

Integridade ecossistêmica da Amazônia brasileira através do uso de redes bayesianas e suas relações com os serviços ecossistêmicos

Margareth Simões^{1,2}
Rodrigo Ferraz¹
Peter Verweij³
Andrei Alvez²
Miguel Equihual⁴
Octavio Maqueo⁴

¹Embrapa Solos
Rua Jardim Botânico 1024, CEP 22460-000, Rio de Janeiro, Brazil
{margareth.simo, rodrigo.demonte}@embrapa.br

² Universidade do Estado do Rio de Janeiro - Programa de Pós-Graduação Meio Ambiente (PPGMA), FEN/DESC, Rua Maracanã 524- Rio de Janeiro, R.J., CEP 20550-013, Brazil
kaageo@gmail.com

³Alterra, Wageningen University-UR
P.O. Box 47, 6700 AA Wageningen, The Netherland
peter.verweij@wur.nl

⁴INECOL - Instituto de Ecologia A.C., Coatepec 351, 91070 Xalapa, Veracruz, Mexico
{miguel.equihua, octavio.maqueo}@inecol.edu.mx

Abstract- The aim of this work is to present the methodological approach and the preliminary results of Ecosystem Integrity mapping, elaborated at regional scale for different patterns of phyto-ecologic landscape of the Brazilian Amazon. In this way, we considered the concept of Ecosystem Integrity (EI), which represents the connection of biodiversity with the ability of ecosystems to sustain the processes of self-organization. Bayesian Networks (BBN-Bayesian Belief Network) can provide metrics for the generation of ecosystem integrity index, from the training of probabilistic relationships of evidence obtained through field data, Remote sensing data and GIS. The modeling was based on learning from the parameters (data-driven model) through the use of the Expectation Maximization algorithm. For the validation of this probabilistic model, an evaluation was carried out in controlled areas, with field observation and comparison with the IE model based on knowledge (knowledge driven), prepared by experts. We are now considering the relationship of IE and ecosystem services (carbon and water), developing three different land use change scenarios for 2050 and studying the relationship of those changes with IE and consequently with the ecosystem services in the future. Assessing different management alternatives, the BBNs can be applied as a methodology for spatial decision support system (SDSS). The Ecosystem Integrity and its relationship with ecosystem services can provide important information on different ecosystems, guiding the proposition of public policies.

Palavras-chave: remote sensing, biodiversidade, land use change, land use dynamic, land use planning carbon, water sensoriamento remoto, biodiversidade, mudanças climáticas, mudança do uso da terra, dinâmica do uso da terra, carbono, água.

1. Introdução

O conceito de biodiversidade pode ser aplicado para balizar a definição de indicadores que caracterizem o estado de um dado sistema natural em relação à sua capacidade de autoregulação. A manutenção de processos ecossistêmicos se relaciona com o estado de integridade do sistema natural em apreciação, estado este que se supõe existir em sistemas naturais cuja biodiversidade se mantém suficientemente íntegra, garantindo, por sua vez, a manutenção dos processos ecossistêmicos. Deste modo, dois sistemas naturais podem possuir “biodiversidades” distintas, segundo algum conceito estrito de biodiversidade, mas, serem igualmente íntegros do ponto de vista dos processos de autoregulação sistêmica.

A Integridade Ecológica (IE) pode ser definida como sendo um estado de equilíbrio de um dado sistema natural que é capaz de se autorregular por meio de diversos processos funcionais. Desta forma, a IE constitui uma propriedade latente dos ecossistemas que não é diretamente observável (EQUIHUA, 2013). Sendo assim, a IE só pode ser descrita e quantificada, respectivamente, por meio de *proxys* e indicadores que representam as evidências deste estado hipotético.

