

Antonio Samuel Alves da Silva

**Ferramentas para modelagem e interpolação de dados
ambientais em escala regional**

Recife – PE

Julho/2015



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

Ferramentas para modelagem e interpolação de dados ambientais em escala regional

Tese julgada adequada para obtenção do título de Doutor em Biometria e Estatística Aplicada, defendida e aprovada por unanimidade em 01/07/2015 pela comissão examinadora

Área de concentração: Biometria e Estatística Aplicada

Orientador: Dr. Borko Stosic
Coorientador: Dr. Rômulo Simões Cezar Menezes

Recife – PE

Julho/2015

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

Ferramentas para modelagem e interpolação de dados ambientais em escala regional

Antonio Samuel Alves da Silva

Tese julgada adequada para obtenção do título de Doutor em Biometria e Estatística Aplicada, defendida e aprovada por unanimidade em 01/07/2015 pela comissão examinadora

Orientador:

Dr. Borko Stosic
Orientador

Banca examinadora:

Prof. Dr. Rômulo Simões Cezar Menezes
Universidade Federal de Pernambuco
(DEN-UFPE)

Prof. Dra. Karina Guedes Correia
Centro Universitário de João Pessoa
(UNIPÊ-Área de Saúde)

Dr. André Luiz de Carvalho
Universidade Federal de Alagoas (CECA-UFAL)

Prof. Dra. Tatijana Stosic
Universidade Federal Rural de Pernambuco
(DEINFO-UFRPE)

Dedico aos meus pais.

Agradecimentos

À Deus.

Aos professores Borko Stosic e Rômulo Simões Cezar Menezes, pela oportunidade e por toda a aprendizagem adquirida.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco e, em particular, ao Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística aplicada, seu corpo docente, discente e técnicos administrativos, pelo ambiente acolhedor e de aprendizagem.

Ao Departamento de Energia Nuclear pelo acolhimento de seu corpo docente e discente.

Ao Instituto de Tecnologia de Pernambuco por disponibilizar gentilmente os dados de precipitação usados neste trabalho.

À Colorado State University por ceder o código fonte do modelo Century 4.5.

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco pelo apoio financeiro.

Aos meus pais, pelos ensinamentos de vida e por me encorajar na realização dos meus objetivos.

A todos os familiares, em especial aos meus irmãos, por acreditarem em minha jornada acadêmica e pela ajuda prestada.

À minha namorada, Lucélia Katia, que acompanhou, e pacientemente me fortaleceu em todos os momentos desta jornada.

A todas as pessoas que, ao longo de minha vida, se tornaram grandes amigos.

Obrigado.

*De que o mel é doce é coisa
que eu me nego afirmar, mas
que parece doce eu
afirmo plenamente.*

Raul Santos Seixas

Resumo

Ao longo dos anos uma grande variedade de modelos matemáticos e computacionais tem sido desenvolvidos para simular a dinâmica da matéria orgânica do solo. Dentre estes, o modelo Century 4.5, tem ganhado destaque, devido à sua capacidade de simular a dinâmica do carbono, nitrogênio, fósforo e enxofre no sistema solo-planta para diversos tipos de agroecossistemas. Computacionalmente o modelo funciona como aplicativo em plataforma Windows para ambiente DOS. Porém, esta arquitetura computacional impossibilita a execução de múltiplas simulações e a avaliação da dinâmica espacialmente explícita destas, limitando assim estudos em larga escala. Um outro fator que merece atenção especial no modelo diz respeito ao acervo de variáveis de entrada exigidas, como séries históricas de precipitação mensal. A precipitação não é fundamental apenas para o modelo Century mas é também subsídio de grande importância na modelagem hidrológica e na implementação de políticas agrícolas. Contudo, esta variável, particularmente no estado de Pernambuco, apresenta limitações referentes a disponibilidade de dados. Atualmente a Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) dispõe de 229 estações pluviométricas para o estado, o qual possui extensão territorial de $98312km^2$. Neste sentido, foram desenvolvidas ferramentas para suprir a deficiência apresentada pelo modelo Century, quanto a execução de estudos em larga escala, e a escassez de dados de precipitação inerente ao estado de Pernambuco. As ferramentas desenvolvidas representam programas implementados em linguagem de programação C, com interfaces gráficas construídas utilizando Application Programming Interface (API) para o Windows, denominadas WinCent e WinPreci. A interface WinCent foi desenvolvida para a execução de múltiplas simulações e a espacialização através dos métodos de interpolação *Inverse Distance Weighting* (IDW) e *Kernel Smoothing*. A interface WinCent foi testada utilizando-se os dados obtidos após a instalação do modelo Century, sendo estes georreferenciados aleatoriamente sobre o estado de Pernambuco e avaliado o comportamento em larga escala para quantidade de carbono no solo (*somsc*) por meio das técnicas de interpolação IDW e *Kernel Smoothing*. A interface WinPreci foi concebida para acesso (resolução de aproximadamente $1km^2$) e visualização espacialmente explícita da precipitação (1950-2012), obtidas a partir da comparação de diferentes técnicas de interpolação espacial, tomando como base de dados informações de precipitação mensal cedidas pelo Instituto de Tecnologia de Pernambuco (ITEP) e pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Dentre os métodos de interpolação, a técnica *Trend Surface Analysis* foi a que apresentou os melhores resultados. Espera-se que essas ferramentas passem a ser empregadas em estudos direcionados ao levantamento de políticas agrícolas, hídricas, ambientais e socioeconômicas para o estado de Pernambuco.

Palavras-chave: Modelo Century, Matéria orgânica do solo, Precipitação, Métodos de interpolação.

Abstract

A large number of mathematical and computational models has been proposed over the years to simulate the soil organic matter dynamics. Among those models Century 4.5 has gained outstanding attention, due to its capacity to simulate dynamics of carbon, nitrogen, phosphorous and sulfur for the soil plant system of different types of agroecosystems. From the computational viewpoint, the model is implemented as a DOS application for the Windows platform, which turns out practically impossible for numerous multiple simulations and subsequent spatially explicit analysis of the results on large scale. Another factor that deserves attention is the set of input variables, among which the historic pluviometric series are among the most important. Besides being important for the Century model, pluviometric series represent a fundamental ingredient for hydrologic modeling and agrarian policies. On the other hand, these data present limitations (in particular for the state of Pernambuco), regarding pluviographic density as well as short period of observation. Currently the Pernambuco state agency for water and climate (APAC) manages only 229 pluviometric stations covering the territory of $98312km^2$. In order to contribute to the current state of the art in the above mentioned problems, in the current work tools are developed to make possible spatially explicit studies using the Century model, and to alleviate the difficulty presented by absence of long term detailed data inherent to the state of Pernambuco. These tools were developed using the C programming language, with graphical user interface (GUI) based on Windows application programming interface (API), and are named WinCent and WinPreci, respectively. The WinCent interface was developed in order to make possible implementation of multiple Century simulations and the posterior spatially explicit analysis of the results using interpolation methods Inverse Distance Weighting (IDW) and Kernel Smoothing, in a single unified environment. The WinCent was tested using data from Century installation package, which are randomly georeferenced over the area of Pernambuco state. The large scale spatial behavior is evaluated for soil carbon (*somsc*) using interpolation technique Inverse Distance Weighted (IDW) and Kernel Smoothing. The WinPreci interface has been developed for access to interpolated data at resolution of $1km^2$, together with spatially explicit visualization of the historic series (1950-2012), obtained through comparison of different techniques of spatial interpolation, based on data on monthly precipitation obtained from the Pernambuco Institute of Technology (ITEP) and the National Institute of Meteorology (INMET). Among the different interpolation methods that were tested, the Trend Surface Analysis presented the best results. It is expected that these tools shall be employed in studies aimed at formulation of agricultural, water, environmental and socioeconomic policies, for the state of Pernambuco.

Key-words: Century Model, Soil organic matter, precipitation, Interpolation methods.

Lista de Figuras

Figura 1 – Compartimentos e fluxos do carbono na MOS para o modelo Century.	10
Figura 2 – Distribuição espacial das unidades de simulação sobre o <i>shape file</i> que corresponde ao estado de Pernambuco.	25
Figura 3 – Localização do estado de Pernambuco e a disposição espacial georreferenciada das estações pluviométricas do ITEP (●) e do INMET (●) situadas no interior e no contorno Pernambucano.	26
Figura 4 – Total anual e o número médio de estações pluviométricas para o ITEP (a) no estado de Pernambuco e para o INMET (b) em Pernambuco e estados vizinhos.	27
Figura 5 – Estrutura computacional do modelo Century 4.5 mostrando a interação entre programas e arquivos.	29
Figura 6 – Relação entre programas e a interface WinCent.	32
Figura 7 – Função dos pesos ($p = 0, 1$ e 2) com relação a distância.	37
Figura 8 – Diagrama de Voronoi para um conjunto N com 7 (a) e 8 (b) pontos geradores.	40
Figura 9 – Diagrama de Voronoi para 7 pontos amostrais e suas respectivas áreas A_i	42
Figura 10 – Ilustração das principais RBF (<i>Multiquadric</i> , <i>Inverse Multiquadric</i> , <i>Multilog</i> e <i>Natural Cubic Spline</i> , <i>Thin Plate Spline</i>) com parâmetros de suavização $R = 0.5$ (a) e $R = 2$ (b).	45
Figura 11 – Gráfico das principais funções <i>Kernel</i> para valores de x entre -3 e 3.	47
Figura 12 – Ilustração de um semivariograma e de um modelo de variograma teórico com parâmetros alcance (a), efeito pepita (C_0), patamar (C) e contribuição (C_1).	49
Figura 13 – Exemplos de variogramas teóricos comumente utilizados na interpolação de dados georreferenciados.	51
Figura 14 – Comportamento espacial de variáveis dependentes condicionadas por uma variável independente (linha/curva) e por duas variáveis independentes (superfícies).	55
Figura 15 – Interface WinCent e a função de seus componentes.	62
Figura 16 – Janela <i>WinCent Graph</i> para visualização do resultado da simulação através de gráfico de linhas.	63

Figura 17 – Janela <i>WinCent GIS Graph</i> para visualização espacialmente explícita do resultado da simulação através de mapas em intensidade de cores, obtida a partir das técnicas de interpolação <i>Inverse Distance Weighting</i> e <i>Kernel Smoothing</i>	64
Figura 18 – Janela de controle de visualização gráfica.	65
Figura 19 – Interação entre as janelas <i>WinCent Graph</i> e <i>WinCent GIS Graph</i> : representação do resultado da simulação em gráfico de linhas para as nove unidades de simulação (a) e a distribuição espacialmente explícita, através do IDW ($p = 2$) (b), para os estoques de carbono no solo (<i>somsc</i>) no instante de tempo igual a 501 em Pernambuco.	66
Figura 20 – Interação entre as janelas <i>WinCent Graph</i> e <i>WinCent GIS Graph</i> : representação do resultado da simulação em gráfico de linhas para as nove unidades de simulação (a) e a distribuição espacialmente explícita, através do IDW ($p = 2$) (b), para os estoques de carbono no solo (<i>somsc</i>) no instante de tempo igual a 1502 em Pernambuco.	67
Figura 21 – Interação entre as janelas <i>WinCent Graph</i> e <i>WinCent GIS Graph</i> : representação do resultado da simulação em gráfico de linhas para as nove unidades de simulação (a) e a distribuição espacialmente explícita, através do <i>Kernel Smoothing</i> ($h = 0.10$) (b), para os estoques de carbono no solo (<i>somsc</i>) no instante de tempo igual a 501 em Pernambuco.	68
Figura 22 – Interação entre as janelas <i>WinCent Graph</i> e <i>WinCent GIS Graph</i> : representação do resultado da simulação em gráfico de linhas para as nove unidades de simulação (a) e a distribuição espacialmente explícita, através do <i>Kernel Smoothing</i> ($h = 0.10$) (b), para os estoques de carbono no solo (<i>somsc</i>) no instante de tempo igual a 1502 em Pernambuco.	69
Figura 23 – Quantidade total e número médio anual de estações pluviométricas para as séries de precipitação do ITEP e do INMET no período de 1950 a 2012 no estado de Pernambuco.	70
Figura 24 – Precipitação média mensal no estado de Pernambuco para ao período de 1950 a 2012.	71
Figura 25 – Desvio padrão da precipitação média mensal no estado de Pernambuco para o período de 1950 a 2012.	72
Figura 26 – Visualização espacialmente explícita do erro médio (<i>EM</i>) obtido quando utilizado a técnica de interpolação <i>Trend Surface Analysis</i> ($n = 4$) para interpolar a precipitação mensal para o estado de Pernambuco.	76

Figura 27 – Visualização espacialmente explícita do erro absoluto médio (<i>EAM</i>) obtido quando utilizado a técnica de interpolação <i>Trend Surface Analysis</i> ($n = 4$) para interpolar a precipitação mensal para o estado de Pernambuco.	77
Figura 28 – Visualização espacialmente explícita do erro quadrático médio (<i>EQM</i>) obtido quando utilizado a técnica de interpolação <i>Trend Surface Analysis</i> ($n = 4$) para interpolar a precipitação mensal para o estado de Pernambuco.	77
Figura 29 – Visualização espacialmente explícita da raiz do erro quadrático médio (<i>REQM</i>) obtida quando utilizado a técnica de interpolação <i>Trend Surface Analysis</i> ($n = 4$) para interpolar a precipitação mensal para o estado de Pernambuco.	78
Figura 30 – Visualização espacialmente explícita da eficiência do modelo (<i>EFM</i>) obtida quando utilizado a técnica de interpolação <i>Trend Surface Analysis</i> ($n = 4$) para interpolar a precipitação mensal para o estado de Pernambuco.	79
Figura 31 – Visualização espacialmente explícita do índice de concordância (<i>D</i> de Willmott) obtido quando utilizado a técnica de interpolação <i>Trend Surface Analysis</i> ($n = 4$) para interpolar a precipitação mensal para o estado de Pernambuco.	79
Figura 32 – Visualização espacialmente explícita do coeficiente de determinação (R^2) obtido quando utilizado a técnica de interpolação <i>Trend Surface Analysis</i> ($n = 4$) para interpolar a precipitação mensal para o estado de Pernambuco.	80
Figura 33 – A interface WinPreci e a função de seus componentes.	81
Figura 34 – Janela de visualização espacialmente explícita para a precipitação mensal (<i>mm</i>) no estado de Pernambuco e o mapa de precipitação para janeiro de 1950.	82
Figura 35 – Mapa de visualização espacialmente explícita da precipitação (<i>mm</i>) em Pernambuco para o mês de abril de 1950: (a) mapa de precipitação para valores obtidos na interpolação (0-668.34 <i>mm</i>); (b) mapa de precipitação para valor máximo de precipitação informado no campo “Máximo valor” (0-300 <i>mm</i>).	83
Figura 36 – Janela de visualização espacialmente explícita (com grade) para a precipitação mensal (<i>mm</i>) no estado de Pernambuco e o mapa de precipitação para janeiro de 1950.	84

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Formatação do arquivo auxiliar *.gis.	32
Tabela 2 – Subconjunto formado pelas 23 variáveis de saída selecionadas.	33
Tabela 3 – <i>Radial Basis Functions</i> comumente utilizadas na interpolação de dados.	44
Tabela 4 – Função <i>Kernel</i> comumente utilizados com dados georreferenciados.	47
Tabela 5 – Forma analítica dos principais modelos de variograma teórico e suas referências.	50
Tabela 6 – Medidas utilizadas para avaliar o desempenho dos métodos de interpolação espacial.	58
Tabela 7 – Resumo dos valores obtidos através das medidas de avaliação de desempenho para os 7 métodos de interpolação.	73
Tabela 8 – Descrição do agendamento do arquivo <code>arids1.sch</code>	104
Tabela 9 – Descrição do agendamento do arquivo <code>boreal.sch</code>	104
Tabela 10 – Descrição do agendamento do arquivo <code>tconif.sch</code>	105
Tabela 11 – Descrição do agendamento do arquivo <code>tundra.sch</code>	105
Tabela 12 – Descrição do agendamento do arquivo <code>c4grs.sch</code>	105
Tabela 13 – Descrição do agendamento do arquivo <code>tdecid.sch</code>	106
Tabela 14 – Descrição do agendamento do arquivo <code>tsavan.sch</code>	106
Tabela 15 – Descrição do agendamento do arquivo <code>c3grs.sch</code>	107
Tabela 16 – Descrição do agendamento do arquivo <code>tropeg.sch</code>	107

Sumário

1	Introdução	1
2	Objetivos	4
2.1	Geral	4
2.2	Específicos	4
3	Revisão de Literatura	5
3.1	Modelo Century de dinâmica da matéria orgânica do solo	7
3.1.1	Submodelo de dinâmica da matéria orgânica do solo (MOS)	9
3.1.2	Taxas de decomposição para ciclagem do carbono no submo- delo de dinâmica da MOS	11
3.2	Precipitação	14
3.2.1	Precipitação no estado de Pernambuco	16
3.3	Principais métodos de interpolação espacial	17
4	Metodologia	24
4.1	Caracterização da área	24
4.2	Dados	24
4.2.1	Base de dados utilizada no modelo Century 4.5	24
4.2.2	Base de dados utilizada no mapeamento da precipitação pluvial para Pernambuco	26
4.3	Windows Century	29
4.3.1	Adaptação do modelo Century 4.5 para modelagem espacial- mente explícita	29
4.3.1.1	Estrutura computacional do modelo Century 4.5	29
4.3.1.2	Estrutura computacional para a interface WinCent	31
4.4	Windows Precipitation	35
4.4.1	Desenvolvimento e funcionalidade da interface WinPreci	35
4.5	Métodos de interpolação espacial	36
4.5.1	Inverse Distance Weighting	36
4.5.2	Shepard Modified	37
4.5.3	Natural Neighbour	39
4.5.4	Nearest Neighbour	42
4.5.5	Radial Basis Function	43
4.5.6	Kernel smoothing	45

4.5.7	Kriging	48
4.5.7.1	Variograma	48
4.5.7.2	Ajuste do variograma	51
4.5.7.3	Ordinary Kriging	52
4.5.8	Trend Surface Analysis	54
4.6	Avaliação dos métodos de interpolação espacial	57
5	Resultados	61
5.1	Windows Century – WinCent	61
5.1.1	A interface WinCent	61
5.1.2	Simulação espacialmente explícita através da interface WinCent	65
5.2	Windows Precipitation – WinPreci	70
5.2.1	Comparação dos métodos de interpolação espacial	70
5.2.2	A interface WinPreci	80
6	Considerações finais	85
	 Referências Bibliográficas	 87
	 Apêndices	 103
	APÊNDICE A Descrição das tabelas de agendamentos	104

1 Introdução

A quantificação e representação da distribuição espaço-temporal da matéria orgânica do solo (MOS) tem sido amplamente enfatizada, devido aos importantes serviços ambientais relacionados à MOS. Dentre esses serviços pode-se destacar a disponibilidade de nutrientes para as plantas, agregação do solo, retenção de água e troca de gases causadores do efeito estufa entre a superfície terrestre e a atmosfera. Particularmente, por meio do manejo adequado da MOS pode-se evitar que o carbono seja transferido para a atmosfera, contribuindo para mitigação de mudanças climáticas (WATSON et al., 2000). Neste contexto, o desenvolvimento de modelos matemáticos ou computacionais que possam auxiliar na avaliação dos efeitos do clima e nas mudanças no uso da terra sobre a dinâmica da MOS é essencial na formulação de políticas agrícolas, ambientais e socioeconômicas (LEITE; MENDONÇA, 2007).

