

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Programa de Pós-Graduação em Computação



Dissertação

Modelagem e simulação da quantificação de dióxido de carbono neutralizado por plantios comerciais de eucalipto

Rafael Rodrigues Bastos

Pelotas, 2013

Dados Internacionais de Publicação (CIP)

B327m Bastos, Rafael Rodrigues
Modelagem e simulação da quantificação de dióxido de carbono neutralizado por plantios comerciais de eucalipto / Rafael Rodrigues Bastos; Aline Brum Loreto, orientador. – Pelotas, 2013.
80 f.; il.

Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação), Universidade Federal de Pelotas / Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, 2013.

1. Autômatos celulares. 2. Dióxido de carbono. 3. Modelo matemático. I. Loreto, Aline Brum . II. Título.

CDD: 004

Catálogo na Fonte: Patrícia de Borba Pereira CRB:10/1487
Universidade Federal de Pelotas

RAFAEL RODRIGUES BASTOS

Modelagem e simulação da quantificação de dióxido de carbono neutralizado por
plantios comerciais de eucalipto

Dissertação apresentada ao Programa
de Pós-Graduação em Computação da
Universidade Federal de Pelotas, como
requisito parcial para a obtenção do grau
de Mestre em Ciência da Computação.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Aline Brum Loreto

Pelotas, 2013

Banca examinadora:

Profa. Aline Brum Loreto (orientadora)

Profa. André Rauber Du Bois (UFPel)

Profa. Leonardo Ramos Emmendorfer (FURG)

Profa. Luciana Foss (UFPel)

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente aos meus pais e irmãos, por tudo que sou hoje, pelo estio sempre fornecido e o carinho imensurável.

À minha esposa, Paula, pela compreensão, paciência e apoio ao longo de todo o tempo.

Aos amigos que, nos últimos dois anos, quase não os vi, e tão pouco convivi.

Aos meus professores, em especial à minha orientadora, Aline Brum Loreto, por confiar na minha capacidade, entender minhas dificuldades e acima de tudo por me ensinar o caminho.

E principalmente ao meu filho, Rafael Filho, que, no auge de seus dois anos, conseguiu sempre, nas diversas vezes que tirou meu foco do trabalho para brincarmos, mostrar-me o que realmente é o mais importante da vida: a família, não os livros e o computador.

RESUMO

BASTOS, Rafael Rodrigues. **Modelagem e simulação da quantificação de dióxido de carbono neutralizado por plantios comerciais de eucalipto**. 2013. 80f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Computação. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

Os autômatos celulares são modelos abstratos utilizados para descrever sistemas naturais possibilitando a análise de padrões complexos a partir de uma formulação simplificada. Sendo constituídos por estruturas compostas por um reticulado de células, onde cada célula evolui de acordo com as características das células vizinhas, podem ser utilizados para a modelagem de sistemas naturais. As mudanças climáticas e ambientais causadas pelo acúmulo de dióxido de carbono atmosférico podem ser consideradas como um dos grandes problemas da humanidade nos últimos séculos. As árvores, devido ao seu potencial de sequestro do dióxido de carbono atmosférico, podem ser consideradas e empregadas no auxílio da redução da concentração atmosférica deste gás. O eucalipto é um gênero de árvore não nativa que, por apresentar boa adaptação aos mais variados ambientes, elevada taxa de crescimento e facilitado reflorestamento, suas espécies são amplamente indicadas para auxiliar na neutralização de dióxido de carbono atmosférico. O Rio Grande do Sul concentra grandes áreas de plantações de eucalipto. Na região de Bagé-RS, plantios comerciais de eucalipto vêm crescendo nos últimos anos, principalmente, devido ao aumento da demanda da indústria de celulose e papel. Esta região é também marcada pela presença de relevantes fontes emissoras de poluentes atmosféricos. A presença destas fontes poluentes e de grandes plantações comerciais de eucalipto nesta região torna interessante a quantificação do potencial de neutralização de dióxido de carbono atmosférico destas plantações. Neste sentido, o presente trabalho propõe a formalização de um modelo matemático para a simulação da neutralização de dióxido de carbono para uma plantação comercial de eucalipto, implementado computacionalmente utilizando a metodologia dos autômatos celulares, considerando a possibilidade de ataque por pragas ao plantio para a contabilização de árvores mortas, bem como a influência da escolha do espaçamento que mostrou-se um dos principais fatores que afetam o potencial de neutralização de dióxido de carbono de um plantio.

Palavras-chave: autômatos celulares, dióxido de carbono, modelo matemático.

ABSTRACT

BASTOS, Rafael Rodrigues. **Modelagem e simulação da quantificação de dióxido de carbono neutralizado por plantios comerciais de eucalipto**. 2013. 80f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Computação. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

The cellular automata are abstract models used to describe natural systems enabling the analysis of complex patterns from a simplified formulation. Cellular automata consist of structures composed of a grid of cells where each cell evolves according to the characteristics of the neighboring cells and can be employed to modeling natural systems. The climatic and environmental changes caused by the accumulation of atmospheric carbon dioxide can be considered as one of the biggest problems of humanity in the last centuries. The trees, based in their catch atmospheric carbon dioxide potential, can be considered and used in helping to reduce the atmospheric concentration of this gas. The eucalyptus is a non-native tree gender's that their species are widely indicated in helping to neutralize the atmospheric carbon dioxide because of their good adaptation to the most different environment, high growth rate e easily reforestation. The state of Rio Grande do Sul concentrates a large eucalyptus plantations area. In the region of Bagé-RS, the commercial eucalyptus plantations are growing in the last years due to increased from cellulose and paper industry demands. In this region also there are relevant atmospheric pollutant emission sources. The presence of these sources and of large commercial plantations of eucalyptus in that region makes interesting the quantification of potential carbon dioxide neutralization of these plantations. Based on these, the present work proposes the formalization of a mathematic model to simulation of a carbon dioxide neutralization from a eucaliptus's commercial plantation, computationally implemented using the cellular automata methodology, considering the pest attack probability to the plantation to count of dead trees as well as the influence of a spacement choosing that proved one of main factors that affects the potencial of a carbon dioxide neutralization from a plantation.

Keywords: cellular automata, carbon dioxide, eucalyptus, mathematical model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de autômato celular.....	17
Figura 2 - Dimensões de autômatos celulares	18
Figura 3 - Classes de autômatos celulares	20
Figura 4 - Modelos de vizinhança de autômatos celulares.....	21
Figura 5 - Emissão de CO ₂ pela queima de combustíveis (IEA, 2012).....	24
Figura 6 - Emissão de CO ₂ por setores em 2009 (IEA, 2012).....	25
Figura 7 - Emissão de CO ₂ por região em 2009 (IEA, 2012)	25
Figura 8 - Comparativo da emissão de CO ₂ por região entre 2001 e 2010 (IEA, 2012)	26
Figura 9 - Percentual da área de plantios de eucalipto por estado em 2011 (ABRAF, 2012)	28
Figura 10 - Grafo de transição do modelo	41
Figura 11 - Representação do vértice AC	42
Figura 12 - Representação do vértice CBVAT	42
Figura 13 - Representação do vértice CBAMP.....	43
Figura 14 - Representação do vértice CBAMC	43
Figura 15 - Representação do vértice CBH.....	44
Figura 16 - Representação do vértice CBVT	44
Figura 17 - Representação do vértice CCBV	45
Figura 18 - Representação do vértice SOLO	45
Figura 19 - Representação do vértice CDA.....	46
Figura 20 - Representação do vértice CPVS.....	46
Figura 21 - Representação do vértice CCS.....	46

Figura 22 - Localização da área de aplicação do estudo - Imagem: Google Maps ..	48
Figura 23 - Plantio de eucalipto na área de estudo - Imagem: Google Maps	50
Figura 24 - Mapa com informações sobre o plantio	51
Figura 25 - Vista parcial do plantio de <i>Eucalyptus grandis</i>	51
Figura 26 - DAP médio do plantio.....	52
Figura 27 - Altura média do plantio.....	52
Figura 28 - Acúmulo de serrapilheira no plantio	53
Figura 29 - Evolução do DAP do plantio de eucalipto	54
Figura 30 - Evolução da altura do plantio de eucalipto.....	55
Figura 31 - Taxa de crescimento do plantio de eucalipto	55
Figura 32 - Distribuição dos coletores de serrapilheira (LONDERO, 2011)	56
Figura 33 - Aspecto de um coletor de serrapilheira (LONDERO, 2011).....	56
Figura 34 - Produção média mensal de serrapilheira.....	57
Figura 35 - Exemplo de aplicação de penalidades causadas por ataques de pragas	59
Figura 36 - Emissão anual de CO ₂ e da UTEPM	63
Figura 37 - Tela inicial do software: Aba "Cálculo de CO ₂	64
Figura 38 - Tela inicial do software: Aba "Dados do plantio	64
Figura 39 - Exemplo de cálculo a partir da área informada.....	66
Figura 40 - Exemplo de cálculo a partir da área informada com restrição de idade .	66
Figura 41 - Exemplo de cálculo a partir da quantidade de CO ₂ informada	67
Figura 42 - Exemplo de dados do plantio, após o processamento do cálculo	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Espécies de eucalipto com indicações de uso	31
Tabela 2 - Espécies de eucalipto e condições climáticas.....	32
Tabela 3 - Evolução temporal da emissão de gases de efeito estufa da UTEPM.....	49
Tabela 4 - Características dendométricas de um plantio de eucalipto	53
Tabela 5 - Produção média de serrapilheira em um plantio de eucalipto.....	57
Tabela 6 - Crescimento do plantio.....	60
Tabela 7 - Quantificação de árvores vivas e mortas no plantio.....	61
Tabela 8 - Quantificação da biomassa do plantio.....	61
Tabela 9 - Quantificação de carbono do plantio	62
Tabela 10 - Quantificação de carbono do plantio ao final do terceiro ciclo	62
Tabela 11 - Quantificação de carbono a partir da área do plantio.....	68
Tabela 12 - Quantificação de carbono a partir da quantidade de CO ₂ a ser neutralizada	68

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Motivação	13
1.2 Objetivos.....	14
1.2.1 Objetivo geral.....	14
1.2.2 Objetivos específicos.....	14
1.3 Organização do texto.....	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 Autômatos celulares	16
2.1.1 Descrição.....	16
2.1.2 Geometria e dimensão	18
2.1.3 Regras	19
2.1.4 Vizinhaça	20
2.1.5 Aplicações de autômatos celulares	21
2.2 Dióxido de carbono e o efeito estufa	23
2.3 Cultura do eucalipto.....	27
2.3.1 Área plantada	28
2.3.2 Aproveitamento comercial	28
2.3.3 Meio ambiente	29
2.3.4 Crescimento e produção.....	29
2.3.5 Espaçamento.....	30
2.3.6 Pragas	30
2.3.7 Espécies	31

2.3.8 Área de estudo	33
2.4 Trabalhos relacionados	33
2.4.1 Biomassa em povoamentos de eucalipto	33
2.4.2 Estoque de carbono em eucaliptos	34
2.4.3 Sistema de previsão de crescimento.....	34
3 FORMALIZAÇÃO DE UM MODELO PARA A QUANTIFICAÇÃO DO CARBONO NEUTRALIZADO	35
3.1 Quantificação da biomassa	36
3.1.1 Biomassa arbórea viva	36
3.1.1 Biomassa de árvores mortas em pé.....	37
3.1.2 Biomassa de árvores mortas caídas	37
3.1.3 Biomassa da serrapilheira	37
3.1.4 Biomassa vegetal total.....	38
3.2 Quantificação do carbono.....	38
3.2.1 Cálculo do carbono na biomassa vegetal total.....	38
3.2.2 Cálculo do carbono no solo	39
3.2.3 Cálculo do carbono total	40
3.3 Formalização do modelo	40
3.4 Regras de evolução de autômatos celulares.....	47
4 RESULTADOS	48
4.1 Descrição do local de estudo.....	48
4.2 Calibração do modelo.....	53
4.2.1 Altura e DAP	53
4.2.2 Serrapilheira	56
4.2.3 Perdas	58
4.3 Aplicação do modelo	60

4.3.1 Crescimento do plantio	60
4.3.2 Simulação de perdas	60
4.3.3 Cálculo da biomassa	61
4.3.4 Cálculo do carbono	61
4.4 Resultado da quantificação	62
4.5 Implementação do modelo	63
4.5.1 Interface com o usuário	63
4.5.2 Simulação	68
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	70
5.6 Trabalhos futuros.....	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
APÊNDICES	76

1 INTRODUÇÃO

A evolução dos recursos computacionais permite ampliar a aplicação às diferentes áreas do conhecimento, como a matemática, ecologia e meio ambiente, que carecem cada vez mais de recursos para o avanço científico e tecnológico para a obtenção de resultados com maior agilidade.

Uma das técnicas mais utilizadas para a representação dos sistemas físicos e naturais é através dos modelos matemáticos, que são sistemas matemáticos obtidos pela transcrição de processos físicos e biológicos de qualquer sistema para um conjunto de relações matemáticas. Representam o mundo real com imperfeições, de forma abstrata, permitindo a percepção de como funciona a organização de sistemas complexos a partir de elementos mais simples (ODUN, 1988).

Os autômatos são modelos abstratos que podem descrever sistemas naturais que permitem a análise de padrões complexos a partir de uma formulação simplificada. Por serem constituídos por estruturas matemáticas compostas por um reticulado de células, onde cada célula evolui de acordo com as características das células vizinhas, os autômatos celulares podem ser utilizados para a modelagem de sistemas naturais.

Considerando que um dos grandes problemas da humanidade nos últimos séculos são as mudanças climáticas e ambientais, causadas principalmente pela grande concentração de gases do efeito estufa como o dióxido de carbono, faz-se necessário o estudo e o desenvolvimento de modelos a fim de prever/estimar comportamentos destas mudanças.

As árvores, devido ao seu potencial de neutralização do dióxido de carbono atmosférico, podem ser empregadas na redução da concentração deste gás. Os eucaliptos, gênero de árvore não nativa do Brasil, por apresentarem um rápido crescimento e fácil adaptação às condições climáticas brasileiras, podem ser cultivados para auxiliar no sequestro do dióxido de carbono atmosférico.

Especialmente na metade sul do Rio Grande do Sul, onde encontram-se

instaladas relevantes fontes emissoras de poluentes atmosféricos, diversas plantações comerciais de eucalipto vêm sendo desenvolvidas nos últimos anos impulsionadas principalmente pela indústria de celulose e papel.

A partir desse contexto, o presente trabalho propõe a utilização de autômatos celulares para a modelagem matemática e simulação da neutralização de carbono realizada por plantações comerciais de eucalipto. O objetivo do desenvolvimento deste é quantificar/estimar o sequestro de CO₂ nos três ciclos completos desta cultura.

1.1 Motivação

As frequentes mudanças climáticas e ambientais causadas pelos efeitos do acúmulo de dióxido de carbono na atmosfera podem ser consideradas como um dos grandes problemas da humanidade nos últimos séculos.

As árvores, em sua grande maioria, possuem a capacidade de retirar o dióxido de carbono da atmosfera e fixar em sua biomassa. Desta forma, as árvores podem ser empregadas no auxílio da redução de dióxido de carbono atmosférico (RENNER, 2004).

No sul do Rio Grande do Sul, nos últimos anos, diversas plantações comerciais de eucalipto vem sendo desenvolvidas, muitas estimuladas pelo potencial uso desta espécie na fabricação de celulose. Contudo, não há estudos que façam o dimensionamento da capacidade que estas áreas de vegetação em amplo desenvolvimento possuem para a neutralização de dióxido de carbono atmosférico.

Baseado nestas constatações, o presente trabalho surgiu a partir da possibilidade de agrupar a formalização da modelagem do cálculo de potencial de neutralização de carbono da biomassa arbórea viva de árvores de eucalipto com a quantidade possível de neutralização pela serrapilheira. Convém salientar que, segundo Arevalo et al. (2002), serrapilheira a porção de folhas, galhos, ramos e demais materiais orgânicos caídos no solo ao redor das árvores do plantio.

Deste modo, pode-se, a partir de algumas medições e aquisições de informações sobre a área a ser analisada, estimar seu potencial de neutralização de dióxido de carbono.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é apresentar uma proposta de aplicação de autômatos celulares para a modelagem e simulação da quantificação de dióxido de carbono neutralizado por plantações comerciais de eucalipto.

1.2.2 Objetivos específicos

- Pesquisar/conhecer aplicações de autômatos celulares voltadas meio ambiente;
- Coletar informações sobre a cultura do eucalipto;
- Identificar os efeitos causados pelo acúmulo de dióxido de carbono na atmosfera;
- Modelar o potencial de neutralização de carbono da biomassa arbórea viva com a quantidade de neutralização pela serrapilheira de árvores de eucalipto;
- Propor uma aplicação de autômatos celulares na modelagem para quantificar o dióxido de carbono neutralizado por eucaliptos;
- Simular o potencial de neutralização de dióxido de carbono para uma plantação comercial de eucalipto na região de Bagé-RS.

Deseja-se, por fim, verificar se a cultura do eucalipto também contribui na neutralização do dióxido de carbono, amenizando a grande concentração desse gás na atmosfera.

1.3 Organização do texto

No capítulo 2 é apresentado o referencial teórico sobre: autômatos celulares, com algumas aplicações; dióxido de carbono e o efeito estufa, identificando os efeitos causados pelo acúmulo de CO₂; a cultura do eucalipto e os trabalhos relacionados ao tema da presente dissertação.

O capítulo 3 apresenta a formalização do modelo proposto para a quantificação do carbono neutralizado para um plantio de eucalipto, suas dependências como as quantificações da biomassa e as regras de evolução do

modelo.

No capítulo 4 são descritos os resultados do trabalho, apresentando as características do local de estudo, os dados para calibração do modelo, detalhes da aplicação do modelo à área de estudo e os resultados da quantificação.

O capítulo 5 aborda as considerações finais do trabalho onde é apresentado um fechamento dos resultados e propostas para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

No presente capítulo será brevemente descrito a fundamentação teórica que norteia o desenvolvimento deste trabalho. Sobre os autômatos celulares descreve-se as características gerais, regras e classes de evolução, aplicações e o estado da arte. Em relação ao dióxido de carbono apresenta-se as principais causas de emissões e o registro histórico (em toneladas) de emissões em diferentes continentes do mundo. Já sobre a cultura do eucalipto relata-se as principais características da cultura como crescimento, aproveitamento comercial, ataques por pragas, produção e exploração. Por fim, descreve-se os trabalhos relacionados a estudos da biomassa e estoque de carbono em povoamento de eucalipto e o sistema de previsão de crescimento SisEucalipto.

2.1 Autômatos celulares

2.1.1 Descrição

Os estudos sobre autômatos celulares iniciaram na década de 1950 por John Von Neumann durante pesquisas sobre sistemas biológicos, resultando na construção de um modelo abstrato autorreplicativo conhecido como construtor universal (WEISSTEIN, 2011).

