

Influência da Evolução do Uso e Ocupação do Solo do Município de Lucena-PB no Armazenamento de Carbono: Projeções para os anos de 2030 e 2040

Influence of the Evolution of the Land Use and Land Cover of the Municipality of Lucena-PB in the Carbon Storage: Projections for the Years 2030 and 2040

Ivanhoé Soares Bezerra  & Tarciso Cabral da Silva 

Universidade Federal da Paraíba, Engenharia Civil e Ambiental, João Pessoa, PB, Brasil

E-mails: ivanhoe.bezerra@gmail.com; tarcisocabral@gmail.com

Autor Correspondente: Ivanhoé Soares Bezerra; ivanhoe.bezerra@gmail.com

Resumo

O processo de mudança do uso e ocupação do solo (UOS), com destaque para o desmatamento da Mata Atlântica, é um dos principais fatores que influenciam o fenômeno do aquecimento global, visto que significativas quantidades de carbono deixam de ser retidas e são liberadas na atmosfera. Esse processo vem sendo observado em quase toda a Zona Costeira brasileira, na qual está inserido o município de Lucena, no estado da Paraíba. Diante desta problemática, o presente estudo objetivou avaliar quantitativamente e espacialmente o estoque de carbono decorrente das mudanças do UOS, para os períodos pretéritos de 1994 a 2018 e futuros de 2030 e 2040, considerando as suas tendências de alteração em Lucena. Para isso foram integradas duas metodologias o LCM (*Land Change Modeler*) para simulação do UOS futuro e o CSS (*Carbon Storage and Sequestration*) para a quantificação do estoque de carbono. A análise preditiva realizada para os anos de 2030 e 2040 indicou uma tendência de crescimento da área urbana, destacando-se a ocupação ao longo da planície litorânea e na porção mais oriental do Tabuleiro Costeiro. Em sentido oposto, a Mata Atlântica é que apresenta a maior redução, estimando-se que até o ano de 2040 ocorra uma redução de 3% por ano, de forma que a cobertura florestal do município corresponda a apenas 9,82% do seu território. Em relação ao estoque total de carbono a tendência é a redução da capacidade de retenção por hectare, estimando-se que até o ano de 2040 haverá uma redução de 48,04% do armazenamento observado no ano de 1994. Assim, pôde ser concluído que a diminuição do estoque de carbono em Lucena é fortemente influenciada pelo UOS e pelo desmatamento da Mata Atlântica.

Palavras-chave: Biomassa; Desmatamento; Mata Atlântica

Abstract

The process of changing land use and land cover (LULC), with emphasis on deforestation in the Atlantic Forest, is one of the main factors that influence the phenomenon of global warming, considering that significant amounts of carbon are any retained and released in the atmosphere. This process is observed throughout the Brazilian Coastal Zone, in which the municipality of Lucena is located, in the state of Paraíba. In view of this issue, this study aimed to assessing quantitatively and spatiality the carbon stock resulting from the changes in the LULC, for the past periods from 1994 to 2018 and future periods of 2030 and 2040, considering the trend of alteration in land use and occupation. Two methodologies were integrated, the LCM (*Land Change Modeler*) for simulating the future LULC and the CSS (*Carbon Storage and Sequestration*) for the quantification of the carbon stock. The analysis carried out for the years 2030 and 2040 indicated a growth trend in the urban area, highlighting the occupation along the coastal plain and in the easternmost portion of the Coastal Tableland. In the opposite direction, the Atlantic Forest presents the greatest reduction, since estimations show that by the year 2040 there will be a reduction of 3% per year, so that the forest cover of the municipality of Lucena will correspond to 9.82% of its territory. In relation to the total carbon stock, the tendency is the reduction of the retention capacity per hectare, with estimates that by the year 2040 there will be a reduction of 48.04% in the storage observed in the year 1994. Therefore, the decrease in the carbon stock in Lucena strong influenced by LULC and deforestation in the Atlantic Forest.

Keywords: Biomass; Deforestation; Atlantic Forest

1 Introdução

A avaliação da evolução do uso e ocupação do solo (UOS) possibilita um entendimento dos processos de formação do território que, em muitos casos, não é suficiente para um planejamento ambiental adequado. Quando se trata de gestão espacial, os cenários preditivos se apresentam como ferramentas que proporcionam uma gestão pública eficiente e sustentável (Rezende et al. 2018).

A simulação do UOS futuro possibilita uma série de análises espaciais, entre as quais podem ser destacados os estudos que visam compreender a evolução da cobertura florestal e sua substituição por agricultura (Tornquist & Silva 2019), a evolução das áreas urbanas visando dar suporte aos planejadores e tomadores de decisão na construção de um ambiente mais sustentável (Wang et al. 2018) e a interferência nos processos hidrológicos e consequências nos processos biofísicos e na precipitação regional (Quesada et al. 2017). A simulação para os cenários dos UOS futuros vem sendo amplamente realizada com a utilização de Redes Neurais artificiais (Doğan & Buğday 2018; Qiang & Lam 2015; Silva et al. 2020), por permitir a resolução de problemas como complexos, uma vez que são capazes de aprender a partir de exemplos e com isto generalizar a informação, sendo fundamental o processo de treinamento e validação (Fleck et al. 2016)

Dentre os diversos relatos de modelagem com a utilização de redes neurais, destaca-se o uso do Perceptron Multicamadas (MLP) que consiste em um modelo com três camadas que pode identificar relações que são não lineares na natureza e tomar decisões sobre qual parâmetro usar na modelagem e que modificações realizar de forma a obter o melhor resultado (Dzieszko 2014). Para as previsões se utiliza da Cadeia de Markov, que é um processo que se caracteriza pela determinação do estado futuro em função apenas do estado atual, onde os estados pretéritos não exercem influência sobre o estado futuro (Levin & Peres 2017).

Outra aplicação que utiliza dados de previsão do UOS é a simulação das mudanças climáticas. Observações em estudos de modelagem ambiental indicam que as mudanças no uso e ocupação do solo desempenham um papel importante nos processos biofísicos e bioquímicos e, conseqüentemente, no sistema climático (Mahmood et al. 2016).

As mudanças climáticas decorrentes da emissão dos gases de efeito estufa (GEE) estão trazendo uma série de consequências ambientais. A influência humana é evidente e, recentemente, as emissões atmosféricas antropogênicas alcançaram os maiores valores da história. A manutenção desses níveis de emissão causará grandes mudanças em todos os componentes ambientais, com impactos irreversíveis tanto para as pessoas como para os ecossistemas (IPCC 2017).

Como consequência, observa-se que os regimes das chuvas sofrem alteração e os eventos extremos são intensificados (Silva et al. 2017). Estas mudanças têm potencial para afetar diretamente os processos oceânicos e atmosféricos, pondo em risco a vida de milhares de pessoas que vivem nas Zonas Costeiras (Fernandino et al. 2018).

As mudanças climáticas, principalmente o aumento das médias de temperaturas, interferem diretamente no uso e ocupação do solo (UOS), com destaque para as alterações causadas na cobertura vegetal (Turner et al. 2015).

