taxa do PRODES, nos mesmos períodos. Considerando toda a Amazônia Legal, ambas as análises mostraram uma alta relação entre os dados do DETER e do PRODES. Esta mesma conclusão foi observada quando as análises foram realizadas para o estado do Mato Grosso. Por outro lado, o mesmo comportamento não foi verificado para o estado do Pará. Apesar desses bons resultados obtidos na área da Amazônia Legal e no estado do Mato Grosso, as análises também mostraram que o uso de modelos de regressão para a predição de taxa de desmatamento deve ser feito com cautela, pois podem levar a erros consideráveis em relação ao valor da taxa estimada (podendo ser maior que 40% para a região da Amazônia Legal). Recomenda-se, então, que estas análises sejam utilizadas para avaliar tendências no sinal da taxa de desmatamento, antecipações de políticas para o controle e fiscalização do desmatamento. No caso do estado do Pará, que apresentou baixas correlações entre os dados do DETER e do PRODES é preciso um estudo aprofundado que investigue os fatores que contribuíram para esse resultado.

5. Referencias bibliográficas

- INPE (2008). Monitoramento da Cobertura Florestal da Amazônia por Satélite: Sistemas PRODES, DETER, DEGRAD E QUEIMADAS 2007-2008. Disponível em:
<http://www.obt.inpe.br/prodes/Relatorio_Prodes2008.pdf>
- INPE (2006). Monitoramento da Cobertura Florestal da Amazônia por Satélite: Sistemas . Disponível em:
<<http://www.obt.inpe.br/prodes/>>
- Matricardi, E. A. T., Skole, D. L., Pedlowski, M. S., Chomentowski, W., Fernandes, L. C. Assessment of tropical forest degradation by selective logging and fire using Landsat imagery, *Remote Sensing of Environment*, 2010.
- Pinheiro, T. F. Padrões e Trajetórias de Degradação Florestal em Fronteiras Madeireiras da Amazônia, Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.
- Nepstad, D., McGrath, D., Stickler, C., Alencar, A., Azevedo, A., Swette, B., Bezerra, T., DiGiano, M., Shimada, J., Seroa da Motta, R., Armijo, E., Castello, L., Brando, P., Hansen, M.C., McGrath-Horn, M., Carvalho, O., Hess, L. Slowing Amazon deforestation through public policy and interventions in beef and soy supply chains. *Science*, 344, 1118-1123. 2014.
- Rudorff, B.F.T., Adami, M., Aguiar, D.A., Moreira, M.A., Mello, M.P., Fabiani, L., Amaral, D.F., Pires, B.M. The Soy Moratorium in the Amazon Biome Monitored by Remote Sensing Images. *Remote Sensing*, 3, 185-202, 2011.
- Valeriano, Dalton (2016). Palestra de título “Apresentação dos Dados do PRODES”, Seminário Técnico-Científico do PRODES, Ministério do Meio Ambiente (MMA), Brasília/DF, 03 e 04 de outubro de 2016.