

Antonio Samuel Alves da Silva

**ADAPTAÇÃO DO MODELO CENTURY 4.0 PARA SIMULAÇÃO EM
ESCALA REGIONAL**

RECIFE-PE

2012



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOMETRIA E ESTATÍSTICA APLICADA

ADAPTAÇÃO DO MODELO CENTURY 4.0 PARA SIMULAÇÃO EM ESCALA REGIONAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada como exigência parcial à obtenção do título de Mestre.

Área de Concentração: Modelagem Estatística e Computacional

Orientador: Prof. Dr. Rômulo Simões Cezar Menezes

Co-orientador: Prof. Dr. Borko Stojić

RECIFE-PE

2012

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOMETRIA E ESTATÍSTICA APLICADA

**ADAPTAÇÃO DO MODELO CENTURY 4.0 PARA SIMULAÇÃO EM
ESCALA REGIONAL**

Antonio Samuel Alves da Silva

Dissertação julgada adequada para obtenção do título de mestre em Biometria e Estatística Aplicada, defendida e aprovada por unanimidade em 28/02/2012 pela Comissão Examinadora.

Orientador:

Prof. Dr. Rômulo Simões Cezar Menezes
Universidade Federal de Pernambuco

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Borko Stošić
Universidade Federal Rural de Pernambuco
DEINFO-UFRPE

Prof. Dr. Moacyr Cunha Filho
Universidade Federal Rural de Pernambuco
DEINFO-UFRPE

Prof. Dra. Karina Guedes Correia
Universidade Federal Pernambuco
DEN-UFPE

*Dedico,
aos meus pais, Emídio Sebastião da Silva e
Maria Alves de Souza Silva, e aos meus ir-
mãos.*

Agradecimentos

Agradeço eternamente aos professores Borko e Rômulo pela oportunidade e por toda a ajuda prestada. Sou grato por todos os conhecimentos adquiridos com a ajuda do professor Borko, nunca vi tanta humildade em alguém tão grandioso. Meus sinceros agradecimentos ao professor Rômulo pela orientação, companheirismo e atenção nos momentos que mais precisei, obrigado mesmo por tudo!

Na Universidade Federal Rural de Pernambuco, ao Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada (PPGBEA). Admira-me a forma como surge à interação entre corpo docente e discente. Agradeço a todo o corpo docente e em particular aos professores Eufrásio, Moacyr e Tatijana.

Aos funcionários Marco e Zuleide, “Mãe Zuleide”. É impressionante a capacidade de Marco lidar com os entraves burocráticos, valeu por sempre me ajudar. A forma como Zuleide fala comigo me lembra muito uma Tia, sei que os “puxões de orelha” é pra me orientar. Obrigado.

Aos colegas de Mestrado pela convivência amigável. Em particular, aos companheiros de estudo Josimar e Augusto. A Djalma meus agradecimentos e respeito, ao poderoso Dennis, a dupla Diego e Silvio, a Rivelino, ao perigoso Milton Perceus, a Anderson, a Guilherme e Cintia.

Na Universidade Federal de Pernambuco, ao Departamento de Energia Nuclear (DEN). Agradeço as pessoas que lá se encontram: Karina, Mona, André, Tiago, Júlio, Eric, Taciana, Emanuel e Kennedy. Vocês contribuíram significativamente nesta caminhada.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

Na Universidade Regional do Cariri (URCA), ao Departamento de Matemática Pura e

Aplicada (DEMPA). Agradeço a todo o corpo docente em especial aos professores Pedro Ferreira, Ricardo e Cicero Carlos (Carlão). Aos colegas de graduação: Cicero, Luiz, Nayara, Josué, Jorge, Ediuberto, Merycelia, Rosana, Sergio e Lucélia,

No Crato-CE, agradeço a toda a galera do edifício Maia no qual passei quatro anos: Liberalino Neto (Libera), Carlito, Neto, Cleudimar, Mara, Rafael, Robson, Danilo, Mimi, Cledson, Gildemara, Vanessa, Narciso, Pablo, Lairton, Elineth, Uana, Natália, Karlinha, Marjorie e Fátima. Foi muito divertido esse tempo com vocês.

Agradeço as pessoas Dâmocles e Rodrigo que aqui conheci, valeu pela ajuda prestada sem medir esforços sempre que precisei. Agradeço aos já conhecidos, Carlão e Rosilda. Obrigado pelo apoio em Recife no início de minha chegada, vocês foram um indicativo em direção ao PPGBEA.

A minha namorada, Lucélia Kátia, sou extremamente grato por sua disposição em me ajudar, assistir aos meus anseios, tomar para si próprio meus problemas e me compreender nos momentos difíceis. Você me deixa em estado de Paz.

A toda minha família, em particular aos meus irmãos: Cristiano, Elmano (Manim), Ernando, Edival, Eduardo e Luís. Obrigado por estarem sempre ao meu lado, me dar força e acreditar que posso conquistar os meus sonhos. Vocês são realmente importantes em minha história.

Agradeço a minha cunhada Eliana que tem sempre atuado como uma irmã em minha vida. Obrigado por toda a ajuda prestada, por sempre querer o melhor para mim e por ser rígida quando necessário.

Ao meu pai, Emídio Sebastião da Silva, e a minha mãe, Maria Alves de Souza Silva. Vocês foram os responsáveis por tudo que sou hoje e serei amanhã. Toda educação e bem-estar a mim dedicado foram provenientes de suas batalhas diárias, os carrego comigo em qualquer momento, seja de felicidade ou tristeza. Para toda força que necessitar me espelharei em suas atitudes e deste modo conduzirei o meu dia-a-dia, com a firmeza de meu pai e forma amável de minha mãe. Agradeço por tudo!

Agradeço principalmente a entidade divina que aqui nos governa e que sempre me mostrou a direção, **Deus**.

*"E sendo nuvem passageira
Não me leva nem à beira
Disso tudo
Que eu quero chegar"*

Raul Santos Seixas

Resumo

A matéria orgânica do solo (MOS) é formada por resíduos vegetais e animais que se encontram parcialmente decompostos e em contínua decomposição. A MOS tem efeito direto sobre as características físicas, químicas e biológicas em qualquer ecossistema terrestre e possui importância significativa na disponibilidade de nutrientes, agregação do solo, retenção de água e troca de fluxos de gases de efeito estufa entre a superfície terrestre e a atmosfera. Diversos modelos para simular a dinâmica da MOS do solo tem sido desenvolvido nos últimos anos. Um modelo que tem ganhado destaque, devida sua capacidade de simular a dinâmica do carbono (C), nitrogênio (N), fósforo (P) e enxofre no sistema solo planta para diversos agroecossistemas, é o modelo Century 4.0 de simulação de dinâmica da MOS. O modelo foi desenvolvido pela Great Plains System Research Unit- USDA (GPSR) e funciona como aplicativo em plataforma Windows para ambiente MS-DOS (*MicroSoft Disk Operating System*). Sua arquitetura ultrapassada, em aspectos computacionais, impede a realização de múltiplas simulações bem como a dinâmica espacialmente continua destas. Para suprir estas deficiências, no presente trabalho, foi acoplado ao modelo o método de interpolação não-linear *NURBS* (*B-spline* Racional Não Uniforme) bem como o desenvolvimento de uma interface (*Windows Century Manager* – WinCent) para auxiliar na execução de múltiplas simulações e uma janela para visualização gráfica em tempo real sem auxílio de qualquer *software* alternativo.

Palavras-chave: Modelo Century, MOS, NURBS.

Abstract

The soil organic matter (SOM) consists of plant and animal residues that are partially decomposed and in continuous decomposition. The SOM has a direct effect on physical, chemical and biological characteristics in any terrestrial ecosystem and it has significant importance in nutrient availability, soil aggregation, water retention and exchanges fluxes of greenhouse gases between the land surface and atmosphere. Several models to simulate the dynamics of SOM in soil have been developed in recent years. A model that has great importance due to their ability to simulate the carbon (C), nitrogen (N), phosphorus (P) and sulfur (S) dynamics in soil-plant system for several agroecosystems, is the Century 4.0 model of MOS dynamic simulation. The model was developed by Great Plains System Research Unit-USDA (GPSR) and it works as an application on Windows platform for MS-DOS environment (*MicroSoft Disk Operating System*). It's exceeded architecture, in some computational aspects, prevent the execution of multiple simulations, as well as the spatially continuous dynamics of these. To remedy these deficiencies in the present work was coupled to the model the NURBS (*Non Uniform Rational B-spline*) non-linear interpolation method, as well as the development of an interface (*Windows Century Manager – WinCent*) to assist in the execution of multiple simulations and a window for graphic display in real time without the aid of any alternative software.

Key words: Century Model, SOM, NURBS.

Lista de Figuras

3.1	Compartimentos e fluxos do carbono no modelo Century 4.0 (adaptado de [1])	p. 8
3.2	Ambiente do modelo Century 4.0 mostrando a relação entre programas e a estrutura dos arquivos (adaptado de [2])	p. 12
3.3	Relação entre os quatro tipos de superfícies/curvas (adaptado de [3]) . . .	p. 16
4.1	Curva poligonal e pontos de controle	p. 23
4.2	Uma curva de Bézier e seu polígono de controle	p. 24
4.3	Superfície de Bézier (adaptado de [4])	p. 26
5.1	Relação entre programas e a interface WinCent (adaptado de [2])	p. 34
5.2	Interface WinCent	p. 35
5.3	Janela de visualização gráfica para as unidades de simulação	p. 36
5.4	Janela de espacialização contínua pelo <i>NURBS</i>	p. 37
5.5	Janela de controle de visualização gráfica	p. 38
5.6	Interação entre as janelas WinCent Graph e WinCent GIS Graph para o período de simulação $t = 501$	p. 39
(a)	Comportamento da variável <i>somsc</i> para cada unidade de simulação e a reta de interação no período $t = 501$	p. 39
(b)	Espacialização contínua pelo <i>NURBS</i> para variável <i>somsc</i> no período $t = 501$	p. 39

5.7	Interação entre as janelas WinCent Graph e WinCent GIS Graph para o período de simulação $t = 1002$	p. 40
(a)	Comportamento da variável <i>somsc</i> para cada unidade de simulação e a reta de interação no período $t = 1002$	p. 40
(b)	Espacialização contínua pelo <i>NURBS</i> para variável <i>somsc</i> no período $t = 1002$	p. 40
5.8	Interação entre as janelas WinCent Graph e WinCent GIS Graph para o período de simulação $t = 1502$	p. 41
(a)	Comportamento da variável <i>somsc</i> para cada unidade de simulação e a reta de interação no período $t = 1502$	p. 41
(b)	Espacialização contínua pelo <i>NURBS</i> para variável <i>somsc</i> no período $t = 1502$	p. 41

Lista de Tabelas

4.1	Descrição do agendamento do arquivo <i>aridsl.sch</i>	p. 18
4.2	Descrição do agendamento do arquivo <i>boreal.sch</i>	p. 19
4.3	Descrição do agendamento do arquivo <i>tconif.sch</i>	p. 19
4.4	Descrição do agendamento do arquivo <i>tundra.sch</i>	p. 19
4.5	Descrição do agendamento do arquivo <i>tdecid.sch</i>	p. 20
4.6	Descrição do agendamento do arquivo <i>tropeg.sch</i>	p. 20
4.7	Descrição do agendamento do arquivo <i>c3grs.sch</i>	p. 21
4.8	Descrição do agendamento do arquivo <i>tsavan.sch</i>	p. 21
4.9	Descrição do agendamento do arquivo <i>c4grs.sch</i>	p. 21
4.10	Lista das variáveis de saída selecionadas	p. 31

Sumário

1	Introdução	p. 1
2	Objetivos	p. 3
2.1	Objetivo geral	p. 3
2.2	Objetivos específicos	p. 3
3	Revisão de Literatura	p. 4
3.1	Modelos de ciclagem biogeoquímica em agroecossistemas	p. 4
3.2	Modelo Century de dinâmica da matéria orgânica do solo	p. 6
3.2.1	Submodelo de matéria orgânica do solo	p. 7
3.2.2	Taxas de decomposição e fluxos entres os compartimentos	p. 9
3.2.3	Ambiente computacional do Modelo Century 4.0	p. 11
3.3	Superfícies <i>B-spline</i> Racionais Não Uniformes – <i>NURBS</i>	p. 14
4	Metodologia	p. 18
4.1	Dados	p. 18
4.2	Teoria sobre superfícies <i>B-spline</i> Racionais Não Uniformes	p. 21
4.2.1	Curvas e superfícies de Bézier	p. 24
4.2.2	Curvas e superfícies <i>B-spline</i>	p. 26

4.2.3	Curvas <i>B-spline</i> Racionais	p. 28
4.2.4	Superfícies <i>B-spline</i> Racionais	p. 29
4.3	Acoplamento do modelo Century 4.0 ao método <i>NURBS</i>	p. 29
5	Resultados	p. 33
6	Considerações finais	p. 42
	Referências	p. 43

Introdução

A matéria orgânica é um dos componentes mais importantes do solo e tem efeitos direto sobre as características físicas, químicas e biológicas em qualquer ecossistema terrestre e importância significativa na disponibilidade de nutrientes, agregação do solo, retenção de água e troca de fluxos de gases de efeito estufa entre a superfície terrestre e a atmosfera. Por meio de seu manejo pode-se evitar que o carbono seja transferido para a atmosfera ou permaneça retido no material do solo, contribuindo para mitigação de mudanças climáticas [5]. Neste contexto, a predição dos efeitos do clima, composição atmosférica e mudanças no uso da terra sobre a dinâmica da matéria orgânica do solo (MOS) é essencial na formulação de políticas agrícolas, ambientais e socioeconômicas [6].

A introdução da computação auxiliou e conduziu, por meio de modelos de simulação, a melhor compreensão sobre sistemas que envolvem número significativo de interações. Como exemplo pode-se citar o estudo sobre a dinâmica da MOS, visto que a complexidade dos agroecossistemas inibe previsões sobre o comportamento da sua dinâmica em larga escala, pelo fato dos agroecossistemas se apresentarem sob dimensões distintas, com alta variabilidade espacial, diferenças climáticas ou até mesmo problemas como limitações financeiras e logísticas.

A maioria dos modelos hoje utilizados foram desenvolvidos em países situados em regiões de clima temperado (EUA e Europa) e assumem que a MOS é dividida em compartimentos bem definidos e com taxas de decomposição diferenciadas. São exemplos de tais modelos, o modelo Century [7, 8] e o modelo RothC [9].

O modelo Century 4.0, desenvolvido pela Great Plains System Research Unit – USDA (GPSR) da Colorado State University ([7, 8]), representa uma ferramenta geral para simulação da dinâmica do carbono e nutrientes no sistema solo-planta em diversos tipos de agroecossistemas. O modelo contém submodelo para simulação de decomposição

da MOS, submodelo para ciclagem de água, submodelo para produção vegetal (floresta, pastagem/cultura e savana) e submodelos para calcular os fluxos de carbono (C), nitrogênio (N), fósforo (P) e enxofre (S).

Apesar de ser um modelo intensamente utilizado ([7, 8, 10, 11, 12]), a versão 4.0 do modelo Century ainda carece de alguns ajustes que venham a facilitar seu uso, melhorar seu desempenho quanto à simulação em escala regional e visualização gráfica, pois qualquer e única simulação é feita em ambiente MS-DOS (*MicroSoft Disk Operating System*) seguida da utilização de um software alternativo para visualização gráfica.

Especificamente, para estudo de uma região com N unidades de simulação, é necessário preparar com antecedência arquivos de entrada ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*) para cada unidade de simulação e em seguida para cada uma destas deve ser executada a simulação, gerando assim um número correspondente de arquivos de saída binária. Além do grande número de arquivos cujo manuseio representa uma tarefa árdua, a lentidão inerente ao acesso ao disco rígido, quando comparado ao acesso a dados na memória RAM (*American Standard Code for Information Interchange*), representa um fator que limita seu uso apenas em escala pontual.

O presente trabalho situa-se na direção de contornar os problemas inerente ao uso do modelo Century 4.0 em ambiente MS-DOS através do desenvolvimento de uma interface – *Windows Century Manager* (WinCent) – bem como o ambiente GUI (*Graphic User Interface*) e torná-lo capaz de realizar múltiplas simulações seguidas de visualização gráfica em tempo real e sem auxílio de qualquer outro software alternativo. O trabalho tem ainda como foco principal, para uma grade de N unidades de simulação, representar as lacunas entre estas unidades de simulações de forma espacialmente contínua usando o método de interpolação *NURBS* (*B-spline* Racional Não Uniforme).

Objetivos

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho trata-se do aperfeiçoamento computacional do Modelo Century 4.0 de dinâmica da matéria orgânica do solo, escrito em linguagem FORTRAN, de forma a torná-lo apto a realizar múltiplas simulações e ainda acoplar estas ao método de interpolação não-linear *NURBS* (*B-splines* Racional Não Uniforme).

2.2 Objetivos específicos

1. Integrar o código fonte do modelo Century 4.0 com o código a ser desenvolvido em linguagem C;
2. Modificar pontos do código para isolar trechos com as instruções de entrada e saída de dados;
3. Desenvolver uma interface – *Windows Century Manager* (WinCent);
4. Desenvolver um ambiente GUI (*Graphical User Interface*) e promover a espacialização das simulações através do método *NURBS*.

