

Revista Brasileira de Cartografia (2013) N^o 65/6: 1199-1210
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

IDENTIFICAÇÃO DE CENÁRIOS ALTERNATIVOS PARA AS ÁREAS DE PASTAGENS CULTIVADAS NO ESTADO DE GOIÁS A PARTIR DE UM MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR

Identification of Alternative Scenarios for the Pasture Areas in the State of Goiás based on a Linear Mathematical Model

**Maria Socorro Duarte da Silva Couto¹; Ole Peter Smith²;
Laerte Guimarães Ferreira³; Fanuel Nogueira Garcia³;
Luis E. Fernandez⁴ & Christopher B. Field⁴**

**¹Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia de Goiás – IFG
Departamento de Áreas Acadêmicas**

IFG – Campus Inhumas - Av. Universitária s/n Vale das Goiabeiras, CEP:75400-000, Inhumas – GO, Brasil.
socorrodc@inhumas.ifg.edu.br

**²Universidade Federal de Goiás – UFG
Instituto de Matemática e Estatística**

UFG - Campus Samambaia, Caixa Postal: 131, CEP:74001-970, Goiânia – GO, Brasil.
ole@mat.ufg.br

³Universidade Federal de Goiás – UFG

Instituto de Estudos Sócio-Ambientais - Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento
Campus Samambaia, Caixa Postal: 131, CEP:74001-970, Goiânia – GO, Brasil.
laerte@iesa.ufg.br, fanuelng@yahoo.com.br

**⁴Carnegie Institution for Science, Stanford University
Department of Global Ecology**

260 Panama St., Stanford, CA, Estados Unidos.
luisf@stanford.edu, cfield@ciw.edu

*Recebido em 01 de Fevereiro, 2013/ Aceito em 07 de Agosto, 2013
Received on February 01, 2013/ Accepted on August 07, 2013*

RESUMO

A pecuária exerce grande importância na economia do Brasil, com as áreas de pastagens ocupando ~ 30% da área total do país. Igualmente significativos são os impactos ambientais associados a esta atividade. Entre outros, estima-se que a cadeia de produção pecuária seja responsável por algo em torno de 50% das emissões totais de gases de efeito estufa no país. Dentro deste contexto, e tendo em vista a necessidade de se otimizar, de forma economicamente e ambientalmente sustentáveis, a ocupação destas áreas, consideradas importantes reservas de terras à expansão agrícola em geral, neste trabalho apresentamos um modelo matemático inédito, o qual, tendo por referência o Estado de Goiás (bioma Cerrado), busca identificar, com base em um amplo conjunto de atributos físicos, biofísicos e socioeconômicos, diferentes alternativas e cenários de uso para as áreas de pastagens cultivadas. A solução ótima padrão avaliada indica que,

enquanto 77% destas áreas devem permanecer como estão e com as mesmas taxas de ocupação, 12% das pastagens atuais devem ser destinadas à restauração da vegetação natural, 4% à expansão da área plantada com cana-de-açúcar e 7% submetidas ao incremento da lotação bovina. A nossa expectativa é de que o modelo proposto possa ser aplicado em diferentes regiões, conjuntos de dados, cenários e escalas de análise. Independentemente da precisão das soluções encontradas, as quais dependem, entre outros fatores, dos atributos escolhidos e disponibilidade e confiabilidade dos dados, estas certamente se constituem em importante subsídio à formulação de políticas públicas voltadas à melhor governança territorial e ambiental de paisagens naturais remanescentes ameaçadas, como é particularmente o caso do bioma Cerrado.

Palavras-chave: Cerrado, Pastagens, Cenários de Ocupação, Políticas de Conservação.

ABSTRACT

Cattle ranching plays an important role in the Brazilian economy, with pasturelands occupying approximately 30% OF the total country area. The environmental impacts associated with this activity are equally significant. Among others, it is estimated that the whole cattle industry is responsible for about 50% of the national emissions of greenhouse gases. Within this context, and in pursuit of optimizing, in a sustainable way, the occupation of these lands, considered important reserves for agricultural expansion, in this work we present a mathematical model, which, based on a wide set of physical, biophysical, and socioeconomic attributes, aims at identifying, in a spatially consistent manner, different land use alternatives for areas currently occupied with cultivated pastures. The optimum standard solution found in this preliminary evaluation, focused in the State of Goiás (Cerrado biome core region), indicated that, while 77% of the pasture area should remain as it is, with the same occupation rates, 12% of the existent pastures should be put apart for restoration of the natural environments, 4% should be used for expansion of sugarcane plantations, and 7% should be submitted to increased cattle occupation. Our expectation is that the linear approach proposed in this work can be applied to different regions, datasets, scenarios and scales of analysis. Regardless of the precision of possible solutions, which strongly depend on the chosen attributes and consistency of the available datasets, these certainly can subsidize public policies aiming at improved territorial and environmental governance of remnant natural landscapes, which is particularly the case of the threatened Cerrado biome.

Keywords: Cerrado, Pastures, Land-Use Scenarios, Conservation Policies.

1. INTRODUÇÃO

Pastagens, principalmente as cultivadas com espécies de origem africana (ex. *Brachiaria spp.*), constituem a principal forma de uso da terra no Brasil, com uma área aproximada de 180 milhões de hectares (i.e. ~ 22% da área total do país) (MMA, 2007). A atividade pecuária é particularmente proeminente no bioma Cerrado, *hotspot* de biodiversidade (MYERS et al., 2000) e onde se localizam em torno de 44% do rebanho nacional (CNPQ, 2011), distribuídos em cerca de 60 milhões de hectares de pastagens cultivadas (SANO et al., 2000; SANO et al., 2010).

Ainda que parte significativa da área de pastagem cultivada no bioma Cerrado encontre-se degradada ou apresente diminuição em sua capacidade de suporte (MARTHA JÚNIOR e VILELA, 2002; OLIVEIRA et al., 2004), a expansão no consumo interno e das exportações tem estimulado tanto o aumento na área de pastagens quanto da produtividade, através

do incremento na lotação bovina (MACEDO, 2005; EUCLIDES FILHO, 2008). Ao mesmo tempo, as áreas de pastagens são cada vez mais demandadas pela agricultura em escala industrial, em particular, com vistas à produção de etanol derivado da cana-de-açúcar (MARTINELLI e FILOSO, 2008; SAWYER, 2008).

