

DEGRADAÇÃO AMBIENTAL E CRESCIMENTO ECONÔMICO: A CURVA DE KUZNETS AMBIENTAL PARA O CERRADO

Maria Virgínia da Silva Colusso¹

José Luiz Parré²

Eduardo Almeida³

RESUMO - O estudo tem como objetivo verificar a existência de relação entre degradação ambiental e crescimento econômico, sob a hipótese da Curva de Kuznets Ambiental, para o Cerrado brasileiro no ano de 2008. Para tanto, definiu-se como variável dependente do modelo testado a área de Cerrado desmatada dos municípios que constituem o bioma e como variáveis explicativas o PIB *per capita* e sua forma quadrática e cúbica, a densidade demográfica, a área plantada e o efetivo dos rebanhos bovinos. Visto que a localização geográfica é um fator bastante relevante para a economia ambiental, optou-se por considerar os efeitos espaciais. Assim, o tratamento dos dados deu-se por meio da análise exploratória de dados espaciais e estimação do modelo pelos métodos de mínimos quadrados ordinários (sem efeitos espaciais) e com efeitos espaciais como: modelo de defasagem espacial, de erro, Durbin espacial (de defasagem e do erro) e regressivo cruzado espacial. Os resultados obtidos corroboram a hipótese do “U” invertido nos modelos de defasagem e erro espacial. Uma vez obtidos tais resultados, incluiu-se na análise a forma cúbica da variável PIB *per capita*. Sendo assim, reestimaram-se os modelos de defasagem espacial e de erro espacial, visto que esses apresentaram o melhor ajustamento dos dados de acordo com a hipótese da CKA. Os resultados encontrados apresentaram o retorno do crescimento do desmatamento frente ao aumento continuado da renda, corroborando assim para uma CKA em forma de “N”.

Palavras-chave: Cerrado, Curva de Kuznets Ambiental, crescimento econômico, desmatamento, econometria espacial.

ABSTRACT - The essay aims to verify the relationship between environmental degradation and economic growth, based on the Environmental Kuznets Curve hypothesis for the Brazilian Cerrado in 2008. The deforested area of the municipalities' Cerrado was defined as dependent variable of the tested model and as explanatory variables the GDP *per capita* and its quadratic form, population density, the planted area and the cattle. Since geographic location is a highly relevant factor to environmental economics, it was decided to consider its spatial effects, therefore spatial econometric methods were used. Thus, the analysis is done through exploratory analysis of spatial data and then the EKC model is estimated by the ordinary least squares method (without consider spatial effects) and models with spatial effects such as spatial lag model, spatial error model, spatial Durbin model (lag and error) and spatial cross-regressive model. The results support the hypothesis of the inverted “U” in cases of the spatial lag and spatial error models. Once these results that were observed, a cubic form of the per capita GDP was insert and tested to observe if deforestation turns to increase during time while income continuous to grow. The results pointed to an EKC in shape of a “N”.

Key-words: Cerrado, deforestation, economic growth, Environmental Kuznets Curve, spatial econometrics.

Área 10 – Economia Agrícola e do Meio Ambiente

Código JEL: C21, Q23, Q56

¹ Universidade Estadual de Maringá

² Universidade Estadual de Maringá

³ Universidade Federal de Juiz de Fora

1 INTRODUÇÃO

Por muito tempo prevaleceu a ideia de que a economia se tratava de um sistema isolado, relegando a um segundo plano as interações com o meio ambiente, o qual deve ser tratado como fonte de sustentação do sistema econômico. Segundo Mueller (2007):

É como se o sistema econômico pudesse operar sem intercambiar matéria e energia com seu meio externo; ou como se o meio ambiente fosse uma cornucópia abundante de recursos naturais e um depósito ilimitado para os resíduos e rejeitos do sistema econômico. (Mueller, 2007, p. 12)

De acordo com Andrade e Romeiro (2011), a preocupação com a limitação dos recursos naturais como obstáculo a expansão da produção já era encontrada nos modelos de crescimento dos economistas clássicos (como Smith, Ricardo e Mill). Ainda, com o advento da escola neoclássica passa-se a ter uma relativização na limitação desses fatores produtivos, uma vez que acreditava que o progresso tecnológico traria uma solução. Porém, essas preocupações residiam na limitação dos recursos naturais como entrave ao crescimento econômico, e não nas consequências que a degradação ambiental traria não somente para o bem estar dos seres que dependem do meio natural.

Mueller (2007) afirma que esse modo de enxergar as relações entre economia e meio ambiente perdurou até fins dos anos 1960, começando a ser invertido devido a fatores como a expansão produtiva do pós-II Guerra, os choques do petróleo e a publicação da projeção do Clube de Roma, em 1972. Observa-se que o tema em questão deixa de ser assunto tratado somente por biólogos ou ambientalistas e começa a se tornar uma preocupação geral, inclusive de economistas. Explicitada a necessidade de a ciência econômica “teorizar” a interação do sistema econômico com o meio ambiente, surgem duas vertentes na pesquisa da economia do meio ambiente: a economia ambiental e a economia ecológica. Dessa forma, realiza-se uma ligação importante entre o meio ambiente e economia:

No passado, nos preocupamos com os impactos do crescimento econômico sobre o meio ambiente. Agora temos que nos preocupar com os impactos do desgaste ecológico – degradação de solos, regimes hídricos, atmosfera e florestas – sobre nossas perspectivas econômicas. (...) A ecologia e a economia estão cada vez mais entrelaçadas – em âmbito local, regional, nacional e mundial – numa rede inteiriça de causas e efeitos. (CMMAD, 1988, p.5).

Das discussões sobre causalidade e efeito sobre problemas ambientais e crescimento econômico, surgem diversas tentativas na pesquisa econômica de se abordar a questão. Dentre elas, se encontra a hipótese da Curva de Kuznets Ambiental. A hipótese da CKA sugere que, inicialmente, conforme a renda aumenta, eleva-se também a degradação ambiental até atingir o ponto máximo e que, a partir deste ponto, o aumento da renda é observado simultaneamente ao decréscimo da degradação ambiental, formando uma curva em “U” invertido. Tal hipótese já foi testada empiricamente por diversos autores, tentando aplicá-la em âmbito mundial ou para regiões menores, testando também sua validade para diferentes agentes causadores de degradação, como tipos variados de poluentes do ar, desmatamento, erosão de solos, etc.

O presente estudo tem como proposta dar continuidade à pesquisa acerca desse tema, tendo como objetivo principal verificar a existência de relação entre degradação ambiental (desmatamento) e crescimento econômico (PIB), sob a hipótese da Curva de Kuznets Ambiental, para o Cerrado brasileiro no ano de 2008. Para tanto, alguns objetivos específicos foram realizados, tais como: caracterizou-se o bioma Cerrado, região foco desse estudo, sob o ponto de vista tanto dos aspectos geográficos e ambientais quanto dos socioeconômicos; buscou-se na literatura acerca do tema a fundamentação para a hipótese testada; construiu-se o mapa do bioma Cerrado a partir do mapa do Brasil disponibilizado pelo IBGE, realizou-se a Análise Exploratória de Dados Espaciais, a fim de se observar as primeiras estatísticas referentes aos dados coletados; estimaram-se regressões

tanto pelo método dos Mínimos Quadrados Ordinários quanto por métodos que levam em consideração efeitos espaciais.

Delimitou-se a análise ao bioma cerrado pela sua importância ecológica, econômica e pela constatada desatenção dedicada a este, traduzida em escassez de pesquisas dedicadas ao Cerrado, em comparação aos outros biomas brasileiros. Assim como explicitado por Marouelli (2003, p. 11), “apesar de sua incontestável importância, é nítido o contraste entre o papel decisivo dos cerrados na manutenção dos grandes equilíbrios biogeoquímicos planetários e o valor secundário que lhe é atribuído pela opinião pública no Brasil e no exterior”. Assim, acredita-se que a contribuição do estudo é, não apenas para o debate acadêmico e o conhecimento científico acerca do tema levantado, mas também para a sociedade como um todo por ser o assunto tratado de relevante interesse comum.

O presente estudo divide-se em 5 partes, sendo o primeiro deles esta introdução. A seção 2 trata-se de uma revisão de literatura acerca da Curva de Kuznets Ambiental sob duas formas: os aspectos teóricos e os aspectos empíricos. A seção 3 discute a metodologia abordada, os procedimentos metodológicos que serão utilizados como ferramentas no presente trabalho. A seção 4 apresenta os resultados encontrados e a análise destes. e por último, a seção 5 fecha o estudo trazendo conclusões derivadas dos resultados analisados.