Revisão de Literatura

3.1 Modelos de ciclagem biogeoquímica em agroecossistemas

A matéria orgânica do solo (MOS) representa um acervo de resíduos animais e vegetais parcialmente decompostos e também parcialmente sintetizados, em contínua decomposição resultante do trabalho de microrganismos do solo. É portanto um componente do solo sobremodo transitório e que deverá ser constantemente renovado pela adição de resíduos vegetais [13]. Dessa forma, a MOS tem efeito direto sobre as características físicas, químicas e biológicas do solo em qualquer ecossistema terrestre e possui importância significativa na disponibilidade de nutrientes, agregação do solo, retenção de água, troca de fluxo de gases de efeito estufa entre a superfície terrestre e a atmosfera, além de representar principal compartimento de carbono (C) na biosfera, avaliado em $1550Pg^1$ [14].

Consequentemente, o estudo e a compreensão da dinâmica da MOS são fundamentais na sustentabilidade de diferentes sistemas agrícolas, no ciclo global de C, no fluxo de nutrientes (causando empobrecimento dos solos e contaminação dos cursos d'água), e na capacidade do solo em resistir a danos físicos, erosão e compactação [15]. Contudo, tais estudos são dificultados pela grande complexidade dos agroecossistemas, pois estes se apresentam em dimensões distintas com alta variabilidade espacial, diferenças climáticas, etc.

Devido a essa complexidade, pesquisas experimentais são dificultadas por problemas logísticos ou limitações financeiras. Assim, modelos de simulação matemática funcionam como ferramenta para auxiliar a compreensão destes fenômenos.

Os modelos de simulação podem ser classificados em determinísticos, quando o sis-

¹ Pg corresponde a pentagrama e é igual 10^{15} ou 1 bilhão de toneladas

tema não depende de nenhuma variável probabilística, e estocásticos, quando dependem de variáveis probabilísticas. Os modelos determinísticos, ainda, se subdividem em modelos mecanísticos e funcionais. Um modelo mecanístico descreve detalhadamente os mecanismos dos processos, enquanto que o modelo funcional objetiva fornecer uma descrição mais generalizada dos processos sem maiores detalhes [16].

Diferentes modelos de simulação de dinâmica de MOS foram concebidos nos últimos anos. Na década de 80, o interesse em simular a dinâmica da MOS e o crescimento de culturas conduziu ao desenvolvimento dos modelos NCSOIL [17], EPIC [18], CERES [19], PAPRAN [20], SOILN [21] bem como aos modelos [22, 7] que utilizam a abordagem de que o C do solo é dividido em compartimentos lento, ativo e passivo, com diferentes tempo de reciclagem e dados respectivamente por 1, 30 e 1500 anos. Ainda nos anos 80, Van Veen & Paul [22] melhoraram o modelo desenvolvido por Jenkinson & Rayner [23] incluindo conceitos de proteção química e física, e fatores como erosão e cultivo do solo. Parton e colaboradores [7] adicionaram o efeito da textura na dinâmica da MOS e desenvolveram submodelos de ciclagem de nutrientes, os quais simulam, simultaneamente, C do solo e a dinâmica de nitrogênio (N), fósforo (P) e enxofre (S). Na década de 90, foram desenvolvidos os modelos DAISY [24], VERBERNE [25], SUNDIAL [26], CANDY [27], DNDC [28], RothC [9] e, recentemente foi desenvolvido o modelo EPICSEAR, adaptado do código fonte do modelo EPIC, que foi aplicado na região semiárida do nordeste brasileiro sob condições de um Latossolo do Piauí, cultivado com milho e feijão [29, 30]. Outro modelo, o SALSA [31], desenvolvido especificamente para ambientes semiáridos simulou bem a dinâmica da MOS, produtividade de biomassa do milho e dinâmica de N no solo.

É notório, como mostrado, o uso de diversos modelos nos últimos anos, embora alguns não façam uso dos critérios adotados em [32], ou se encontrem em fase inicial de desenvolvimento e não tenham sido testado sobre diversos ecossistemas e tipos de solo. Em estudo realizado [33], por meio de comparação crítica de nove modelos de simulação de C e nutrientes em diferentes ecossistemas terrestres de clima temperado (através de sete experimentos de longa duração), um grupo formado pelos modelos RothC-26.3, Century, DAISY, CANDY, NCSOIL e DNDC apresentaram desempenho significativamente melhor do que os outros três – SOMM, ITE e Verberne. Destes, apenas os modelos RothC-26.3 e Century foram capazes de simular o C em todos sistemas de uso da terra em cada experimento.

O modelo Century [7, 8] foi desenvolvido originalmente para simular em escala pontual a dinâmica da MOS e nutrientes no sistema solo-planta em pastagens naturais nas Planícies Norte Americanas. Desde o momento, o seu uso não compreende apenas regiões de clima temperado ou solo específico, mas também, tem sido aplicado com êxito em ecos-

sistemas tropicais [10, 34] e semiárido [35, 36]. Modificações no modelo ainda conduziram sua aplicabilidade sob sistemas agrícolas [12] e sistemas florestais [37].

O modelo Century 4.0, por ter sido desenvolvido especificamente para simulação em escala pontual e com poucos recursos computacionais (em relação aos atuais), apresenta restrições quando o interesse são simulações de caráter regional. Embora poucos, mas não escassos, são encontradas aplicações do Century com esta abordagem.

Um dos primeiros estudos [38] nesta direção foi nas padarias do Nordeste do estado do Colorado - EUA, onde as variáveis de entrada para o modelo Century foram extraídas de um GIS (*Geographic Information System*) contendo planos com informações de clima e solo, gerando um total de 160 unidades de simulação para estudar a dinâmica do C.

Nørgaard (2004) [39] adotou método semelhante para modelar os estoques de C do solo em uma região de 10000km^2 no semiárido Norte do Senegal. A modelagem se deu possível depois do acoplamento do Century com um GIS contendo informações de solo, clima, uso e manejo de solos por meio de uma base de dados gerenciada pela interface i_Century. Trabalho similar ao realizado por Nørgaard foi produzido por Tornquist (2009) e demais pesquisadores [40], o qual também fez uso de um SIG e da interface i_Century para executar simulações em dimensões espaciais e temporais e avaliar as mudanças nos estoques de carbono orgânico do solo ocorridas em Ibirubá-RS.

3.2 Modelo Century de dinâmica da matéria orgânica do solo

A Versão 4.0 do modelo Century, concebido pela Great Plains System Research Unit- USDA (GPSR) da Colorado State University [7, 8], foi desenvolvida especialmente para lidar com diversos sistemas de rotações de culturas e práticas de sistemas de plantio para analisar efeitos de manejo e mudanças globais na produtividade e sustentabilidade de agroecossistemas. A versão 4.0 integra os efeitos de clima, conduz as variáveis de solo e manejo agrícola para simular a dinâmica do carbono (C), nitrogênio (N), fósforo (P), enxofre (S) e água no sistema solo-planta. A versão 4.0 é capaz de simular sistemas complexos de manejo agrícola, com rotações de culturas, práticas de plantio, adubação, fertilização, irrigação, pastagem e métodos de colheitas [2], diferentemente da versão 3.0 [41].

O modelo funciona em escala de metro quadrado e simula a dinâmica do C, N, P e S para uma camada superficial do solo (0-20cm) usando etapa de tempo mensal [6]. As principais variáveis de entrada exigida pelo modelo são:

- temperatura do ar;
- precipitação mensal;
- textura do solo;
- teor de N, P e S do material vegetal;
- conteúdo de lignina do material vegetal;
- aporte de N do solo e da atmosfera;
- teor inicial de C, N, P e S nos diferentes compartimentos do solo [42].

As variáveis são disponíveis para a maioria dos sistemas naturais e agrícolas e podem ser obtidas através da literatura. A simulação pode ser feita considerando apenas a dinâmica do C e N, C, N e P, ou C, N, P e S quando atribuído respectivamente os valores 1, 2 ou 3 a variável NELEM [2] presente nos parâmetros de controle do arquivo de sítio, posteriormente esclarecido na subseção 3.2.3.

Existem compilações alternativas do modelo Century em função do trabalho em estudo. Porém, a implementação mais utilizada ainda é a versão 4.0 já que possui código fonte livre e tem sido extensivamente testada.

Atualmente, o Century dispõe das versões 4.5 (principais modificações estão relacionadas ao processo de decomposição, modificação no cálculo do efeito da temperatura e no cálculo da evapotranspiração, além da adição de novas variáveis de saída, tornando-a capaz de modelar cenários com alterações climáticas [43]), 5.0 (o modelo tem sido reescrito em linguagem C++, reorganizado e modificado para o uso independente da plataforma de configuração e inclui uma estrutura para camada física do solo e novos submodelos de erosão e deposição [44]), DAYCENT (versão de simulação diária para o Century e é capaz de simular detalhadamente a dinâmica da água e temperatura do solo assim como fluxos de gases (CH_4 , N_2O , NO_x e N_2), o que não era possível na versão 4.0 do modelo Century [45]) e i_Century (interface desenvolvida por Todd Campbell (Center for Agricultural and Rural Development – Iowa State University, Ames, Iowa, EUA) em linguagem de programação C++ que permite realizar múltiplas simulações a partir de variáveis e parâmetros do Century armazenados em banco de dados MS Access [40]).

3.2.1 Submodelo de matéria orgânica do solo

O Century consiste dos submodelos para decomposição da matéria orgânica do solo, ciclagem de água, ciclagem de N, ciclagem de P, ciclagem de S e o submodelo de produção

vegetal que contém submodelos de pastagem/cultura, floresta e savana.

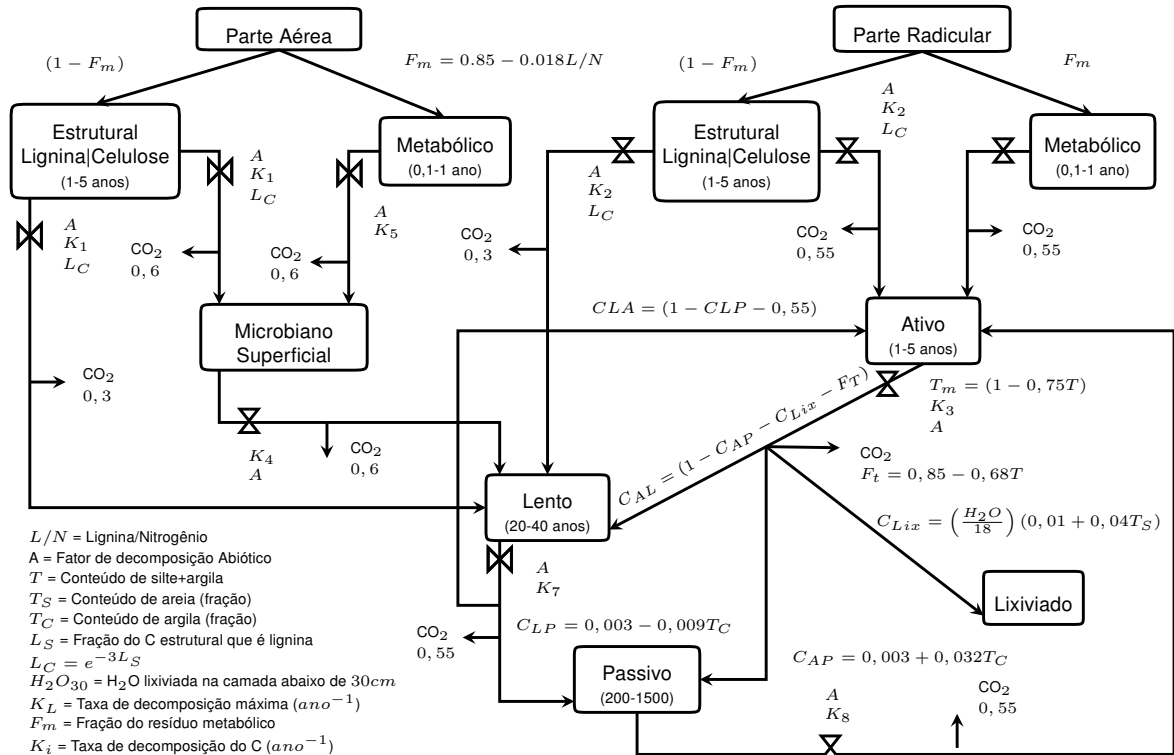


Figura 3.1: Compartimentos e fluxos do carbono no modelo Century 4.0 (adaptado de [1])

O submodelo de MOS simula a dinâmica do C, N, P e S em sistemas orgânicos e inorgânicos do solo com base em múltiplos compartimentos, particionados pelo tempo de reciclagem e similar a outros modelos de dinâmica da MOS [23, 46, 22] (Figura 3.1). De acordo com [7], o submodelo de dinâmica da MOS é dividido em três maiores compartimentos na qual inclui:

- Compartimento Ativo – constituído pela biomassa microbiana do solo e seus produtos, apresenta fácil decomposição e curto tempo de ciclagem (1 a 5 anos);
- Compartimento Lento – fisicamente protegido e/ou com formas químicas mais resistente para decomposição biológica, apresenta tempo de reciclagem intermediário (20 a 40 anos);
- Compartimento Passivo – pode também ser fisicamente protegido, com longo tempo de reciclagem (200 a 1500 anos).

A Figura 3.1 mostra a divisão dos resíduos vegetais de acordo sua classificação:

- Parte Radicular – inclui os resíduos vegetais no solo que, por sua vez, é fracionada nos compartimentos metabólico e estrutural com taxas de decomposição de 0,1-1 ano (facilmente decomponível) e 1-5 anos (resistente a decomposição);
- Parte aérea – inclui os resíduos vegetais dos galhos finos e grossos acima do solo, sendo esta dividida nos compartimentos metabólico e estrutural, com taxas de decomposição de 0,1-1 ano (facilmente decomponível) e de 1-5 anos (resistente a decomposição).

A divisão dos resíduos vegetais em metabólico e estrutural é decorrente da função

$$F_m = 0,85 - 0,018L/N \quad (3.1)$$

em que F_m representa a fração metabólica. A fração de lignina na equação 3.1 é assumida ser parte do compartimento estrutural bem como é pressuposto sua transferência diretamente para o compartimento lento da MOS e sua deficiência em criar biomassa microbiana [1]. Nota-se que com aumento na relação lignina/nitrogênio (L/N) maior parte do resíduo é transferido para compartimento estrutural ($1 - F_m$) que possui taxas de decomposição menores em relação ao compartimento estrutural (ver Figura 3.1).

O Submodelo de MOS ainda possui os compartimentos lixiviado e microbiano superficial que apresenta taxa de reciclagem independente da textura do solo e é transferido diretamente para o compartimento lento da MOS [47].

3.2.2 Taxas de decomposição e fluxos entres os compartimentos

Segundo [1], a decomposição do carbono para cada compartimento mostrado na Figura 3.1 são oriundas de um sistema de equações diferenciais dado por:

$$\frac{dC_i}{dt} = \begin{cases} K_i \cdot L_C \cdot A \cdot C_i, & \text{se } i = 1, 2 \\ K_i \cdot T_m \cdot A \cdot C_i, & \text{se } i = 3 \\ K_i \cdot A \cdot C_i, & \text{se } i = 4, 5, 6, 7, 8 \end{cases} \quad (3.2)$$

Onde C_i é a quantidade de C para os compartimentos estrutural da parte aérea ($i = 1$), estrutural da parte radicular ($i = 2$), ativo da MOS ($i = 3$), micróbios da superfície ($i = 4$), metabólico da parte aérea ($i = 5$), metabólico da parte radicular ($i = 6$), lento da MOS ($i = 7$) e passivo da MOS ($i = 8$); K_i é a taxa de decomposição máxima para o i -ésimo compartimento ($K_i = 3,9; 4,9; 7,3; 6,0; 14,8; 18,5; 0,2; 0,004 \text{ ano}^{-1}$); A é o efeito

combinado da umidade e temperatura sobre a decomposição; L_C o impacto de lignina do material estrutural (L_S) na decomposição estrutural; T_m é o efeito da textura do solo na reciclagem do compartimento ativo da MOS e T é o conteúdo de *silte + argila*.

As taxas de decomposição máxima K_i são fixas para os compartimentos em que $4 \leq i \leq 8$, porém podem ser modificadas por um coeficiente de cultivo se houver revolvimento do solo [6], e variáveis para $1 \leq i \leq 3$, dependendo apenas da textura do solo e do teor de lignina respectivamente descrito nas funções abaixo:

$$T_m = (1 - 0,75T) \quad (3.3)$$

$$L_C = e^{-L_S} \quad (3.4)$$

Independente das taxas de decomposição máxima dos diferentes compartimentos, os fluxos de carbono são controlados também pelo fator de decomposição abiótico, composto pela umidade e temperatura [47]. A função umidade (U) é controlada pelo quociente entre precipitação mensal mais quantidade de água armazenada à uma camada de 0-30cm do solo (PPM) e evapotranspiração potencial (ETP), dada por:

$$U = \begin{cases} \frac{1}{1 + 30e^{(-8,5 \frac{PPM}{ETP})}} \\ \frac{1 - 0,7(\frac{PPM}{ETP} - 1,5)}{1,5} \end{cases} \text{ se } \frac{PPM}{ETP} > 1,5 \quad (3.5)$$

Por outro lado, a função temperatura é definida como

$$T_E = t_2 e^{0,2 \ln(t_1)} \quad (3.6)$$

Para t_1 como sendo a média da temperatura máxima mensal e t_2 igual a média da temperatura mínima mensal respectivamente dadas por:

$$t_1 = \frac{45 - T}{10} \quad (3.7)$$

$$t_2 = e^{0,076[1 - e^{2,63 \ln(t_1)}]} \quad (3.8)$$

O modelo Century pressupõe que todos os fluxos de decomposição do C estão associados com a atividade microbiana e que a respiração microbiana está presente em cada um destes fluxos. A fração de C perdido devido a respiração microbiana é mostrada na

Figura 3.1 próximo aos fluxos de CO_2 . Os fluxos de decomposição do C que sai do compartimento ativo é divididos em quatro novos fluxos e direcionados para os compartimentos lento e passivo da MOS, compartimento lixiviado de C orgânico solúvel e um fluxo de C perdido devido a respiração microbiana, sendo estes ajustados pelas seguintes equações:

$$F_T = 0,85 - 0,68T \quad (3.9)$$

$$C_{Lix} = \left(\frac{H_2O}{18}\right)(0,01 + 0,04T_S) \quad (3.10)$$

$$C_{AP} = 0,003 + 0,032T_C \quad (3.11)$$

$$C_{AL} = (1 - C_{AP} - C_{Lix} - F_T) \quad (3.12)$$

onde F_T representa o C perdido devido a respiração microbiana, C_{Lix} é a fração perdida por lixiviação, C_{AP} é a fração alocada no compartimento passivo da MOS, C_{AL} é a fração enviada para o compartimento lento, H_2O é a água lixiviada mensalmente abaixo de 30cm de profundidade do solo (cm mês^{-1}), T_C é o conteúdo de argila e T_s é o conteúdo de areia.