Diversos indicadores podem ser utilizados para quantificar a IE, podendo ser variáveis relacionadas a estrutura e/ou a funcionalidade dos ecossistemas. Assim, por exemplo, pode-se utilizar indicadores relacionados a: estrutura da vegetação (características dendrométricas); diversidade biótica (número de espécies ou de grupos funcionais); presença de espécies-chaves ou indicadoras de estágios clímax; entrada de energia solar (balanço de radiação, produção de biomassa, sequestro de carbono); saída de matéria e energia (respiração, transpiração, evapotranspiração); fluxos de nutrientes (mineralização), etc.

Devido à complexidade dos ecossistemas e à compreensão ainda incompleta dos processos ecológicos em resposta às perturbações antrópicas, deve-se considerar que a causalidade das relações entre as variáveis escolhidas como indicadores e o estado de integridade ecológica nem sempre é tão evidente, guardando certo grau de incerteza.

Para lidar com as incertezas nas modelagens de fenômenos latentes, ou seja, que não são diretamente observáveis, como a Integridade Ecológica, se faz necessário a utilização de modelos probabilísticos ou estocásticos. No presente trabalho optou-se por trabalhar com o método estocástico denominado “aproximação bayesiana” que se baseia na construção de Redes Bayesianas (*Bayesian Belief Network - BBN*).

2. Metodologia de Trabalho

Redes Bayesianas são modelos que representam probabilisticamente as relações causais e de correlação. Neste trabalho, estas redes foram estabelecidas a partir da concepção de um modelo conceitual - Integridade Ecológica e Evidências - que integrou o conhecimento de diversos especialistas (ecologistas, biólogos, geógrafos, engenheiros florestais e especialistas em GIS e Sensoriamento Remoto, etc). Em um processo iterativo, por meio de videoconferências, os especialistas foram aprimorando o modelo conceitual da rede, considerando os pressupostos teóricos e a disponibilidade de dados. Utilizou-se o *software* (DSS – Decision Support System) QuickScan (VERWEIJ et al 2012) como ambiente para discutir e elaborar diversos mapas conceituais possíveis, representativos da IE a ser modelada. Por fim, foi criado o modelo conceitual que foi convertido em um protótipo de rede para cálculo de integridade ecológica.

O método bayesiano se fundamenta no conceito de probabilidade *a priori* e *a posteriori* e consiste em determinar a probabilidade de ocorrer um determinado evento ou fenômeno de interesse dado a presença de um condicionante ou evidência. Transformando uma série de dados determinísticos em probabilidades o método faz uso da inserção de conjuntos para gerar funções de probabilidades condicionais, baseados nos princípios introduzidos por Bayes. A modelagem matemática do teorema de Bayes liga a inferência racional (probabilidade *a posteriori*) a subjetividade (probabilidade *a priori*) e a experiência empírica (probabilidades condicionais). As Redes Bayesianas (*Bayesian Belief Network - BBN*) são modelos probabilísticos que representam relacionamentos correlativos e causais entre variáveis. Ou seja, descreve a distribuição de probabilidades entre as variáveis tidas como evidências e o fenômeno de interesse.

Por sua vez, o conceito de Redes Bayesianas se refere a uma cadeia de cálculo de probabilidades de Bayes. As redes bayesianas são representações (grafos acíclicos) de relações causais entre variáveis aleatórias interdependentes em modelos probabilísticos (LAURIA E DUCHESSI, 2006).

Foi elaborado um Sistema de Informação Geográfica (SIG), composto de dados originados de diversas fontes (Sensoriamento Remoto e dados secundários), visando a organização das informações e dos metadados da Amazônia Brasileira.

Foi utilizado o *software* NETICA¹ para gerar e rodar o modelo BBN a partir do modelo conceitual estabelecido com base no conhecimento dos especialistas (*expert knowledge*). A rede foi treinada em locais conhecidos e a integridade ecossistêmica determinada por inferência. Os dados espaciais foram armazenados em arquivos Raster em um GIS com uma resolução de 1,66 10⁻² graus 2 por célula possuindo um total de 3600 linhas de colunas x 2800. Foi também utilizado o *software* Quickscan¹ que é um Sistema de Apoio a Decisão (DSS) capaz de relacionar dados espaciais e estatísticos a regras de conhecimento.