2 A CURVA DE KUZNETS AMBIENTAL

2.1 ASPECTOS TEÓRICOS

Em decorrência da limitação dos recursos naturais disponíveis e da capacidade do meio ambiente de absorver os resíduos produzidos pela sociedade, percebeu-se a insustentabilidade da produção material crescente e contínua. Com base nesse pensamento, afirma Mueller (2007), que se formou ao longo dos anos 1970 a ideia da existência de uma relação direta entre a degradação ambiental e o nível de produção. A possibilidade de “compatibilização” entre produção e proteção ambiental surge da ideia de desenvolvimento sustentável que, dentre as diversas definições encontradas na literatura, é mais usualmente conceituado como “aquele capaz de satisfazer as necessidades da geração atual sem comprometer a capacidade das gerações futuras satisfazerem as suas próprias” (CMMAD, 1988, p.46), tal como no relatório “Nosso Futuro Comum”. Dessa forma, surge o seguinte questionamento: *Can economic growth be part of the solution rather than the cause of environmental problems?* (ROTHMAN; DE BRUYN, 1998, p. 143). Surge, assim, a hipótese do “U” invertido ambiental, isto é, a Curva Kuznets Ambiental (CKA). Tal hipótese afirmava que:

em um país subdesenvolvido cuja renda *per capita* aumenta consistentemente, um emprego de quantidades crescentes de energia e materiais conduz a uma degradação ambiental – registrada por certos indicadores – cada vez maior. Mas isso aconteceria até certo nível de renda *per capita*. Se a Y/P [razão entre produto Y e a população P , resultando na renda *per capita*] desse país continuar a crescer, cedo ou tarde será atingido um nível de renda *per capita* após o qual aumentos posteriores nesse indicador de desenvolvimento trariam reduções na magnitude dos indicadores de degradação ambiental. (MUELLER, 2007, p. 62)

Infere-se de Carvalho e Almeida (2010) que aumentos na produção gerariam níveis de poluição (degradação) ambiental maiores, uma vez que num primeiro momento o país colocaria como prioridade o seu desenvolvimento e não o controle da qualidade da natureza. Posteriormente, quando este teria atingido determinado nível de crescimento, suas prioridades mudariam e com elas se observaria a redução da degradação ambiental. Essa transição denotaria a curva em forma de “U” invertido.

A CKA seria resultado de três efeitos, de acordo com Borghesi (2002, apud MUELLER, 2007): o efeito escala, o efeito composição e o efeito mudança tecnológica. O efeito escala seria a consequência de que quanto maior a escala de produção de uma economia, maior é também a emissão de resíduos poluentes deste. O efeito composição faz referência à estrutura do processo produtivo, isto é, uma economia cujo setor de serviços ocupe a maior parcela do seu Produto Interno Bruto (PIB) poderia ser considerada uma economia mais “limpa”. Mueller (2007) afirma ainda que o efeito composição agiria no sentido inverso ao efeito escala. E o efeito mudança tecnológica é a tendência a progredir para tecnologias mais eficientes e, de certa forma, mais “limpas”. Segundo Mueller (2007), o efeito escala seria predominante em estágios iniciais de desenvolvimento e que posteriormente, com níveis maiores de desenvolvimento, se atribuiria pesos maiores aos efeitos composição e mudança tecnológica.

Rothman e de Bruyn (1998) afirmam que as evidências da existência de tal relação acabaram por gerar interpretações equivocadas que sugeriam que somente mediante crescimento econômico é que políticas ambientais efetivas poderiam ser implementadas. Segundo os autores:

The presumption of income determinism hampers a fuller understanding of the factors underlying the changes in environment-income relationships and can result in naive conclusions about the role of economic growth in reducing environmental pressure (ROTHMAN; DE BRUYN, 1998, p. 144).

Desse modo, os autores mostram que o modo mais propício de se ver a CKA é como uma hipótese e não como relação determinística (em que maiores níveis de renda seriam determinantes para que houvesse redução da degradação ambiental). Com isso, os mesmos autores concluem que não se pode dizer que a hipótese foi confirmada ou rejeitada e que os estudos empíricos sobre esta apenas mostram diferentes abordagens, deficiências e sugestões de como superar tais deficiências, como, por exemplo, testando diferentes poluentes ou indicadores de degradação, adicionando outras variáveis explicativas ou aplicando-a a diferentes regiões. Assim, o modelo econométrico básico para se testar estatisticamente a CKA é dado por:

$$IDA_t = \alpha_0 + \alpha_1 Y_t + \alpha_2 Y_t^2 + u_t \quad (1)$$

em que a variável dependente é o Indicador de Degradação Ambiental (IDA) e as variáveis explicativas são o PIB per capita (Y) e suas formas quadrática. Ressalta-se que t é o período em análise e u_t o termo de erro.

Porém, alguns autores defendem que a CKA não se sustentaria no longo prazo, sendo seu formato de “U” invertido apenas um estágio inicial desta relação. Logo, a degradação tornaria a aumentar mesmo em níveis mais elevados de desenvolvimento econômico, caracterizando o formato da CKA similar ao de um “N” (CARVALHO; ALMEIDA, 2010). Para captar tal efeito, introduz-se a forma cúbica da variável PIB per capita, passando o modelo econométrico a ser apresentado como:

$$IDA_t = \alpha_0 + \alpha_1 Y_t + \alpha_2 Y_t^2 + \alpha_3 Y_t^3 + u_t \quad (2)$$

2.2 ASPECTOS EMPÍRICOS

Os trabalhos empíricos acerca da relação entre degradação ambiental nas suas diversas formas e crescimento econômico remontam ao pioneiro artigo de Grossman e Krueger de 1991 intitulado “*Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement*”. A motivação dos autores foram os questionamentos de grupos ambientalistas sobre as pressões ambientais após a formação do bloco de livre comércio – NAFTA – uma vez que, com a liberalização comercial entre os países membros, a produção se expandiria. Os autores reconhecem que alguns poluentes são subprodutos da atividade econômica e que, dada a expansão dessa, a tendência é a emissão desses poluentes também aumentar. Por outro lado, eles também acreditam que: *As a society becomes*

richer its members may intensify their demands for a more healthy and sustainable environment, in which case the government may be called upon to impose more stringent environmental controls. (GROSSMAN; KRUEGER, 1991, p. 7)

Grossman e Krueger (1991) relacionam a qualidade do ar com o crescimento econômico. Os autores identificam três poluentes atmosféricos – SO₂, partículas em suspensão (“gravimetric and nephelometric methods”) e matéria escura (“smoke-shade method”) – com o Produto Interno Bruto *per capita* (em suas formas quadrática e cúbica). Outras variáveis explicativas foram incluídas no modelo. Na equação de concentração de SO₂ foi incluída uma variável *dummy* para localização dentro da cidade (se zona central ou subúrbio) e outra para o uso da terra perto do local de teste (se industrial, comercial ou residencial), acrescentou-se também uma variável *dummy* para o método de medição e outra indicando a localização da cidade (se em zona costeira ou não), e foi adicionada também uma linha de tendência temporal na análise. Nas equações para partículas suspensas e matéria escura variáveis explicativas similares foram adicionadas (com exceção da variável *dummy* do método para monitoramento de matéria escura, que foi retirada da regressão), além de uma *dummy* indicando se o local de mensuração está a 100 milhas de um deserto (“*since dust is an important natural source of particulate matter*”).

Os resultados encontrados pelos autores indicam a presença de relação do tipo Curva de Kuznets Ambiental (posteriormente assim denominada) nas análises feitas, isto é, aumentava-se a emissão de poluentes atmosféricos até o ponto de máximo em que o contínuo crescimento econômico as fazia decrescer (configurando assim a curva em forma de “U” invertido). A exceção foram os coeficientes estimados para partículas suspensas pelo modelo de efeitos fixos, que revelaram um relação linear monotônica crescente entre o poluente e o crescimento do PIB.

O resumo da análise da literatura que trata de estudos empíricos acerca da Curva de Kuznets Ambiental encontra-se disposto no Quadro 1. O que se observa é a grande quantidade de trabalhos empíricos sobre a CKA relacionando o crescimento econômico com a emissão de gases poluentes atmosféricos (como CO₂ e outros gases) – o que se deve, muito provavelmente, ao fato de essa se tratar da relação original feita no trabalho pioneiro de Grossman e Krueger (1991) – e a pouca quantidade de trabalhos que consideram o desmatamento de florestas como variável de interesse. Tal escassez reforça a necessidade de maior investigação empírica da questão e incentiva a pesquisa desse presente estudo a averiguar a relação entre o desmatamento do bioma Cerrado e o crescimento da região em que ele se encontra.

