

## **Análise de ferramentas de SIG para estimativa de biomassa potencial: um estudo de caso em região de contato floresta/savana, Roraima**

Flora da Silva Ramos Vieira Martins<sup>1</sup>

João Roberto dos Santos<sup>1</sup>

Maristela Ramalho Xaud<sup>1,2</sup>

Haron Xaud<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{florarvm, jroberto, mramalho, haron}@dsr.inpe.br

<sup>2</sup> Embrapa Roraima  
BR- 174, km 8, Distrito Industrial, 69.301-970 – Boa Vista – RR, Brasil

**Abstract.** The knowledge and monitoring of the amount of forest biomass and its spatial distribution in the Amazon basin represents a key application of remote sensing and GIS (geographic information system) technologies. In order to explore these potentialities, a GIS was used to estimate the potential biomass expected if no human or natural disturbances occurred in a forest/savanna contact zone in Roraima (Brazil). This value was derived from spatial weighted data on precipitation, a climate index and land agricultural capability. Initially, these layers were combined in a potential biomass index through the analytic hierarchy process (AHP). In a second step, the potential biomass index map was converted into a potential biomass density map. This calibration was done with 35 biomass samples acquired in the same area (reference values). Potential biomass for the total area (forests and savannas) was estimated to reach  $5.2 \times 10^7$  Mg. The potential biomass density map was then masked with a PRODES (INPE) map of forests, non-forests and deforestation. For the area still recovered by forests until 2009, the total potential biomass estimated was  $3.8 \times 10^7$  Mg, with an average of  $153.13 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ . In the total area, a potential loss of  $1.0 \times 10^7$  Mg due to land conversion was estimated.

**Palavras-chave:** Índice de Biomassa Potencial, AHP, PRODES, Amazônia.

### **1. Introdução**

A dimensão do estoque de biomassa em uma dada região é uma informação valiosa. Dentre suas aplicações, pode-se citar: (i) a estimativa do fluxo de carbono liberado por mudanças de uso do solo; (ii) a estimativa da biomassa como recurso importante para diversas atividades humanas (e.g. energia, construções) e (iii) o monitoramento auxiliar da fitossanidade, degradação e perturbações diversas.

Dado que este recurso não é conhecido com precisão - principalmente quando se refere às florestas tropicais - a distribuição espacial da biomassa ainda é uma fonte de incertezas, sobretudo, em modelos que buscam estimar o fluxo de carbono envolvido na mudança de uso do solo na Amazônia (Houghton et al., 2001). Esta densidade varia consideravelmente ao longo da paisagem em função de diferenças edáficas, topográficas, climáticas e também do histórico de uso e de degradações (Iverson et al. 1994).

Historicamente, as estimativas de biomassa viva acima do solo de florestas que ocupam grandes áreas vêm sendo feitas através de medições em campo, modelagem ou a combinação dos dois métodos (Houghton et al., 2001). Estes dados, obtidos pontualmente, são generalizados para toda a área, porém muitas vezes a porção medida é insuficiente para representar toda a heterogeneidade da paisagem. Iverson et al. (1994) destacam o impacto negativo neste tipo de estimativa do uso de parcelas pequenas de estudos ecológicos, selecionadas no intuito de captar indivíduos com grandes diâmetros, já que a biomassa aumenta geometricamente com o diâmetro. Quanto às parcelas de inventário florestal (permanentes ou não), os autores destacam desvantagens como o diâmetro mínimo variável e o fato de que poucos países com florestas tropicais as possuem.