Uma segunda abordagem foi realizada visando o cálculo da Integridade Ecossistêmica baseada em BBN porém utilizando-se somente em dados de Sensoriamento Remoto. Esta abordagem permite a elaboração do IE em áreas com pouca disponibilidade de dados, além de permitir a avaliação da integridade ecossistêmica no tempo, seja voltando ao passado (Como era a integridade antes?), seja permitindo o monitoramento da Integridade Ecossistêmica nos anos subsequentes.

Finalmente, uma abordagem baseada em conhecimento (*knowledge driven*) foi realizada para comparação da abordagem probabilística e mecanicista. Desta forma, várias interações com especialistas foram realizadas através de workshops e reuniões remotas, até elaborar-se a proposta de rede bayesiana para o cálculo e monitoramento da IE no tempo.

3. Resultados

3.1. Abordagem baseada em dados secundários e sensoriamento remoto

Como evidências da para o cálculo da Integridade Ecossistêmica baseada em dados secundários e Sensoriamento Remoto, utilizou-se os seguintes indicadores quantitativos originários de Sensoriamento Remoto: (i) Índice de Área Foliar (MODIS USGS – NASA) (WATSON, 1947); (ii) Evapotranspiração (MODIS USGS – NASA); (iv) Cobertura Vegetal (AMTHOR e BALDOCCHI, 2001), (v) Biomassa. Também foram utilizadas variáveis qualitativas derivadas de mapas temáticos da Amazônia, tais como: (i) uso antrópico da terra (MMA); (ii) áreas protegidas, unidade de Conservação e terras indígenas (MMA); que foram incluídas visando aprimorar o modelo. A rede bayesiana utilizada encontra-se ilustrada na Figura 1.

¹ NorSys: <https://www.norsys.com>

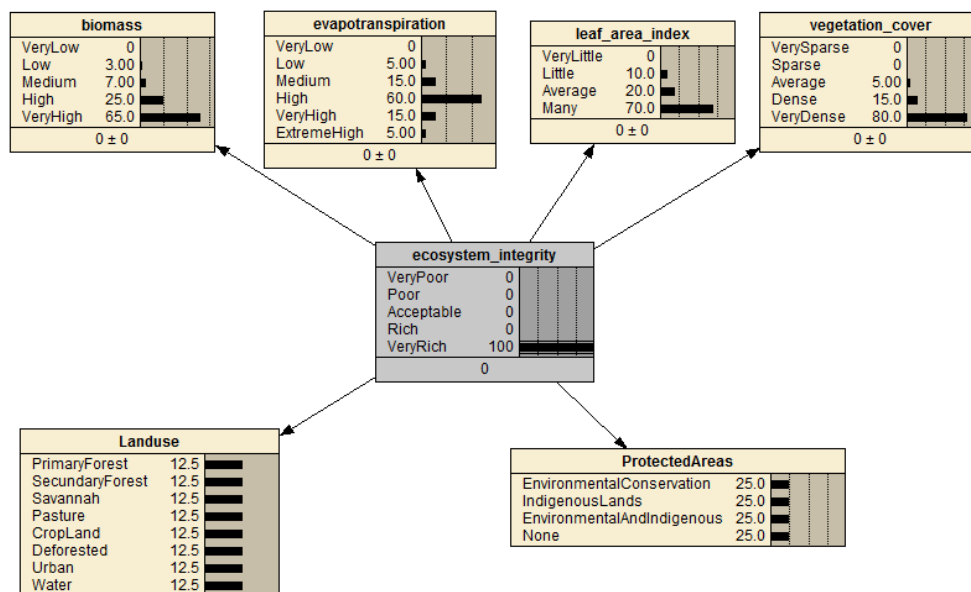


Figura 1: Rede Bayesiana (BBS), definindo a integridade do ecossistema em função da biomassa, evapotranspiração, índice de área de folha e cobertura vegetal e em uso do solo e áreas protegidas (estas duas últimas relacionadas à gestão).