Neste sentido, e tendo em vista a necessidade de se otimizar, de forma economicamente e ambientalmente sustentáveis, a ocupação das terras no bioma Cerrado, neste estudo apresentamos um modelo matemático de programação linear, o qual, a partir de dados satelitários, cartográficos e censitários, e tendo por referência o Estado de Goiás (Figura 1), celeiro do Brasil na produção de grãos e carnes (MENDES, 2008; BUSTAMANTE e FERREIRA, 2010), gera alternativas de uso para as áreas de pastagens. Especificamente, a solução ótima padrão avaliada neste trabalho busca identificar áreas mais favoráveis à restauração da

vegetação natural, ao aumento da lotação bovina ou substituição por cana-de-açúcar, bem como áreas que, em função de características naturais, localização e infraestrutura existentes, devem manter a lotação bovina atual.

2. DADOS E ABORDAGENS

2.1 Área de Estudo

A área de estudo deste trabalho compreende o Cerrado goiano, situado na região Centro-Oeste do país e originalmente presente em aproximadamente 97% do estado de Goiás. Caracterizado pela intensa ocupação de seu território, com destaque para a pastagem, distribuída de forma generalizada, e agricultura, predominante no sudoeste e centro-sul, o Cerrado goiano faz parte do celeiro do Brasil na produção de grãos e carnes (MENDES, 2008) (Figura 1).

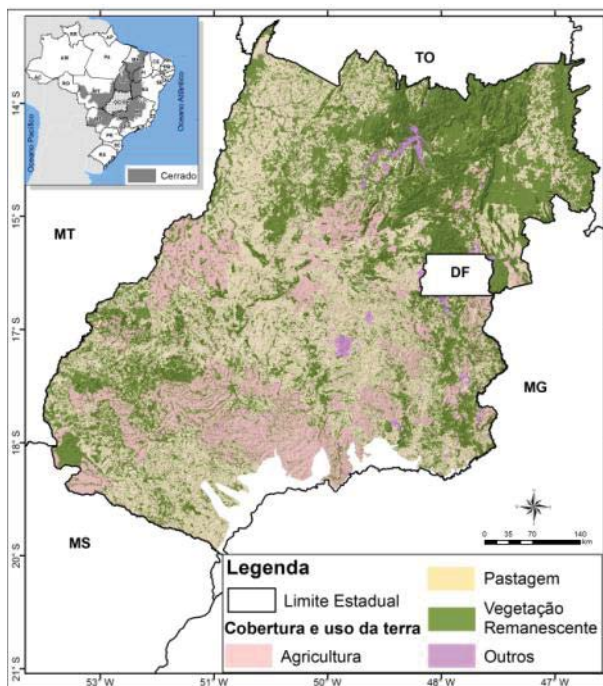


Fig.1 - Mapa de cobertura e uso da terra no Cerrado goiano (em detalhe, localização do Estado de Goiás em relação ao bioma Cerrado e à totalidade do território brasileiro).

2.2 Dados e Processamentos

Um dado de fundamental importância para este estudo diz respeito à produtividade primária líquida (PPL) para as áreas de pastagens no Cerrado goiano, a qual foi obtida, indiretamente, no período entre 2001 e 2009, a partir do mosaico

de imagens MODIS índices de vegetação EVI (*enhanced vegetation index* – produto MOD13Q1) (HUETE et al., 2002). Estas imagens, em formato GeoTIFF, re-projetadas e filtradas, são disponíveis através do portal de dados do Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento do Instituto de Estudos Socioambientais da Universidade Federal de Goiás (LAPIG/IESA/UFG – www.lapig.iesa.ufg.br) (PARENTE et al., 2013).

Conforme demonstrado por Ferreira et al. (2012), o valor acumulado do índice de vegetação ao longo de um ciclo hidrológico completo está diretamente correlacionado ao crescimento da biomassa. Assim, para cada polígono de pastagem procedeu-se ao somatório, *pixel a pixel*, dos valores de EVI ao longo de cada ano (i.e. 23 *composites*), entre 2001 e 2009, conforme Eq. (1):

$$\text{Imagem_Produtividade}_{2001,2002\dots2009} = (\sum \text{EVI}_{01,23}) \quad (1)$$

A partir da Eq. (2), os valores radiométricos da imagem produtividade média, relativa a todo o período analisado, foram normalizados:

$$[(Xi) - (Xmin)] / [(Xmax) - (Xmin)] \quad (2)$$

onde Xi = valor médio de um pixel; $Xmin$ = *pixel* de menor valor na *imagem média*; e $Xmax$ = *pixel* de maior valor na *imagem média*.

Além do extenso conjunto de imagens índice de vegetação MODIS, outros 11 planos de informação foram utilizados neste estudo (Figura 2). Quanto às bases cartográficas, estas compreenderam: (i) mapa de uso da terra para o todo o bioma Cerrado, elaborado no âmbito do Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira (PROBIO), à escala de 1:250.000, tendo como base as imagens Landsat ETM+ de 2002 (SANO et al., 2010) e (ii) Áreas Prioritárias (disponíveis em <http://mapas.mma.gov.br/mapas/>); (iii) Imagens topográficas SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) (BERRY et al., 2007), obtidas junto ao Centro Nacional de Pesquisa de Monitoramento por Satélite da EMBRAPA, no âmbito da Coleção “Brasil em Relevo” (www.relevobr.com).

cnpm.embrapa.br); (iv) áreas de cultivo de cana-de-açúcar e usinas de etanol e açúcar (disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/canasat/>); (v) limite do bioma Cerrado e Unidades de Conservação (disponível em: www.ibama.gov.br); (vi) limite municipal e malha viária, disponíveis através do SIEG (Sistema Estadual de Estatística e de Informações Geográficas de Goiás - www.sieg.go.gov.br).

Os dados relacionados à pecuária, ou seja, área de pastagem no Cerrado goiano, rebanho bovino e lotação bovina (i.e. número de cabeças de gado por hectare), foram obtidos junto ao IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), através do Censo Agropecuário (IBGE, 2006) e da Produção da Pecuária Municipal (IBGE, 2010) (disponível em: www.ibge.gov.br), enquanto os dados de localização dos frigoríficos foram obtidos junto à Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carnes (ABIEC, 2011) (www.abiec.com.br/2_mapa.asp).