Autor(es)	Variável dependente	Variáveis explicativas	Período	Região	Tipo de dados	Conclusões
de Bruyn et al. (1998)	Emissão de CO ₂ , NO _x e SO ₂	PIB <i>per capita</i> e índice de preços da energia	1960 e 1993	Holanda, UK, USA e Alemanha Ocidental	painel de dados	Somente para o caso da emissão de SO ₂ da Holanda é que não se constatou relação entre a emissão e o crescimento econômico.
Rupasingha et al. (2004)	Lançamento de lixo tóxico per capita em libras (à água, ao ar, à terra e o total)	PIB <i>per capita</i> e sua forma quadrática, densidade populacional, o percentual de empregados na manufatura, o percentual da população com 25 anos ou mais com ensino médio cursado, a diversidade étnica, desigualdade da renda e variáveis <i>dummy</i> (uma para condados rurais e outra para condados urbanos)	1997	condados dos USA	<i>cross-section</i>	Verificou-se relação do tipo CKA para todos os modelos espaciais apresentados. Com a inclusão do termo cúbico do PIB per capita configurou-se assim formato de “N”.
McPherson e Nieswiadomy (2005)	Percentual de espécies de aves e mamíferos ameaçadas	PIB <i>per capita</i> e sua forma quadrática, percentual de mamíferos endêmicos, percentual de aves endêmicas, <i>dummy</i> para espécies habitantes em ilhas, densidade populacional, direitos políticos e liberdades civis, demonstrações antigovernamentais, <i>dummy</i> para direito civil, <i>dummy</i> para lei comum, <i>dummy</i> para lei comunista e <i>dummy</i> para lei muçulmana	2000	113 países	<i>cross-section</i>	Resultados corroboram para a existência de uma curva em formato de “U” invertido (CKA) tanto para mamíferos quanto para aves.
Arraes et al. (2006)	Proporção da população sem abastecimento de água e sem acesso à rede sanitária, déficit na expectativa de vida em relação ao ideal, déficit na alfabetização de adultos em relação ao ideal, emissão de CO ₂ <i>per capita</i> e taxa de mortalidade	PIB <i>per capita</i> (e suas formas quadrática e cúbica) e uma variável <i>dummy</i> regional	1980 a 2000		dados em painel	Os resultados foram satisfatórios somente para as variáveis dependentes CO ₂ e taxa de mortalidade.
Culas (2007)	Taxa de desmatamento	PIB <i>per capita</i> e sua forma quadrática, densidade populacional, índice da aplicabilidade dos contratos dos governos, área absoluta de floresta, a proporção de área de floresta, índice da produção agrícola, percentual de PIB, índice de preços de produtos	1972 a 1994	14 países da América Latina, Ásia e África	dados em painel	Os resultados para a América Latina corroboram a hipótese da CKA em forma de “U” invertido. Já para a Ásia e África o modelo não se mostrou estatisticamente

		exportados, índice do preço da madeira para exportação e uma tendência temporal				significativo.
Bagliani et al. (2008)	Pegada ecológica (e seus componentes energéticos e não energéticos)	PIB <i>per capita</i> e suas formas quadrática e cúbica	2001	141 países	cross-section	Não se chega a uma curva em forma de “U” invertido quando se relaciona tais variáveis.
Brajer et al. (2008)	Emissão de SO ₂	PIB <i>per capita</i> e suas formas quadrática e cúbica, densidade populacional, dummy para cidades do Norte e dummy para cidades na região costeira	1990 a 2004	cidades da China	painel de dados	Todos os modelos testados apresentaram a CKA (tanto em forma em “U” invertido quanto em forma de “N”).
Cunha (2008)	Emissão de CO ₂	PIB <i>per capita</i> e suas formas quadrática e cúbica	1980 a 2004	Brasil	série temporal	Confirmou-se a hipótese da CKA.
Managi e Jena (2008)	Índice da produtividade ambiental	PIB <i>per capita</i> e sua forma quadrática, densidade populacional, índice da urbanização e índice da educação	1991 a 2002	16 estados da Índia	dados em painel	Verificou-se a hipótese da CKA.
Oliveira et al. (2009)	Desmatamento	PIB <i>per capita</i> e suas formas quadrática e cúbica, rebanho bovino, área plantada de soja e cana-de-açúcar, extração de madeira, extração vegetal de produtos não madeireiros, silvicultura, densidade populacional, crédito rural e área de floresta.	2001 a 2006	Amazônia Legal	dados em painel	O modelo base não apresentou a forma em “U” invertido para nenhuma das formas testadas. O modelo de erro espacial com transbordamentos espaciais apresentou CKA em forma de “N”.
Parrilla (2009)	Gases de efeito estufa, NO _x , CO, CO ₂ , SO e partículas menores que 10µm	PIB <i>per capita</i> e suas formas quadrática	1992 a 2003	Europa (23 países)	série temporal	As evidências encontradas pelo autor corroboram a hipótese da CKA.
Carvalho e Almeida (2010)	Emissão de CO ₂	PIB <i>per capita</i> e sua forma quadrática e cúbica, exportações <i>per capita</i> , consumo de energia <i>per capita</i> e <i>dummy</i> para países que ratificaram o Protocolo de Kyoto	2004	187 países	cross-section	Configurou-se a CKA em forma de “U” invertido e, posteriormente, em forma de “N” ao adicionar a variável PIB <i>per capita</i> ao cubo.

Quadro 1: Relação dos estudos empíricos sobre a CKA.

Fonte: elaboração própria.

3 METODOLOGIA

3.1 A ANÁLISE ESPACIAL

Para a economia ecológica, a localização geográfica é um fator bastante relevante, uma vez que a distribuição geográfica interfere no fenômeno em análise. Assim, optou-se por considerar os efeitos espaciais também no presente estudo, utilizando-se, para tanto, o instrumental da econometria espacial. Anselin (1999, p. 1) define econometria espacial da seguinte forma: *spatial econometrics is a subfield of econometrics that deals with the treatment of spatial interaction (spatial autocorrelation) and spatial structure (spatial heterogeneity) in regression models*. Dessa forma, se pode afirmar que considerar os efeitos espaciais na especificação de modelos é de grande importância uma vez que métodos econométricos “tradicionais” são limitados quanto a capacidade de controlar tais efeitos espaciais.

3.1.1 Matriz de pesos espaciais

LeSage (1998) considera a importância da distância para a dependência espacial (teorema da ciência regional), isto é, de que observações mais próximas entre si apresentam maior grau de dependência espacial, e expõe o conceito de vizinhança na econometria espacial, assim como a necessidade de se levar em consideração tal proximidade. O autor afirma que uma segunda informação relevante sobre a localização das observações é a contiguidade, isto é, a posição relativa da observação no espaço em relação às demais observações, permitindo assim determinar quem são considerados vizinhos. Uma maneira de quantificar tal contiguidade pode ser por meio da atribuição de um peso espacial.

Para que seja possível a estimação de parâmetros e a verificação do grau de interação entre as variáveis em análise, define-se um arranjo para as interações espaciais conhecido como matriz de pesos espaciais. Há vários tipos de matrizes de pesos espaciais, como as baseadas na contiguidade (com convenção do tipo rainha – *queen* – ou torre – *rook*), na distância (ou a inversa dela), em um número determinado k de vizinhos, entre outras. A escolha da matriz de pesos espaciais deve ser compatível com as características do fenômeno que está sendo estudado. Mas caso ainda assim permaneçam dúvidas sobre qual matriz usar, Almeida (2004) afirma que se pode adotar o seguinte procedimento: para uma mesma especificação do modelo, usar um conjunto de matrizes de pesos espaciais, estimar a regressão com estas e escolher a matriz que apresentar o mais alto valor da função de máxima verossimilhança na regressão.

3.1.2 Análise Exploratória de Dados Espaciais

Como auxílio na identificação do modelo econométrico espacial apropriado, realiza-se primeiramente a Análise Exploratória de Dados Espaciais (AEDE). Almeida (2004, p. 1) define a AEDE como uma “coleção de técnicas para a análise estatística de informação geográfica, com o intuito de descobrir padrões espaciais nos dados e para sugerir hipóteses, mas impondo a menor estrutura possível”. O autor adverte que a AEDE é mais apropriada para a análise de variáveis espacialmente densas, isto é, dividindo-as por algum indicador de intensidade como, por exemplo, per capita, por área, etc, pois assim elas estariam levando em conta externalidades relevantes ao fenômeno estudado.