Elaborou-se, também, um modelo de IE baseado em conhecimento, ou seja, usando-se regras de conhecimento mecanicista. A regra de conhecimento utilizada se baseou em duas variáveis, cobertura vegetal e evapotranspiração. Para cada combinação foi determinada uma categoria de Integridade Ecológica. Foram adotadas as seguintes classes: Muito baixa; Baixa; Moderada; Alta e Muito Alta (Quadro 2). Este modelo, baseado em conhecimento dos especialistas (*knowledge driven*) foi elaborado a fim de comparar o resultado obtido através do processo baseado em dados (*data driven*) através das redes bayesianas (BNN).

Quadro 1: Casos de Integridade Ecológica baseada em regra de conhecimento realizada por especialistas.

		Classes de densidade de cobertura vegetal				
		Muito esparsa	Esparsa	Média	Densa	Muito densa
Evapotranspiração	Muito baixa	Muito baixa	Baixa	Moderada	Alta	Muito Alta
	Baixa	Muito baixa	Baixa	Moderada	Alta	Muito Alta
	Moderada	Baixa	Baixa	Moderada	Alta	Muito Alta
	Alta	Muito baixa	Baixa	Moderada	Muito Alta	Muito Alta
	Muito alta	Baixa	Moderada	Moderada	Alta	Alta
	Extremamente alta	Baixa	Moderada	Alta	Alta	Moderada

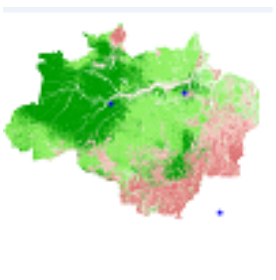

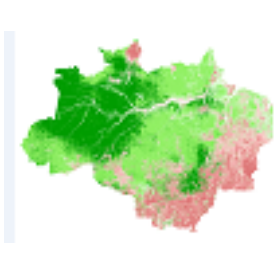
Os resultados da modelagem foram apresentados na forma de mapas preliminares de Integridade Ecológica com base em três abordagens (Quadro 2): (i) IE derivada do modelo de Rede Bayesiana (BNN) considerando-se a máxima probabilidade (*data-driven*); (ii) IE derivada do modelo de Rede Bayesiana (BNN) considerando-se a distribuição de

probabilidades (*data-driven*) e (iii) IE obtido através do modelo baseado nas regras de conhecimento especialista (*knowledge driven*). Os valores quantitativos de probabilidade da IE foram fatiados, representando a IE de forma qualitativa através de classes: muito baixa (vermelho escuro); baixa, aceitável, alta e muito alta integridade ecossistêmica (verde escuro).

A distribuição de área por categoria de IE foi bastante semelhante em todas as três abordagens. Especialmente, quando compara-se os resultados dos modelos de IE baseados na Rede Bayesiana (BBN) considerando-se a distribuição de probabilidade e no modelo baseado em regras de conhecimento.

Por outro lado, se a distribuição em área foi praticamente a mesma, o padrão espacial se mostrou diferente. Na abordagem baseada em regra de conhecimento observa-se uma tendência de se agrupar as categorias (clusters), enquanto na abordagem da modelagem por distribuição de probabilidades apresenta uma imagem mais dispersa.

Quadro 2: Mapas de Integridade Ecossistêmica calculados pelas abordagens: (i) Rede Bayesiana (BBN) Máxima Probabilidade; (ii) Rede Bayesiana (BBN) Distribuição de Probabilidade (*data-driven*) e (ii) modelo baseado em regras de conhecimento (*knowledge-driven*). Categorias distribuídas por percentuais em área.