No intuito de considerar as variações espaciais, muito se evoluiu no uso de técnicas de sensoriamento remoto durante as últimas décadas para prover estimativas ao longo de grandes áreas (Saatchi et al., 2007, Sales et al., 2007, Falkowski et al., 2009). Neste sentido, ferramentas de geoprocessamento vêm sendo igualmente exploradas com sucesso, pois permitem a combinação de dados e geração de novas informações, sempre considerando a heterogeneidade espacial do ambiente. Sob este enfoque, o presente trabalho tem como objetivo a obtenção de um mapa de biomassa potencial através do uso de ferramentas de geoprocessamento e do índice de biomassa potencial (IBP). Em um segundo momento, maior detalhamento é dado ao estudo da região florestal, buscando-se quantificar o estoque de biomassa potencial atual (referente às áreas atualmente ocupadas por florestas) e de biomassa potencial já extraída (referente às áreas desflorestadas).

## 2. Metodologia de Trabalho

### 2.1. Área de estudo

A região de estudo pertence ao estado de Roraima, na Amazônia brasileira, e contempla 5.243 km<sup>2</sup>. A área é caracterizada pelo contato savana/floresta (Figura 1) e foi selecionada para que a metodologia pudesse ser avaliada em condições heterogêneas e também pela disponibilidade de amostras do estoque de biomassa. Segundo Brasil (1975), ocorre na região de estudo a Floresta Estacional Semidecidual isoladamente ou determinando contato com Floresta Ombrófila Densa e Floresta Ombrófila Aberta. Quanto à savana, ocorrem na área a Savana Graminosa (campos entremeados de lagoas temporárias ou permanentes) e a Savana Parque (fisionomia campestre com árvores isoladas e/ou em grupos também isolados que se espalham de maneira mais ou menos ordenada).

De acordo com a classificação climática de Köppen, a região pertence ao domínio de clima tropical chuvoso com nítida estação seca (Aw), com amplitude térmica entre as médias do mês mais quente e do mês mais frio inferior a 5° C (Xaud, 1998).

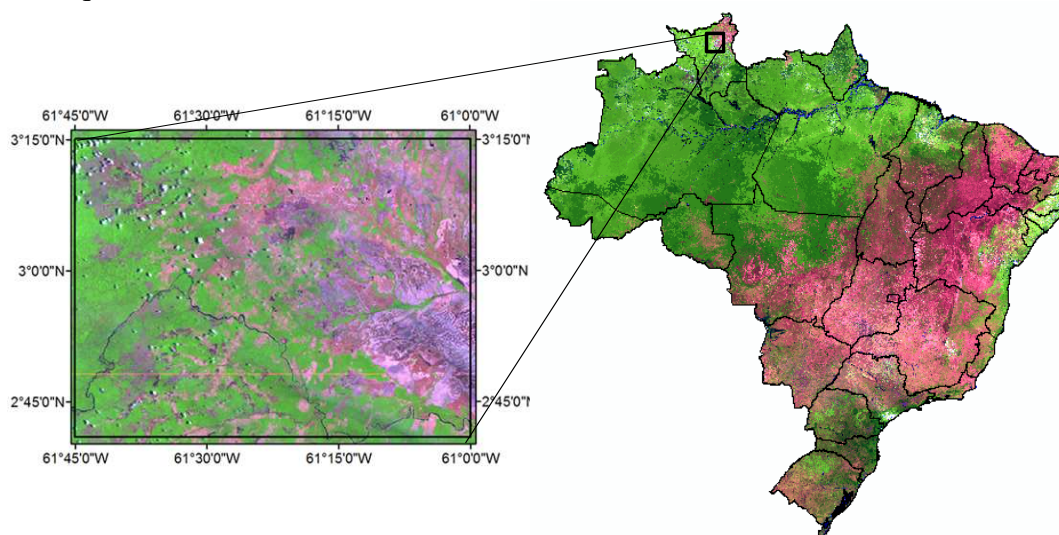


Figura 1. Área de estudo: zona de contato savana/floresta na região centro-leste de Roraima.

