

TECNOLOGIA AGRÍCOLA E USO DO SOLO: EVIDÊNCIAS PARA O BRASIL¹

Ademir Antônio Moreira Rocha²

Eduardo Gonçalves³

Eduardo Simões de Almeida⁴

Resumo: A produção agropecuária brasileira vem crescendo de forma substancial nas últimas décadas. É possível afirmar que o progresso técnico está no centro do crescimento do agrobusiness brasileiro. Esse ‘boom’ agrícola trouxe consequências em termos de expansão de algumas culturas, adaptação de novas e mudanças geográficas da fronteira agrícola. Ressalta-se também o debate acerca da relação entre expansão agropecuária e desflorestamento. Desta forma, é possível estabelecer uma relação entre a adoção de tecnologia e uso do solo agrícola e florestal. Posto o problema, a metodologia adotada segue a estrutura dos modelos de Equações Simultâneas no Espaço. É possível concluir que o uso de tecnologia, sob forma de capital físico ou humano, proporciona a expansão de atividades agrícolas, em especial, soja, milho e café sem pressionar áreas de floresta. Ademais, verificou-se um efeito vizinhança negativo para as culturas de milho e soja.

Palavras-Chave: tecnologia agrícola, difusão tecnológica, uso do solo.

Abstract: Brazilian agricultural production has been growing substantially in recent decades. It is possible to affirm that technical progress is at the center of the growth of Brazilian agribusiness. This agricultural boom has had consequences in terms of expansion of some crops, adaptation of new ones and geographical changes of the agricultural frontier. The debate about the relationship between agricultural expansion and deforestation is also worth mentioning. It is possible to establish a relationship between technology adoption and agricultural and forest land use. Given the problem, the adopted methodology follows the structure of the Simultaneous Space Equation models. It is possible to conclude that the use of technology, in the form of physical or human capital, provides the expansion of agricultural activities, especially soybean, corn and coffee without pressing forest areas. In addition, a negative neighborhood effect was observed for corn and soybean crops.

Keywords: agricultural technology, technological diffusion, land use.

Código JEL: O13, O33.

¹ Os autores agradecem à FAPEMIG, CNPq e CAPES pelo seu apoio. Artigo submetido à I Latin American and Caribbean Regional Science Association e XV Encontro Nacional da Associação Brasileira de Estudos Regionais.

² Mestrando em Economia Aplicada. Email: amr.eco@gmail.com

³ Professor Associado e pesquisador do CNPq. Email: eduardo.goncalves@ufjf.edu.br

⁴ Professor Associado e pesquisador do CNPq. Email: eduardo.almeida@ufjf.edu.br

1 Introdução

A produção agropecuária brasileira vem crescendo de forma extraordinária. Em 1980, a colheita de grãos foi de 50,8 milhões de toneladas, alcançou a marca de 100,2 milhões em 2000 e, por fim, 219 milhões em 2016 segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab). Nesse contexto, o país transformou-se num grande *player* global na produção de bens agropecuários. Nenhuma outra nação experimentou variações de produção tão expressivas. O setor tem destaque nas contas nacionais, uma vez que a balança comercial agrícola em 2016 foi de 71,3 bilhões de dólares, enquanto o saldo total foi de 45 bilhões, segundo *World Trade Organization* (WTO). O Brasil se encontra entre os maiores exportadores mundiais de açúcar, soja, milho, suco de laranja, café, algodão, suínos, aves e bovinos.

As razões desse sucesso são várias. O país apresenta uma vantagem natural, com farta disponibilidade de terra e água, além de condições climáticas favoráveis. Mas, a chave do sucesso está no uso de tecnologia agrícola adaptada à realidade brasileira, fruto da parceria entre a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), centros de pesquisa presentes nas universidades e iniciativa privada junto aos agricultores e pecuaristas. Assim, é possível afirmar que o progresso técnico está no centro do crescimento do *agrobusiness* brasileiro.

Esse *boom* agrícola trouxe consequências em termos de expansão de algumas culturas, adaptação de novas, além de mudanças geográficas da fronteira agrícola. Ressalta-se, também, o debate acerca da relação entre agropecuária e desflorestamento. Desta forma, é possível estabelecer uma relação entre a adoção de tecnologia e uso do solo agrícola e florestal. Contudo, os impactos da tecnologia sobre o uso do solo ainda são controversos.

Alguns trabalhos argumentam que a pesquisa agrícola e, por conseguinte, o uso de tecnologia agrícola podem preservar áreas de matas e florestas, limitando perdas de biodiversidade por meio do aumento da produtividade alcançada pelo setor agrícola (Green *et al.*, 2005). As tecnologias que promovem a eficiência do uso de insumos permitem aos agricultores superar as limitações impostas pelas baixas qualidades da terra (Wu, 2014). Tal dinâmica afeta significativamente os preços das terras de modo a reduzir o prêmio para terrenos de qualidade superior, que resulta, em última instância, em não necessidade de desmatamento. Por outro lado, há os que defendam que os aumentos na produtividade provenientes das novas tecnologias podem elevar a rentabilidade da agricultura em comparação com os usos alternativos da terra (como o florestal), incentivando a expansão da fronteira agrícola (Lambin *et al.*, 2001; Southgate *et al.*, 1991).

Ademais, não se pode negligenciar o efeito de *spillover* tecnológico proveniente da proximidade espacial, ou seja, ao utilizar algum tipo de tecnologia o agricultor pode influenciar socialmente seus vizinhos, inclusive no modo de utilização da terra. Os trabalhos de Case (1992), Best *et al.* (1998), Holloway *et al.* (2002), Staal *et al.* (2002), Rounsevell *et al.* (2003), Bandiera e Rasul (2006), Conley e Udry (2010), Wright *et al.* (2013) e Wollni e Anderson (2014) se inserem nesta temática.

Diante dos pontos apresentados, as questões que norteiam este estudo são: (i) qual o impacto de elementos tecnológicos (capital físico e humano) sobre o uso do solo agrícola e florestal no Brasil? e (ii) existe alguma influência da vizinhança nesta relação?

Sabe-se que o recurso terra é limitado, e a decisão acerca de seu uso é interdependente e requer exclusividade do espaço (e.g. ao optar pelo uso lavoura implica em não escolher o uso para pasto ou floresta e vice-versa). Tem-se, portanto um problema de simultaneidade de equações que explicam o uso da terra. Isto posto, a metodologia adotada segue a estrutura dos modelos de Equações Simultâneas no Espaço.

Além dessa seção introdutória, o presente artigo está dividido como se segue. A segunda seção traz uma discussão acerca da relação entre tecnologia e uso do solo, além de apontamentos sobre efeito vizinhança no meio agrícola. A terceira descreve o modelo teórico, base de dados, bem como a implementação empírica. A quarta seção apresenta e discute os resultados. Por fim, a quinta seção traz as considerações finais.

2 Referencial teórico: relação entre tecnologia agrícola e uso do solo

A Revolução Verde iniciada nos EUA e Europa na década de 50, disseminou a “agricultura moderna” nas regiões agrícolas do mundo, por meio da criação de novos produtos e práticas⁵. A adoção de inovações agrícola afetou de modo drástico o uso e os valores da terra. O crescimento de novas variedades cultivadas, bem como expansão das culturas já existentes são alguns dos resultados deste processo (Wu, 2014). Contudo, os impactos da tecnologia sobre o uso do solo ainda são controversos.

Green *et al.* (2005) argumentam que a pesquisa agrícola e, por consequência, o uso de tecnologias podem manter áreas de matas e florestas, limitando perdas de biodiversidade por meio do aumento da produtividade alcançada pelo setor agrícola. Ademais, o uso de tecnologias tem impactos diretos sobre o controle de danos tais como a recuperação de terras erosivas ou remanescentes da pecuária (Ervin e Ervin, 1982) e controle de pragas (Lichtenberg e Zilberman, 1986). As tecnologias que aumentam a eficiência do uso de insumos permitem aos agricultores superar as limitações impostas pelas baixas qualidades da terra (Wu, 2014). Tal dinâmica afeta significativamente os preços das terras de modo a reduzir o prêmio para terrenos de qualidade superior, que resulta, em última instância, em não realizar novos desmatamentos.