Ao longo das últimas décadas vários modelos matemáticos e computacionais têm sido desenvolvidos para simular a dinâmica da MOS em ecossistemas terrestres. Um estudo extensivo realizado por Smith et al. (1997), comparando nove modelos de simulação de dinâmica da MOS, mostrou que os modelos Century (PARTON et al., 1987; PARTON; STEWART; COLE, 1988), RothC (COLEMAN; JENKINSON, 1996), DAISY (HANSEN et al., 1990), CANDY (FRANKO; OELSCHLAGEL; SCHENK, 1995), DNDC (LI; FROLKING; FROLKING, 1992a; LI; FROLKING; FROLKING, 1992b) e NCSOIL (MOLINA et al., 1983) apresentaram desempenho significativamente melhor do que os modelos SOMM (CHERTOV; KOMAROV, 1997), ITE (ARAH, 1996; ARAH et al., 1997) e Verbene (GUNNEWIEK, 1996). Contudo, somente os modelos Century e RothC foram capazes de simular adequadamente a dinâmica do carbono do solo para todos os sistemas e uso da terra em cada experimento. Este trabalho concentra-se no modelo Century.

O modelo Century foi desenvolvido pela Great Plains System Research Unit – USDA (GPSR) da Colorado State University (PARTON et al., 1987; PARTON; STEWART; COLE, 1988) e representa uma ferramenta geral para simular a dinâmica do carbono e nutrientes (nitrogênio, fósforo e enxofre) no sistema solo-planta em diversos tipos de agroecossistemas. O modelo contém submodelos para ciclagem de água, produção vegetal (floresta, pastagem/cultura e savana) e matéria orgânica do solo. Este modelo tem sido amplamente utilizado ao longo das últimas décadas e demonstrado sucesso quando simula a dinâmica do carbono, nitrogênio, fósforo e enxofre no sistema solo-planta em vários

agroecossistemas (PARTON et al., 1987; PARTON; STEWART; COLE, 1988; PARTON; WOOMER; MARTIN, 1994; PARTON et al., 1995; PAUSTIAN; PARTON; PERSSON, 1992). No Brasil, trabalhos associando o modelo Century a Sistemas de Informações Geográficas (SIG) para realizar simulações em larga escala ainda são escassos, contudo é possível apontar os trabalhos realizados por Lopes et al. (2008), Tornquist et al. (2009) e Bortolon et al. (2011), e a interface desenvolvida por Silva (2012). Os estudos em larga escala através dos modelo Century são dificultados pelo grande número de variáveis de entrada e, particularmente, pelos procedimentos computacionais exigidos para realizar as simulações.

Computacionalmente, o algoritmo do modelo Century foi implementado em linguagem Fortran, e a versão 4.5 do modelo funciona em ambiente DOS (*Disk Operating System*) sobre plataforma Windows, tornando suas execuções uma tarefa árdua para o modelador e sujeita a erros. Especificamente, a simulação do modelo e a avaliação dos resultados envolve vários passos, tais como a preparação e organização de uma série de arquivos de texto (ASCII - *American Standard Code for Information Interchange*) de entrada, a execução do programa principal para obter a saída em um arquivo binário e a extração de um subconjunto de resultados de interesse em formato ASCII para posterior análise gráfica em algum outro software. O fato de que todo o processo de execução é feito em ambiente DOS faz com que as simulações para dados coletados em locais espacialmente distribuídos se tornem difíceis, bem como na organização dos resultados.

Séries históricas de precipitação média mensal formam uma das mais importantes variáveis climáticas de entrada exigida pelo modelo Century. Contudo, a falta de dados climatológicos, especificamente de precipitação, em várias regiões, inviabiliza projetos agrícolas e comprometem a análise de elementos físico-químico do solo, causando pouca efetividade nas pesquisas. Por esse motivo, o uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG's) se faz tão importante (HOOGENBOOM, 2000; FURTADO; NEGREIROS, 2010). Informações de precipitação ainda são insumo de grande importância na modelagem hidrológica, podendo auxiliar na prevenção de eventos de precipitação extrema, tais como seca e enchentes. No entanto, na maioria dos casos, a rede de estações de medição de precipitação é escassa e os dados disponíveis são insuficientes para caracterizar a precipitação e sua distribuição espacial.

Assim como na maioria dos estados brasileiros, o estado de Pernambuco apresenta limitações referentes a disponibilidade de dados de precipitação, tanto em termos de densidade da rede pluviográfica, como em relação ao pequeno período de observações disponível. A saber, atualmente (janeiro a junho de 2015), a Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) conta com 229 estações pluviométricas sobre todo o estado, o

qual possui extensão territorial de $98.312km^2$. Desta forma, em muitos casos é necessário recorrer ao uso de informações dos postos pluviográficos mais próximos das localidades onde são realizados os projetos. Contudo, isso pode gerar estimativas pouco confiáveis, em função da grande variabilidade espacial dos dados de precipitação (SILVA et al., 2012), deixando evidente a necessidade do emprego de metodologias adequadas para geração confiável destas estimativas.

Os métodos de interpolação espacial para dados georreferenciados constituem uma parte do SIG e funcionam como ferramentas promissoras para a estimativa e compreensão da distribuição espacial de dados provenientes de fenômenos ocorridos no espaço, auxiliando assim no grande desafio de elucidar questões centrais em diversas áreas do conhecimento como saúde, ambiente, geologia, urbanismo, planejamento e climatologia. Tais métodos também são empregados para gerar informações de precipitação onde não houve a coleta destas, além de serem bastante utilizados na literatura como ferramentas para analisar a dinâmica de distribuição espacial da precipitação. Particularmente, no estado de Pernambuco, pode-se apontar as pesquisas conduzidas por Silva, Queluz e Klar (2013), Silva, Moura e Klar (2014) e Nóbrega, Farias e Santos (2015).

Estes métodos são encontrados em grande variedade na maioria dos softwares estatísticos ou de SIG (Arcgis (ARCGIS, 2008), Quantum GIS (QUANTUM, 2011), R (R Development Core Team, 2006), e Surfer (SURFER, 1993)) como pacotes ou ferramentas para análises espaciais de dados (climáticos, agrometeorológicos e ambientais) georreferenciados. Todavia, critérios para selecionar quais métodos apresentam melhores resultados para a variável em estudo devem ser levados em consideração. A comparação de diferentes técnicas de interpolação para dados de precipitação podem ser encontradas nas pesquisas de Vicente-Serrano et al. (2003), Wagner et al. (2012), Cunha et al. (2013) e Wang et al. (2014).

Tendo em vista que o modelo Century não é capaz de realizar simulações em larga escala, bem como a importância e/ou escassez de dados de precipitação para o estado de Pernambuco, tanto para alimentar o modelo Century quanto para o desenvolvimento de estudos em locais específicos, o presente trabalho concentra-se no desenvolvimento de ferramentas que possam contornar estas limitações. Para isto, o modelo Century recebeu adaptações em seu código fonte de forma a torná-lo apto a executar múltiplas simulações e ainda apresentar o resultado destas de forma espacialmente explícita. Séries históricas de precipitação mensal, obtidas através da comparação de diferentes métodos de interpolação espacial, para todo o estado de Pernambuco poderão ser acessadas em tempo real, além da visualização espacialmente explícita destas.

2 Objetivos

2.1 Geral

Adaptar o modelo Century 4.5 para a execução de múltiplas simulações assim como a visualização espacialmente explícita destas e o desenvolver um programa para acesso e visualização de uma base de dados georreferenciados para precipitação mensal do estado de Pernambuco.

2.2 Específicos

1. Integrar o código fonte (Linguagem Fortran) do modelo Century 4.5 com o código desenvolvido em linguagem C;
2. Modificar partes do código fonte do modelo Century para isolar trechos com instruções de entrada e saída de dados;
3. Implementar algoritmos de métodos de interpolação (*Inverse Distance Weighting* e *Kernel Smoothing*) para visualização espacialmente explícita das múltiplas simulações através do modelo Century;
4. Organizar base de dados de precipitação para o estado de Pernambuco;
5. Implementar algoritmos de métodos de interpolação (*Inverse Distance Weighting*, *Shepard Modified*, *Natural Neighbour*, *Nearest Neighbour*, *Radial Basis Function*, *Kriging*, *Trend Surface Analysis*) para o mapeamento da precipitação mensal em todo o estado de Pernambuco;
6. Implementar algoritmo para medidas de avaliação de desempenho dos métodos de interpolação;
7. Desenvolver ambientes Graphical User Interface (GUI) de fácil uso: a interface Windows Century (WinCent) e a interface Windows Precipitation (WinPreci).

3 Revisão de Literatura

O solo é um sistema vivo e dinâmico onde são encontrados milhares de organismos e pequenos animais intimamente associados à matéria orgânica, utilizando-a como fonte de energia e nutrientes necessários as biossínteses celulares, principalmente dos microrganismos. A energia e os nutrientes disponíveis aos microrganismos são provenientes dos resíduos vegetais e animais e estão contidos em uma ampla variedade de compostos orgânicos, tais como carboidratos, lignina, proteínas, lipídios e substâncias húmicas. Consequentemente, a fração orgânica do solo representa um sistema complexo, constituído de diversas substâncias, sendo sua dinâmica determinada constantemente pela adição de resíduos vegetais e animais ao solo e pela transformação destes, por meio da ação de diferentes grupos de microrganismos (ROSCOE; MERCANTE; SALTON, 2006; BRADY, 1989).

A dinâmica da matéria orgânica do solo (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 gases de efeito estufa entre a superfície terrestre e a atmosfera, além de representar o principal compartimento de carbono na biosfera, avaliado em $1550Pg^1$ (FOLLETT, 2001).

Diante disto, o estudo e a compreensão da dinâmica da MOS são fundamentais na sustentabilidade de diferentes culturas agrícolas, no ciclo global do carbono, no fluxo de nutrientes e na capacidade do solo em resistir a danos físicos, erosão e compactação (FERREIRA et al., 2004). Contudo, tais estudos são limitados pela grande complexidade dos agroecossistemas, pois estes se apresentam em dimensões distintas com alta variabilidade espacial e topográfica, bem como variações climáticas.

Devido a essa complexidade, pesquisas experimentais são dificultadas por problemas logísticos ou limitações financeiras, por exemplo. Assim, a modelagem por meio de modelos de simulação matemática e computacional contribuem como ferramentas para integrar e sistematizar o conhecimento de forma organizada e auxiliar na compreensão das particularidades dos processos que compõem os sistemas e visualizar o comportamento futuro de sistemas através da criação de cenários alternativos e que ainda não foram explorados experimentalmente (SCORZA JÚNIOR et al., 2006).

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

Os modelos de simulação podem ser classificados como determinísticos e estocásticos. Um modelo determinístico assume que um determinado grupo de eventos propicia um resultado único e definido, enquanto que o modelo estocástico pressupõe que o resultado é incerto e é estruturado para aceitar essa incerteza. Os modelos determinísticos ainda se subdividem em modelos mecanísticos (descreve detalhadamente os mecanismos do processo) e funcionais (objetiva fornecer uma descrição mais generalizada dos processos sem maiores detalhes) (LEITE; MENDONÇA, 2005). Os modelos Century, RothC e DAYSY são exemplos de modelos de dinâmica da MOS considerados determinísticos e mecanísticos (HANSEN et al., 1990).

Ao longo dos anos uma grande variedade de modelos de simulação de dinâmica da MOS foram desenvolvidos. Na década de 80, o interesse em simular a dinâmica da MOS e o crescimento de culturas agrícolas conduziu ao desenvolvimento dos modelos NC-SOIL (MOLINA et al., 1983), EPIC (WILLIAMS; RENARD, 1985), CERES (RITCHIE; GODWIN; OTTER-NACKE, 1986), PAPRAN (SELIGMAN; KEULEN, 1981), SOLIN (JOHNSSON et al., 1987) e aos modelos desenvolvidos por Veen e Paul (1981), Parton et al. (1987), os quais utilizam a abordagem em que o carbono do solo é dividido em compartimentos e, conseqüentemente, diferentes níveis de recalcitrância e dinâmica de decomposição.

Ainda nos anos 80, Veen e Paul (1981) melhoraram o modelo desenvolvido por Jenkinson e Rayner (1977) com a inclusão dos conceitos de proteção química/física e fatores como erosão e cultivo do solo. Parton et al. (1987) adicionaram o efeito de textura do solo na dinâmica da MOS e desenvolveram modelos de ciclagem de nutrientes, os quais simulam simultaneamente o carbono do solo e a dinâmica de nitrogênio, fósforo e enxofre.

Na década de 90 foram desenvolvidos os modelos DAISY (HANSEN et al., 1990), Verbenne (VERBERNE et al., 1990), SUNDIAL (BRADBURY et al., 1993), CANDY (FRANKO; OELSCHLAGEL; SCHENK, 1995), DNDC (LI; FROLKING; HARRISS, 1994) e RothC (COLEMAN; JENKINSON, 1996). Recentemente foi desenvolvido o modelo EPICSEAR, uma versão recém desenvolvida do modelo EPIC, para calcular o impacto da erosão na produtividade agrícola em regiões semiáridas. O modelo EPICSEAR foi aplicado na região semiárida do Nordeste brasileiro - Piauí sob condições de um solo Latossolo cultivado com milho e feijão (BARROS; WILLIAMS; GAISER, 2004; BARROS; WILLIAMS; GAISER, 2005). Outro modelo, o SALSA (PEINETTI et al., 2008), desenvolvido especificamente para regiões de clima semiárido simulou, bem a dinâmica da MOS, a produtividade de biomassa do milho e a dinâmica de nitrogênio do solo.

A diversidade de modelos desenvolvidos para simular a dinâmica da MOS nos últimos anos é notória, embora alguns não façam uso dos critérios apontados por Sinclair

e Seligman (2000), no que diz respeito a modelagem de culturas, ou se encontram em fase inicial de desenvolvimento e não tenham sido testados em diferentes ecossistemas, condições climáticas e tipos de solo.

Smith et al. (1997) e Molina e Smith (1998) realizaram uma comparação crítica de nove modelos de simulação de carbono e nutrientes do solo em diferentes ecossistemas terrestres de clima temperado, através de sete experimentos de longa duração. Dentre os nove modelos avaliados, o grupo formado pelos modelos RothC, Century, DAYSY, CANDY, NCSOIL e DNTC apresentaram desempenho significativamente melhor que os modelos SOMM (CHERTOV; KOMAROV, 1997), ITE (ARAH, 1996; ARAH et al., 1997) e Verbene, mas somente os modelos RothC e Century foram capazes de simular adequadamente o carbono em todos os sistemas de uso da terra em cada experimento avaliado.

Em comparação também realizada por Smith et al. (1999), entre os modelos Century, DNDC, EPIC, Rothc, SOCRATES (GRACE; LADD, 1995), SOMM e SUNDIAL, os resultados mostraram que os modelos Century e RothC apresentaram melhor performance. Devido ao seu melhor desempenho dentre o conjunto de modelos disponíveis, o modelo Century foi escolhido para ser avaliado no presente estudo.

3.1 Modelo Century de dinâmica da matéria orgânica do solo

O modelo Century foi concebido pela Great Plains System Research Unit USDA (GPSDR) da Colorado University (PARTON et al., 1987; PARTON; STEWART; COLE, 1988) 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.

Originalmente o modelo foi desenvolvido para simular em escala pontual a dinâmica da MOS e nutrientes no sistema solo-planta em pastagens naturais nas planícies Norte Americanas sob clima temperado. Posteriormente, foram incluídas no modelo simulações em biomas com florestas e agricultura (envolvendo práticas de manejo), preparos do solo, irrigação, fertilização, colheita, pastejo, queimadas e ocorrências de erosão (WEBER, 2010).

Desde então o uso do modelo Century não compreende apenas regiões de clima temperado ou solos específicos, pois também tem sido aplicado com êxito em ecossistemas tropicais (PARTON; WOOMER; MARTIN, 1994; CERRI et al., 2003) e clima semiárido (ALTHOFF et al., 2009). Modificações no modelo ainda levaram sua aplicabilidade com sucesso em sistemas agrícolas (PAUSTIAN; PARTON; PERSSON, 1992) e florestais (SANFORD et al., 1991).

Atualmente o modelo Century disponibiliza as versões 3.0, 4.0 e 4.5. Porém, apenas a versão 4.0 encontra-se livremente disponível (código fonte e executável para simulação) para download através do endereço eletrônico <<http://www.nrel.colostate.edu/projects/century/>>. Compilações alternativas da versão 4.0 (SILVA, 2012; CARD, 2008) e pesquisas realizadas com as versões 3.0 (PARTON et al., 1993) e 4.5 (CONG et al., 2014; WENDLING et al., 2014) também têm sido amplamente desenvolvidas.

A versão 3.0 do modelo Century inclui um número substancial de modificações que não foram descritas em publicações originais. Estas modificações incluem a adição de um efeito sobre a formação de argila no compartimento passivo da MOS, melhoramento na decomposição, simulação da lixiviação do material orgânico solúvel, melhoramento das equações de lixiviação inorgânica e desenvolvimento de um submodelo de produção de pastagem robusto (PARTON et al., 1993).

As principais mudanças na versão 4.5 estão relacionadas à inclusão do efeito de pH no processo de decomposição, modificações no cálculo do efeito de temperatura e no cálculo da evapotranspiração. A soma de 15 parâmetros adicionais no arquivo de cultura (*crop.100*) também fazem parte das modificações feitas no modelo Century, além da mudança no conceito do parâmetro PRDX(1), o qual era definido na versão anterior como a produção potencial mensal da parte aérea de cada cultura em função da precipitação. Já na versão 4.5, este parâmetro é definido como o coeficiente usado para o cálculo da produção potencial em função da radiação solar. A adição de novas variáveis de saída também foram associadas na versão 4.5 do modelo Century, tornando-o capaz de modelar cenários com alterações climáticas, no que se refere à temperatura do ar e precipitação (WEBER, 2010).