É possível distinguir dois efeitos espaciais: a dependência (ou autocorrelação espacial) e a heterogeneidade espacial. Quanto à definição de dependência espacial, LeSage (1998, p. 3) afirma que: *spatial dependence in a collection of sample data observations refers to the fact that one*

observation associated with a location which we might label i depends on other observations at locations $j \neq i$. Ou ainda, na definição mais simplificada de Anselin (1999, p. 4): *the coincidence of value similarity with location similarity.* A ocorrência do segundo efeito, a heterogeneidade espacial, se dá devido ao fato de fenômenos espaciais não apresentarem estabilidade estrutural (como coeficientes variáveis, variância não constante ou ainda formas funcionais diferentes para determinados subconjuntos de dados). Consequentemente, dificulta-se o ajustamento de um mesmo modelo teórico para todo e qualquer conjunto de dados, acarretando em perda de eficiência ou até mesmo estimativas viesadas (Almeida, 2004). Na definição de LeSage (1998, p. 6): *the term spatial heterogeneity refers to variation in relationships over space. In the most general case consider that we might expect a different relationship to hold for every point in space.*

Inicialmente, verifica-se a aleatoriedade ou não (dependência) espacial dos dados. Para se averiguar a existência de dependência (autocorrelação) espacial, algumas estatísticas de teste cumprem essa função, como as estatísticas I de Moran, c de Geary e G de Getis-Ord. Tais estatísticas de teste supõe como hipótese nula a aleatoriedade espacial, isto é, que o fenômeno em estudo não dependeria da sua localização (ALMEIDA, 2004). Apesar da existência de mais de uma medida de dependência espacial (como as estatísticas c de Geary e G de Getis-Ord), optou-se por utilizar nesse estudo apenas a estatística I de Moran, por ser essa a medida mais usual, não se incorrendo assim em prejuízo aos resultados obtidos tendo em vista a semelhança da finalidade das demais medidas em comparação a essa.

Visto que tanto a ausência quanto à forte presença de autocorrelação global podem ocultar associações espaciais locais, como *clusters* ou *outliers* espaciais, alguns autores propuseram algumas formas de solucionar tal problema. Anselin (1995, apud ALMEIDA, 2004) propôs um novo indicador capaz de capturar padrões locais de associação linear, que chamou de I de Moran local. Dessa forma, Almeida (2004, p. 10) define que “o I local provê uma indicação do grau de agrupamento dos valores similares em torno de uma determinada observação, identificando *clusters* espaciais, estatisticamente significantes”.

Assim como se calcula o I de Moran (global) multivariado, é possível calcular também o I de Moran local multivariado a fim de se obter uma medida da autocorrelação espacial local multivariada (ALMEIDA, 2004), fornecendo o grau de associação linear entre uma variável em uma dada localidade e a média de uma outra variável em regiões vizinhas.

De acordo com a dispersão dos valores obtidos de Moran, pode-se verificar a formação de *clusters* (agrupamentos) espaciais. Definem-se quatro tipos desses agrupamentos de associação linear espacial: Alto-Alto (AA), tipo de agrupamento em que a variável de interesse apresenta valor alto e encontra-se cercada por regiões apresentando valores também altos; Baixo-Baixo (BB), em que regiões apresentando valores baixos encontram-se rodeadas por outras também de valores baixos; Alto-Baixo (AB), no qual uma localização espacial que apresenta um valor alto da sua variável de interesse é rodeada por regiões que apresentam valores baixos; e Baixo-Alto (BA), em que uma unidade espacial com baixo valor da variável de interesse é circundada por regiões com valores altos. Ressalta-se ainda que tal análise de dispersão é válida tanto para a estatística I de Moran univariada quanto para a multivariada. Um relevante problema sobre o mapa de dispersão de Moran ressaltado por Almeida (2004) é que ele exibe tanto *clusters* estatisticamente significantes quanto os que não o são. A solução apresentada para este problema seria combinar o mapa de dispersão de Moran com o mapa de significância dos valores obtidos de associação local, apresentando, assim, somente *clusters* estatisticamente significantes.

3.2 MODELOS ECONOMETRÍCOS ESPACIAIS

Após realizar a AEDE, desenvolve-se a modelagem econométrica espacial. A proposta é estimar o modelo da CKA exposto utilizando-se seis diferentes métodos, a saber: (0) modelo sem correção para dependência espacial (estimação por Mínimos Quadrados Ordinários), (1) modelo de defasagem espacial, (2) modelo de erro espacial, (3) modelo regressivo cruzado espacial, (4) modelo de Durbin espacial e (5) modelo de Durbin espacial do erro.

O modelo de defasagem espacial ou *Spatial Autoregressive Model* (SAR) incorpora um coeficiente autorregressivo espacial a fim de captar o efeito de “vizinhança” do fenômeno em estudo, que captaria a forma como um fenômeno seria espreado pelas regiões próximas. O modelo pode ser expresso como:

$$y = \rho Wy + X\beta + \varepsilon \quad (3)$$

onde y é o vetor $n \times 1$ de variáveis dependentes; ρ é o coeficiente autorregressivo espacial (um escalar); Wy o vetor $n \times 1$ de defasagens espaciais para as variáveis dependentes; X é a matriz $n \times k$ de variáveis explicativas; β é o vetor $k \times 1$ de coeficientes de regressão e ε o vetor $n \times 1$ de erros aleatórios (ALMEIDA, 2004).

O modelo com erro autorregressivo espacial expressa no termo de erro aqueles efeitos que não podem ser modelados. Dessa forma, os efeitos espaciais nesse modelo se apresentam apenas no termo de erro da regressão, podendo ser interpretado da seguinte forma:

O significado intuitivo desse modelo é que o padrão espacial manifestado no termo de erro é dado por efeitos não modelados por conta da falta de adequada medida, que, por sua vez, não são distribuídos aleatoriamente no espaço, mas, ao contrário, estão espacialmente autocorrelacionados. Almeida (2004, p. 6).

Assim, o modelo proposto pioneiramente por Whittle (1954, apud ALMEIDA, 2004), pode ser expresso da seguinte forma:

$$y = X\beta + \lambda Wu + \varepsilon \quad (4)$$

onde λ , o parâmetro do erro autorregressivo espacial, $\lambda < 1$.

No modelo regressivo cruzado espacial se supõe que algumas ou até mesmo todas as variáveis explicativas tenham seus efeitos espreados para regiões vizinhas, além de apresentar uma defasagem espacial para a variável dependente. O modelo é expresso da seguinte forma:

$$y = X\beta + WX\tau + \varepsilon \quad (5)$$

na qual τ expressa o efeito transbordamento.

O modelo de Durbin espacial (ou “do fator comum”), derivado do modelo de erro autorregressivo espacial de primeira ordem, incorpora a ideia de transbordamento a partir da defasagem das variáveis independentes (WX) e também pela inclusão de uma variável endógena defasada espacialmente (Wy). Expressa-se este modelo conforme a especificação a seguir:

$$y = \lambda Wy + X\beta - \lambda WX\beta + \varepsilon \quad (6)$$

O modelo misto com defasagem espacial e erro autorregressivo espacial incorpora tanto o coeficiente de defasagem espacial (ρ) quanto parâmetro do termo de erro autorregressivo (λ). O modelo é expresso como:

$$y = \rho W_1 y + X\beta + \lambda W_2 u + \varepsilon \quad (7)$$

3.3 MODELO EMPÍRICO

3.3.1 Descrição das variáveis

A amostra utilizada tratou dos 1306 municípios que apresentam área de Cerrado no Brasil de acordo o Relatório Técnico de Monitoramento do Desmatamento no Bioma Cerrado do IBAMA de 2009, de onde foram retirados os dados referentes ao desmatamento do bioma. A análise econométrica espacial foi feita sob a forma de *cross-section* para o ano de 2008 devido à limitação de dados de desmatamento para os municípios do bioma, impossibilitando que a análise fosse mais abrangente sob o aspecto temporal. Os demais dados analisados foram o PIB per capita, a densidade demográfica, a área plantada (tanto de lavoura permanente quanto de lavoura temporária) e o rebanho bovino.