### 2.2. Índice de biomassa potencial - IBP

Segundo a metodologia desenvolvida por Iversen et al. (1994), o índice de biomassa potencial estima a biomassa esperada caso nenhum distúrbio antrópico ou natural seja observado. Os autores consideram que topografia (altitude e declividade), precipitação, solo (textura) e índice climático de Weck (ICMW) são os fatores determinantes da produtividade de uma região (Equação 1). O modelo proposto é aditivo e para cada um dos planos de informação (ICMW, pluviosidade, topografia e solos) é atribuído um coeficiente de peso

global  $I$  com valor máximo de 25 pontos, de forma que o valor total máximo encontrado para o índice é 100.

$$IBP = I(\text{ICMW}) + I(\text{pluviosidade}) + I(\text{topografia}) + I(\text{solos}) \quad (1)$$

Neste trabalho, os planos topografia e solos foram representados pela aptidão agrícola, de forma que este passou a ter, no máximo, 50 pontos. Esta substituição foi uma tentativa de simplificação da metodologia. Além desta modificação, tentou-se aprimorar a atribuição dos coeficientes globais  $I$  às camadas de informação através do processo de suporte à decisão AHP, do inglês *Analytic Hierarchy Process* (Saaty, 1980), implementado em ambiente Spring.

### 2.2.1. Pluviosidade

As isoietas (1: 250.000) utilizadas neste trabalho são oriundas do Zoneamento Ecológico e Econômico (ZEE) do Estado de Roraima (CPRM, 2002). Estas amostras foram processadas de forma a obter uma malha regular que em seguida foi fatiada em classes de acordo com os pesos atribuídos (Figura 2). Esta ponderação seguiu, em linhas gerais, a metodologia de Iverson et al. (1994).

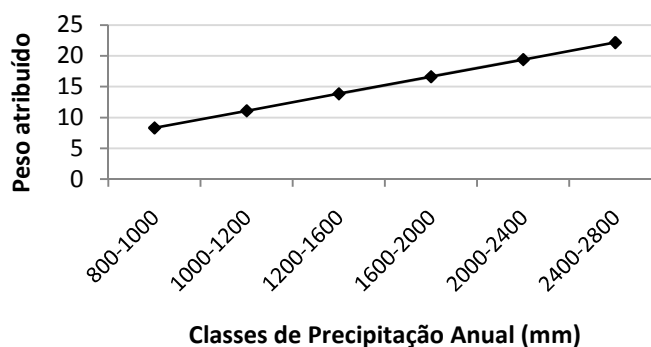


Figura 2. Pesos atribuídos às classes de precipitação.

### 2.2.2. Aptidão Agrícola

O plano de informação sobre a aptidão agrícola que, neste trabalho, substitui a topografia e solos, foi também obtido através do ZEE de Roraima (CPRM, 2002). A classificação das terras é feita de acordo com cinco principais critérios: fertilidade, deficiência em água, excesso de água, susceptibilidade à erosão e impedimentos à mecanização (Ramalho Filho e Beek, 1995). Inicialmente, o plano de informação era do tipo vetor (temático) e foi convertido em grade regular (30 m) ponderando-se as classes existentes (Figura 3).

### 2.2.3. Índice Climático Modificado de Weck

Desenvolvido por Weck (1961 apud Weck, 1970), este índice tinha inicialmente o objetivo de estimar a produtividade potencial em florestas na Alemanha e depois teve seu uso estendido para regiões tropicais. Após modificações introduzidas por Iverson *et al.* (1994) - para aplicação em florestas tropicais da Ásia - e por Martins et al. (2009) - para aplicação em florestas ombrófilas (densa e mista), floresta estacional semidecidual e savanas de todo o estado de São Paulo - o índice assumiu a seguinte configuração (Equação 2):

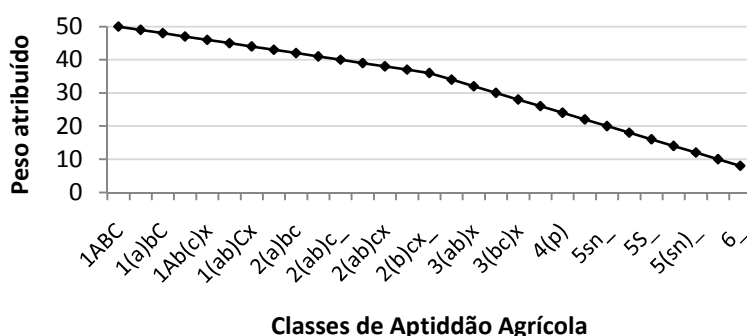


Figura 3. Pesos atribuídos às classes de aptidão agrícola encontradas na região de estudo. Maiores detalhamentos sobre definição das classes são encontrados em Ramalho Filho e Beek (1994).