Por outro lado, há os que defendam que os aumentos na produtividade provenientes das novas tecnologias podem elevar a rentabilidade da agricultura em comparação com os usos alternativos da terra (cultivos agrícolas menos lucrativos ou florestal), incentivando a expansão da fronteira agrícola. Esta segunda visão está atrelada à visão econômica de maximização de lucro pelo agente tomador de decisão. Angelsen e Kaimowitz (1999) sintetizam o resultado de diversos trabalhos que analisam as causas do desmatamento tropical. No que concerne ao uso de tecnologia, encontraram-se evidências de uma relação positiva entre melhora tecnológica e aumento na área desmatada (Southgate *et al.*, 1991). Lambin *et al.*, (2001) argumenta que 4% de todos os casos de desmatamento florestal são explicados pela expansão agrícola. Ainda neste estudo, considera-se que o uso de tecnologia nos setores da agricultura e extração de madeira são responsáveis por 107 dos 152 casos de desmatamento (70%). Angus *et al.* (2009), em estudo feito para o Reino Unido, preveem que, nos próximos 50 anos, o desenvolvimento de novos mercados, decorrentes de tecnologia agrícola, para os produtos agrícolas provoque mudanças consideráveis no uso da terra. O aumento de variedades agriculturáveis provenientes da Revolução Verde pode expandir a parcela de terra destinada a agricultura, processo este reforçado pela maior adoção de tecnologia por parte de pequenos agricultores, influenciados por seu menor preço de acesso (Sunding e Zilberman, 2001).

Com base nas duas visões acima mencionadas, chega-se a duas hipóteses antagônicas:
Hipótese 1: o uso de tecnologias agrícolas pode possibilitar a manutenção de áreas agrícolas, preservando ainda, áreas de matas e florestas por meio de elevação de produtividade e/ou ocupando áreas antes improdutivas.

Caso a hipótese 1 seja confirmada, o sinal dos coeficientes que relacionam as variáveis tecnológicas (capital físico e humano) e uso do solo tipo agrícola e florestal devem ser positivos.

⁵ O conceito de tecnologia agrícola deve ser compreendido, como a aplicação do conhecimento, ciência e engenharia em sistemas de produção agrícola e animal (Wu, 2014).

Hipótese 2: o aumento de produtividade leva ao aumento de lucro, propiciando a expansão da atividade agrícola e uso da terra destinada à mesma, em detrimento do uso florestal.

Desta forma, espera-se um sinal positivo para os coeficientes que relacionam as variáveis tecnológicas e os usos do solo voltado à agricultura, e de modo inverso, encontrar um sinal negativo ao uso floresta.

Ademais, alguns estudos apresentam a existência de spillovers tecnológicos provenientes de atividades agrícolas próximas geograficamente. Os trabalhos de Case (1992), Best *et al.* (1998), Holloway *et al.* (2002), Staal *et al.* (2002), Rounsevell *et al.* (2003), Bandiera e Rasul (2006), Conley e Udry (2010), Wright *et al.* (2013) e Wollni e Anderson (2014) se inserem nesta temática. Case (1992) comprova por meio de modelo microeconômico a interdependência entre agricultores acerca de decisões tomadas em relação à adoção de novas tecnologias na Indonésia. Wright *et al.* (2013) avaliam a existência de spillovers espaciais na adoção de tecnologia de irrigação no Texas (EUA). Para tanto, utilizaram modelos tipo SAR (defasagem espacial) e SEM (erro autorregressivo espacial) e não verificaram evidências de efeito vizinhança. Segundo Wollni e Anderson (2014) a agricultura orgânica pode minimizar efeitos de erosão do solo. Os autores enfatizam o papel da difusão de tecnologias biológicas sobre o uso do solo voltado à agricultura orgânica. Tem-se como área de estudo algumas regiões de Honduras. Verificou-se que a maior informação acerca destas técnicas presentes na vizinhança influenciou de maneira positiva o aumento do cultivo orgânico que quebrou uma espiral de degradação.

Por sua vez, Pardey *et al.* (2010) destacam as características do uso de tecnologia no meio agrícola que segue (i) a natureza atomística da produção agrícola, diferentemente do setor industrial em que o processo de aglomeração é mais evidente, (ii) a especificidade espacial das tecnologias agrícolas, devido à natureza biológica da produção agrícola, em que as tecnologias apropriadas variam com as mudanças no clima, tipos de solo, topografia, latitude, altitude e distância dos mercados e (iii) grande heterogeneidade entre os estabelecimentos existentes, que implica em diferenças na demanda por tecnologias e inovações agrícolas. Desta forma, a reunião destes fatores pode funcionar como bloqueio à possibilidade de efeito vizinhança em atividades agrícolas.

Com base no exposto acima, formula-se a última hipótese deste estudo:

Hipótese 3: efeito spillover tecnológico na agricultura existe e seus efeitos sobre o uso do solo não devem ser desconsiderados.

Caso a hipótese 3 seja confirmada, os coeficientes que relacionam as variáveis tecnológicas defasadas espacialmente e os tipos de uso do solo devem ser estatisticamente significantes.

3 Metodologia

3.1 Modelo teórico

Evenson e Alves (2009) e Féres *et al.* (2009) utilizam pressupostos microeconômicos para análise de uso do solo. O modelo teórico utilizado neste estudo faz uma releitura dos mesmos. A função de produção para cada categoria de uso da terra é descrita como:

$$y_i = F(n_i, I_i, T_i, X_i), i = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

onde i é a categoria de uso da terra, y_i produto de origem da terra tipo i , n área de terra utilizada tipo i , I vetor de insumos utilizados na terra tipo i , T vetor de variáveis de tecnologia, X é o vetor de outras variáveis de controle. A função lucro (π_i) associada à produção para cada categoria de uso da terra é dada por:

$$\pi_i = \sum p_{yi}y_i - \sum p_{Fi}F_i = \pi_i(p_{yi}, p_{xi}, F_i) \quad (2)$$

assume-se que p_{yi} e p_{xi} sejam constantes (numerário) e $F = \langle n, I, T, X \rangle$. É possível escrever o seguinte problema de maximização do lucro condicionado à quantidade total de terra:

$$\max_{n_1, n_2, \dots, n_m} \left(\sum_{i=1}^m \pi_i(n_i, F_i - n_i) \right) \text{ s. r } \sum_{i=1}^m n_i = N \quad (3)$$

A partir das condições de primeira ordem extraídas de (3), podemos derivar as alocações ótimas de terra para cada tipo de uso i , representadas pelo símbolo n_i^* . Estas áreas ótimas são determinadas pela área total do estabelecimento e pelo vetor de variáveis explicativas, ou seja $n_i^* = \mathcal{F}(N, F_i)$. Desta forma, obtêm-se duas equações de alocações ótimas para os vários tipos de uso da terra, sendo elas:

$$\sum_{i=1}^m \frac{\partial n_i^*(N, F_i)}{\partial N} = 1; \sum_{i=1}^m \frac{\partial n_i^*(N, F_i)}{\partial F_i} = 0 \quad (4)$$

As expressões acima (4) podem ser interpretadas da seguinte forma: caso haja um aumento de um hectare na área do estabelecimento, essa área adicional deve ser alocada de tal forma que as variações de área dos diferentes tipos de uso também somem um hectare. Por outro lado, caso haja mudanças nas categorias (F_i), as realocações de área entre os tipos de uso devem se compensar, resultando num efeito líquido nulo.

3.2 Dados

3.2.1 Variável dependente

Uso do solo (N): Foram consideradas de início (modelo 1) a utilização do solo de maneira agregada representado por três tipos de uso, classificados como lavoura (*lt*), pasto (*pt*) e floresta (*ft*), seguindo Féres *et al.* (2009). Foram calculadas as participações destes usos em relação ao total⁶. Em seguida, numa segunda abordagem (modelo 2), a categoria lavoura é desagregada, trazendo para a análise maior nível de detalhe, preenchendo uma lacuna existente na literatura. Nesta fase, foram selecionadas oito culturas com maior utilização de área cultivada segundo relatórios do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) e averiguados com os dados do Censo Agropecuário (2006). São elas: cacau (*cac*), café (*caf*), cana-de-açúcar (*can*), castanha (*cas*), feijão (*fjo*), milho (*mlh*), perecíveis (*prc*)⁷ e soja (*sja*). Os dados foram extraídos do Censo Agropecuário de 2006 disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

3.2.2 Variável de Interesse

Tecnologia agrícola (T): Dois vetores compõem a categoria tecnologia agrícola. O primeiro representa o uso de capital tecnológico agrícola físico (*k*). Para tanto, adotou-se como *proxy* a razão entre o número de tratores (com mais de 100 cv. de potência) e o número de estabelecimentos agrícolas. Tem-se como fonte o Censo Agropecuário de 2006, disponibilizado pelo IBGE. O segundo, representa o capital humano agrícola (*h*). Utilizou-se como métrica a razão entre a soma de trabalhadores qualificados que atuam no ramo agrícola (engenheiros

⁶ A área total refere-se ao somatório de área de lavoura, pasto, floresta e outros (áreas degradadas, áreas destinadas a construção de imóveis e estradas).