Neste estudo, definiu-se como variável dependente a área de desmatamento dos municípios que compõem o bioma Cerrado (DSMT). As variáveis explicativas básicas do modelo CKA são o PIB per capita (Y), sua forma quadrática (Y^2) e sua forma cúbica (Y^3). Definiram-se como variáveis explicativas adicionais a densidade demográfica (DEMOG), a área plantada e o efetivo dos rebanhos bovinos. O Quadro 5 apresenta o resumo das variáveis utilizadas no modelo, a descrição destas, o sinal esperado e a fonte das quais os dados foram coletados.

Variável	Descrição	Sinal esperado	Fonte
DESMAT _i	Área de Cerrado desmatada, como proxy para degradação ambiental.		IBAMA
Y _i	PIB <i>per capita</i> .	+	elaboração própria, com base em dados fornecidos pelo SIDRA/IBGE e IPEADATA.
Y _i ²	PIB <i>per capita</i> elevado ao quadrado.	-	calculado a partir da variável Y _i .
Y _i ³	PIB <i>per capita</i> elevado ao cubo.	+ ou nulo	calculado a partir da variável Y _i .
DEMOG	Densidade demográfica (razão do número de habitantes por área total do município em km ²)	+	elaboração própria, com base em dados fornecidos pelo SIDRA/IBGE e Ipeadata.
AREAPLANT	Área plantada total (em km ²), intensificada pela área total do município.	+	elaboração própria, com base em dados fornecidos pelo SIDRA/IBGE
REBANHO	Rebanho bovino (número de cabeças), intensificada pela área total do município.	+	elaboração própria, com base em dados fornecidos pelo SIDRA/IBGE

Quadro 2: Apresentação das variáveis do estudo.

Fonte: elaboração própria.

3.3.1.1 Desmatamento

A área de desmatamento dos municípios que compõem o Cerrado (DSMT), definida como variável dependente neste estudo, encontra-se disponibilizada no Relatório Técnico de Monitoramento do Desmatamento no Bioma Cerrado. É uma proxy para a variável de degradação ambiental, exigida pelo modelo da CKA. Este estudo é o resultado do monitoramento e mapeamento de áreas desmatadas no Bioma Cerrado, parte de uma cooperação técnica entre a Secretaria de Biodiversidade e Florestas do Ministério do Meio Ambiente – SBF/MMA, Diretoria

de Proteção Ambiental do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – Dipro/Ibama, Centro de Sensoriamento Remoto do Ibama – CSR, Agência Brasileira de Cooperação – ABC e Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento – PNUD (IBAMA, 2009). Utilizaram-se imagens recentes de satélites para a identificação de mudanças na cobertura vegetal nativa, tendo o Mapa de Cobertura Vegetal dos Biomas Brasileiros (ano base 2002), do Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira – Probio/MMA, como “mapa de tempo zero” para início do monitoramento (IBAMA, 2009).

Observou-se que a vegetação remanescente de Cerrado passou de 55,73% em 2002 para 51,54% em 2008. A estimativa do desmatamento ocorrido no Cerrado até o ano de 2002 era de 43,67% de área de Cerrado e entre os anos de 2002 e 2008 estima-se que foram desmatados mais 4,17% desse território. Acredita-se que o desmatamento total até o ano de 2008 do Bioma Cerrado seja de 47,84% do seu território (IBAMA, 2009). São Paulo foi o Estado com maior desmatamento do bioma, tendo deflorestado 90,2% de seu território de Cerrado. Em seguida, Mato Grosso do Sul (75,87%), Distrito Federal (70,63%), Paraná (70%), Goiás (65,11%) e Minas Gerais (56,84%). Ainda, Mato Grosso apresentou desmatamento de 42,83% de sua área de Cerrado, Bahia de 36,45%, Tocantins de 26,4%, Maranhão de 22,85%, Piauí de 15,1% e, por último, Rondônia 2,88% de Cerrado desmatado.

Apesar de sua vastidão territorial e importância biológica, o bioma Cerrado possui apenas 7,44% de sua área protegida por unidades de conservação federais, estaduais e municipais, sendo que destes somente aproximadamente 2,91% do Cerrado são protegidos na forma de unidades de proteção integral, ou seja, unidades de conservação que permitem somente o uso indireto dos recursos naturais com o mínimo possível de intervenção antrópica (IBAMA, 2009).

3.3.1.2 PIB per capita e a Densidade Demográfica

Segundo Mueller (2007, p. 38), “a evolução da degradação ambiental gerada por uma sociedade vai depender da dinâmica dos dois componentes da escala da economia (Y): o da sua população (P) e o da sua produção (material) *per capita* (Y/P)”. Ainda de acordo com o autor, “a distribuição de renda molda a demanda, o padrão de consumo, a estrutura produtiva e natureza dos resíduos lançados no meio ambiente” (MUELLER, 2007, p. 38).

Utilizou-se neste estudo o PIB *per capita* como medida da distribuição de renda (mesmo tendo-se consciência da limitação desse “indicador”), em consonância com o modelo da CKA. Quanto à população, ou melhor, quanto medida dos impactos que o tamanho da população causaria ao meio ambiente, acredita-se que a densidade demográfica (isto é, a razão entre a população do município e a área deste) represente forte agravante dos impactos causados sobre o meio ambiente. A variável PIB foi coletada no Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA/IBGE) e dividida pela população (estimativa da população municipal do ano de 2008 fornecida pelo Ipeadata) de cada município, gerando a variável PIB *per capita*. A partir dessa, calculou-se suas formas quadrática e cúbica. A variável densidade demográfica foi obtida calculando-se a razão da população de cada município (estimativa da população municipal do ano de 2008 fornecida pelo Ipeadata) pela respectiva área total do município (disponibilizada no Ipeadata).

3.3.1.3 Área plantada e efetivo do rebanho bovino

A atividade agropecuária é de suma importância na geração de empregos e renda na região, bem como no incremento da produção agrícola do país de modo geral. Apesar desses pontos positivos, a atividade representa também impactos negativos diretos sobre rios e solo, além de redução da biodiversidade e da cobertura vegetal do Cerrado (EMBRAPA CERRADOS, 2008).

As variáveis representativas da atividade agropecuária foram definidas como a área plantada total intensificada pela área do município e o efetivo do rebanho bovino intensificada pela área do município. Quanto à área plantada, foram coletados dados relativos à totalidade da lavoura permanente e da lavoura temporária dos municípios que compõem o Cerrado no SIDRA/IBGE e dividiu-se a soma destas pela respectiva área total do município, em virtude da necessidade de se intensificar a variável. A variável efetivo do rebanho bovino também foi coletada no SIDRA/IBGE e intensificada pela área total de cada município.

3.3.2 Modelo econométrico

O modelo econométrico básico para estimar a Curva de Kuznets Ambiental, tal como apresentado na seção 2.2, pode ser descrito da seguinte forma:

$$DESMAT_t = \alpha_0 + \alpha_1 Y_t + \alpha_2 Y_t^2 + u_t \quad (8)$$

A variável dependente do modelo é o desmatamento do Cerrado em km², representada pela sigla DESMAT. As variáveis explicativas básicas do modelo são o PIB per capita (Y) dos municípios do Cerrado e sua forma quadrática (Y²). Variáveis explicativas adicionais foram incorporadas à análise a fim de complementá-la, sendo estas: a densidade populacional das unidades espaciais (DPOP) dada pelo número de habitantes por km² de área de cerrado em cada município, a área plantada (PLANT) em cada município em hectares e o rebanho bovino (BOV) correspondente ao número de cabeças de gado em cada município. Logo, o modelo é representado da seguinte forma:

$$DESMAT_t = \alpha_0 + \alpha_1 Y_t + \alpha_2 Y_t^2 + \alpha_4 DPOP + \alpha_5 PLANT + \alpha_6 BOV + u_t \quad (9)$$

ou:

$$DESMAT_t = \alpha_0 + \alpha_1 Y_t + \alpha_2 Y_t^2 + Z_t \beta_k + u_t \quad (10)$$

em que Z é a matriz com k variáveis explicativas adicionais ao modelo básico da CKA. O subscrito t corresponde ao ano observado, sendo neste estudo o ano de 2008, e u é o termo de erros aleatórios. Caso a estimação do modelo descrito apresente-se estatisticamente significativo, a forma cúbica da variável PIB per capita será incluída na análise, e, assim, o novo modelo (a ser reestimado) será apresentado como:

$$DESMAT_t = \alpha_0 + \alpha_1 Y_t + \alpha_2 Y_t^2 + \alpha_3 Y_t^3 + Z_t \beta_k + u_t \quad (11)$$

Inferre-se de Carvalho e Almeida (2010) que para que a hipótese da CKA tenha a forma de “U” invertido, é condição necessária que o coeficiente estimado α_1 seja positivo e significativo, o coeficiente α_2 seja negativo e o coeficiente α_3 não seja significativamente diferente de zero (uma vez que o contrário ocorra, isso é, o coeficiente α_3 seja significativo e positivo, evidenciaria uma CKA em forma de “N”). Há ainda a possibilidade de que a relação entre degradação ambiental seja linear, crescente ou decrescente. Porém, nesses casos, não se configuraria tal relação como sendo a Curva de Kuznets Ambiental.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 A MATRIZ DE PESOS ESPACIAIS

Diversas configurações de matrizes espaciais foram testadas, tais como: matrizes de contiguidade *rook* (torre) e *queen* (rainha) e matrizes com k-vizinhos (quatro, cinco, dez e quinze vizinhos). Os resultados obtidos (explicitados na Tabela 2) indicam que a matriz de pesos espacial

com o maior valor encontrado da estatística *I* de Moran é a matriz de contiguidade do tipo torre. Isto consiste em inferir-se que a autocorrelação espacial da variável desmatamento do Cerrado para o ano de 2008 é melhor captada utilizando-se esta configuração espacial.