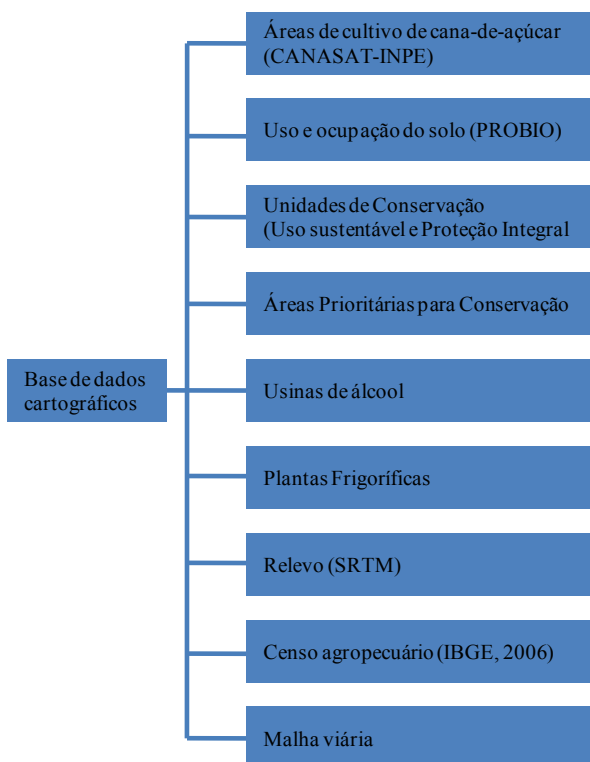


Fig. 2 - Base de dados cartográficos e censitários utilizados neste estudo.

Entorno das áreas de cultivo de cana-de-açúcar e das Unidades de Conservação de proteção integral foram definidos *buffers* (1 e 5 km, respectivamente), os quais foram

intersectados com os polígonos de pastagens e atribuídos valores 0, se situados dentro destes limites, ou 1, quando localizados a distâncias superiores a 1km ou 5km das plantações de cana ou áreas protegidas, respectivamente. De forma similar, polígonos de pastagens situados no interior das Unidades de Conservação de uso sustentável e Áreas Prioritárias, foram atribuídos valor 0, enquanto que o valor 1 foi atribuído aos polígonos fora destes limites. Quanto ao entorno das usinas de etanol e frigoríficos, definiram-se *buffers* com 15 km de raio, em relação aos quais foram atribuídos valores de 0 e 1 para os polígonos de pastagens interceptados ou não, respectivamente.

Em uma etapa seguinte, foi realizada a intersecção entre as áreas de pastagens com os dados de declividade gerados a partir de imagens SRTM. Para os polígonos de pastagens situados em declividades menores que 12%, atribuiu-se o valor 0, enquanto àqueles polígonos situados em áreas com declividades superiores a 12%, atribuiu-se o valor 1. Vale ressaltar que os locais com baixa declividade são os mais favoráveis tanto para a criação de gado quanto para agricultura e cultivo de cana de açúcar, enquanto áreas com elevadas declividades podem ser mais viáveis para a restauração da vegetação natural.

Quanto à malha viária, atribuiu-se o valor 0 a todos os polígonos interceptados por alguma estrada, pavimentada ou não; para os demais, valor 1. Em relação às áreas de vegetação remanescente, atribuiu-se valor 0 a todos os polígonos de pastagens situados até a distância de 1km e o valor 1 aos demais polígonos, localizados a distâncias maiores.

Por fim, foi realizada a intersecção de todos estes polígonos de pastagens com as médias de produtividade primária líquida (PPL) de cada município.

3. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Basicamente, queremos saber se um dado polígono de pastagem deve ser:

- x_i : destinado à maior lotação de gado;
- y_i : destinado à cana-de-açúcar;
- z_i : destinado à restauração da vegetação natural;
- w_i : mantido como está.

Assim, para cada polígono foram considerados os seguintes atributos (Tabela 1):

Tabela 1: Atributos associados a cada polígono e seus respectivos símbolos.

Atributos	Símbolos
Área	a
PPL Médio	n_p
Lotação bovina	l
Distância aos frigoríficos	d_f
Declividade	d
Distância às usinas	d_u
Distância às áreas de cana-de-açúcar	d_c
Adjacência às áreas prioritárias	a_p
Adjacência às áreas de proteção integral	a_{pi}
Adjacência às áreas de proteção sustentável	a_s
Adjacência às áreas de vegetação natural remanescente	a_v
Distância às rodovias	d_r

Estes atributos são relacionados através do seguinte modelo de programação linear, conforme proposto neste estudo:

$$\text{Maximizar } \sum_{i=1}^n [(A_1 a^i + A_2 n_p^i - A_3 l^i - A_4 d_f^i) x_i + (-A_5 d^i - A_6 d_u^i - A_7 d_c^i) y_i + (-A_8 a_p^i - A_9 a_{pi}^i - A_{10} a_s^i - A_{11} a_v^i + A_{12} d_r^i - A_{13} l^i) z_i]$$

sujeito a $x_i + y_i + z_i + w_i = 1$
 $x_i \geq 0$
 $y_i \geq 0$
 $z_i \geq 0$
 $w_i \geq 0$

onde, x , y , z e w são os vetores de decisão, que indicam o grau de viabilidade dos possíveis destinos para cada polígono, isto é, $x = \{x_i\}$, $y = \{y_i\}$, $z = \{z_i\}$ e $w = \{w_i\}$, $i = 1, 2, \dots, n$, o que justifica a imposição das restrições $x_i + y_i + z_i + w_i = 1$

Isso significa que a solução encontrada para cada polígono de pastagem será um valor entre 0 e 1, o qual indicará uma possível redistribuição de uso.

É importante ressaltar que na modelagem matemática é crucial a escolha dos parâmetros A_1 a A_{13} . Conforme o valor escolhido para esses parâmetros, certas características de ocupação serão favorecidas ou penalizadas, as quais dependem dos interesses envolvidos. Especificamente, as motivações das parcelas da função objetivo são:

– $A_1 a^i x_i$: favorece os polígonos de pastagem com

maior área a terem uma maior lotação;

– $A_2 n_p^i x_i$: favorece os polígonos de pastagem com maior valor de PPL médio a terem uma maior lotação;

– $A_3 l^i x_i$: favorece os polígonos de pastagem que possuem baixa lotação bovina a terem uma maior lotação;

– $A_4 d_f^i x_i$: favorece os polígonos de pastagem mais próximos aos frigoríficos instalados a terem uma maior lotação;

– $A_5 d^i y_i$: favorece os polígonos de pastagem com baixa declividade a se tornarem áreas de expansão para a cana-de-açúcar;

– $A_6 d_u^i y_i$: favorece os polígonos de pastagem mais próximos às usinas a se tornarem áreas de expansão para a cana-de-açúcar;

– $A_7 d_c^i y_i$: favorece os polígonos de pastagem mais próximos das áreas de cana-de-açúcar a se tornarem áreas de expansão;

– $A_8 a_p^i z_i$: favorece os polígonos de pastagem mais próximos das áreas prioritárias a se tornarem áreas destinadas à restauração da vegetação natural;

– $A_9 a_{pi}^i z_i$: favorece os polígonos de pastagem mais próximos das áreas de proteção integral a se tornarem áreas destinadas à restauração da vegetação natural;

– $A_{10} a_s^i z_i$: favorece as áreas de pastagens adjacentes às áreas de preservação sustentável a serem restauradas, ou seja, se tornarem áreas de vegetação natural;

– $A_{11} a_v^i z_i$: favorece os polígonos de pastagem adjacentes às áreas de vegetação remanescente a se tornarem áreas destinadas à restauração da vegetação natural;

– $A_{12} d_r^i z_i$: restringe os polígonos de pastagem próximos das rodovias de se tornarem áreas de vegetação natural;

– $A_{13} l^i z_i$: favorece os polígonos de pastagem com pouco gado a se tornarem áreas de vegetação natural.