⁷ A categoria 'perecíveis' foi criado neste trabalho e representa os alimentos que se degradam com grande facilidade e exige um sistema de transporte mais especializado e devem ser consumidos rapidamente. Inserem-se neste grupo: abacate, abacaxi, batata-inglesa, cebola, goiaba, laranja, limão, maçã, mamão, manga, maracujá, melancia, pera, pêssego, tangerina, tomate e uva.

agrícolas, engenheiros agrônomos e pesquisadores em ciências agrônômicas) e estabelecimentos agrícolas. Os dados utilizados foram disponibilizados pela Relação Anual de Informações Sociais (RAIS), vinculado ao Ministério do Trabalho e Emprego (MTE).

3.2.3 *Demais variáveis de controle*

*Condições climáticas*⁸ (*C*): Foram selecionadas as médias de temperatura e precipitação em faixas trimestrais⁹ visando adaptar os momentos climáticos às decisões de cultivo. Tem-se como fonte dos dados o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEADATA) que compilou as informações geradas pelo *Climate Research Unit da University of East Anglia*, cobrindo o período de 1961 a 1991. Apesar da obsolescência dos dados espera-se que estes não tenham se alterado de maneira significativa nos últimos anos. As variáveis climáticas são incluídas para verificar a influência de mudanças de temperatura e precipitação sobre a utilização do solo.

Condições Edáficas (*E*): Como *proxy* adotaram-se *dummies* relacionadas aos biomas brasileiros¹⁰. Dois motivos justificam seu uso: (i) o solo que pertencente ao mesmo bioma tem características edáficas semelhantes, de modo a nos auxiliar a explicar quão apropriadas são as culturas a um determinado tipo de solo e (ii) observar o funcionamento dos biomas no que concerne a utilização de suas terras.

Interdependência espacial (*S*): Duas dependência espaciais foram utilizadas neste trabalho e são na verdade resultado da interação entre a matriz de ponderação espacial (*W*) e as variáveis escolhidas: (i) *WN* que demonstra a média utilizada do solo tipo *n* nos vizinhos, servindo como indicador de padrões espaciais e (ii) interdependência tecnológica em que temos *Wk* e *Wh* que simbolizam a média de utilização de alguma tecnologia ou conhecimento técnico nos vizinhos, servindo como *proxy* de transbordamento tecnológico (*spillovers*).

No apêndice (Quadro A1) estão apresentadas as variáveis com mais detalhe. Devido à diferença entre as unidades de medida das variáveis, optou-se por padronizá-las. Desta forma, os resultados devem ser interpretados como desvio-padrão. Considera-se como unidade espacial de análise os 5507 municípios brasileiros.

3.3 *Análise exploratória de dados espaciais: testes de autocorrelação espacial*

Testou-se a presença de autocorrelação espacial de maneira global e local. Para tanto, utilizou-se respectivamente o Índice de Moran (*I de Moran*) e o indicador LISA. A existência de padrões espaciais foi verificada para as variáveis dependentes (utilização do solo) e as variáveis de tecnologia, que posteriormente serão úteis para testar a hipótese de transbordamentos tecnológicos. Foram calculados os coeficientes de *I de Moran* e seus valores estão reportados na Tabela 1.

Dadas as evidências estatísticas exibidas pela Tabela 1, é possível rejeitar a hipótese nula de aleatoriedade espacial sob nível de significância de 1%. Os valores do coeficiente *I* fornecem clara indicação que os 'usos' do solo e variáveis de tecnologia são autocorrelacionadas no espaço através dos municípios brasileiros. A magnitude da estatística nos informa que as variáveis cacau (*cac*), soja (*sja*) e cana-de-açúcar (*can*) apresentam forte concentração espacial.

⁸ Decker *et al.* (1986), Adams (1989), Sanghi *et al.* (1997), Evenson e Alves (2009), Féres *et al.* (2009) e Faria e Haddad (2017) destacam a relação entre variáveis climáticas e uso do solo em regiões brasileiras.

⁹ São elas: dezembro/janeiro/fevereiro (*djf*), março/abril/maio (*mam*), junho/julho/agosto (*jjj*) e setembro/outubro/novembro (*son*).

¹⁰ São eles: Amazônia (*damz*), Cerrado (*dcer*), Mata Atlântica (*dmatl*), Caatinga (*dcaa*), Pampa (*dpmp*) e Pantanal (*dptn*). A categoria base adotada será Amazônia (*damz*).

Tabela 1 - Estatística de autocorrelação espacial - *I* de Moran*

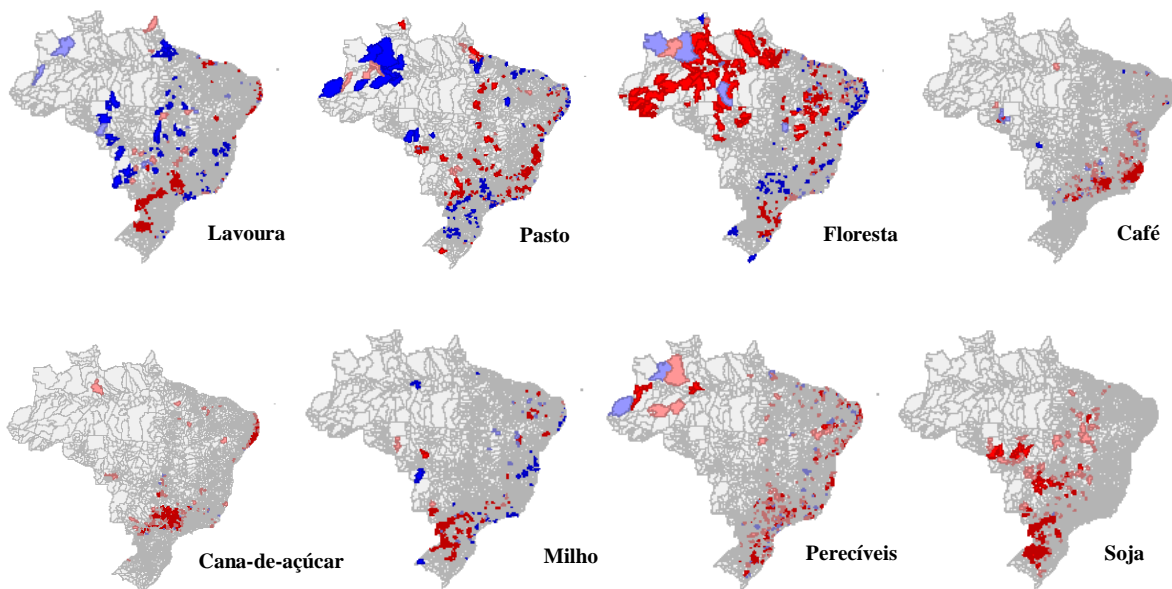
Variável**	I de Moran	E(I)	p-valor***
Lavoura (<i>lt</i>)	0,7920	-0,0002	0,001
Pasto (<i>pt</i>)	0,7630	-0,0002	0,001
Floresta (<i>ft</i>)	0,5884	-0,0002	0,001
Cacau (<i>cac</i>)	0,9048	-0,0002	0,001
Café (<i>caf</i>)	0,8040	-0,0002	0,001
Cana-de-açúcar (<i>can</i>)	0,8373	-0,0002	0,001
Castanha (<i>cas</i>)	0,6601	-0,0002	0,001
Feijão (<i>fjo</i>)	0,7218	-0,0002	0,001
Milho (<i>mlh</i>)	0,7811	-0,0002	0,001
Perecíveis (<i>prc</i>)	0,6398	-0,0002	0,001
Soja (<i>sja</i>)	0,8562	-0,0002	0,001
Capital físico - Máquinas agrícolas (<i>k</i>)	0,3708	-0,0002	0,001
Capital humano - Assistência técnica (<i>h</i>)	0,6193	-0,0002	0,001

Notas: *Utilizou-se como convenção a matriz de ponderação (*W*) *k1* vizinhos mais próximos, escolhida por meio do procedimento de Baumont (2004) apresentado no apêndice. ** As variáveis são expressas em relação ao total.

***A pseudo-significância empírica baseada em 99.999 permutações aleatórias.

Fonte: Elaboração própria, utilizando *software* GeoDa.

O indicador LISA (*Local Indicator of Spatial Association*) proposto por Anselin (1995), tem a capacidade de capturar padrões locais de autocorrelação espacial. O coeficiente *I* de Moran local (I_i) faz uma decomposição do indicador global de autocorrelação na contribuição local de cada observação em quatro categorias AA - alto/alto, BB - baixo/baixo, AB - alto/baixo e BA - baixo/alto (Almeida, 2012). Os mapas de *clusters* gerados estão expostos abaixo. As expectativas acerca da distribuição das variáveis no espaço foram satisfeitas (Figura 1), demonstrando a confiabilidade dos dados utilizados. Ademais, verificamos que as variáveis utilizadas não são aleatoriamente distribuídas no espaço, mas sim espacialmente agrupada. Isto sugere que a análise econométrica incorpore os efeitos de vizinhança geográfica.