Integridade Ecossistêmica	Modelo Rede Bayesiana (BBN)	Modelo Rede Bayesiana (BBN)	Modelo baseado em Regras de Conhecimento
	Máxima Probabilidade	Distribuição de Probabilidade	(Knowledge rule)
Mapas			
Muito Baixa	30 %	30 %	30 %
Baixa	37 %	34 %	33 %
Aceitável	8 %	11 %	11 %
Rica	9 %	12 %	12 %
Muito Rica	16 %	12 %	13 %

3.2. Subdivisão em zonas fitoecológicas

A fim de se aprimorar o resultado, foi realizada a subdivisão da Amazônia em zonas fitoecológicas, obtidas a partir da análise do mapa de vegetação do projeto Radam Brasil (IBGE, <http://www.inde.gov.br>). As zonas fitoecológicas são baseadas na fitofisionomia, declividade e sazonalidade climática. A inclusão destas zonas no modelo probabilístico evita inconsistências relacionadas a heterogeneidade da Amazônia. A figura 2 ilustra esta subdivisão.

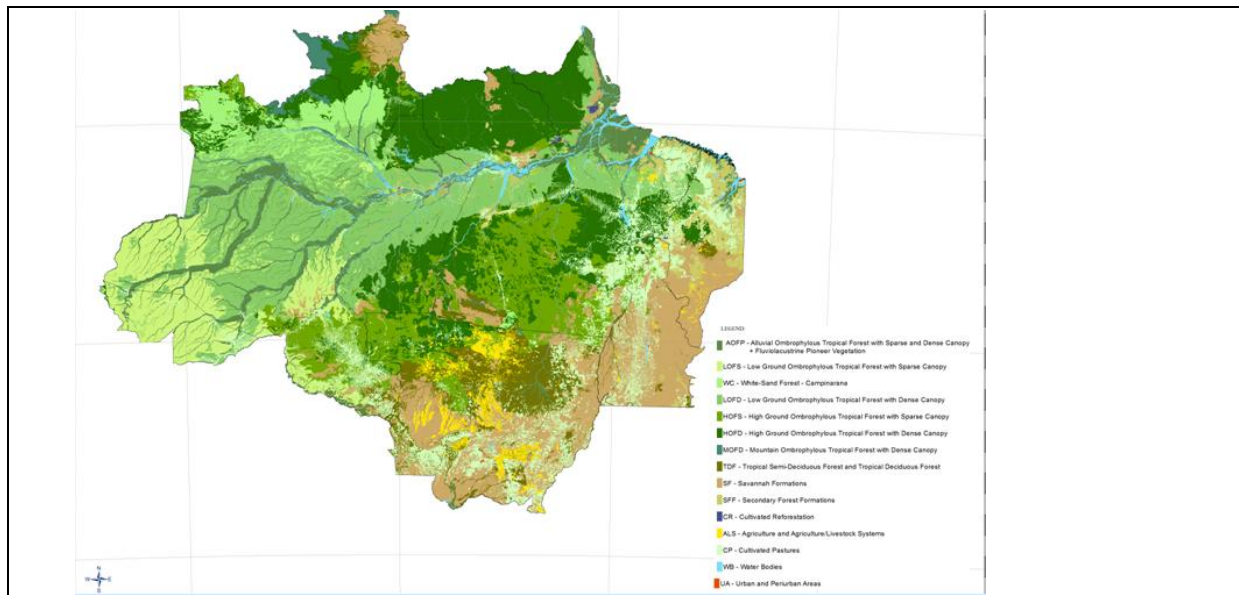


Figura 2 – Zonas fitoecológicas da Amazônia Brasileira (adap.: IBGE, RadamBrasil)

3.3. Abordagem baseada somente em dados advindos de Sensoriamento Remoto e subdivisão em zonas fitoecológicas

Uma segunda abordagem foi realizada visando o cálculo da Integridade Ecosistêmica baseada somente em dados de Senosriamnneto Remoto. Esta abordagem permite a elaboração do IE em áreas com pouca disponibilidade de dados, além de permitir a avaliação da integridade ecossistêmica no tempo, seja voltando ao passado (Como era a integridade antes?), seja permitindo o monitoramento da Integridade Ecosistêmica nos anos subsequentes. Desta forma, várias interações com especialistas foram realizadas até elaborar-se a proposta de rede bayesiana para o cálculo e monitoramento da IE no tempo, apresentada nas Figuras 3,4 e 5.