Bolker (1998) [48], analisou a estrutura matemática do modelo Century, baseado nas propriedades de linearidade do submodelo de MOS, e mostrou que com pouca perda de generalidade o modelo pode ser simplificado, preservando sua dinâmica. Assim, entendimento auxiliar sobre a taxa de decomposição e os fluxos entre os compartimentos da MOS pode ser encontrado em [48].

3.2.3 Ambiente computacional do Modelo Century 4.0

A versão 4.0 do modelo Century encontra-se disponível para download em [49] bem como seu código fonte (*cent40_src.zip*) e o manual para o usuário (*CENTURY Manual*).

A instalação do modelo de simulação é feita sem dificuldade, devendo o executável *cent40.exe* estar obrigatoriamente destinada em uma pasta com nome definido pelo usuário e na unidade C do computador. Concluída a instalação, a pasta conterá 5 arquivos executáveis (*century.exe*, *event100.exe*, *file100.exe*, *list100.exe* e *UNWISE.exe*), 2 arquivos de ajuda (*Cent_man.hlp* e *Cent40.hlp*), 20 arquivos de extensão .100 (os arquivos de manejo *crop.100*, *cult.100*, *fert.100*, *fire.100*, *graz.100*, *harv.100*, *irri.100*, *omad.100*, *tree.100*, *trem.100*, *fix.100* e os arquivos de sítio *aridsl.100*, *boreal.100*, *c3grs.100*, *c4grs.100*, *tconif.100*, *tdecid.100*, *tropeg.100*, *tsavan.100*, *tundra.100*) e 9 arquivos de agendamentos (*aridsl.sch*, *boreal.sch*, *c3grs.sch*, *c4grs.sch*, *tconif.sch*, *tdecid.100*, *tropeg.sch*, *tsavan.sch*, *tundra.sch*) para os respectivos arquivos de sítio, dentre outros.

O ambiente do Century 4.0 (Figura 3.2) é constituído de doze arquivos com extensão

.100, um arquivo de clima (.wth), dos utilitários (programas auxiliares) FILE100, EVENT100 e LIST100, do programa CENTURY – responsável pela simulação – e de um software independente para visualização de gráficos e análise dos resultados.

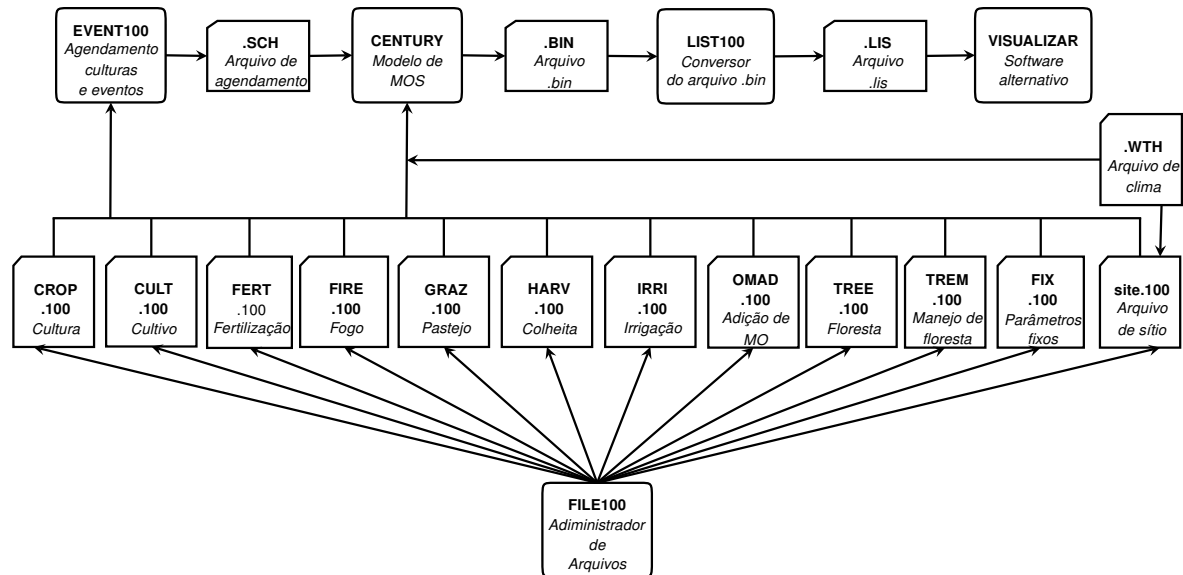


Figura 3.2: Ambiente do modelo Century 4.0 mostrando a relação entre programas e a estrutura dos arquivos (adaptado de [2])

O modelo Century foi escrito em linguagem FORTRAN e, de um ponto de vista computacional, funciona como aplicativo console em ambiente MS-DOS (*MicroSoft Disk Operating System*) para plataforma Windows utilizando os utilitários FILE100 e EVENT100 para fornecer arquivos de entrada ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*) e o utilitário LIST100 para converter arquivos de saída .bin gerados pelo CENTURY em arquivos ASCII após a execução de uma simulação.

O utilitário FILE100 funciona como um gerenciador de arquivos e é designado para adicionar, alterar, deletar ou comparar opções nos arquivos de cultura (*crop.100*), cultivo (*cult.100*), fertilização (*fert.100*), fogo (*fire.100*), pastagem (*graz.100*), colheita (*harv.100*), irrigação (*irri.100*), adição de matéria orgânica (*omad.100*), floresta (*tree.100*), remoção de floresta (*trem.100*), fixo (*fix.100*) e sítio (*site.100*). Cada um dos arquivos .100 é composto por uma série de variáveis padrão, dos quais o arquivo de sítio carrega um conjunto de variáveis relacionadas ao clima, controle da simulação e parâmetros do sítio, parâmetros de entrada de nutrientes externos, valores iniciais de matéria orgânica, parâmetros iniciais de matéria orgânica florestal, parâmetros iniciais de nutrientes na forma mineral e parâmetros iniciais de umidade do solo. Para dados climáticos com um período de no

mínimo dez anos, é possível, por meio do FILE100, gerar precipitação média (PRECIP(1-12)), desvios padrão (PRCSTD(1-12)), valores de assimetria (PRCSKW(1-12)) e média mínima (TMN2M(1-12)) e máxima (TMX2M(1-12)) da temperatura mensal para os meses de janeiro a dezembro, isto é, os parâmetros de clima exigido pelo arquivo de sítio.

O EVENT100 é destinado para programar eventos, agendar culturas, especificar o período inicial e final da simulação e é responsável pela criação do arquivo ASCII com extensão *.sch*, solicitado pelo CENTURY. A simulação utiliza uma das seguintes opções de clima que deve ser informada no arquivo *.sch*:

M – valores para precipitação e temperatura média lidos no arquivo de sítio (*site.100*);

S – valores para temperatura e precipitação média gerados estocasticamente a partir do arquivo *site.100*;

F – valores para precipitação e temperatura lidos no arquivo de clima (*.wth*).

Através do programa, usa-se blocos para agendar rotação de culturas e manipular eventos em intervalos contidos durante o período de simulação. O EVENT100 exibe uma grade para facilitar sua aplicação, permitindo percorrer entre meses ou anos e escolher a opção do mês inicial e final para crescimento de cultura e árvores, além do tipo de colheita, mês de senescência, cultivo, adição de fertilizantes, irrigação, adição de matéria orgânica, pastejo, fogo, remoção de floresta e erosão.

O CENTURY se encarrega de promover a simulação quando de posse dos arquivos com extensão *.wth* (opcional), *.sch* e de todos os arquivos *.100*, gerando assim um arquivo de saída com extensão *.bin*.

As informações contidas no arquivo *.bin* são lidas pelo LIST100 – utilitário responsável de gerar um arquivo de saída ASCII com extensão *.lis* – permitindo indicar um período específico entre o tempo final e inicial de simulação e informar quais são as variáveis de interesse para este intervalo, podendo ser visualizadas em um software independente.

Em suma, os passos para executar uma simulação através do modelo Century 4.0 são descritos em:

- I. usar o programa FILE100 para atualizar valores ou criar novas opções para qualquer um dos doze arquivos *.100*;
- II. usar o programa EVENT100 para estabelecer um período de simulação e agendar eventos que venham a ocorrer durante a simulação;

- III. usar o CENTURY para realizar a simulação;
- IV. usar o programa LIST100 para converter o arquivo gerado pelo CENTURY e criar um arquivo de saída ASCII.

Como já mencionado, a versão 4.0 do modelo Century foi escrita em linguagem FORTRAN e o próprio programa para simulação funciona como executável em ambiente MS-DOS, usando arquivos de entrada ASCII e gerando um arquivo de saída binária. Esta arquitetura ultrapassada acarreta ao modelo diversas limitações do ponto de vista prático. Computacionalmente, vários acessos ao disco rígido não necessários entre sucessivas simulações. Especificamente, num cenário de análise regional com grade de N unidades de simulação, é necessário preparar com antecedência para cada unidade os arquivos de entrada ASCII (arquivos *.100*) bem como os agendamentos (arquivos *.sch*), e em seguida para cada unidade a simulação deve ser executada, gerando assim um número correspondente de arquivos de saída binária.

Além do grande número de arquivos cuja manipulação representa uma tarefa árdua, a lentidão ao acessar o disco rígido, comparado ao acesso dos dados na memória RAM (*Random Access Memory*), representa um fator que limita seu uso apenas para pequenas grades de resolução espacial.

3.3 Superfícies *B-spline* Racionais Não Uniformes – *NURBS*

O surgimento da técnica *NURBS* (*B-spline* Racional Não Uniforme) nasceu no início de 1950, por engenheiros que necessitavam da representação matemática exata para superfícies de forma livre como chassis de automóveis, superfície externa de modelos aeroespaciais e cascos de barcos. Anterior ao desenvolvimento de *NURBS* tais representações acima mencionadas só poderiam ser criadas a partir de modelos específicos criado por designer.

Em 1959, um funcionário da empresa francesa de automóveis, Citroën, chamado de Paul de Faget Casteljau surgiu com a simples ideia de iterar combinações de malhas de polígonos para obter superfícies lisas e adequadas para modelagem de chassis de automóveis. Quase simultaneamente e ainda na França, Pierre Bézier, pela empresa de automóveis Renault, trabalhou na interseção parcial de cilindros para alcançar os mesmos objetivos. Ambas as versões produziram curvas iguais mas hoje são conhecidas como curvas de Bézier, já que Pierre Bezier foi o primeiro a escrever um documento público sobre o assunto. Contudo, Paul de Faget de Casteljau não foi esquecido, pois seu nome

está gravado no algoritmo de Casteljau, uma das maneiras mais comuns para avaliar curvas de Bézier [50]. Assim, Paul de Faget Casteljau e Piere Bézier foram os propulsores no estudo sobre superfícies de formas livre.

Por volta de 1967, Steven Coons Anson, fez a maioria de seus trabalhos, embora poucos conhecidos, sobre superfícies enquanto trabalhava para empresa de automóveis Ford. Em 1969, o matemático William J. Gordon generalizou as superfícies de Coons, como parte de seu trabalho para os laboratórios de pesquisa na *General Motors*. Além disso, o designer de aviões James Ferguson teve as mesmas ideias para construção de curvas e superfícies [51].

Enquanto a teoria sobre curvas de Bézier deve-se aos matemáticos Pierre Bézier e Paul de Faget Casteljau, a teoria sobre bases *spline* ou *B-spline* foi sugerida pela primeira vez por Schoenberg [52], e deve-se enfatizar que curvas de Bézier são casos particulares de *B-spline*. Baseado em [53], a expressão *spline* era o nome usado para longas tiras de madeiras, plástico ou metal utilizados por desenhistas qualificados.

Sem a utilização de computadores e de posse apenas de lápis, papel e outras ferramentas básicas para desenho, engenheiros, arquitetos e artistas não eram capazes de representar desenhos robustos. Particularmente, este problema se tornava mais crítico na indústria naval, já que os desenhos tinham de ser representados de tamanho real, ou quase real. Devido a esta grande dimensão, tais desenhos eram feitos no sótão de grandes edifícios, onde a *spline* era fixada num lugar definido e com pesos principais. As curvas resultantes eram lisas e variadas em curvatura, dependendo da posição dos pesos.

Matematicamente, superfícies de Bézier e *B-spline* são superfícies paramétricas. Como formas paramétricas não podem representar certas superfícies, conclui-se que superfícies de Bézier e *B-spline* somente podem representar o que formas paramétricas são capazes. Contudo, a introdução de coordenadas homogêneas (ver seção 4.2) em tais superfícies as tornam racionais. Ou seja, superfícies de Bézier e *B-spline* passam a ser superfícies de Bézier Racional e *B-spline* Racional Não Uniforme.² Neste contexto, superfícies de Bézier racional são mais poderosas que superfícies de Bézier, bem como superfícies *B-spline* racional são mais poderosas que superfície *B-spline*.

A Figura 3.3 dispõe de forma gradativa a relação entre os quatro tipo de superfícies. Ou seja, as superfícies de Bézier apresentam-se em um universo menor, seguido das superfícies *B-spline*, Bézier racional e das superfícies *B-spline* racionais Não Uniformes (*NURBS*), que por sua vez compreende todas as superfícies.

²O mesmo é válido para curvas de Bézier e *B-spline*, ver [3].

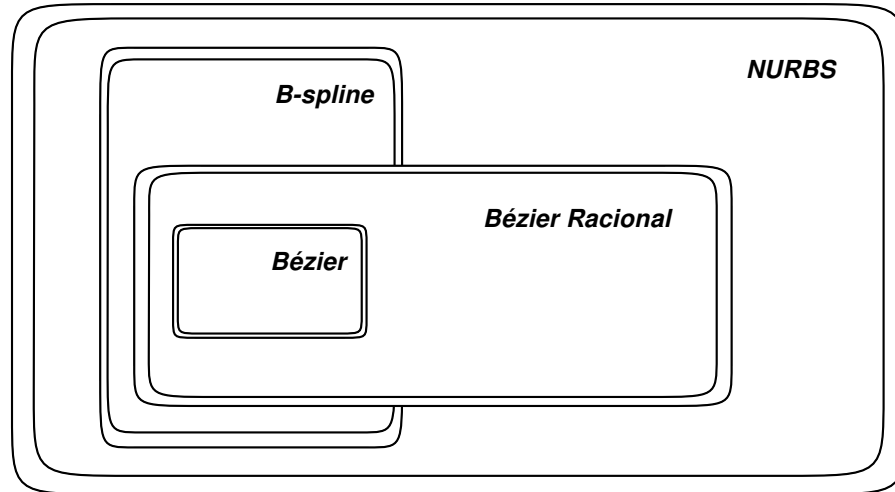


Figura 3.3: Relação entre os quatro tipos de superfícies/curvas (adaptado de [3])

Superfícies *B-spline* Racionais Não Uniformes são o padrão para modelagem de superfícies em grande parte da computação gráfica e desenho auxiliado por computador. Muitas formas típicas de superfície usadas em computação gráfica e desenho auxiliado por computador, tais como superfície planas e quádras ou cilindros, esferas e elipsoides de revolução e superfícies complexas totalmente esculpidas, são facilmente e precisamente representada por superfícies *B-spline* racionais. Assim, uma única descrição de uma superfície, com controle local e global excelente, pode ser usada em um sistema de modelagem ou projeto auxiliado por computador ao invés de lidar com múltiplas descrições de tipos de superfície [4].

Recentemente, de um ponto de vista teórico, Minetto (2003) [3], direcionou esforços ao estudo dos conceitos matemáticos de curvas *NURBS*, utilizando uma ferramenta matemática chamada DesignMentor com a finalidade de testar algoritmos destes conceitos. Zheng (2009) [54], trabalhou na busca da representação de uma curva de Bézier racional de continuidade geométrica G^1 . Para isto, foi desenvolvido um algoritmo para converter curvas de Bézier racional G^1 em curvas *NURBS*, cuja representação homogênea não racional é contínua paramétrica C^1 no espaço homogêneo³. Um novo método para calcular a distância mínima entre pontos e curvas *NURBS* foi apresentado por Chen (2008) e demais pesquisadores [55].

Por outro lado, e de um ponto de vista prático, Sacramento (2010) [56], fez uso de

³Seja uma curva onde dois segmentos, $P_i(t)$ e $P_{i+1}(t)$ se encontram em um ponto p . A curva é dita de continuidade geométrica G^n no ponto p se o sentido da n -ésima derivada dos segmentos no ponto p são iguais. Se a n -ésima derivada dos segmentos no ponto p são iguais em sentido e magnitude dizemos que a curva possui continuidade paramétrica C^n no ponto p . Claramente, continuidade C^n implica em continuidade G^n , porém continuidade G^n não implica em continuidade C^n [4].