A predição de cenários futuros de uso e ocupação do solo permite uma melhor estimativa das emissões atmosféricas dos gases de efeito estufa e, conseqüentemente, a construção de cenários que possibilitem o sequestro de carbono com estratégia para mitigação.

Com o objetivo de estimar as emissões de GEE, Göpel et al. (2017), identificaram que a mudança no padrão do UOS do sudoeste da Amazônia, decorrente da pressão pela ampliação das atividades agrícolas, irá influenciar fortemente a liberação de GEE.

Buscando o entendimento do armazenamento e sequestro do carbono, Solomon et al. (2018) estimaram, temporal e espacialmente, o efeito da mudança do UOS na dinâmica dos estoques de carbono na floresta de Wujig Mahgo Waren no nordeste da Etiópia e concluíram que esse processo explica 59% da variação do carbono orgânico no solo.

Sleeter et al. (2015) afirmam que o incremento nas mudanças do UOS com a substituição intensa de áreas florestadas por áreas cultivadas resulta na perda do estoque de carbono no ecossistema e conseqüentemente este carbono livre na atmosfera favorece o processo de mudanças climáticas.

Yu et al. (2018) analisaram os estoques de carbono no meio-oeste norte americano tomado como base a evolução do UOS no período de 1850 a 2015. Este estudo identificou uma redução de 1,35 Pg no carbono presente na Biomassa Viva e uma diminuição contínua do carbono orgânico do solo em 45% da área estudada, indicando que o UOS desempenha um papel essencial no equilíbrio regional do carbono, sendo o manejo sustentável da terra benéfico para o sequestro de carbono.

Diao et al. (2020) estudando a evolução do UOS na Baía de Chesapeake no período de 2001 e 2011, com destaque para as transições entre terras agrícolas e áreas florestadas, identificaram uma redução significativa nas áreas florestadas; no entanto, a implantação de sistemas agroflorestais importaram em um aumento de 13 Tg no estoque total de carbono enquanto que o desenvolvimento da urbanização e das práticas agrícolas foram responsáveis pela perda de carbono.

Observa-se que existe uma forte correlação entre os processos de mudança do UOS, armazenamento de carbono e mudanças climáticas, o que indica que se deve buscar um desenvolvimento sustentável do território.

A Zona Costeira (ZC) brasileira vem passando por um intenso processo de alteração do UOS, com destaque para o crescimento acelerado do processo de urbanização (Silva & Farias Filho 2015), o que traz como consequência uma redução do estoque de carbono decorrente da substituição da cobertura vegetal responsável pelo sequestro e substituição por usos antrópicos.

Pavani et al. (2018) analisaram as perdas de carbono total no litoral norte do estado de São Paulo e identificaram que em 20 anos perdeu-se cerca de 3,7 Mg de carbono, correspondendo a uma perda monetária de US\$ 47 milhões, sendo esse processo prioritariamente ligado a supressão de vegetação nativa e outras atividades antrópicas.

Inserido em um contexto semelhante de mudanças do UOS, com intenso processo de desmatamento, está o município de Lucena, localizado na ZC Norte do estado da Paraíba, que entre os anos de 1972 e 2018, sofreu alterações em 63,77% do território, com a substituição da cobertura vegetal por culturas agrícolas e urbanização. Assim, no município foi observada a ocorrência da vegetação de Mata Atlântica em apenas 18,38% de sua área (Barbosa Segundo et al. 2016), sugerindo significativas reduções nos estoques de carbono.

Tomando como base a evolução espacial do território do município de Lucena-PB, é realizada, neste trabalho,

uma avaliação quantitativa e espacial do estoque de carbono decorrente das mudanças do UOS, para os períodos pretéritos de 1994 a 2018 e futuros de 2030 e 2040, considerando a tendência de alteração no uso e ocupação do solo decorrente da expansão das atividades antrópicas.

2 Metodologia e Dados

2.1 Caracterização da Área em Estudo

O município de Lucena (Figura 1), na Região Geográfica Intermediária de João Pessoa no estado da Paraíba, está inserido entre os paralelos de 6°50' S e 7°00' S e os meridianos de 34°50' O e 35°00' O. Limita-se a norte com o município de Rio Tinto pelo talvegue do rio Miriri, a leste com o Oceano Atlântico, a sul com os municípios de Santa Rita e Cabedelo pelo rio Soé, e a oeste com o município de Santa Rita por divisas secas.

O município de Lucena, no estado da Paraíba caracteriza-se por estar inserido na área de ocorrência da Formação Barreiras, onde se observam duas unidades, os Tabuleiros Costeiros e a Planície Litorânea (Furrier et al. 2006), que propicia uma divisão bem definida do uso do solo. Os solos que ocorrem na área de estudo se correlacionam com os aspectos geomorfológicos dominantes, sendo observados latossolos e argissolos nos Tabuleiros Costeiros e gleissolos e neossolos na Planície Litorânea (Santos et al. 2018).

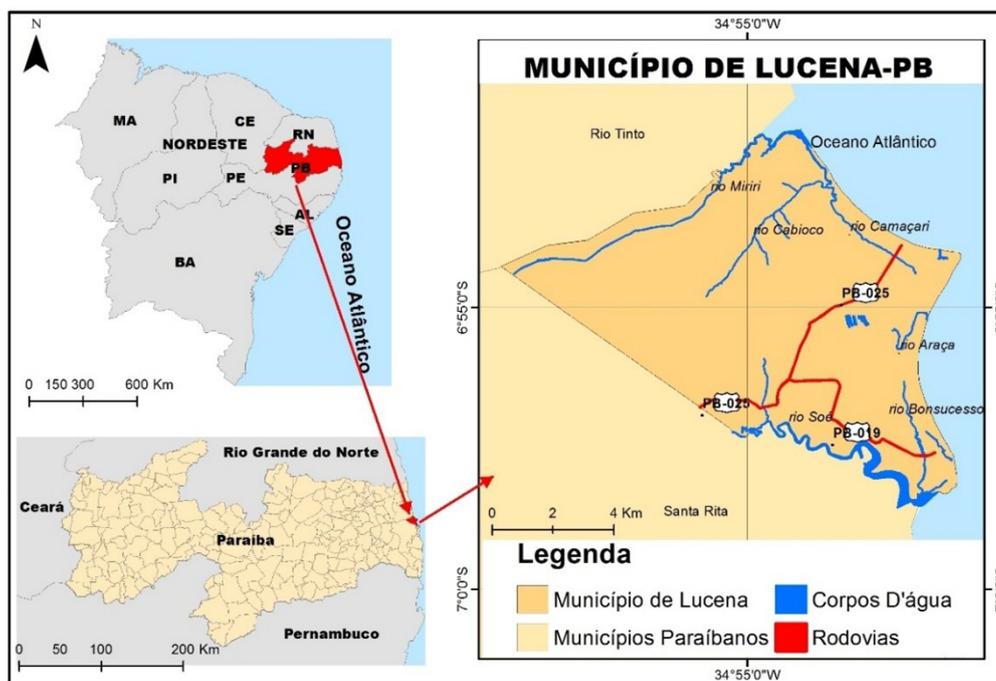


Figura 1 Mapa de localização do município de Lucena-PB.