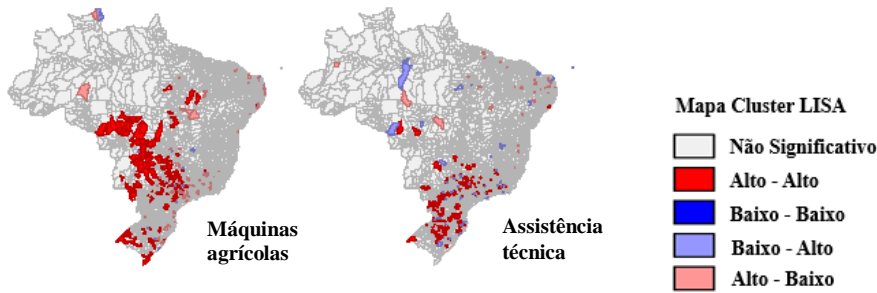


Figura 1 - Mapa de *Clusters* LISA para variáveis selecionadas

Fonte: Elaboração própria, utilizando os *softwares* GeoDa e ArcView 3.2.

3.4 Implementação Empírica

O recurso terra é limitado, e a decisão acerca de seu uso é interdependente e requer exclusividade do espaço. Assim, ao se optar pelo uso lavoura, isso implica em não escolher o uso para pasto ou floresta e vice-versa. Isso produz uma potencial correlação nos termos de erro (ε) das equações pertencentes ao sistema. Tem-se, portanto, um problema de simultaneidade de equações que explicam o uso da terra. Soma-se a isso a detecção de autocorrelação espacial. Nota-se a presença de defasagem espacial cruzada, indicando que a média da variável de interesse nos vizinhos explica a variável endógena básica, além da simultaneidade de realimentação, formalizando um conceito de causação circular. Ao fazermos uso do arcabouço de modelos de Sistema de Equações Simultâneas Espaciais evitam-se dois problemas: (i) um método de estimação simultânea permite levar em conta a correlação entre estes erros. Métodos que estimam cada equação isoladamente ignoram a correlação entre as equações e, portanto, não são eficientes; e (ii) evita-se viés de variável omitida ao não excluir o aspecto de dependência espacial.

Este estudo fará a exposição de dois modelos. O modelo 1 faz uso das variáveis dependentes de maneira agregada, isto é, lavoura, pasto e floresta, e segue a estrutura apresentada em (5).

$$\begin{cases} lt_i = \beta_{01} + \beta_{11}W_1lt_i + \beta_{21}N'_{1i} + \beta_{31}W_1N'_{1i} + \beta_{41}T_i + \beta_{51}W_1T_i + \beta_{61}C_i + \beta_{71}E_i + \varepsilon_1 \\ pt_i = \beta_{02} + \beta_{12}W_2pt_i + \beta_{22}N'_{2i} + \beta_{32}W_2N'_{2i} + \beta_{42}T_i + \beta_{52}W_2T_i + \beta_{62}C_i + \beta_{72}E_i + \varepsilon_2 \\ ft_i = \beta_{03} + \beta_{13}W_3ft_i + \beta_{23}N'_{3i} + \beta_{33}W_3N'_{3i} + \beta_{43}T_i + \beta_{53}W_3T_i + \beta_{63}C_i + \beta_{73}E_i + \varepsilon_3 \end{cases} \quad (5)$$

onde i são os 5507 municípios brasileiros analisados, W_1, W_2 e W_3 são as matrizes de ponderação espacial de kI vizinhos mais próximos¹¹ que multiplicado às variáveis lt , pt e ft representam, respectivamente, a média das áreas de lavoura, pasto e floresta nos vizinhos. N'_{1i} , N'_{2i} e N'_{3i} representam o uso dos demais tipos de solo, respectivamente, são os vetores $\langle pt, ft \rangle$, $\langle lt, ft \rangle$ e $\langle lt, pt \rangle$ resultando em dois parâmetros estimados por equação. Estes foram defasados espacialmente e compõe WN' . As variáveis de tecnologia estão representadas por T e seus transbordamentos WT . Em C estão inseridos os vetores das variáveis climáticas (temperatura e precipitação, ou a interação destas). Em E encontram-se os vetores de variáveis edáficas.

Em seguida, o modelo 2 decompõe o uso lavoura em oito diferentes tipos de culturas já mencionadas anteriormente, além das categorias pasto e floresta. Pretende-se, desta forma, alcançar um maior nível de detalhe nas informações obtidas. Sua estrutura segue (6).

¹¹ Ver Apêndice (Tabela A1) o resultado do procedimento de Baumont (2004), utilizado na seleção da matriz W .

$$\left\{ \begin{array}{l} cac_i = \beta_{01} + \beta_{11}W_1cac_i + \beta_{21}N'_{1i} + \beta_{31}W_1N'_{1i} + \beta_{41}T_i + \beta_{51}W_1T_i + \beta_{61}C_i + \beta_{71}E_i + \varepsilon_1 \\ caf_i = \beta_{02} + \beta_{12}W_2caf_i + \beta_{22}N'_{2i} + \beta_{32}W_2N'_{2i} + \beta_{42}T_i + \beta_{52}W_2T_i + \beta_{62}C_i + \beta_{72}E_i + \varepsilon_2 \\ can_i = \beta_{03} + \beta_{13}W_3can_i + \beta_{23}N'_{3i} + \beta_{33}W_3N'_{3i} + \beta_{43}T_i + \beta_{53}W_3T_i + \beta_{63}C_i + \beta_{73}E_i + \varepsilon_3 \\ cas_i = \beta_{04} + \beta_{14}W_4cas_i + \beta_{24}N'_{4i} + \beta_{34}W_4N'_{4i} + \beta_{44}T_i + \beta_{54}W_4T_i + \beta_{64}C_i + \beta_{74}E_i + \varepsilon_4 \\ fjo_i = \beta_{05} + \beta_{15}W_5fjo_i + \beta_{25}N'_{5i} + \beta_{35}W_5N'_{5i} + \beta_{45}T_i + \beta_{55}W_5T_i + \beta_{65}C_i + \beta_{75}E_i + \varepsilon_5 \\ mlh_i = \beta_{06} + \beta_{16}W_6mlh_i + \beta_{26}N'_{6i} + \beta_{36}W_6N'_{6i} + \beta_{46}T_i + \beta_{56}W_6T_i + \beta_{66}C_i + \beta_{76}E_i + \varepsilon_6 \\ prc_i = \beta_{07} + \beta_{17}W_7prc_i + \beta_{27}N'_{7i} + \beta_{37}W_7N'_{7i} + \beta_{47}T_i + \beta_{57}W_7T_i + \beta_{67}C_i + \beta_{77}E_i + \varepsilon_7 \\ sja_i = \beta_{08} + \beta_{18}W_8sja_i + \beta_{28}N'_{8i} + \beta_{38}W_8N'_{8i} + \beta_{48}T_i + \beta_{58}W_8T_i + \beta_{68}C_i + \beta_{78}E_i + \varepsilon_8 \\ pt_i = \beta_{09} + \beta_{19}W_9pt_i + \beta_{29}N'_{9i} + \beta_{39}W_9N'_{9i} + \beta_{49}T_i + \beta_{59}W_9T_i + \beta_{69}C_i + \beta_{79}E_i + \varepsilon_9 \\ ft_i = \beta_{010} + \beta_{110}W_{10}ft_i + \beta_{210}N'_{10i} + \beta_{310}W_{10}N'_{10i} + \beta_{410}T_i + \beta_{510}W_{10}T_i + \beta_{610}C_i + \beta_{710}E_i + \varepsilon_{10} \end{array} \right. \quad (6)$$

O modelo desagregado tem seu funcionamento similar ao anterior apresentado. A diferença está na variável N' (e por conseguinte WN') que expressará todos os usos da terra, exceto a variável dependente, de modo que, para esse vetor, nove parâmetros serão estimados por equação.

Busca-se, através de ambos, verificar as Hipóteses 1 e 2 - coeficientes estimados para as variáveis k e h , assim como a Hipótese 3, com coeficientes associados às variáveis Wk e Wh . O estimador de Kelejian e Robinson (1993) será utilizado na geração dos resultados. Sua implementação segue os passos apresentados em Rey e Boarnet (2004)¹². Os estimadores KR são considerados consistentes. Isso parece insuficiente ao se trabalhar com amostras finitas, todavia, este ainda é superior ao alternativo MQ2EE (Rey e Boarnet, 2004).