NURBS e trabalhou na direção de otimizar o método tradicional área-velocidade para estimar descargas de rios. Mais precisamente, foi observado a forma funcional do perfil de velocidade em função da profundidade, aplicando regressão linear entre cada vertical. Em seguida, foi utilizado *NURBS* entre as verticais para gerar uma interpolação contínua da velocidade para toda a área da seção vertical. A técnica *NURBS* também foi utilizada para implementar uma nova metodologia para modelagem de formas livres e geometrias complexas em Máquinas de Medição por Coordenadas (MMCs) [57].

Na área de saúde, particularmente biomedicina, foi desenvolvido um sistema de modelagem utilizando superfícies *NURBS* para fins de simulações dinâmicas de contatos articulados. As simulações foram determinadas para analisar o comportamento de implantes ortopédicos. O uso de superfícies *NURBS* visou substituir a representação por superfícies triangulares pois possui melhor convergência das curvas, além de minimizar o uso de memória durante as simulações e por conseguinte o tempo de processo [58].

Metodologia

4.1 Dados

Os dados utilizados neste trabalho são os arquivos de agendamentos e sítios presentes quando instalado o modelo Century 4.0, como referido na subseção 3.2.3. Mais precisamente, são nove arquivos de agendamento (*aridsl.sch*, *boreal.sch*, *tconif.sch*, *tundra.sch*, *tdecid.sch*, *tropeg.sch*, *c3grs.sch*, *tsavan.sch* e *c4grs.sch*) com seus respectivos arquivos de sítio (*aridsl.100*, *boreal.100*, *tconif.100*, *tundra.100*, *tdecid.100*, *tropeg.100*, *c3grs.100*, *tsavan.100* e *c4grs.100*), utilizados na elaboração de tais agendamentos.

Neste sentido foram tomadas nove unidades de simulação, das quais em cinco as simulações variam entre o ano 1 e o ano de 2000 e as demais variam entre o ano 1 e o ano 2001, tendo como opção de clima os valores para precipitação e temperatura média lidos em seus particulares arquivos de sítio (*M*) e diferentes blocos. Aqui é exibido, respectivamente nas tabelas 4.1, 4.2 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9, a forma de como foram descritos os agendamentos, os intervalos de saída (mensal = 0.0833, semestral = 0.5, anual = 1.0) para as possíveis variáveis de interesse e o período de simulação para seus respectivos blocos.

Tabela 4.1: Descrição do agendamento do arquivo *aridsl.sch*

Blocos	Período (anos)	Intervalo de saída	Descrição (meses de janeiro a dezembro)
1	1 – 2000	1.0	Plantação e crescimento inicial no 1º mês da cultura <i>JRN</i> (<i>crop.100</i>) e floresta <i>THODR</i> (<i>tree.100</i>) seguidos de pastejo <i>GM</i> (<i>graz.100</i>) no 4º, 5º e 6º mês e 12º mês como último mês de crescimento, a cada 30 anos;
2	2001 – 2001	0.0833	Plantação e crescimento inicial no 1º mês da cultura <i>JRN</i> (<i>crop.100</i>) e floresta <i>THODR</i> (<i>tree.100</i>) e crescimento final no 12º mês.

Tabela 4.2: Descrição do agendamento do arquivo *boreal.sch*

Blocos	Período (anos)	Intervalo de saída	Descrição (meses de janeiro a dezembro)
1	1 – 99	1.0	Plantação e crescimento inicial no 1º mês da floresta <i>BNZ (tree.100)</i> e 12º mês como último mês de crescimento;
2	100 – 100	1.0	Plantação e crescimento inicial no 1º mês da floresta <i>BNZ (tree.100)</i> seguidos de remoção de floresta (<i>BURN</i>) (<i>trem.100</i>) no 8º mês e 12º mês como último mês de crescimento;
3	101 – 199	1.0	Repetição do bloco 1;
4	200 – 200	1.0	Repetição do bloco 2;
⋮	⋮	⋮	⋮
37	1801 – 1899	1.0	Repetição do bloco 1;
38	1900 – 1900	1.0	Repetição do bloco 2;
39	1901 – 2000	0.0833	Repetição do bloco 1.

Tabela 4.3: Descrição do agendamento do arquivo *tconif.sch*

Blocos	Período (anos)	Intervalo de saída	Descrição (meses de janeiro a dezembro)
1	1 – 299	1.0	Plantação e crescimento inicial no 1º mês da floresta <i>AND (tree.100)</i> e 12º mês como último mês de crescimento;
2	300 – 300	1.0	Plantação e crescimento inicial no 1º mês da floresta <i>AND (tree.100)</i> seguidos de remoção de floresta (<i>BURN</i> , <i>trem.100</i>) no 8º mês e 12º mês como último mês de crescimento;
3	301 – 599	1.0	Repetição do bloco 1;
4	600 – 600	1.0	Repetição do bloco 2;
⋮	⋮	⋮	⋮
11	1501 – 1799	1.0	Repetição do bloco 1;
12	1800 – 1800	1.0	Repetição do bloco 2;
13	1801 – 2000	0.0833	Repetição do bloco 1.

Tabela 4.4: Descrição do agendamento do arquivo *tundra.sch*

Blocos	Período (anos)	Intervalo de saída	Descrição (meses de janeiro a dezembro)
1	1 – 2000	0.0833	Plantação e crescimento inicial no 1º mês da cultura <i>NWT (crop.100)</i> seguidos de senescência (<i>SENM</i>) no 10º mês e crescimento final no 12º mês.

Tabela 4.5: Descrição do agendamento do arquivo *tdecid.sch*

Blocos	Período (anos)	Intervalo de saída	Descrição (meses de janeiro a dezembro)
1	1 – 299	1.0	Plantação e crescimento inicial no 1º mês da floresta <i>CWT</i> (<i>tree.100</i>) e 12º mês como último mês de crescimento;
2	300 – 300	1.0	Plantação e crescimento inicial no 1º mês da floresta <i>CWT</i> (<i>tree.100</i>) seguidos de remoção de floresta (<i>BURN</i> , <i>trem.100</i>) no 8º mês e 12º mês como último mês de crescimento;
3	301 – 599	1.0	Repetição do bloco 1;
4	600 – 600	1.0	Repetição do bloco 2;
⋮	⋮	⋮	⋮
11	1501 – 1799	1.0	Repetição do bloco 1;
12	1800 – 1800	1.0	Repetição do bloco 2;
13	1801 – 2000	0.0833	Repetição do bloco 1.

Tabela 4.6: Descrição do agendamento do arquivo *tropeg.sch*

Blocos	Período (anos)	Intervalo de saída	Descrição (meses de janeiro a dezembro)
1	1 – 299	1.0	Plantação e crescimento inicial no 1º mês da floresta <i>LUQ</i> (<i>tree.100</i>) e 12º mês como último mês de crescimento;
2	300 – 300	1.0	Plantação e crescimento inicial no 1º mês da floresta <i>LUQ</i> (<i>tree.100</i>) seguidos de remoção de floresta (<i>BURN</i> , <i>trem.100</i>) no 8º mês e 12º mês como último mês de crescimento;
3	301 – 599	1.0	Repetição do bloco 1;
4	600 – 600	1.0	Plantação e crescimento inicial no 1º mês da floresta <i>LUQ</i> (<i>tree.100</i>) seguidos de remoção de floresta (<i>BLOW</i> , <i>trem.100</i>) no 8º mês e 12º mês como último mês de crescimento;
5	601 – 899	1.0	Repetição do bloco 1;
⋮	⋮	⋮	⋮
10	1501 – 1799	1.0	Repetição do bloco 2;
11	1501 – 1799	1.0	Repetição do bloco 1;
12	1800 – 1800	1.0	Repetição do bloco 4;
13	1801 – 2000	0.0833	Repetição do bloco 1.

Tabela 4.7: Descrição do agendamento do arquivo *c3grs.sch*

Blocos	Período (anos)	Intervalo de saída	Descrição (meses de janeiro a dezembro)
1	1 – 2000	1.0	Plantação e crescimento inicial no 1º mês da cultura <i>CPR</i> (<i>crop.100</i>) seguidos de pastejo <i>GM</i> (<i>graz.100</i>) no 5º, 6º, 7º, 8º e 9º mês, senescência (<i>SENM</i>) no 11º mês e crescimento final no 12º mês;
2	2001 – 2001	0.0833	Plantação e crescimento inicial no 1º mês da cultura <i>CPR</i> (<i>crop.100</i>), senescência (<i>SENM</i>) no 11º mês e crescimento final no 12º mês.

Tabela 4.8: Descrição do agendamento do arquivo *tsavan.sch*

Blocos	Período (anos)	Intervalo de saída	Descrição (meses de janeiro a dezembro)
1	1 – 2000	1.0	Plantação e crescimento inicial no 1º mês da cultura <i>KNZ</i> (<i>crop.100</i>) e floresta <i>CWT</i> (<i>tree.100</i>) seguidos de pastejo <i>GM</i> (<i>graz.100</i>) no 5º, 6º e 7º mês, senescência (<i>SENM</i>) no 11º mês e crescimento final no 12º mês, a cada 30 anos. Exceto para o 4º, 8º, 12º, 20 e 24º e 28º ano. No 28º ano foi mantida a plantação e crescimento inicial no 1º mês da cultura <i>KNZ</i> (<i>crop.100</i>) e floresta <i>CWT</i> (<i>tree.100</i>), utilizado o arquivo <i>fire.100</i> (H) e removida a floresta (<i>BURN</i> , <i>trem.100</i>) no 4º mês, senescência (<i>SENM</i>) no 11º mês e crescimento final no 12º mês, nos demais anos não houve remoção de floresta;
2	2001 – 2001	0.0833	Plantação e crescimento inicial no 1º mês da cultura <i>JRN</i> (<i>crop.100</i>) e floresta <i>THODR</i> (<i>tree.100</i>), senescência (<i>SENM</i>) no 11º mês e crescimento final no 12º mês.

Tabela 4.9: Descrição do agendamento do arquivo *c4grs.sch*

Blocos	Período (anos)	Intervalo de saída	Descrição (meses de janeiro a dezembro)
1	1 – 2000	1.0	Plantação e crescimento inicial no 1º mês da cultura <i>KNZ</i> (<i>crop.100</i>) seguido de pastejo <i>GM</i> (<i>graz.100</i>) no 5º, 6º, 7º, 8º e 9º, senescência (<i>SENM</i>) no 11º mês e crescimento final no 12º mês, a cada 4 anos. Sendo que no último ano fez-se uso do arquivo <i>fire.100</i> (H) no 10º mês;
2	2001 – 2001	0.0833	Plantação e crescimento inicial no 1º mês da cultura <i>KNZ</i> (<i>crop.100</i>), senescência (<i>SENM</i>) no 11º mês e crescimento final no 12º mês.

4.2 Teoria sobre superfícies *B-spline* Racionais Não Uniformes

Antes de fazer qualquer menção sobre curvas de Bézier, curvas *B-spline* e superfície *B-spline* Racional é necessário o entendimento básico sobre coordenadas homogêneas,

polinômios homogêneos, curva poligonal e curvas racionais.

O uso de coordenadas homogêneas auxilia na projeção de certas classes de curvas e superfícies muito úteis em computação gráfica e projeto auxiliado por computador. As coordenadas homogêneas de um ponto no $\mathbb{R}^n$ (espaço de dimensão n) são representados por um vetor no espaço de dimensão $n + 1$ ($\mathbb{R}^{n+1}$). Assim, a transferência do objeto de um espaço para outro é chamada de homogênea se for feita pela adição de uma coordenada extra, a qual é denominada fator de escala ou peso. Por exemplo:

- um ponto x_1 pertencente aos $\mathbb{R}$ terá como coordenadas homogêneas o par $(wx_1, w) \in \mathbb{R}^2$, onde $w \in \mathbb{R}$ é um escalar qualquer, ($w \neq 0$);
- um ponto (x_1, x_2) pertencente ao $\mathbb{R}^2$ terá como coordenadas homogêneas a tripla $(wx_1, wx_2, w) \in \mathbb{R}^3$, onde $w \in \mathbb{R}$ é um escalar qualquer, ($w \neq 0$);
- um ponto (x_1, x_2, x_3) pertencente ao $\mathbb{R}^3$ terá como coordenadas homogêneas a quadra $(wx_1, wx_2, wx_3, w) \in \mathbb{R}^4$, onde $w \in \mathbb{R}$ é um escalar qualquer, ($w \neq 0$);
- um ponto (x_1, x_2, x_3, x_4) pertencente ao $\mathbb{R}^4$ terá como coordenadas homogêneas a quina $(wx_1, wx_2, wx_3, wx_4, w) \in \mathbb{R}^5$, onde $w \in \mathbb{R}$ é um escalar qualquer, ($w \neq 0$).

Inversamente, um ponto descrito em coordenadas homogêneas no espaço de dimensão $n + 1$, é representando por um ponto em coordenadas usuais no espaço de dimensão n . Assim, é reduzido uma unidade na dimensionalidade ao transferi um objeto definido em coordenadas homogêneas para coordenadas usuais. Por exemplo:

- um ponto (x_1, w) em coordenadas homogêneas tem como correspondente o ponto $x_1/w \in \mathbb{R}$, para algum escalar $w \in \mathbb{R}$, ($w \neq 0$);
- um ponto (x_1, x_2, w) em coordenadas homogêneas tem como correspondente o ponto $(x_1/w, x_2/w) \in \mathbb{R}^2$, para algum escalar $w \in \mathbb{R}$, ($w \neq 0$);
- um ponto (x_1, x_2, x_3, w) em coordenadas homogêneas tem como correspondente o ponto $(x_1/w, x_2/w, x_3/w) \in \mathbb{R}^3$, para algum escalar $w \in \mathbb{R}$, ($w \neq 0$);
- um ponto (x_1, x_2, x_3, x_4, w) em coordenadas homogêneas tem como correspondente o ponto $(x_1/w, x_2/w, x_3/w, x_4/w) \in \mathbb{R}^4$, para algum escalar $w \in \mathbb{R}$, ($w \neq 0$).

Para instruir o conhecimento sobre polinômio homogêneo, de acordo com [59], um polinômio do tipo

$$P(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^m a_i (x_1^{r_{i1}} x_2^{r_{i2}} \dots x_n^{r_{in}}) \quad (4.1)$$

é dito ser um polinômio homogêneo de grau d quando $r_{i_1} + r_{i_2} + \dots + r_{i_n} = d$. Ou seja, todos os seus monômios¹ tem grau igual a d . Um caso particular de um polinômio homogêneo de grau d em duas variáveis (x_1 e x_2) é dado pelo binômio de Newton,

$$(x_1 + x_2)^d = \sum_{i=0}^d \binom{d}{i} x_1^i x_2^{d-i} \quad (4.2)$$

onde $\binom{d}{i}$ figura os possíveis valores de a_i na equação 4.1.

Em geral, segundo Minetto (2003) [3], após a substituição de x_1 e x_2 por x_1/w e x_2/w seguido da multiplicação do resultado por w^d , em um polinômio de grau d sob duas variáveis, obtém-se um polinômio homogêneo de grau d e as coordenadas (x_1, x_2, w) são chamadas de coordenadas homogêneas.

Para a definição de curva polinomial considere $B_0, B_1, \dots, B_{n-1}, B_n$ pontos distintos do plano. Uma curva poligonal (Figura 4.1) é definida como sendo a união dos segmentos $\overline{B_0B_1}, \overline{B_1B_2}, \dots, \overline{B_{n-1}B_n}$.

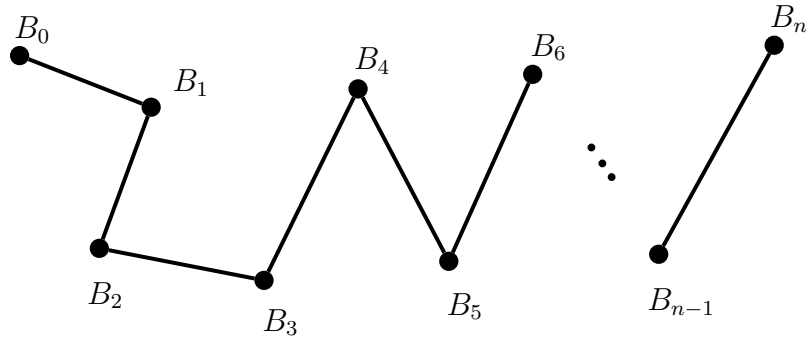


Figura 4.1: Curva poligonal e pontos de controle

Onde os pontos B_i 's são denominados de vértices da curva ou pontos de controle e os segmentos $\overline{B_iB_{i+1}}$ são chamados de arestas da curva poligonal.

Conforme Minetto (2003) [3], uma curva paramétrica na forma homogênea é designada curva racional e sua representação no espaço tridimensional é dada por quatro funções ao invés de três, por exemplo:

$$F(t) = (x_1(t), x_2(t), x_3(t), x_4(t)) \quad (4.3)$$

¹Um monômio $x_1^{r_1} x_2^{r_2} \dots x_n^{r_n}$ é dito de grau d quando $r_1 + r_2 + \dots + r_n = d$

sendo t pertencente a algum intervalo fechado $[a, b]$. A conversão desta curva para sua fórmula convencional é dada por:

$$f(t) = (x_1(t)/w(t), x_2(t)/w(t), x_3(t)/w(t)) \quad (4.4)$$

Note que se w é uma função constante, $w(t) = 1$, a curva homogênea se reduz a curva original definida no $\mathbb{R}^3$

4.2.1 Curvas e superfícies de Bézier

Antes de iniciar a abordagem sobre curvas e superfícies *NURBS* (*B-spline* Racional Não Uniforme), deve-se olhar para suas formas antecedentes. Particularmente, curvas e superfície Bézier e curvas e superfícies *B-spline*.