Nos Tabuleiros Costeiros predominam as atividades agrícolas e na Planície Litorânea a ocupação urbana, desenvolvidas após um intenso processo de desmatamento da Mata Atlântica ocorrido nos últimos 50 anos.

Originalmente, a cobertura vegetal era a Mata Atlântica, a qual pode ser observada nos remanescentes florestais, classificados como Área de Tensão Ecológica/Savana/Floresta Estacional, Floresta Estacional Semidecidual (*Lei nº 11428 2006*) e vegetação de mangue.

2.2 Procedimentos Metodológicos

Para a avaliação quantitativa e espacial do estoque de carbono decorrente das mudanças do UOS no município de Lucena, no estado da Paraíba foram integradas duas metodologias (Figura 2) o LCM (*Land Change Modeler*) para simulação do UOS futuro (Dzieszko 2014) e o CSS (*Carbon Storage and Sequestration*) para a quantificação do estoque de carbono (Pavani et al. 2018).

A simulação temporal considerou um planejamento a médio prazo, com simulações para os períodos de 10 e 20 anos, respectivamente 2030 e 2040, tendo em vista que períodos maiores poderiam apresentar um elevado grau de incerteza.

Em relação ao LCM é importante destacar que o modelo de predição se baseia em padrões de ocupação pretéritos. Em muitos casos, estes modelos não conseguem retratar influências externas tais como investimento privados e políticas públicas (Dzieszko 2014), que são elementos complexos e dependentes de variáveis não mensuráveis sujeitas a intensa influência antrópica.

Para a simulação do UOS futuro utilizou-se o mapeamento de UOS desenvolvido referente aos anos de 1994, 2005 e 2018, conforme Figura 3.

Inicialmente, utilizou-se o software *TerrSet* para a análise das mudanças pretéritas de UOS, permitindo identificar a transição do UOS para os anos de 1994-2005, o que deu suporte para a definição das variáveis *drivers* que foram utilizadas no processo de predição das mudanças do UOS.

As transições potenciais de UOS foram identificadas e modeladas com o LCM e as transições foram agrupadas em submodelos, de forma que as mudanças ocorridas entre os anos de 1994 e 2005 serviram para a predição dos cenários futuros.

Para a definição do modelo de transição foram estabelecidos quatro submodelos de transição. Inicialmente foi realizada a conversão das variáveis usando a transformação do tipo natural log. A determinação do potencial de correlação da variável foi realizada com base na análise do índice V de *Cramer*, conforme proposto por Dzieszko (2014), selecionando-se aquelas que apresentaram valor entre 0,3 e 0,4.

Definidos os submodelos, foi possível realizar a predição do UOS para o ano de 2018. Neste processo foi utilizado a rede neural Perceptron Multicamadas MLP (Eastman 2016) associada a Cadeia de *Markov* para geração da matriz de transição, que permitiu determinar as mudanças que irão ocorrer para uma determinada data em função das transições potenciais determinadas (Dzieszko 2014).

O mapa de UOS simulado para o ano de 2018 foi comparado ao mapa de UOS-2018 utilizando o método *CrossTab*, o que permitiu o cálculo de dois índices de qualidade, o Índice Kappa, que possibilitou o cálculo do grau de concordância (Landis & Koch 1977) entre dois mapas e o V de *Cramer* para o cálculo da correlação entre duas tabelas.

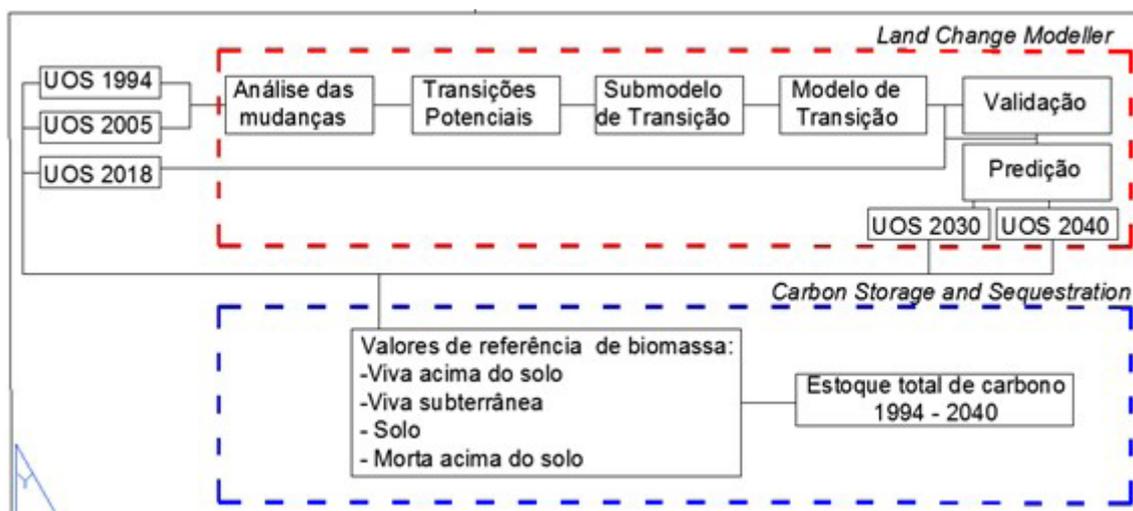


Figura 2 Fluxograma da análise da influência da evolução temporal do UOS no armazenamento de carbono no município de Lucena-PB.

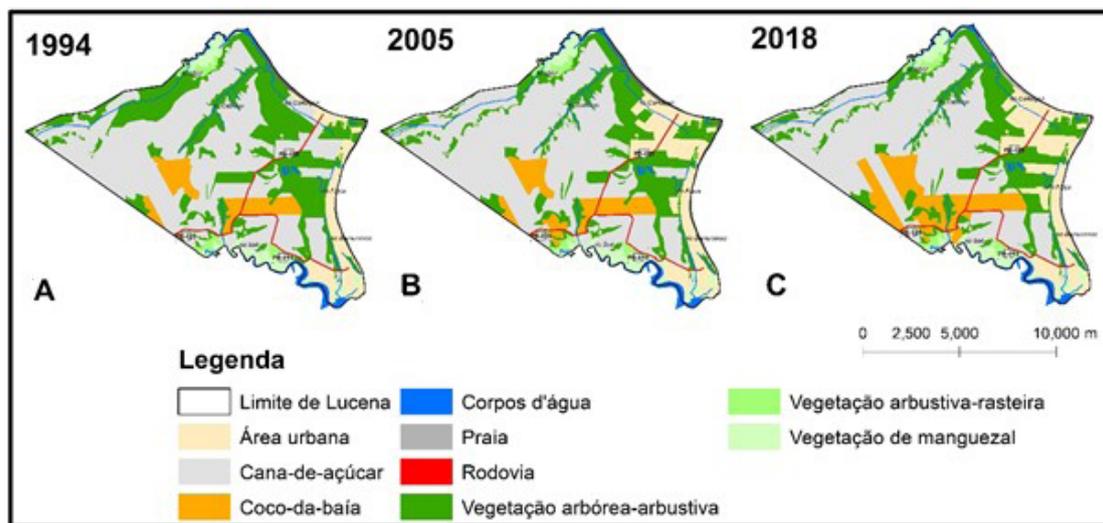


Figura 3 UOS do município de Lucena dos anos de 1994 a 2018: A. 1994; B. 2005; C. 2018.