Tabela 1: Matrizes de pesos espaciais e valores encontrados da estatística *I* de Moran.

Tipo de matriz	<i>I</i> de Moran	p-value*
rook	0,4361	0,0010
queen	0,4227	0,0010
4 vizinhos	0,4072	0,0010
5 vizinhos	0,3857	0,0010
10 vizinhos	0,3282	0,0010
15 vizinhos	0,2969	0,0010

Fonte: elaboração própria.

4.2 A ANÁLISE EXPLORATÓRIA DE DADOS ESPACIAIS

Lembrando que a estatística *I* de Moran, medida da dependência espacial, varia de -1 a +1 (sendo que valores negativos indicam autocorrelação espacial negativa e valores positivos apontam autocorrelação espacial positiva), a Tabela 2 apresenta os valores encontrados da estatística univariada e bivariada de *I* de Moran das variáveis em estudo.

Tabela 2: Estatística *I* de Moran das variáveis em estudo.

Variável	<i>I</i> de Moran univariado	p-valor*	<i>I</i> de Moran bivariado**	p-valor*
DESMAT	0,4361	0,0010		
Y	0,3067	0,0010	0,0801	0,0390
DEMOG	0,4077	0,0010	-0,0782	0,6150
AREAPLANT	0,7432	0,0010	-0,1510	0,0010
REBANHO	0,7230	0,0010	-0,1746	0,0010

*A pseudo-significância empírica é baseada em 999 permutações aleatória.

** *I* de Moran bivariado entre a variável dependente DESMAT e as variáveis explicativas.

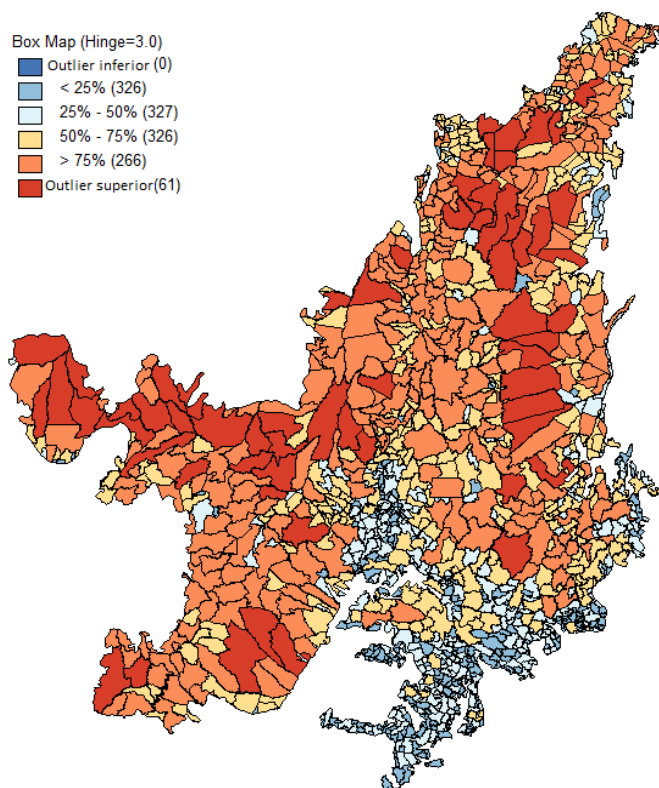
Fonte: elaboração própria.

O valor encontrado da estatística *I* de Moran univariada da variável desmatamento indica a presença de autocorrelação espacial positiva e estatisticamente significativa (a 1%), isto é, o desmatamento está interligado com a sua localização no espaço, sofrendo interferências não somente da região em que se encontra, mas também das demais que o circundam. O gráfico de dispersão da variável desmatamento evidencia que boa parte das observações se aglomera no quadrante Alto-Alto. A estatística *I* de Moran univariada da variável PIB *per capita*, assim como a variável desmatamento, também acusa a presença de autocorrelação espacial positiva e estatisticamente significativa (a 1%) e suas observações se concentram em maior parte no quadrante Alto-Alto. Quanto as variáveis explicativas adicionais ao modelo, DEMOG, AREAPLANT e REBANHO, há a indicação de autocorrelação espacial positiva, visto que sua significância estatística (a 1%) possibilita a rejeição da hipótese nula de aleatoriedade espacial destas.

Quanto ao *I* de Moran bivariado entre desmatamento e PIB *per capita*, o valor encontrado aponta a presença de autocorrelação espacial positiva baixa entre essas duas variáveis, estatisticamente significativo a 5%. Na análise bivariada entre desmatamento e as variáveis explicativas adicionais, verifica-se a indicação de autocorrelação espacial negativa para as variáveis explicativas adicionais relativas a área plantada (AREAPLANT) e ao efetivo do rebanho

(REBANHO), tendo em vista a sua significância estatística. A exceção é a variável de demografia (DEMOG), uma vez que o p-valor aponta para sua não significância estatística.

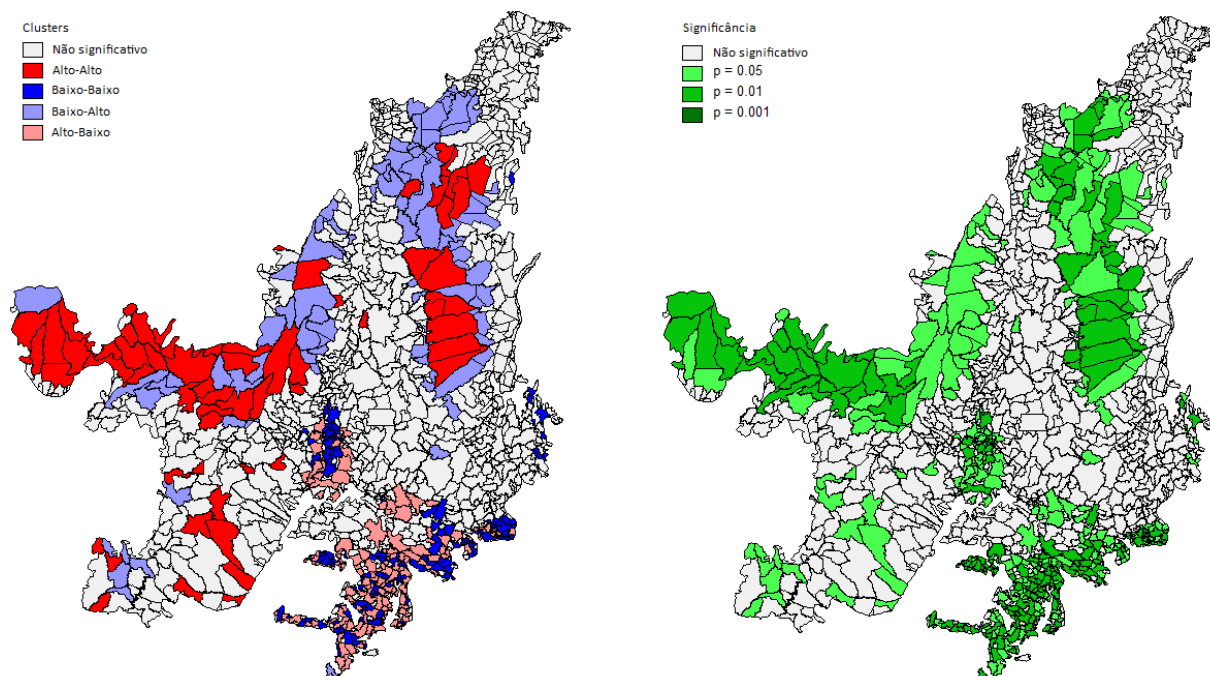
O Mapa 1 apresenta a detecção de *outliers* para a área desmatada dos municípios do Cerrado em 2008, com base na ferramenta *boxmap* e considerando um *hinge* igual a 3.0. Foram identificados 61 municípios considerados *outliers* superiores. Dentre eles, 22 encontram-se no Estado de Mato Grosso, 12 no Maranhão, 7 na Bahia, 5 no Mato Grosso do Sul, 5 no Tocantins, 4 no Piauí, 3 em Goiás e 3 em Minas Gerais. Nenhum município da amostra apresentou-se como *outlier* inferior.