Autômatos podem ser definidos como modelos abstratos de um computador digital que possuem um mecanismo de entrada para leitura de uma fita composta por um alfabeto e dividida em células, onde cada célula contém um símbolo pertencente ao alfabeto (ACIÓLY et al., 2002).

Segundo Wolfram (1983), autômatos celulares podem ser considerados como idealizações discretas das equações diferenciais parciais que podem ser utilizados para descrever sistemas naturais, consistindo de uma rede de células idênticas onde cada célula assume um conjunto finito de valores que evoluem em períodos discretos conforme regras determinísticas, as quais determinam o valor de cada célula de acordo com as células vizinhas. Devido a esta natureza discreta, é possível fazer uma analogia com os computadores digitais, relacionando os

autômatos celulares com computadores de processamento paralelo.

Peixoto e Barros (2004) consideram que a principal característica dos autômatos celulares seja a fácil implementação a partir de uma formulação simplificada, além do retorno visual que permite uma análise de padrões mais complexos.

De acordo com El Yacoubi e El Jai (2002) um autômato celular é um mecanismo para a modelagem de sistemas com interações locais, representado por uma matriz de células idênticas que interagem entre suas vizinhanças, de acordo com suas programações específicas, em intervalos discretos onde o estado de uma célula em um instante $t + 1$ depende do seu estado e dos estados das células vizinhas no instante t .

Segundo Alonso (2008) a definição formal para Autômato Celular é dada a partir da quadrupla $A = (L, S, N, f)$, onde:

L = representa o espaço dimensiona compreendido pelo reticulado de células;

S = o conjunto finito de estados possíveis de cada célula;

N = é um subconjunto de L que representa a vizinhança de uma célula;

f = a regra local de transição.

Um exemplo de autômato celular pode ser observado na Figura 1 que apresenta um autômato de uma dimensão onde cada célula da linha possui um valor 0 ou 1 e uma possível regra de evolução deste valor definida pela equação 1, onde o valor de uma célula na posição i em um tempo $(t+1)$ é dado por

$$a_i^{(t+1)} = a_{(i-1)}^t + a_{(i+1)}^t \text{ mod } 2 \quad (1)$$



Figura 1 - Exemplo de autômato celular

Para Peixoto e Barros (2004) os modelos de autômatos celulares fornecem uma descrição macroscópica do comportamento dos fenômenos e não uma especificação exata do processo, desta forma não devem ser utilizados como

mecanismos de previsão, mas sim como um instrumento de experimentação na comprovação de hipóteses para uma posterior formulação de um modelo matemático.

2.1.2 Geometria e dimensão

De acordo com Gremonini e Vicentini (2008), a dimensão espacial dos autômatos celulares, o formato e a disposição de cada uma de suas células caracterizam a geometria do autômato celular, que deve ser regular, de forma que todas as células possuam um mesmo tamanho e estejam dispostas em uma malha.

Segundo Aguiar e Costa (2001), uma das propriedades dos autômatos celulares é a autossimilaridade, o que determina que as células são indistinguíveis do todo. Este padrão de semelhança é chamado de fractal e está presente em muitos sistemas naturais, desta forma podem ser gerados através de autômatos celulares.

Um autômato celular pode ser construído com uma dimensão, onde a rede é constituída por uma única linha e cada autômato pode ter vizinhos à esquerda e à direita; duas dimensões, formando uma rede em um plano, de maneira que cada autômato pode ter vizinhos nos limites superior, inferior, laterais e diagonais; três dimensões, formando uma distribuição espacial, onde a vizinhança dos autômatos é acrescida dos vizinhos à frente e atrás (GREMONINI e VICENTINI, 2008). A Figura 2 mostra a representação das dimensões dos autômatos celulares.

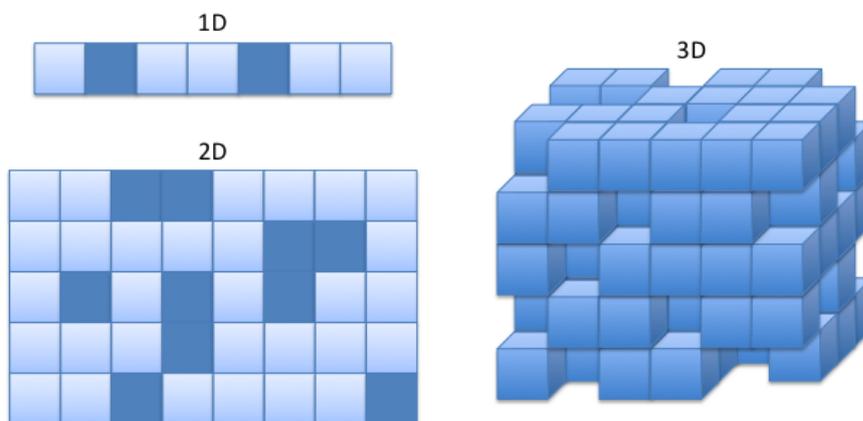


Figura 2 - Dimensões de autômatos celulares

2.1.3 Regras

Para Gremonini e Vicentini (2008) as regras que determinam o estado seguinte das células dos autômatos são dependentes do estado da própria célula e de suas células vizinhas. Estas regras são geralmente determinísticas, determinando o próximo estado da célula com exatidão baseando-se nos estados das células vizinhas. Estas regras também podem ser não-determinísticas, definindo o próximo estado com base no valor de uma função de probabilidade. Há ainda regras temporais, ou seja, que dependem do tempo.

Wolfram (1983) define que generalizações a partir da regra definida na equação 1, permitem que cada célula assuma um número k de valores e que este valor dependa dos valores de seus vizinhos que estejam separados até uma distância r , como ilustra a equação 2. A quantidade de regras diferentes com os parâmetros k e r aumenta com k^{2r+1} e mesmo para valores pequenos de k e r , torna-se imensa.

$$a_i^{(t+1)} = F\left(a_{(i-r)}^t, \dots, a_{(i+r)}^t\right) \quad (2)$$

Segundo Wolfram (1983), cada uma destas regras leva a padrões que são diferentes em alguns detalhes, porém, os padrões gerados tendem a cair em apenas quatro classes qualitativas, que são apresentadas na Figura 3:

- I. Classe 1 – a evolução leva a um estado homogêneo, onde por exemplo, todas as células têm valor igual;
- II. Classe 2 – a evolução leva para uma configuração de estruturas estáveis ou periódicas que são separadas e simples;
- III. Classe 3 – a evolução leva a formação de padrões caóticos;
- IV. Classe 4 – a evolução leva a formação de estruturas complexas, algumas vezes, com um longo tempo de vida.

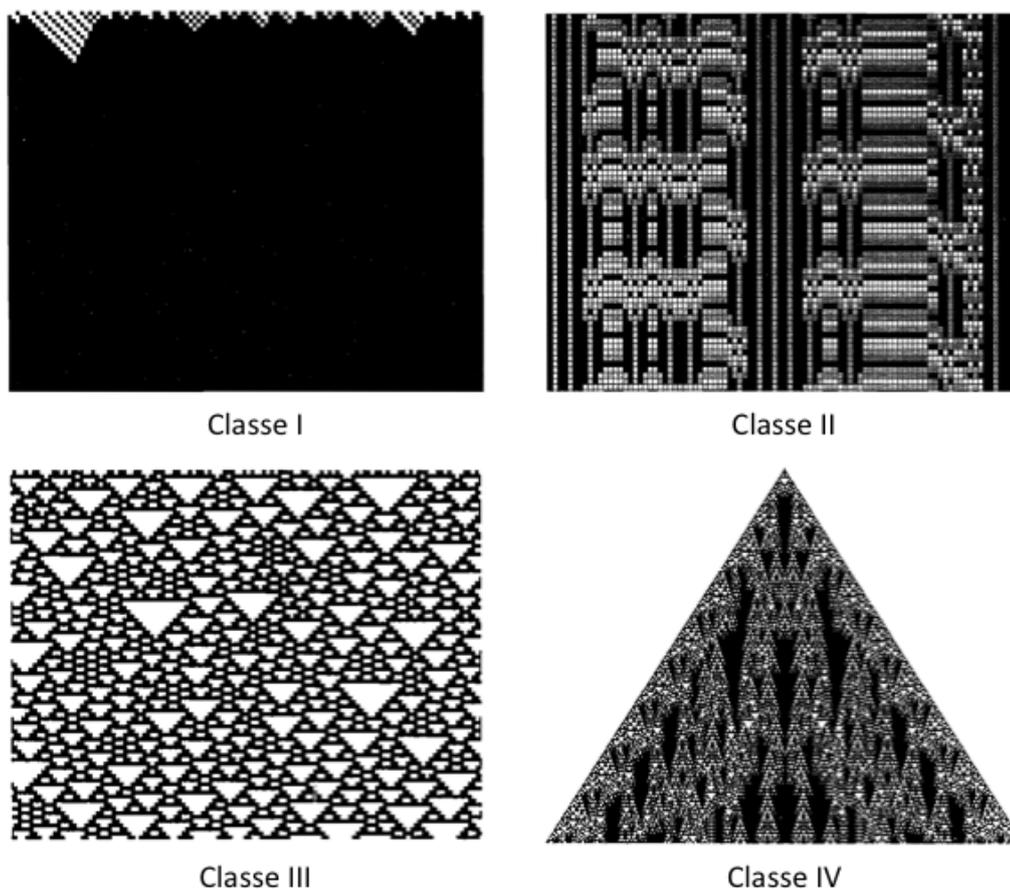


Figura 3 - Classes de autômatos celulares

2.1.4 Vizinhança

De modo geral, cada célula possui uma vizinhança, de tamanho igual para todas as células, que determina sua evolução. Para uma rede de uma dimensão, a vizinhança se dá a partir das células que fazem fronteira à esquerda e à direita. Para uma rede de duas dimensões existem basicamente dois tipos de vizinhança: Von Neumann e Moore. A vizinhança de Von Neumann considera como vizinhas as células limítrofes inferior, superior, esquerda e direita. A vizinhança de Moore, considera além destas células as células diagonalmente adjacentes (MAERIVOET e DE MOOR, 2005). No presente trabalho, as células de borda possuem o mesmo tamanho que as demais células vizinhas porém não possuem células vizinhas em todas as direções conforme a vizinhança de Moore. A Figura 4 ilustra a diferença entre as vizinhanças.

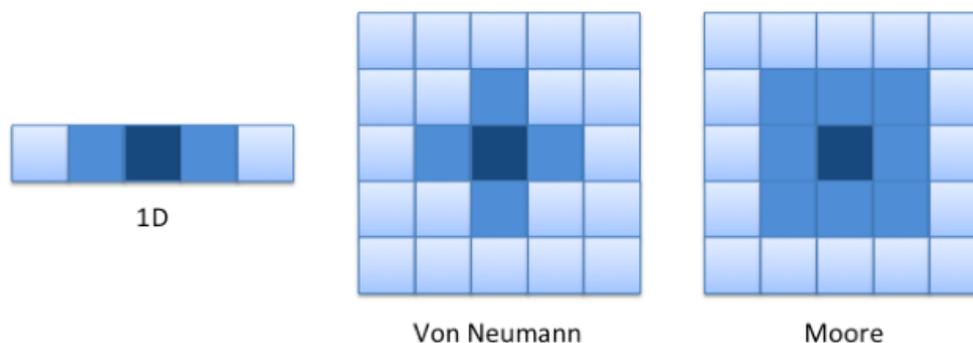


Figura 4 - Modelos de vizinhança de autômatos celulares

2.1.5 Aplicações de autômatos celulares

Os autômatos celulares têm sido aplicados, desde os primeiros estudos, na formação de padrões fractais que representam a evolução de padrões biológicos. Outra aplicação amplamente conhecida dos autômatos celulares é o “Jogo da Vida”, desenvolvido por John Conway, que simula processos de nascimento, sobrevivência e morte. Contudo, além destas aplicações clássicas de autômatos celulares, várias outras aplicações foram propostas em áreas como: criptografia de dados, geoprocessamento, incêndios florestais, espalhamento de epidemias e ocupação territorial.

Geoprocessamento

Aguiar e Costa (2001) apresentam um modelo de autômatos celulares para a subdivisão de áreas geológicas através da análise da monotonicidade da declividade do relevo, baseado na proposta de subdivisão confiável de áreas geológicas de Vladik Kreinovich.

O modelo apresentado adota a vizinhança de Von Neumann e é regulado pelo tamanho da vizinhança ao qual uma célula é dependente para a evolução de estados e pelo número de pontos da malha geofísica que representa a área a ser analisada, dependente apenas das informações topográficas como altura, latitude e longitude.

Uma estrutura bidimensional de autômatos celulares, com regras que detectam a situação do segmento em relação à área total através do estado assumido pela célula, representa a área geofísica a ser analisada a partir da subdivisão da área total em porções menores, onde cada uma destas porções é indicada por uma célula na malha.

O trabalho em questão, apresenta uma substituição ao tipo de análise realizada por Vladik Kreinovich, que é unidimensional e só cobre uma direção do modelo, por uma análise bidimensional baseada em autômatos celulares e do ponto de vista computacional, o modelo é inerentemente paralelo, pois a ordem de aplicação das regras de cada uma das células da malha não é restringida pela execução síncrona.

Ocupação territorial

Delaneze et al. (2011) utilizam um modelo baseado em autômatos celulares para simular a dinâmica espacial de ocupação territorial para uma determinada área, gerando prognósticos para comparativos entre os resultados da simulação e os dados reais obtidos pela interpretação visual de imagens de sensoriamento remoto.

O modelo empregado no trabalho reúne funções de transição de estados baseadas na vizinhança, utilizando um processo estocástico de simulação de múltiplas etapas com retroalimentação a partir do cálculo de variáveis dinâmicas.

Os dados de ocupação da área foram obtidos a partir da classificação de imagens de sensoriamento remoto digital correspondentes a séries temporais referentes a diferentes cenários de ocupação ao longo de alguns anos.

O estudo mostra uma relevante proximidade dos dados de ocupação territorial gerados a partir das simulações com os dados reais e destaca que para que sejam obtidos resultados melhores um dos fatores críticos é a área de abrangência a ser analisada, pois extrapolando-se para áreas maiores é possível considerar um número maior de variáveis.

Incêndios florestais

Lichtenegger e Schappacher (2011) examinam um modelo climático que utiliza autômatos celulares desenvolvido para estudar, em um cenário *small world*, as implicações das mudanças locais de clima e população de árvores no contexto global, baseado no modelo de incêndio florestal proposto por Clar-Drossel-Schwabl.

O modelo consiste em uma matriz retangular, onde cada célula representa uma porção de área que pode ou não ser habitada por certa quantidade de árvores com características individuais, conforme o processamento de alguns parâmetros durante a inicialização do modelo.

A transição de estados de cada célula é influenciada pelo espalhamento, que é a capacidade de uma área não habitada por árvores tornar-se habitada; nível de concentração de carbono e temperatura para a região; taxa de crescimento das árvores que habitam a área; além da probabilidade de ocorrência de incêndio de acordo com algumas regras.

Como principais resultados o trabalho analisado apresenta a identificação de parâmetros cruciais que levam à propagação de incêndios florestais, a partir da execução de várias configurações para o modelo, desde um cenário onde a população inicial de árvores não seja expressiva até situações de grande densidade populacional, considerando também a possibilidade de ocorrência de incêndios espontâneos devido às altas temperatura e concentração de carbono nas árvores.

Espalhamento de epidemias

Emmendorfer e Rodrigues (2001) apresentam um modelo de autômatos celulares para o espalhamento geográfico de epidemias, baseado nos modelos de Holmes e de Kermack e McKendrick, considerando padrões de contato locais e não locais entre os indivíduos.

O modelo apresentado considera, além de padrões locais de contato que inclui indivíduos geograficamente próximos, a inclusão de efeitos não locais que representam contatos aleatórios que possam ocorrer entre indivíduos distantes.

Um reticulado de células representa espacialmente o sistema, onde cada célula é considerada um indivíduo e possui regras que controlam a mudança de estado, em períodos discretos, de acordo com o estado das células vizinhas, podendo assumir os valores suscetível, infectado ou recuperado.

O trabalho apresenta a adição de um padrão de contato não local entre os indivíduos. Mesmo com uma probabilidade pequena, este fator permite a visualização da ocorrência de focos secundários de epidemia que tendem a fundir-se com a colônia principal conforme vão crescendo. Estes focos exercem um papel fundamental no processo de espalhamento da epidemia.

2.2 Dióxido de carbono e o efeito estufa

De acordo com Townsend (2006), os animais sociais, espécie que inclui os homens, são produtores de poluentes, contudo a poluição produzida pelos seres

humanos possui uma maior relevância comparando-se com os outros animais, pois além de emissões provenientes de seu metabolismo existem as emissões provenientes da queima de combustíveis.

Em 2010 mais de 30000 milhões de toneladas de dióxido de carbono foram liberadas na atmosfera em razão da queima de combustíveis. A Figura 5 apresenta o registro de emissão de dióxido de carbono desde 1971 até 2010.

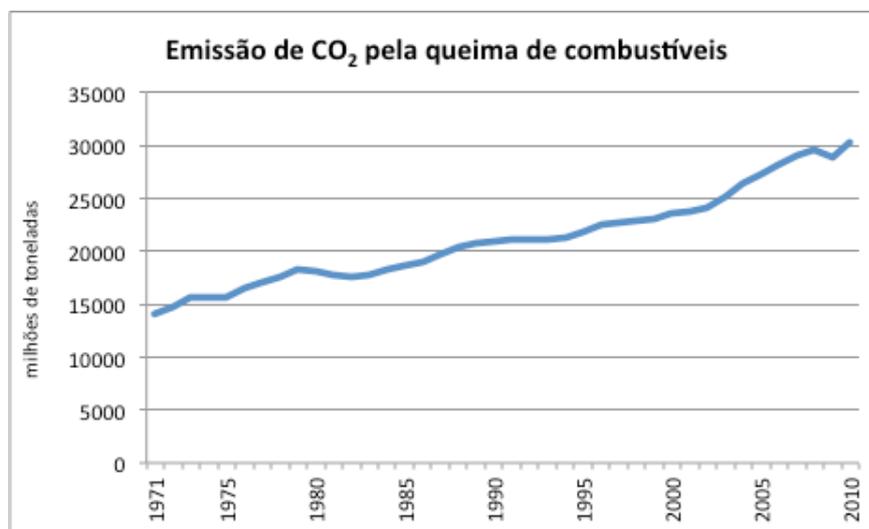


Figura 5 - Emissão de CO₂ pela queima de combustíveis (IEA, 2012)

A emissão mundial de dióxido de carbono teve uma redução de cerca de 1,5% de 2008 para 2009, contudo as tendências são muito variáveis, pois as emissões dos países desenvolvidos diminuíram enquanto que nos países em desenvolvimento, que hoje já representam praticamente 54%, aumentaram. Contudo, a tendência de emissões nos países desenvolvidos voltou a crescer a partir de 2010, semelhante ao que ocorreu em 2008, antes da recente crise financeira mundial que ocasionou no enfraquecimento da atividade econômica nestes países (IEA, 2012).