Para a validação desse resultado utilizou-se o método *Validate* que indica a qualidade da concordância entre os mapas em termos de quantidade de células em cada categoria e em termo de espacialização das células em cada categoria; nessa análise foi feita uma separação em componentes que permitiram identificar o grau de concordância e discordância entre os mapas, possibilitando a calibração e validação do modelo e posteriormente a predição para os anos de 2030 e 2040.

Para a determinação do estoque de carbono utilizou-se o software *Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs* (InVEST) 3.7.0, módulo *Carbon Model*. Como entrada para o modelo se utilizou os mapas de UOS dos anos de 1994, 2005, 2018, 2030 e 2040 convertidos para o formato raster e os valores de referência para os quatro compartimentos de biomassa em Mg/ha: viva acima do solo, viva subterrânea, do solo e morta acima do solo, os quais são definidos para cada classe de uso e ocupação e calculados por célula do raster. A definição dos valores de referência de biomassa considerou as tipologias de UOS e as correlacionou com as especificações presentes no Terceiro Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa (MCT 2015), possibilitando a quantificação e a espacialização dos estoques de carbono apresentados em forma de gráficos e cartas.

3 Resultados

3.1 Evolução do UOS e Predição para os Anos de 2030 e 2040

A análise da evolução do UOS do município de Lucena, no estado da Paraíba, indicou que o município

passou nos últimos anos por processos significativos de substituição de usos com destaque para o desmatamento da Mata Atlântica e a substituição por culturas agrícolas e áreas urbanas.

O elemento principal para a predição do uso futuro é a determinação dos fatores chaves para a mudança do UOS observado ao longo dos anos. As principais sucessões do UOS observadas ao longo dos anos foram: i) Mata Atlântica por cana-de-açúcar; ii) cana-de-açúcar por área urbana; iii) cana-de-açúcar por coco-da-baía; e iv) Mata Atlântica por área urbana.

A análise das variáveis com base no teste de V de Cramer, permitiu selecionar aquelas que integrariam os submodelos, conforme se observa na Tabela 1.

Todas as variáveis analisadas apresentaram uma boa resposta ao teste V de Cramer, com o menor valor para a vegetação arbórea-arbustiva e o maior valor para a praia, com uma variação entre 0,3009 e 0,4186, atendendo assim a recomendação para valores entre 0,3 e 0,4 (Dzieszko 2014), o que possibilitou que fossem incorporadas ao modelo.

Tabela 1 Variáveis e resultado do teste V de Cramer.

Variável	V de Cramer
Área urbana	0,3436
Vegetação arbustiva-rasteira	0,3909
Vegetação arbórea-arbustiva	0,3009
Vegetação de manguezal	0,4055
Cana-de-açúcar	0,3288
Coco-da-baía	0,3543
Corpos d'água	0,3891
Praia	0,4186
Rodovias	0,3810

Com a análise das variáveis foi possível a definição dos submodelos de transição conforme observado na Tabela 2.

Analisando a Tabela 2, verifica-se que as taxas de precisão das transições potenciais foram superiores em 90% para todos os submodelos, o que serviram de *drivers* para a matriz de transição utilizada para a geração do UOS-simulado para o ano de 2018.

O mapa de UOS simulado para o ano de 2018 foi comparado ao mapa de UOS-2018, conforme se observa no Tabela 3. O resultado obtido para o Índice Kappa (0,9147), e o V de *Cramer* (0,9330) indicam que os produtos cartográficos apresentam uma boa concordância e uma boa correlação.

A Tabela 4 apresenta o resultado da validação do modelo, o que demonstrou por meio das estatísticas de quantidade que o UOS-simulado para o ano de 2018 que está em conformidade com o UOS-2018. Todos os valores

obtidos para o índice Kappa foram superiores a 0,90, o que permite considerar uma representação quase perfeita. Destaca-se ainda uma concordância de 0,5586 devido à localização da célula e uma discordância de 0,0354 devido à quantidade.

Os valores obtidos para o Kappa indicaram que o modelo guardou um elevado grau de concordância (Landis & Koch 1977), o que tornou possível a utilização do modelo para as predições do UOS para os anos de 2030 e 2040.

Na Figura 4 observa-se o UOS referente ao ano de 2018 e as predições do UOS para os anos de 2030 e 2040.

Analisando a predição realizada para os anos de 2030 e 2040, verificou-se a tendência do crescimento da área urbana, com uma possibilidade de ampliação da área em 75% no período 2018-2030 e 18% no período 2030-2040, destacando-se o desenvolvimento da ocupação ao longo da planície litorânea e a urbanização da porção mais oriental do Tabuleiro Costeiro (ao longo de sua borda de ruptura).

Tabela 2 Composição dos submodelos de transição potencial.

Transição Potencial	Variável									Taxa de Precisão
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
7 para 2	X	X	X	X	X	X		X	X	90,42%
2 para 1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	99,13%
2 para 3	X	X	X	X	X	X			X	98,93%
7 para 1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	96,24%
Categoria										
1	Área urbana				6	Rodovia				
2	Cana-de-açúcar				7	Vegetação arbórea-arbustiva				
3	Coco-da-baía				8	Vegetação arbustiva-rasteira				
4	Corpos d'água				9	Vegetação de Manguezal				
5	Praia				X	Variável utilizada no submodelo				

Tabela 3 Análise comparativa entre o UOS-simulado (colunas) e o UOS de referência (linhas) para o ano de 2018, em função dos pixels.

Categoria	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Total
1	11145	791	0	0	0	0	154	0	0	12090
2	819	45273	1000	0	0	0	0	0	0	47092
3	0	3558	6566	0	0	0	66	0	0	10190
4	0	0	0	1887	0	0	0	0	0	1887
5	0	0	0	0	1216	0	0	0	0	1216
6	0	0	0	0	0	148	0	0	0	148
7	4515	1553	0	0	0	0	16349	0	0	22417
8	0	0	0	0	0	0	0	1507	0	1507
9	0	0	0	0	0	0	0	0	4070	4070
Total	16479	51175	7566	1887	1216	148	16569	1507	4070	100617
V de Cramer	0,9330									
Kappa geral	0,9147									

Tabela 4 Validação do UOS-simulado com base no UOS de referência – análise dos componentes de concordância e discordância.