Mapa 1: *Boxmap* do desmatamento em 2008.

Fonte: elaboração própria.

O Mapa 2 apresenta os padrões de aglomeração local, denominados *clusters*, e, ao lado, o mapa de significância multivariados para o desmatamento e PIB *per capita* no Cerrado no ano de 2008. Percebe-se, em vermelho escuro, o padrão de associação denominado local Alto-Alto, indicando que municípios com alto PIB *per capita* são circundados por municípios com alto desmatamento. Opondo-se a esse padrão, percebe-se em azul escuro clusters do tipo Baixo-Baixo, isto é, municípios com baixo PIB *per capita* encontram-se contíguos a municípios com baixo desmatamento. Outros dois padrões de aglomeração também podem ser observados. Em rosa claro está evidenciado o padrão do tipo Alto-Baixo, representando municípios com alto PIB *per capita* vizinhos de municípios com baixo desmatamento. Em azul claro, verifica-se o padrão de associação denominado Baixo-Alto, em que municípios com baixo PIB *per capita* encontram-se rodeados por municípios com alto desmatamento.



Mapa 1: Mapa de cluster espacial multivariado e mapa de significância LISA, do desmatamento e PIB per capita dos municípios do Cerrado em 2008.
 Fonte: elaboração própria.

4.3 ESTIMAÇÃO E ANÁLISE DOS MODELOS ECONOMÉTRICOS

Estimou-se primeiramente um modelo clássico de regressão linear, pelo método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), sem correção para dependência espacial. Testou-se a hipótese de ausência de autocorrelação espacial e, analisando-se a saída obtida no software Geoda (apresentada no Apêndice A.1), verificou-se que os testes Multiplicador de Lagrange para defasagem (ML_p) e Multiplicador de Lagrange para o erro (ML_λ) eram estatisticamente significativas. Sendo assim, há a indicação de presença de autocorrelação espacial, evidenciando a necessidade de se optar por modelos que considerem os efeitos espaciais.

A versão robusta dos testes de Multiplicador de Lagrange para defasagem (ML_p) e Multiplicador de Lagrange para o erro (ML_λ) apontam que o modelo mais indicado seria o de defasagem espacial, tendo em vista a não significância estatística da versão robusta do ML_λ . De qualquer forma, os cinco modelos espaciais propostos foram estimados e os resultados obtidos foram comparados. Os resultados encontrados estão apresentados no Quadro 3.

O modelo (1), de defasagem espacial, apresenta como variáveis significativas todas as variáveis explicativas incluídas no modelo, inclusive o coeficiente de defasagem espacial ρ . As variáveis explicativas adicionais (tais como DEMOG, AREAPLANT e REBANHO), apesar da significância estatística, apresentaram sinais inversos aos esperados. Ainda, as variáveis explicativas básicas da hipótese da Curva de Kuznets Ambiental, o PIB *per capita* (Y) e sua forma quadrática (Y^2) apresentaram os sinais esperados, configurando o formato de “U” invertido da CKA, indicando que o aumento do PIB per capita está inicialmente relacionado com o aumento do desmatamento invertendo-se após o ponto de máximo da curva.

O modelo (2), de erro espacial, apresentou variáveis explicativas estatisticamente significativas, com exceção da variável referente à demografia DEMOG. O parâmetro de erro espacial λ também apresentou-se significativo e com sinal positivo. As variáveis explicativas adicionais ao modelo, DEMOG e AREAPLANT, apresentaram sinais inversos ao esperados. As

variáveis explicativas básicas da CKA, como PIB *per capita* e sua forma quadrática, além da significância estatística, apresentaram os sinais esperados corroborando a hipótese da CKA. Apesar de bastante satisfatórios e semelhantes aos obtidos no modelo (1), o modelo (2) apresenta um valor maior para o critério de informação de Akaike (AIC), indicando uma ligeira piora em relação ao modelo anterior.

O modelo (3) apresentou como variáveis significativas todas as variáveis explicativas do modelo, como exceção da variável espacialmente defasada wDEMOG. As variáveis explicativas básicas do modelo não corroboram a hipótese da CKA, visto que a forma quadrática do PIB *per capita* apresenta sinal positivo, inverso ao esperado, corroborando uma curva em formato de “U” somente.

No modelo (4), as variáveis explicativas apresentaram-se estatisticamente significativas, à exceção da variável espacialmente defasada wDEMOG. Nesse modelo, o coeficiente de defasagem espacial ρ apresentou-se estatisticamente não significativo.

O modelo (5) apresentou variáveis explicativas estatisticamente significativas, à exceção da variável espacialmente defasada wDEMOG. Nesse modelo, o parâmetro de erro espacial λ apresentou-se estatisticamente não significativo.

Variável	modelo (1)	modelo (2)	modelo (3)	modelo (4)	modelo (5)
ρ	+			ns**	
λ		+			ns**
constante	+	+	+	+	+
Y	+	+	+	+	+
Y2	-	-	+	+	+
DEMOG	-	ns*	+	+	+
AREAPLANT	-	-	+	+	+
REBANHO	-	-	+	+	+
wY			-	-	-
wY2			-	-	-
wDEMOG			ns**	ns**	ns**
wAREAPLANT			-	-	-
wREBANHO			-	-	-

Quadro 3: Resultado dos modelos estimados com correção para dependência espacial.

Fonte: elaboração própria.

Notas: (1) modelo de defasagem espacial – SAR, (2) modelo de erro espacial – SEM, (3) modelo regressivo cruzado espacial, (4) modelo Durbin espacial, (5) modelo Durbin de erro espacial.

ns = não significativo; * = coeficiente não significativo em 5%; ** = coeficiente não significativo em 10%.

Uma vez obtidos resultados que corroboraram a hipótese da curva em forma de “U” invertido, quando testado o modelo básico da CKA (com a variável Y em sua forma quadrática), tanto no modelo de defasagem espacial quanto no modelo de erro espacial, optou-se por refazer tais testes incluindo a forma cúbica da variável renda *per capita* (Y3). Como já explicitado, a inclusão de tal variável permite verificar se a degradação tornaria a ascender uma vez continuado o crescimento das atividades produtivas da região. Caso os resultados encontrados estejam em conformidade com o esperado, o formato da curva configuraria um “N”, evidenciando tanto o momento em que o crescimento da renda colabora para a redução da degradação ambiental quanto o segundo ponto crítico em que, apesar de continuado tal crescimento do PIB *per capita*, a degradação torna a aumentar.

Sendo assim, repete-se os procedimentos já feitos anteriormente, testando-se primeiramente modelo clássico de regressão linear, pelo método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), sem correção para dependência espacial, em que se determinou chamá-lo de Modelo (0*).

Analisando-se os resultados obtidos da estimação, verificou-se que tanto o Multiplicador de Lagrange para defasagem (ML_{ρ}) quanto o Multiplicador de Lagrange para o erro (ML_{λ}) eram estatisticamente significativas, ou seja, se mostram significativos a dependência espacial. Como “critério de desempate”, examinou-se a versão robusta de ambos os testes, apontando o modelo de erro espacial como o que melhor se adequa. Mais uma vez evidenciada a necessidade de se optar por modelos que consideram os efeitos espaciais, estimou-se novamente tanto os modelos de erro espacial (apontado pelo teste da robustez do Multiplicador de Lagrange) – Modelo (1*) – quanto o modelo de defasagem espacial – Modelo (2*), agora também com a forma cúbica da variável PIB *per capita*, visto que nos testes anteriores esses foram os modelos que confirmaram a hipótese da CKA. Os resultados encontram-se disposto no Quadro 4.