As compilações alternativas da versão 4.0 desenvolvidas por Silva (2012) e CARD (2008) utilizam o modelo Century para modelagem em larga escala através de ferramentas GIS (*Geographic Information System*). O trabalho desenvolvido por CARD (2008) trata-se de uma interface (*i_Century*) criada em linguagem de programação C++ que permite realizar várias simulações a partir de variáveis e parâmetros do modelo armazenados em um banco de dados MS Access. No Brasil, estudos realizados com a interface *i_Century* foram conduzidos por Tornquist et al. (2009). Já no trabalho realizado por Silva (2012), foi criada uma interface capaz de realizar múltiplas simulações e ainda expor estas em gráfico de linhas bem como a dinâmica espacialmente explícita da variável de saída selecionada, utilizando o método de interpolação *Non Uniform Rational B-Spline* (NURBS) (HU et al., 2001).

O modelo Century ainda possui uma versão para simulação diária, a qual recebeu o nome de DAYCENT (PARTON et al., 1998; GROSSO et al., 2001; KELLY et al., 2000).

Esta versão é capaz de simular detalhadamente a dinâmica da água e temperatura do solo, assim como o fluxo dos gases CH_4 , N_2O , NO_x e N_2 , os quais não eram possíveis na versão 4.0 (PARTON et al., 2001).

O modelo Century, nas suas versões 4.0 e 4.5, funcionam em uma escala de metro quadrado (m^2) e simulam a dinâmica do carbono do solo e de nutrientes como nitrogênio, fósforo, enxofre, água do solo e crescimento vegetal, para uma camada superficial do solo (0-20cm), usando etapa de tempo mensal (LEITE; MENDONÇA, 2007).

De acordo com Leite, Mendonça e Machado (2004), as principais variáveis de entrada exigida pelo modelo são:

- variáveis climáticas (médias mensais de temperatura mínimas e máximas do ar e precipitação acumulada mensal);
- textura do solo (teores de areia, silte e argila);
- teor de nitrogênio, fósforo e enxofre do material vegetal;
- conteúdo de lignina do material vegetal;
- aporte de nitrogênio do solo e da atmosfera;
- teor inicial de carbono, nitrogênio, fósforo e enxofre nos diferentes compartimentos do solo.

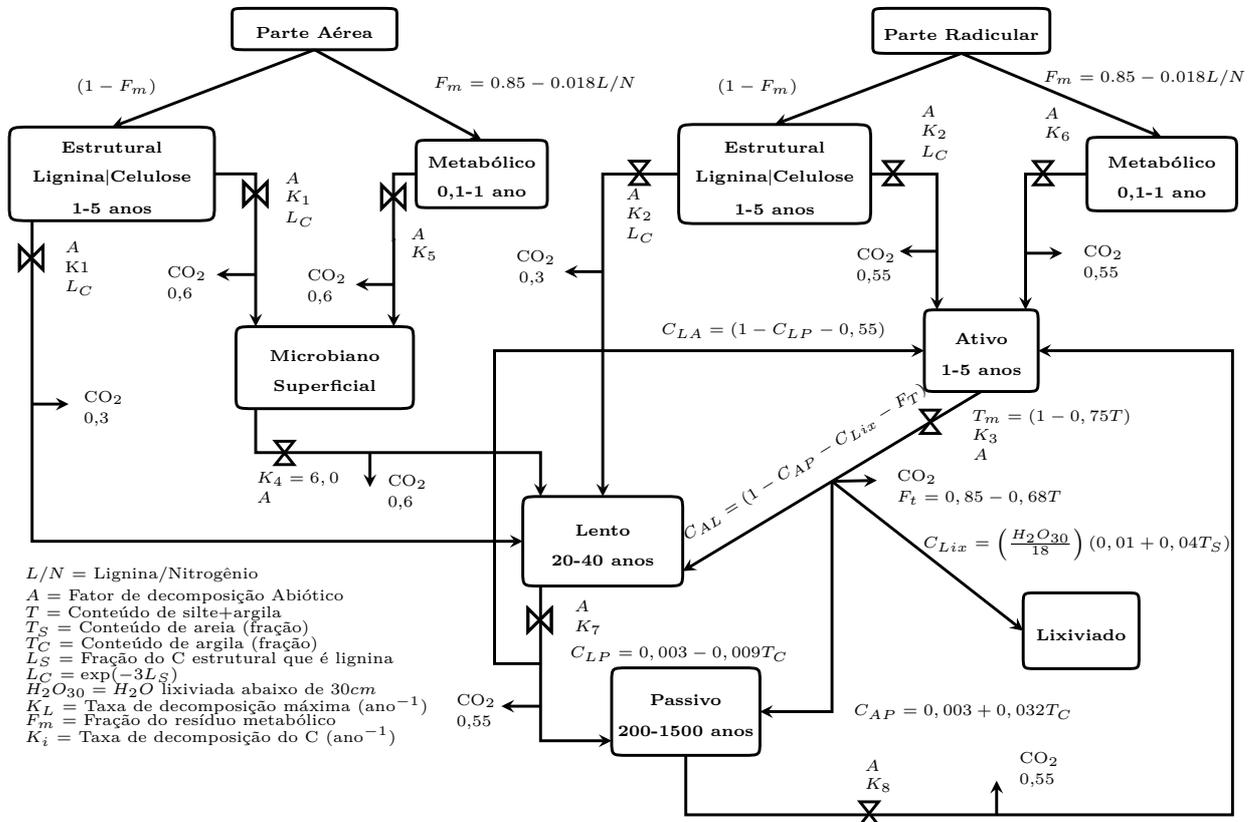
As variáveis de entrada do modelo podem ser obtidas em campo para a maioria dos sistemas naturais e agrícolas, assim como, podem ser obtidas através da literatura. A simulação pode ser realizada escolhendo a simulação apenas do carbono e nitrogênio, carbono, nitrogênio e fósforo ou carbono, nitrogênio, fósforo e enxofre (METHERALL et al., 1993).

O modelo é formado por vários submodelos: o submodelo de água, submodelo de produção vegetal e o submodelo de dinâmica da MOS, baseado em múltiplos compartimentos e com diferentes taxas de decomposição (compartimentos ativo, lento e passivo) (LEITE; MENDONÇA; MACHADO, 2004).

3.1.1 Submodelo de dinâmica da matéria orgânica do solo (MOS)

O submodelo de dinâmica da MOS simula a ciclagem do carbono, nitrogênio, fósforo e enxofre, enquanto o submodelo de produção vegetal é formado pelos submodelos de pastagem/cultura, floresta e savana. Na Figura 1 é apresentado a ciclagem do carbono na MOS.

Figura 1 – Compartimentos e fluxos do carbono na MOS para o modelo Century.



Fonte: adaptado de Parton et al. (1993).

O submodelo de MOS para simular a ciclagem de carbono, nitrogênio, fósforo e enxofre em sistemas orgânicos e inorgânicos do modelo Century é baseado em múltiplos compartimentos, particionados pelo tempo de ciclagem e similar a outros modelos de dinâmica da MOS (JENKINSON; RAYNER, 1977; JENKINSON, 1990; VEEN; PAUL, 1981).

Na Figura 1 é mostrada a divisão do submodelo de dinâmica da MOS em seus três maiores compartimentos: ativo, lento e passivo. De acordo com Parton et al. (1987) estes compartimentos são descritos como:

- **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 resistentes a decomposição biológica, apresenta tempo de re-

ciclagem intermediário (20 a 40 anos);

- **Compartimento Passivo** – pode também ser fisicamente protegido, com longo tempo de reciclagem (200 a 1500 anos).

Os resíduos vegetais são divididos em abaixo e acima do solo e classificados como:

- **Parte Radicular** – inclui resíduos vegetais do solo que, por sua vez, é fracionada nos compartimentos metabólico e estrutural, apresentando taxas de decomposição de 0,1-1 ano (facilmente decomposto) e 1-5 anos (resistente a decomposição);
- **Parte Aérea** – inclui resíduos vegetais das folhas, galhos finos e grossos acima do solo, sendo esta dividida nos compartimentos metabólico e estrutural, apresentando taxas de decomposição de 0,1-1 ano (facilmente decomposto) e 1-5 anos (resistente a decomposição).

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

$$F_m = 0,85 - 0,018L/N, \quad (1)$$

onde L/N representa a relação lignina/nitrogênio e F_m representa a fração metabólica. A fração lignina na Equação 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 (PARTON et al., 1993). Nota-se que com o aumento da relação L/N , maior parte do resíduo é transferido para o compartimento estrutural através da função $1 - F_m$, o qual apresenta taxas de decomposição menores que o compartimento metabólico (Figura 1).

O submodelo de MOS ainda apresenta os compartimentos lixiviado e microbiano superficial, os quais possuem taxa de reciclagem independente da textura do solo e é transferido diretamente para o compartimento lento da MOS (LEITE; MENDONÇA, 2003).

3.1.2 Taxas de decomposição para ciclagem do carbono no submodelo de dinâmica da MOS

Segundo Parton et al. (1993), a decomposição do carbono para cada compartimento, como mostrado na Figura 1, são oriundas de um sistema de equações diferenciais

dado por

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

Onde C_i é a quantidade de carbono nos compartimentos estrutural da parte aérea ($i = 1$), estrutural da parte radicular ($i = 2$), ativo da MOS ($i = 3$), microbiano superficial ($i = 4$), metabólico da parte aérea ($i = 5$), metabólico da parte radicular ($i = 6$), lento da MOS ($i = 7$) e passivo da MOS ($i = 8$);

A quantidade K_i representa a taxa de decomposição máxima respectivamente 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 de umidade e temperatura sobre a decomposição, L_C é o impacto de lignina do material estrutural na decomposição estrutural e T_m o efeito da textura do solo na reciclagem do compartimento ativo da MOS.

As taxas de decomposição máxima K_i são fixas para os compartimentos em que $i=4,5,6,7$ e 8 , e variáveis para os demais compartimentos ($i=1,2$ e 3). De acordo com Leite e Mendonça (2007), as taxas de decomposição fixas podem ser modificadas por um coeficiente de cultivo, quando houver revolvimento do solo. Por outro lado, as taxas de decomposição variáveis dependem apenas da textura do solo e do teor de lignina através das Equações 3 e 4:

$$T_m = (1 - 0,75T) \quad (3)$$

$$L_C = \exp\{-L_S\}, \quad (4)$$

em que L_S é a decomposição estrutural e T é o conteúdo de silte + argila.

Independente das taxas de decomposição máxima nos diferentes compartimentos, os fluxos de carbono são controlados também pelo fator de decomposição abiótico, composto pela umidade e temperatura (LEITE; MENDONÇA, 2003). 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),

conforme a Equação 5

$$U = \begin{cases} \frac{1}{1 + 30 \exp\left\{\frac{-8,5PPM}{ETP}\right\}}, & \text{se } \frac{PPM}{ETP} > 1,5 \\ \frac{1 - 0,7\left(\frac{PPM}{ETP} - 1,5\right)}{1,5}, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (5)$$

Por outro lado, a função temperatura é definida como

$$T_E = t_2 \exp\{0,2 \ln(t_1)\}, \quad (6)$$

onde t_1 corresponde a temperatura média máxima mensal e t_2 a temperatura média mínima mensal, com expressões dadas respectivamente por

$$t_1 = \frac{45 - T}{10} \quad (7)$$

$$t_2 = \exp\left\{0,076\left[1 - \exp\{2,63 \ln(t_1)\}\right]\right\} \quad (8)$$

O modelo Century pressupõe que todos os fluxos de decomposição do carbono estão associados com a atividade microbiana e que a respiração microbiana está presente em cada um destes fluxos. A fração de carbono perdido devido a respiração microbiana é mostrada na Figura 1 próximo aos fluxos de CO_2 . Os fluxos de decomposição do carbono que saem do compartimento ativo são divididos em quatro novos fluxos e direcionados para os compartimentos lento e passivo da MOS, lixiviado de carbono orgânico solúvel e um fluxo de C perdido devido a respiração microbiana. Estes fluxos são ajustados pelas seguintes equações:

$$F_T = 0,85 - 0,68T, \quad (9)$$

$$C_{Lix} = \left(\frac{H_2O_{30}}{18}\right) (0,01 + 0,04T_S), \quad (10)$$

$$C_{AP} = 0,003 + 0,032T_C, \quad (11)$$

$$C_{AL} = (1 - C_{AP} - C_{Lix} - F_T), \quad (12)$$

onde F_T representa o carbono 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_{30} é a água lixiviada mensalmente abaixo de 30cm de profundidade do solo, T_C é o conteúdo de argila e T_s é o conteúdo de areia.

Entendimento complementar sobre as taxas de decomposição e os fluxos entre os compartimentos da MOS também podem ser encontrado nos estudos realizados por Parton et al. (1993) e Bolker, Pacala e Parton (1998). Bolker, Pacala e Parton (1998) se concentraram em analisar a estrutura matemática do modelo Century e, com base nas propriedades de linearidade do submodelo de MOS, mostraram que com pouca perda de generalidade o modelo pode ser simplificado e ainda preservar sua dinâmica.

3.2 Precipitação

Para compreender, caracterizar e/ou modelar os diferentes fenômenos e processos associados aos sistemas climáticos, são necessários dados confiáveis. Estes dados nem sempre estão disponíveis ou podem estar incompletos. Quando existem, eles podem não corresponder ao período de interesse ou não cobri-lo completamente. Porém, o sucesso da análise e modelagem depende fortemente da existência, acessibilidade e qualidade dos dados (HINGRAY; PICOUET; MUSY, 2014).

A obtenção de dados em larga escala para o estudo climatológico das diversas variáveis ambientais é de extrema importância, tendo em vista o impacto ambiental que a anomalia dessas componentes provocam no clima regional. De acordo com Sousa, Lundgren e Netto (2010), a precipitação pluvial é um dos elementos meteorológicos que exerce maior influência sobre condições ambientais. Hoogenboom (2000) aponta a precipitação pluvial como uma variável climática de extrema importância socioeconômica e que está diretamente relacionada com o desenvolvimento e crescimento de culturas e a tomada de decisões políticas para o gerenciamento hídrico.

Segundo Santos et al. (2014), o conhecimento do regime de precipitação de uma região, no que concerne à duração final da estação chuvosa, e a possibilidade de se conhecer períodos mais susceptíveis a estiagem (veranicos) dentro dessa estação, são fundamentais para a elaboração de um calendário e a implementação de projetos agrícolas.

Dados de precipitação são, sem dúvida, um dos insumos fundamentais para projetos agrícolas. Para Silva et al. (2010) o estudo do comportamento espacial da precipitação é fundamental para o mapeamento de atividades agrícolas e o gerenciamento de recursos hídricos. Compreender a sua variabilidade é um desafio, principalmente na região Nor-

deste do Brasil, a qual é caracterizada pela irregularidade espacial e temporal e pelos processos de escoamento e erosão dos solos, que decorrem de um conjunto de fatores, tais como: características fisiográficas e influência de vários sistemas atmosféricos.

Conforme Pinto et al. (1976), a precipitação pode ser compreendida como a fase do ciclo hidrológico que é responsável pelo retorno das águas condensadas na atmosfera à superfície terrestre em diferentes formas: chuva, granizo, neblina, neve, orvalho ou geada. Quando o vapor de água presente na atmosfera condensa-se ao atingir elevadas altitudes ou encontra massas de ar frias, formando as nuvens que quando carregadas de vapor de água retornam a superfície terrestre em forma de chuva, ocorre um fenômeno denominado precipitação pluviométrica. Segundo Lira et al. (2006) a chuva em trânsito entre a atmosfera e o solo tem aparentemente um aspecto quantitativo para cada local, mas sua distribuição durante o ciclo anual é irregular em todo o planeta.

Diferentes mecanismos podem ocorrer devido à ascensão do ar úmido, fundamental para originar precipitação. Através desses mecanismos, as precipitações podem ser classificadas segundo três padrões: convectivas, orográfica e ciclônicas ou frontais (PINTO et al., 1976).

A chuva convectiva está relacionada com instabilidade convectiva, ou seja, o movimento vertical do ar resulta do processo de aquecimento da superfície terrestre pelo sol, ocasionando colunas de ar ascendentes (ar que sobe para a troposfera superior). Este processo resulta na formação de nuvens do tipo cumulonimbus, que possuem um elevado desenvolvimento vertical. Geralmente essas chuvas são intensas e de curta duração, ocorrendo com mais frequência no verão, no período vespertino. As chuvas orográficas ocorrem quando ventos quentes e úmidos, soprando geralmente do oceano para o continente, encontram uma barreira montanhosa, elevam-se e se resfriam adiabaticamente havendo condensação do vapor, formação de nuvens e ocorrências de chuvas. É desse processo que surge a grande incidência de nebulosidade e chuva próxima às altas encostas das montanhas. As ciclônicas ou frontais são precipitações provenientes do confronto entre massas de ar quentes e frias. As frentes frias podem ocasionar chuvas intensas, podendo ser acompanhadas de trovoadas, granizos, vendavais e tornados. As frentes quentes provocam chuva contínua de menor intensidade (AYODE, 1994).

A saber, no estado de Pernambuco, as chuvas convectivas ocorrem com maior frequência nas regiões do Agreste, Sertão e Zona da Mata com os distúrbios de leste. Já as chuvas ciclônicas ou frontais podem ser verificadas em maiores abundâncias de suas ocorrências, no Litoral e Zona da Mata pernambucana. Por fim, as chuvas orográficas ocorrem sistematicamente no Estado de Pernambuco, por ser cortado pelo Planalto da Borborema (SALGUEIRO, 2005).

3.2.1 Precipitação no estado de Pernambuco

O Estado de Pernambuco tem 70% do seu território localizado no semi-árido nordestino, no “Polígono das Secas”. Como qualquer outra região semi-árida do mundo, o Nordeste brasileiro sempre estará sujeito a secas periódicas. Isto porque uma das características naturais desse tipo de clima é a ocorrência de chuvas irregulares e mal distribuídas geograficamente (MOURA et al., 2007).

Particularmente na mesorregião do Agreste pernambucano, conforme Santos e Montenegro (2012), a precipitação média anual para esta região é de $607mm$, tendo forte influência dos sistemas meteorológicos como as Zonas de Convergência Intertropical (ZCINT) que atuam nos meses de fevereiro a maio. Nessa região, vale salientar ainda que os municípios de Passira, Gravatá e Salgadinho são cortados pela linha que delimita o Polígono das Secas (SALGUEIRO et al., 2015).