Componente	Valor
Kappa devido à localização da célula	0,9710
Kappa para "no information"	0,9421
Concordância devido ao acaso	0,1000
Concordância devido a quantidade	0,2892
Concordância devido à localização da célula	0,5586
Discordância devido à localização da célula	0,0167
Discordância devido a quantidade	0,0354

Em relação as atividades agrícolas a predição indicou uma estagnação com tendência a manutenção das áreas ocupadas e projeção para a redução no ano de 2040 de 0,75%.

A cobertura vegetal arbórea-arbustiva, classificada como Mata Atlântica é a unidade que apresenta a maior tendência de redução, sendo sucedida pelo uso urbano. Estima-se que até o ano de 2040 ocorra uma redução de 3% por ano, de forma que a cobertura florestal do

município de Lucena, venha a corresponder a apenas 9,82% do seu território.

A tendência na ampliação das áreas urbanas em substituição a área de Mata Atlântica ou ainda de áreas agricultáveis, observado no município de Lucena, é um processo que vem sendo observado ao longo de toda a Zona Costeira brasileira. Folharini & Oliveira (2020) em seu estudo sobre a microrregião de Santos, estado de São Paulo, observaram uma forte tendência para substituição de Mata Atlântica por áreas urbanas até o ano de 2022. Passos et al. (2020) analisando o município de Mangaratiba, Zona Costeira do Rio de Janeiro previram, que até 2034, haverá uma significativa ampliação das áreas urbanas sucedendo áreas rurais

3.2 Evolução do Estoque de Carbono no Período de 1994 a 2040

A liberação do carbono na atmosfera é uma das principais responsáveis pelo processo de amplificação do efeito estufa, o que traz como consequência o aquecimento global. Como estratégia para mitigação, busca-se manter o carbono retido na natureza em suas diversas fontes.

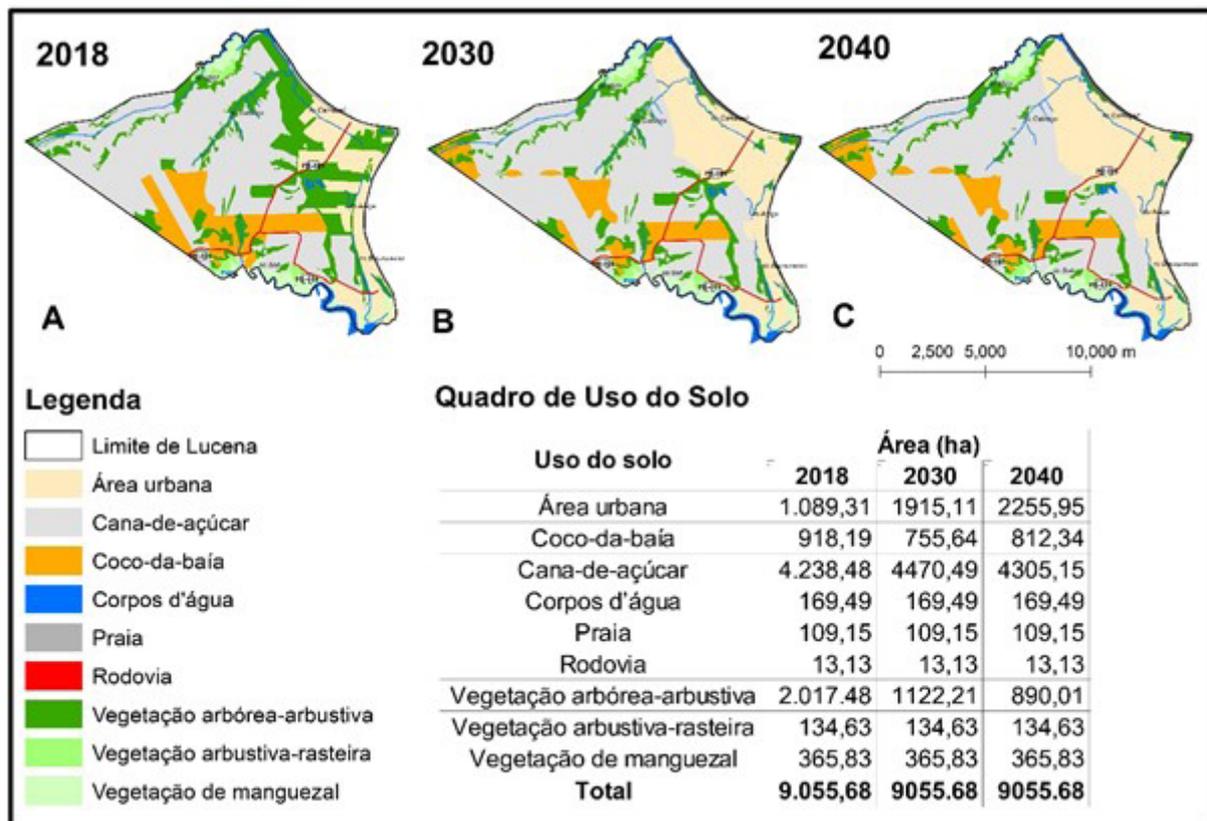


Figura 4 UOS do ano de 2018 e predição para os anos de 2030 e 2040: A. 2018; B. 2030; C. 2040.

O município de Lucena apresentou, nos últimos anos, uma intensa dinâmica do UOS, conforme observada na Figura 4. A manutenção desse processo, principalmente com o desmatamento da Mata Atlântica e a substituição por cultura agrícola e por áreas urbanas deve contribuir para a amplificação do processo de aquecimento global. Para a determinação da evolução do estoque de carbono no município de Lucena determinaram-se os valores de referência para os quatro compartimentos de biomassa em Mg/ha: viva acima do solo, viva subterrânea, do solo e morta acima do solo, conforme se observa na Tabela 5.

Com base nos valores de referência identificou-se a variação dos estoques de carbono ao longo dos anos no município de Lucena. Na Figura 5 é apresentada a variação da biomassa para cada compartimento ao longo do período de análise. A biomassa no solo foi aquela que apresentou a maior redução no período de análise, com uma diminuição de 62,3%, seguida pela biomassa morta acima do solo com 56,6%, biomassa viva subterrânea com 51,7% e a biomassa viva acima do solo com 45,7%.

A redução da biomassa do solo é explicada pelo desmatamento da Mata Atlântica e substituição pela agricultura e urbanização, as quais não contribuem para a retenção do carbono no compartimento solo. No tocante à redução da biomassa viva acima do solo, as culturas agrícolas exploradas na região têm um potencial muito menor de retenção do carbono: a cana-de-açúcar retém mais de 1236% menos carbono que a vegetação arbórea-arbustiva, enquanto que o coco-da-baía retém 294 % menos carbono.

Merece destaque o papel desempenhado pela vegetação de manguezal, tendo em vista que é a tipologia de UOS identificada no município de Lucena com maior capacidade de retenção de carbono, o que indica

a importância de sua preservação de forma a reduzir as emissões de carbono na região.