$$ICMWS = \frac{S.(P1+\sqrt{P2}).G}{100.T_m} \quad (2)$$

Onde:  $ICMWS$  = índice climático modificado de Weck (simplificado);  $S$  (horas) = comprimento médio do dia durante estação de crescimento;  $P1$  (dm) = média anual de precipitação até 20 dm;  $P2$  (dm) = média anual de precipitação acima de 20 dm;  $G$  (meses) = duração da estação de crescimento em que, para que um mês seja considerado da estação de crescimento, ele deve obedecer à seguinte condição:  $(12.P)/(T+10) \leq 20$ , em que  $P$  (mm) é a precipitação total do mês em questão e  $T$  ( $^{\circ}C$ ) é a temperatura média do mesmo mês;  $T_m$  ( $^{\circ}C$ ) = temperatura média do mês mais quente da estação de crescimento.

O índice foi então calculado para uma amostra de 29 estações pluviométricas do Estado nas quais se dispunha de dados históricos sobre a precipitação mensal. Os dados de temperatura média mensal foram obtidos através de imagens MODIS (MOD11, 5 km) do ano de 2009. O comprimento do dia em horas foi fixado em 12, pois a região encontra-se muito próxima ao Equador. Ao fixar um valor, assume-se que a variável não é determinante na variação do índice e, portanto, na produtividade potencial do local, o que parece coerente para a região de estudo (variação inferior a  $1^{\circ}$  em latitude).

De posse desta amostra, o índice foi interpolado para toda a área de forma a obter uma malha regular. Esta malha foi então fatiada em classes de acordo com os pesos atribuídos (Figura 4).

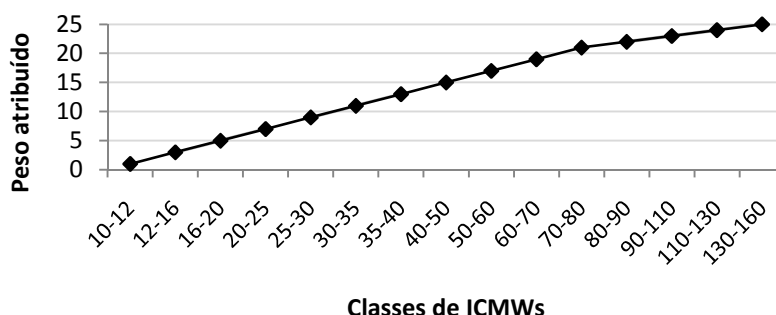


Figura 4. Pesos atribuídos às classes de índice climático modificado de Weck (simplificado).

#### 2.2.4. AHP

Nesta etapa, o objetivo foi a obtenção dos coeficientes “ $T$ ” do índice de biomassa potencial (Equação 1). Para isto, a aptidão agrícola foi considerada como o fator de maior importância, seguida pelo índice climático e por fim pela pluviosidade. Esta configuração foi

escolhida já que o regime hídrico é basicamente o mesmo ao longo da região, assim como o índice climático (em menor grau).

## 2.4. Mapa de biomassa potencial

Uma vez calculado o índice de biomassa potencial (adimensional) para toda a área, este foi convertido em um mapa de biomassa potencial ( $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ). Para isto, foram utilizadas 35 amostras de biomassa obtidas em campo (Xaud, 1998). Dentre as amostras, aquelas referentes às florestas secundárias foram descartadas de forma que apenas amostras consideradas de ambientes em equilíbrio fossem mantidas (floresta primária e savana), já que o índice reflete o potencial máximo de produtividade de um ambiente. A partir dos valores de referência (amostras de campo) e de seus respectivos valores de índice de biomassa potencial, a análise de regressão permitiu o ajuste de um modelo que explicasse a relação entre estes dois parâmetros, permitindo a obtenção de valores de biomassa potencial para toda a região.