4 Resultados

A Tabela 2 traz os resultados obtidos pelo modelo 1¹³. Por meio dela, verifica-se que o coeficiente associado ao uso de capital físico tecnológico (k) se mostrou positivo e estatisticamente significativo para todas as categorias de uso da terra, validando a Hipótese 1. Em outras palavras, o uso de tecnologia possibilitou, de modo concomitante, o aumento de área agrícola e florestal. No caso brasileiro, as áreas degradadas de pasto permitem a expansão da agricultura sem a necessidade de derrubada da floresta nativa. Esses excedentes estão estimados em 90 milhões de hectares (Navarro, 2014). Contudo, a visão do todo pode omitir informações relevantes acerca dos diferentes tipos de cultivo. Os resultados apresentados na Tabela 3 suprem essa lacuna e dizem respeito ao modelo 2¹⁴. É possível observar que soja e café foram cultivos beneficiados pela adoção de máquinas agrícolas enquanto cacau e feijão apresentaram desvios negativos. Estes dois últimos refletem possivelmente a afirmação da Hipótese 2, e indicam ser menos lucrativas a ponto de serem substituídas por culturas tecnicamente mais intensivas e de maior escala produtiva como a soja.

Os resultados correspondentes ao capital humano tecnológico foram menos evidentes, se comparado ao físico. Ainda assim, é possível destacar alguns pontos. O cultivo de milho e soja obtiveram coeficientes beta positivos confirmando a Hipótese 1, em detrimento de áreas de pasto e cacau. De modo geral, é possível concluir que a tecnologia (capital físico ou humano) proporcionam a expansão de atividades agrícolas, em especial soja, milho e café, sem pressionar áreas de floresta. Fica claro que há um processo de mudança intra agrícola onde áreas de pasto já desgastadas estão sendo recuperadas para plantio ou se expandem via substituição por atividades com maior rentabilidade.

¹² O procedimento KR envolve a estimação dos valores preditos, expresso neste trabalho pelo prefixo *pr*-. Para maiores detalhes, consultar Rey e Boarnet (2004).

¹³ Todos os resultados obtidos pelo modelo 1 encontram-se no Apêndice (Tabela A2).

¹⁴ Todos os resultados obtidos pelo modelo 2 encontram-se no Apêndice (Tabela A3).

Tabela 2 - Determinantes do uso da terra agrícola e florestal para o modelo 1: estimação por Sistema de Equações Simultâneas no Espaço. Período: 2006.

Variáveis explicativas	Lavoura (<i>lt</i>)	Pasto (<i>pt</i>)	Floresta (<i>ft</i>)
	Coef.	Coef.	Coef.
Capital físico tecnológico (<i>k</i>)	0,075*** (0,019)	0,078*** (0,029)	0,074** (0,030)
Capital humano tecnológico (<i>h</i>)	0,037 (0,026)	0,024 (0,042)	0,046 (0,048)
Capital físico tecnológico defasado espacialmente (<i>Wk</i>)	0,019*** (0,007)	0,032* (0,018)	0,013 (0,014)
Capital humano tecnológico defasado espacialmente (<i>Wh</i>)	0,010 (0,015)	0,044** (0,017)	0,006 (0,021)
Demais variáveis de controle			
Variáveis climáticas	Sim	Sim	Sim
Variáveis edáficas	Sim	Sim	Sim
Variáveis de interdependência espacial	Sim	Sim	Sim
AIC	4.465,0	5.201,44	8.139,95
BIC	4.663,41	5.399,85	8.338,36
R2	0,869	0,851	0,747

Notas: Os erros-padrão estimados são robustos e apresentados entre parênteses. *** Significativo em 1%;

** Significativo em 5%; * Significativo em 10%.

Fonte: Elaboração própria, utilizando *software* Stata 12.

Tabela 3 - Determinantes do uso da terra agrícola e florestal para o modelo 2: estimação por Sistema de Equações Simultâneas no Espaço. Período: 2006.

Variáveis explicativas	Cacau (<i>cac</i>)	Café (<i>caf</i>)	Cana (<i>can</i>)	Castanha (<i>cas</i>)	Feijão (<i>fjo</i>)
	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.
Capital físico tecnológico (<i>k</i>)	-0,046*** (0,015)	0,067*** (0,023)	-0,041 (0,058)	-0,047 (0,062)	-0,054** (0,027)
Capital humano tecnológico (<i>h</i>)	-0,119*** (0,020)	-0,016 (0,035)	-0,046 (0,049)	-0,050 (0,074)	-0,023 (0,033)
Capital físico tecnológico defasado espacialmente (<i>Wk</i>)	0,014 (0,015)	0,000 (0,019)	-0,097 (0,062)	0,018 (0,023)	-0,035 (0,023)
Capital humano tecnológico defasado espacialmente (<i>Wh</i>)	-0,109*** (0,018)	-0,012 (0,029)	-0,056 (0,046)	0,009 (0,047)	-0,013 (0,029)
Demais variáveis de controle					
Variáveis climáticas	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Variáveis edáficas	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Variáveis de interdependência espacial	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
AIC	7.874,13	9.385,82	7.466,16	12.077,91	10.603,40
BIC	8.198,21	9.709,89	7.790,24	12.401,99	10.927,48
R2	0,760	0,679	0,772	0,479	0,603

(continua)

Variáveis explicativas	Milho	Perecíveis	Soja	Pasto	Floresta
	(<i>mlh</i>)	(<i>prc</i>)	(<i>sja</i>)	(<i>pt</i>)	(<i>ft</i>)
	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.
Capital físico tecnológico (<i>k</i>)	0,039 (0,030)	-0,013 (0,065)	0,193*** (0,033)	-0,031 (0,033)	-0,001 (0,065)
Capital humano tecnológico (<i>h</i>)	0,096*** (0,035)	0,008 (0,064)	0,093*** (0,029)	-0,154*** (0,041)	0,040 (0,107)
Capital físico tecnológico defasado espacialmente (<i>Wk</i>)	-0,049** (0,024)	-0,004 (0,040)	-0,048** (0,021)	-0,003 (0,025)	-0,063 (0,039)
Capital humano tecnológico defasado espacialmente (<i>Wh</i>)	-0,010 (0,031)	-0,022 (0,050)	-0,033 (0,025)	0,026 (0,031)	-0,039 (0,046)
Demais variáveis de controle					
Variáveis climáticas	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Variáveis edáficas	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Variáveis de interdependência espacial	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
AIC	8,986,99	13.135,09	6.012,57	6.787,38	9.699,60
BIC	9.311,06	13.459,17	6.336,65	7.111,45	10.023,6
R2	0,707	0,377	0,828	0,803	0,667

Notas: Os erros-padrão estimados são robustos e apresentados entre parênteses. *** Significativo em 1%; ** Significativo em 5%; * Significativo em 10%.

Fonte: Elaboração própria, utilizando *software* Stata 12.

A Hipótese 3 foi comprovada para algumas culturas, em especial para milho e soja, visto que seus coeficientes estimados para as variáveis capital físico tecnológico (*Wk*) e capital humano tecnológico (*Wh*) ambos defasados espacialmente foram estatisticamente significantes. Encontrou-se sinal negativo para ambos os casos, interpretado como um efeito concorrencial, ou seja, se um agricultor próximo geograficamente utiliza tecnologia e, por sua vez, é mais competitivo, atua como um desincentivo ao agricultor local em usar o solo para a mesma cultura. Tal evidência pode explicar porque as áreas de *clusters* destas atividades são tão concentradas (Figura 1). Fica claro através deste último resultado como o uso de tecnologia e seus possíveis *spillovers* na agricultura possui particularidades e menor difusão se comparada à tecnologia industrial, justificando a presença do Estado como agente central na produção e disseminação de conhecimento.

5 Considerações finais

Este artigo teve como objetivo entender a relação entre adoção de tecnologia e uso do solo agrícola e florestal nos municípios brasileiros. Diante disso, as questões que nortearam este estudo são: (i) qual o impacto de elementos tecnológicos (capital físico e humano) sobre o uso do solo agrícola e florestal no Brasil? e (ii) existe alguma influência da vizinhança nesta relação? Para tanto, as variáveis de uso do solo agrícola e florestal foram regredidas em relação às variáveis de capital físico e humano tecnológico. Além disso, outros fatores foram considerados nas equações, como condições climáticas, condições edáficas e interdependência espacial.

Visto que o recurso terra é limitado, e a decisão acerca de seu uso é interdependente e requer exclusividade do espaço (e.g. ao optar pelo uso lavoura implica em não escolher o uso para pasto ou floresta e vice-versa). Tem-se, portanto um problema de simultaneidade de

equações que explicam o uso da terra. Isto posto, a metodologia adotada segue a estrutura dos modelos de Sistema de Equações Simultâneas Espaciais.