A mesorregião Metropolitana do Recife possui características similares a Zona da Mata e com grande variabilidade de chuvas. Segundo Galvêncio e Moura (2006), o clima nessas mesorregiões é classificado como tropical úmido, com predominância de chuvas nos meses de março a julho (outono a inverno) com média histórica entre 1.500 e 2.000 milímetros anuais. A precipitação nessa área está relacionada a sua proximidade com o litoral e a presença do relevo como por exemplo o Planalto da Borborema, os morros e colinas.

O sertão de Pernambuco, o qual compreende as mesorregiões do Sertão e Sertão de São Francisco é dominada pelo clima semiárido e, conforme Assis, Sobral e Souza (2012), apresenta registros de chuvas nos meses de dezembro a maio em porções distintas e índices pluviométricos alternando entre 400 e $800mm$ anuais. As chuvas que ocorrem nessa região tem sua origem nas Frentes Frias, nos Vórtices Ciclônicos de Ar Superior (VCAS) e na ZCIT. Outra característica marcante dessa região é a estação de seca, podendo se prolongar por 7 a 10 meses e conduzir a situações críticas.

Silva, Queluz e Klar (2013) apontam que a precipitação na mesorregião do Sertão de São Francisco atinge médias anuais em torno de $950mm$, com maiores índices de chuva nos meses de janeiro a abril. As regiões mais secas do Sertão de São Francisco sofrem a ação de fenômenos climático como por exemplo o El Niño, que abrange o Nordeste brasileiro provocando perturbação no clima local e interferindo no regime pluviométrico (COSTA, 2014).

Em Pernambuco, os resultados encontrados por Nóbrega, Farias e Santos (2015) demonstraram predominância de tendência de aumento no volume de chuva anual, com exceção da mesorregião da região Metropolitana do Recife e parte leste da mesorregião da

Zona da Mata. Resultados opostos para a região Metropolitana do Recife foram obtidos por Souza e Azevedo (2012), detectando aumento da precipitação para esta área. Diminuição da precipitação foi observada por Assis, Sobral e Souza (2012) nas bacias do rio Brígida e Pajeú, ambas localizadas no Sertão. Já Assis, Lacerda e Sobral (2012) verificou essa mesma diminuição na bacia do Capibaribe.

3.3 Principais métodos de interpolação espacial

A interpolação espacial é uma operação comum em um *Geographic Information System* (GIS). Embora ela seja frequentemente usada de forma explícita na análise, ela também é usada implicitamente em várias operações, como na preparação da visualização de curvas de nível, na qual a interpolação espacial é realizada diretamente pelo usuário. A interpolação espacial é um processo no qual se busca, por meio de técnicas matemáticas, estimativas precisas dos valores de uma região em locais onde não foram feitas medidas em campo. Em geral, os métodos de interpolação usam a distância, baseada na suposição que o valor em um local, é mais similar aos valores medidos em pontos amostrais vizinhos, do que os valores de pontos amostrais mais distantes (LONGLEY et al., 2013).

De acordo com Andriotti (2003), a interpolação é um método pelo qual se estimam valores de uma variável em uma região interior aos pontos de amostragem disponíveis, permitindo representar em mapas, de forma espacialmente contínua, o comportamento de variáveis amostradas pontualmente. Diversos métodos de interpolação têm sido propostos e uma discussão a respeito deles encontra-se em Lam (1983), Yamamoto (1998) e Li e Heap (2011).

Conforme Li e Heap (2008) os métodos de interpolação para dados georreferenciados podem ser classificados em dois principais grupos: estocásticos/geoestatísticos e determinísticos. Os métodos estocásticos incorporam o conceito de aleatoriedade e fornecem tanto estimativas (parte determinística) quanto os erros associados (parte estocástica, isto é, as incertezas são representadas pela variância estimada). Todos os outros métodos são determinísticos pois não incorporam tais erros e somente fornecem estimativas. Os métodos determinísticos não fornecem uma avaliação dos valores previstos, enquanto os métodos estocásticos fornecem uma avaliação dos erros associados aos valores previstos. Howarth (1983) e Kansa (1990) afirmam que estes métodos são considerados segundo duas categorias:

- **Globais** – procuram considerar todos os valores amostrados, interpolando valores em qualquer ponto dentro do domínio dos dados originais; a retirada ou adição de um valor amostrado terá consequência em todo o

domínio. São exemplos os métodos *Trend Surface Analysis e Regression Models* (VICENTE-SERRANO et al., 2003);

- **Locais** – são aplicados em porções da área mapeada e, sucessivamente, cobrem toda a região de interesse; a retirada ou inclusão de dados irá afetar apenas os pontos a ele adjacentes e até uma determinada distância. São exemplos destes os métodos *Inverse Distance Weighting, Nearest Neighbour, Natural Neighbour, Radial Basis Function, Ordinary Kriging, Modified Shepard e Kernel Smoothing* (LANDIM, 2003; VICENTE-SERRANO et al., 2003).

Os métodos globais e locais, segundo Burrough e McDonnell (1998), ainda são classificados em exatos e inexatos. Interpoladores exatos são geralmente utilizados quando se tem certeza dos valores dos pontos no qual a interpolação é baseada. Eles sempre honram os dados, de maneira que após o processo de interpolação não há presença de resíduos, isto é, a interpolação sobre os locais observados vai ser igual ao próprio valor amostrado (MAZZINI; SCHETTINI, 2009). Todos os outros métodos são inexatos, ou seja, os valores interpolados diferem dos locais observados.

Para Mazzini e Schettini (2009), a classificação quanto aos métodos serem locais ou globais e exatos ou inexatos são um tanto subjetiva, pois a grande maioria dos programas de computadores mais sofisticados que possuem algoritmos para realização de interpolações (tais como Surfer da Golden Software Inc, GS+ e WinGslib, entre outros), possuem parâmetros que quando alterados para o mesmo tipo de técnica, podem modificar sua classificação, como por exemplo o número de pontos amostrais a serem utilizados dentro de uma certa vizinhança.

Estudo realizado por Lam (1983), o qual teve como objetivo realizar uma revisão sobre métodos de interpolação espacial, mostrou que vários métodos possuem vantagens e desvantagens individuais, e que a escolha de um método de interpolação depende primeiramente do tipo de dado, do grau de precisão desejada e do esforço computacional. Portanto, não existe, na literatura, um método que se sobressaia aos demais, mas deve-se determinar o melhor método para cada circunstância (LENNON; TURNER, 1995). Em outras palavras, o conhecimento do fenômeno em estudo e suas características intrínsecas irá embasar a correta interpretação ou a aplicação de um determinado método.

Um conjunto formado por 8 métodos de interpolação espacial é considerado neste estudo: *Inverse Distance Wiegthing (IDW), Modified Shepard, Natural Neighbour, Nearest Neighbour, Radial Basis Function, Kernel Smoothing, Kriging e Trend Surface Analysis*. Os métodos IDW e *Kernel Smoothing* são utilizados como ferramentas para visualização

em larga escala das variáveis de saída do modelo Century. Para a criação de uma base de dados de precipitação pluviométrica para o estado de Pernambuco os 8 métodos serão avaliados, com exceção do *kernel Smoothing*. Esses métodos são encontrados na maioria dos softwares estatísticos ou de ambiente GIS, ArcGIS (ARCGIS, 2008), Quantum GIS (QUANTUM, 2011), R (R Development Core Team, 2006) e Surfer (SURFER, 1993), como pacotes e ferramentas de análises espaciais de dados ou ferramentas geoestatísticas.

O método de interpolação espacial IDW é um dos métodos mais utilizados em análises GIS. A técnica foi proposta originalmente por Shepard (1968) e combina a ideia de proximidade exposta por Thiessen (1911) com uma mudança gradual sobre toda a superfície interpolada. A predição para algum valor não amostrado é feita usando uma combinação linear com base nos pontos amostrais em torno do ponto interpolado, atribuindo peso maior a pontos próximos e menor peso a pontos mais distante. Assim, o IDW assume que cada ponto amostral possui influência sobre o ponto interpolado e que essa influência diminui com o aumento da distância (LUO; TAYLOR; PARKER, 2008).

O peso no processo de interpolação através do IDW é controlada por um parâmetro p e, segundo Isaaks e Srivastava (1989), a precisão do método é também afetada por este parâmetro. A escolha de tal parâmetro é feita de forma arbitrária (WEBSTER; OLIVER, 2007) mas é largamente utilizado com $p = 2$, fazendo com que o método passe a ser chamado de *Inverse Distance Squared* (IDS) (GARDIMAN et al., 2012). Nos casos em que $p = 0$ e $p = 1$, o IDW é classificado como interpolador de médias móveis (LASLETT et al., 1987; HOSSEINI; GALLICHAND; CARON, 1993) e interpolador linear, respectivamente. Já para valores de $p \neq 1$ o IDW é denominado como interpolador de médias móveis ponderada (BURROUGH; MCDONNELL, 1998).

Conforme Landim (2000) as principais vantagens e desvantagens do IDW são respectivamente descritas em:

- **Vantagens** – fácil entendimento matemático; algoritmo bem conhecido e discutido; disponível em muitos softwares de ambiente GIS; baixo custo computacional; fiel aos valores amostrais originais, ou seja, não estima valores maiores ou menores que os máximos e mínimos dos dados; útil na análise de variações de pequenas amplitude (anomalias) entre dados irregularmente distribuídos; bom estimador para propósitos gerais.
- **Desvantagens** – não estima valores maiores ou menores que os valores máximos e mínimos dos dados; ruim para estimativas de dados estruturais, isto é, para determinar o topo ou a base de horizontes estratigráficos ou litológicos; difícil de obter a localização precisa de uma isolinha se os

valores amostrais não contiverem este valor; influência de valores anômalos é dificilmente removida; dados em *clusters* podem influenciar as estimativas de modo tendencioso; gera contornos concêntricos.

Os contornos concêntricos gerados pelo IDW são comumente chamados de “*bull’s eyes*” ou simplesmente como “efeito de mira”. Esta característica negativa pode ser contornada adicionando um parâmetro de suavização (TOMCZAK, 1998).

De acordo com Mazzini e Schettini (2009) a técnica de interpolação *Modified Shepard* é muito semelhante ao IDW e pode ser classificado, tanto como um interpolador exato como um interpolador suavizante. Ele distingue-se do IDW por utilizar localmente o método dos mínimos quadrados para reduzir ou eliminar o efeito de mira. O método *Modified Shepard* se trata de uma modificação do IDW (SHEPARD, 1968). Quatro novas versões do *Modified Shepard* foram propostas por Basso, Zingano e Freitas (1999), para cada uma destas versões foi avaliado o tempo de processamento e a precisão de seus resultados através de análises de imagens.

Em estudo realizado por Alves, Biudes e Vecchia (2012), o qual teve como objetivo avaliar o desempenho de diferentes métodos de interpolação para a temperatura do ar no campus de Cuiabá da Universidade Federal de Mato Grosso, ficou evidente que o método *Modified Shepard* não apresentou bons resultados, pois os padrões de distribuição da temperatura gerados pelo método foge completamente das demais técnicas, além de apresentar valores irrealistas.

O método de interpolação espacial *Kernel Smoothing* é muito utilizado para mapear e estimar a distribuição dos pontos no espaço utilizando estatística não paramétrica por meio de uma função *Kernel*. Seu objetivo é interpolar um valor de intensidade para cada célula de uma grade considerando uma função simétrica, centrada na célula, utilizando-se para o cálculo os pontos situados até certa distância do centro da célula (ALI, 1998; CARNEIRO; SANTOS, 2003).

O *Kernel Smoothing* foi concebido inicialmente por Nadaraya (1964) e Watson (1964) e tem como base o método de estimação *Kernel Density Estimation*. O *Kernel Density Estimation* representa uma técnica estatística não paramétrica, proposta por Rosenblatt (1956) e Parzen (1962), para estimar a função densidade de probabilidade de uma variável aleatória, e é bastante útil para suavização de dados provenientes de uma amostra finita, onde inferências são feitas sobre a população (GUIDOUM, 2013). O *Kernel Density Estimation* é amplamente utilizado em vários procedimentos de inferência, tais como processamento de sinais, mineração de dados e econometria (SILVERMAN, 1986; WAND; JONES, 1994; SIMONOFF, 1996; HÄRDLE, 1991; TSYBAKOV; ZAIATS, 2009).

Conforme Wand e Jones (1994), o *Kernel Smoothing* depende unicamente de dois parâmetros. Usualmente, mas nem sempre, uma função densidade de probabilidade simétrica, utilizada como a função *Kernel* na interpolação, e um parâmetro de suavização h . De acordo com Jou, Akhoond-Ali e Nazemosadat (2013), os *Kernel* Uniforme, Triangular, Guassiano, Biweight e Epanechnikov são bastante utilizados na literatura. Contudo o *Kernel* Guassiano ainda é o mais utilizado (GERVASI et al., 2008).

A escolha do parâmetro de suavização, também chamado de largura da banda (*bandwidth*) ou janela (*window width*), controla o raio de abrangência em torno do ponto amostral no qual será aplicado a função *Kernel*. O parâmetro de suavização possui efeito fundamental na interpolação, pois tem papel determinante na variabilidade e no viés da interpolação. Se o valor de h escolhido for pequeno, a interpolação terá um viés reduzido mas uma variabilidade elevada. Por outro lado, se o valor de h for grande, a estimativa terá um viés elevado mas pequena variabilidade (MARQUETTI; VIALI, 2004).

De acordo com Marquetti e Viali (2004), a escolha ideal seria uma banda diferente para cada ponto amostral, levando em consideração a densidade dos pontos no local. Entretanto, fazer isto na prática é muito complexo. Assim, uma primeira decisão é a escolha entre um valor de h global, ou seja, que sirva para todos os pontos amostrais. A escolha mais simples é considerar o parâmetro de suavização constante. Este procedimento é satisfatório nos casos em que a variável independente possui uma distribuição uniforme. O principal problema desta abordagem é o caso das vizinhanças vazias, ou quando a interpolação envolve mais de uma dimensão. Uma segunda abordagem é a opção por uma banda local, que pode ser escolhida de forma a sempre conter um número específico de pontos e que resolve o problema das vizinhanças vazias.

O *Kernel Smoothing* foi recentemente aplicado (BARBOSA et al., 2014) na construção da estimativa contínua da densidade espaço-temporal da chuva para região Nordeste, para período de 1904-1998. Devido a grande massa de dados, 26 milhões de medidas de precipitação pluvial extraídas de 2.283 estações meteorológicas, tal aplicação se tornou possível devido aos avanços revolucionários de hardware para processamento em paralelo, GPGPU (*General Purpose computing on Graphics Processing Units*). Por meio do mapeamento tornou-se possível ter uma visão geral da distribuição da chuva em escala espacial e temporal, estabelecendo-se assim base para estudos futuros da dinâmica da chuva.

Um dos métodos bastante influentes no campo da geoestatística é o *Kriging*. Tal técnica leva em conta a dependência espacial entre os pontos amostrais para estimar valores em qualquer posição dentro da região a ser interpolada, tomando como base a correlação espacial entre as observações vizinhas, sem tendência e com variância mínima, isto é, são estimadores ótimos e com grande potencial para o estudo da distribuição da

precipitação pluvial (SILVA; LIMA; BOTTEGA, 2011).

O grau de dependência ou correlação espacial entre os pontos amostrais no método *Kriging* é avaliada através da semivariância. Uma vez que o semivariograma tenha sido ajustado a um modelo de variograma teórico, é possível verificar o nível de anisotropia dos dados, e então definir os melhores pesos para as amostras na interpolação (CRESSIE, 1991). Segundo Mazzini e Schettini (2009) o *Kriging* pode ser classificado como interpolador exato ou suavizador. Esta metodologia ainda tenta expressar tendências sugeridas pelos dados, como por exemplo, pontos de elevada altitude ao longo de uma cadeia montanhosa, ao invés de gerar contornos concêntricos.

O *Kriging* tem sido utilizado por muitos autores no estudo da distribuição espacial de precipitação pluvial (TABIOS; SALAS, 1985; PHILLIPS; DOLPH; MARKS, 1992; CARVALHO; ASSAD, 2005; AMORIM et al., 2008; VIOLA et al., 2010; BOSTAN; HEUVELINK; AKYUREK, 2012; FERNANDES; CARVALHO, 2013). Quanto ao uso do modelo de variograma teórico, Sartori et al. (2010) utilizaram o variograma esférico para estudar a variabilidade temporal da temperatura do ar, precipitação pluviométrica e umidade relativa do ar na cidade de Botucatu-SP. Pesquisa realizada por Junior et al. (2012) utilizando o método *Kriging*, também com o variograma esférico, obtiveram melhor representação da distribuição espacial da precipitação pluvial média mensal na bacia do rio Itapemirim-ES, quando comparado com o métodos IDW, Spline regularizada e *Topo to Raster*.

A interpolação pelo método *Trend Surface Analysis*, muitas vezes chamado de polinomial, se dá por uma expansão polinomial das coordenadas geográficas dos pontos amostrais. Os coeficientes do polinômio são encontrados pelo método dos mínimos quadrados, assegurando que a soma dos desvios quadrados a partir da superfície tendência é minimizada. Cada observação original é considerada como sendo a soma de uma função polinomial determinística das coordenadas geográficas mais um termo aleatório de erro. Uma vez que os coeficientes tenham sido estimados, a função polinomial pode ser avaliada em qualquer ponto dentro área de estudo (LUO; TAYLOR; PARKER, 2008).

Recentemente tal metodologia foi empregada por Gomes et al. (2015) como ferramenta para realizar uma análise comparativa da precipitação média mensal no estado de Paraíba. Os resultados obtidos apontaram que as regressões polinomiais que melhor se ajustaram aos dados observados foram as superfícies de 3º e 4º grau. Os autores ainda apontam o método como uma ferramenta promissora na estimativa da precipitação mensal no estado da Paraíba.

O método *Natural Neighbour* foi desenvolvido originalmente por Sibson (1981), baseando-se no conceito de área de influência dos pontos amostrais, obtida através do di-

agrama de Voronoi (VORONOÏ, 1908). Para cada ponto a ser interpolado, é calculado o peso de cada ponto amostral com base na área proporcional, em vez da distância (HOFS-TRA et al., 2008). Para avaliar as condições climáticas do modelo Eta CPTEC/HadCM3 na bacia do Ijuí-RS, a metodologia *Natural Neighbour*, foi aplicada por Oliveira, Pedrollo e Castro (2015) como ferramenta para realizar a interpolação espacial dos dados climáticos, sendo esta uma das etapas necessárias para realizar a avaliação.