## 2.5. Mapa de biomassa potencial de 2009

De posse do mapa de biomassa potencial, uma análise mais aprofundada da região florestal foi realizada. Para isto, o mapeamento das formações vegetais foi necessário, tendo-se utilizado dados do PRODES do ano de 2009 (INPE) a partir dos quais foi criado o mapa das classes “floresta”, “não floresta” e “desmatamento”. Este mapeamento permitiu a seleção das áreas remanescentes de florestas e a quantificação deste estoque potencial de biomassa. Além disto, foi possível quantificar a perda de biomassa potencial pelo desmatamento. A quantificação da biomassa potencial nestas áreas foi realizada pela soma dos valores dos pixels, sendo necessária nesta etapa a conversão dos valores de  $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  para  $\text{Mg}\cdot\text{pixel}^{-1}$  ( $900\text{m}^2$ ).

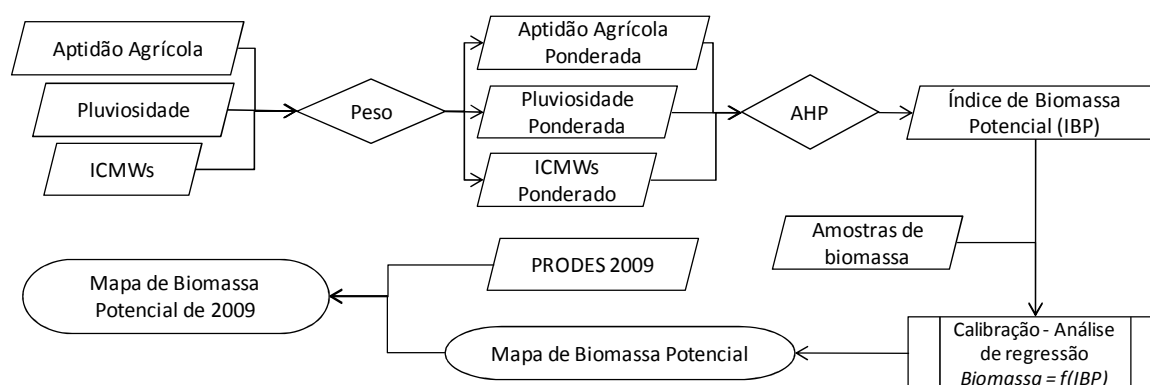


Figura 5. Sequência de processamentos realizados.

## 3. Resultados e Discussão

Em toda a região de estudo, o mapa de ICMWs apresentou classes com pesos que variaram de 13 a 22. Para o mapa de pluviosidade, a variação foi de 13 a 16. Quanto à aptidão agrícola, a variação encontrada foi naturalmente maior, de 8 a 48 (Figura 6), uma vez que substituiu dois planos de informação (topografia e solos).

Através da análise de suporte à decisão (AHP), foram então gerados os coeficientes globais (I) para cada plano de informação, obtendo-se a razão de consistência de 0,006 e a seguinte configuração do índice de biomassa potencial (Equação 3). Desta maneira, o índice pôde ser calculado em toda a extensão da área de estudo.

$$\text{IBP} = 0,669*(\text{Aptidão Agrícola}) + 0,243*(\text{ICMW}) + 0,088*(\text{Pluviosidade}) \quad (3)$$