Neste contexto, dois resultados encontrados merecem destaque. O primeiro, reside na constatação da possibilidade de expansão da atividade agrícola, em especial soja, milho e café, de modo concomitante à permanência da área florestal, desmistificando a ideia de *trade-off* entre os dois usos. Segundo, verificou-se ainda um efeito vizinhança negativo para os cultivos de milho e soja, confirmando a característica concorrencial presente no setor agrícola e reforçando a necessidade do setor público na difusão de novas informações.

Este artigo pretende contribuir para a literatura empírica sobre impactos da tecnologia agrícola sobre o uso do solo agrícola e florestal no Brasil abrindo um novo debate sobre esse tema de pesquisa. Extensões futuras poderiam considerar outras *proxies* para a variável tecnologia agrícola além de testar outros níveis de desagregação para a variável dependente. Ademais, este estudo serve como motivação para trabalhos futuros que podem avançar nesta temática, investigando os impactos da tecnologia agrícola sobre as áreas dos biomas.

Referências

- ADAMS, R. M. Global climate change and agriculture: an economic perspective. *American Journal of Agricultural Economics*, v. 71, n. 5, p. 1272–1279, 1989.
- ALMEIDA, E. *Econometria Espacial Aplicada*. Campinas: Alínea, 2012.
- ANSELIN, L. Local Indicators of Spatial Association - LISA. *Geographical Analysis*, v. 27, n. 2, p. 93–115, 1995.
- BAUMONT, C. Spatial effects in housing price models: do housing prices capitalize urban development policies in the agglomeration of Dijon (1999)? 2004.
- DECKER, W. L.; JONES, V. K.; ACHUTUNI, R. *The Impact of Climate Change from Increased Atmospheric Carbon Dioxide on American Agriculture*. . Washington: US Department of Energy. , 1986
- EVENSON, R. E.; ALVES, D. C. O. Technology, climate change, productivity and land use in Brazilian agriculture. *Planejamento e políticas públicas*, n. 18, 2009.
- FARIA, W. R.; HADDAD, E. A. Modeling land use and the effects of climate change in Brazil. *Climate Change Economics*, p. 37, 2017.
- FÉRES, J.; REIS, E.; SPERANZA, J. Mudanças climáticas globais e seus impactos sobre os padrões de uso do solo no Brasil. *XLVII Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural*, 2009.
- GREEN, R. E. *et al.* Farming and the fate of wild nature. *Science*, v. 307, n. 5709, p. 550–5, 2005.
- KELEJIAN, H. H.; ROBINSON, D. P. A suggested method of estimation for spatial interdependent models with autocorrelated errors, and an application to a county expenditure model. *Papers in regional science*, v. 72, n. 3, p. 297–312, 1993.
- LAMBIN, E. F. *et al.* The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global environmental change*, v. 11, n. 4, p. 261–269, 2001.
- NAVARRO, Z. *O mundo rural no Brasil do século 21 - A formação de um novo padrão agrário e agrícola*. Brasília: Embrapa, 2014.
- REY, S. J.; BOARNET, M. G. A. Taxonomy of spatial econometrics mode simultaneous equations systems. *Advances in spatial econometrics*. Nova York: Springer, 2004. .
- SANGHI, A. *et al.* Global warming impacts on Brazilian agriculture: estimates of the Ricardian model. *Economia Aplicada*, v. 1, n. 1, p. 7–33, 1997.
- SOUTHGATE, D.; SIERRA, R.; BROWN, L. The causes of tropical deforestation in

Ecuador: A statistical analysis. *World Development*, v. 19, n. 9, p. 1145–1151, 1991.
WU, J. *The Oxford handbook of land economics*. Oxford: Oxford University Press, 2014.

Apêndice

Tabela A1 - Critério de Baumont para seleção da matriz de defasagem espacial

Convenção	I de Moran	p-valor
Rainha (grau 1)	0,5952	0,001
Rainha (grau 2)	0,4338	0,001
Distância (d=10)	0,0060	0,001
1-vizinho mais próximo	0,6583	0,001
2-vizinhos mais próximos	0,6444	0,001
3-vizinhos mais próximos	0,6328	0,001
4- vizinhos mais próximos	0,6187	0,001
5- vizinhos mais próximos	0,6065	0,001
6- vizinhos mais próximos	0,5941	0,001
7- vizinhos mais próximos	0,5835	0,001
8- vizinhos mais próximos	0,5729	0,001
9- vizinhos mais próximos	0,5612	0,001
10- vizinhos mais próximos	0,5546	0,001

Fonte: Elaboração própria, utilizando *softwares* SpaceStat versão 1.80 e GeoDa.

Quadro A1 - Descrição das variáveis

Descrição		Fonte	Período
I. Variáveis Endógenas			
(N) Uso do solo			
<i>lt</i>	Área destinada a lavoura em relação ao total	Censo Agropecuário (IBGE)	2006
<i>cac</i>	Área de cultivo de cacau em relação a área total		
<i>caf</i>	Área de cultivo de café em relação a área total		
<i>can</i>	Área de cultivo de cana-de-açúcar em relação a área total		
<i>cas</i>	Área de cultivo de castanha em relação a área total		
<i>fjo</i>	Área de cultivo de feijão em relação a área total		
<i>mlh</i>	Área de cultivo de banana em relação a área total		
<i>prc</i>	Área de cultivo de alimentos perecíveis em relação a área total		
<i>sja</i>	Área de cultivo de soja em relação a área total		
<i>pt</i>	Área destinada a pasto em relação a área total		
<i>ft</i>	Área destinada a floresta em relação a área total		
II. Variáveis Exógenas			
(T) Tecnologia agrícola			
<i>k</i>	Número de tratores (com mais de 100 cv.) por estabelecimentos agrícolas	Censo Agropecuário (IBGE)	2006

(continua)

Descrição		Fonte	Período
<i>h</i>	Número de engenheiros agrícola, agrônomos e pesquisadores do ramo por estabelecimentos agrícolas	RAIS	2006
(C) Condições climáticas			
<i>tdjf</i>	Média de temperatura dos meses de dezembro/janeiro/fevereiro (em °C)	Climate Research Unit da University of East Anglia (CRU-UEA)	1961-1991
<i>tmam</i>	Média de temperatura dos meses de março/abril/maio (em °C)		
<i>tjja</i>	Média de temperatura dos meses de junho/julho/agosto (em °C)		
<i>tson</i>	Média de temperatura dos meses de setembro/outubro/novembro (em °C)		
<i>pdjf</i>	Média de precipitação dos meses de dezembro/janeiro/fevereiro (em mm)		
<i>pmam</i>	Média de precipitação dos meses de março/abril/maio (em mm)		
<i>pjja</i>	Média de precipitação dos meses de junho/julho/agosto (em mm)		
<i>pson</i>	Média de precipitação dos meses de setembro/outubro/novembro (em mm)		
<i>cdjf</i>	Interação entre as variáveis <i>tdjf</i> e <i>pdjf</i>	Elaboração própria	1961-1991
<i>cmam</i>	Interação entre as variáveis <i>tmam</i> e <i>pmam</i>		
<i>cjja</i>	Interação entre as variáveis <i>tjja</i> e <i>pjja</i>		
<i>cson</i>	Interação entre as variáveis <i>tson</i> e <i>pson</i>		
(E) Condições edáficas			
<i>damz</i>	Bioma - Amazônia (= 1)	Shapefile IBGE	2006
<i>dcer</i>	Bioma - Cerrado (= 1)		
<i>dmatl</i>	Bioma - Mata Atlântica (= 1)		
<i>dcaa</i>	Bioma - Caatinga (= 1)		
<i>dpmp</i>	Bioma - Pampa (= 1)		
<i>dptn</i>	Bioma - Pantanal (= 1)		
(S) Interação espacial			
<i>Wk, Wh</i>	Transbordamento tecnológico - média do número de tratores e profissionais qualificados nos vizinhos mais próximos	Elaboração própria	2006
<i>Wn</i>	Dependência espacial - demonstra a média da utilizada do solo tipo <i>n</i> nos vizinhos (padrões de uso do solo)		

Fonte: Elaboração própria.

Tabela A2 - Determinantes do uso da terra agrícola e florestal para o modelo 1: estimação por Sistema de Equações Simultâneas no Espaço. Período: 2006.