A técnica *Nearest Neighbour* atribui o valor do ponto mais próximo para cada local a ser interpolado. De acordo com Mazzini e Schettini (2009) esta metodologia mostra-se bastante útil para preenchimento de lacunas nos dados. Pereira et al. (2014) utilizaram o Diagrama de Taylor para analisar 15 diferentes métodos de interpolação espacial, em área com cultivo comercial de eucalipto, para comparação e escolha do melhor método de interpolação de um conjunto de valores da fração granulométrica do solo. Dentre os 15 métodos notou-se o método *Nearest Neighbour* como um dos menos adequados para o objetivo proposto.

O método *Radial Basis Function* é um conjunto de métodos de interpolação exatos. A maioria dos métodos são derivações de Spline e, segundo Mazzini e Schettini (2009), o método *Multiquadric* é considerado como padrão no programa Surfer, (SURFER, 1993), pois é o melhor na maioria dos casos. Araujo et al. (2015) obtiveram que os métodos de interpolação *Radial Basis Function* e IDW apresentaram as melhores estimativas, quando comparados com os métodos *Kriging* (variograma esférico), interpolação polinomial global e local, para a espacialização da precipitação total anual na bacia do rio Piquiri-PR.

4 Metodologia

4.1 Caracterização da área

O estado de Pernambuco situa-se no Nordeste brasileiro entre os paralelos $7^{\circ} 18' 17''$ e $9^{\circ} 28' 43''$ de latitude Sul e os meridianos de $34^{\circ} 48' 15''$ e $41^{\circ} 21' 22''$ de longitude a Oeste. Especificamente, o estado de Pernambuco limita-se ao Norte, com o Ceará e a Paraíba; a Oeste, com o Piauí; ao Sul, com Bahia e Alagoas; a Leste, com o Oceano Atlântico. O Pernambuco apresenta uma área total de 98281 km^2 constituída por 184 municípios, divididos em três grandes regiões geoeconômicas: Litoral/Zona da Mata, Agreste e Sertão/São Francisco. O território pernambucano é subdividido em cinco mesorregiões: Sertão do São Francisco, Sertão, Agreste, Zona da Mata e Região Metropolitana do Recife (SILVA; QUELUZ; KLAR, 2013). De acordo com Silva et al. (2011) a posição geográfica, vegetação e topografia de Pernambuco oferecem condições climáticas diversificadas.

4.2 Dados

O conjunto de informações utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho constam de duas bases de dados, sendo ambas efetivamente relacionadas ao estado de Pernambuco. A primeira base de dados são os arquivos necessários para a execução do modelo Century e conseqüentemente as múltiplas simulações através da interface WinCent. A segunda base de dados é formada por informações georreferenciadas de precipitação pluviométrica que são utilizadas como alicerce na construção de um programa para acesso e visualização espacialmente explícita da precipitação mensal para o estado de Pernambuco. Ambas as informações estão detalhadamente descritas nas seções 4.2.1 e 4.2.2, respectivamente.

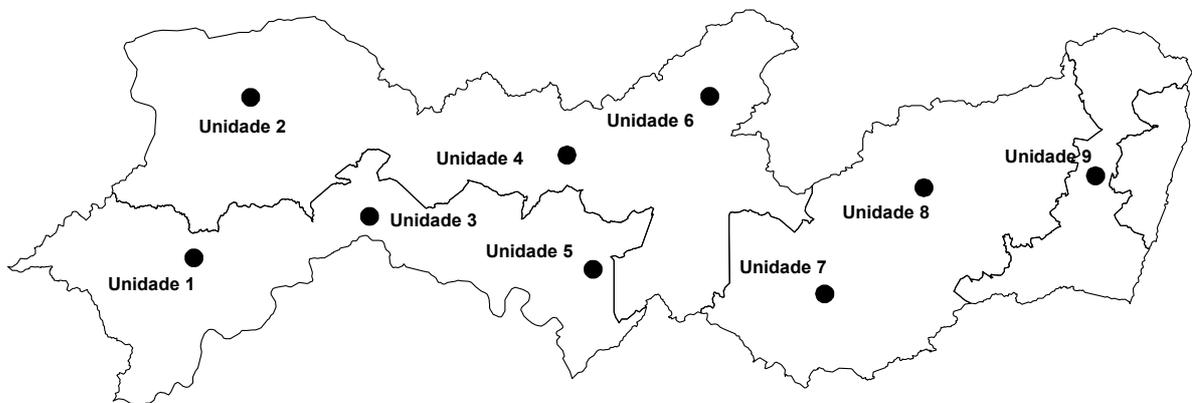
4.2.1 Base de dados utilizada no modelo Century 4.5

Os dados utilizados para testar a interface WinCent constam dos arquivos de agendamentos e sítios presentes na instalação do modelo Century. Mais precisamente são nove arquivos de agendamento (`aridsl.sch`, `boreal.sch`, `tconif.sch`, `tundra.sch`, `tdecid.sch`, `tsavan.sch`, `c3grs.sch`, `tropeg.sch` e `c4grs.sch`) com seus respectivos arquivos de sítio (`aridsl.100`, `boreal.100`, `tconif.100`, `tundra.100`, `tdecid.100`, `tsavan.`

100, c3grs.100, tropeg.100 e c4grs.100), totalizando assim nove pontos para execução do modelo e aqui definidos como unidades de simulação. Estas nove unidades de simulação foram identificadas com os nomes de “Unidade 1”, “Unidade 2”, “Unidade 3”, “Unidade 4”, “Unidade 5”, “Unidade 6”, “Unidade 7”, “Unidade 8”, “Unidade 9”, as quais correspondem aos arquivos de sítio e agendamento.

O total de nove unidades de simulação possuem agendamentos variando entre os anos de 1 a 2000 (5 unidades) e de 1 a 2001 (4 unidades). A descrição detalhada de cada arquivo é mostrado nas Tabelas 8 a 16 presentes no Apêndice A. As nove unidades de simulação foram georreferenciadas aleatoriamente nas coordenadas (-40.015,-7.762), (-40.330,-8.658), (-39.358,-8.426), (-38.263,-8.084), (-38.120,-8.720), (-37.476,-7.755), (-36.840,-8.857), (-36.292,-8.268), (-35.341 -8.200) e espacialmente distribuídas sobre o *shape file*² correspondente à delimitação geográfica do estado de Pernambuco. A disposição geográfica das nove unidades de simulação está apresentada na Figura 2.

Figura 2 – Distribuição espacial das unidades de simulação sobre o *shape file* que corresponde ao estado de Pernambuco.



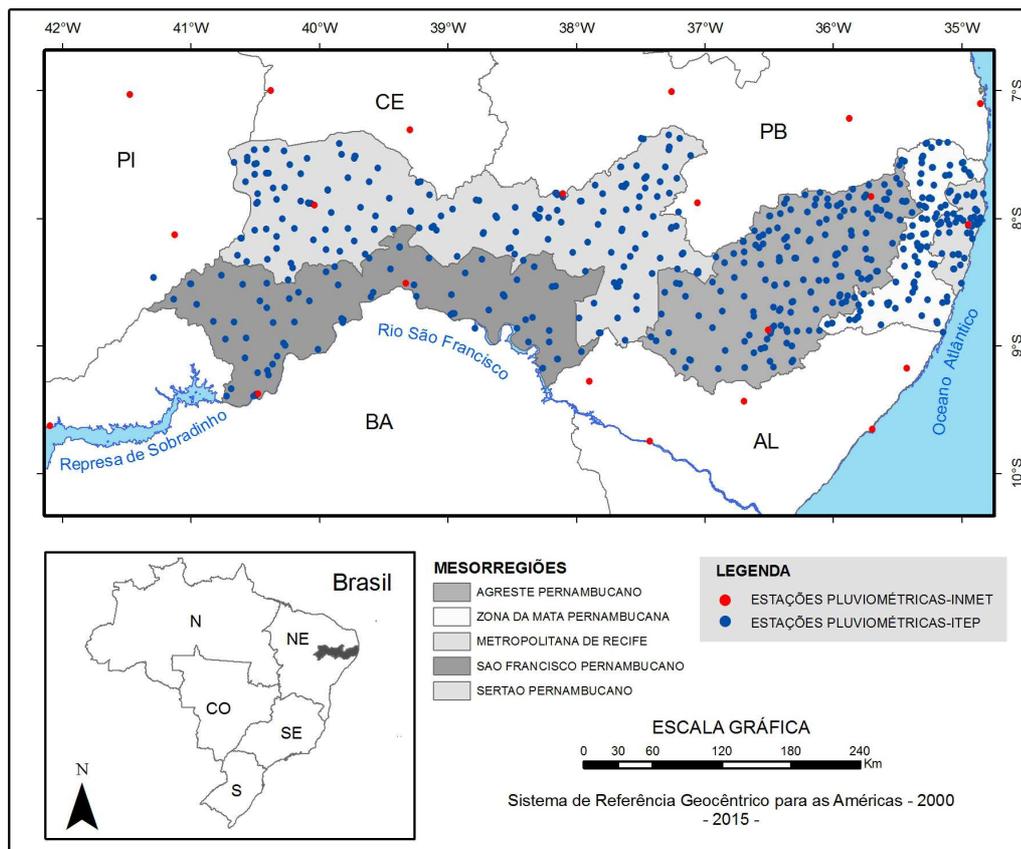
A escolha de um arquivo *shape file* fará parte das adaptações feitas no modelo Century e será utilizado como arquivo de entrada necessário para mostrar a área de delimitação da dinâmica espacialmente explícita, a qual se baseia nos resultados previamente fornecidos pelo modelo Century e pelos métodos de interpolação.

²O “shape file” é um tipo de arquivo digital que representa uma feição ou elemento gráfico, seja ela em formato de ponto, linha ou polígono e que contém uma referência espacial (coordenadas geográficas) de qualquer que seja o elemento mapeado (SEMACE, 2015).

4.2.2 Base de dados utilizada no mapeamento da precipitação pluvial para Pernambuco

Os dados utilizados neste trabalho são séries históricas de precipitação mensal para o estado de Pernambuco cedidas pelo Instituto de Tecnologia de Pernambuco - ITEP (ITEP, 2014), assim como séries históricas diárias de precipitação obtidas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), disponíveis para download através do endereço eletrônico <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Para as séries de precipitação diárias disponibilizadas pelo INMET foram calculadas as precipitações mensais, ou seja, a precipitação acumulada mensal. A disposição espacial das estações pluviométricas cedidas pelo ITEP e as disponibilizadas pelo INMET estão representadas na Figura 3 por círculos em azul (●) e círculos em vermelho (●), respectivamente.

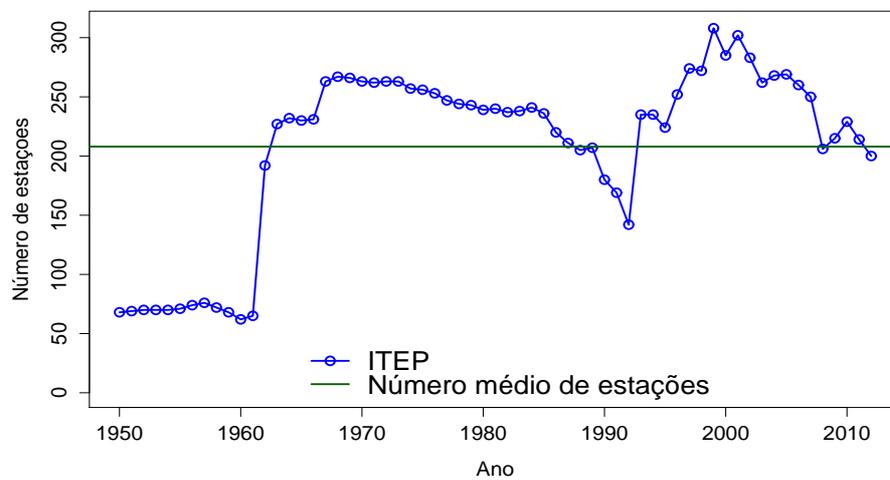
Figura 3 – Localização do estado de Pernambuco e a disposição espacial georreferenciada das estações pluviométricas do ITEP (●) e do INMET (●) situadas no interior e no contorno Pernambucano.



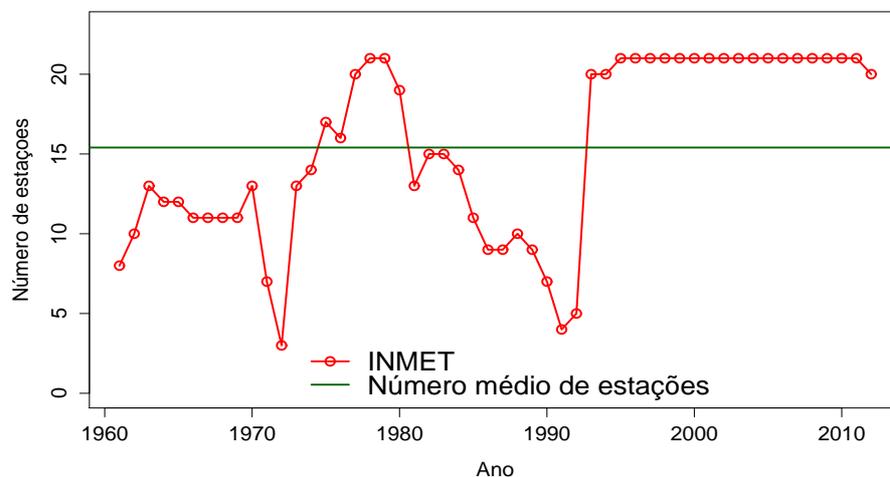
As séries de precipitação mensal cedidas pelo ITEP são registros datados durante o período de 1950 a 2012 obtidos através de estações pluviométricas distribuídas sobre o estado de Pernambuco. A quantidade de estações variam de acordo com o ano, podendo

um ano específico assumir um total entre 68 e 308 estações. As séries disponibilizadas pelo INMET são registros de precipitação diária coletados e selecionados entre os anos de 1961 e 2012, totalizando 21 estações localizadas no contorno (14 estações) e no interior (7 estações) do estado de Pernambuco. Na Figura 4 está representado através de gráfico de linhas, em função do ano, o número total de estações e o número médio de estações para o ITEP (Figura 4(a)) e para o INMET (Figura 4(b)).

Figura 4 – Total anual e o número médio de estações pluviométricas para o ITEP (a) no estado de Pernambuco e para o INMET (b) em Pernambuco e estados vizinhos.



(a)



(b)

Conforme a Figura 4(a), observa-se que o número médio de estações cedidas pelo ITEP é igual a 207, sendo que os anos correspondentes aos períodos de 1963 a 1987 e 1993 a 2011 possuem um número de estações acima da média. Por outro lado, o número médio

de estações disponibilizadas pelo INMET no interior e contorno de Pernambuco é igual a 15, destacando-se os anos de 1975 a 1980 e 1993 a 2012 como os períodos onde encontra-se um número de estações superior a média do número de estações (Figura 4(b)).

Visando a construção da base de dados de precipitação mensal para o estado de Pernambuco, foram inicialmente agrupadas as informações de precipitação mensal cedidas pelo ITEP e os registros de precipitação diária disponibilizadas pelo INMET em uma única base de dados. Esta nova base de dados soma um total de 329 estações distribuídas sobre o interior e o contorno do estado de Pernambuco e compreende o período de 1950 a 2012, podendo um ano específico conter um número mínimo de 62 e máximo de 329 estações, com média anual igual a 220 estações pluviométricas

A metodologia apresentada a seguir é formada por quatro etapas. Na primeira etapa (seção 4.3) é detalhada a estrutura computacional do modelo Century 4.5 e os esforços empregados na adaptação de seu código fonte para a execução de múltiplas simulações, assim como o desenvolvimento da interface WinCent (Windows Century). A segunda etapa (seção 4.4) trata da concepção da interface WinPreci (Windows Precipitation) e das funcionalidades necessárias para acesso de séries históricas de dados de precipitação e visualização espacialmente explícita destas. Na terceira etapa (seção 4.5) está apresentado em detalhes um conjunto formado por 8 métodos de interpolação espacial para dados georreferenciados, sendo estes necessários tanto para as adaptações realizadas no modelo Century quanto para a criação da interface WinPreci. Vale ainda informar que somente os métodos *Inverse Distance Weighting* e *Kernel Smoothing* fazem parte das adaptações inseridas no modelo Century, adicionados como ferramentas para produzir a visualização e análise em larga escala das variáveis de saída do modelo Century. Os demais métodos, com exceção da técnica *Kernel Smoothing*, serão julgadas através das medidas de avaliação de desempenho descritas na seção 4.6 (quarta etapa), visando posteriormente criar uma base de dados, a partir do método que apresentar melhor desempenho, para ser empregada como meio de obtenção e visualização da precipitação mensal utilizando-se a interface WinPreci.

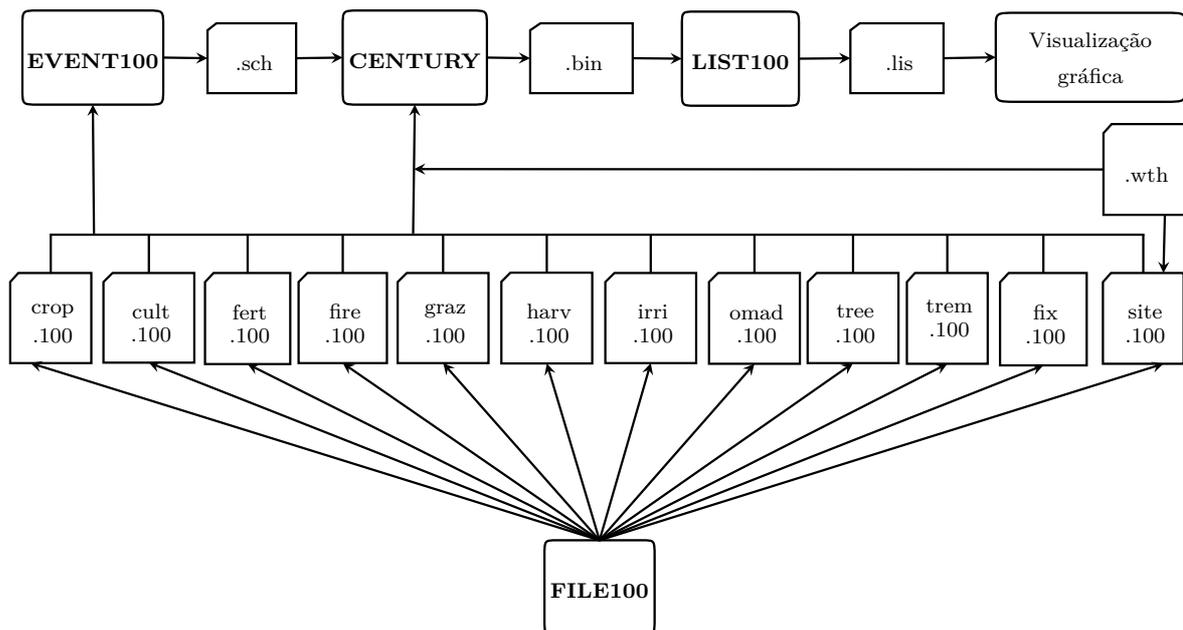
4.3 Windows Century

4.3.1 Adaptação do modelo Century 4.5 para modelagem espacialmente explícita

4.3.1.1 Estrutura computacional do modelo Century 4.5

O modelo Century 4.5 foi escrito em linguagem FORTRAN e funciona como um programa executável em ambiente MS-DOS (*MicroSoft Disk Operating System*), requerendo arquivos ASCII como arquivos de entrada e produzindo arquivos binários como arquivos de saída. O algoritmo para execução de uma simulação pelo modelo Century 4.5 é mostrada na Figura 5. Esta versão do modelo possui a mesma estrutura que a versão 4.0 do modelo Century, disponível para download em NREL (2000).