Caetano et al. (2007) afirma que um dos principais problemas associados com o crescimento econômico é aumento da demanda por energia, cuja principal fonte de geração é através da queima de combustíveis fósseis. A Figura 6 apresenta o percentual de emissão de dióxido de carbono de diferentes setores, no ano de 2010.

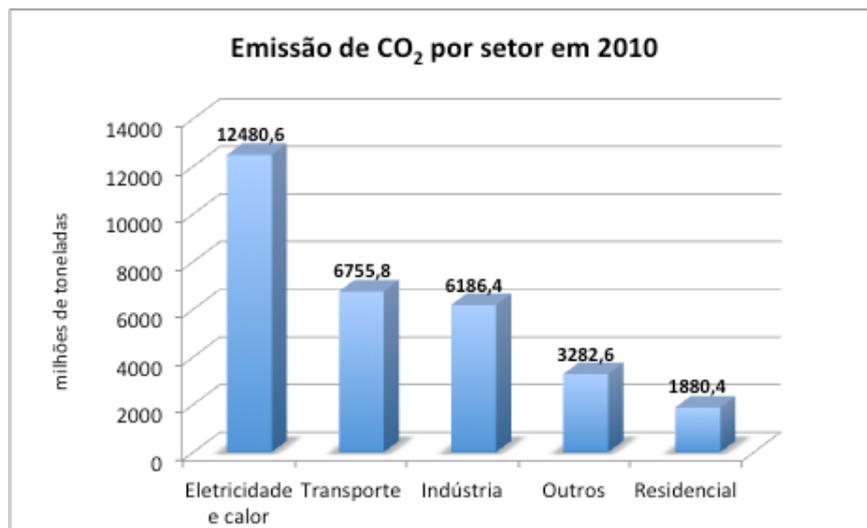


Figura 6 - Emissão de CO₂ por setores em 2009 (IEA, 2012)

Segundo Renner (2004), o aumento da concentração dos gases de efeito estufa, decorrentes em grande parte por atividades econômicas e industriais, deve-se principalmente ao acúmulo de dióxido de carbono, metano e óxido nitroso na atmosfera, contudo, devido ao volume emitido à atmosfera, o dióxido de carbono é o que apresenta a maior contribuição para o aquecimento global.

A Figura 7 mostra a emissão de dióxido de carbono devido a queima de combustíveis, por região, para o ano de 2010.

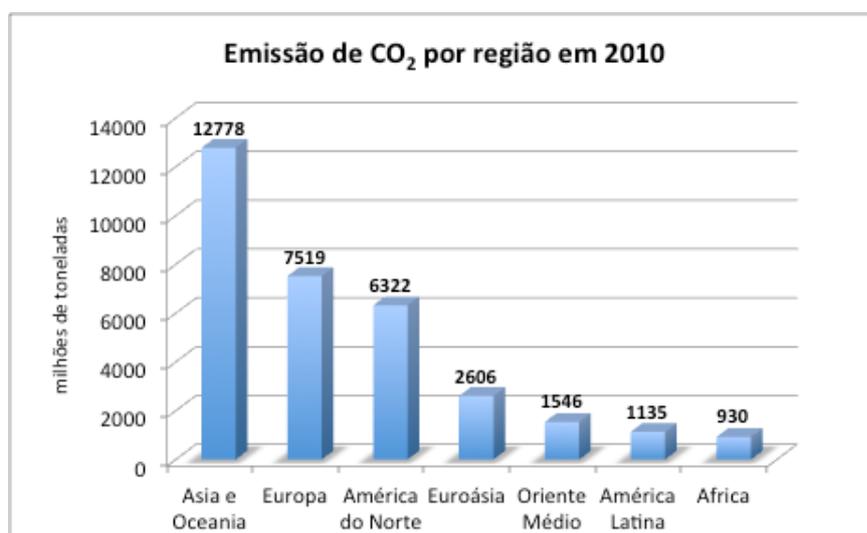


Figura 7 - Emissão de CO₂ por região em 2009 (IEA, 2012)

Pode-se observar uma crescente contribuição da poluição atmosférica nas últimas décadas. Cerca de 9×10^{10} toneladas métricas de dióxido de carbono foram liberadas na atmosfera devido a queima de combustíveis fósseis entre meados do

século XIX e meados do século XX, a mesma quantidade que foi adicionada à atmosfera desde 1950. Segundo Townsend (2006), a concentração atmosférica de dióxido de carbono aumentou de 280 para 370 ppm desde 1750 e de acordo com estimativas, até o ano de 2100, esta quantidade poderá chegar a 700 ppm caso não aconteçam alterações no comportamento dos seres humanos.

Conforme Soares e Oliveira (2002), o aumento da concentração de dióxido de carbono na atmosfera pode resultar em mudanças permanentes no clima global, criando novos padrões de ocorrência para correntes de vento, alterando as frequências e volumes de precipitações pluviométricas, modificando a circulação de oceanos, o que acarretaria em perturbações nas condições de vida no planeta.

Nas florestas tropicais, o desmatamento para a extração de madeiras, assim como as queimadas para a utilização da área voltada para a criação de animais, são duas das mais importantes causas do aumento de dióxido de carbono na atmosfera (TOWNSEND, 2006).

De acordo com Townsend (2006), a temperatura atual da superfície terrestre está $0,6 \pm 0,2^\circ$ C mais quente do que durante o período pré-industrial e que até o ano de 2100 continuará aumentando e poderá estar de $1,4$ a $5,8^\circ$ C mais quente.

A Figura 8 apresenta um comparativo de emissão de dióxido de carbono na atmosfera entre os anos de 2001 e 2009 para cada região.

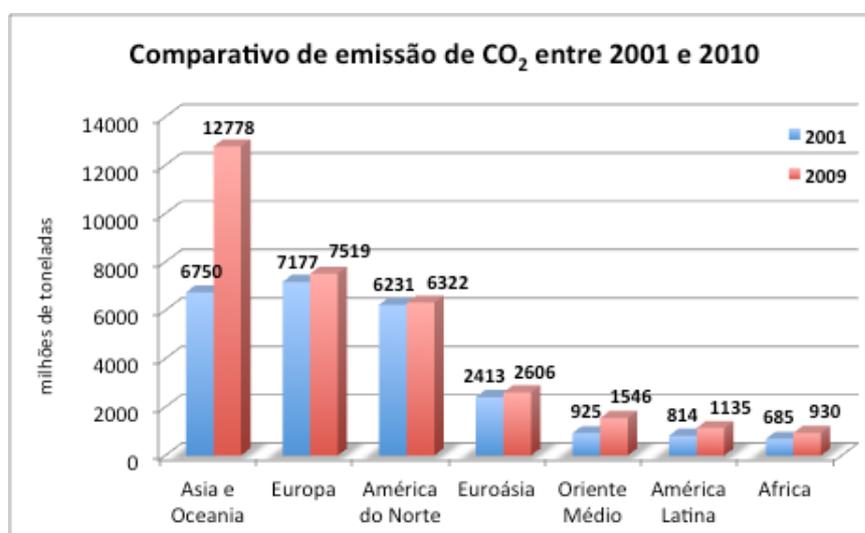


Figura 8 - Comparativo da emissão de CO₂ por região entre 2001 e 2010 (IEA, 2012)

Enquanto a emissão de dióxido de carbono apresentou um discreto aumento nos países desenvolvidos no período de 2001 a 2010, nos países em

desenvolvimento a quantidade de emissão aumentou consideravelmente, principalmente na Ásia e Oriente Médio (IEA, 2012).

Existem algumas ações que podem ser empregadas para a redução da concentração de dióxido de carbono na atmosfera, Soares e Oliveira (2002) destacam a redução da queima de combustíveis fósseis e material vegetal e também, o sequestro de carbono a partir do plantio e manejo de florestas, contudo, a redução da queima de combustíveis fósseis implica diretamente no desaquecimento da economia de países desenvolvidos. Além disso, os desmatamentos e alterações no uso de territórios dificilmente deixarão de ocorrer devido ao crescimento populacional e o aumento da demanda por novas áreas para atividades agrícolas e de pecuária. Desta forma, o sequestro de carbono torna-se uma opção mais atrativa para atuar na redução de dióxido de carbono na atmosfera.

Renner (2004) considera o sequestro de carbono a partir do reflorestamento em larga escala uma alternativa para amenizar os impactos da emissão de dióxido de carbono na atmosfera, pois, através da capacidade fotossintética, as árvores conseguem capturar e fixar o dióxido de carbono em suas estruturas através da biossíntese.

Soares et al. (2005) destaca que mesmo as florestas desempenhando um papel importante no sequestro de carbono existem algumas atividades florestais que contribuem para aumento da concentração do dióxido de carbono na atmosfera, como a queima de madeira para fabricação de carvão e o processo de polpação para produção de papel, quando todo o carbono armazenado na árvore é liberado novamente para a atmosfera.

2.3 Cultura do eucalipto

O estabelecimento de plantios de eucalipto no Brasil, começou no início de século XX, mas foi somente no período entre 1965 e 1988, devido a provisão de incentivos fiscais, teve o seu grande impulso. Inicialmente introduzido com o objetivo de suprir as necessidades de lenha, postes e dormentes em ferrovias, a partir da década de 1950 passou a ser produzido como matéria prima para a indústria de celulose e papel (EMBRAPA, 2010).

2.3.1 Área plantada

A área plantada com eucaliptos, até o final de 2009, era de aproximadamente 4,52 milhões de hectares (EMBRAPA, 2010). Segundo a ABRAF (2012), em 2011, a área de plantios de eucalipto no Brasil totalizou 4,87 milhões de hectares, que representa 74,8% da área ocupada por plantios florestais. Este número, em grande parte deve-se ao estabelecimento de novos plantios para suprir a demanda futura dos projetos industriais do segmento de celulose e papel.

Especificamente no Rio Grande do Sul, há uma área de 280198ha de plantios de eucalipto, o que representa 5,7% da área nacional e coloca o estado como o quinto maior em plantios de eucalipto, como mostra a Figura 9 (ABRAF, 2012).

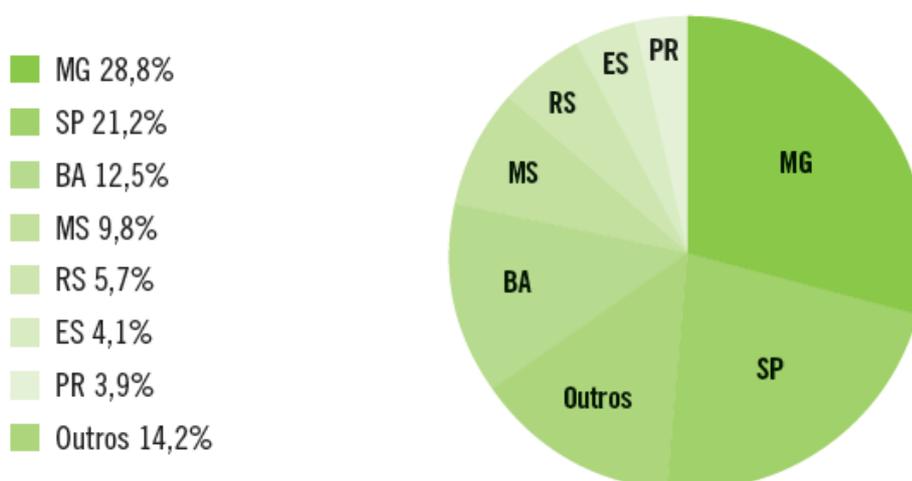


Figura 9 - Percentual da área de plantios de eucalipto por estado em 2011 (ABRAF, 2012)

2.3.2 Aproveitamento comercial

A cultura do eucalipto no Brasil encontrou bases sólidas para o seu desenvolvimento, inicialmente, motivada, principalmente, pelo potencial uso como fonte de biomassa para combustível e pelo emprego como matéria-prima para a indústria de celulose e papel (EMBRAPA, 2010).

Nas décadas de 1960 e 1970, a madeira do eucalipto era amplamente utilizada para a confecção de postes, dormentes e mourões, contudo, devido aos problemas com rachaduras e empenamentos, não era utilizada para usos mais nobres como serraria e móveis. Porém, do ponto de vista econômico e ecológico,

devido à crescente demanda de madeira para o mercado, a sua utilização nestas áreas passou a ser vista como medida racional e vantajosa, pois evitaria o corte de muitas florestas naturais (EMBRAPA, 2010).

O eucalipto apresenta-se como uma importante fonte de recursos para diferentes áreas, pois o óleo extraído das folhas são empregados em produtos de limpeza e alimentícios, perfumes e remédios, a casca oferece tanino, usado no processo de curtimento do couro, a madeira do tronco é utilizada para a fabricação de sarrafos, lambris, ripas, vigas, postes, varas, mastros para barco, tábuas para embalagens e móveis. Além disso, a fibra é utilizada como matéria-prima para a indústria de fabricação de celulose e papel (VARGAS et al., 2007).

2.3.3 Meio ambiente

As florestas plantadas destacam-se atualmente como um dos principais recursos no combate às causas das mudanças climáticas, devido à alta capacidade de fixar o carbono atmosférico (EMBRAPA, 2010). Além disso, também são utilizadas na reabilitação ou proteção de áreas degradadas por erosão, extensa atividade pecuária e mineração.

De acordo com Azevedo (2009) o eucalipto, quando plantado de forma adequada e sendo bem manejado, pode transformar-se em um grande aliado da natureza, pois as florestas plantadas de eucalipto são renováveis, tendo grande importância na utilização da madeira, aliada à preservação do meio ambiente.

Destaca-se ainda, benefícios ambientais como a melhora na fertilidade do solo, reciclagem de nutrientes e proteção de bacias hidrográficas e da biodiversidade (EMBRAPA, 2010).

2.3.4 Crescimento e produção

No Brasil e no mundo, espécies de eucalipto têm sido preferencialmente utilizadas devido ao seu rápido crescimento, capacidade de adaptação às diversas regiões ecológicas e pelo potencial econômico de utilização diversificada de sua madeira (EMBRAPA, 2010).

De acordo com Oliveira et al. (1999), as árvores de eucalipto apresentam alta taxa de crescimento, plasticidade, forma retilínea do fuste, ou seja, a parte

da árvore desde o solo até os primeiros ramos, desrama natural e variações das propriedades tecnológicas adaptadas as diversas condições de uso.

Para Aveiro e Cercal (2007), as florestas comerciais de eucalipto representam 4% do PIB brasileiro, atuando nos segmentos papelero, energético e moveleiro, com a produção de celulose para a indústria de papel, produção de carvão e produção de chapas e laminados para a fabricação de móveis.

Em 2011, 71,2% da área plantada de eucalipto foi destinada ao segmento de celulose e papel, 18,4% para o segmento de siderurgia a carvão vegetal, 6,8% para a fabricação de painéis de madeira industrializada e o restante para produtores independentes (ABRAF, 2012).

2.3.5 Espaçamento

O espaçamento influenciará as taxas de crescimento, a qualidade da madeira produzida, a idade de corte, os desbastes, as práticas de manejo e consequentemente os custos de produção, sendo provavelmente uma das principais técnicas de manejo que visa a qualidade e a produtividade da matéria-prima (EMBRAPA, 2010).

Para Aveiro e Cercal (2007) é importante a definição prévia do espaçamento antes do plantio, com o objetivo de melhor dimensionar a quantidade de mudas a serem adquiridas, bem como para serem definidas as operações de preparo do solo.

Normalmente os plantios são feitos sob espaçamentos variando entre 3x1,5m, 3x2m, 3x2,5m, 2,5x2,5m e 3x3m. Quanto à forma, os quadrados ou retangulares são os mais indicados e praticados. Espaçamentos menores são indicados para produção de madeira para fins energéticos, já os espaçamentos maiores, são empregados quando se deseja matéria-prima para fins de fabricação de celulose e papel ou serraria e laminados (EMBRAPA, 2010).

2.3.6 Pragas

As principais pragas que podem danificar as mudas florestais são as lagartas-rosca, lagarta-elasma, grilos, paquinhãs, cupins, formigas cortadeiras, besouros desfolhadores e moscas minadoras (AVEIRO e CERCAL, 2007).

No Brasil, o registro de insetos associados aos cultivos florestais de

eucalipto é vasto e inclui várias pragas. As perdas ocasionadas por insetos-praga são de grande importância. Em grande parte, isto é devido às extensas monoculturas predominantes no sistema produtivo estabelecidas com pouca diversidade de espécies, associados a problemas silviculturais (EMBRAPA, 2010).

A principal praga que afeta o plantio de eucalipto é a formiga cortadeira, cujo ataque impede a obtenção de resultados positivos para o plantio, mesmo com bom preparo de solo, emprego de espaçamento adequado e adubação correta. Desta forma faz-se necessário um combate efetivo para evitar perdas (CRESTANA e MOREIRA, 2009).

As formigas cortadeiras podem causar desfolha total e até a morte das plantas, sendo até os dois primeiros anos o período mais suscetível aos ataques, pois ataques mais graves podem causar a morte das plantas que podem chegar a 15% do plantio (EMBRAPA, 2010).

2.3.7 Espécies

De acordo com Crestana e Moreira (2009) e Embrapa (2010), existem no Brasil diversas espécies comerciais de eucalipto, cada uma com uma característica própria, adaptação para o desenvolvimento em determinadas condições climáticas e indicação de uso. Algumas das indicações de uso para estas espécies incluem o potencial aproveitamento na indústria de celulose e papel, utilização como combustível vegetal, fabricação de móveis, extração de óleos essenciais e fonte de néctar para o setor de apicultura.

A Tabela 1 apresenta algumas espécies de eucalipto e indicações de uso.

Tabela 1 - Espécies de eucalipto com indicações de uso

Espécie	Indicação de uso
<i>Eucalyptus dunnii</i>	Carvão vegetal e serraria
<i>Eucalyptus benthamii</i>	Carvão vegetal
<i>Eucalyptus grandis</i>	Carvão vegetal, celulose e papel, construção civil e serraria
<i>Eucalyptus saligna</i>	Carvão vegetal, laminação, móveis, postes, mourões e celulose e papel
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	Carvão vegetal, serraria, postes, dormentes, construção civil e produção de mel

Espécie	Indicação de uso
<i>Eucalyptus urophylla</i>	Celulose e papel e produção de mel
<i>Eucalyptus tereticornis</i>	Carvão vegetal, serraria, postes, dormentes e construção civil
<i>Eucalyptus maculata</i>	Serraria, laminação, marcenaria, dormentes, postes, mourões
<i>Eucalyptus cloeziana</i>	Carvão vegetal e construção civil
<i>Eucalyptus citriodora</i>	Carvão vegetal, mourões, óleos essenciais e marcenaria
<i>Eucalyptus torelliana</i>	Mourões e cercas
<i>Eucalyptus robusta</i>	Produção de mel
<i>Eucalyptus exserta</i>	Óleos essenciais
<i>Eucalyptus staigeriana</i>	Óleos essenciais

Além de apresentarem diferentes indicações de uso, existem espécies de eucalipto que apresentam maior facilidade de adaptação a certas condições climáticas (HIGA et al., 2000).