A partir do estudo de cada parcela da função objetivo, são obtidos os valores de seus parâmetros, com vistas a ordenar e redistribuir o uso das áreas de pastagens, de forma que, preferencialmente, os polígonos de pastagem mais próximos aos frigoríficos sejam destinados à maior lotação bovina, os mais próximos às

usinas se tornem área de expansão para a cana e nos polígonos adjacentes às unidades de conservação (proteção integral ou sustentável), ou vegetação remanescente, sejam restauradas a vegetação natural.

Como o modelo matemático proposto é um problema de programação linear, foi implementado o algoritmo Simplex na Linguagem C, cuja ideia básica consiste em resolver repetidas vezes um sistema de equações lineares, a partir de uma solução inicial, para obter uma sucessão de soluções básicas, cada uma «melhor» do que a anterior, até se chegar a uma solução básica ótima.

Também é importante observar que para este problema já existe uma solução inicial, pois todos os polígonos de pastagem, a princípio, podem ser mantidos como estão, ou seja, não haverá redistribuição do uso de áreas de pastagens atualmente cultivadas.

Em seguida, para decidir qual é o tipo de redistribuição de uso para cada polígono de pastagem cultivada, faz-se um pós-processamento da solução ótima (x_i , y_i , z_i , w_i) escolhendo o destino dominante, isto é, coloca-se

$$x_i = 1, \text{ se } x_i > \max(y_i, z_i, w_i)$$

$$y_i = 1, \text{ se } y_i > \max(x_i, z_i, w_i)$$

$$z_i = 1, \text{ se } z_i > \max(x_i, y_i, w_i)$$

$$w_i = 1, \text{ se } w_i > \max(x_i, y_i, z_i)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como mencionado anteriormente, o modelo matemático proposto nesse trabalho pode fornecer uma variedade de soluções ótimas, dependendo do valor dos parâmetros A_j a A_{13} , os quais, por sua vez, dependem das prioridades de ocupação e uso do solo. Além disso, a solução ótima também varia de acordo com as características e o tamanho da área de estudo. Especificamente, os parâmetros adotados neste modelo buscaram encontrar soluções ótimas que exibam o desenho de novos arranjos espaciais ecologicamente mais sustentáveis, através da identificação de áreas prioritárias para restauração de paisagens naturais, intensificação da pecuária e/ou expansão sucroalcooleira. Neste sentido, e com vistas a se encontrar uma solução ótima padrão quanto ao ordenamento e

remanejamento de uso das áreas de pastagens do Cerrado em Goiás, a função foi parametrizada com os seguintes valores: $A_1 = 1$, $A_2 = 2$, $A_3 = 100$, $A_4 = 1$, $A_5 = 10^9$, $A_6 = 10^6$, $A_7 = 10^4$, $A_8 = 1$, $A_9 = 10^2$, $A_{10} = 10^2$, $A_{11} = 3$, $A_{12} = 10^3$, $A_{13} = 10^3$.

A solução ótima padrão, referente à totalidade das áreas de pastagens cultivadas no Cerrado goiano, indica que aproximadamente 77% destas pastagens poderão permanecer inalteradas, tendo em vista que estas áreas apresentam boa relação entre os índices de produtividade primária (PPL) e lotação bovina diante das condições naturais das suas respectivas regiões (figura 3).

Por outro lado, a restauração da vegetação natural é recomendada para 12% da área de pastagem atual, em função da proximidade de fragmentos vegetacionais e unidades de conservação (proteção integral e uso sustentável), além de estarem em sua maioria situadas dentro das áreas definidas pelo Ministério do Meio Ambiente como Prioritárias para Conservação da Biodiversidade (MMA, 2007; SCARAMUZZA et al., 2008). Com base na figura 3, podemos observar que no extremo sul goiano a maioria dos polígonos de pastagens situados dentro das áreas prioritárias foram identificados como locais propícios à restauração da vegetação natural. Outras regiões que se destacam pela elevada quantidade de áreas indicadas à recuperação na solução ótima são as porções norte e noroeste do estado (depressão do Araguaia).

Outro direcionamento apresentado nesta solução é o aumento da lotação bovina em aproximadamente 7% das áreas de pastagens (Figura 3). Para se chegar a este valor, o modelo utilizou como critérios a proximidade dos 28 grandes frigoríficos e das principais rodovias do estado (fator crucial para o escoamento de matéria prima e de produtos). Em relação à distribuição geográfica, observa-se que a região central do estado é onde há maior quantidade de frigoríficos e, conseqüentemente, onde houve maior sugestão de aumento na lotação bovina.

Por fim, observa-se que 4% das pastagens cultivadas no cerrado goiano poderiam ser substituídas por cana-de-açúcar, haja vista que estas áreas possuem características naturais (declividade menor que 12%) propícias a esta atividade, além de estarem situadas até 15 km de uma usina (EMBRAPA, 2009) (Figura 3).