Figura 5 – Estrutura computacional do modelo Century 4.5 mostrando a interação entre programas e arquivos.



Fonte: adaptado de Metherall et al. (1993).

A estrutura computacional do modelo Century é constituída de doze arquivos *.100, de um arquivo de clima (*.wth), dos utilitários ou programas auxiliares FILE100, EVENT100 e LIST100, do executável CENTURY e de um software independente para visualização de gráficos e análise de resultados. As simulações são realizadas inicialmente por meio dos utilitários FILE100 e EVENT100 para fornecer arquivos de entrada ASCII e

posteriormente pelo utilitário LIST100 para converter arquivos binários (*.bin) gerados pelo CENTURY em arquivos ASCII.

O utilitário FILE100 funciona como um gerenciador de arquivos e é designado para editar, 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), parâmetros fixos (fix.100) e sítio (site.100).

Cada um dos arquivos *.100 é composto por um conjunto de variáveis de entrada, sendo particularmente o arquivo referente as unidades de simulação (site.100) constituído pelas variáveis relacionadas ao clima médio, ao controle da simulação e dos parâmetros de sítio, aos parâmetros de entrada de nutrientes externos, aos valores iniciais de matéria orgânica, aos parâmetros iniciais de matéria orgânica florestal, aos parâmetros iniciais de nutrientes na forma mineral e aos parâmetros iniciais de umidade do solo.

O utilitário EVENT100 funciona como um pré-processador para o programa CENTURY, sendo destinado a programação de eventos, agendamento de culturas, especificação do período inicial e final da simulação e é responsável pela criação de um arquivo ASCII de agendamento com extensão *.sch exigido pelo CENTURY. A escolha de parâmetros climáticos também é função do EVENT100 e são referenciados utilizando uma das seguintes codificações (letras):

- M – parâmetros climáticos de precipitação média mensal e temperaturas médias mensais lidos no arquivo de sítio (site.100);
- S – parâmetros climáticos de temperatura e precipitação gerados estocasticamente a partir do arquivo de sítio;
- F – parâmetros climáticos de precipitação acumulada e temperatura média lidos no arquivo de clima (*.wth);
- C – continuar utilizando o arquivo de clima (*.wth) atual sem necessitar reiniciá-lo.

O arquivo de agendamento obtido por meio do EVENT100 é construído sobre blocos que permitem agendar a rotação de culturas e manipular eventos durante o período de simulação. Estes blocos são gerados em ambiente MS-DOS através de uma grade que possibilita a escolha mensal, semestral ou anual (inicial/final) para o crescimento de culturas e árvores, tipo de colheita, mês de senescência, cultivo, adição de fertilizantes ou matéria orgânica, irrigação, pastejo, remoção a base de fogo, remoção de floresta e erosão.

O programa CENTURY é o utilitário encarregado de executar a simulação do modelo Century. Para isto, ele utiliza os arquivos de clima (opcional), agendamento e manejo gerados respectivamente pelos utilitários EVENT100 e FILE100, retornando então um arquivo de saída binária que contém resultados para 495 variáveis de saída.

O arquivo binário gerado pelo CENTURY é convertido em um arquivo ASCII (*.lis) utilizando-se o utilitário LIST100. Este utilitário permite informar um período específico entre o tempo final e inicial da simulação e escolher as variáveis de interesse, podendo estas serem visualizadas em softwares independentes.

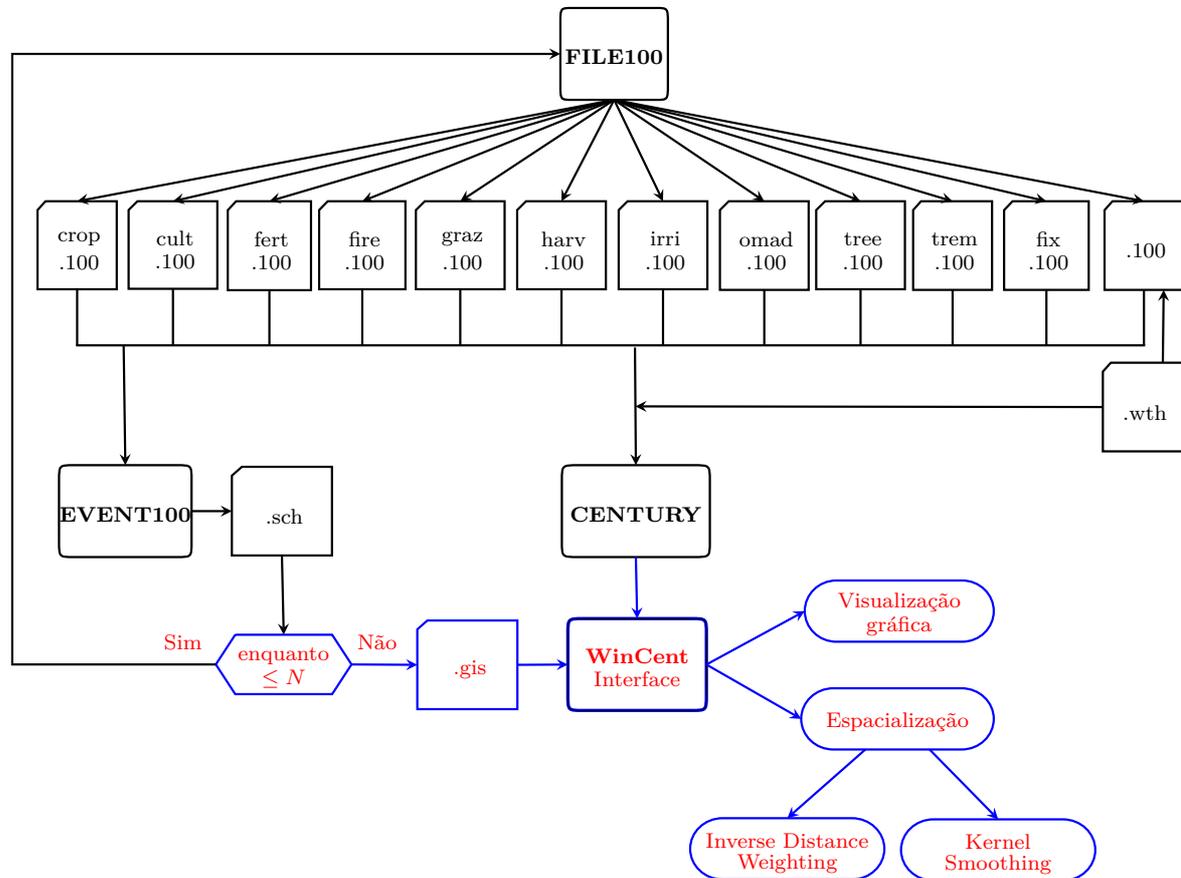
Portanto, pode-se resumir os passos para execução de uma simulação por meio do modelo Century em:

- I. utilizar o programa auxiliar FILE100 para atualizar valores ou criar novas opções em qualquer um dos doze arquivos *.100;
- II. utilizar o programa auxiliar EVENT100 para estabelecer um período de simulação e agendar eventos que venham a ocorrer durante a simulação;
- III. utilizar o programa CENTURY para realizar a simulação;
- IV. utilizar o programa auxiliar LIST100 para escolher as variáveis de saída de interesse e um período específico durante o período de simulação.

4.3.1.2 Estrutura computacional para a interface WinCent

A fim de implementar a modelagem espacialmente explícita integrou-se o programa CENTURY e o administrador LIST100 em uma única *Graphical User Interface* (GUI) para Windows denominada WinCent (abreviação para “Windows Century”). A interface WinCent desenvolvida permite a escolha de um *shape file* e é capaz de realizar múltiplas simulações bem como uma posterior análise das simulações através de um processo interativo de gráficos e geração de mapas. A estrutura computacional para execução de simulações através do WinCent é mostrada na Figura 6 e se assemelha a estrutura computacional do modelo Century mostrada na Figura 5, no sentido que ainda se faz uso dos programas auxiliares FILE100 e EVENT100.

Figura 6 – Relação entre programas e a interface WinCent.



Fonte: adaptado de Parton et al. (1993).

A esta nova estrutura foi somada um arquivo auxiliar de extensão *.gis, a interface WinCent e as saídas de visualização gráfica e espacialização (IDW e *Kernel Smoothing*). O arquivo *.gis contém informações sobre as unidades de simulação e suas respectivas coordenadas geográficas (longitude e latitude), como descrito na Tabela 1.

Tabela 1 – Formatação do arquivo auxiliar *.gis.

Nome	Longitude	Latitude ^a
Unidade 1	-40.015	-7.762
Unidade 2	-40.330	-8.658
Unidade 3	-39.358	-8.426
Unidade 4	-38.263	-8.084
Unidade 5	-38.120	-8.720
Unidade 6	-37.476	-7.755

Continua na próxima página

Tabela 1 – *Continuação da página anterior*

Nome	Longitude	Latitude ^a
Unidade 7	-36.840	-8.857
Unidade 8	-36.292	-8.268
Unidade 9	-35.341	-8.200

^a A formatação do arquivo não inclui o cabeçalho e as colunas são separadas por tabulação.

A interface WinCent foi construída usando API's para Windows (*Application Programming Interface* ou simplesmente Interface de Programas de Aplicativos, inerente a todo sistema operacional Windows). Para isto, o código fonte do modelo Century foi levemente modificado de forma que o algoritmo em Fortran possa ser chamado como uma subrotina (ou melhor, como uma função *void*) a partir do código implementado em linguagem C. Blocos de códigos em Fortran para leitura/escrita foram exportados e são acessados no código em C como estruturas globais externas, permitindo operações de entrada/saída serem externamente ativada ou desativada.

Objetivando manter na memória os resultados para um grande número de simulações, foi reduzido o conjunto de 495 variáveis de saída à um subconjunto formado por 23 variáveis (julgadas serem as mais importantes no que diz respeito as práticas de plantio, cultivo e sistemas florestais): *agcacc*, *aglivo*, *aglivo(1)*, *bgcacc*, *bglivo*, *bglive(1)*, *cgrain*, *crootc*, *crmvt*, *fbrchc*, *fcacc*, *frootc*, *frstc*, *rleavc*, *rlwode*, *som1c(1)*, *som2c*, *som3c*, *somsc*, *somtc*, *stemp*, *tave* e *woodc*. Evidentemente, a escolha está sujeita a alterações, tendo em vista interesses particulares e/ou capacidade de armazenamento. Os detalhes (variável de saída, unidade de medida e definição) estão descritos na Tabela 2 para cada uma das variáveis selecionadas.

Tabela 2 – Subconjunto formado pelas 23 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 o período de crescimento.
<i>aglivo</i>	g/m^2	C na parte aérea viva para pastagem/cultura.
<i>aglivo(1)</i>	g/m^2	N na parte aérea viva para pastagem/cultura.

Continua na próxima página

Tabela 2 – Continuação da página anterior

Variáveis de saída	Unidade de medida	Definição
<i>bgcacc</i>	g/m^2	Produção de C acumulado nas raízes para pastagem/cultura durante o período de crescimento.
<i>bglive</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>crmvt</i>	g/m^2 ao ano	Quantidade de C removido através da palha durante a colheita de pastagem/cultura.
<i>fbrhc</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 ($rleavc+frootc+fbrhc+rlwodc+crootc$).
<i>rleavc</i>	g/m^2	C no sistema florestal para o compartimento 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 ($som1c+soms2c+soms3c$).
<i>somtc</i>	g/m^2	C total do solo, incluindo os compartimentos estrutural e metabólico abaixo da superfície.
<i>stemp</i>	$^{\circ}C$	Temperatura média do solo.
<i>tave</i>	$^{\circ}C$	Temperatura média do ar.
<i>wodc</i>	g/m^2	Total de C nos componentes mortos do sistema florestal.

Uma vez que todas as simulações tenham sido realizadas e que todos os dados tenham sido armazenados na memória, os métodos de interpolação *Inverse Distance Weighting* e *Kernel Smoothing* implementados (seções 4.5.1 e 4.5.6), permitirão a visualização espacialmente explícita da variável selecionada em mapas em intensidade de cores, para diferentes períodos.

4.4 Windows Precipitation

4.4.1 Desenvolvimento e funcionalidade da interface WinPreci

O programa para visualização espacialmente explícita e acesso a séries históricas de precipitação pluviométrica mensal do estado de Pernambuco foi desenvolvido em linguagem de programação C, com interface gráfica (Graphical User Interface – GUI) desenvolvida utilizando API's (Application Programming Interface) do Windows, denominada Windows Precipitation (WinPreci). O ambiente para desenvolvimento utilizado é o Visual Studio da Microsoft.

A construção do programa foi realizada tomando como suporte uma base integrada de dados de precipitação pluviométrica mensal, de 1950 a 2012, resultante da aplicação e avaliação dos métodos de interpolação *Inverse Distance Weighting*, *Modified Shepard*, *Natural Neighbour*, *Nearest Neighbour*, *Radial Basis Function*, *Kriging* e *Trend Surface Analysis* apresentados na seção 4.5.

Especificamente, o algoritmo implementado realiza a leitura dessa base de dados, assim como possui trechos de códigos para desenvolvimento de uma janela (interface gráfica) para visualização espacialmente explícita, com mapa codificado em intensidade de cores (utilizado o modelo RGB³ que define o vermelho como cor de menor intensidade, verde como cor de intensidade intermediária ou moderada e o azul como cor de maior intensidade) da precipitação mensal do estado de Pernambuco e códigos para construção da interface WinPreci (caixa de diálogo), com campos para localização (geográfica e municipal), período da série histórica e ajustes visuais com as seguintes características:

- interação simultânea da localização geográfica (aproximadamente 1km) e municipal (184 municípios) através da janela de visualização ou campos na interface WinPreci;
- interação período (ano e mês) com ajuste gráfico de escala (fixa – valor máximo da série histórica ou móvel – valor máximo de precipitação indicado pelo usuário);
- geração de séries históricas de precipitação obtida através da interação entre a janela de visualização e a interface WinPreci em um arquivo de formato ASCII (arquivo com extensão *.dat), padrão para acesso em softwares gerenciadores de banco de dados, como por exemplo o Microsoft Excel.

³A abreviatura RGB (*Red*, *Green*, *Blue*) representa o método de cores utilizado nos monitores, que fazem uso das cores Vermelho, Verde e Azul para compor imagens coloridas no computador.

4.5 Métodos de interpolação espacial

4.5.1 Inverse Distance Weighting

O *Inverse Distance Weighting* (IDW) é um método determinístico para estimação ou interpolação de dados proposto por Shepard (1968) e pressupõe que quanto mais distante um local observado estiver do estimado menor será seu peso, isto é, menor será sua influência sobre o valor interpolado. Sua expressão usual é dada por

$$F(x, y) = \sum_{k=1}^N W(x_k, y_k) F(x_k, y_k), \quad (13)$$

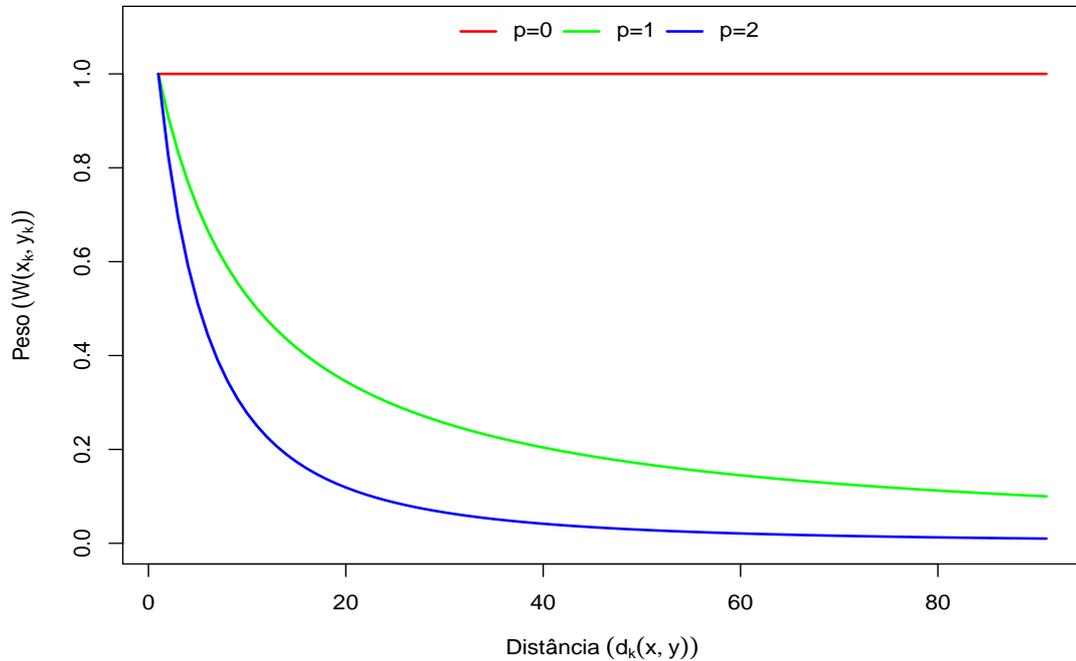
em que $F(x, y)$ é o valor interpolado para a coordenada (x, y) , N é o número de pontos observados na vizinhança do local interpolado, $F(x_k, y_k)$ é o valor observado no ponto k e $W(x_k, y_k)$ são os pesos atribuídos a cada uma das localidades. A expressão para determinar a função peso é a seguinte

$$W(x_k, y_k) = \frac{d_k(x, y)^{-p}}{\sum_{i=1}^N d_k(x, y)^{-p}}. \quad (14)$$

Onde a quantidade $d_k(x, y) = \sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2}$ é a distância entre a coordenada interpolada (x, y) e cada um dos locais observados (x_k, y_k) (a distância pode ser obtida utilizando o sistema de coordenadas esféricas) e $\sum_{k=1}^N W(x_k, y_k) = 1$. Observe que, ao passo que a distancia aumenta os pesos diminuem potencialmente. Assim, quando o parâmetro p aumenta, menor será a influência dos pontos mais distantes sobre o interpolado. Inversamente, quanto menor for o valor de p , maior será a influência dos pontos mais próximos.