Na Tabela 2 são apresentadas algumas espécies de eucalipto de acordo com as condições climáticas mais adequadas para o plantio.

Tabela 2 - Espécies de eucalipto e condições climáticas

Espécie	Condição climática favorável ao plantio
<i>Eucalyptus dunnii</i>	Áreas com geadas severas
<i>Eucalyptus benthamii</i>	Áreas com geadas severas
<i>Eucalyptus grandis</i>	Áreas livres de geadas
<i>Eucalyptus urophylla</i>	Áreas livres de geadas
<i>Eucalyptus saligna</i>	Áreas livres de geadas
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	Áreas com geadas leves
<i>Eucalyptus tereticornis</i>	Áreas livres de geadas
<i>Eucalyptus maculata</i>	Áreas livres de geadas
<i>Eucalyptus citriodora</i>	Áreas com geadas leves
<i>Eucalyptus robusta</i>	Áreas livres de geadas

No RS, segundo Schumacher et al.(2011), a espécie *Eucalyptus grandis* é a mais cultivada por apresentar maior facilidade de adaptação as condições climáticas da região sul do país.

2.3.8 Área de estudo

A área de estudo consiste em um plantio comercial com 6ha de eucalipto da espécie *Eucalyptus grandis* com 6 anos do primeiro ciclo.

Localizado no interior do município de Candiota-RS o plantio pertence a uma grande empresa, líder mundial no setor de celulose e papel.

O espaçamento adotado para o plantio foi 3x2m devido às condições de produtividade que melhor atendem a demanda comercial, o que contabiliza mais de 9000 árvores.

As árvores possuem aproximadamente 16cm de DAP (Diâmetro na Altura do Peito) e medem entre 18,5m e 19,5m de altura.

Ao longo de toda a extensão do plantio há um grande acúmulo de serrapilheira, formado principalmente por folhas, ramas e galhos.

2.4 Trabalhos relacionados

Devido à sua ampla diversidade de aplicações em diversos setores de indústria, comércio e meio ambiente, além de ser um dos gêneros mais utilizados em plantios florestais no Brasil, o eucalipto desperta o interesse de pesquisadores. A estimativa de crescimento e quantificação da biomassa e a quantificação do estoque de carbono são exemplos de pesquisas sobre o eucalipto. Além disso, existe um *software* que realiza a previsão de crescimento populacional de eucalipto.

2.4.1 Biomassa em povoamentos de eucalipto

Schumacher et al. (2011) apresentam um estudo sobre a quantificação de biomassa de um povoamento de eucalipto em pequenas propriedades rurais de Vera Cruz-RS.

Para a realização do trabalho, algumas árvores, agrupadas por classe de DAP em três grupos, foram abatidas e todo o material orgânico foi quantificado, desde a parte aérea, o fuste e a raiz, bem como amostras da serrapilheira acumulada no plantio.

As análises foram realizadas em laboratório, em balanças eletrônicas com 0,01g de precisão, após a secagem do material em estufas.

Entre os resultados apresentados pelo trabalho estão a constatação do aumento da biomassa relativa em função da idade, mesmo com a redução de folhas, galhos, casca e raiz. Além disso, foram destacados fatores que afetam a distribuição da biomassa nos diferentes componentes das árvores, tais fatores são a idade, a espécie, a fertilidade do solo e o espaçamento utilizado no plantio.

O estudo ainda salienta que o corte, quando realizado antes de 6 anos, implica em perda do rendimento de madeira do plantio.

2.4.2 Estoque de carbono em eucaliptos

Soares et al. (2005), apresentam em seu trabalho o ajuste de equações do modelo de Clutter para estimar o carbono presente no fuste de árvores individuais de eucalipto e o estoque de carbono, por unidade de área, em diferentes condições de plantio.

A fim de possibilitar o desenvolvimento do trabalho, foram realizadas medições do DAP, altura, bem como a cubagem para obtenção do volume e a retirada de discos de madeira para a determinação da densidade em 532 árvores, selecionadas aleatoriamente, com variada classificação de altura.

Considerando que 50% da biomassa é composta por carbono, Soares et al. (2011) destacaram que as equações para estimar a quantidade de carbono presente no fuste em função do DAP e altura apresentaram-se precisas.

2.4.3 Sistema de previsão de crescimento

A Embrapa possui em seu catálogo de produtos e serviços o sistema SisEucalipto, que realiza a previsão do crescimento e produção anual de florestas de eucalipto (EMBRAPA, 2012).

O sistema informa, de acordo com as características do plantio, a época e a intensidade ideais para a realização do corte das árvores, conforme a produtividade necessária de acordo com a destinação, seja uso na indústria de celulose e papel, serraria ou demais industrializações da madeira.

3 FORMALIZAÇÃO DE UM MODELO PARA A QUANTIFICAÇÃO DO CARBONO NEUTRALIZADO

A emissão de dióxido de carbono na atmosfera é um dos principais responsáveis pelas causas do efeito estufa. Atualmente existem diversas maneiras de amenizar este fenômeno, uma delas é a neutralização a partir do plantio de árvores.

Através de modelos matemáticos é possível estimar a capacidade de neutralização de carbono para uma determinada espécie de árvore conforme suas características como idade, altura e tamanho da copa.

Os autômatos celulares, por serem estruturas matemáticas constituídas de um reticulado de células, onde cada célula evolui de acordo com as características das células vizinhas, têm sido empregados em modelagens de geoprocessamento, dinâmica populacional e propagação de incêndios florestais.

No presente trabalho propõe-se utilizá-los para mapear e simular as perdas, ou seja, árvores atacadas por pragas no primeiro ano de cada ciclo.

O processo de captura de carbono realizado pelas árvores ocorre através da capacidade de fixação do dióxido de carbono nas folhas, ramos e tronco, durante o processo de fotossíntese. A serrapilheira, camada de solo formada pela decomposição e acúmulo de matérias orgânicas morta como folhas, galhos e sementes, também atua como importante neutralizador de dióxido de carbono atmosférico (AREVALO et al., 2002).

A quantificação da capacidade de fixação de dióxido de carbono de uma determinada espécie de árvore depende da soma do potencial de neutralização da parte aérea, através das folhas, da biomassa do tronco e da serrapilheira. Através da formalização matemática destes três potenciais de captura é possível estimar a capacidade de fixação da árvore, levando em conta diversas características e quantificadores em uma área plantada (AREVALO et al., 2002).

A quantidade de árvores de eucalipto existente na região de Bagé-RS e a existência de grandes fontes emissoras de poluentes atmosféricos na região, torna

interessante o estudo do potencial de fixação de dióxido de carbono para determinadas áreas dessa espécie.

A partir da criação do modelo matemático composto pelas formalizações, o presente trabalho propõe sua implementação computacional, utilizando a metodologia dos autômatos celulares, para a simulação do potencial de captura de dióxido de carbono atmosférico através de plantações comerciais de eucalipto existentes na região de Bagé-RS.

3.1 Quantificação da biomassa

O modelo a ser proposto para a quantificação de carbono sequestrado depende da quantificação da biomassa vegetal total do plantio. Esta é composta pela em biomassa arbórea viva, biomassa das árvores mortas em pé, biomassa da árvore mortas caídas e da biomassa da serrapilheira.

A metodologia do cálculo para a quantificação da biomassa foi determinada pelo *International Centre for Research in Agroforestry* - ICRAF. Todas as equações apresentadas nesta seção correspondem a esta metodologia e foram descritas por Arevalo et al. (AREVALO et al., 2002).

3.1.1 Biomassa arbórea viva

Para a quantificação de carbono presente na biomassa arbórea viva, são considerados o diâmetro na altura do peito (DAP) e as constantes escalares 0,1184 e 2,53 definidas pelo ICRAF, como mostra a equação 3, (AREVALO et al., 2002).

$$BAVT = (0,1184 \cdot DAP^{2,53}) \cdot 0,1 \quad (3)$$

onde:

BAVT (t/ha) é a biomassa arbórea viva total em toneladas por hectare;

0,1184 e 2,53 são constantes;

DAP (cm) é o diâmetro na altura do peito à aproximadamente 1,3m do solo;

0,1 é o fator de conversão para o cálculo de t/ha.

A biomassa arbórea viva, constituída pelo tronco, ramos e folhas das árvores é obtida através da aplicação da metodologia definida por (AREVALO et al., 2002).

3.1.1 Biomassa de árvores mortas em pé

Para determinar a biomassa das árvores mortas em pé de um plantio, utiliza-se o mesmo procedimento utilizado para a biomassa arbórea viva.

$$BAMP = (0,1184 \cdot DAP^{2,53}) \cdot 0,1 \quad (4)$$

onde:

BAMP (t/ha) é o biomassa de árvores mortas em pé;

0,1184 e 2,53 são constantes;

DAP (cm) é o diâmetro na altura do peito;

0,1 é o fator de conversão para o cálculo de t/ha.

3.1.2 Biomassa de árvores mortas caídas

Para determinar a biomassa das árvores mortas caídas de um plantio são requeridos o diâmetro na altura do peito e o comprimento da árvore.

$$BAMC = 0,4 \cdot DAP^2 \cdot L \cdot 0,25 \cdot \pi \cdot 0,1 \quad (5)$$

onde:

BAMC (t/ha) é o biomassa de árvores mortas caídas;

0,4 é a densidade, assumida por convenção;

DAP (cm) é o diâmetro na altura do peito;

L (m) é o comprimento da árvore;

0,25 e π (3,1416) são constantes;

0,1 é o fator de conversão para o cálculo de t/ha.

3.1.3 Biomassa da serrapilheira

Para o cálculo da biomassa da serrapilheira são considerados o peso fresco e o peso seco do volume de material extraído para amostra, a área de extração da amostra e o fator de conversão 0,04, (AREVALO et al., 2002).

$$BH = \frac{PSM}{PFM} \cdot PFT \cdot 0,04 \quad (6)$$

onde:

BH (t/ha) é a biomassa da serrapilheira;

PSM é o peso seco da amostra coletada;

PFM é o peso fresco da amostra coletada;

PFT é o peso fresco total por metro quadrado;

0,04 é o fator de conversão para o cálculo de t/ha.

3.1.4 Biomassa vegetal total

A biomassa vegetal total compreende a soma de todas as biomassas anteriores, lembrando que estas são definidas para apenas uma árvore, de modo que para obter-se os valores para o respectivo plantio é necessário realizar o somatório das biomassas de todas as árvores.

$$BVT = SBAVT + SBAMP + SBAMC + SBH \quad (7)$$

onde:

BVT (t/ha) é a biomassa vegetal total;

SBAVT é o somatório da biomassa arbórea viva de todas as árvores;

SBAMP é o somatório da biomassa arbórea de todas as árvores mortas em pé;

SBAMC é o somatório da biomassa arbórea de todas as árvores mortas caídas;

SBH é o somatório da biomassa da serrapilheira.

3.2 Quantificação do carbono

Após a quantificação da biomassa vegetal total é possível estabelecer a quantificação de carbono neutralizado pelo plantio.

3.2.1 Cálculo do carbono na biomassa vegetal total

Para o cálculo do carbono na biomassa vegetal total é necessário o valor da biomassa vegetal total.

$$CBV = BVT \cdot 0,45 \quad (8)$$

onde:

CBV (t/ha) é o carbono na biomassa vegetal;

BVT é a biomassa vegetal total;

0,45 é uma constante.

3.2.2 Cálculo do carbono no solo

Para o cálculo do carbono no solo são necessários o peso do volume no solo e o percentual do carbono da amostra analisada em laboratório.

$$CS = \frac{(PVS \cdot \%C_{LAB})}{100} \quad (9)$$

onde:

CS (t/ha) é o carbono no solo;

PVS é o peso do volume no solo;

$\%C_{LAB}$ é o resultado do carbono em percentual analisado em laboratório;

100 é o fator de correção.

$$DA = \frac{PSN}{VCH} \quad (10)$$

onde:

DA (g/cm^3) é a densidade aparente;

PSN é o peso seco dentro do cilindro;

VCH é o volume do cilindro Uhland.

$$PVS = DA * PS * 10000 \quad (11)$$

onde:

PVS (t/ha) é o peso do volume no solo;

DA é a densidade aparente;

PS é a profundidade ou espessura do horizonte do solo;

10000 é uma constante.

3.2.3 Cálculo do carbono total

O cálculo do carbono total refere-se a soma dos cálculos do carbono na biomassa vegetal total e do carbono no solo.

$$CT = CBV + CS \quad (12)$$

onde:

CT (t/ha) é o carbono total;

CBV é o carbono na biomassa vegetal total;

CS é o carbono no solo.

O carbono total neutralizado, obtido quando aplicada a metodologia descrita por Arevalo et al. (2002), resulta na unidade de toneladas por hectare.

3.3 Formalização do modelo

O Autômato Celular (AC) do modelo pode ser definido como uma quádrupla $A = (L, S, N, f)$, onde:

$$L(m, n) | m \in \mathbb{N} : m > 0 | n \in \mathbb{N} : n > 0$$

$$S = [0, 1, 2, 3]$$

$$N(c) = \{x | z | x \in L | z \in L | \|z - x\|_{\infty} \leq 1$$

$$f(x) = \left\{ \begin{array}{l} 3 \rightarrow \sum z \leq 0 | S(z) = 1 \\ 2 \rightarrow \sum z = 1 | S(z) = 1 \\ 1 \rightarrow \sum z = 2 | S(z) = 1 \\ 0 \rightarrow \sum z > 2 | S(z) = 1 \\ 0 \rightarrow \sum z \geq 1 | S(x) = 1 : S(z) = 1 \end{array} \right\}$$

A dimensão do reticulado de células depende do tamanho da área a ser utilizada para o cálculo. O conjunto de estados refere-se à representação da vitalidade da árvore representada por cada célula, a qual é afetada pela penalidade aplicada à árvore em decorrência de ataque de pragas. A vizinhança a ser

considerada para a evolução dos estados de cada célula é a de Moore, com raio igual a 1. A função de transição estabelece condições para o estado da célula de acordo com os estados das células vizinhas.

A descrição do fluxo do processamento das transições do modelo será realizada a partir de um grafo dirigido, onde o processamento da quantificação do carbono neutralizado será realizado nos vértices, possibilitando assim a divisão em etapas de acordo com a característica de comportamento de cada etapa do modelo. Desta forma, o procedimento pode ser beneficiado pela realização de algumas tarefas em paralelo, potencializando a eficácia.

A Figura 10 mostra a representação das transições entre os vértices do grafo.

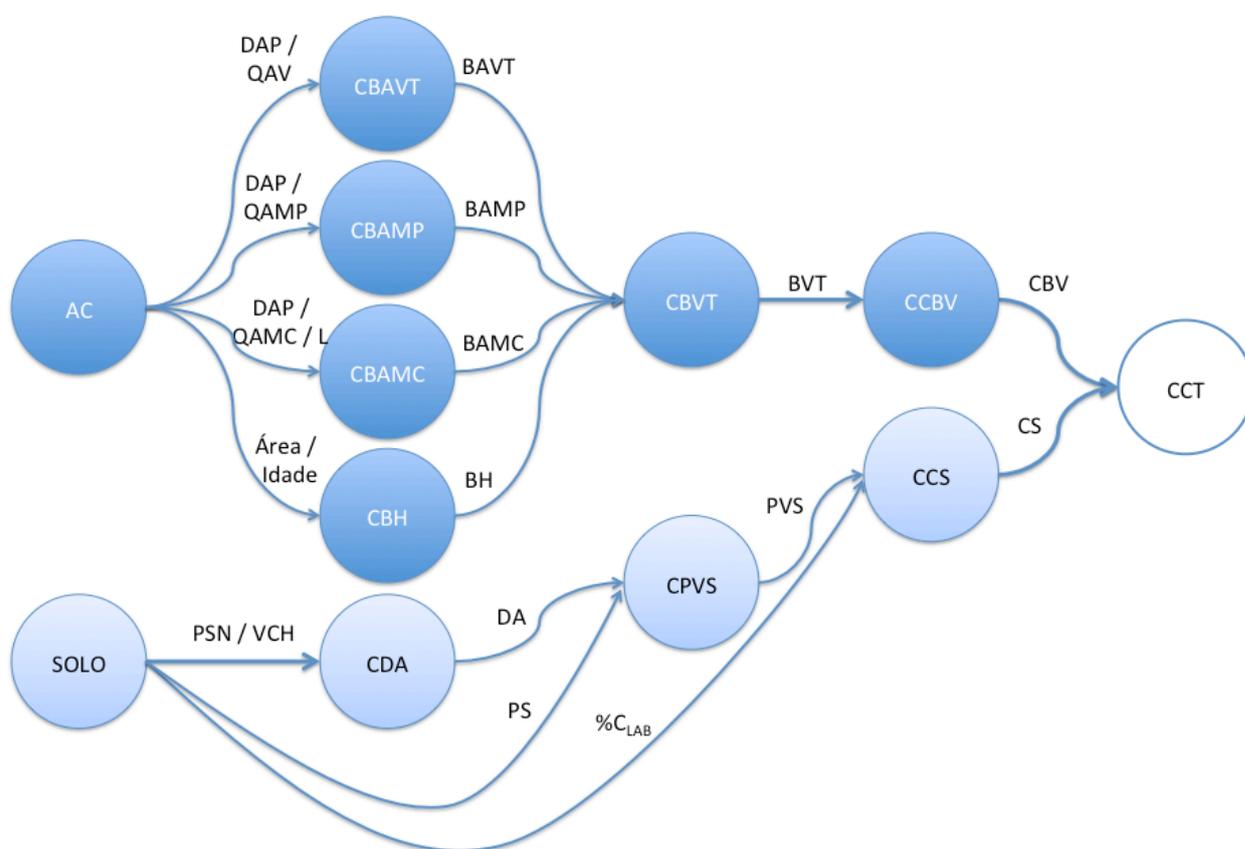


Figura 10 - Grafo de transição do modelo

Salienta-se que o grafo dirigido de transição do modelo foi estruturado, de forma simplificada, para possibilitar a identificação do comportamento de cada etapa do modelo proposto para quantificar a neutralização de dióxido de carbono.

O vértice definido como AC representa o autômato celular que a partir de

sua evolução temporal fornece dados necessários para o processamento do modelo.

Como parâmetro de entrada, este vértice necessita da área do plantio e o espaçamento utilizado.

Após o processamento, este vértice gera os seguintes parâmetros:

- Idade: idade do plantio em diferentes espaços de tempo;
- DAP: diâmetro na altura do peito de acordo com a idade do plantio;
- QAV: quantidade de árvores viva do plantio;
- QAMP: quantidade de árvores mortas em pé;
- QAMC: quantidade de árvores mortas caídas;
- L: altura média das árvores;
- Área: área do plantio.

Estes parâmetros são utilizados por outros vértices como parâmetros de entrada.