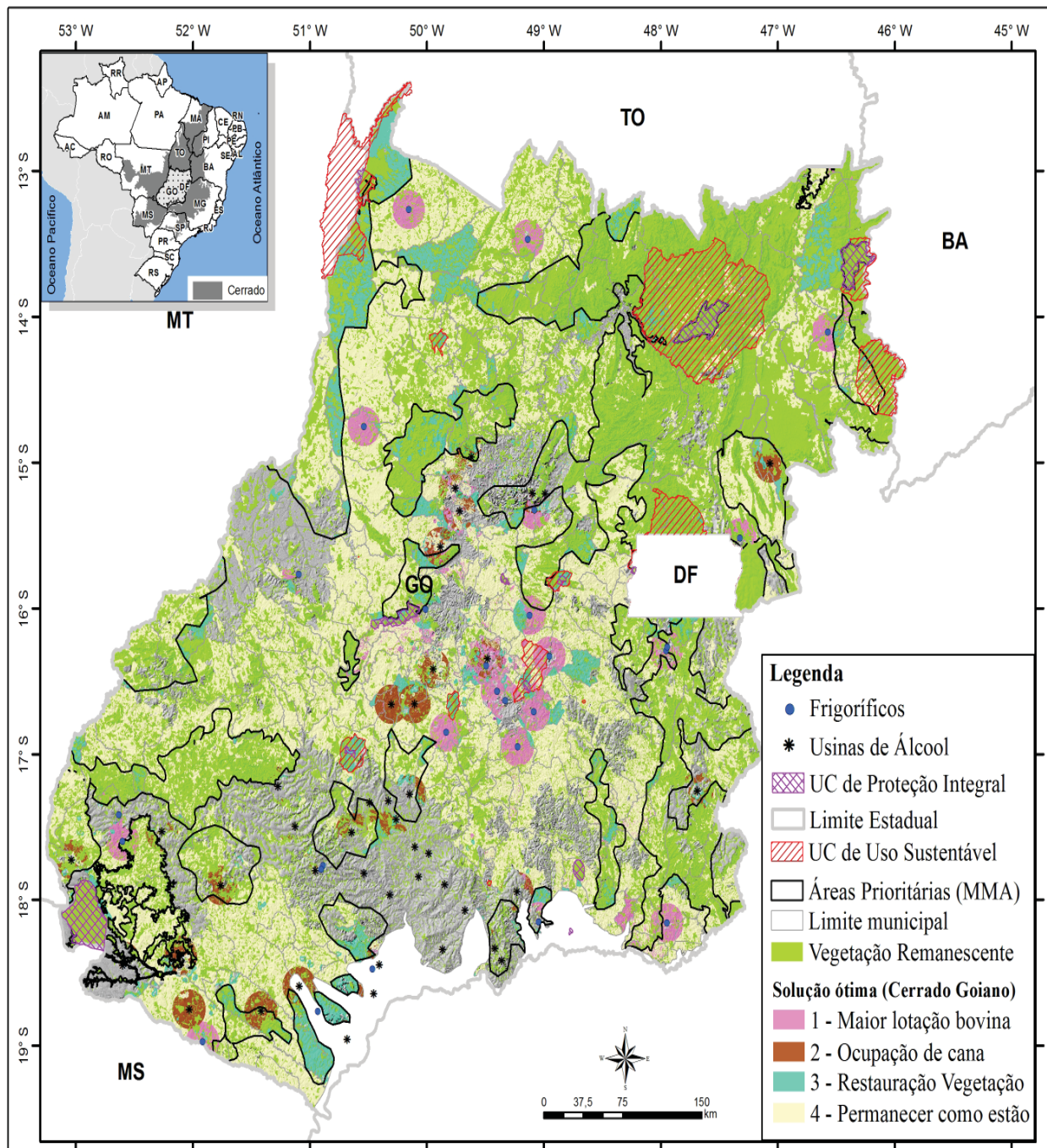


Fig. 3 - Solução ótima padrão com vistas ao ordenamento e remanejamento de uso das áreas de pastagens no Estado de Goiás.

Especificamente em relação ao parâmetro A_2 , associado à média de produtividade primária líquida (PPL), procedeu-se a uma análise de sensibilidade, comparativamente à solução ótima padrão (Figura 3), tendo por base a Região Metropolitana de Goiânia, constituída por 230 polígonos de pastagens.

Assim, para cada valor atribuído ao A_2 {0, 2, 4, 6, 8, 10, 12}, no intervalo [0,12], foi gerada uma solução ótima correspondente. Para facilitar as análises e medir as possíveis alterações entre

cada solução gerada e a solução ótima padrão, definiu-se uma distância Δ como sendo a raiz quadrada da soma do quadrado da diferença entre o vetor solução do parâmetro que foi variado e o vetor da solução ótima padrão (Figura 04).

Conforme pode ser observado na figura 4, o maior valor de Δ ocorre para o valor de $A_2=0$. Isso significa que a ausência do termo PPL no modelo não permite a destinação de polígonos de pastagem para maior lotação de gado (Figura 5), o que confirma a sua importância para tal.

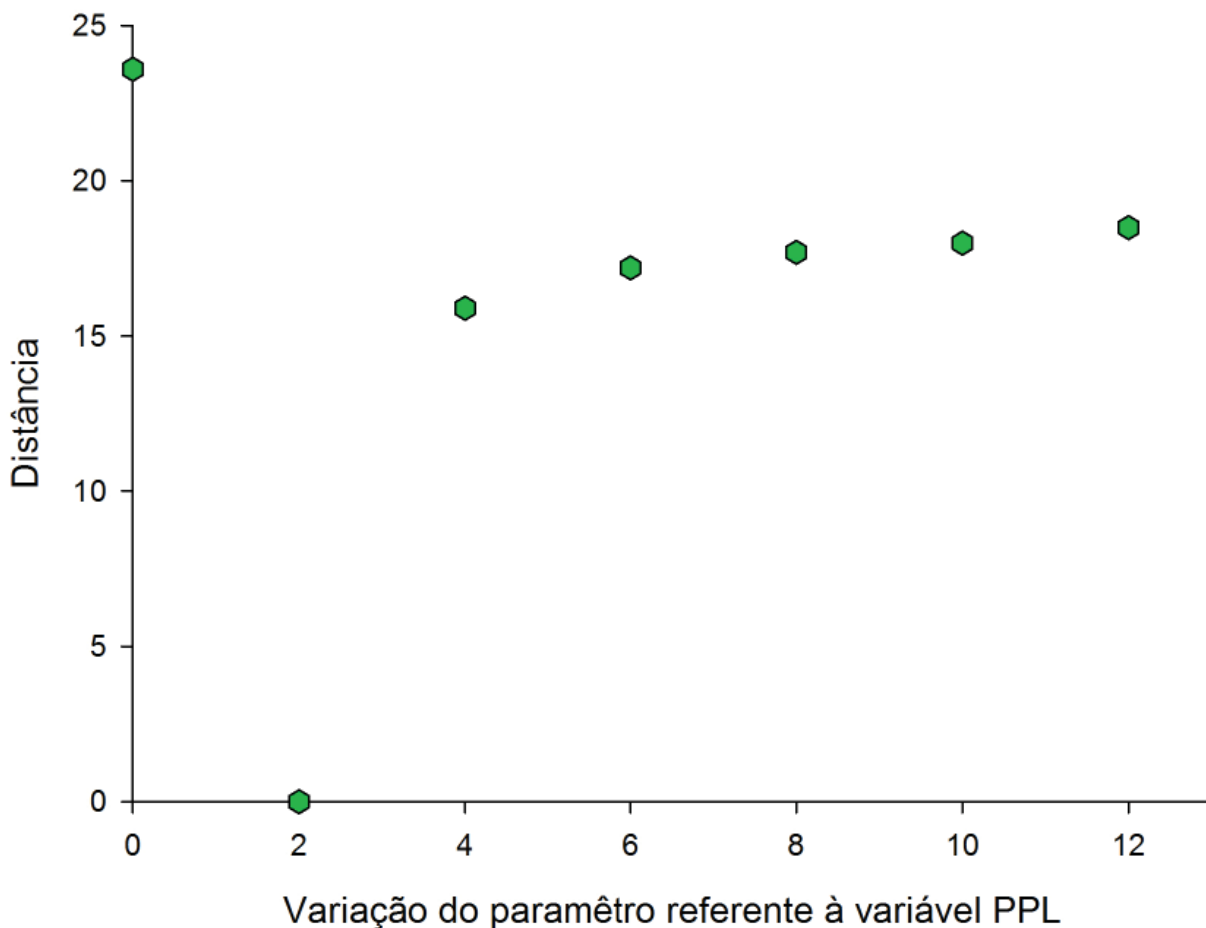


Fig. 4 - Distância entre a solução ótima padrão ($A_2 = 2$) e a solução ótima obtida pela variação do parâmetro referente à variável PPL (produtividade primária líquida) (A_2).