Uma curva de Bézier, a qual é um caso especial de uma curva *NURBS*, é determinada por um polígono de controle, como mostrada na Figura 4.2.

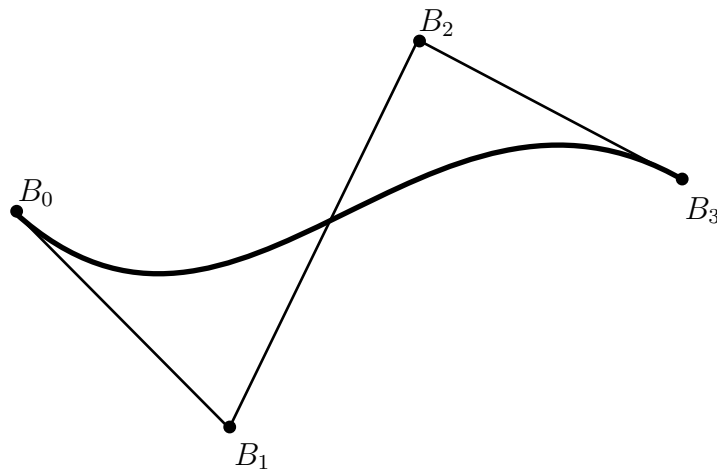


Figura 4.2: Uma curva de Bézier e seu polígono de controle

Matematicamente, uma curva de Bézier parametrizada é definida por

$$P(t) = \sum_{i=0}^n B_i J_{n,i}(t), \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (4.5)$$

Onde B_i é o i -ésimo ponto de controle e $J_{n,i}(t)$ representa a i -ésima função de base Bézier, ou Bernstein, de ordem n , dada por

$$J_{n,i}(t) = \binom{n}{i} t^i (1-t)^{n-i}, \quad (0)^0 \equiv 1 \quad (4.6)$$

com

$$\binom{n}{i} = \frac{n!}{i!(n-i)!}, \quad 0! \equiv 1 \quad (4.7)$$

A função de base de Bernstein de grau n , ou o seguimento da curva polinomial, possui uma unidade a menos que o número de pontos de controle do polígono da curva de Bézier [4].

Uma superfície de Bézier é uma simples extensão de uma curva de Bézier na direção de dois parâmetros, é um produto cartesiano de curvas de Bézier dado por

$$Q(u, w) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m B_{i,j} J_{n,i}(u) K_{m,j}(w) \quad (4.8)$$

onde $J_{n,i}(u)$ e $K_{m,j}(w)$ são as funções de base de Bernstein na direção dos parâmetros u e w . A definição sobre funções base é repetida para $J_{n,i}(u)$ como dada anteriormente nas equações 4.6 e 4.7 e reproduzida de forma análoga para $K_{m,j}(w)$. Isto é,

$$J_{n,i}(u) = \binom{n}{i} u^i (1-u)^{n-i}, \quad (0)^0 \equiv 1 \quad (4.9)$$

e

$$K_{m,j}(w) = \binom{m}{j} w^j (1-w)^{m-j}, \quad (0)^0 \equiv 1 \quad (4.10)$$

com

$$\binom{n}{i} = \frac{n!}{i!(n-i)!}, \quad 0! \equiv 1 \quad (4.11)$$

e

$$\binom{m}{j} = \frac{m!}{j!(m-j)!}, \quad 0! \equiv 1 \quad (4.12)$$

Os $B_{i,j}$'s são os vértices de uma rede de controle poligonal, como mostrado na Figura 4.3.

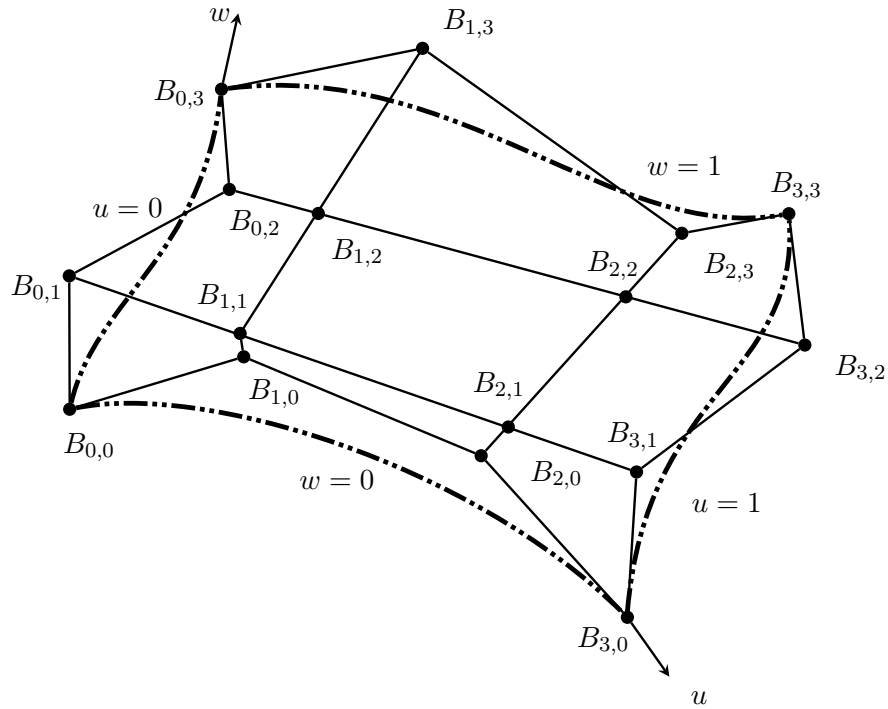


Figura 4.3: Superfície de Bézier (adaptado de [4])

Os índices n e m têm uma unidade a menos que os vértices do polígono na direção de u e w , respectivamente. Para malhas de superfície quadrilateral, a rede deve ser topologicamente retangular, ou seja, deve ter o mesmo número de vértices em cada linha. [4].

4.2.2 Curvas e superfícies *B-spline*

Seja $P(t)$ o vetor de posição ao longo da curva como uma função do parâmetro t , uma curva *B-spline* é dada por

$$P(t) = \sum_{i=1}^{n+1} B_i N_{i,k}(t), \quad t_{min} \leq t < t_{max} \quad \text{e} \quad 2 \leq k \leq n+1 \quad (4.13)$$

onde os B_i 's são os vetores de posição dos $n+1$ vértices do polígono de controle e $N_{i,k}$ são as funções base *B-spline* normalizadas.

Para a i -ésima função base *B-spline* normalizada de ordem k (grau $k-1$), as funções base $N_{i,k}(t)$ são definidas pelas fórmulas de recursão de Cox-de Boor. Especificamente,

$$N_{i,1}(t) = \begin{cases} 1, & \text{se } x_i \leq t < x_{i+1} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.14)$$

e

$$N_{i,k}(t) = \frac{(t - x_i)N_{i,k-1}(t)}{x_{i+k-1} - x_i} + \frac{(x_{i+k} - t)N_{i+1,k-1}(t)}{x_{i+k} - x_{i+1}} \quad (4.15)$$

Os valores de x_i são elementos de um vetor de nó satisfazendo a relação $x_i \leq x_{i+1}$. O parâmetro t varia de t_{min} para t_{max} ao longo da curva.²

Formalmente, uma curva *B-spline* é definida como uma função *spline* polinomial de ordem k (grau $k - 1$), pois satisfaz a duas condições:

- $P(t)$ é um polinômio de grau $k - 1$ em cada intervalo $x_i \leq t < x_{i+1}$;
- $P(t)$ e suas derivadas de ordem $1, 2, \dots, k - 2$ são todas contínuas ao longo da curva.

Desta forma, por exemplo, uma curva *B-spline* de quarta ordem é uma curva cúbica em cada subintervalo [4].

A extensão natural da superfície de Bézier é o produto cartesiano da superfície *B-spline* definida por

$$Q(u, w) = \sum_{i=1}^{n+1} \sum_{j=1}^{m+1} B_{i,j} N_{i,k}(u) M_{j,l}(w) \quad (4.16)$$

onde $N_{i,k}(u)$ e $M_{j,l}(w)$ são funções base *B-spline* respectivamente na direção dos parâmetros u e w . A definição sobre funções base é repetida aqui para $N_{i,k}(u)$ e $M_{j,l}(w)$ como dada anteriormente em 4.9, 4.11 e 4.10, 4.12, respectivamente. Isto é,

$$N_{i,1}(u) = \begin{cases} 1, & \text{se } x_i \leq u < x_{i+1} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.17)$$

$$N_{i,k}(u) = \frac{(u - x_i)N_{i,k-1}(u)}{x_{i+k-1} - x_i} + \frac{(x_{i+k} - u)N_{i+1,k-1}(u)}{x_{i+k} - x_{i+1}} \quad (4.18)$$

e

$$M_{j,1}(w) = \begin{cases} 1, & \text{se } y_j \leq w < y_{j+1} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.19)$$

²Seja t um conjunto de $n + 1$ números reais não-decrescente, $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_{n+1}$, chamamos o conjunto t de vetor de nós, os x_i 's de nós e o intervalo semi-aberto $[x_i, x_{i+1})$ de i -ésimo período de nó.

$$M_{j,l}(w) = \frac{(w - y_j)M_{j,l-1}(w)}{y_{j+l-1} - y_j} + \frac{(y_{j+l} - w)M_{j+1,l-1}(w)}{y_{j+l} - y_{j+1}} \quad (4.20)$$

onde x_i e y_j são elementos de vetores de nós e os $B_{i,j}$'s são os vértices de uma rede de controle poligonal [4].

4.2.3 Curvas *B-spline* Racionais

Uma curva racional *B-spline* é a projeção de uma curva *B-spline* não uniforme (polinomial) definida no espaço de coordenadas homogêneas em quatro dimensão ($\mathbb{R}^4$) de volta para o espaço físico tridimensional ($\mathbb{R}^3$). Especificamente,

$$P(t) = \sum_{i=1}^{n+1} B_i^h N_{i,k}(t) \quad (4.21)$$

onde os B_i^h 's são os vértices do polígono de controle homogêneo de quatro dimensão para a curva *B-spline* não uniforme de quatro dimensão. $N_{i,k}(t)$ são as funções base *B-spline* não uniforme anteriormente dadas nas equações 4.14 e 4.15.

Projetando de volta para o espaço tridimensional através da divisão por meio de coordenadas homogêneas obtém-se a curva *B-spline* racional

$$P(t) = \frac{\sum_{i=1}^{n+1} B_i h_i N_{i,k}(t)}{\sum_{i=1}^{n+1} h_i N_{i,k}(t)} = \sum_{i=1}^{n+1} B_i R_{i,k}(t) \quad (4.22)$$

em que os B_i 's são os vértices do polígono de controle no espaço tridimensional para a curva *B-spline* e

$$R_{i,k}(t) = \frac{h_i N_{i,k}(t)}{\sum_{i=1}^{n+1} h_i N_{i,k}(t)} \quad (4.23)$$

são as funções bases *B-spline* racionais. $h_i \geq 0$ para todos valores de i [4].

4.2.4 Superfícies *B-spline* Racionais

Um produto cartesiano de uma superfície *B-spline* no espaço de coordenadas homogêneas em quatro dimensões é dado por

$$Q(u, w) = \sum_{i=1}^{n+1} \sum_{j=1}^{m+1} B_{i,j}^h N_{i,k}(u) M_{j,l}(w) \quad (4.24)$$

onde os $B_{i,j}^h$'s são os vértices do polígono de controle homogêneo em quatro dimensão, $N_{i,k}(u)$ e $M_{j,l}(w)$ são as funções bases *B-spline* anteriormente dadas nas equações 4.17, 4.18 e 4.19, 4.20, respectivamente.

Projetando de volta para o espaço tridimensional através da divisão por meio de coordenadas homogêneas a superfície *B-spline* é dada por

$$Q(u, w) = \frac{\sum_{i=1}^{n+1} \sum_{j=1}^{m+1} h_{i,j} B_{i,j} N_{i,k}(u) M_{j,l}(w)}{\sum_{i=1}^{n+1} \sum_{j=1}^{m+1} h_{i,j} N_{i,k}(u) M_{j,l}(w)} = \sum_{i=1}^{n+1} \sum_{j=1}^{m+1} B_{i,j} S_{i,j}(u, w) \quad (4.25)$$

onde os $B_{i,j}$'s são vértices tridimensional de controle de rede e

$$S_{i,j}(u, w) = \frac{h_{i,j} N_{i,k}(u) M_{j,l}(w)}{\sum_{i1=1}^{n+1} \sum_{j1=1}^{m+1} h_{i1,j1} N_{i1,k}(u) M_{j1,l}(w)} = \frac{h_{i,j} N_{i,k}(u) M_{j,l}(w)}{Sum(u, w)} \quad (4.26)$$

são as funções bases da superfície *B-spline* racional bivariada. Onde

$$Sum(u, w) = \sum_{i1=1}^{n+1} \sum_{j1=1}^{m+1} h_{i1,j1} N_{i1,k}(u) M_{j1,l}(w) \quad (4.27)$$

É conveniente, embora não seja necessário, assumir que $h_{i,j} \geq 0$ para todo i, j [4].

4.3 Acoplamento do modelo Century 4.0 ao método *NURBS*

Para o acoplamento do modelo Century ao método de interpolação não-linear *NURBS*, antes de qualquer coisa, foi feito download da versão 4.0 do código fonte (*cent40_src.zip*) do modelo, disponível em sua *homepage* [49]. O arquivo compactado *cent40_src.zip* possui uma pasta que contém o código fonte dos utilitários FILE100, EVENT100, LIST100 e do próprio CENTURY. Os utilitários FILE100, EVENT100 e LIST100 estão escritos em linguagem C enquanto o CENTURY está escrito em linguagem FORTRAN.

A adaptação do algoritmo para promover tal acoplamento foi feita em linguagem C sobre plataforma Windows e com uso da interface gráfica do Microsoft Visual Studio 2008. Fica clara a divergência em fazer adaptação em linguagem C para um algoritmo implementado em linguagem FORTRAN. Assim, para contornar o problema sem ter que reescrever completamente o código do CENTURY, foi utilizado o compilador Intel Visual Fortran composer XE 2011. Um dos recursos deste compilador, a grosso modo, é permitir fazer um *link* entre um código escrito em linguagem C, desenvolvido na interface Microsoft Visual Studio 2008, com um código escrito em linguagem FORTRAN. Desta forma é possível percorrer todo o código escrito em linguagem FORTRAN bem como fazer qualquer alteração.

Basicamente, as adaptações tomaram a direção rumo ao CENTURY, já que os utilitários funcionam apenas como programas auxiliares, e dependem de forma indireta para o estado final de uma simulação. Para o estudo em caso, o utilitário LIST100 é o que possui maior ligação com o CENTURY. Este, assim como mencionado na subseção 3.2.3, é responsável por converter o arquivo com extensão *.bin*, retornado pelo CENTURY, para um arquivo de saída ASCII e permitir a escolha do período e da variável de saída desejada.

Nesta direção, para promover a integração entre o código fonte do modelo Century e o código desenvolvido em linguagem C, foram criados dois projetos. Os projetos são interligados entre si, sendo que o primeiro carrega todos os arquivos do CENTURY, ou seja todos os arquivos originais do modelo, com extensão *.f* e escritos em linguagem FORTRAN. Por outro lado, o segundo projeto é escrito em linguagem C e formado principalmente pelos arquivos *wincent.c* e *nurbs.c*, dentre outros. Além disso, foram introduzidas modificações para isolar trechos de entrada e saída de dados.

No segundo projeto foi implementado, no arquivo *wincent.c*, uma rotina para conceber a interface WinCent e construir janelas de visualização gráfica e espacialização contínua entre as unidades de simulação, baseadas nas simulações feitas pelo código fonte do modelo Century. A espacialização contínua e o acoplamento do modelo Century ao método de interpolação *NURBS* foi baseado na rotina escrita sob superfícies *B-spline* Não Uniforme presente no livro de Rogers (2001) [4] – *An Introduction to NURBS, With Historical Perspective* – e inserida como função no arquivo *wincent.c*.

As modificações no código fonte do modelo Century para isolar trechos de entrada foram basicamente criar um arquivo auxiliar com extensão *.gis*. Este arquivo contém informações sobre os arquivos de agendamento, aqui definido por unidade de simulação, e coordenadas geográficas (longitude e latitude). Assim, para realizar múltiplas simulações foi criado um *loop*³ que executa cada uma das unidades de simulação.

³*Loops* são comandos que fazem com que uma ou mais instruções sejam repetidas enquanto determinada condição não estiver satisfeita.