Variáveis explicativas	Lavoura	Pasto	Floresta
	(<i>lt</i>)	(<i>pt</i>)	(<i>ft</i>)
	Coef.	Coef.	Coef.
Constante (<i>c</i>)	0,065** (0,031)	0,120*** (0,035)	0,238*** (0,046)
Capital físico tecnológico (<i>k</i>)	0,075*** (0,019)	0,078*** (0,029)	0,074** (0,030)
Capital humano tecnológico (<i>h</i>)	0,037 (0,026)	0,024 (0,042)	0,046 (0,048)
Capital físico tecnológico defasado espacialmente (<i>Wk</i>)	0,019*** (0,007)	0,032* (0,018)	0,013 (0,014)
Capital humano tecnológico defasado espacialmente (<i>Wh</i>)	0,010 (0,015)	0,044** (0,017)	0,006 (0,021)
Clima - dezembro/janeiro/fevereiro (<i>cdjf</i>)	-0,240*** (0,087)	-0,245*** (0,086)	-0,228** (0,111)
Clima - março/abril/maio (<i>cmam</i>)	0,110** (0,051)	0,071 (0,071)	0,127* (0,066)
Clima - junho/julho/agosto (<i>cjja</i>)	-0,062 (0,058)	-0,114* (0,062)	-0,111 (0,075)
Clima - setembro/outubro/novembro (<i>cson</i>)	0,373*** (0,121)	0,421** (0,167)	0,489*** (0,138)
Clima - dezembro/janeiro/fevereiro ao quadrado (<i>cdjf2</i>)	0,053 (0,064)	0,001 (0,110)	-0,028 (0,111)
Clima - março/abril/maio ao quadrado (<i>cmam2</i>)	0,026 (0,041)	0,092 (0,061)	0,065 (0,056)
Clima - junho/julho/agosto ao quadrado (<i>cjja2</i>)	0,005 (0,023)	0,024 (0,026)	0,017 (0,032)
Clima - setembro/outubro/novembro ao quadrado (<i>cson2</i>)	-0,171** (0,071)	-0,159** (0,071)	-0,211** (0,090)
Bioma - Caatinga (<i>dcaa</i>)	-0,096** (0,041)	-0,193*** (0,045)	-0,240*** (0,061)
Bioma - Cerrado (<i>dcer</i>)	-0,063** (0,028)	-0,128*** (0,032)	-0,238*** (0,044)
Bioma - Pampa (<i>dpmp</i>)	-0,127*** (0,043)	-0,069 (0,042)	-0,314*** (0,059)
Bioma - Pantanal (<i>dptn</i>)	-0,083* (0,045)	-0,017 (0,046)	-0,076 (0,072)
Bioma - Mata Atlântica (<i>dmatl</i>)	-0,064* (0,035)	-0,128*** (0,038)	-0,282*** (0,053)

(continua)

Variáveis explicativas	Lavoura	Pasto	Floresta
	(<i>lt</i>)	(<i>pt</i>)	(<i>ft</i>)
	Coef.	Coef.	Coef.
Pasto (<i>prpt</i>)	-0,626*** (0,127)	-	-0,625*** (0,186)
Floresta (<i>prft</i>)	-0,768*** (0,152)	-0,966*** (0,319)	-
Lavoura defasado espacialmente (<i>prWlt</i>)	-0,141 (0,176)	-0,275 (0,320)	-0,200 (0,254)
Pasto defasado espacialmente (<i>prWpt</i>)	-0,258 (0,204)	-0,179 (0,312)	-0,372 (0,294)
Floresta defasado espacialmente (<i>prWft</i>)	-0,123 (0,147)	-0,285 (0,221)	-0,191 (0,267)
AIC	4.465,00	5.201.44	8.139.95
BIC	4.663,41	5.399.85	8.338.36
R2	0,869	0,851	0,747

Notas: Os erros-padrão estimados são robustos e apresentados entre parênteses. *** Significativo em 1%; ** Significativo em 5%; * Significativo em 10%.

Fonte: Elaboração própria, utilizando *software* Stata 12.

Tabela A3 - Determinantes do uso da terra agrícola e florestal para o modelo 2: estimação por Sistema de Equações Simultâneas no Espaço. Período: 2006.

Variáveis explicativas	Cacau	Café	Cana	Castanha	Feijão
	(<i>cac</i>)	(<i>caf</i>)	(<i>can</i>)	(<i>cas</i>)	(<i>fjo</i>)
	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.
Constante (<i>c</i>)	-0,006 (0,017)	0,033 (0,020)	0,065** (0,028)	-0,082** (0,035)	-0,031 (0,031)
Capital físico tecnológico (<i>k</i>)	-0,046*** (0,015)	-0,067*** (0,023)	-0,041 (0,058)	-0,047 (0,062)	-0,054** (0,027)
Capital humano tecnológico (<i>h</i>)	-0,119*** (0,020)	-0,016 (0,035)	-0,046 (0,049)	-0,050 (0,074)	-0,023 (0,033)
Capital físico tecnológico defasado espacialmente (<i>Wk</i>)	0,014 (0,015)	0,000 (0,019)	-0,097 (0,062)	0,018 (0,023)	-0,035 (0,023)
Capital humano tecnológico defasado espacialmente (<i>Wh</i>)	-0,109*** (0,018)	-0,012 (0,029)	-0,056 (0,046)	0,009 (0,047)	-0,013 (0,029)
Clima - dezembro/janeiro/fevereiro (<i>cdjf</i>)	-0,094 (0,067)	-0,119 (0,106)	-0,095 (0,119)	-0,003 (0,158)	0,034 (0,118)
Clima - março/abril/maio (<i>cmam</i>)	0,192*** (0,057)	-0,021 (0,075)	-0,060 (0,149)	-0,175 (0,229)	-0,151 (0,109)
Clima - junho/julho/agosto (<i>cjja</i>)	0,041 (0,042)	-0,026 (0,053)	-0,009 (0,086)	0,064 (0,101)	0,231*** (0,087)

(continua)

Variáveis explicativas	Cacau	Café	Cana	Castanha	Feijão
	(<i>cac</i>)	(<i>caf</i>)	(<i>can</i>)	(<i>cas</i>)	(<i>fjo</i>)
	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.
Clima - março/abril/maio ao quadrado (<i>cmam2</i>)	-0,045 (0,046)	0,175** (0,085)	0,105 (0,139)	0,036 (0,128)	0,283*** (0,108)
Clima - junho/julho/agosto ao quadrado (<i>cjja2</i>)	-0,059** (0,024)	-0,055 (0,036)	-0,013 (0,075)	0,024 (0,053)	-0,172*** (0,040)
Clima - setembro/outubro/novembro ao quadrado (<i>cson2</i>)	0,041 (0,034)	0,015 (0,044)	-0,010 (0,072)	-0,174 (0,140)	-0,185** (0,082)
Bioma - Caatinga (<i>dcaa</i>)	0,031 (0,028)	-0,081*** (0,030)	-0,16*** (0,038)	0,198*** (0,059)	0,102 (0,071)
Bioma - Cerrado (<i>dcer</i>)	0,023 (0,017)	-0,104*** (0,021)	-0,07*** (0,025)	0,072** (0,033)	-0,081*** (0,027)
Bioma - Pampa (<i>dpmp</i>)	-0,026 (0,023)	0,008 (0,032)	-0,20*** (0,047)	0,116*** (0,045)	-0,002 (0,043)
Bioma - Pantanal (<i>dptn</i>)	0,016 (0,018)	-0,011 (0,029)	-0,13*** (0,042)	0,131*** (0,045)	0,061 (0,044)
Bioma - Mata Atlântica (<i>dmatl</i>)	0,028 (0,019)	0,023 (0,026)	-0,042 (0,034)	0,118*** (0,039)	-0,074** (0,032)
Cacau (<i>prcac</i>)	-	(omitido)	(omitido)	-0,119 (0,218)	(omitido)
Café (<i>prcaf</i>)	(omitido)	-	(omitido)	(omitido)	(omitido)
Cana-de-açúcar (<i>prcan</i>)	-0,486*** (0,056)	0,040 (0,067)	-	-0,058 (0,140)	0,119 (0,088)
Castanha (<i>prcas</i>)	-0,074 (0,12)	0,422** (0,170)	0,234 (0,195)	-	0,651*** (0,204)
Feijão (<i>prfjo</i>)	(omitido)	(omitido)	(omitido)	(omitido)	-
Milho (<i>prmlh</i>)	(omitido)	(omitido)	(omitido)	0,410 (0,416)	(omitido)
Perecíveis (<i>prprc</i>)	-0,736*** (0,131)	0,197 (0,254)	0,152 (0,384)	-0,634 (0,504)	-0,079 (0,296)
Soja (<i>prsj</i>)	(omitido)	(omitido)	(omitido)	(omitido)	(omitido)
Pasto (<i>prpt</i>)	(omitido)	(omitido)	(omitido)	(omitido)	(omitido)
Floresta (<i>prft</i>)	-0,907*** (0,149)	-0,296 (0,252)	-0,253 (0,274)	(omitido)	-0,564** (0,261)
Cacau defasado espacialmente (<i>prWcac</i>)	(omitido)	(omitido)	(omitido)	(omitido)	(omitido)
Café defasado espacialmente (<i>prWcaf</i>)	-0,008 (0,08)	0,661 (0,160)	0,009 (0,155)	-0,545* (0,281)	0,066 (0,149)
Cana-de-açúcar defasado espacialmente (<i>prWcan</i>)	(omitido)	(omitido)	1,150*** (0,212)	(omitido)	(omitido)
Castanha defasado espacialmente (<i>prWcas</i>)	(omitido)	(omitido)	(omitido)	0,849*** (0,206)	(omitido)