Em relação ao estoque total de carbono (Figura 6) verificou-se que a tendência é a redução da capacidade de retenção por hectare, estima-se que até o ano de 2040 haverá uma redução de 48,04% do armazenamento observado no ano de 1994, passando de 320.562 Mg para 166.549Mg, o que significa uma taxa de 3.349 Mg/ano, o que apesar de elevado ainda é inferior ao observado por Pavani et al. (2018), para a Zona Costeira Nordeste do Estado de São Paulo, com uma taxa de 13.000 Mg/ano.

O período que vai de 2005 a 2018 se caracterizou pelo avanço do processo de urbanização e pela substituição da cultura de cana-de-açúcar pelo coco-da-baía, o que teve como consequência uma estagnação na capacidade de armazenamento do carbono, correspondendo a um pequeno aumento (0,13%).

Para os anos de 2030 e 2040, com a tendência do desenvolvimento urbano na planície costeira em substituição à Mata Atlântica, o estoque total de carbono tende a apresentar fortes reduções, principalmente pela ausência na contribuição para o armazenamento na planície costeira, passando então os remanescentes florestais e as culturas agrícolas a serem os responsáveis pela retenção do carbono.

Diversos estudos têm mostrado que a Mata Atlântica apresenta grande potencial de retenção de carbono tanto na forma de biomassa acima do solo, como no carbono total, logo exercendo um papel fundamental no sequestro de carbono (Azevedo et al. 2018; Machado et al. 2019; Mello et al. 2019). Logo, a efetivação do Código Florestal (*Lei nº 12.651* 2012) com a obrigatoriedade da recuperação das áreas de preservação permanente pode desempenhar um papel fundamental na evolução do Estoque de Carbono no município de Lucena revertendo assim o quadro simulado neste estudo.

Tabela 5 Valores de referência para os compartimentos de biomassa (Mg/ha).

UOS	Biomassa (MgC/ha)				Total
	viva acima do solo	viva subterrânea	do solo	morta acima do solo	
Área urbana	-	-	-	-	-
Cana-de-açúcar	5,00	-	-	-	5,00
Coco-da-baía	21,00	-	-	-	21,00
Corpos d'água	-	-	-	-	-
Praia	-	-	-	-	-
Rodovia	-	-	-	-	-
Vegetação arbórea-arbustiva	61,83	14,84	4,08	6,80	87,55
Vegetação arbustiva-rasteira	35,06	7,71	5,79	3,86	52,42
Vegetação de manguezal	79,29	29,80	0,19	7,93	117,21

Fonte: adaptado de MCT (2015).

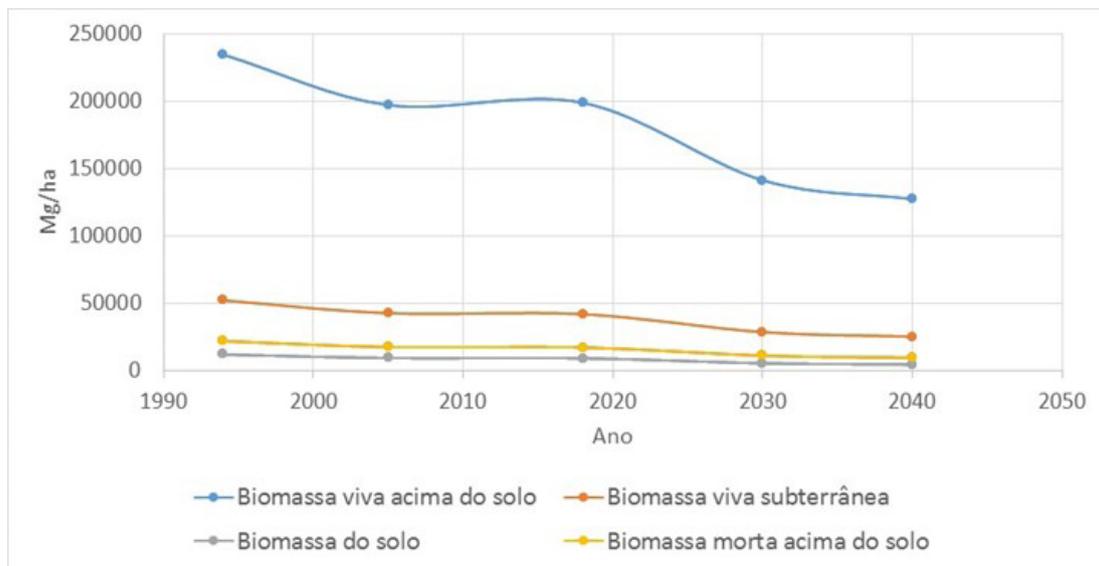


Figura 5 Variação da biomassa de em cada compartimento para o município de Lucena.