Tabela 4.10: Lista das variáveis de saída selecionadas

Variáveis de saída	Unidade de medida	Definição
<i>agcacc</i>	g/m^2 ao ano	Produção de C acumulado na parte aérea durante período de crescimento
<i>aglivc</i>	g/m^2	C na parte aérea viva para pastagem/cultura
<i>aglive(1)</i>	g/m^2	N na parte aérea viva para pastagem/cultura
<i>bgcacc</i>	g/m^2	Produção de C acumulado nas raízes para pastagem/cultura durante o período de crescimento
<i>bglivc</i>	g/m^2	C nas raízes vivas da pastagem/cultura
<i>bglive(1)</i>	g/m^2	N nas raízes vivas da pastagem/cultura
<i>cgrain</i>	g/m^2	Quantidade de C nos grãos para pastagem/cultura
<i>crootc</i>	g/m^2	C nas raízes grossas do sistema florestal
<i>crmvst</i>	g/m^2 ao mês	Quantidade de C removido através da palha durante a colheita de pastagem/cultura
<i>fbrchc</i>	g/m^2	C nos galhos finos do sistema florestal
<i>fcacc</i>	g/m^2 ao mês	Produção de C acumulado no sistema florestal no período de crescimento
<i>frootc</i>	g/m^2	C nas raízes finas do sistema florestal
<i>frstc</i>	g/m^2	Total de C nos componentes vivos do sistema florestal (<i>rleavc+frootc+fbrchc+rlwodc+crootc</i>)
<i>rleavc</i>	g/m^2	C no sistema florestal para o componente folha
<i>rlwodc</i>	g/m^2	C no sistema florestal para galhos grossos
<i>som1c(1)</i>	g/m^2	C na superfície para o compartimento ativo da MOS
<i>som2c</i>	g/m^2	C no compartimento lento da MOS
<i>som3c</i>	g/m^2	C no compartimento passivo da MOS
<i>somsc</i>	g/m^2	C total nos compartimentos da MOS (<i>som1c+soms2c+soms3c</i>)
<i>somtc</i>	g/m^2	C total do solo, incluindo os compartimentos estrutural e metabólico do abaixo da superfície
<i>stemp</i>	$^{\circ}C$	Temperatura média do solo
<i>tave</i>	$^{\circ}C$	Temperatura média do ar
<i>woodc</i>	g/m^2	Total de C nos componentes mortos do sistema florestal

Para isolar trechos de saída de dados foi definida uma estrutura (*typedef struct*) e selecionadas dentre todas as variáveis, instruídas no manual do usuário – *CENTURY Manual* – disponível em sua *homepage* [49], uma nova lista de variáveis: *agcacc*, *aglivc*, *aglive(1)*, *bgcacc*, *bglivc*, *bglive(1)*, *cgrain*, *crootc*, *crmvst*, *fbrchc*, *fcacc*, *frootc*, *frstc*, *rleavc*, *rlwodc*, *som1c(1)*, *som2c*, *som3c*, *somsc*, *somtc*, *stemp*, *tave* e *woodc*. Os detalhes bem como definição e unidade de medida para cada uma das variáveis escolhidas está descrito na Tabela 4.10.

A estrutura definida é capaz de armazenar, para todas as unidades de simulação, o período de simulação informado e os valores assumidos por estas. Desta forma, depois de executada a simulação, todas os valores assumidos pelas variáveis são alocadas na memória RAM e não mais em um arquivo salvo no disco rígido. Assim, é desnecessária a utilização do utilitário LIST100.

Devido a problemas computacionais, especificamente na dimensão da memória RAM, foi reduzida a lista original de variáveis de saída do modelo Century. Ou seja, para um computador com memória RAM de 2G, por exemplo, qualquer valor em *bits* armazenado na memória por estas variáveis superior a esta quantia será perdida. Desta forma, as variáveis selecionadas, foram julgadas serem mais importantes no que diz respeito às práticas de cultivo e sistemas florestais.

Contudo, a adição ou exclusão de determinada variável para se moldar a um estudo específico ou até mesmo conservar todas a variáveis, para manter a interface desenvolvida tão robusta quando a versão original modelo Century 4.0, é possível sem nenhuma dificuldade.

Resultados

As adaptações feitas ao modelo Century 4.0 não incluíram modificações nos programas auxiliares FIIE100, EVENT100 e LIST100. Ou seja, as adaptações se concentraram no programa CENTURY e no acoplamento do modelo a espacialização contínua através do método de interpolação não-linear *NURBS*.

Como o programa auxiliar LIST100 não possui dependência direta com o programa CENTURY, pois sua funcionalidade é de apenas informar qual será a variável de saída e converter arquivos de saída binária retornados pelo CENTURY, a estrutura criada foi capaz de armazenar as variáveis de saída mencionadas na seção 4.3 e alocar na memória RAM após a simulação. Dessa forma, para uma grade com N unidades de simulação, as variáveis de saída ficam locadas na memória RAM e não mais são necessários vários acessos ao disco rígido.

Em relação ao acoplamento do modelo ao método de interpolação não-linear *NURBS*, o código implementado no segundo projeto com base na rotina presente em [4] para superfícies *B-spline* Racionais Não Uniformes foi capaz de interpolar os valores assumidos pela variável selecionada e representar de forma contínua a dinâmica desta variável.

A compilação final dos projetos transformou o modelo Century em uma ferramenta unificada e tem como resultado, no que diz respeito a aspectos computacionais, o arquivo executável *wincen.exe* que pode ser utilizado em plataforma Windows.

O produto das adaptações feitas ao código fonte do modelo Century 4.0 mencionadas na seção 4.3, com base no projeto desenvolvido em linguagem C para o programa CENTURY e ao acoplamento do modelo a técnica *NURBS*, é aqui é mostrado como uma extensão da Figura 3.2 e é representada por uma nova estrutura computacional através da Figura 5.1.

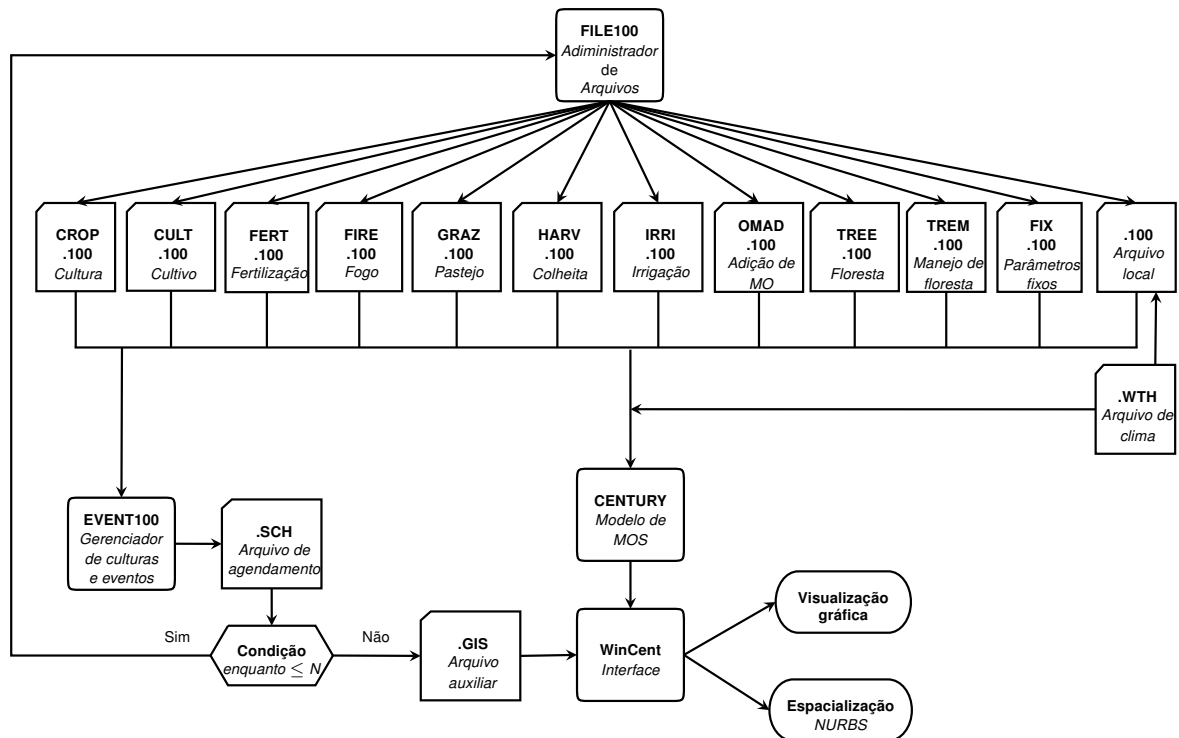


Figura 5.1: Relação entre programas e a interface WinCent (adaptado de [2])

A nova estrutura computacional do modelo Century mostrada na Figura 5.1 se assemelha a estrutura computacional anterior mostrada na Figura 3.2. Ou seja, o programa desenvolvido manteve o uso dos utilitários FILE100 e EVENT100 para preparação dos arquivos de extensão *.100* e os arquivos de agendamento *.sch*, respectivamente. Nesta nova estrutura foi somada um arquivo auxiliar de extensão *.gis*, a interface WinCent e as saídas de visualização gráfica e espacialização contínua.

O arquivo de extensão *.gis* é responsável por armazenar informações sobre os arquivos de agendamento (nome sem extensão *.sch*) e coordenadas geográficas (longitude e latitude) para cada unidade de simulação, quando executado o modelo Century sobre uma região com N unidades de simulação.

A interface WinCent se encarrega tanto de executar o modelo Century baseado nas unidades de simulação dispostas no arquivo auxiliar *.gis* quanto de acionar as janelas de visualização gráfica e de espacialização contínua feita pelo *NURBS*.

Em Resumo, os passos para realizar múltiplas simulações através da interface WinCent é baseado na Figura 5.1 e são descritos em:

- I. definir o número N de unidades de simulação;
- II. usar o programa FILE100 para atualizar valores ou criar novas opções para qualquer um dos doze arquivos *.100* em cada uma das unidades de simulação;

- III. usar o programa EVENT100 para estabelecer um período de simulação e agendar eventos que venham a ocorrer durante a simulação em cada uma das unidades de simulação;
- IV. preparar o arquivo auxiliar de extensão *.gis*;
- V. usar a interface WinCent para realizar as múltiplas simulações e analisar resultados através das janelas de visualização gráfica e espacialização contínua pelo *NURBS*;

A interface desenvolvida é composta de uma janela principal – *WinCent control dialog* (Figura 5.2) – e das janelas auxiliares *WinCent Graph*, *Graph control dialog* e *WinCent GIS Graph* respectivamente mostradas nas Figuras 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5 onde indica-se por itens enumerados a definição de cada ícone presente na janela. Nesta direção, será esclarecido o manuseio e funcionamento de cada janela em sua devida ordem de apresentação.

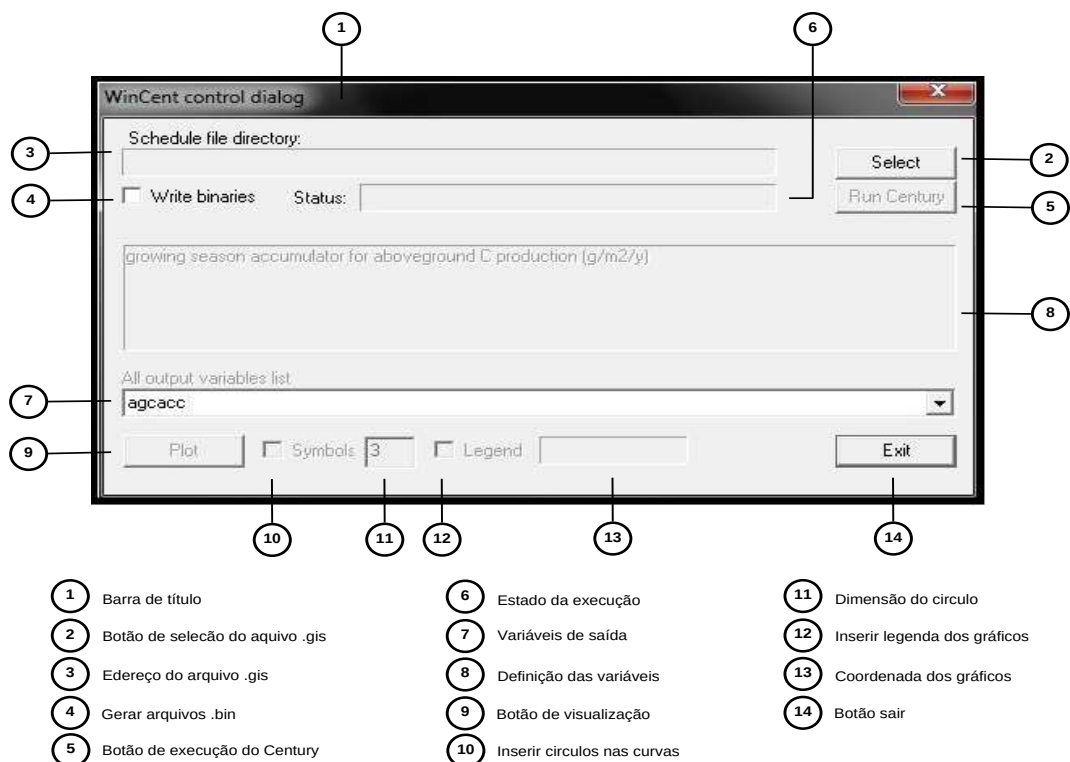


Figura 5.2: Interface WinCent

O botão *select* na janela *WinCent control dialog* permite ao usuário percorrer entre diretórios e escolher em qual se encontra o arquivo *.gis*, sendo o endereço deste mostrado em *Schedule file directory*. É importante enfatizar que o executável *WinCent.exe* esteja no mesmo diretório que a pasta que contém o arquivo *.gis*, os arquivos de clima (se utilizados),

os arquivos de agendamento com seus respectivos arquivos de sítio e os demais arquivos *.100* utilizados na elaboração dos arquivos de sítio.

Assim como na versão 4.0 do modelo Century, o programa desenvolvido manteve a geração de arquivos *.bin*, desde que seja selecionada a opção *Write binaries*. As simulações não mais são feitas uma a uma, ou seja, o botão *Run Century* é o indicado para realizar múltiplas simulações, sendo o estado destas apresentado em *Status*.

As variáveis de saídas selecionadas estão dispostas em *All output variables* e sua definição é mostrada imediatamente após sua escolha no oitavo item da janela *WinCent control dialog*. Para cada unidade de simulação, a visualização gráfica por meio de gráficos de linha e a espacialização contínua entre as unidades de simulação desta variável é responsabilidade do botão *Plot*. É ainda possível inserir (*Symbols*) e dimensionar (11ª opção) círculos ao longo dos gráficos de linha objetivando auxiliar o entendimento dos mesmos. Portanto, não é necessário fazer uso do utilitário LIST100 para converter o arquivo *.bin* ou a utilização de um software alternativo para visualização gráfica.

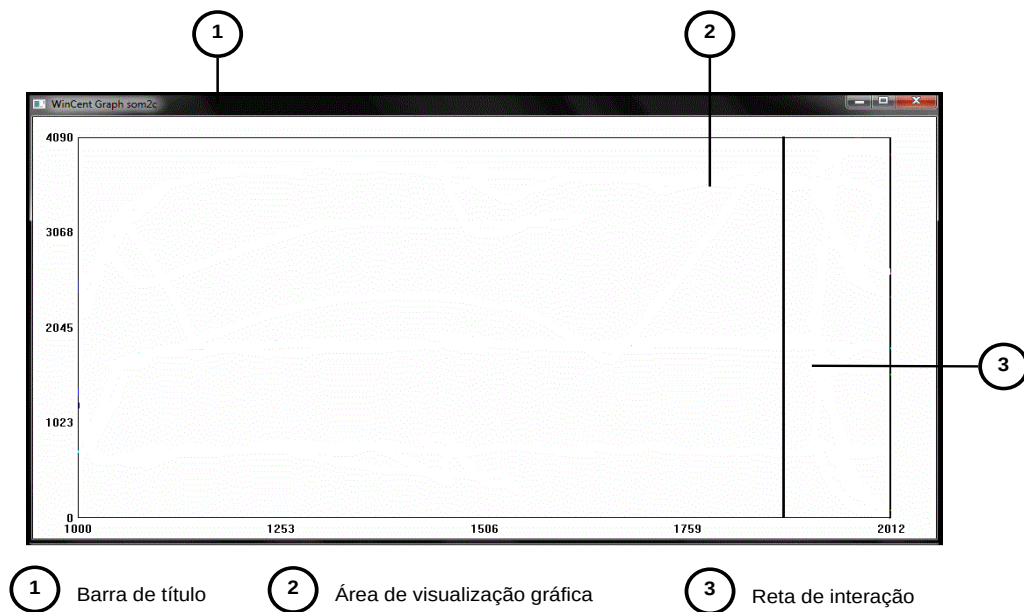


Figura 5.3: Janela de visualização gráfica para as unidades de simulação

Imediatamente após acionar o botão *Plot* surgem as janelas *WinCent Graph* (Figura 5.3) e *WinCent GIS Graph*. A janela *WinCent Graph*, além de ter o compromisso de mostrar através de gráficos de linha a variável informada em *All output variables list*, é encarregada de conter uma reta vertical que ao mover-se mantém interação com a janela *WinCent GIS Graph*. Especificamente, a reta vertical percorre qualquer instante t entre o tempo inicial

e final definido na simulação e tem como resposta na janela *WinCent GIS Graph* a forma como se comportou a dinâmica da variável no instante t .

A ilustração no interior da janela *WinCent GIS Graph* (Figura 5.4) exhibe o resultado em *pixels*¹ da adaptação feita ao modelo Century 4.0 pelo método de interpolação *NURBS* para determinada região. O desenho da região estudada e a localização das unidades de simulação (representadas por pequenos círculos) são baseadas nas coordenadas geográficas informadas no arquivo *.gis*. Assim, para uma região específica e uma quantidade definida de unidades de simulação distribuídas no interior desta região é possível estudar o comportamento em toda a região de forma espacialmente contínua através do método de interpolação *NURBS*.