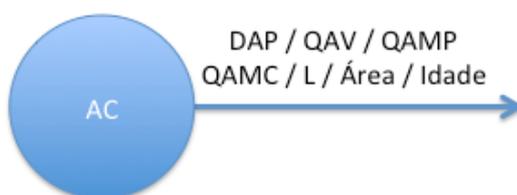


Figura 11 - Representação do vértice AC

O vértice definido como CBAVT é responsável pela quantificação da biomassa arbórea viva.

Como parâmetros de entrada, este vértice necessita do DAP e do QAV.

Após o processamento dos dados recebidos, este vértice gera o parâmetro BAVT, que representa a Biomassa Arbórea Viva Total. Este parâmetro é utilizado por outro vértice como parâmetro de entrada.

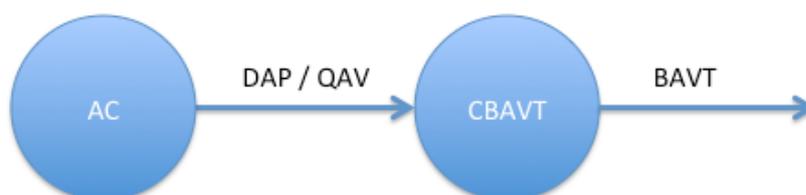


Figura 12 - Representação do vértice CBAVT

O vértice definido como CBAMP é responsável pela quantificação da

biomassa de árvores mortas em pé.

Como parâmetros de entrada, este autômato necessita do DAP e do QAMP.

Após o processamento dos dados recebidos, este vértice gera o parâmetro BAMP, que representa a Biomassa de Árvores Mortas em Pé. Este parâmetro é utilizado por outro vértice como parâmetro de entrada.

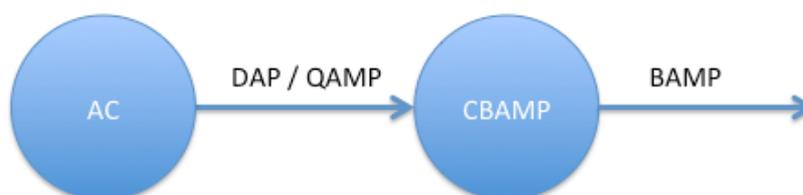


Figura 13 - Representação do vértice CBAMP

O vértice definido como CBAMC é responsável pela quantificação da biomassa de árvores mortas caídas.

Como parâmetros de entrada, este vértice necessita do DAP, do QAMC e do L.

Após o processamento dos dados recebidos, este vértice gera o parâmetro BAMP, que representa a Biomassa de Árvores Mortas Caídas. Este parâmetro é utilizado por outro vértice como parâmetro de entrada.

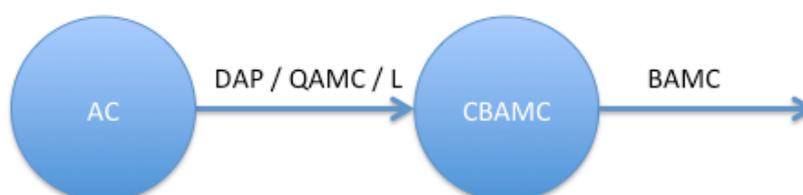


Figura 14 - Representação do vértice CBAMC

O vértice definido como CBH é responsável pela quantificação da biomassa da serrapilheira.

Como parâmetros de entrada, este vértice necessita da Área e da Idade.

Após o processamento dos dados recebidos, este vértice gera o parâmetro BH, que representa a Biomassa da Serrapilheira. Este parâmetro é utilizado por outro vértice como parâmetro de entrada.

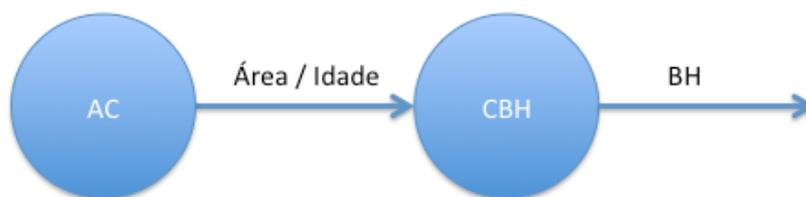


Figura 15 - Representação do vértice CBH

O vértice definido como CBVT é responsável pelo cálculo da biomassa vegetal total.

Como parâmetros de entrada, este vértice necessita das quantificações de biomassa realizadas por outros vértices.

Após o processamento dos dados recebidos, este vértice gera o parâmetro BVT, que representa a Biomassa Vegetal Total. Este parâmetro é utilizado por outro vértice como parâmetro de entrada.

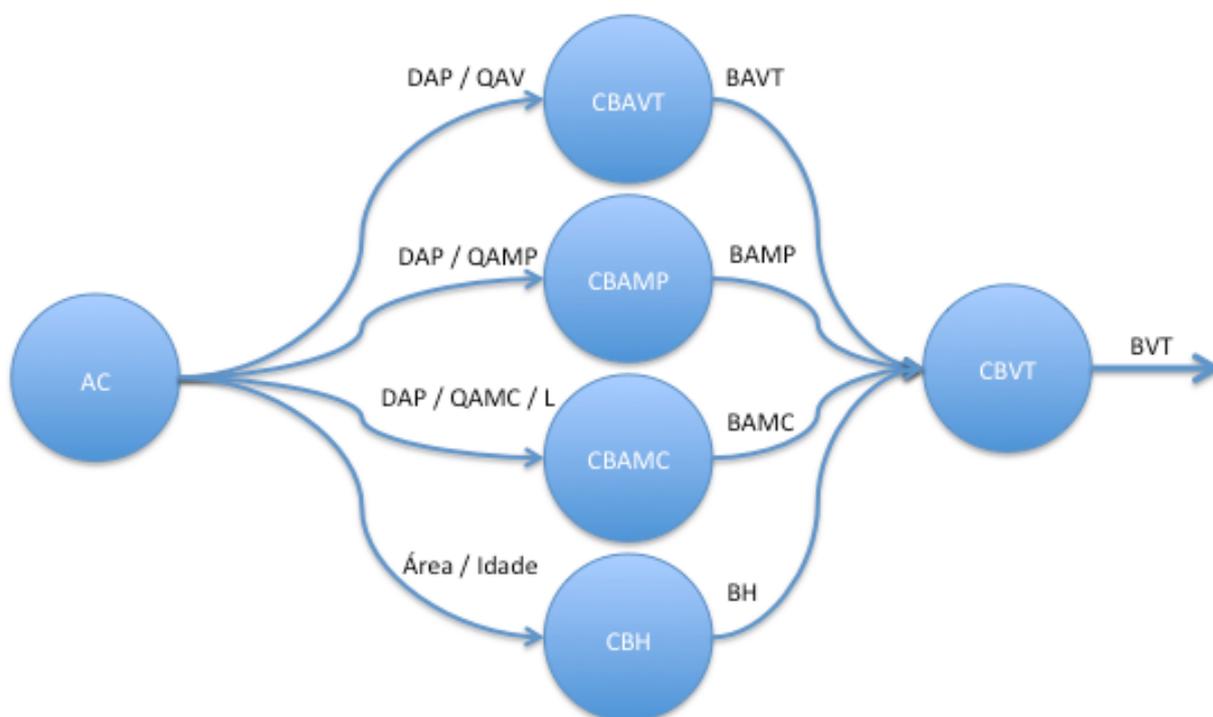


Figura 16 - Representação do vértice CBVT

O vértice definido como CCBV é responsável pelo cálculo do carbono da biomassa vegetal.

Como parâmetro de entrada, este vértice necessita da quantificação da biomassa vegetal total.

Após o processamento do dado recebido, este vértice gera o parâmetro

CBV, que representa a quantificação do Carbono da Biomassa Vegetal. Este parâmetro é utilizado por outro vértice como parâmetro de entrada.

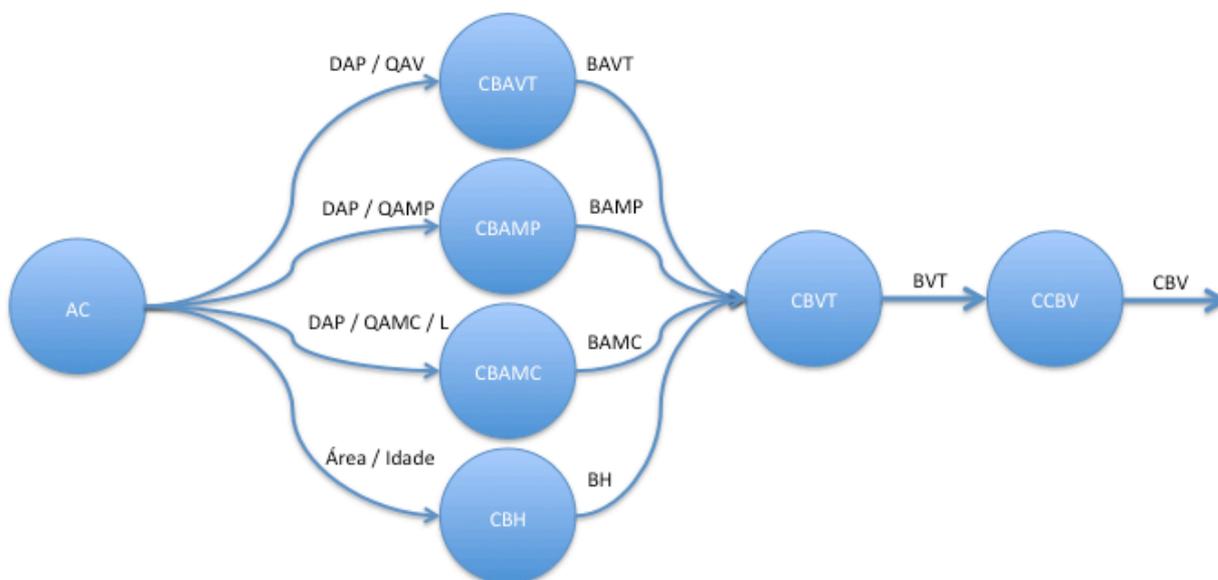


Figura 17 - Representação do vértice CCBV

O vértice definido como SOLO é responsável pelo fornecimento dos parâmetros PSN, VCH, PS e $\%C_{LAB}$, obtidos a partir de análises laboratoriais do material do solo. Estes parâmetros são utilizados por outros vértices como parâmetros de entrada.

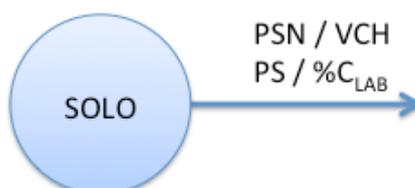


Figura 18 - Representação do vértice SOLO

O vértice definido como CDA é responsável pelo cálculo da densidade aparente do solo.

Como parâmetros de entrada, este vértice necessita do peso seco da amostra dentro do cilindro e do volume do cilindro Umland.

Após o processamento dos dados recebidos, este vértice gera o parâmetro DA, que representa a Densidade Aparente do Solo. Este parâmetro é utilizado por outro vértice como parâmetro de entrada.

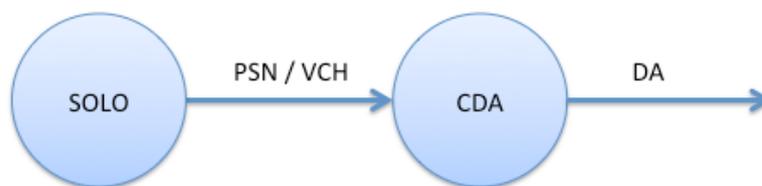


Figura 19 - Representação do vértice CDA

O vértice definido como CPVS é responsável pelo cálculo do peso do volume no solo.

Como parâmetros de entrada, este vértice necessita da densidade aparente e da profundidade ou espessura do horizonte do solo.

Após o processamento dos dados recebidos, este vértice gera o parâmetro PVS, que representa o Peso do Volume da Amostra no Solo. Este parâmetro é utilizado por outro vértice como parâmetro de entrada.

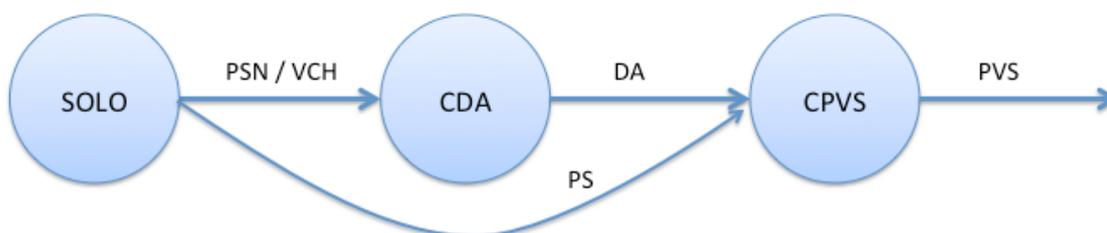


Figura 20 - Representação do vértice CPVS

O vértice definido como CCS é responsável pelo cálculo do carbono no solo.

Como parâmetros de entrada, este vértice necessita do peso do volume da amostra coletada no solo e o percentual do resultado do carbono analisado em laboratório.

Após o processamento dos dados recebidos, este vértice gera o parâmetro CS, que representa a quantificação do Carbono do Solo. Este parâmetro é utilizado por outro vértice como parâmetro de entrada.

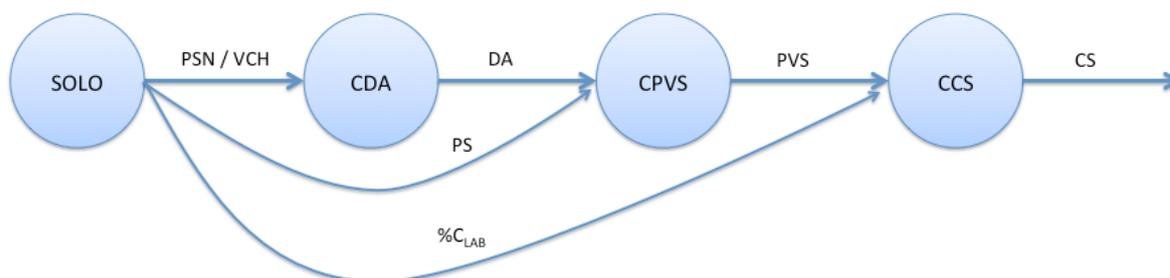


Figura 21 - Representação do vértice CCS

O vértice definido como CCT é responsável pelo cálculo do carbono total.

Como parâmetro de entrada, este vértice necessita da quantificação de carbono realizada por outros vértices.

Após o processamento dos dados recebidos, este vértice gera a quantificação do Carbono Total.

A Figura 10 mostra a representação das transições entre os vértices do grafo.

3.4 Regras de evolução de autômatos celulares

Para o processamento da modelagem proposta define-se um ambiente *small world* com algumas características de modo a aproximar-se de uma ambiente real.

O ambiente é composto por um plantio de eucalipto planejado cujas idades das árvores são idênticas. O plantio é mantido por 21 anos dividido em 3 ciclos sucessivos de 7 anos, quando as árvores são extraídas para industrialização da madeira.

Inicialmente, o plantio não apresenta a ocorrência de árvores mortas. Com o passar do tempo, de acordo com Embrapa (2010), inúmeros fatores podem contribuir para a ocorrência de árvores mortas, como: doenças, pragas, alagamento ou escassez de umidade no solo e danos causados por eventos climáticos.

Embrapa (2010), ressalta que as perdas por pragas podem chegar a 15% da produção. Neste sentido, considerando a ocorrência de perdas por pragas, para fins de demonstração o modelo considerará para cada ciclo um percentual de mortalidade de até 15%. Assim, durante a evolução do plantio com passar do tempo a ocorrência de árvores mortas pode aumentar. Considerando que as pragas não causam a queda das árvores e a dificuldade de modelar outros fatores de perdas que causem a queda, as árvores mortas caídas não serão consideradas na aplicação do modelo.

O modelo considera as árvores mortas do plantio para se obter, o mais exato possível, a quantificação de dióxido de carbono, pois estas podem representar até 15% das árvores do plantio.

4 RESULTADOS

4.1 Descrição do local de estudo

A escolha do local de estudo para este trabalho foi baseada na possibilidade de aplicação em uma região com abundância de plantios de eucalipto e com relevantes fontes emissoras de dióxido de carbono para a atmosfera.

O plantio faz parte do território da cidade de Candiota-RS onde encontra-se em funcionamento há mais de 30 anos a UTEPM - Usina Termelétrica Presidente Médici da Eletrobrás CGTEE, cujo combustível principal é o carvão mineral. A Figura 22 mostra a localização geográfica do plantio.

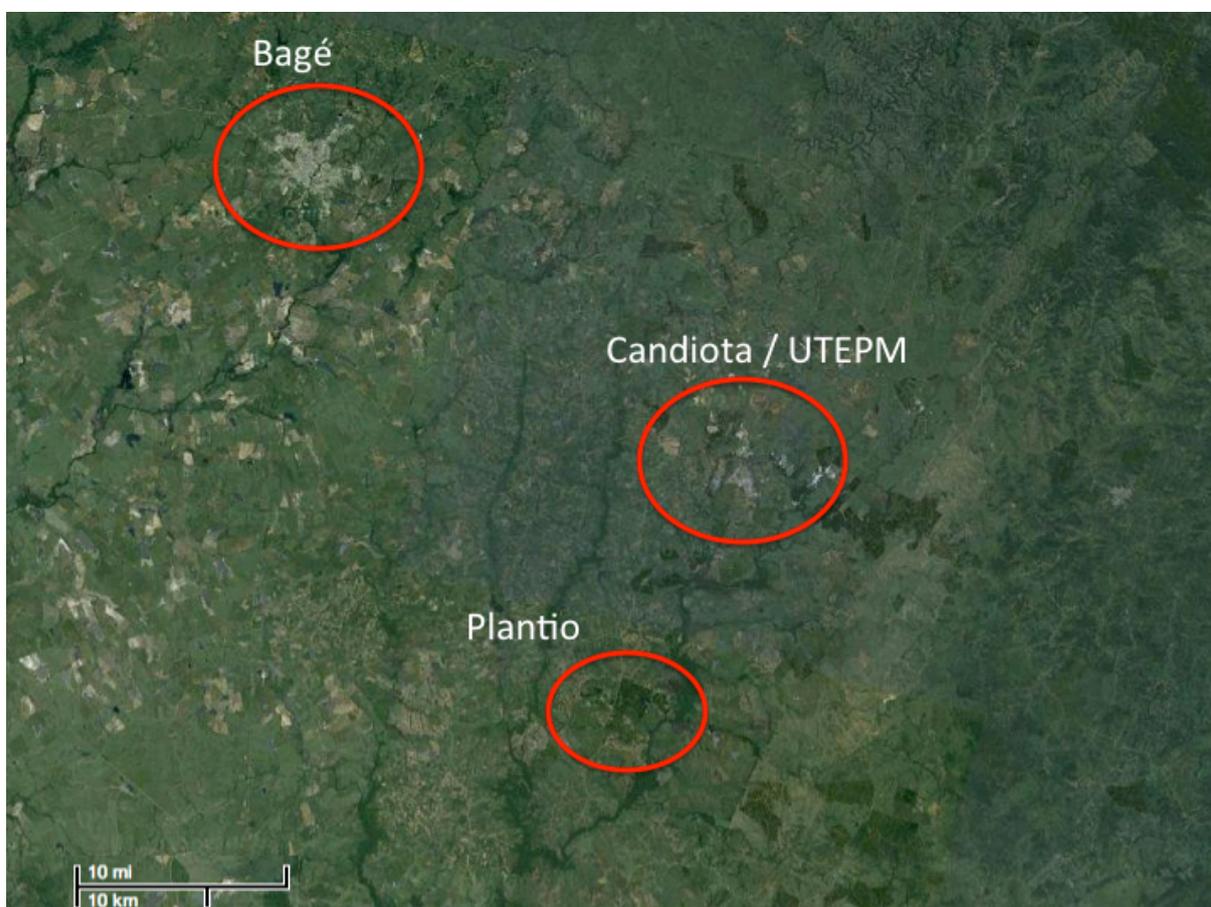


Figura 22 - Localização da área de aplicação do estudo - Imagem: Google Maps

Contando com uma capacidade instalada de 796MW, a UTEPM foi responsável pela emissão de 2585524,15t de dióxido de carbono equivalente no ano

de 2011 e mais de 18550000t nos últimos 9 anos, como mostra a Tabela 3 (ELETROBRAS, 2012).