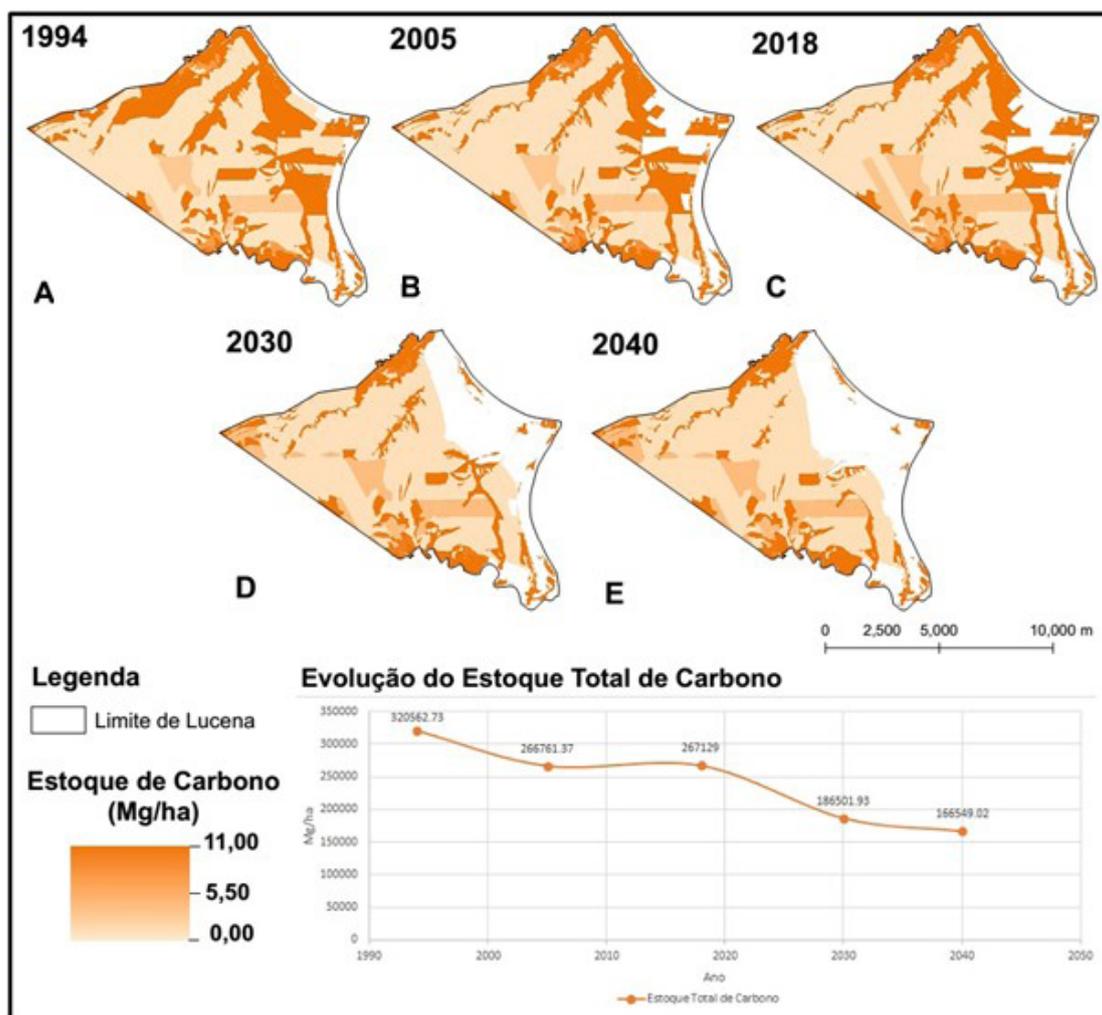


Figura 6 Evolução do estoque total de carbono no município de Lucena no período de 1994 a 2040: A. 1994; B. 2005; C. 2018; D. 2030; E. 2040.

4 Conclusões

A simulação do UOS para o município de Lucena, caso as tendências observadas no passado continuarem sendo registradas nas próximas décadas, indica uma propensão a uma urbanização mais intensa, o que poderá ocasionar que a região da Planície Litorânea venha a ser quase que totalmente ocupada e as áreas mais próximas do litoral, inseridas no Tabuleiro Costeiro, também modificadas com a substituição das áreas agricultáveis pelo uso urbano e também pelo desmatamento da Mata Atlântica.

A modelagem, no entanto, não considerou restrições legais que estão em processo de consolidação no Brasil, como a obrigatoriedade das recuperações das áreas degradadas e das reservas legais, impostas pelo Código Florestal Brasileiro, ou ainda a implantação de políticas urbanas que venha a restringir o desenvolvimento do município de Lucena e conseqüentemente gerar cenários que não foram simulados neste estudo.

A diminuição do estoque de carbono, nos anos de 1994 a 2018, do município de Lucena foi fortemente influenciada pela mudança do uso do solo. O desmatamento da Mata Atlântica foi o grande responsável por essa redução, uma vez que os usos implantados não detêm a mesma capacidade de retenção de carbono que a vegetação nativa. Caso a tendência de desmatamento da Mata Atlântica se confirme, haverá uma tendência no período de 2030 a 2040 a uma menor retenção de carbono.

Diante deste cenário é necessário que sejam implantadas e mantidas as ações conservacionistas e de recuperação ambiental que estão presente na legislação brasileira, de forma que os resultados observados neste estudo não venham a se confirmar, logo contribuindo para uma mitigação do problema do aquecimento global e das mudanças climáticas.

5 Referências

- Azevedo, A.D., Camara, R., Francelino, M.R., Pereira, M.G., Leles, P.S.S. 2018, 'Estoque de carbono em áreas de restauração florestal da mata atlântica', *Floresta*, vol. 48, no. 2, pp. 183-94. <http://dx.doi.org/10.5380/ufv.v48i2.54447>.
- Barbosa Segundo, I.D., Malzac, M., Bias, G.S., Albuquerque, I.F. & Silva, T.C. 2016, 'Análise das ocorrências das formações florestais dos municípios do litoral norte paraibano por meio de indicadores', *Congresso Ibero Americano de Gestão Integrada de Áreas Litorais*, Florianópolis, pp. 47-8.
- Diao, J., Liu, J., Zhu, Z., Li, M. & Sleeter, B.M. 2020, 'Substantially Greater Carbon Emissions Estimated Based on Annual Land-Use Transition Data', *Remote Sensing*, vol. 12, no. 7, pp. 1126-41. <https://doi.org/10.3390/rs12071126>
- Doğan, S. & Buğday, E. 2018, 'Modeling of Temporal and Spatial Changes of Land Cover and Land Use by Artificial Neural Networks: Kastamonu Sample', *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, vol. 20, no. 3, pp. 653-63. <https://dergipark.org.tr/en/pub/barofd/issue/38873/467974>
- Dzieszko, P. 2014, 'Land-Cover Modelling using Corine Land Cover Data and Multi-Layer Perceptron', *Quaestiones Geographicae*, vol. 33, no. 1, pp. 5-22. <https://doi.org/10.2478/quageo-2014-0004>
- Eastman, J.R. 2016, *Manual IDRISI TerrSet: Geospatial Monitoring and Modeling System*, Clark Labs da Clark University, Worcester, Ma.
- Fernandino, G., Elliff, C.I. & Silva, I.R. 2018, 'Ecosystem-based management of coastal zones in face of climate change impacts: challenges and inequalities', *Journal of Environmental Management*, vol. 215, pp. 32-9. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.034>
- Fleck, L., Tavares, M.H.F., Eyng, E., Helmann, A.C. & Andrade, M.A.M. 2016, 'Redes neurais artificiais: princípios básicos', *Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia*, vol. 1, no. 13, pp. 47-57. <https://periodicos.utfrp.edu.br/recit/article/view/4330>
- Folharini, S. & Oliveira, R. 2020, 'Utilização do Land Change Modeler® na modelação prospetiva do uso e cobertura do solo na microrregião de Santos, Brasil para o ano de 2022', *Revista de Geografia e Ordenamento do Território*, no. 19, pp. 57-73. <http://dx.doi.org/10.17127/got/2020.19.003>
- Furrier, M., Araújo, M.E. & Menezes, L.F. 2006, 'Geomorfologia e tectônica da Formação Barreiras no Estado da Paraíba', *Geologia USP*, vol. 6, no. 2, pp. 61-70. <https://doi.org/10.5327/S1519-874X2006000300008>
- Göpel, J., Schüngel, J., Schaldach, R., Meurer, K.H.E., Jungkunst, F., Franko, U., Boy, J., Strey, R., Strey, S. & Guggenberger, G. 2017, 'Future land use and land cover in Southern Amazonia and resulting greenhouse gas emissions from agricultural soils', *Regional Environmental Change*, vol. 18, no. 1, pp. 129-42. <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1235-0>
- Intergovernmental Panel on Climate Change 2017, *AR6 Scoping Meeting*, May 2017, Addis Ababa. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/11/AR6-Chair-Vision-Paper.pdf>
- IPCC - vide Intergovernmental Panel on Climate Change
- Landis, J.R. & Koch, G.G. 1977, 'The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data', *Biometrics*, vol. 33, no. 1, pp. 159-75. <https://doi.org/10.2307/2529310>
- Lei nº 11428 2006, Brasil.
- Lei nº 12.651 2012, Brasil.
- Levin, D.A. & Peres, Y. 2017, *Markov Chains and Mixing Times*, 2nd edn, American Mathematical Society, Providence, RI.
- Machado, A., Martins, A.P.M., Sanquetta, C.R., Corte, A.P.D., Wojciechowski, J., Machado, S.A., Santos, R. & Landim, I.A.M. 2019, 'Dinâmica do volume, biomassa e carbono na mata atlântica por ferramenta de detecção de mudanças', *Nativa*, vol. 7, no. 4, pp. 437-44. <http://dx.doi.org/10.31413/nativa.v7i4.6935>