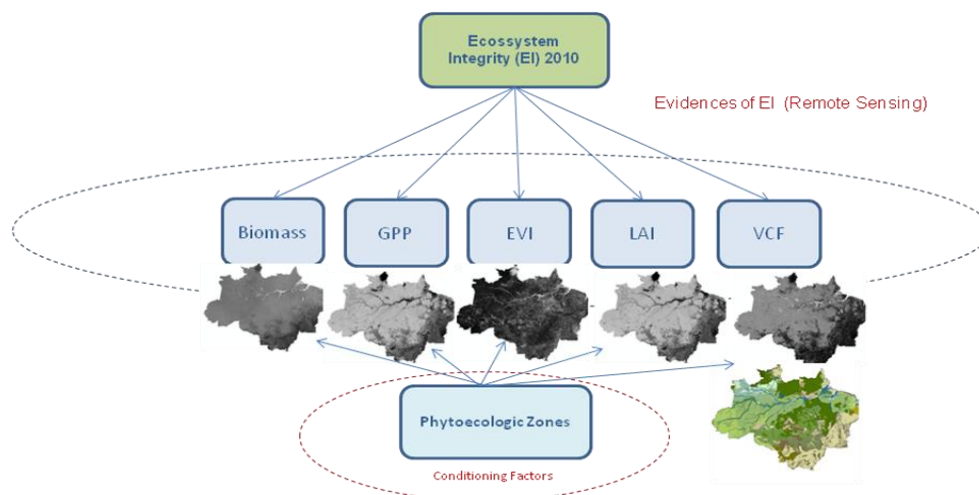


Figura 3: Modelo Conceitual da Integridade Ecosistêmica em função de dados advindos de Sensoriamento Remoto e considerando-se a subdivisão da Amazônia em zonas fitoecológicas.