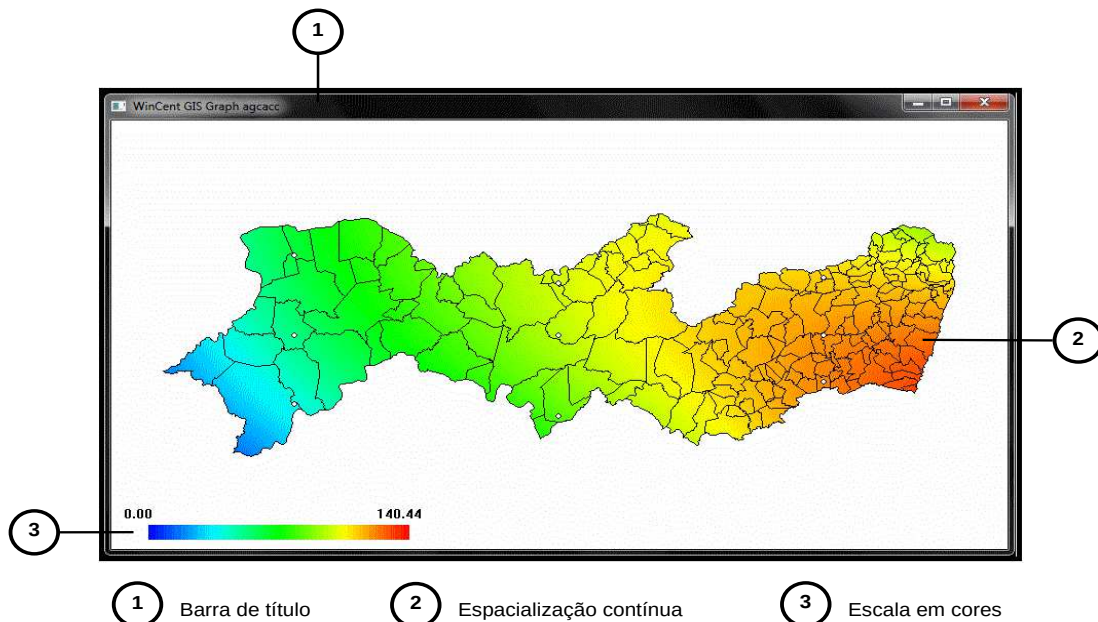


Figura 5.4: Janela de espacialização contínua pelo *NURBS*

Na janela *Wincent GIS Graph* ainda é mostrado em uma escala de cores a intensidade com que se apresenta a variável de saída selecionada em *Plot*. A escala de cores varre de forma contínua todas as combinações possíveis entre as cores primárias e define o azul como a cor de menor intensidade, o verde como intensidade intermediária e o vermelho como a cor de maior intensidade.

A janela *WinCent control dialog* (Figura 5.5) é acionada quando pressionado o botão direito do *mouse* sobre qualquer parte interior a janela *WinCent Graph*. A janela *WinCent*

¹pi.xel (cs) sm (ingl) 1 Telev Bloco elementar ou célula para construção de imagens na tela. 2 Inform Menor unidade ou ponto de um monitor de vídeo cuja cor ou brilho podem ser controlados; elemento de imagem [60].

control dialog é constituída pela depressão retangular que mostra qual variável está sendo exibida na janela *WinCent Graph* e dos campos de dados e legenda.

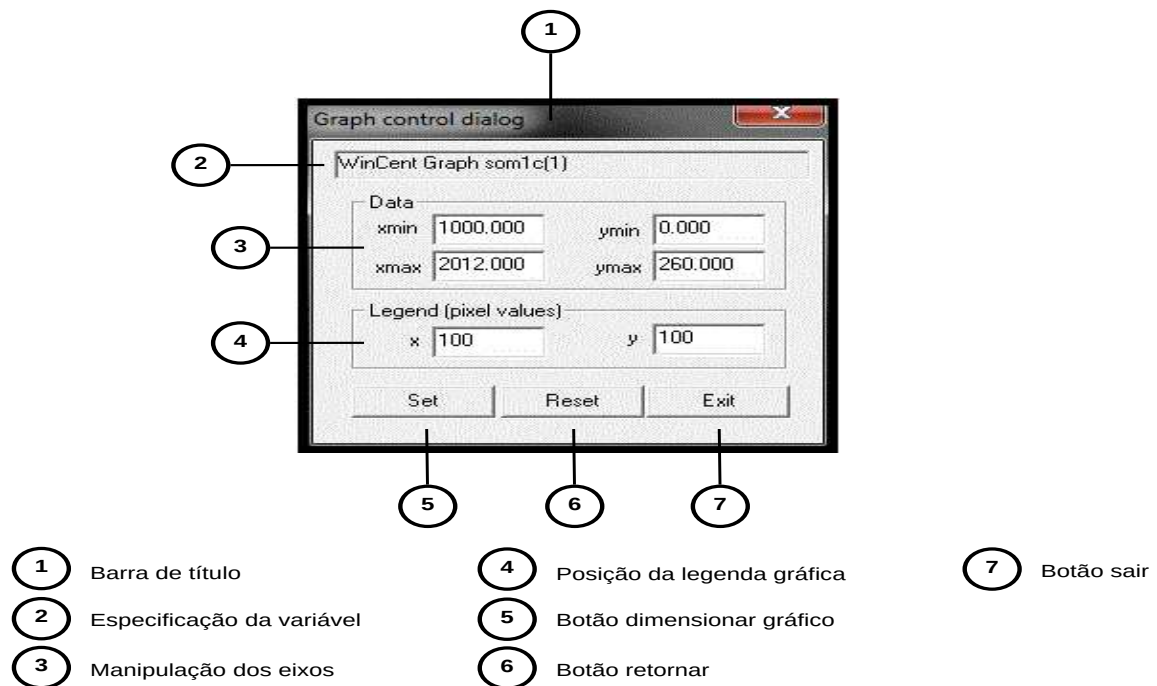


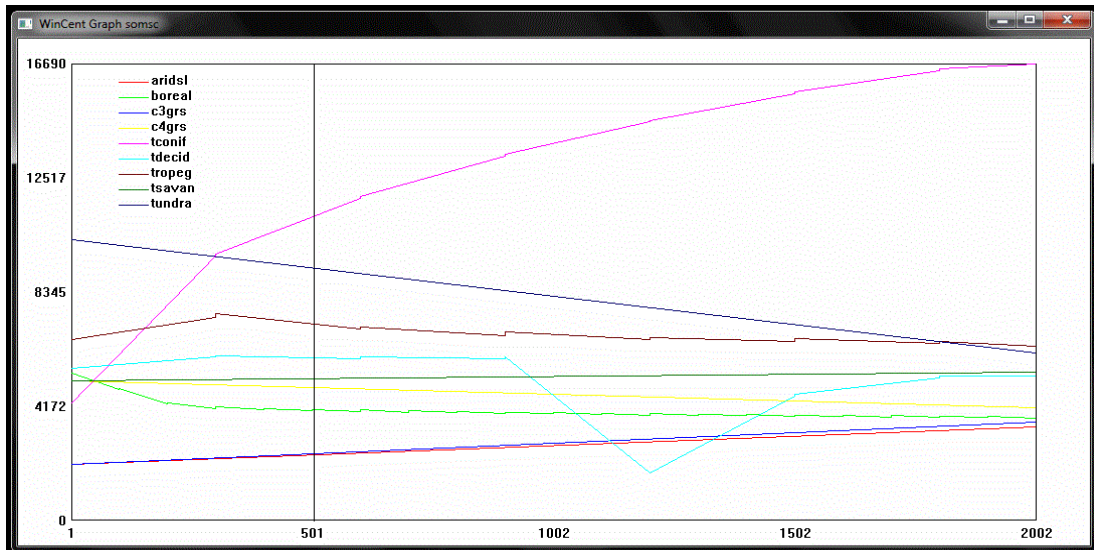
Figura 5.5: Janela de controle de visualização gráfica

O campo de dados por sua vez é formado pelo período mínimo ($xmin$) e máximo ($xmax$) definido na simulação e pelos valores mínimo ($ymin$) e máximo ($ymax$) assumido pela variável de saída. Para quaisquer intervalos intermediário entre o período mínimo e máximo ou entre os valores mínimo e máximo é feito um *zoom*² sobre a área de visualização gráfica na janela *WinCent Graph*, depois de pressionado o botão *Set*. O botão *Reset* retorna a área de visualização gráfica inicial. Por outro lado, o campo de legenda se torna ativo quando selecionada a opção *Legend* na janela *WinCent control dialog* e tem como obrigação posicionar a legenda na área de visualização gráfica de acordo com as informações dada para as coordenadas x e y .

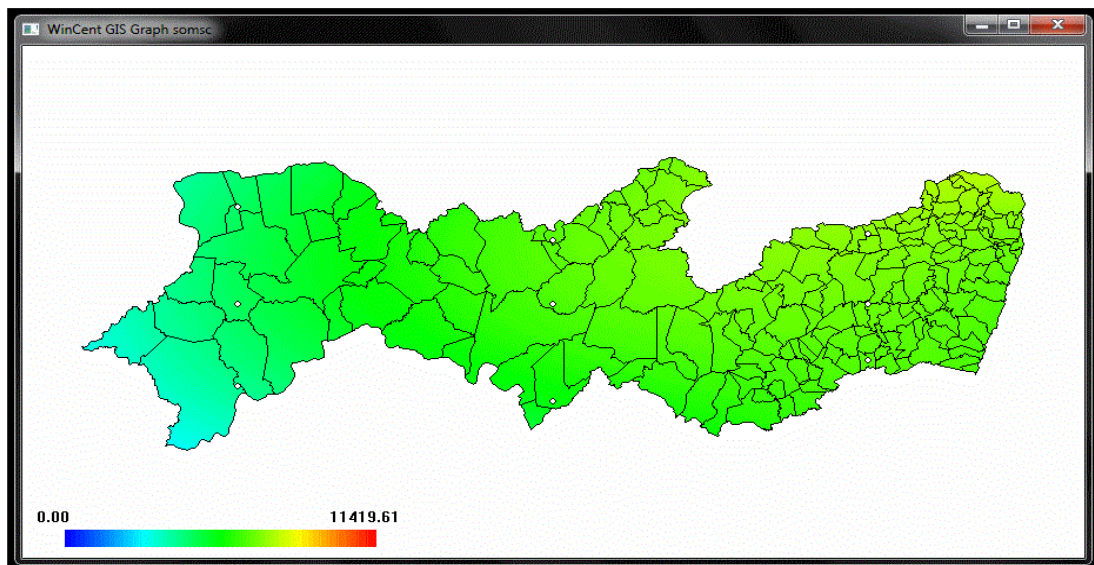
Com base nos dados referidos na seção 4.1, ou seja, nas nove unidades de simulação tomadas para mostrar a veracidade das adaptações feitas na versão 4.0 do modelo Century, foi considerado a região que compreende o estado de pernambuco e feitas as múltiplas simulações através da interface WinCent, fixando como variável de saída a quantidade total de C presente nos compartimentos ativo, lento e passivo da MOS (*somsc*).

²zum sm (ingl zoom) 1 Conjunto de lentes que se ajustam para oferecer vários graus de grandeza, sem perda de foco. 2 O efeito de afastamento ou aproximação produzido por esse conjunto de lentes, no cinema ou na televisão. Sin: zoom [60].

Na Figura 5.6 é mostrada a interação entre as janelas *WinCent graph* e *WinCent GIS graph* bem como o comportamento através de gráficos de linhas para cada uma das nove unidades de simulação (ver 5.6(a)) e a interpolação pelo *NURBS* no período $t = 501$ (ver 5.6(b)), para a quantidade total de C nos compartimentos ativo, lento e passivo da MOS.



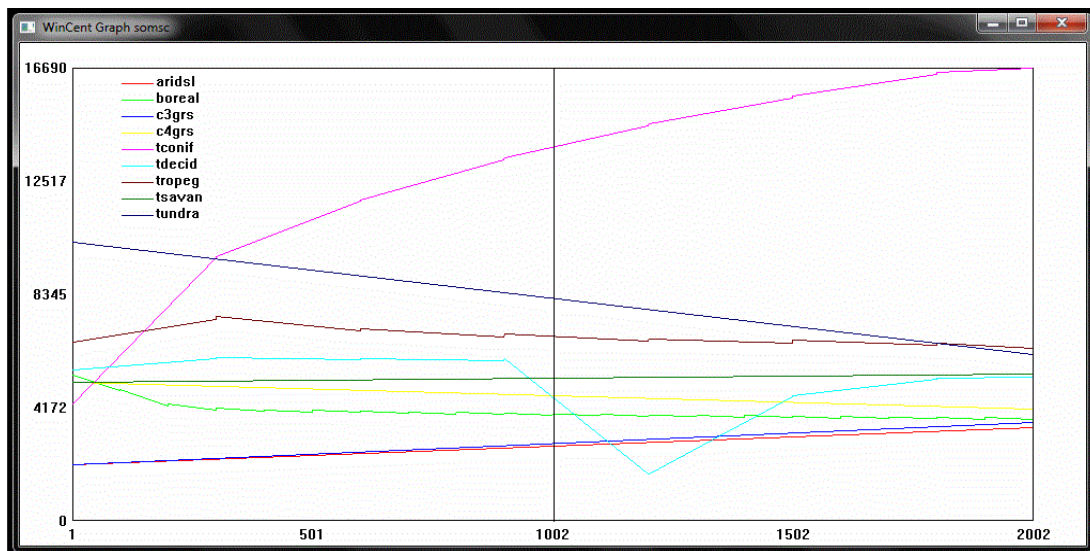
(a) Comportamento da variável *somsc* para cada unidade de simulação e a reta de interação no período $t = 501$



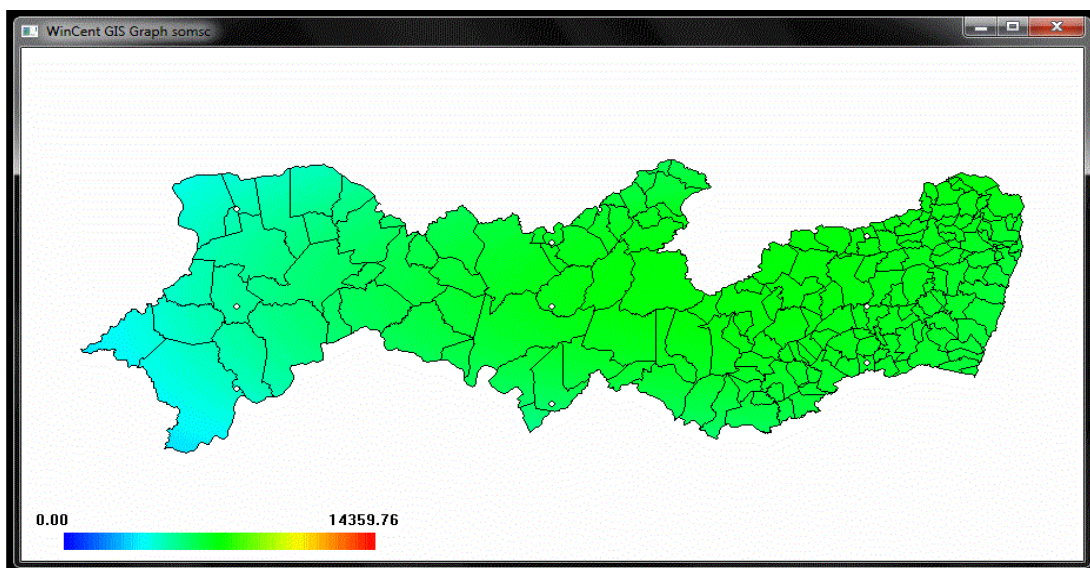
(b) Espacialização contínua pelo *NURBS* para variável *somsc* no período $t = 501$

Figura 5.6: Interação entre as janelas WinCent Graph e WinCent GIS Graph para o período de simulação $t = 501$

Já na Figura 5.7 é mostrada a interação entre as janelas *WinCent graph* e *WinCent GIS graph* bem como o comportamento através de gráficos de linhas para cada uma das nove unidades de simulação (ver 5.7(a)) e a interpolação pelo *NURBS* no período $t = 501$ (ver 5.7(b)), para a quantidade total de C nos compartimentos ativo, lento e passivo da MOS.