Tabela 3 - Evolução temporal da emissão de gases de efeito estufa da UTEPM

Ano	tCO ₂ e
2003	1984630
2004	2298340
2005	2525610
2006	2631520
2007	2196730
2008	1497570
2009	1483830
2010	1340799,59
2011	2598887,64

A área de estudo pertence a uma grande empresa, líder mundial na produção de celulose de eucalipto, com uma capacidade produtiva de 5,25 milhões de toneladas anuais. A empresa conta com uma ampla área plantada de eucalipto. Cerca de 47 mil hectares de plantios próprios, na metade sul do Rio Grande do Sul. A área de estudo é composta por mais de 740ha. A Figura 23 apresenta uma parte da área plantada.

Esta área é dividida em várias glebas, que são divididas em vários talhões. Cada talhão corresponde a um plantio. Cada plantio possui suas características próprias como área, espécie plantada, espaçamento e idade. A Figura 24 mostra um exemplo de mapa com as divisões da área.

A área a ser considerada para o estudo é o talhão 12A, constituído por 6ha de árvores de eucalipto da espécie *Eucalyptus grandis*, separadas por um espaçamento de 3x2m, o que resulta em aproximadamente 9960 árvores. A Figura 25 apresenta uma visão parcial do plantio.

As árvores foram plantadas em 2006, de modo que estão com 6 anos do primeiro ciclo e apresentam um DAP médio de aproximadamente 16cm, calculado a partir da circunferência das árvores, como pode ser visto na Figura 26.

Como grande parte das equações do modelo são dependentes do DAP, esta

medida torna-se muito importante para quantificação do carbono presente no plantio.

A altura média das árvores do plantio foi estimada dentro do intervalo entre 18,5m e 19,5m, devido a dificuldade na realização de uma medição precisa sem o corte das árvores. A Figura 27 apresenta a proporção de um adulto com 1,78m ao lado do plantio.

A área apresenta também um acúmulo considerável de serrapilheira que pode ser visto na Figura 28.



Figura 23 - Plantio de eucalipto na área de estudo - Imagem: Google Maps



Figura 24 - Mapa com informações sobre o plantio



Figura 25 - Vista parcial do plantio de *Eucalyptus grandis*



Figura 26 - DAP médio do plantio



Figura 27 - Altura média do plantio



Figura 28 - Acúmulo de serrapilheira no plantio

4.2 Calibração do modelo

Para realizar a calibração do modelo proposto, serão utilizados os dados de altura, DAP e biomassa, fornecidos por Schumacher (2011) e Londero (2011), cujos trabalhos são as únicas referências encontradas sobre o registro destes dados.

4.2.1 Altura e DAP

Londero (2011) fornece as características dendométricas para um plantio de eucalipto, a partir de medições realizadas, as quais serão utilizados para a calibração dos parâmetros do modelo proposto, como mostra a Tabela 4.

Tabela 4 - Características dendométricas de um plantio de eucalipto

Ano	DAP (cm)	Altura (m)
2	9,4	10,9
3	14,0	16,7

Ano	DAP (cm)	Altura (m)
4	16,4	20,0
5	18,4	24,0
6	18,1	24,9
7	20,6	28,4

Os dados, conforme mostram a Figura 29 e Figura 30, apresentam uma convergência entre as evoluções do DAP e da altura do plantio de eucalipto e apontam claramente para uma taxa de crescimento maior nos primeiros anos, sendo o período entre o 2º e 3º ano o que apresenta maior taxa de crescimento, como mostra a Figura 31.

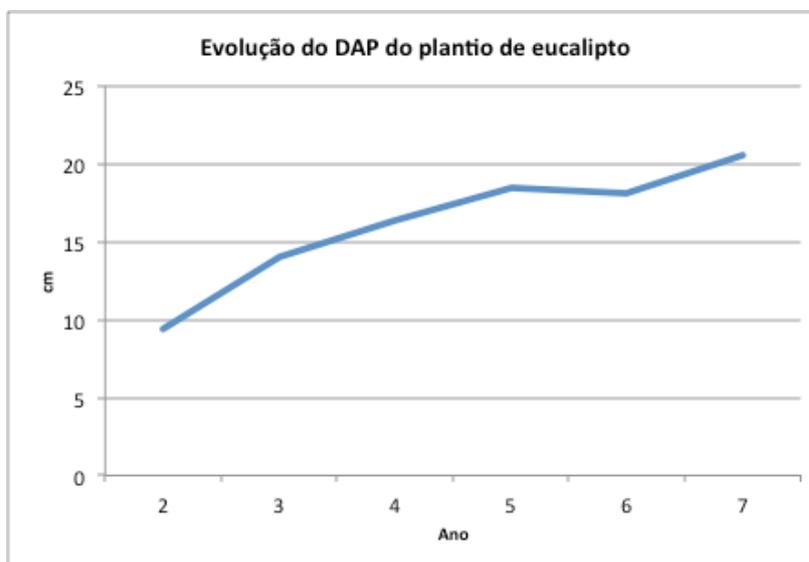


Figura 29 - Evolução do DAP do plantio de eucalipto

O registro das características dendométricas do plantio ao longo dos anos, realizado por Londero (2011), permite que sejam formalizadas funções que representem o crescimento do eucalipto em altura e o aumento do DAP.

Como os gráficos de crescimento apresentam um comportamento exponencial, torna-se necessário a utilização de uma função logarítmica para um melhor ajuste da representação dos valores medidos. Desta forma, após a linearização da função, realiza-se a interpolação dos pontos do gráfico de crescimento de altura, aplicando-se o método do ponto médio, de tal forma a originar a função 1.

$$f(x) = 9,483913733\ln(x) + 10,4171581796 \quad (1)$$

O mesmo procedimento foi realizado para a formalização de uma função para o aumento do DAP, originando a função logarítmica 2.

$$f(x) = 5,9282118938\ln(x) + 9,6494674522 \quad (2)$$

As funções 1 e 2 obtidas por interpolação dos dados fornecidos por Londero (2011) foram geradas no presente trabalho a fim de tornar possível o cálculo da altura e DAP para diferentes idades do plantio de eucalipto. Estas informações são necessárias para as quantificações de biomassa arbórea viva total, biomassa de árvores mortas em pé e biomassa de árvores mortas caídas.

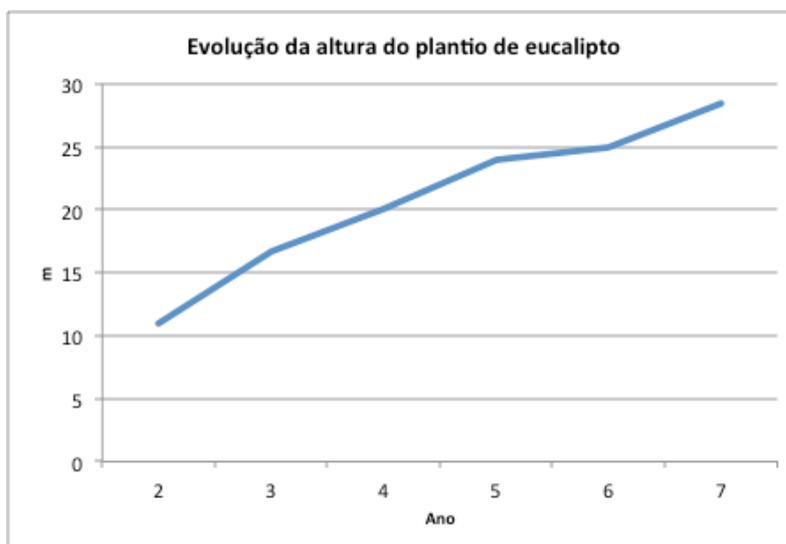


Figura 30 - Evolução da altura do plantio de eucalipto

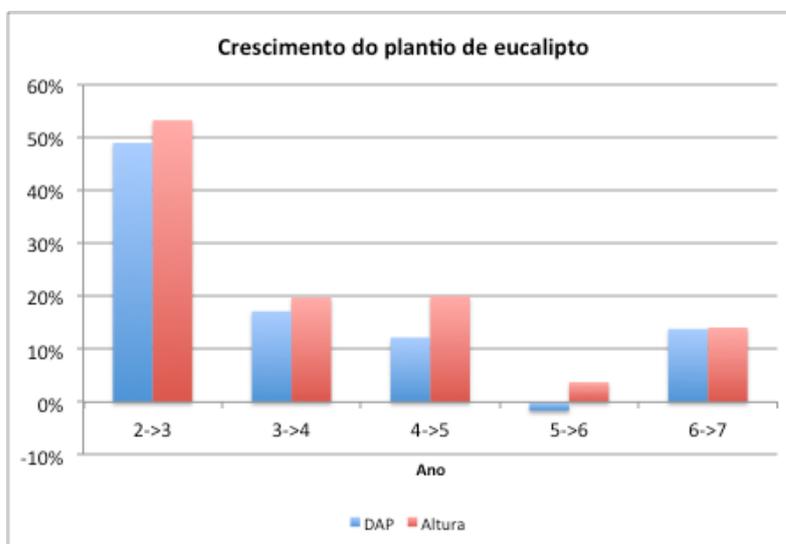


Figura 31 - Taxa de crescimento do plantio de eucalipto

4.2.2 Serrapilheira

Para a quantificação da serrapilheira, realizada por Londero (2011), foram utilizados coletores, dispostos em 4 posições diferentes: diagonal entre quatro árvores, em linha de plantio, entre linha de plantio e próximo a árvore, como mostra a Figura 32. As amostras, coletadas mensalmente, foram separadas em galhos finos e folhas, secadas e pesadas em laboratório e estimadas em quantidades por hectare. A Tabela 5 apresenta a produção de serrapilheira acumulada em 12 meses.

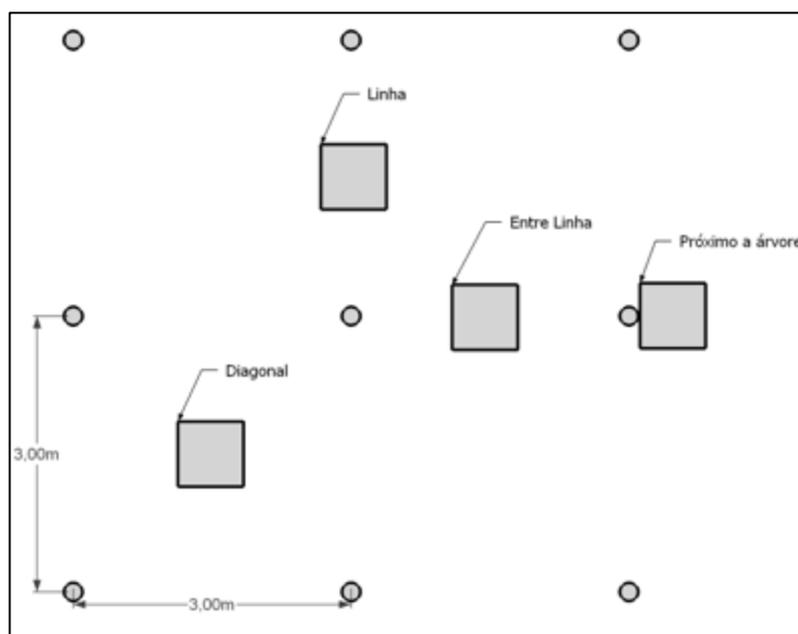


Figura 32 - Distribuição dos coletores de serrapilheira (LONDERO, 2011)

Os coletores utilizados podem ser vistos na Figura 33.



Figura 33 - Aspecto de um coletor de serrapilheira (LONDERO, 2011)

Tabela 5 - Produção média de serrapilheira em um plantio de eucalipto

Ano	Folhas	Galhos finos	Total
	kg ha ⁻¹		
2	58,8	16,6	75,4
3	157,2	8,8	166
4	125	20,2	145,2
5	124,2	33,4	157,6
6	122,3	31,6	153,9
7	109,1	23,7	132,8

Londero (2011) explica que a produção de serrapilheira é caracterizada por um comportamento de regularidade cíclico anual, cujo ápice ocorre por volta do 30º mês e tende a decrescer com o passar do tempo, como pode ser visto na Figura 34.

Para a formalização de uma função para a produção mensal de serrapilheira, assim como no crescimento de altura e aumento do DAP, foram utilizadas as medições realizadas por Londero (2011).

A característica do gráfico apresentado força o uso de técnicas de linearização dos pontos do gráfico, originando a função logarítmica 3.

$$f(x) = 30,7825074925 \ln(x) + 104,7290250453 \quad (3)$$

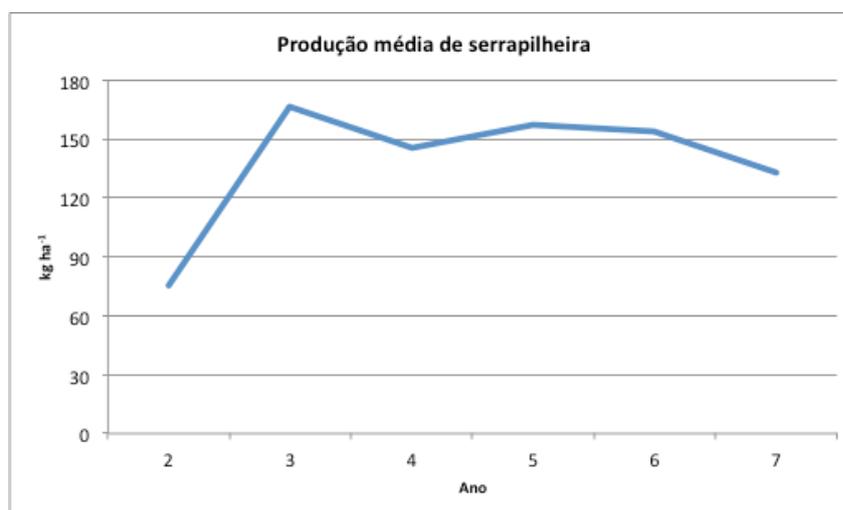


Figura 34 - Produção média mensal de serrapilheira

Assim como as funções 1 e 2, a função 3 foi obtida, a partir da interpolação dos dados fornecidos por Londero (2011), e gerada no presente trabalho a fim de

aproximar-se dos dados reais e tornar possível a estimativa de produção de serrapilheira para plantios com diferentes áreas. Desta forma, portanto, a formalização descrita por Arevalo et al. (2002) na equação 6, devido a inviabilidade de medição para simulação através de um modelo, não será utilizada para fins de cálculo de produção de serrapilheira.

4.2.3 Perdas

Para a aproximação de um cenário real onde as perdas são previstas e ocorrem com mais frequência durante o primeiro ano do plantio, o ambiente de estudo será submetido às condições de perda geradas pelo modelo, onde durante o primeiro ano de cada ciclo as árvores podem ser atacadas por pragas e ocasionarem a perda para o plantio.

O modelo considera somente perdas por pragas devido à escassez de dados desta natureza o que dificulta uma abordagem mais ampla de todas as possibilidades de perdas, como alagamentos, estiagem, acilidade do terreno, geada, descargas atmosféricas, falta de nutrientes e problemas de manejo.

Considerando uma matriz onde cada célula representa uma árvore do plantio, cada célula possui um valor que representa a vitalidade desta árvore. O valor inicial foi definido como 3.

A cada início de um novo ciclo que representa o primeiro ano, são selecionadas, de forma aleatória, uma determinada quantidade de células do plantio que simularão um ataque realizado por pragas, que resulta na diminuição do valor de vitalidade da árvore, bem como de suas células vizinhas, seguindo a regra da vizinhança de Moore, de modo que os valores da penalidade são respectivamente 2 e 1.

Caso ocorra uma situação, após a distribuição dos ataques por praga, onde a célula contenha valor menor ou igual a 0, a árvore, cuja célula corresponde, é considerada morta.

A Figura 35 mostra um exemplo de distribuição de ataques por pragas, bem como a incidência de dois ataques em uma mesma área ocasionando a morte da árvore, devido à soma das penalidades.

nl representa o número de linhas da matriz;

nc representa o número de colunas da matriz.

Calculada a quantidade de árvores atacadas por pragas, esta será descontada do total de árvores vivas do plantio, influenciando no cálculo da biomassa arbórea viva nos demais ciclos.

4.3 Aplicação do modelo

Para a aplicação do modelo à área de estudo serão consideradas as medições realizadas por Londero (2011) e utilizadas para a calibração. Considerando a área de 1ha com o espaçamento de 3x2m é possível realizar uma divisão de 50 linhas por 33 colunas, onde o ponto de intersecção entre uma linha e uma coluna representa uma árvore, o que corresponde ao plantio de 1650 árvores.

4.3.1 Crescimento do plantio

Baseado nas funções definidas a partir da interpolação dos dados registrados por Londero (2011) o registro de crescimento do plantio, no que diz respeito à altura e aumento do DAP, é registrado como mostra a tabela.

Tabela 6 - Crescimento do plantio

Ano	Altura (m)	DAP (cm)
1	10,42	9,65
2	16,99	13,76
3	20,84	16,16
4	23,56	17,87
5	25,68	19,19
6	27,41	20,27
7	28,87	21,19

4.3.2 Simulação de perdas

De acordo com as regras definidas para a evolução do plantio, durante a simulação foram registrados ataques de pragas às árvores, criando um cenário composto por árvores vivas e mortas para cada ciclo, como mostra a Tabela 7.

Tabela 7 - Quantificação de árvores vivas e mortas no plantio

Ciclo	Vivas	Mortas
1	1643	7
2	1631	12
3	1616	15

4.3.3 Cálculo da biomassa

A quantificação de biomassa será registrada para cada ano de cada ciclo do plantio, com base na quantificação de perdas registrada na Tabela 7.