Observe ainda que, se $p = 0$ não há diminuição ou aumento do peso com a distância (Figura 7) pois cada λ_i terá a mesma influência sobre os valores interpolados; se $p = 1$, esta é uma simples interpolação linear entre os pontos; se $p = 2$, haverá uma forte influência para pontos mais próximos e uma leve influência para pontos mais distantes (LU; WONG, 2008).

Figura 7 – Função dos pesos ($p = 0, 1$ e 2) com relação a distância.



Baseado na estrutura da expressão do IDW, a escolha do peso p (Equação 13) pode afetar significativamente o resultado da interpolação. A comparação de pesos específicos pode ser encontrado nos trabalhos de Kravchenko e Bullock (1999), Cecílio e Pruski (2003) e Vicente-Serrano et al. (2003).

O método IDW é caracterizado pelo fato de ser um interpolador exato e pela geração de *bull's eyes* (também conhecido como efeito de mira) que ocorrem na forma de círculos concêntricos ao redor dos pontos de amostragem (BAKKALI; AMRANI, 2008), os quais se devem a função peso (Equação (14)). Contudo, um parâmetro de suavização pode ser atribuído ao IDW para reduzir o efeito de mira e suavizar a superfície interpolada (TOMCZAK, 1998).

4.5.2 Shepard Modified

O método de *Shepard Modified* foi desenvolvido por Franke e Nielson (1980) e trata-se de uma modificação no método IDW com o objetivo de eliminar o efeito de mira em torno dos pontos amostrais (GUMUS; SEN, 2013). A Interpolação é construída através de uma função nodal ajustada pelo método dos mínimos quadrados e uma modificação na

função peso definida na Equação (14). A expressão geral é dada pela seguinte expressão

$$F(x, y) = \frac{\sum_{k=1}^N W_k(x, y) Q_k(x, y)}{\sum_{k=1}^N W_k(x, y)}, \quad (15)$$

onde $F(x, y)$ é o valor interpolado para a coordenada (x, y) , $Q_k(x, y)$ é uma função nodal e $W_k(x, y)$ é a função peso sugerida por Franke e Nielson (1980) e utilizada por Renka (1988), definida como

$$W_k(x, y) = \left\{ \frac{[R_W - d_k(x, y)]_+}{R_W d_k(x, y)} \right\}^2, \quad (16)$$

com

$$[R_W - d_k(x, y)]_+ = \begin{cases} R_W - d_k(x, y), & d_k(x, y) < R_W \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (17)$$

Onde $d_k(x, y)$ é a distância Euclidiana entre o ponto interpolado (x, y) e o k -ésimo ponto amostral (x_k, y_k) , $R_W > 0$ é o raio de influência sobre o ponto (x_k, y_k) .

A função nodal $Q_k(x, y)$ é uma função quadrática bivariada, embora também possa ser representada por uma função polinomial ou trigonométrica (MCLAIN, 1974), obtida pelo método dos mínimos quadrados minimizando os coeficientes a_{kj} , isto é

$$\min_{a_{kj}, j=2, \dots, 6} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^N w_i(x_k, y_k) \left[F_k + a_{k2}(x_i - x_k) + a_{k3}(y_i - y_k) + a_{k4}(x_i - x_k)^2 \right. \\ \left. + a_{k5}(x_i - x_k)(y_i - y_k) + a_{k6}(y_i - y_k)^2 - F_i \right]^2 \quad (18)$$

com pesos

$$w_k(x, y) = \left\{ \frac{[R_Q - d_k(x, y)]_+}{R_Q d_k(x, y)} \right\}^2, \quad (19)$$

onde R_Q denota o raio de influência dos pontos amostrais sobre a função nodal e $[R_Q - d_k(x, y)]_+$ é definido de forma análoga a Equação (17). Os raios R_W e R_Q são definidos por Franke e Nielson (1980) de acordo com as relações

$$R_W = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{N_W}{N}} \quad \text{e} \quad R_Q = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{N_Q}{N}}, \quad (20)$$

onde $D = \max_k d_k(x, y)$ e N é o número total de amostras. Os valores N_W e N_Q podem ser interpretados como uma representação do número de pontos amostrais dentro dos círculos de raios R_W e R_Q , respectivamente. Os valores recomendados por Renka (1988) para tais parâmetros são $N_Q = 13$ e $N_W = 19$.

4.5.3 Natural Neighbour

O método de interpolação *Natural Neighbour* é uma técnica de interpolação introduzida por Sibson (1980, 1981) e utiliza uma média ponderada baseada na proporção das áreas em torno de cada ponto amostral. Estas áreas são determinadas por meio da geração de diagramas de Voronoi em volta de cada ponto.

A ideia do diagrama de Voronoi (VORONOÏ, 1908) constitui-se da divisão de determinada região em um conjunto de sub-regiões formando assim polígonos convexos, em que cada sub-região está associada a um ponto. Mais precisamente, cada sub-região (também chamada de polígono de Voronoi ou de Thiessen) é formada por um ponto gerador que contém todos os pontos que estão mais próximos do ponto gerador do que qualquer outro ponto (LEDOUX; GOLD, 2005). Conforme Sibson (1980) e Kolahdouzan e Shahabi (2004), o polígono e diagrama de Voronoi podem ser formalmente definidos como:

Considere um conjunto de pontos geradores $N = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\} \subset \mathbb{R}^2$ com $2 < n < \infty$ e $(x_i, y_i) \neq (x_j, y_j)$ para todo $i \neq j$ e $i, j \in I_n = \{1, 2, \dots, n\}$, correspondentes às coordenadas dos pontos amostrais. A região dada por

$$\mathcal{V}_i = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : d_i(x, y) < d_j(x, y), \quad \text{para } i \neq j\} \quad (21)$$

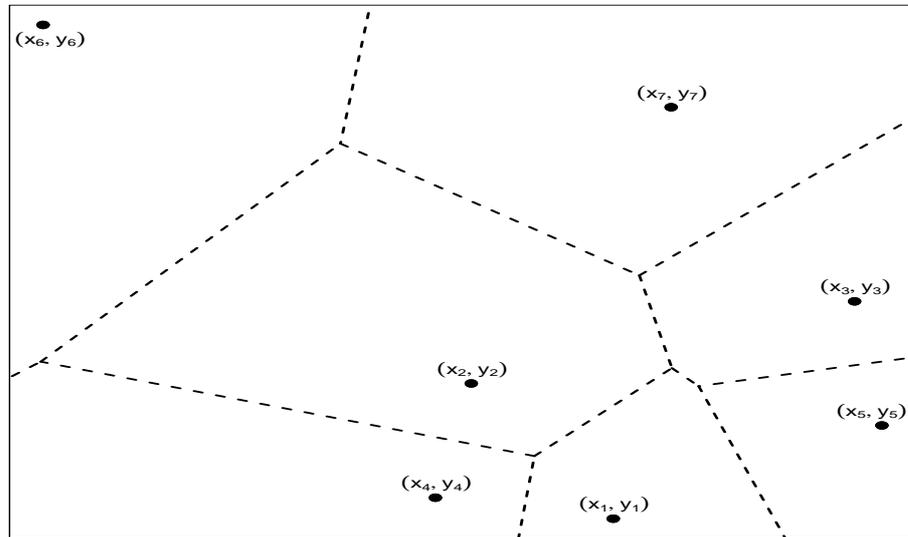
é definida como o polígono de Voronoi associado ao ponto (x_i, y_i) e é determinada pela menor distância Euclidiana $d_i(x, y)$ entre os pontos (x, y) e (x_i, y_i) . O conjunto dado por

$$\mathcal{DV}(N) = \{\mathcal{V}_1, \mathcal{V}_2, \dots, \mathcal{V}_n\} \quad (22)$$

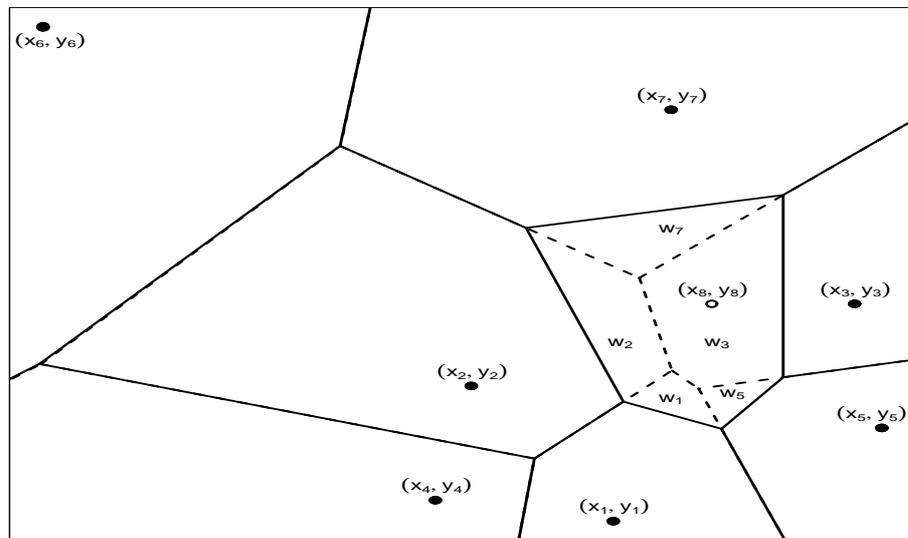
é nomeado como o diagrama de Voronoi gerado por N . Claramente $\mathcal{V}(x_i, y_i)$ é a sub-região delimitada pela mediatriz⁴ dos pontos (x_i, y_i) e (x_j, y_j) que separa todos os pontos do plano que estão mais próximos de (x_i, y_i) que (x_j, y_j) (AURENHAMMER, 1991). A Figura 8(a) apresenta um exemplo de um diagrama de Voronoi com seus polígonos e pontos geradores.

⁴Denomina-se mediatriz de um segmento de reta obtida através dos pontos (x_i, y_i) e (x_j, y_j) a reta perpendicular ao segmento que passa pelo seu ponto médio

Figura 8 – Diagrama de Voronoi para um conjunto N com 7 (a) e 8 (b) pontos geradores.



(a)



(b)

Uma forma alternativa para obtenção do diagrama de Voronoi é através da triangulação de Delaunay (DELAUNAY, 1934). Estas estruturas carregam consigo uma relação de dualidade, podendo a triangulação de Delaunay ser extraída de um polígono de Voronoi, e vice-versa (LEDOUX; GOLD, 2005).

Conforme a breve descrição apresentada sobre a definição de Diagrama de Voronoi, a técnica de interpolação *Natural Neighbour*, segundo Smith, Goodchild e Longley (2007),

pode ser inicialmente descrita nos seguintes passos:

inicialmente é criada a triangulação de Delaunay baseada no conjunto de pontos geradores N como um estágio preliminar na geração dos polígonos de Voronoi;

o segundo passo é a criação do diagrama de Voronoi com base na triangulação de Delaunay obtida no passo anterior. Assim cada ponto $(x_i, y_i) \in N$ possuirá seu próprio polígono de Voronoi e uma área $A(\mathcal{V}_i)$ associada a este. A interpolação para uma coordenada específica dar-se adicionando um ponto (x, y) em N ($N \cup \{(x, y)\}$) e recalculando-se novamente o diagrama de Voronoi. A adição do ponto (x, y) resulta em um novo polígono de Voronoi e na redefinição daqueles imediatamente a sua volta (Figura 8(b)).

Efetivamente este novo ponto “rouba” uma porção da área de cada um dos pontos mais próximos. Estes pontos mais próximos e a porção de área roubada são chamados respectivamente de *natural neighbours* e *natural neighbour coordinates*, ou simplesmente vizinhos naturais e coordenada do vizinho natural. A proporção de área roubada em cada ponto (x_i, y_i) é

$$W_i(x, y) = \frac{A(\mathcal{V}_i \cap \mathcal{V}_{(x,y)})}{\sum_{i=1}^n A(\mathcal{V}_i \cap \mathcal{V}_{(x,y)})}, \quad (23)$$

onde $A(\mathcal{V}_i \cap \mathcal{V}_{(x,y)})$ representa a interseção entre os polígonos de Voronoi \mathcal{V}_i e $\mathcal{V}_{(x,y)}$ obtidas a partir dos pontos geradores de N e $N \cup \{(x, y)\}$. Para qualquer ponto (x, y) o valor assumido por $W_i(x, y)$ está sempre entre 0 e 1, sendo 0 quando (x_i, y_i) não é vizinho natural de (x, y) e 1 quando (x, y) tem a mesma coordenada que (x_i, y_i) . As coordenadas dos vizinhos naturais são influenciadas tanto pela distância de (x, y) a (x_i, y_i) quanto pela distribuição de (x_i, y_i) em torno de (x, y) (LEDOUX; GOLD, 2005). As proporções $W_i(x, y)$ são os pesos utilizados na interpolação pelo método *Natural Neighbour* para calcular o valor no ponto (x, y) através da função

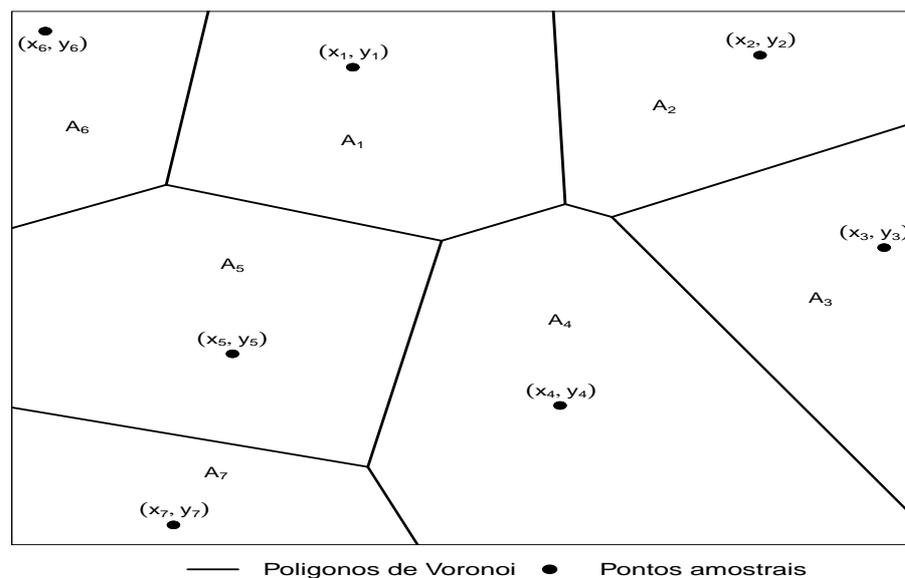
$$F(x, y) = \sum_{i=1}^n W_i(x, y) F(x_i, y_i), \quad (24)$$

em que $F(x, y)$ é o valor interpolado para a coordenada (x, y) e $F(x_i, y_i)$ é o valor observado no ponto (x_i, y_i) . O *Natural Neighbour* é um interpolador exato e $F(x, y)$ é uma função suave e contínua em toda parte, exceto nos pontos amostrais (LEDOUX; GOLD, 2005). Uma forma para remover a descontinuidade nos pontos amostrais tem sido proposta por Watson (1992) e Gold (1989).

4.5.4 Nearest Neighbour

O método *Nearest Neighbour* (ou *Thiessen polygon*) é uma técnica de interpolação introduzida por Thiessen (1911) e caracterizada por ser um dos métodos mais simples e antigo (WEBSTER; OLIVER, 2007). Semelhante a técnica *Natural Neighbour* (subseção 4.5.3), o *Nearest Neighbour* assume que os pontos que estão mais próximos aos pontos amostrais possuem as mesmas características. Este fato designa intrinsecamente uma região (polígonos) que determina o conceito do diagrama de Voronoi apresentado na Equação (22). A Figura 9 ilustra um exemplo de um diagrama de Voronoi obtido a partir de 7 pontos amostrais $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_7, y_7)\}$ com áreas respectivamente dadas por A_1, A_2, \dots, A_7 .

Figura 9 – Diagrama de Voronoi para 7 pontos amostrais e suas respectivas áreas A_i



As áreas geradas pelos polígonos em torno de cada ponto amostral são utilizadas como pesos no processo de interpolação. Assim, conforme Ojha, Berndtsson e Bhunya (2008), pode-se expressar matematicamente a interpolação pelo *Nearest Neighbour*, para um conjunto de pontos $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\} \subset \mathbb{R}^2$ respectivamente com valores $F(x_1, y_1), F(x_2, y_2), \dots, F(x_n, y_n)$, como

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^n W_i(x, y) F(x_i, y_i). \quad (25)$$

Sendo $F(x, y)$ o valor interpolado para cada polígono, $F(x_i, y_i)$ o valor assumido no i -ésimo

ponto amostral e

$$W_i(x, y) = \frac{A_i}{\sum_{i=1}^n A_i}, \quad (26)$$

em que o peso é atribuído na interpolação como função da área A_i associada a cada um dos polígonos. Esta interpolação é uma abordagem simples, uma vez que o resultado é um conjunto de polígonos condicionados a distribuição espacial dos pontos amostrais, com valores espacialmente abruptos na mudança de um polígono para outro (VICENTE-SERRANO et al., 2003).