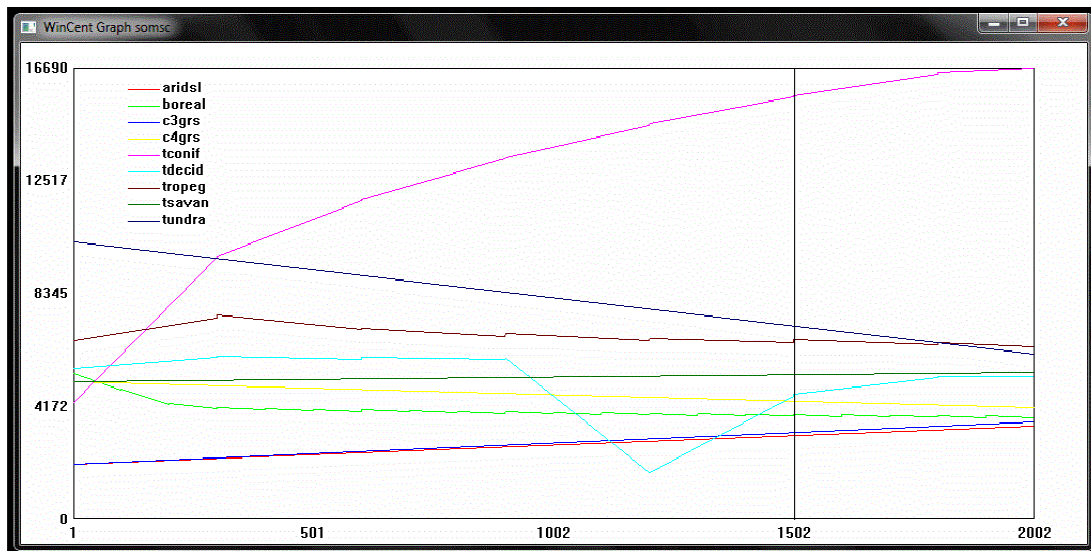
(a) Comportamento da variável *somsc* para cada unidade de simulação e a reta de interação no período $t = 1002$



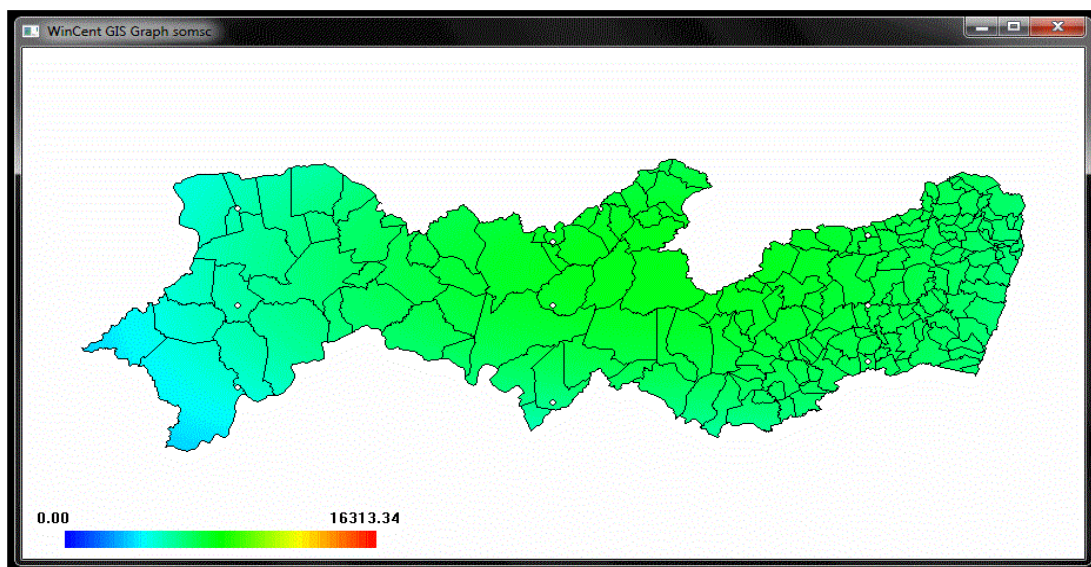
(b) Espacialização contínua pelo *NURBS* para variável *somsc* no período $t = 1002$

Figura 5.7: Interação entre as janelas WinCent Graph e WinCent GIS Graph para o período de simulação $t = 1002$

Vê-se também, na Figura 5.8 a interação entre as janelas *WinCent graph* e *WinCent GIS graph* bem como o comportamento através de gráficos de linhas para cada uma das nove unidades de simulação (ver 5.8(a)) e a interpolação pelo *NURBS* no período $t = 501$ (ver 5.8(b)), para a quantidade total de C nos compartimentos ativo, lento e passivo da MOS.



(a) Comportamento da variável *somsc* para cada unidade de simulação e a reta de interação no período $t = 1502$



(b) Espacialização contínua pelo *NURBS* para variável *somsc* no período $t = 1502$

Figura 5.8: Interação entre as janelas *WinCent Graph* e *WinCent GIS Graph* para o período de simulação $t = 1502$

Considerações finais

A integração entre o código fonte do modelo Century 4.0 de simulação de dinâmica da MOS e o código desenvolvido em linguagem C foi bem sucedida. As modificações em trechos do código para entrada e saída de dados contribuíram na realização de múltiplas simulações e consequentemente ao acoplamento do modelo ao método de interpolação não-linear *NURBS* (*B-spline* Racional Não Uniforme) bem como o desenvolvimento da interface WinCent e da janela de visualização gráfica. Portanto, a interface desenvolvida se tornou uma ferramenta unificada para realizar múltiplas simulações, fundamentada na versão 4.0 do modelo Century, e capaz de distribuir de forma espacialmente contínua a dinâmica entre as unidades de simulação definidas para região de estudo adotada.

Para comprovar a robustez da interface desenvolvida, esta deve ser testada sobre diversas regiões e uma quantidade significativa de vezes, afim de mostrar que realmente possui arquitetura com base sólida. O produto obtido nesta dissertação trata-se de um trabalho inicial. Contudo, nada impede que, por meio da interface desenvolvida, sejam feitas projeções de cenários futuros de estoque de C no solo em todo estado de Pernambuco, por exemplo. Por outro lado, trabalhos adicionais, baseados nas características fenomenológicas, formulação matemática e aspectos computacionais podem ser aprofundados.

A criação de um *site* é um passo que merece ser considerado para permitir aos usuários do modelo Century o acesso a interface Wincent. Neste sentido, poderiam ser criado debates, talvez por meio de *chat*, para levantar questionamentos, tirar dúvidas ou realizar trabalhos com usuários do modelo de qualquer parte do mundo.

Referências

- [1] PARTON, W. J. et al. Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 7, n. 4, p. 785–809, 1993.
- [2] METHERALL, A. K. et al. Century Soil Organic Matter Model Environment Technical Documentation, Agroecosystem Version 4.0. *Great Plains System Research Unit Technical Report*, USDA-ARS, Fort Collins, Colorado State University, n. 4, 1993.
- [3] MINETTO, C. de F. *Um Estudo sobre Curvas NURBS*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRS), Programa de Pós-Graduação em Matemática Aplicada, Porto Alegre - RS, 2003.
- [4] ROGERS, D. *An introduction to NURBS: with historical perspective*. [S.l.]: Morgan Kaufmann Publishers, 2001. (The Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics and Geometric Modeling Series). ISBN 9781558606692.
- [5] WATSON, R. T. et al. *Land use, land-use change, and forestry : a special report of the IPCC*. [S.l.]: Cambridge University Press, Cambridge, 2000. 377 p.
- [6] LEITE, L. F. C.; MENDONÇA, E. S. Perspectivas e limitações da modelagem da dinâmica da matéria orgânica dos solos tropicais. *Tópicos em Ciência do Solo*, v. 5, p. 181–218, 2007.
- [7] PARTON, W. J. et al. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. *Soil Science Society of America Journal*, Soil Sci Soc America, v. 51, n. 5, p. 1173–1179, 1987.
- [8] PARTON, W. J.; STEWART, J. W. B.; COLE, C. V. Dynamics of C, N, P and S in grassland soils: a model. *Biogeochemistry*, Springer, v. 5, n. 1, p. 109–131, 1988.
- [9] COLEMAN, K.; JENKINSON, D. S. RothC-26.3: a model for the turnover of carbon in soil. In: _____. *Evaluation of soil organic matter models using existing longterm datasets*. [S.l.]: Springer-Verlag, 1996. Vol. 38, n. April, p. 237–246.
- [10] PARTON, W.; WOOMER, P.; MARTIN, A. Modeling soil organic matter dynamics and plant productivity in tropical ecosystems. In: _____. *The biological management of tropical soil fertility*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1994. p. 171–188.

- [11] PARTON, W. J. et al. Impact of climate change on grassland production and soil carbon worldwide. *Global Change Biology*, v. 1, n. 1, p. 13–22, 1995.
- [12] PAUSTIAN, R.; J, P. W. P. Modeling soil organic matter in organic-amended and nitrogen-fertilized long-term plots. *Soil Science Society American Journal*, v. 56, p. 476–488, 1992.
- [13] BRADY, N. *Natureza e Propriedades dos Solos / Nyle C. Brady “The nature and properties of soils”*. Trad. Antônio B. Neiva Figueiredo Filho. 7. ed. Rio de Janeiro: Livraria Freitas Bastos, 1989. 3–39 p.
- [14] FOLLETT, R. F. Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soils. *Soil Tillage Research*, v. 61, p. 77–92, 2001.
- [15] FERREIRA, J. A. et al. Caracterização espectroscópica da matéria orgânica do solo 24. *Society*, v. 7, p. 1–3, 2004.
- [16] LEITE, L. F. C.; MENDONÇA, E. S. Modelagem da dinâmica da matéria orgânica em ambiente tropical. *Embrapa – Meio-Norte*, Teresina - PI, n. 118, p. 40, 2005.
- [17] MOLINA, J. A. E. et al. NCSOIL, a model of nitrogen and carbon transformations in soil: description, calibration, and behavior. *Soil Science Society of America Journal*, Soil Science Society of America, v. 47, n. 1, p. 85–91, 1983.
- [18] WILLIAMS, J. R.; RENARD, K. G. Assesment of soil erosion and crop productivity with process models (EPIC). In: _____. *Soil Erosion and Crop Productivity*. [S.l.]: American Society of Agronomy, 1985. p. 68–102.
- [19] RITCHIE, J. T.; GODWIN, D. C.; OTTER-NACKE, S. *CERES-Wheat: A Simulation Model of Wheat Growth and Development*. [S.l.]: Department of Crop and Soil Science, Michigan State University, 1986.
- [20] SELIGMAN, N. G.; KEULEN, H. V. PAPRAN: a simulation model of annual pasture production limited by rainfall and nitrogen. In: _____. *Simulation of Nitrogen Behavior of SoilPlant Systems*. [S.l.]: PUDOC, 1981. p. 192–221.
- [21] JOHNSON, H. et al. Simulated nitrogen dynamics and losses in a layered agricultural soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Elsevier, v. 18, n. 4, p. 333–356, 1987.
- [22] VEEN, J. A. V.; PAUL, E. A. Organic carbon dynamics in grasslands soils. 1. background information and computer simulation. *Canadian Journal of Soil Science*, v. 61, p. 185–201, 1981.
- [23] JENKINSON, D. S.; RAYNER, J. H. The turnover of soil organic matter in some of the rothamsted classical experiments. *Soil Science*, v. 123, n. 5, p. 298–305, 1977.
- [24] HANSEN, S. et al. DAISY: Soil plant atmosphere system model. *NPO Report*, The National Agency for Environmental Protection, n. A 10, p. 272, 1990.
- [25] VERBERNE, E. L. J. et al. Modelling organic matter dynamics in different soils. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, v. 38, n. 3A, p. 221–238, 1990.

- [26] BRADBURY, N. J. et al. Modelling the fate of nitrogen in crop and soil in the years following application of ^{15}N -labelled fertilizer to winter wheat. *The Journal of Agricultural Science*, v. 121, n. 03, p. 363–379, 1993.
- [27] FRANKO, U.; OELSCHLAGEL, B.; SCHENK, S. Simulation of temperature, water and nitrogen dynamics using the model CANDY. *Ecological Modelling*, v. 81, n. 1-3, p. 213–222, 1995.
- [28] LI, C.; FROLKING, S.; HARRISS, R. Modeling carbon biogeochemistry in agricultural soils. *Global Biogeochemical Cycles*, AGU AMERICAN GEOPHYSICAL UNION, v. 8, n. 3, p. 237–254, 1994.
- [29] BARROS, I. D.; WILLIAMS, J. R.; GAISER, T. Modeling soil nutrient limitations to crop production in semiarid NE of Brazil with a modified EPIC version I. changes in the source code of the model. *Ecological Modelling*, v. 178, n. 3-4, p. 441–456, 2004.
- [30] BARROS, I. D.; WILLIAMS, J. R.; GAISER, T. Modeling soil nutrient limitations to crop production in semiarid NE of Brazil with a modified EPIC version - II: Field test of the model. *Ecological Modelling*, v. 181, n. 4, p. 567–580, 2005.
- [31] PEINETTI, H. R. et al. Simulating plant productivity under different organic fertilization practices in a maize/native pasture rotation system in semi-arid NE Brazil. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 62, n. 2, p. 204–222, 2008.
- [32] SINCLAIR, T. Criteria for publishing papers on crop modeling. *Field Crops Research*, v. 68, n. 3, p. 165–172, 2000.
- [33] SMITH, P. et al. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. *Geoderma*, v. 81, n. 1-2, p. 153–225, 1997.
- [34] CERRI, C. E. P. et al. Modeling soil carbon from forest and pasture ecosystems of Amazon, Brazil. *Soil Science Society American Journal*, v. 67, n. 1-2, p. 1879–1887, 2003.
- [35] ALTHOFF, T. D. et al. Calibração do Century para simulação da produtividade do milho em um Neossolo Regolítico no semiárido. p. 241, 2009. Anais do Congresso Brasileiro de Ciência do solo, Fortaleza-CE.
- [36] MARTINS, J. C. R. et al. Validação do Century para simulação da produtividade do milho após adubação orgânica em um Neossolo Regolítico no semiárido. p. 175, 2009. Anais do Congresso Brasileiro de Ciência do solo, Fortaleza-CE.
- [37] SANFORD, R. L. et al. Hurricane effects on soil organic matter dynamics and forest production in the Luquillo Experimental Forest, Puerto rico: results of simulation modeling. *Biotropica*, The Association for Tropical Biology and Conservation, v. 23, n. 4, p. 364–372, 1991.
- [38] BURKE, I. C. et al. Regional modeling of grassland biogeochemistry using GIS. *Landscape Ecology*, v. 4, n. 1, p. 45–54, 1990.
- [39] NØRGAARD, A. *Spatial modelling of soil organic carbon by linking Century and GIS*. Dissertação (Mestrado) — Institute of Geography, University of Copenhagen, Copenhagen - Dinamarca, 2004.

- [40] TORNQUIST, C. G. et al. Spatially explicit simulations of soil C dynamics in Southern Brazil: Integrating century and GIS with i_Century. *Geoderma*, Elsevier B.V., v. 150, n. 3-4, p. 404–414, 2009.
- [41] PARTON, W. J. et al. Century Users's Manual. *Natural Resource Ecology Laboratory, Colorado State University, USDA-ARS, Fort Collins, Colorado State University*, 1992.
- [42] LEITE, L. F. C.; MENDONÇA, E. S.; MACHADO, P. L. O. A. Simulação pelo modelo century da dinâmica da matéria orgânica de um Argissolo sob adubação mineral e orgânica. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 28, n. 2, p. 347–358, 2004.
- [43] WEBER, M. A. *PARAMETRIZAÇÃO E VALIDAÇÃO DO CICLO DO CARBONO E DO NITROGÊNIO DO MODELO CENTURY 4.5 COM EXPERIMENTOS DE LONGA DURAÇÃO EM UM ARGISSOLO DO SUL DO BRASIL*. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Dezembro 2010.
- [44] PARTON, B. et al. Century Model Reference and User's Guide. *Natural Resource Ecology Laboratory, Colorado State University, USDA-ARS, Fort Collins, Colorado State University*, Dec 2000.
- [45] PARTON, B. et al. Century tutorial, Supplement to Century User's Manual. *Great Plains System Research Unit Technical Report, USDA-ARS, Fort Collins, Colorado State University*, 2001.
- [46] JENKINSON, D. S. The turnover of organic carbon and nitrogen in soil. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London - Series B: Biological Sciences*, v. 329, p. 361–368, 1990.
- [47] LEITE, L. F. C.; MENDONÇA, E. D. S. Modelo century de dinâmica da matéria orgânica do solo: equações e pressupostos. *Ciência Rural*, SciELO Brasil, v. 33, n. 4, p. 679–686, 2003.
- [48] BOLKER, B. M.; PACALA, S. W.; PARTON, W. J. Linear analysis of soil decomposition: Insights from the century model. *Ecological Applications*, Eco Soc America, v. 8, n. 2, p. 425–439, 1998.
- [49] NREL. *Natural Resource Ecology Laboratory*. 2000. Acessado em: 18/09/2011. Disponível em: <<http://www.nrel.colostate.edu/projects/century/>>.
- [50] ANDERSSON, F. *Bezier and B-spline Technology*. Dissertação (Mestrado) — Umea University, 2003.
- [51] SALOMON, D. *Curves and Surfaces for Computer Graphics*. [S.l.]: Springer, 2006. 176-248 p.
- [52] SCHOENBERG, I. J. Contributions to the problem of approximation of equidistant data by analytic functions. *Quarterly of Applied Mathematics*, Birkhauser, v. 4, n. 2, p. 45–99, 112–141, 1946.
- [53] BOOR, C. de. *A Practical Guide to Splines*. New York: Springer-Verlag, 1978.

- [54] ZHENG, J. c^1 NURBS representations of g^1 composite rational Bézier curves. *Computing*, Springer Wien, v. 86, p. 257–268, 2009.
- [55] CHEN, X. et al. Computing the minimum distance between a point and a NURBS curve. *Computer-Aided Design*, Elsevier Ltd, v. 40, n. 10-11, p. 1051–1054, 2008.
- [56] SACRAMENTO, V. P. *OTIMIZAÇÃO DO MÉTODO ÁREA VELOCIDADE PARA ESTIMAÇÃO DE VAZÃO FLUVIAL*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada, Recife-PE, 2010.
- [57] SACRAMENTO, V. P. *APLICAÇÃO DE NURBS EM MMCs, COM APALPADOR TOUCH TRIGGER, PARA ESCANEAMENTO DE SUPERFÍCIES DE FORMAS LIVRES E GEOMETRIAS COMPLEXAS*. Dissertação (Doutorado) — Universidade Federal da Paraíba, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, João Pessoa-Paraíba, 2011.
- [58] LANDON, R. L.; HAST, M. W.; PIAZZA, S. J. Robust contact modeling using trimmed NURBS surfaces for dynamic simulations of articular contact. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Elsevier B.V., v. 198, n. 30-32, p. 2339–2346, 2009.
- [59] JÚNIOR, C. H. S.; VIEIRA, F. L. J.; PAZ, L. B. Sobre a classe de diferenciabilidade de quocientes de polinômios homogêneos. *Cadernos de Cultura e Ciência*, v. 3, n. 1, p. 1–7, 2008.
- [60] MICHAELIS. *Moderno dicionário da língua portuguesa*. 2009. Acessado em: 01/02/2012. Disponível em: <<http://www.http://michaelis.uol.com.br/>>.