Tanto o modelo de erro espacial (1*) quanto o modelo de defasagem espacial (2*) apresentam significância estatística e os sinais esperados das variáveis explicativas básicas da hipótese da CKA (Y, Y2 e Y3), configurando-se assim uma curva em forma de “N”. Infere-se dessa análise que o desmatada no Cerrado, nas condições analisadas, torna a crescer conforme o PIB *per capita* aumenta.

Variável	modelo (1*)	modelo (2*)
ρ	+	
λ		+
constante	ns	+
Y	+	+
Y2	-	-
Y3	+	+
DEMOG	ns	ns
AREAPLANT	-	-
REBANHO	-	-

Quadro 4: Resultado dos modelos estimados com correção para dependência espacial, com variável adicional.

Fonte: elaboração própria.

Notas: (1) modelo de defasagem espacial – SAR, (2) modelo de erro espacial – SEM.

ns = não significativo.

5 CONCLUSÃO

O presente estudo verificou a existência de relação entre o desmatamento ocorrido no bioma Cerrado no ano de 2008 e o nível de atividade econômica na região, sob a hipótese da Curva de Kuznets Ambiental. Para tanto, definiu-se como variável dependente do modelo testado a área de Cerrado desmatada dos municípios e como variáveis explicativas o PIB *per capita* e suas formas quadrática e cúbica, a densidade demográfica, a área plantada e o efetivo dos rebanhos bovinos. O tratamento estatístico dos dados se deu sob a forma de uma *cross-section* para o ano de 2008, tendo em vista a indisponibilidade de dados referentes ao desmatamento para outros períodos dos municípios que constituem o Cerrado.

Visto que a localização geográfica é um fator bastante relevante para a economia ambiental, optou-se por considerar os efeitos espaciais. Construiu-se o mapa do bioma Cerrado a partir do

mapa do Brasil disponibilizados pelo IBGE. Assim, o tratamento dos dados se deu por meio da análise exploratória de dados espaciais e posteriormente estimou-se o modelo pelo método de mínimos quadrados ordinários (sem efeitos espaciais) e modelos com efeitos espaciais como: modelo de defasagem espacial, modelo de erro, modelo Durbin espacial (de defasagem e do erro) e modelo regressivo cruzado espacial.

Estimaram-se primeiramente os modelos propostos da CKA utilizando-se somente a forma quadrática do PIB *per capita* e as demais variáveis explicativas adicionais. Os resultados obtidos corroboram a hipótese do “U” invertido nos modelos de defasagem espacial e de erro espacial, indicando inicialmente o aumento do desmatamento associado ao crescimento da renda e posteriormente a inversão dessa tendência: após o ponto de máximo, a continuidade do aumento da renda contribui para a redução da degradação. Os demais modelos (regressivo cruzado espacial, Durbin espacial e Durbin espacial do erro) apontam para uma relação linear crescente entre o PIB *per capita* ao quadrado e o desmatamento, mas sem configurar hipótese da CKA.

Uma vez analisados tais resultados, incluiu-se na análise a forma cúbica da variável PIB *per capita*, a fim de verificar se, após o ponto de máximo da curva que expressa a queda da degradação, o crescimento continuado da renda contribuiria para o desmatamento tornar a crescer. Optou-se refazer as estimações somente para os modelos de defasagem espacial e de erro espacial, uma vez que só ambos corroboraram a hipótese proposta do “U” invertido. Os resultados encontrados apontam que, a princípio o crescimento da renda *per capita* ajuda a diminuir o desmatamento na região. Porém, o aumento contínuo do PIB *per capita* corrobora para que o desmatamento torne a crescer, configurando assim uma curva em forma de “N”.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se reestimar o modelo da CKA para o bioma Cerrado pelo método das Regressões Ponderadas Geograficamente (RPG).

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, E. S. *Curso de Econometria Espacial Aplicada*. Piracicaba, 2004.
- ANDRADE, D. C.; ROMEIRO, A. R. *Degradação Ambiental e Teoria Econômica: Algumas Reflexões sobre a “Economia dos Ecossistemas”*. Brasília: Revista EconomiA, v. 12, n. 1, p. 3-26, jan/abr de 2011.
- ANSELIN, L. *Spatial Econometrics*. USA: University of Texas, 1999.
- ANSELIN, L. (2005). *Exploring Spatial Data with GeoDa™ : A Workbook*. Center for Spatially Integrated Social Science, GeoDa Tutorial – Revised Version.
- ANSELIN, L. *Thirty years of spatial econometrics*. Papers in Regional Science, v. 89, n. 1, março de 2010.
- ARRAES, R. A. et al. *Curva Ambiental de Kuznets e Desenvolvimento Econômico Sustentável*. Rio de Janeiro: RER, v. 44, n. 03, p. 525-547, jul/set 2006.
- BAGLIANI, M. et al. *A Consumption-based Approach to Environmental Kuznets Curves Using the Ecological Footprint Indicator*. *Ecological Economics*, v. 65, p. 650-661, 2008.
- BRAJER, V. et al. *Health Benefits of Tunneling Through the Chinese Environmental Kuznets Curve*. *Ecological Economics*, v. 66, p. 674-686, 2008.
- CARVALHO, T. S; ALMEIDA, E. *A hipótese da Curva de Kuznets Ambiental Global: uma perspectiva econométrico-espacial*. Est. Econ., São Paulo, v. 40, n 3, p. 587-615, jul.-set. 2010.
- CMMAD – COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO. *Nosso futuro Comum*. Rio de Janeiro: Ed. Fundação Getúlio Vargas, 1988.
- CULAS, R. J. *Deforestation and Environmental Kuznets Curve: an Institutional Perspective*. *Ecological Economics*, v. 61, p. 429-437, 2007.

- CUNHA, C. A. *Curva de Kuznets Ambiental: Estimativa Econométrica Usando CO2 e PIB per capita*. SOBER: XLVI Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural, 2008.
- EMBRAPA CERRADOS. IV Plano Diretor da Embrapa Cerrados 2008 - 2011 - 2023 / Embrapa Cerrados – Planaltina. DF: Embrapa Cerrados, 2008.
- GROSSMAN, G. M.; KRUEGER, A. B. *Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement*. USA: National Bureau of Economic Research, NBER Working Paper nº 3914, nov. 1991.
- IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. *Relatório técnico de monitoramento do desmatamento no Bioma Cerrado, 2002 a 2008: dados revisados*. Acordo de cooperação técnica MMA/IBAMA/PNUD. Brasília: Centro de Sensoriamento Remoto – CSR/IBAMA, nov. de 2009. Disponível em: http://siscom.ibama.gov.br/monitorabiomas/cerrado/RELATORIO_CERRADO_2008-2009.pdf .
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Mapa de Biomas do Brasil. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=169 . Acesso em: 17 de março de 2011.
- LE SAGE, J. R. *Spatial Econometrics*. USA: University of Toledo, 1998.
- MANAGI, S.; JENA, P. R. *Environmental Productivity and Kuznets Curve in India*. *Ecological Economics*, v. 65, p. 432- 440, 2008.
- MARQUELLI, R. P. *O desenvolvimento sustentável da agricultura no cerrado brasileiro*. Brasília: ISEA-FGV/ECOBUSINESS SCHOOL, 2003.
- MCPHERSON, M. A.; NIESWIADOMY, M. L. *Environmental Kuznets Curve: Threatened Species and Spatial Effects*. *Ecological Economics*, v. 55, p. 395-407, 2005.
- MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Projeto de Monitoramento do Desmatamento dos Biomas Brasileiros por Satélite (PMDBBS). Disponível em: <http://siscom.ibama.gov.br/monitorabiomas/> . Acesso em: 8 de março de 2011.
- MUELLER, C. C. *Os economistas e as relações entre o sistema econômico e o meio ambiente*. Brasília: Ed. UnB, 2007. p. 60-85.
- OLIVEIRA, R. C. *Curva de Kuznets Ambiental para a Amazônia Legal*. 2009. 160 f. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada), Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora. 2009
- PARRILLA, J. C. *Curva de Kuznets Ambiental: Evidencia para a Europa*. CRE, Documents de treball, 2009.
- QUEIROZ, F. A. *Impactos do comércio internacional de soja sobre a biodiversidade do cerrado*. Brasília: Centro de Desenvolvimento Sustentável/UNB, 2003.
- ROTHMAN, D. S.; de BRUYN, S. M. *Probing into the environmental Kuznets curve hypothesis*. *Ecological Economics*, v. 25, p. 143-145, 1998.
- RUPASINGHA, A. et al. *The Environmental Kuznets Curve for US Counties: a Spatial Econometric Analysis with Extensions*. *Papers in Regional Science*, v. 83, p. 407-424, 2004.