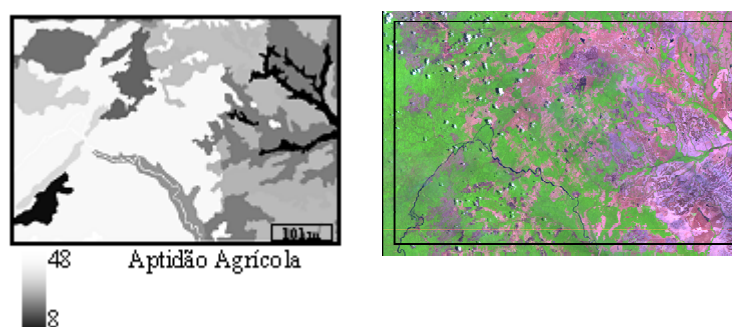


Figura 6. Exemplo de plano de informação componente do IBP: mapa de aptidão agrícola e respectivas classes já ponderadas (esquerda). À direita, área de estudo.

Em seguida, foi realizado o ajuste do modelo de predição da biomassa potencial ( $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) em função do índice de biomassa potencial (Equação 4) com base nas amostras de campo. O coeficiente de determinação obtido foi de 0,97 e o RMSE,  $10,67 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ . A partir desta equação, o mapa de IBP foi então convertido em mapa de biomassa potencial (Figura 7) para toda a área de estudo.

$$\text{Biomassa} = 0,286(\text{IBP}) + \frac{e^{\text{IBP}}}{10^{12}} \quad (4)$$

Onde: Biomassa = biomassa potencial ( $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) e IBP = índice de biomassa potencial calculado segundo Equação 5.

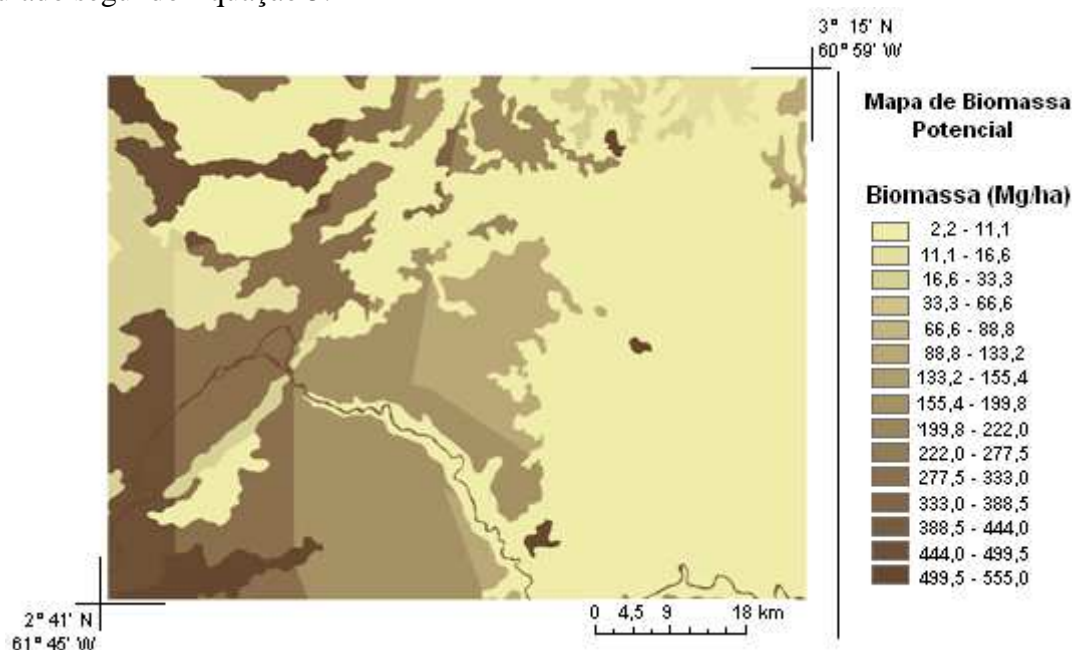


Figura 7. Mapa de biomassa potencial em  $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ .

Através da análise da Figura 7, nota-se que o gradiente de biomassa potencial aumenta no sentido das savanas ( $2,22\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) às florestas, onde atinge valores máximos ( $555\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), o que confirma a sensibilidade do método à heterogeneidade da região de contato.