O modelo considera apenas as perdas causadas por ataques de pragas, o que não ocasiona a queda de árvores, portanto, para a aplicação do modelo, não será considerada a biomassa de árvores mortas caídas (BAMC).

A cada ano do plantio são registradas as quantificações de biomassa arbórea viva, biomassa de árvores mortas em pé e a biomassa da serrapilheira, cuja soma destas representa a biomassa vegetal total, como mostra a Tabela 8.

Tabela 8 - Quantificação da biomassa do plantio

Ano	BAVT	BAMP	BH	BVT
1	6022,58	25,66	1,257	6049,50
2	14776,83	0,0	1,513	14778,35
3	22207,54	0,0	1,663	22209,20
4	28623,57	0,0	1,769	28625,34
5	34292,63	0,0	1,851	34294,48
6	39391,72	0,0	1,919	39393,64
7	44040,63	0,0	1,976	44042,60

4.3.4 Cálculo do carbono

O cálculo do carbono presente na biomassa arbórea viva será baseado nos dados representados na Tabela 8 e apresentará o registro da quantificação para cada ano do plantio, como mostra a Tabela 9.

Devido a insuficiência de dados e impossibilidade de análise dos dados do solo do plantio, a quantificação do carbono presente no solo não será considerado

no cálculo do carbono total.

Tabela 9 - Quantificação de carbono do plantio

Ano	CT (t/ha)
1	2722,27
2	6650,26
3	9994,14
4	12881,40
5	15432,52
6	17727,14
7	19819,17

4.4 Resultado da quantificação

O modelo considera, para fins de simulação, que os 3 ciclos apresentam taxas de crescimento idênticas, devido à impossibilidade de coleta de dados dendométricos de rebrota. Desta forma, o resultado final da quantificação do carbono neutralizado pelo plantio ao final do terceiro ciclo corresponde ao acúmulo dos ciclos anteriores.

A Tabela 10 mostra que um plantio de 1650 árvores de eucalipto em uma área de 1ha tem a capacidade de neutralizar cerca de 59421t de CO₂.

Tabela 10 - Quantificação de carbono do plantio ao final do terceiro ciclo

Ano	CT (t/ha)	Ano	CT (t/ha)	Ano	CT (t/ha)
1	2722,27	8	22529,90	15	42184,53
2	6650,26	9	26420,86	16	46034,58
3	9994,14	10	29740,32	17	49323,51
4	12881,40	11	32606,50	18	52163,33
5	15432,52	12	35138,98	19	54672,52
6	17727,14	13	37416,84	20	56929,43
7	19819,17	14	39493,59	21	58987,08

Considerando a Tabela 3, cujo conteúdo apresenta a quantidade de CO₂ emitida pela CGTEE nos últimos anos, o plantio, ao longo dos 3 ciclos, teria

neutralizado aproximadamente 2,27% da quantidade correspondente a emissão de 2011.

Como pode ser visto na Figura 36, a taxa de emissão anual é variável, porém a partir do valor médio, extraído a partir dos dados de cada ano, pode-se criar um índice que represente a emissão média anual a fim de obter-se a quantidade necessária de árvores a serem plantadas para a neutralização de uma quantidade média de carbono emitido ao longo de um ano.

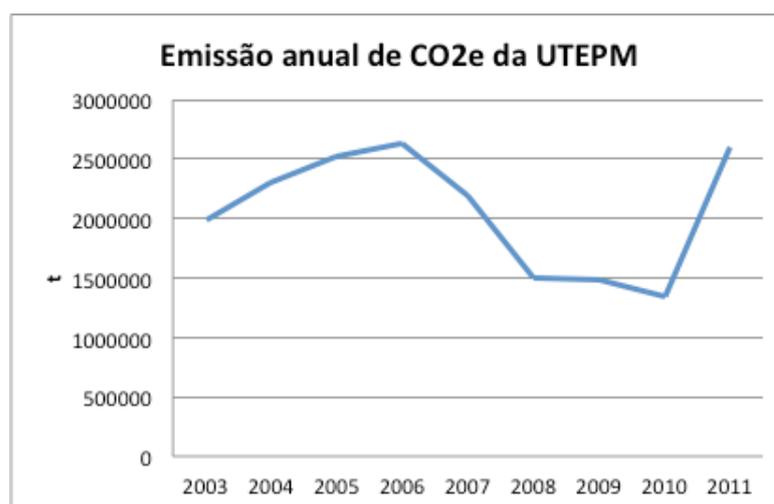


Figura 36 - Emissão anual de CO₂e da UTEPM

Com base nestes valores, para neutralizar 2061990t de CO₂e, que representa aproximadamente a quantidade média emitida anualmente pela UTEPM, define-se que é necessário o plantio anual de 35ha de árvores de eucalipto, com um espaçamento de 3x2m, considerando que a neutralização ocorrerá ao longo dos 21 anos correspondentes aos 3 ciclos do plantio.

4.5 Implementação do modelo

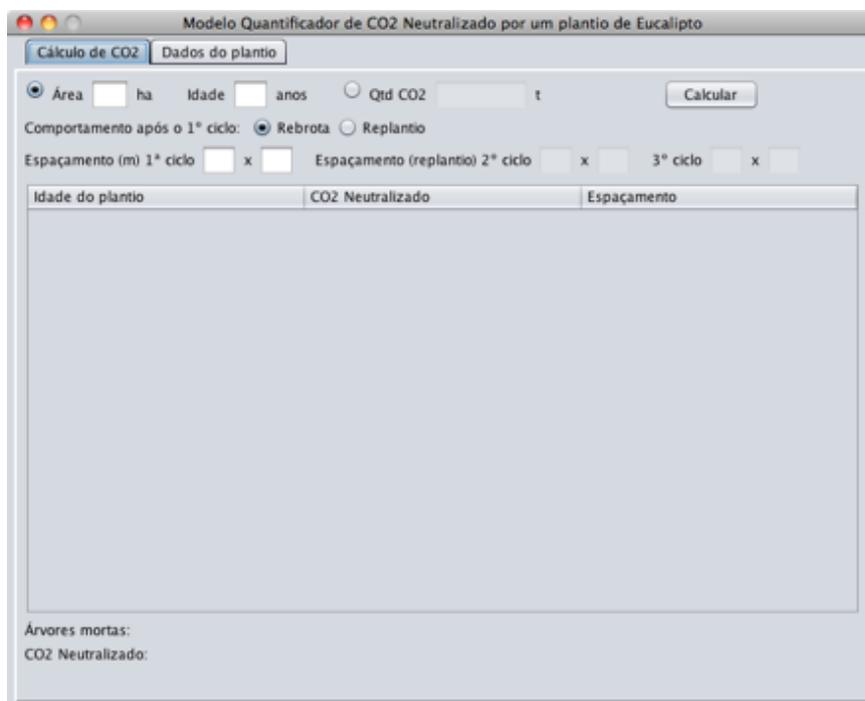
A implementação do modelo proposto foi realizada em linguagem Java, de modo a garantir a portabilidade da implementação e maior facilidade de desenvolvimento pela vasta quantidade de recursos nativos da linguagem. O código fonte encontra-se no Apêndice A.

4.5.1 Interface com o usuário

A interface da implementação do modelo foi desenvolvida utilizando-se de

princípios de usabilidade, de modo a ser intuitiva, de fácil memorização, com a minimização da ocorrência de erros e adequação à tarefa.

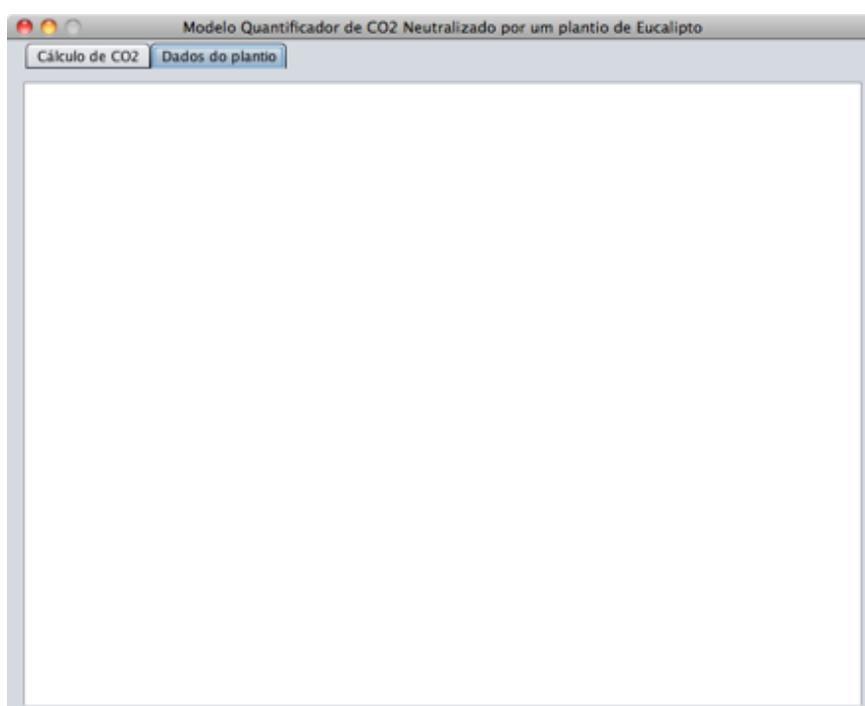
A Figura 37 e a Figura 38 mostram, respectivamente, as abas "Cálculo de CO2" e "Dados do plantio", bem como seus componentes.



The screenshot shows a window titled "Modelo Quantificador de CO2 Neutralizado por um plantio de Eucalipto". It has two tabs: "Cálculo de CO2" (selected) and "Dados do plantio". The "Cálculo de CO2" tab contains the following elements:

- Input fields for "Área" (ha) and "Idade" (anos), and a radio button for "Qtz CO2" (t) with a "Calcular" button.
- Radio buttons for "Comportamento após o 1º ciclo": "Rebrota" (selected) and "Replanteio".
- Input fields for "Espaçamento (m) 1º ciclo" (x) and "Espaçamento (replanteio) 2º ciclo" (x) and "3º ciclo" (x).
- A table with three columns: "Idade do plantio", "CO2 Neutralizado", and "Espaçamento".
- Labels for "Árvores mortas:" and "CO2 Neutralizado:" at the bottom.

Figura 37 - Tela inicial do software: Aba "Cálculo de CO2"



The screenshot shows the same window as Figure 37, but with the "Dados do plantio" tab selected. The main content area is currently blank.

Figura 38 - Tela inicial do software: Aba "Dados do plantio"

Na aba "Cálculo de CO₂", o usuário pode escolher o tipo de cálculo que deseja ser feito: a partir da área, em hectare, e opcionalmente a idade, em anos, do plantio, cujo retorno será a quantidade, em toneladas, de carbono neutralizado pelo plantio, por ano, ao longo dos 21 anos ou até a idade informada; ou ainda, a partir da quantidade, em toneladas, de carbono a ser neutralizado, cujo retorno será a quantidade, em hectare, de árvores de eucalipto suficientes para a neutralização da quantidade de carbono informada, ao longo dos 21 anos do plantio. Caso não seja informado a área, é assumido o valor padrão de 1ha.

É possível escolher, também, qual o procedimento adotado para o manejo do plantio após o corte, rebrota ou replantio, assim como espaçamento entre árvores. No caso da rebrota, após o corte ao final do ciclo, a porção remanescente das árvores iniciam um novo processo de brotamento no mesmo local e com mesmo espaçamento do primeiro ciclo. A escolha pelo replantio significa que as árvores ao final de cada ciclo serão cortadas, e novas mudas são plantadas em local diferente, permitindo assim a escolha de espaçamentos diferentes para cada ciclo. O valor padrão para o espaçamento, caso não seja informado é 2x3m.

Ainda nesta aba, é apresentada a quantidade de árvores mortas, por ciclo, a partir da simulação dos ataques por pragas.

Para o processamento do cálculo, a partir de quaisquer opção, basta pressionar o botão "Calcular". Após o processamento, os dados de saída da quantificação são apresentados em uma tabela e os dados do plantio em uma área de texto, ambos na própria janela do *software*.

Na aba "Dados do plantio", são apresentados, através de números, os valores de cada célula, após o processamento da simulação de ataques por pragas, bem como a legenda com a representação dos valores.

A Figura 39 mostra um exemplo de cálculo realizado a partir da área informada, sem a restrição de idade do plantio.

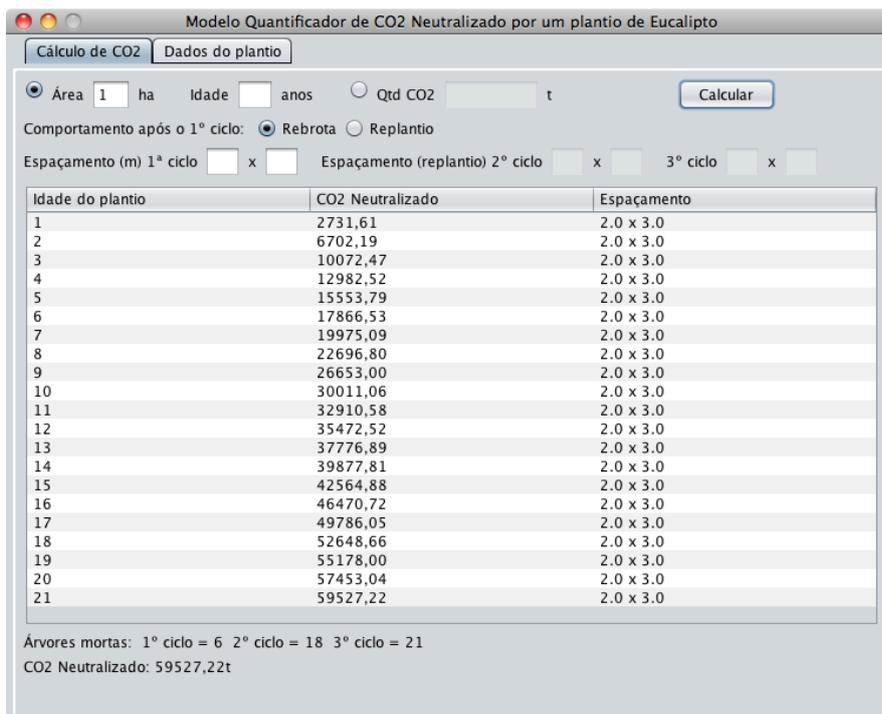


Figura 39 - Exemplo de cálculo a partir da área informada

A Figura 40 mostra um exemplo de cálculo realizado a partir da área informada, com a restrição de idade do plantio.

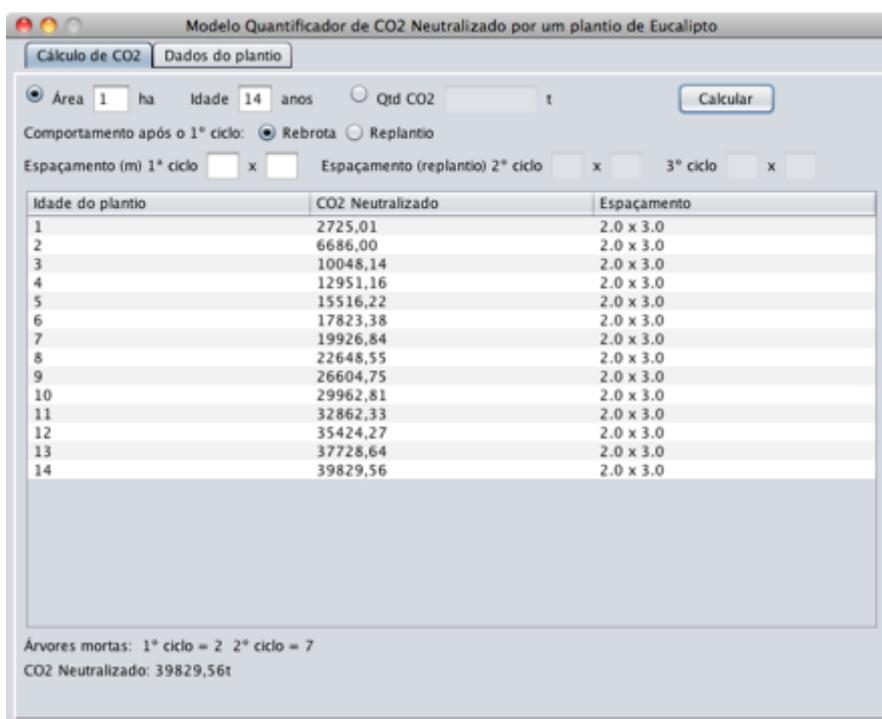


Figura 40 - Exemplo de cálculo a partir da área informada com restrição de idade

A Figura 41 mostra um exemplo de cálculo a partir da quantidade de CO₂ a

4.5.2 Simulação

Para fins de simulação, são definidos alguns cenários para a aplicação do modelo, todos considerando os 21 anos do plantio divididos em 3 ciclos. Para estes cenários o cálculo de quantificação será realizado a partir da área do plantio e a partir de uma quantidade de CO₂ a ser neutralizada. Os resultados serão mostrados na Tabela 11 e na Tabela 12, respectivamente.

Tabela 11 - Quantificação de carbono a partir da área do plantio

Área (ha)	Espaçamento (m)			Árvores mortas			CO ₂ Neutralizado (t)
	1º ciclo	2º ciclo	3º ciclo	1º ciclo	2º ciclo	3º ciclo	
2	2x3	2x3	2x3	5	16	30	118143,44
2	2x2	2x3	3x1.5	15	5	4	152641,08
5	2x3	2x3	2x3	41	76	95	296720,64
5	2x4	3x4	2.5x4	20	0	2	185506,66
10	2x3	2x3	2x3	73	135	197	593984,07
10	2x2.5	2x3	2x3.5	71	4	6	610822,98
50	2x3	2x3	2x3	397	698	947	2983514,53
50	2x4	2x3	3x1.5	220	81	43	3092472,86

Tabela 12 - Quantificação de carbono a partir da quantidade de CO₂ a ser neutralizada

CO ₂ (t)	Espaçamento (m)			Árvores mortas			Área necessária ao plantio (ha)
	1º ciclo	2º ciclo	3º ciclo	1º ciclo	2º ciclo	3º ciclo	
150000	2x3	2x3	2x3	14	35	58	3,0
150000	2x2	2x3	3x1.5	14	4	2	2,0
300000	2x3	2x3	2x3	39	8	6	8,5
300000	2x4	3x4	2.5x4	39	70	95	5,5
600000	2x3	2x3	2x3	69	133	173	10,5
600000	2x2.5	2x3	2x3.5	63	8	4	10,0
2500000	2x3	2x3	2x3	309	587	815	42,0
2500000	2x4	2x3	3x1.5	192	57	39	40,50

A partir dos resultados obtidos pelas simulações pode-se perceber que o

espaçamento escolhido para o plantio exerce uma grande influência diretamente o resultado da quantificação do carbono, pois para uma mesma área espaçamentos diferentes apresentam valores diferentes para a quantificação, assim como dois plantios que precisem neutralizar uma mesma quantidade de carbono, dependendo do espaçamento utilizado necessitam de áreas diferentes para o plantio.