De fato, verificou-se que quando foi atribuído um valor maior que zero para esse parâmetro, a solução ótima passou a admitir áreas de pastagens para maior lotação. Por exemplo, para $A_2 = 2$, a solução ótima padrão destinou 62 polígonos de pastagem para maior lotação de gado (Figura 5). Para valores de A_2 maiores ou iguais a 4, no intervalo $[0, 12]$, a distância aumenta gradativamente, indicando a inclusão gradativa de polígonos para maior lotação. A inclusão desses polígonos pode ocorrer para um determinado valor de A_2 na solução ótima e não para outros valores. Especificamente, na solução ótima obtida para $A_2 = 6$, o aumento na lotação bovina é recomendado para um total de 87 áreas de pastagens, sendo que a inclusão destes 25 polígonos adicionais (i.e. $A_2 = 2 \rightarrow A_2 = 6$) é observada principalmente ao norte da Região Metropolitana de Goiânia (Figura 5). Por outro lado, para esta mesma solução ($A_2 = 6$), simultaneamente ocorre a exclusão de 20 polígonos na porção centro-sul, os quais passam

a ser indicados à manutenção dos atuais padrões de ocupação.

Além disso, para valores de A_2 maiores que 8, a solução tende a se tornar constante (figura 4). Isso se deve à influência dos outros atributos e seus respectivos parâmetros na função objetivo.

Ao analisar a função objetivo e os dados para a Região Metropolitana de Goiânia, constatou-se que uma porção considerável de áreas é destinada à restauração da vegetação natural com a variação do parâmetro A_2 . Isso ocorreu devido a uma grande parte dessa região conter (ou ser adjacentes às) áreas prioritárias para conservação (SCARAMUZZA et al., 2008), as quais exercem forte influência na solução do problema.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A atividade pecuária exerce grande importância na economia do Brasil, detentor do maior rebanho bovino comercial do mundo (CNPQ, 2011; ABIEC, 2012). Contudo, seus

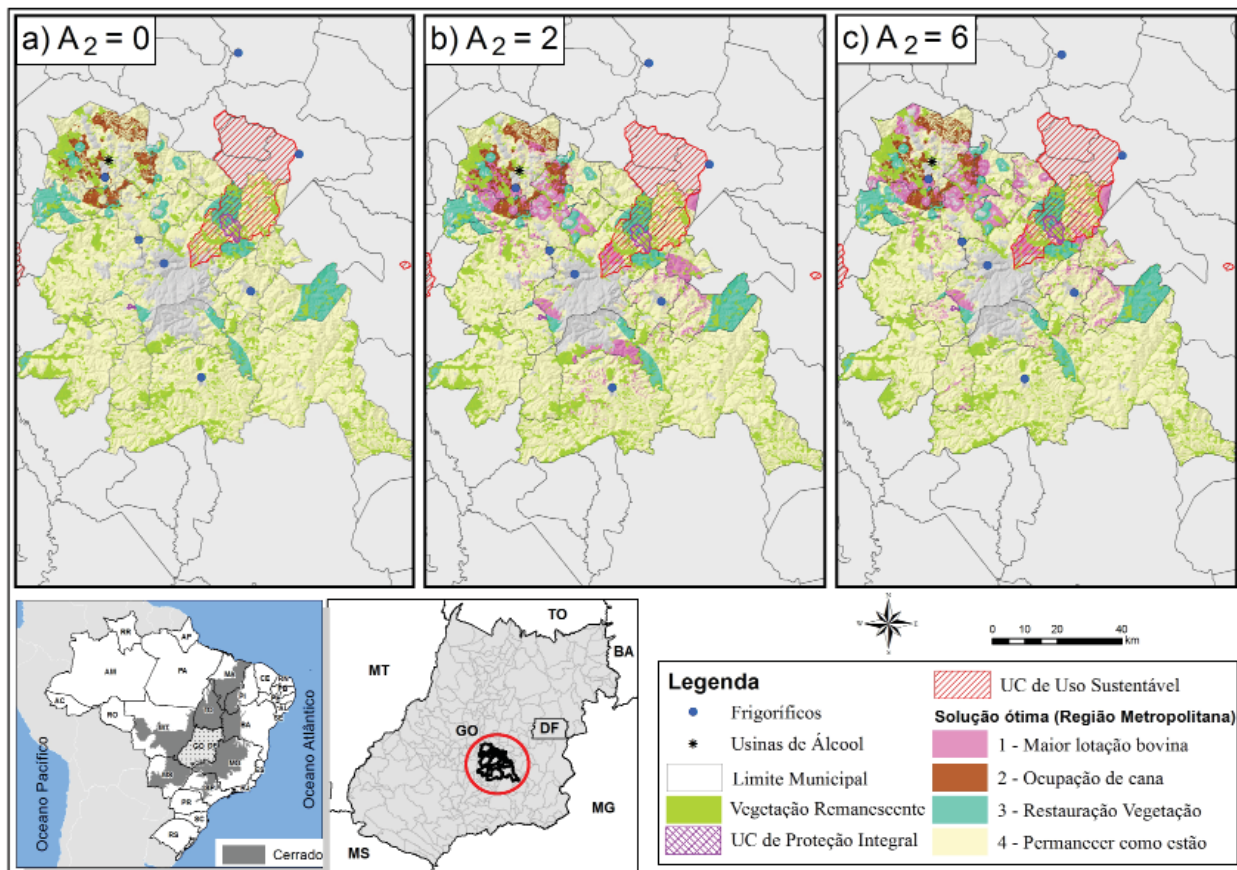


Fig. 5 - Soluções ótimas para a Região Metropolitana de Goiânia (230 polígonos de pastagem), conforme distintas parametrizações de A_2 (produtividade primária líquida).

severos impactos ambientais não são menos significativos. Entre outros, estima-se que a cadeia de produção pecuária seja responsável por algo em torno de 50% das emissões totais de gases de efeito estufa no país (BUSTAMANTE et al., 2012). Da mesma forma, e em particular no bioma Cerrado, a fragmentação e substituição de ecossistemas complexos por gramíneas pouco profundas já causaram danos irreversíveis aos ciclos hidrológicos, biogeoquímicos e de carbono e às transferências de água e energia para a atmosfera (COSTA et al., 2003; BUSTAMANTE e FERREIRA, 2010; COE et al., 2011).