Em seguida, a biomassa potencial da área ocupada atualmente por florestas foi quantificada utilizando-se como limite espacial a classe “Floresta” do mapa obtido com dados do PRODES de 2009 (Figura 8). Desta forma, a biomassa potencial total da área florestada (47,8% de toda a área, ou seja,  $2.504 \text{ km}^2$ ) foi de  $3,8 \times 10^7 \text{ Mg}$  e a média foi de  $153,13 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Este valor médio é bastante próximo àqueles obtidos em campo por Xaud (1998) para a

mesma área, de  $195 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  e Araújo (1999), de  $130,6 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , em estudo também na região de contato floresta/savana em Roraima. Estes valores relativamente baixos podem ser explicados pelo fato de que a floresta em questão é de transição (tipo estacional semi-decidual), apresentando normalmente valores inferiores àqueles encontrados em floresta ombrófila densa.

O desmatamento, por sua vez, representou 15,9 % (832  $\text{km}^2$ ) da área total de estudo e 24,94 % da área inicialmente ocupada por florestas. Nestes aproximadamente um quarto de área florestal, encontra-se uma perda de biomassa potencial de  $1,0 \times 10^7 \text{ Mg}$ , que representam 20,83% da biomassa potencial florestal inicial. Na área total de estudo (5.243  $\text{km}^2$ ) estimou-se um estoque de biomassa potencial de  $5,2 \times 10^7 \text{ Mg}$ .

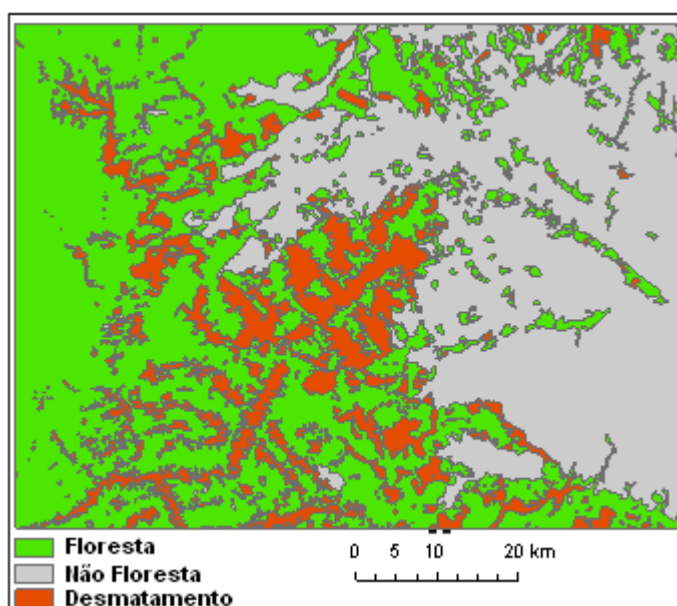


Figura 8. Distribuição espacial das porções “Floresta”, “Desmatamento” (acumulado até 2009) e “Não Floresta” na área de estudo segundo dados do PRODES.

#### 4. Conclusões

Este trabalho estimou a biomassa potencial desta região, e não a real. O índice de biomassa potencial aplicado através de um SIG se mostrou uma metodologia capaz de estimar a biomassa potencial da floresta semi-decidual nessa zona de contato com a formação savânica de Roraima. O valor médio de biomassa potencial para a área atualmente ocupada por florestas foi de  $153,13 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , bastante próximo ao encontrado por Xaud (1998) através de amostras de campo desta região sugerindo que, através de ferramentas de um SIG, é possível obter estimativas coerentes. Em etapas futuras, seria interessante: 1) a comparação destes resultados com o uso de outro conjunto de amostras para a validação da metodologia; 2) a suavização das bordas de transição entre os níveis de biomassa, o que seria possível com a ponderação das classes através de metodologia Fuzzy e 3) a comparação do IBP obtido pela metodologia exposta e o IBP produzido a partir da metodologia original (Iverson et al., 1994).