- Mahmood, R., Pielke, R.A. & Mcalpine, C.A. 2016, 'Climate-Relevant Land Use and Land Cover Change Policies', *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 97, no. 2, pp. 195-202. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00221.1>
- Mello, A.A., Meira, A.C.S., Sanquetta, C.R. & Ferreira, R.A. 2019, 'Estimativas de biomassa e carbono em área de mata atlântica, implantada por meio de reflorestamento misto', *Biofix Scientific Journal*, vol. 5, no. 1, pp. 130-4. <http://dx.doi.org/10.5380/biofix.v5i1.67298>
- Ministério da Ciência Tecnologia e Inovação 2017, *Terceiro Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa: relatórios de referência setor uso da terra, mudança do uso da terra e florestas*, MCT, Brasília, DF.
- MCT - vide Ministério da Ciência Tecnologia e Inovação.
- Pavani, B.F., Sousa Júnior, W.C., Inouye, C.E.N., Vieira, S.A. & Mello, A.Y.I. 2018, 'Estimating and valuing the carbon release in scenarios of land-use and climate changes in a Brazilian coastal area', *Journal of Environmental Management*, no. 226, pp. 416-27. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.059>
- Passos, A.S., Deus, L.A.B., Santos, P.R.A. & Dias, F.F. 2020, 'Modelagem da ocupação e uso do solo na zona costeira do município de Mangaratiba-RJ e suas implicações utilizando a ferramenta LCM e imagens orbitais', *Anuário do Instituto de Geociências*, vol. 43, no. 1, pp. 346-54. http://dx.doi.org/10.11137/2020_1_346_354
- Qiang, Y. & Lam, N.S.N. 2015, 'Modeling land use and land cover changes in a vulnerable coastal region using artificial neural networks and cellular automata' *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 187, no. 3. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-015-4298-8>
- Quesada, B., Devaraju, N., Noblet-Ducoudré, N. & Arneth, A. 2017, 'Reduction of monsoon rainfall in response to past and future land use and land cover changes', *Geophysical Research Letters*, vol. 44, no. 2, pp. 1041-50. <https://doi.org/10.1002/2016GL070663>
- Rezende, F.S., Carriello, F., Rodriguez, D.A. & Neves, O.M.S. 2018, 'Análise Espaço-Temporal de Mudança de Uso e Cobertura da Terra na Região do Vale do Paraíba Paulista: desenvolvimento de cenários futuros', *Revista Brasileira de Geografia Física*, vol. 11, no. 5, pp. 1732-47. <https://doi.org/10.26848/rbfg.v11.5.p1732-1747>
- Santos, H.G., Zaroni, M.J. & Clemente, E.P. 2018, *Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos*, Embrapa Solos, Brasília, DF.
- Silva, J.S. & Farias Filho, M.S. 2015, 'Instrumentos legais de prevenção de impactos ambientais na zona costeira: estratégias integradas de gestão territorial', *Revista Eletrônica do Mestrado em Educação Ambiental*, vol. 2, no. 32, pp. 7-25. <https://doi.org/10.14295/remea.v32i2.4742>
- Silva, L.P., Xavier, A.P.C., Silva, R.M. & Santos, C.A.G. 2020, 'Modeling land cover change based on an artificial neural network for a semiarid river basin in northeastern Brazil', *Global Ecology and Conservation*, vol. 21, pp. 1-13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00811>
- Silva, R.O.B., Montenegro, S.M.G.L. & Souza, W.M. 2017, 'Tendências de mudanças climáticas na precipitação pluviométrica nas bacias hidrográficas do estado de Pernambuco', *Engenharia Sanitária e Ambiental*, vol. 22, no. 3, pp. 579-89. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522017142481>
- Sleeter, B.M., Liu, J., Daniel, C., Frid, L. & Zhu, Z. 2015, 'An integrated approach to modeling changes in land use, land cover, and disturbance and their impact on ecosystem carbon dynamics: a case study in the Sierra Nevada Mountains of California', *Aims Environmental Science*, vol. 2, no. 3, pp. 577-606. <https://doi.org/10.3934/environsci.2015.3.577>
- Solomon, N., Pabi, O., Annang, T., Asante, I.K. & Birhane, E. 2018, 'The effects of land cover change on carbon stock dynamics in a dry Afromontane forest in northern Ethiopia', *Carbon Balance and Management*, vol. 13, no. 1, pp. 1-13. <https://doi.org/10.1186/s13021-018-0103-7>
- Tornquist, C.G. & Silva, D.S. 2019, 'Current and future land use and land cover scenarios in the Arroio Marrecas watershed', *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 23, no. 3, pp. 215-22. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n3p215-222>
- Turner, D.P., Conklin, D.R. & Bolte, J.P. 2015, 'Projected climate change impacts on forest land cover and land use over the Willamette River Basin, Oregon, USA', *Climatic Change*, vol. 133, no. 2, pp. 335-48. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1465-4>
- Wang, R., Derdouri, A. & Murayama, Y. 2018, 'Spatiotemporal Simulation of Future Land Use/Cover Change Scenarios in the Tokyo Metropolitan Area', *Sustainability*, vol. 10, no. 6, pp. 2056-74. <https://doi.org/10.3390/su10062056>
- Yu, Z., Lu, C., Cao, P. & Tian, H. 2018, 'Long-term terrestrial carbon dynamics in the Midwestern United States during 1850-2015: roles of land use and cover change and agricultural management', *Global Change Biology*, vol. 24, no. 6, pp. 2673-90. <https://doi.org/10.1111/gcb.14074>

Contribuições dos Autores

Ivanhoé Soares Bezerra: conceituação; metodologia; validação; redação – rascunho original; redação – revisão e edição; **Tarciso Cabral da Silva:** conceituação; análise formal; metodologia; validação; supervisão; visualização.

Conflito de interesse

Os autores declaram nenhum potencial conflito de interesse.

Declaração de disponibilidade de dados

Todos os dados incluídos neste estudo estão disponibilizados publicamente na literatura.

Como citar:

Bezerra, I.S. & Silva, T.C. 2022, 'Influência da Evolução do Uso e Ocupação do Solo do Município de Lucena-PB no Armazenamento de Carbono: Projeções para os anos de 2030 e 2040', *Anuário do Instituto de Geociências*, 45:40011. https://doi.org/10.11137/1982-3908_45_40011

Financiamento

Não aplicável.

Editora chefe

Dra. Claudine Dereczynski

Editor Associado

Dr. Gerson Cardoso da Silva Jr.