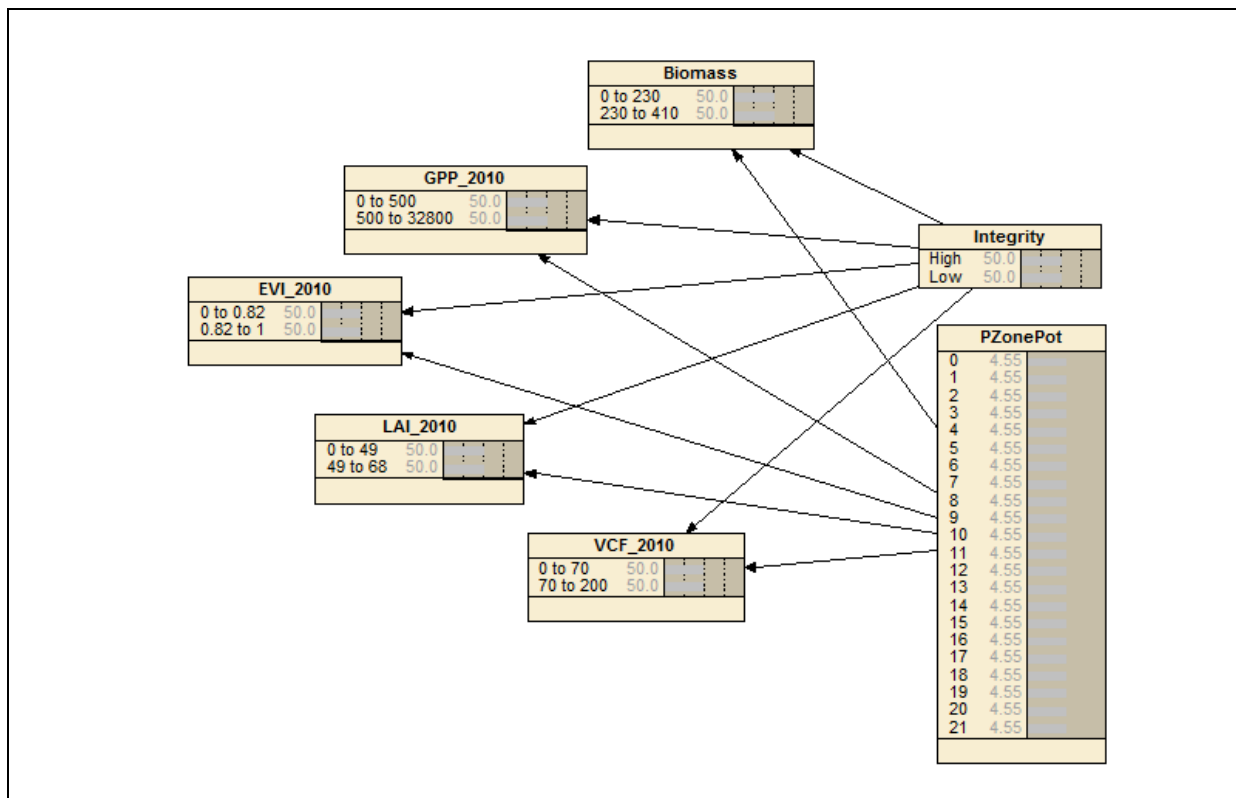


Figura 4: Rede Bayesiana (BBS) definindo a integridade do ecossistema em função da: biomassa, GPP (Produtividade Primária Bruta), VCF (*Vegetation Continuous Field*), LAI (índice de área de foliar) e EVI (Índice de Vegetação) e considerando-se a subdivisão da Amazônia em zonas fito-ecológicas (PzonePot).

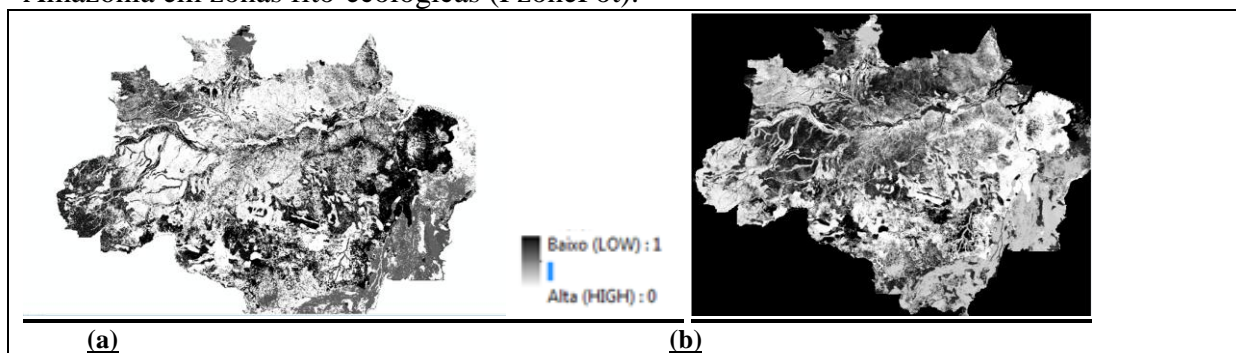


Figura 5: a) Integridade Ecosistêmica calculada através de dados de Sensoriamento Remoto e b) Perda da Integridade Ecosistêmica em 2010 em relação a vegetação primicial

4. Conclusão

Avaliando o impacto de diferentes alternativas de gestão, as BBNs têm sido aplicadas com êxito como metodologia de suporte a decisão no âmbito da gestão dos recursos naturais. A Integridade Ecosistêmica (IE) e as suas relações com os diversos serviços ecossistêmicos, como por exemplo, os fatores de mitigação de mudanças climáticas, podem fornecer informações importantes sobre os diferentes ecossistemas, balizando a proposição de políticas públicas e alternativas de gestão ambiental. Neste trabalho, considerou-se a “Integridade Ecosistêmica” (IE) como um *proxy* da biodiversidade. Ou seja, como sendo a capacidade de auto-organização dos ecossistemas biodiversos, de manutenção dos processos ecossistêmicos relacionados aos fluxos de matéria e de energia, essenciais para os ciclos biogeoquímicos terrestres, notadamente, o ciclo do carbono e da água. Integrando um modelo de Integridade Ecosistêmica (BBN) em um Sistema de Informações Geográficas (SIG), tornou-se possível