Por outro lado, vários estudos sugerem que as áreas de pastagens, mediante o uso de melhores práticas de manejo e aumento da produtividade bovina (ex. SPAROVEK et al., 2012), podem vir a se tornar importantes reservas de terra, voltadas principalmente à expansão sucroalcooleira, como aliás preconiza o plano nacional de biocombustíveis (EMBRAPA, 2009).

Dentro deste contexto, bem como considerando o fato de que o incremento das áreas

de pastagens se constitui ainda no principal indutor de novos desmatamentos no bioma Cerrado (FERREIRA et al., 2011; ROCHA et al., 2011), este trabalho buscou demonstrar e validar um modelo matemático inédito, cujas soluções ótimas possíveis, baseadas em um amplo conjunto de atributos de natureza física (ex. declividade do terreno), biofísica (i.e. produtividade das áreas de pastagens) e relacionados à infraestrutura existente (ex. distância de estradas, frigoríficos), resultam em diferentes alternativas e cenários de uso para as áreas de pastagens cultivadas.

Priorizando as pastagens cultivadas no Estado de Goiás, protagonista na produção agropecuária do país e localizado na região central do bioma Cerrado, neste estudo avaliamos uma solução ótima padrão centrada no equilíbrio entre aumento da produção bovina e de cana-de-açúcar e proteção ambiental de áreas subutilizadas e / ou de baixa aptidão agrícola.

Ainda que os nossos resultados, de caráter exploratório, tendem a corroborar com a manutenção dos arranjos espaciais e

padrões produtivos vigentes, i.e. 77% das áreas de pastagens devem permanecer como estão e com as mesmas taxas de ocupação, fica também evidente o potencial para um melhor ordenamento e gestão territorial, através da realocação das pastagens atuais para recuperação da vegetação natural (12%) e expansão da área plantada com cana-de-açúcar (4%), bem como o aumento da lotação bovina em aproximadamente 7% das gramíneas cultivadas.

Estes resultados, obviamente, dependem tanto dos atributos utilizados no modelo (neste estudo, 12 variáveis ao todo), quanto da parametrização destes atributos. Uma análise de sensibilidade preliminar do atributo A_2 , i.e. produtividade primária líquida (PPL), em áreas próximas à Região Metropolitana de Goiânia, resultou em nenhum polígono de pastagem selecionado para aumento da lotação bovina, quando $A_2 = 0$, e 62 polígonos selecionados, para $A_2 = 2$. Para valores de $A_2 \geq 8$, quando a solução tende a se tornar constante, o aumento do rebanho é apontado para 87 polígonos, ainda que para 20 áreas de pastagens, localizadas principalmente no centro-sul desta região, a recomendação, inicialmente de incremento da atividade pecuária, conforme a solução $A_2 = 2$, passa a ser de manutenção do rebanho atual.

Igualmente importante é a consistência e compatibilidade entre os atributos escolhidos. Especificamente para este estudo, há discrepâncias em resolução espacial entre os produtos de sensoriamento remoto (ex. dados SRTM e imagens MODIS índices de vegetação), significativa variabilidade de escalas entre os dados cartográficos e distintos padrões de distribuição e abrangência dos dados censitários. Não menos relevante, é a defasagem quanto à atualização entre todos os dados e informações utilizadas. Este é o caso, por exemplo, do mapa de áreas de pastagens (PROBIO), referência fundamental para este estudo, cujos limites (polígonos), além de desatualizados, são em geral pouco detalhados e muito extensos, ocasionando a mistura de distintos atributos fisiográficos, níveis de infraestrutura e práticas de manejo.

Certamente, uma maior aderência topológica e temporal entre estes atributos, bem como a incorporação de novas variáveis ao

modelo (ex. classes de solo, disponibilidade hídrica), resultará em soluções mais coerentes do ponto de vista espacial, geograficamente mais representativas e em maior conformidade às características socioeconômicas regionais. Dois avanços fundamentais nesta direção, com perspectiva de curto prazo, incluem a atualização e maior nível de detalhe espacial do mapa de uso da terra, se possível à escala de 1:100.000, e o acesso às bases cadastrais do Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA), possibilitando assim incorporar às análises tanto padrões de estrutura fundiária quanto a ocorrência de passivos ambientais, duas importantes variáveis de contorno às soluções geradas.

Por fim, deve-se enfatizar que o modelo matemático proposto e apresentado neste artigo, aplicável a qualquer região, pode ser rapidamente ajustado à disponibilidade de dados e arranjos espaciais prioritários (ex. contiguidade entre tipos de usos, demandas específicas do setor sucroalcooleiro). Independentemente da precisão e conformidade das soluções ótimas encontradas, estas, ao evidenciarem alternativas de uso para as áreas de pastagem, certamente se constituem em importante subsídio à formulação de políticas públicas voltadas à melhor governança territorial e ambiental, particularmente imprescindíveis à sustentabilidade das paisagens naturais remanescentes do já bastante ameaçado bioma Cerrado.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho, inserido entre as várias iniciativas do Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento (LAPIG / UFG) voltadas ao monitoramento sistemático e gestão territorial do bioma Cerrado, teve o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (Edital Universal 471198/2009-9), da Fundação de Apoio à Pesquisa no Estado de Goiás (FAPEG), da Agência Brasileira de Financiamento de Estudos e Projetos (FINEP / CT-Hidro) e do *Global Climate and Energy Project* (Stanford University / GCEP).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIEC. Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carne. **Quantidade de Abate.**