(continua)

Variáveis explicativas	Cacau	Café	Cana	Castanha	Feijão
	(<i>cac</i>)	(<i>caf</i>)	(<i>can</i>)	(<i>cas</i>)	(<i>fjo</i>)
	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.
Perecíveis defasado espacialmente (<i>prWprc</i>)	0,413** (0,193)	-0,096 (0,247)	-0,243 (0,267)	(omitido)	-0,246 (0,309)
Soja defasado espacialmente (<i>prWsja</i>)	-0,366*** (0,064)	-0,049 (0,078)	0,225 (0,169)	-0,411** (0,197)	-0,035 (0,106)
Pasto defasado espacialmente (<i>prWpt</i>)	-0,439*** (0,111)	0,181 (0,105)	0,112 (0,143)	-0,209** (0,098)	0,160 (0,144)
Floresta defasado espacialmente (<i>prWft</i>)	-0,205*** (0,062)	0,078 (0,081)	-0,001 (0,149)	0,096 (0,131)	0,094 (0,110)
AIC	7.874,13	9.385,82	7.466,16	12.077,91	10.603,40
BIC	8.198,21	9.709,89	7.790,24	12.401,99	10.927,48
R2	0,760	0,679	0,772	0,479	0,603

Variáveis explicativas	Milho	Perecíveis	Soja	Pasto	Floresta
	(<i>mlh</i>)	(<i>prc</i>)	(<i>sja</i>)	(<i>pt</i>)	(<i>ft</i>)
	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.
Constante (<i>c</i>)	-0,016 (0,028)	0,064 (0,045)	0,050** (0,025)	0,147*** (0,036)	0,242*** (0,056)
Capital físico tecnológico (<i>k</i>)	0,039 (0,030)	-0,013 (0,065)	0,193*** (0,033)	-0,031 (0,033)	-0,001 (0,065)
Capital humano tecnológico (<i>h</i>)	0,096*** (0,035)	0,008 (0,064)	0,093*** (0,029)	-0,15*** (0,041)	0,040 (0,107)
Capital físico tecnológico defasado espacialmente (<i>Wk</i>)	-0,049** (0,024)	-0,004 (0,040)	-0,048** (0,021)	-0,003 (0,025)	-0,063 (0,039)
Capital humano tecnológico defasado espacialmente (<i>Wh</i>)	-0,010 (0,031)	-0,022 (0,050)	-0,033 (0,025)	0,026 (0,031)	-0,039 (0,046)
Clima - dezembro/janeiro/fevereiro (<i>cdjf</i>)	0,077 (0,120)	-0,201 (0,177)	-0,298*** (0,106)	-0,313** (0,134)	-0,072 (0,218)
Clima - março/abril/maio (<i>cmam</i>)	-0,030 (0,094)	-0,069 (0,125)	0,053 (0,075)	-0,070 (0,105)	-0,001 (0,140)
Clima - junho/julho/agosto (<i>cjja</i>)	0,248*** (0,079)	-0,008 (0,108)	0,081 (0,064)	-0,169** (0,0084)	0,119 (0,155)
Clima - setembro/outubro/novembro (<i>cson</i>)	0,150 (0,117)	0,109 (0,233)	0,205** (0,089)	-0,294** (0,134)	0,222 (0,207)
Clima - dezembro/janeiro/fevereiro ao quadrado (<i>cdjf2</i>)	-0,113 (0,122)	0,223 (0,226)	0,017 (0,100)	0,382*** (0,129)	-0,057 (0,227)

(continua)

Variáveis explicativas	Milho	Perecíveis	Soja	Pasto	Floresta
	(<i>mlh</i>)	(<i>prc</i>)	(<i>sj</i>)	(<i>pt</i>)	(<i>ft</i>)
	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.
Clima - setembro/outubro/novembro ao quadrado (<i>cson2</i>)	0,017 (0,067)	-0,105 (0,150)	0,041 (0,054)	0,089 (0,089)	-0,013 (0,139)
Bioma - Caatinga (<i>dcaa</i>)	0,006 (0,041)	-0,034 (0,066)	-0,046 (0,029)	-0,17*** (0,049)	-0,24*** (0,069)
Bioma - Cerrado (<i>dcer</i>)	-0,047 (0,027)	-0,099** (0,041)	-0,034 (0,027)	-0,16*** (0,034)	-0,31*** (0,050)
Bioma - Pampa (<i>dpmp</i>)	-0,264*** (0,055)	-0,071 (0,074)	-0,049 (0,065)	-0,104* (0,061)	-0,43*** (0,078)
Bioma - Pantanal (<i>dptn</i>)	-0,057 (0,067)	-0,012 (0,041)	-0,133 (0,128)	0,018 (0,056)	-0,039 (0,086)
Bioma - Mata Atlântica (<i>dmatl</i>)	-0,016 (0,030)	-0,037 (0,046)	-0,043 (0,027)	-0,13*** (0,041)	-0,32*** (0,060)
Cacau (<i>prcac</i>)	(omitido)	(omitido)	(omitido)	(omitido)	(omitido)
Café (<i>prcaf</i>)	(omitido)	0,799 (0,647)	(omitido)	(omitido)	(omitido)
Cana-de-açúcar (<i>prcan</i>)	-0,399*** (0,099)	-0,287 (0,182)	-0,257*** (0,081)	-0,30*** (0,091)	-0,361 (0,272)
Castanha (<i>prcas</i>)	0,316* (0,175)	-0,086 (0,342)	-0,034 (0,134)	-0,398** (0,202)	0,385 (0,237)
Feijão (<i>prfjo</i>)	(omitido)	(omitido)	(omitido)	(omitido)	(omitido)
Milho (<i>prmlh</i>)	-	(omitido)	(omitido)	(omitido)	-0,812* (0,484)
Perecíveis (<i>prprc</i>)	-0,021 (0,281)	-	-0,701*** (0,221)	0,060 (0,344)	-0,255 (0,479)
Soja (<i>prsj</i>)	(omitido)	(omitido)	-	(omitido)	(omitido)
Pasto (<i>prpt</i>)	(omitido)	(omitido)	(omitido)	-	(omitido)
Floresta (<i>prft</i>)	-0,840*** (0,269)	-0,339 (0,483)	-0,609*** (0,224)	0,231 (0,286)	-
Cacau defasado espacialmente (<i>prWcac</i>)	(omitido)	(omitido)	(omitido)	(omitido)	(omitido)
Café defasado espacialmente (<i>prWcaf</i>)	0,783*** (0,139)	-0,962 (0,738)	0,376*** (0,116)	-0,015 (0,155)	0,693** (0,303)
Cana-de-açúcar defasado espacialmente (<i>prWcan</i>)	(omitido)	(omitido)	(omitido)	(omitido)	(omitido)
Castanha defasado espacialmente (<i>prWcas</i>)	(omitido)	(omitido)	(omitido)	(omitido)	(omitido)
Feijão defasado espacialmente (<i>prWfjo</i>)	0,222** (0,101)	-0,163 (0,215)	-0,177** (0,080)	-0,32*** (0,100)	0,023 (0,234)
Milho defasado espacialmente (<i>prWmlh</i>)	(omitido)	(omitido)	(omitido)	(omitido)	(omitido)

(continua)

Variáveis explicativas	Milho (<i>mlh</i>)	Perecíveis (<i>prc</i>)	Soja (<i>sjá</i>)	Pasto (<i>pt</i>)	Floresta (<i>ft</i>)
	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.
Pasto defasado espacialmente (<i>prWpt</i>)	-0,353** (0,170)	-0,476* (0,249)	-0,379** (0,150)	0,259* (0,135)	-0,368 (0,291)
Floresta defasado espacialmente (<i>prWft</i>)	-0,140 (0,114)	-0,044 (0,169)	-0,004 (0,098)	-0,55*** (0,184)	-0,233 (0,323)
AIC	8.986,99	13.135,09	6.012,57	6.787,38	9.699,60
BIC	9.311,06	13.459,17	6.336,65	7.111,45	10.023,6
R2	0,707	0,377	0,828	0,803	0,667

Notas: Os erros-padrão estimados são robustos e apresentados entre parênteses. Algumas variáveis foram omitidas devido a problemas de multicolinearidade. *** Significativo em 1%; ** Significativo em 5%; * Significativo em 10%.

Fonte: Elaboração própria, utilizando *software* Stata 12.