mapear um grande número de entidades espaciais, e, em um ambiente de Sistema de Suporte a Decisão (DSS), realizar múltiplas interações para gerar diferentes mapas de Integridade Ecosistêmica da Amazônia Legal Brasileira. Este trabalho, portanto, apresentou uma metodologia para avaliação da Integridade Ecosistêmica através do uso de um modelo probabilístico baseado em redes Bayesianas. Procurou-se utilizar variáveis extraídas de produtos de Sensoriamento Remoto devido a disponibilidade e possibilidade de atualização desses dados em escala regional e através do tempo (monitoramento). Para verificar a eficácia da modelagem da IE por meio das redes bayesianas, comparou-se os resultados desta com os resultados de um modelo baseado em conhecimento, dados de campo e conhecimento de colegas da Embrapa que atuam na região Amazônica. Neste momento, um processo estatístico de validação está em curso. Utilizando-se a mesma rede bayesiana, com dados de satélite atualizados, torna-se possível monitorar a IE ao longo do tempo. Assim, o aperfeiçoamento desta abordagem metodológica pode servir para estabelecer um protocolo de monitoramento da mudança da integridade ecosistêmica de uma dada região de interesse. Permitiria, ainda, observar tendências, avaliar a eficácia das políticas e os impactos do comprometimento da integridade ecosistêmica e/ou a perda da biodiversidade nos serviços ecosistêmicos (carbono e água). Os resultados preliminares foram promissores, permitindo inicialmente estabelecer probabilidades e incertezas associadas a modelagem da Integridade Ecosistêmica. Em uma avaliação preliminar, os padrões espaciais de distribuição probabilística da IE, bem como a comparação com modelos baseado em conhecimento, se mostraram coerentes, entretanto, se faz necessário dar continuidade ao estudo para se estabelecer conclusões mais precisas e adequadas. Neste momento estamos trabalhando na relação estatística da Integridade Ecosistêmica com os serviços ambientais (água e carbono) também através do uso de produtos de Sensoriamento Remoto. Estamos também realizando a modelagem dinâmica do uso da terra até 2050 (SIMÕES et al, 2014) em três cenários distintos do IPCC para a geração de distintos cenários de Integridade Ecosistêmica e seus serviços ecosistêmicos no futuro.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da Comissão Europeia através do projeto EU FP7 ROBIN (Role of Biodiversity in Climate Change Mitigation) do qual este trabalho é integrante.

Referências bibliográficas

Equihua M., Maeda P.D., Equihua J., Alaniz N. G., Kolb M., Schmidt M., 2013 : **ROBIN - Role Of Biodiversity In climate change mitigation** - 1st Report 15th of March 2013.

Simões, M., Pereira, S., Ferraz, R. Geração de Cenários de Mudança de Uso do Solo na Amazônia Legal Brasileira em Função do Agronegócio e da Aplicação de Políticas Públicas. **VII GEONORDESTE 2014. Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto**, Aracaju, Sergipe. CD-ROM, On-line www.embrapa.br

Lauria E. J. M. e P. J. Duchessi, 2006: A methodology for developing bayesian networks: an application to information technology (IT) implementation. **European Journal of Operational Research**, 179,234-252.

Verweij P., Winograd M., Perez-Soba M., Knapen R., van Randen, Y., 2012: QUICKScan: a pragmatic approach to decision support, In: **International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs) 2012**, Leipzig, Germany R. Seppelt, A.A. Voinov, S. Lange, D. Bankamp (Eds.), www.iemss.org/society/index.php/iemss-2012-proceedings

Watson D.J., 1947: Comparative physiological studies on the growth of field crops: I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties and within and between years. **Annals of Botany**, 11: 41-76.