2012. Disponível em: <http://www.abiec.com.br/2_abate.asp> Acesso: 20 nov. 2012.
- ABIEC. Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carne. **Frigoríficos exportadores**. 2011. Disponível em: <www.abiec.com.br/2_mapa.asp> Acesso: 16 nov. 2012.
- BERRY, P.A.M.; GARLICK, J.D.; SMITH, R.G. Near- global validation of the SRTM DEM using satellite radar altimetry. **Remote Sensing of Environment**, v.106, p.17-27, 2007.
- BUSTAMANTE, M.; FERREIRA, L.G. Land Use Change and the Carbon Budget in the Brazilian Cerrado. In **Ecosystem Function in Savannas: Measurement and Modeling at Landscape to Global Scales**; Hill, M.J., Niall P., Hanan, N.P., Eds.; CRC Press: city, country, pp. 367–382, 2010.
- BUSTAMANTE, M.M.C.; CARLOS, C.A.; SMERALDI, R.; AGUIAR, A. P. D.; BARIONI, L.G.; FERREIRA, L.G.; LONGO, K.; MAY, P.; PINTO, A.S.; OMETTO, J. P. H. B. Estimating greenhouse gas emissions from cattle raising in Brazil. **Climatic Change**, p. 1-19, 2012 (doi: 10.1007/s10584-012-0443-3).
- CNPC. Conselho Nacional de Pecuária de Corte -National Beef Cattle Council (2011). **Balanco de Pecuária Bovídea de Corte: 1994–2010**. Disponível em: <<http://www.cnpc.org.br/arquivos/Balanco.xls>> Acesso: 20 maio. 2012.
- COE, M.; LATRUBESSE, E.M.; FERREIRA, M.E.; AMSLER, M.L. The effects of deforestation and climate variability on the streamflow of the Araguaia River, Brazil. **Biogeochemistry**, 105, 119–131, 2011.
- COSTA, M.H.; BOTTA, A.; CARDILLE, J.A. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins river, Southeastern Amazonia. **Journal of Hydrology**, 283, 206–217, 2003.
- EMBRAPA. Zoneamento Agroecológico da Cana-de-Açúcar. **EMBRAPA, 2009** (Brasília). Disponível online: http://www.cnps.embrapa.br/zoneamento_cana_de_acucar/ZonCana.pdf (acessado em 15 de janeiro de 2013).
- EUCLIDES FILHO, K.A. Pecuária de corte no Cerrado Brasileiro. In: FALEIRO, F. G.; FARIAS NETO, A. L. (Org.), **Savanas: Desafios e Estratégias para o Equilíbrio entre Sociedade, Agronegócio e Recursos Naturais**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2008.p. 613-644.
- FERREIRA, M.E.; SILVA, J.R.; ROCHA, G.F.; ANTONIAZZI, L.; NASSAR, A. Caracterização das áreas desmatadas no bioma Cerrado via sensoriamento remoto: uma análise sobre a expansão de culturas agrícolas e pastagens cultivadas. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15. Curitiba, PR, 30 de abril a 5 de maio 2011. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011, 8p.
- FERREIRA, L.G.; SANO, E. E. ;FERNANDEZ, L.; ARAÚJO, F. M. Biophysical characteristics and fire occurrence of cultivated pastures in the Brazilian savanna observed by moderate resolution satellite data. **International Journal of Remote Sensing**, v.34 (1), p. 154-167, 2012.
- HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E. P.; GAO, X.; FERREIRA, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v.83, p. 195–213, 2002.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção da Pecuária Municipal 2010**. Disponível em<<http://www.ibge.gov.br/home/download/estatistica.shtm>>. Acesso: 10 out. 2012.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agropecuário 2006**. Disponível em:<<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/agropecuaria/censoagro/default.shtm>>. Acesso: 10 jul. 2011.
- MACEDO, M.C.M. Pastagens no ecossistema Cerrado: evolução das pesquisas para o desenvolvimento sustentável. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 42. Goiânia, GO, 25-28 julho 2005. **Anais...**Brasília: SBZ, 2005, p.56-84.
- MARTHA JÚNIOR, G. B.; VILELA, L. **Pastagens no Cerrado: baixa produtividade pelo uso limitado de fertilizantes**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2002, 30p. (Documentos, 50.).
- MARTINELLI, L.A.; FILOSO, S. Expansion of sugarcane ethanol production in Brazil:

- Environmental and social challenges. **Ecological Applications**, 18, 885–898, 2008.
- MENDES, E. P. P. Ocupação e produção no Cerrado Goiano: do século XVIII ao XX. In: SIMPÓSIO NACIONAL CERRADO, 9. Brasília, DF, 12-17 outubro 2008. **Anais...** Brasília: Embrapa Cerrados, 2008, 17p.
- MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Mapa de cobertura vegetal dos biomas brasileiros**. 2007. Disponível em: <<http://mapas.mma.gov.br/mapas/aplic/probio/datadownload.htm>> Acesso: 08 jul. 2010.
- MYERS, N.; MITTERMEIER, R.A.; MITTERMEIER, C.G.; FONSECA, G.A.B.; KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v.403, p. 853-858, 2000.
- OLIVEIRA, O.C.; OLIVEIRA, I.P.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R.M. Chemical land biological indicators of decline/degradation of Brachiaria pastures in the Brazilian Cerrado. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.103, p.289-300, 2004.
- PARENTE, L.L.; MEDEIROS, L.C.; FERREIRA, L.G.; FERREIRA, M. E. Uma Plataforma de Pesquisa para o Cerrado: Disseminando e Promovendo Dados e Conhecimento Científico sobre um Bioma Ameaçado. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16. Foz do Iguaçu, PR, 13-18 abril 2013. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013, 8p.
- ROCHA, G.F.; FERREIRA, L.G.; FERREIRA, N.C. FERREIRA, M.E. Detecção de desmatamentos no bioma cerrado entre 2002 e 2009: padrões, tendências e impactos. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 63 (03), p. 341-349, 2011.
- SANO, E.E.; BARCELLOS, A.O.; BEZERRA, H.S. Assessing the spatial distribution of cultivated pastures in the Brazilian savanna. **Pasturas Tropicales**, v. 22, p. 2–15, 2000.
- SANO, E. E.; ROSA, R.; BRITO, J. L.S.; FERREIRA, L. G. Land cover mapping of the tropical savanna region in Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.166, p.113-124, 2010.
- SAWYER, D. Climate change, biofuels and eco-social impacts in the Brazilian Amazon and Cerrado. **Philos. Trans. Roy. Soc. Biol. Sci.**, 363, 1747–1752, 2008.
- SCARAMUZZA, C.A.; MACHADO, R.B.; RODRIGUES, S.T., RAMOS NETO, M.B.; PINAGÉ, E.R.; DINIZ FILHO, J.A.F. Áreas prioritárias para a conservação da biodiversidade em Goiás. In: Ferreira, L.G. (Ed.). **A encruzilhada socioambiental: Biodiversidade, economia e sustentabilidade no Cerrado**. Goiânia, GO: Editora da Universidade Federal de Goiás, 13-66, 2008.
- SPAROVEK, G.; BERNDEN, G.; BARRETO, A.G.O.P.; KLUG, I.L.F. The revision of the Brazilian Forest Act: increased deforestation or a historic step towards balancing agricultural development and nature conservation?. **Environmental Science & Policy**, v. 16, p. 65-72, 2012.