Sobre o local de estudo que possui 6ha, 9.960 árvores plantadas, espaçamento de 3x2m, com 6 anos (primeiro ciclo) e DAP médio de 16cm, verifica-se com a aplicação do modelo proposto e resultados da simulação (obtido da implementação) que a área, até o presente momento, sequestrou 106621,77t de CO₂, que representa 4,10% do total de dióxido de carbono emitido pela CGTEE em 2011.

Considerando que a área de estudo possui 740ha de área plantada por eucaliptos e que o espaçamento utilizado seja 3x2m, ao longo de 1 ano esta área teria a capacidade de neutralizar aproximadamente 13213000t de dióxido de carbono, quantidade que representa ~99% da emissão realizada pela CGTEE em 2011.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos sobre captura do carbono atmosférico vem crescendo devido à sua grande importância nas alterações climáticas, sendo necessário o aprofundamento no tema para que medidas corretivas e preditivas possam ser definidas a fim de permitir a diminuição dos impactos causados pelos fenômenos decorrentes do acúmulo de dióxido de carbono na atmosfera.

As árvores, devido ao seu potencial de sequestro do dióxido de carbono atmosférico, podem ser consideradas e empregadas no auxílio da redução da concentração atmosférica deste gás.

Pelo fato do eucalipto ser um gênero de árvores não nativas que apresentam boa adaptação aos mais variados ambientes, elevada taxa de crescimento e facilitado reflorestamento, suas espécies são amplamente indicadas para a recuperação de áreas degradadas e para auxiliar na neutralização de dióxido de carbono atmosférico, além de evitar o corte de florestas de árvores nativas.

O Rio Grande do Sul é um dos estados brasileiros que detém as maiores concentrações de plantações de eucalipto, com cerca de 280198ha plantados. Especificamente na metade sul, na região de Bagé-RS, a cultura do eucalipto vem crescendo nos últimos anos com o aumento da demanda principalmente do setor da indústria de celulose e papel. Esta região é também marcada pela presença de importantes fontes emissoras de poluentes atmosféricos como usina termelétrica e fábricas de cimento.

A presença destas fontes poluentes e de grandes plantações comerciais de eucalipto nesta região torna interessante a quantificação do potencial de neutralização de dióxido de carbono atmosférico destas plantações.

Neste sentido, o presente trabalho propõe a formalização de um modelo matemático para a simulação da neutralização de dióxido de carbono para uma plantação comercial de eucalipto, implementado computacionalmente utilizando autômatos celulares.

Após a implementação do modelo proposto, foi possível estimar e simular a capacidade e o potencial de neutralização de dióxido de carbono de uma área habitada por determinada espécie de eucalipto, bem como fornecer a quantidade necessária para o plantio a fim de realizar-se a neutralização de uma quantidade definida de dióxido de carbono da atmosfera.

Para a simulação de ataques por pragas ao plantio, definiu-se, de acordo com a literatura, que estes ocorrem no primeiro ano de cada ciclo, quando as árvores ainda são pequenos brotos e podem ocasionar sua morte. A simulação é baseada em regras definidas e apresentou-se com um comportamento não determinístico estocástico. A partir da implementação, de acordo com a metodologia dos autômatos celulares, esta pode ser considerada, dentre as classificações dos autômatos celulares, como classe 3, pois sua evolução leva a formação de padrões caóticos, que podem ser vistos na aba "Dados do plantio" da interface de implementação, após o cálculo realizado. Para a evolução das regras entre as células vizinhas, adotou-se o modelo de vizinhança de Moore.

Devido a interpolação de dados históricos de altura e DAP e o comportamento complexo de crescimento das árvores, a medição realizada no plantio, apresentou divergência dos valores estimados pelo modelo. No caso do DAP, de acordo com o modelo uma árvore com 6 anos deveria ter aproximadamente 20cm e a medida no plantio apontou cerca de 16cm, assim como a altura que deveria estar, segundo o modelo em torno de 20m e o que verificou-se no plantio foi uma medida entre 18,5m e 19,5m. Estas diferenças devem-se principalmente na dificuldade em estimar o crescimento de organismos vivos complexos e sujeitos a interferências externas como ações humanas e da natureza.

Após a implementação pôde-se observar, também, que o espaçamento entre árvores escolhido para o plantio é fator importante e pode afetar de maneira relevante no potencial de quantificação de uma plantação.

Por fim, salienta-se que o modelo proposto estima de forma parcial a quantidade de dióxido de carbono neutralizado por uma plantação comercial de eucalipto.

Embora com quantidades parciais, pode-se afirmar que a produção comercial de eucalipto também contribui para amenizar a concentração de gás

carbônico da atmosfera.

5.6 Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros sugere-se o aprimoramento do modelo proposto, através do ajuste de equações ou realização da implementação de forma paralela, de modo a torna-lo mais eficaz.

Devido a indisponibilidade de dados sobre o solo do plantio, não foi possível, neste trabalho, a contabilização do carbono presente no solo, portanto a disponibilidade de informações sobre o solo podem contribuir para o aprimoramento do modelo.

A estimativa de crescimento do plantio é um fator importante para uma quantificação precisa, contudo devido a complexidade em estimar medidas muito próximas do real não foram explorados métodos mais eficazes para tal devido a interdisciplinaridade do assunto, ficando a possibilidade de avanço referente a este comportamento.

Outro ponto importante a ser considerado é a possibilidade de consideração de diversos fatores que podem vir a causar a morte de árvores no plantio, como doenças e fenômenos naturais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAF - Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. **Anuário estatístico da ABRAF 2012 ano base 2011**. ABRAF, Brasília, 2012.
- ACIÓLY, B. M.; BEDREGAL, B. R. C.; LYRA, A. **Introdução à teoria das linguagens formais, dos autômatos e da computabilidade**. Natal: Edições UnP, 2002.
- AGUIAR, M. S.; COSTA, A. C. R. Autômatos celulares para análise da monotonicidade da declividade de áreas geológicas. In: **Anais do III Workshop Brasileiro de Geoinformática**, Rio de Janeiro, 2001. Anais, 87-94.
- ALONSO, E. J. H. **Autômatos celulares generalizados como modelos de influência para agrupamentos de dados e interações sociais**. Tese de doutorado. UFRJ. Rio de Janeiro. 2008.
- AREVALO, L. A.; ALEGRE, J. C.; VILCAHUAMAN, L. J. M. **Metodologia para estimar o estoque de carbono em diferentes sistemas de uso da terra**. Colombo: Embrapa Florestas, 2002.
- AVEIRO, A. V. D.; CERCAL, M. L. P. M. **Dossiê técnico: Eucalipto**. Instituto de Tecnologia do Paraná. 2007.
- AZEVEDO, T. L. **Ajuste de equações hipsométricas e volumétricas para um povoamento de Eucalyptus sp, localizado na Floresta Nacional do Ibura, Sergipe**. Monografia. UFS. São Cristóvão, 2009.
- BARROS, J. P. M. P. **CpPNeTS: uma Classe de Redes de Petri de Alto-nível**. 1996. Dissertação de mestrado. Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, Portugal, 1996.
- BARROS, J. P. M. P. **Introdução à Modelagem de Sistemas utilizando Redes de Petri**. 2001. Disponível em <http://www.estig.ipbeja.pt/~jpb/textos/pc/pn.pdf>. Acessado em 20/12/2012.
- CAETANO, M. A. L.; GHERARDI, D. F. M.; YONEYAMA, T. Optimal resource management control for CO2 emission and reduction of the greenhouse effect. **Ecological Modelling**. Volume 213, 119-126, 2007.
- CRESTANA, M. S. M.; MOREIRA, R. M. **Plantio de Eucalipto**. 2009. Disponível em http://www.infobibos.com/Artigos/2009_3/eucalipto/index.htm. Acessado em: 20/05/2012.
- DELANEZE, M. E.; RIEDEL, P. S.; MARQUES, M. L.; FERREIRA, M. V.; BENTZ, C. M. Modelagem espacial utilizando autômato celular aplicada à avaliação das mudanças do uso e cobertura da terra no entorno da faixa de dutos Rio de Janeiro – Belo Horizonte. In: **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Curitiba, 2011. Anais, 5909-5916.
- EL YACOUBI, S.; EL JAI, A. Cellular automata modelling and spreadability. **International journal of Mathematical and computer modelling**, volume 36, 1059-

1074, 2002.

ELETRORBRAS. **Inventário de emissões de gases de efeito estufa** – Ano base 2011. 2012. Disponível em <http://www.eletrorbras.com>. Acessado em 13/10/2012.

EMBRAPA. Cultivo do Eucalipto. **Sistemas de Produção**. 2010. Disponível em http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Eucalipto/CultivodoEucalipto_2ed. Acessado em 24/05/2012.

EMBRAPA. **SisEucalipto**. 2012. Disponível em http://www.catalogosnt.cnptia.embrapa.br/catalogo20/catalogo_de_produtos_e_servicos/arvore/CONT000f056pyvb02wx5af00iogrnrxrrbzda.html. Acessado em 06/06/2012.

EMMENDORFER, L.R.; RODRIGUES, L. A. D. Um modelo de autômatos celulares para o espalhamento geográfico de epidemias. **TEMA. Tendências em Matemática Aplicada e Computacional**, São Paulo, volume 2, 73-80, 2001.

GREMONINI, L.; VICENTINI, E. Autômatos celulares: revisão bibliográfica e exemplos de implementações. **Revista eletrônica Lato Sensu - UNICENTRO**, Ed. 6, 2008.

HIGA, R. C. V.; MORA, A. L.; HIGA, A. R. **Plantio de Eucalipto na Pequena Propriedade Rural**. Colombo: Embrapa Florestas, 2000.

IEA - International Energy Agency. **CO₂ emissions from fuel combustion – 2012 Highlights**. 2012. Disponível em <http://www.iea.org/co2highlights/CO2highlights.pdf>. Acessado em 02/03/2013.

LICHTENEGGER, K.; SCHAPPACHER, W. A carbon-cycle based stochastic cellular automata climate model. In: **International Journal of Modern Physics C**, volume 22, 607-621, 2011.

LIMA, E. A.; LUDERS, R.; KUNZLE, L. A. **Uma abordagem unificada para geração de grafos de classes de estados em Redes de Petri temporais**. In: **Anais do VII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente**, Florianópolis, 2007.

LONDERO, E. K. **Calibração do modelo 3-PG para eucalyptus saligna smith na região de Guaíba, RS**. Dissertação de mestrado. UFSM. Santa Maria, 2011.

MAERIVOET, S.; DE MOOR, B. Cellular Automata Models of Road Traffic. In **Physics Reports**. Volume 419, nr. 1, 1-64, 2005.

MARRANGHELLO, N. **Redes de Petri: Propriedades e Análise**. 2005. Disponível em <http://www.dcce.ibilce.unesp.br/~norian/cursos/tds/ApostilaRdP-PA.pdf>. Acessado em 20/12/2012.

MURATA, T. Petri Nets: Properties, analysis and applications. **Proceedings of the IEEE**, v. 77, n. 4, p. 541-579, 1989.

ODUM, E. P. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan, 1988.

OLIVEIRA, J. T. S.; HELLMMEISTER, J. C.; SIMÕES, J. W.; FILHO, M. T. Caracterização da madeira de sete espécies de eucaliptos para a construção civil: 1 - avaliações dendrométricas das árvores. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 56, 113-124, 1999.

PÁDUA, S. I. D.; SILVA, A. R. Y.; PORTO, A. J. V.; INAMASU, R. Y. O potencial das redes de Petri em modelagem e análise de processos de negócio. **Gestão e**

Produção, São Carlos, volume 11, n. 1, 2004.

PEIXOTO, M. S.; BARROS, L. C. Um estudo de autômatos celulares para o espalhamento geográfico de epidemias com parâmetro fuzzy. **TEMA. Tendências em Matemática Aplicada e Computacional**, São Paulo, volume 5, 125-133, 2004.

RENNER, R. M. **Sequestro de carbono e a viabilização de novos reflorestamentos no Brasil**. Dissertação de mestrado. UFPR. Curitiba, 2004.

SCHUMACHER M. V.; WITSCHORECK, R.; CALIL, F. N. Biomassa em povoamentos de eucalyptus spp. de pequenas propriedades rurais em Vera Cruz, RS. **Ciência Florestal**. Volume 21, 17-22. Santa Maria, 2011.

SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; GÖRGENS, E. B. Equações para estimar o estoque de carbono no fuste de árvores individuais e em plantios comerciais de eucalipto. **Revista Árvore**. Volume 29, 711-718. Viçosa, 2005.

SOARES, C. P. B.; OLIVEIRA, M. L. R. Equações para estimar a quantidade de carbono na parte aérea de árvores de eucalipto em Viçosa, Minas Gerais. **Revista Árvore**. Volume 26, 533-539. Viçosa, 2002.

TOWNSEND, C. R. **Fundamentos em ecologia**. Porto Alegre: Artmed, 2006.

VARGAS, F. M.; ARAÚJO, J. H. B.; LEMOS, G. Influências bióticas e abióticas que podem vir a comprometer o desenvolvimento do eucalyptus citriodora hook no *campus* da UTFPR Campo Mourão - Paraná. **Resumos FEBRACE 2007**. São Paulo: EPUSP, 2007.

WEISSTEIN, E. W. Cellular automaton. **MathWorld - A Wolfram Web Resource**. Disponível em <http://mathworld.wolfram.com/CellularAutomaton.html>. Acessado em 10/09/2011.

WOLFRAM, S. Cellular automata. **Los Alamos Science**. Volume 9, 2-21. New Mexico, 1983.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Código fonte da implementação do modelo

```
private double calcular(double area, double idade, double esp1[], double esp2[], boolean rebrota) {
    DefaultTableModel model = (DefaultTableModel) tblResultados.getModel();
    model.setNumRows(0);

    lblArvores.setText("Árvores mortas: ");
    lblCarbono.setText("Carbono Neutralizado: ");

    double qtdco2 = 0;
    double altura[] = new double[21];
    double dap[] = new double[21];
    double serrapilheira[] = new double[21];
    double bavl[] = new double[21];
    double bamp[] = new double[21];
    double bvt[] = new double[21];
    double ct[] = new double[21];

    int i, j;
    int x, y, c, a, p, qtdP, qtdAV = 0, qtdAM[] = new int[3];
    int m[][] = null;

    for (c = 1; c <= 3; c++) {
        if (rebrota == false || c == 1) {
            l1 = (int) (Math.round(Math.sqrt(area)) / esp1[c - 1]);
            l2 = (int) (Math.ceil(Math.sqrt(area)) / esp2[c - 1]);

            m = new int[l1][l2];

            for (i = 0; i < l1; i++) {
                for (j = 0; j < l2; j++) {
                    m[i][j] = 3;
                }
            }
        }

        qtdP = (int) ((0.15 / (c * 7)) * (l1 * l2));

        for (p = 1; p <= qtdP; p++) {
            x = (int) (Math.random() * l1);
            y = (int) (Math.random() * l2);

            if (x - 1 >= 0 && y - 1 >= 0) {
                m[x - 1][y - 1] = m[x - 1][y - 1] - 1;
            }
            if (y - 1 >= 0) {
                m[x][y - 1] = m[x][y - 1] - 1;
            }
            if (x + 1 < l1 && y - 1 >= 0) {
                m[x + 1][y - 1] = m[x + 1][y - 1] - 1;
            }
            if (x - 1 >= 0) {
                m[x - 1][y] = m[x - 1][y] - 1;
            }
            m[x][y] = m[x][y] - 2;
        }
    }
}
```

```

    if (x + 1 < l1) {
        m[x + 1][y] = m[x + 1][y] - 1;
    }
    if (x - 1 >= 0 && y + 1 < l2) {
        m[x - 1][y + 1] = m[x - 1][y + 1] - 1;
    }
    if (y + 1 < l2) {
        m[x][y + 1] = m[x][y + 1] - 1;
    }
    if (x + 1 < l1 && y + 1 < l2) {
        m[x + 1][y + 1] = m[x + 1][y + 1] - 1;
    }
}

for (i = 0; i < l1; i++) {
    for (j = 0; j < l2; j++) {
        if (m[i][j] <= 0) {
            qtdAM[c - 1] = qtdAM[c - 1] + 1;
        }
        switch (m[i][j]) {
            case 0:
                continue;
            case 1:
                continue;
            case 2:
                if (c < 3) {
                    m[i][j] = 3;
                }
            case 3:
                continue;
            default:
                m[i][j] = 0;
        }
    }
}

if (idade == 0 || ((c - 1) * 7 < idade)) {
    lblArvores.setText(lblArvores.getText() + " " + c + "º ciclo = " + qtdAM[c - 1] + " ");
}

qtdAV = (l1 * l2);

if (rebrotar) {
    for (i = 1; i < c; i++) {
        qtdAV = qtdAV - qtdAM[c - 1];
    }
} else {
    qtdAV = qtdAV - qtdAM[c - 1];
}

for (i = 0; i < 7; i++) {

    if (idade != 0 && (((c - 1) * 7) + (i + 1) > idade)) {
        continue;
    }

    altura[(c - 1) * 7 + i] = (9.483913733 * Math.log(i + 1) + 10.4171581796);
    dap[(c - 1) * 7 + i] = (5.9282118938 * Math.log(i + 1) + 9.6494674522);
    serrapilheira[(c - 1) * 7 + i] = (((30.7825074925 * Math.log(i + 1)) + 104.7290250453) * 12) /
1000) * (area / 10000);
}

```

```

bvt[(c - 1) * 7 + i] = ((0.1184 * (Math.pow(dap[(c - 1) * 7 + i], 2.53))) * 0.1) * qtdAV;
bamp[(c - 1) * 7 + i] = ((0.1184 * (Math.pow(dap[(c - 1) * 7 + i], 2.53))) * 0.1) * qtdAM[c - 1];
if (i > 0) {
    bvt[(c - 1) * 7 + i] = bvt[(c - 1) * 7 + i] + serrapilheira[(c - 1) * 7 + i];
} else {
    bvt[(c - 1) * 7 + i] = bvt[(c - 1) * 7 + i] + bamp[(c - 1) * 7 + i] + serrapilheira[(c - 1) * 7 + i];
}
if (c > 1) {
    ct[(c - 1) * 7 + i] = (bvt[(c - 1) * 7 + i] * 0.45) + ct[((c - 1) * 7) - 1];
} else {
    ct[(c - 1) * 7 + i] = bvt[(c - 1) * 7 + i] * 0.45;
}

model.addRow(new Object[]){((c - 1) * 7) + i + 1, String.valueOf(df.format(ct[(c - 1) * 7 + i])),
String.valueOf(esp1[c - 1]) + " x " + String.valueOf(esp2[c - 1])});

qtdco2 = ct[(c - 1) * 7 + i];
lblCarbono.setText("CO2 Neutralizado: " + df.format(qtdco2) + "t");

}

}

return qtdco2;

}

```