#### Agradecimentos

Os autores agradecem a Bárbara M. G. Ribeiro pela contribuição no processamento dos dados e a Raimundo Costa Filho (Exército de Roraima) pela disponibilidade de numerosos dados. Agradecem igualmente ao CNPq pela bolsa de estudos concedida ao primeiro autor.



## Referências Bibliográficas

- Araújo, L. S. Análise da cobertura vegetal e de biomassa em áreas de contato floresta/savana a partir de dados TM/LANDSAT e JERS-1. 1999. 115p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999.
- Brasil. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Projeto RADAMBRASIL**. Folha NA.20 Boa Vista e parte das folhas NA.21 Tumucumaque, NB.20 Roraima e NB.21; geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro, 1975. 428p. (Levantamento de Recursos Naturais, 8).
- CPRM. **Geologia e recursos minerais da Amazônia Brasileira, Região Cratônica**. Sistema de Informações Geográficas –SIG. Mapa na escala 1: 1.750.000. CD-Rom. 2002.
- Falkowski, M. J., Wulder, M. W., White, J. C., Gillis, M. D. Supporting large-area, sample-based forest inventories with very high spatial resolution satellite imagery. **Progress in Physical Geography**, v.33, n. 3, p. 403-423, 2009.
- Houghton, R.A.; Lawrence, K.T.; Hackler, J.L.; Brown, S. The Spatial distribution of forest biomass in the Brazilian Amazon: a comparison of estimates. **Global Change Biology**, v.7, p.731-746, 2001.
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Estimativas anuais do desflorestamento desde 1988. **Projeto PRODES: Monitoramento da floresta amazônica brasileira por satélite**. 2010. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/prodes/>> Acesso em: 10 junho 2010.
- Iverson, L. R. et al. Use of GIS for Estimating Potential and Actual Forest Biomass for Continental South and Southeast Asia. In: V. H. DALE (Ed). **Effects of land-use change on atmospheric CO concentrations**. Springer-Verlag, 1994.
- Laurance, W.F. et al. Relationship between soils and Amazon forest biomass: a landscape-scale study. **Forest Ecology and Management**, v. 118, p. 127-138, 1999.
- Martins, O.S. et al. **Estimativa da densidade de biomassa potencial com uso de SIG no estado de São Paulo**. Cadernos da Mata Ciliar / Secretaria de Estado do Meio Ambiente, Departamento de Proteção da Biodiversidade. - N. 2 (2009)--São Paulo: SMA, 2009.
- Ramalho Filho, A. e Beek, K.J. **Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras**. 3.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA/CNPQ, 1994. 65p.
- Veloso, H.P.; Rangel Filho, A.L.R.; Lima J.C.A. **Classificação da vegetação brasileira adaptada a um sistema universal**. São Paulo: IBGE, 1991.123 p.
- Saatchi, S., Houghton, R. A., dos Santos Alvalá, R. C., Soares, J. V. Distribution of aboveground live biomass in the Amazon basin. **Global Change Biology**, v.13, p. 816-837, 2007.
- Saaty, T. L. **The Analytic Hierarchy Process: planning, priority setting, resource allocation**. New York: McGraw-hill, 1980. 287 p.
- Sales, M. H., Souza Jr., C. M., Kyriakidis, P. C., Roberts, D. A., Vidal, E. Improving spatial distribution estimation of forest biomass with geostatistics: A case study for Rondônia, Brazil. **Ecological Modelling**, v. 205, p. 221-230, 2007.
- Weck, J. An improved CVP-index for the delimitation of the potential productivity zones of forest lands of India. **Indian Forester**, v. 96, p.565-572, 1970.
- Xaud, M. Avaliação de dados TM/LANDSAT e SAR/JERS na caracterização da cobertura vegetal e distribuição de fitomassa em áreas de contato floresta/savana no Estado de Roraima – Brasil. 1998. 151p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1998.