4.5.5 Radial Basis Function

Uma importante classe de métodos de interpolação para dados georreferenciados é conhecida como *Radial Basis Function* (RBF). As RBF são interpoladores determinísticos e, do ponto de vista computacional, são moderadamente rápidos. A interpolação pelas RBF podem ser formalmente apresentada, conforme Wong, Hon e Golberg (2002) e Fornberg, Larsson e Wright (2006), pela seguinte expressão

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^N \lambda_i \phi(\|(x, y) - (x_i, y_i)\|), \quad (27)$$

em que $F(x, y)$ corresponde ao valor interpolado na coordenada (x, y) , N é o número total de pontos observados e $\phi(\cdot)$ é uma RBF positiva definida⁵, com $\|\cdot\|$ sendo a norma Euclidiana, isto é, a distância Euclidiana entre o valor a ser interpolado (x, y) e os pontos observados (x_i, y_i) . Os λ_i 's são um conjunto de coeficientes ou pesos desconhecidos que podem ser determinados impondo-se

$$F(x_i, y_i) = z_i, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (28)$$

onde z_i é o valor observado na coordenada (x_i, y_i) . A combinação das Equações (27) e (28)

⁵Uma função contínua $\Phi : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$ é dita ser positiva definida em \mathbb{R}^d se, e somente se, para todos os conjuntos de centros distintos $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\} \subseteq \mathbb{R}^d$ e todos os vetores $\alpha \in \mathbb{R}^N \setminus \{0\}$, a forma quadrática $\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \alpha_j \alpha_k \Phi(x_j - x_k) > 0$.

resulta em sistema de equações linear da forma

$$\begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \dots & \phi_{1N} \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \dots & \phi_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{N1} & \phi_{N2} & \dots & \phi_{NN} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_N \end{bmatrix}, \quad (29)$$

onde $\phi_{ji} = \phi(\|(x_j, y_j) - (x_i, y_i)\|)$, $j, i = 1, 2, \dots, N$. Assim, a Equação 29 pode ser expressa de forma matricial como

$$\mathbf{\Phi} \mathbf{\Lambda} = \mathbf{Z}, \quad (30)$$

onde $\mathbf{\Phi} = [\phi(\|(x_j, y_j) - (x_i, y_i)\|)]$ é uma matriz $N \times N$ chamada de matriz de interpolação. $\mathbf{\Lambda} = [\lambda_i]$ e $\mathbf{Z} = [z_i]$ são respectivamente matrizes colunas $N \times 1$. De acordo com Rippa (1999), a interpolação apresenta solução se, e somente se, a matriz $\mathbf{\Phi}$ for não-singular. Condições que garantem a não-singularidade de $\mathbf{\Phi}$ são apresentadas por Micchelli (1986).

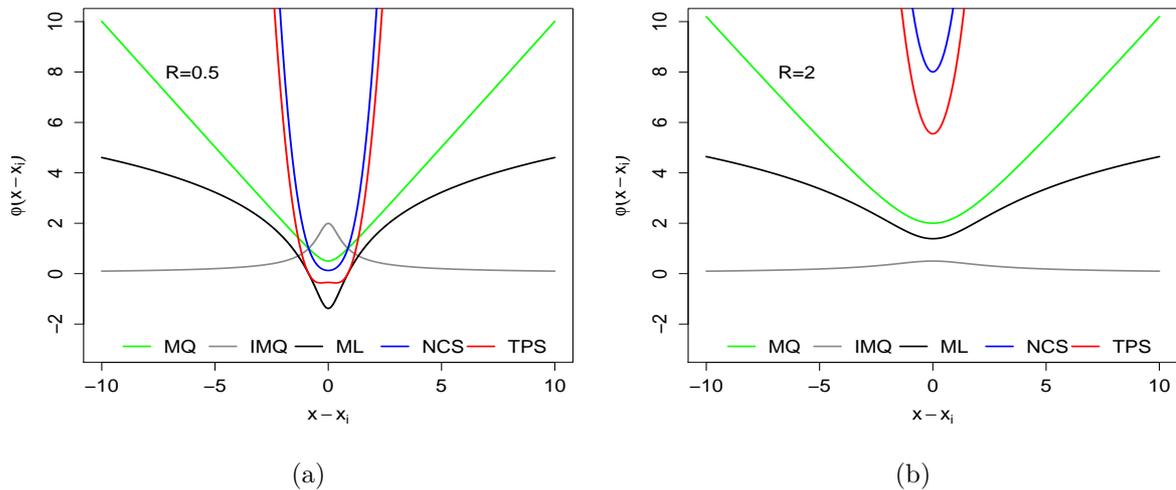
A interpolação pelas RBF também depende da escolha da função base. Dentre estas, as RBF *Multiquadric*, *Inverse Multiquadric*, *Multilog*, *Natural Cubic Spline* e *Thin Plate Spline* são as principais utilizadas na interpolação de dados. Estas funções dependem da distância Euclidiana entre os pontos (x, y) e (x_i, y_i) e exigem a especificação inicial de um parâmetro de forma R , o qual proporciona uma flexibilidade adicional e pode ser entendido como um parâmetro de suavização na interpolação. Na Tabela 3 está apresentado a forma analítica para as principais RBF.

Tabela 3 – *Radial Basis Functions* comumente utilizadas na interpolação de dados.

RBF	Abreviação	$\phi(\ (x, y) - (x_i, y_i)\)$
<i>Multiquadric</i>	MQ	$\sqrt{\ (x, y) - (x_i, y_i)\ + R^2}$
<i>Inverse Multiquadric</i>	IMQ	$\frac{1}{\sqrt{\ (x, y) - (x_i, y_i)\ + R^2}}$
<i>Multilog</i>	ML	$\log(\ (x, y) - (x_i, y_i)\ + R^2)$
<i>Natural Cubic Spline</i>	NCS	$(\ (x, y) - (x_i, y_i)\ + R^2)^{3/2}$
<i>Thin Plate Spline</i>	TPS	$(\ (x, y) - (x_i, y_i)\ + R^2) \log(\ (x, y) - (x_i, y_i)\ + R^2)$

Na Figura 10 é mostrado uma ilustração gráfica das principais RBF mencionadas na Tabela 3 com parâmetros de forma inicialmente especificados como $R = 0.5$ (Figura 10(a)) e $R = 2.0$ (Figura 10(b)).

Figura 10 – Ilustração das principais RBF (*Multiquadric*, *Inverse Multiquadric*, *Multilog* e *Natural Cubic Spline*, *Thin Plate Spline*) com parâmetros de suavização $R = 0.5$ (a) e $R = 2$ (b).



Cada uma das RBF apresentadas na Tabela 3 possuem formas distintas (ver Figura 10) e podem resultar em superfícies de interpolação ligeiramente diferentes. Carlson e Foley (1992) apontam as RBF *Multiquadric* e *Thin Plate Spline* como as mais efetivas para interpolação de dados. Press et al. (2007) enfatizam esse fato, afirmando que a RBF *Multiquadric* é usada com mais frequência na interpolação de dados.

A interpolação pelas RBF ainda são controladas pelo parâmetro de forma R , o que determina severamente a exatidão na interpolação (RIPPA, 1999). Vários métodos para selecionar R na interpolação de dados bidimensional, utilizando as RBF *Multiquadric* e *Inverse Multiquadric*, foram propostos na literatura. Hardy (1971) usou $R = 0.815d$, onde $d = (1/N) \sum_{i=1}^N d_i$ e d_i é a distância entre o i -ésimo ponto amostral e seu vizinho mais próximo. Franke (1982) substituiu d por D/\sqrt{N} , em que D é o diâmetro do menor círculo que engloba todos os pontos, e sugeriu usar $R = 1.25D/\sqrt{N}$. Sugestões semelhantes também foram propostas por Foley (1987).

4.5.6 Kernel smoothing

Um método bastante utilizado para mapear e estimar a forma da distribuição espacial de dados georreferenciados foi proposto por Nadaraya (1964) e Watson (1964). Tal método baseia-se nos conceitos de estatística não paramétrica e recebeu o nome, interpolador de Nadaraya-Watson, mas é também frequentemente chamado de *Kernel Smoothing*. Sua fórmula geral para obtenção de um valor interpolado $F(x, y)$ com base

nos pontos amostrais $F(x_i, y_i)$ é dada por

$$F(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^N K_h \left[\|(x, y) - (x_i, y_i)\| \right] F(x_i, y_i)}{\sum_{i=1}^N K_h \left[\|(x, y) - (x_i, y_i)\| \right]}, \quad (31)$$

em que N é a quantidade total pontos observados e

$$\|(x, y) - (x_i, y_i)\| = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (32)$$

é a distância Euclidiana entre o ponto interpolado (x, y) e o ponto observado (x_i, y_i) , a distância também pode ser obtida através do sistema de coordenadas esféricas. O *Kernel Smoothing* é um interpolador que tem como base o método não paramétrico *Kernel Density Estimation*, introduzido por Rosenblatt (1956) e Parzen (1962), e definido originalmente como

$$f(x; h) = \frac{1}{Nh} \sum_{i=1}^N K \left(\frac{\|x - X_i\|}{h} \right), \quad (33)$$

onde K é uma função de modo que $\int K(x)dx = 1$ e $h > 0$ é um parâmetro de suavização denominado largura da banda (*bandwidth*) ou largura da janela (*window width*). Estes parâmetros são os únicos necessários para o cálculo das estimativas (WAND; JONES, 1994). Uma fórmula levemente compacta para o *Kernel Density Estimation* pode ser introduzida utilizando a notação $K_h(\cdot) = h^{-1}K(\cdot/h)$. Desta forma, pode-se reescrever a Equação 33 como

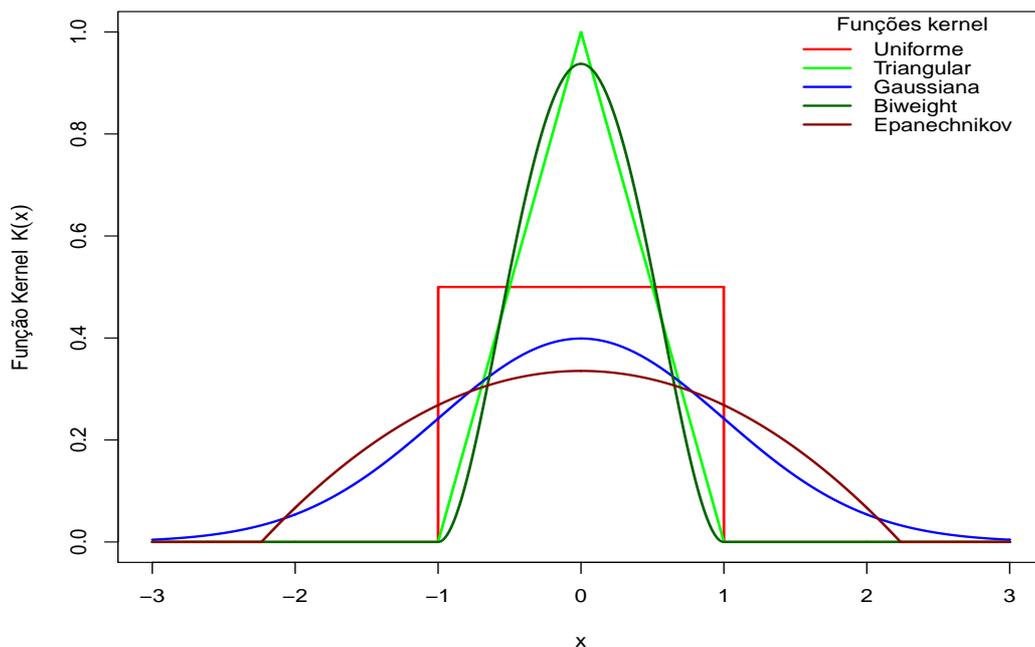
$$f(x; h) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N K_h(x - X_i) \quad (34)$$

e utilizar a mesma notação que a descrita para o *Kernel Smoothing* na Equação 31.

A função K_h é geralmente uma função densidade de probabilidade simétrica em torno de zero que depende unicamente do parâmetro h e é chamada de função *Kernel*. Muitas funções de densidade de probabilidade são utilizadas mas dentre elas os *Kernel* Uniforme, Triangular, Guassiana, Biweight e Epanechnikov são os mais difundidos (JOU; AKHOOND-ALI; NAZEMOSADAT, 2013). Na Tabela 4 observa-se a forma analítica destes principais *Kernel* e a Figura 11 seus respectivos gráficos para diferentes valores de x .

Tabela 4 – Função *Kernel* comumente utilizados com dados georreferenciados.

Função <i>Kernel</i>	Forma analítica para $K_h(x)$
Uniforme	$\frac{1}{2}I_{(x <1)}$
Triangular	$1 - x I_{(x <1)}$
Gaussiana	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right)$
Biweight	$\frac{15}{16} (1 - x^2)^2 I_{(x <1)}$
Epanechnikov	$\frac{3}{4} (1 - x^2/5) / \sqrt{5} I_{(x <\sqrt{5})}$

Figura 11 – Gráfico das principais funções *Kernel* para valores de x entre -3 e 3.

De acordo com Gervasi et al. (2008) o *Kernel* gaussiano é uma escolha natural e um dos mais utilizados dentre as funções *Kernel*. Este *Kernel* é baseado na função densidade de probabilidade gaussiana e pressupõe que o parâmetro de suavização h corresponde a variância da distribuição gaussiana, bem como controla o raio de abrangência na interpolação (HASTIE et al., 2009; JIANQING; IRENE, 1996). O parâmetro h ainda determina o quão suave será a interpolação, ou seja, baixos valores de h reproduzem estimativas menos suaves enquanto altos valores de h reproduzem estimativas mais suaves (BARBOSA et al., 2014).

4.5.7 Kriging

A técnica de interpolação *Kriging*, também conhecida na língua portuguesa como Krigagem, tem sido usada por muitas décadas como sinônimo de interpolação geoestatística. A ideia original se deve ao engenheiro de minas D. G. Krige e o estatístico H. S. Sichel, que desenvolveram no início dos anos 1950 empiricamente uma metodologia própria para melhorar a estimativa de reservas de minério. A técnica foi publicada pela primeira vez por Krige (1951), a qual recebeu posteriormente um tratamento formal pelo matemático Matheron, 1962 e 1963. Tal metodologia foi nomeada, por Matheron, como geoestatística para o estudo das chamadas variáveis regionalizadas, isto é, variáveis com condicionamento espacial (CRESSIE, 1990; ZHOU et al., 2007).

4.5.7.1 Variograma

Na interpolação por meio do *Kriging* é assumido como ideia principal que o valor de uma variável em determinada localização pode ser considerada como uma caracterização de uma função aleatória intrinsecamente estacionária. De acordo com Lark (2000), este processo estacionário é uma forma de estacionaridade de segunda ordem a qual é válida se duas condições são satisfeitas. A primeira condição é que

$$E[Z(\mathbf{x}_i) - Z(\mathbf{x}_i + \mathbf{h})] = 0, \quad \forall \mathbf{x}_i, \quad (35)$$

onde a distância $\mathbf{h} = \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|$, $\forall i \neq j$, é um vetor com direção e orientação específica que separa o ponto \mathbf{x}_i do \mathbf{x}_j . A segunda condição é que a esperança matemática do quadrado da diferença entre pares de pontos amostrais,

$$2\gamma(\mathbf{h}) = E\{[Z(\mathbf{x}_i) - Z(\mathbf{x}_i + \mathbf{h})]^2\}, \quad (36)$$

dependa somente de \mathbf{h} e não de \mathbf{x}_i . A função $\gamma(\mathbf{h})$ é denominada semivariância e, segundo Wong, Yuan e Perlin (2004), esta quantidade mede o grau de similaridade entre duas observações separadas por uma dada distância \mathbf{h} . É comum encontrarmos na literatura, como por exemplo, em Genton (1998) e Mingoti e Rosa (2008), abordagens que adotam a utilização de $2\gamma(\mathbf{h})$, a qual é a variância que gera o variograma. No entanto, por conveniência matemática, é mais comum a utilização da semivariância $\gamma(\mathbf{h})$, a qual gera o semivariograma, embora a utilização retorna resultados semelhantes (TEIXEIRA; SCALON, 2013).

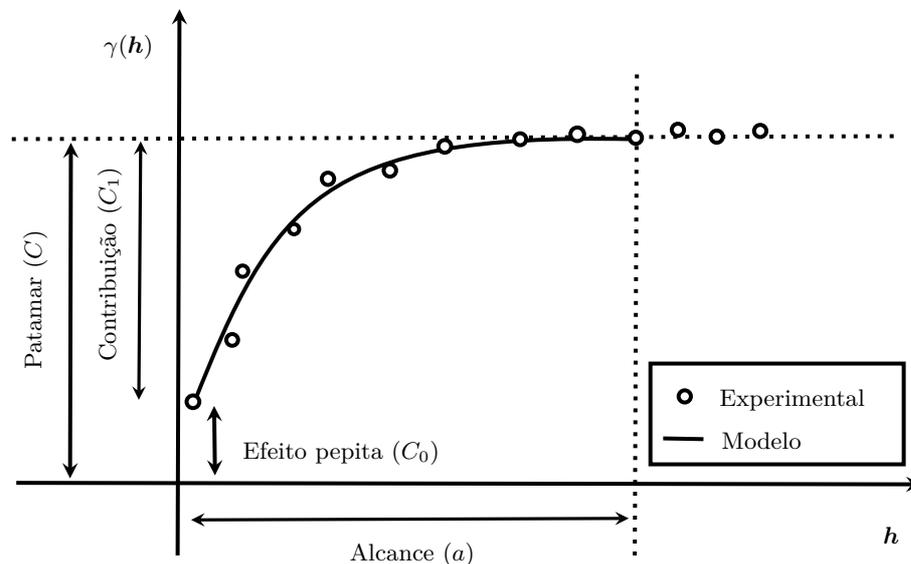
Convencionalmente o variograma é obtido do conjunto de pontos amostrais em dois estágios, como descrito por Webster e Oliver (1990). No primeiro estágio a semivariância

é estimado para diferentes valores de \mathbf{h} . O gráfico do conjunto de valores estimados em função de \mathbf{h} é chamado de semivariograma. Para $N(\mathbf{h})$ pares de observações separados por uma distância \mathbf{h} , a saber $\{Z(\mathbf{x}_i), Z(\mathbf{x}_i + \mathbf{h})\}$, $i = 1, 2, \dots, N(\mathbf{h})$, a semivariância estimada $\hat{\gamma}(\mathbf{h})$ é dada por

$$\hat{\gamma}(\mathbf{h}) = \frac{1}{2N(\mathbf{h})} \sum_{i=1}^{N(\mathbf{h})} [Z(\mathbf{x}_i) - Z(\mathbf{x}_i + \mathbf{h})]^2. \quad (37)$$

A segunda etapa consiste na construção do semivariograma experimental a partir dos pontos amostrais da variável consoante a distância e direção consideradas, visualizando o resultado por meio de um gráfico de dispersão. Na Figura 12 está apresentado um exemplo do gráfico de um semivariograma experimental calculado para um conjunto de pontos amostrais sobre diferentes valores de \mathbf{h} . Os pontos (círculos vazios) correspondem aos valores obtidos pelo semivariância, enquanto a curva contínua representa um modelo de variograma teórico que deve ser ajustado a semivariância.

Figura 12 – Ilustração de um semivariograma e de um modelo de variograma teórico com parâmetros alcance (a), efeito pepita (C_0), patamar (C) e contribuição (C_1).



Fonte: adaptado de Camargo, Fucks e Câmara (2004).

Os parâmetros do variograma observados na Figura 12 são descritos em: alcance (a), indica a distância dentro da qual as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente; efeito pepita ou *Nugget effect* (C_0), representa o valor do variograma na origem, evidenciando a descontinuidade; patamar (C), refere-se ao valor em que ocorre a estabi-

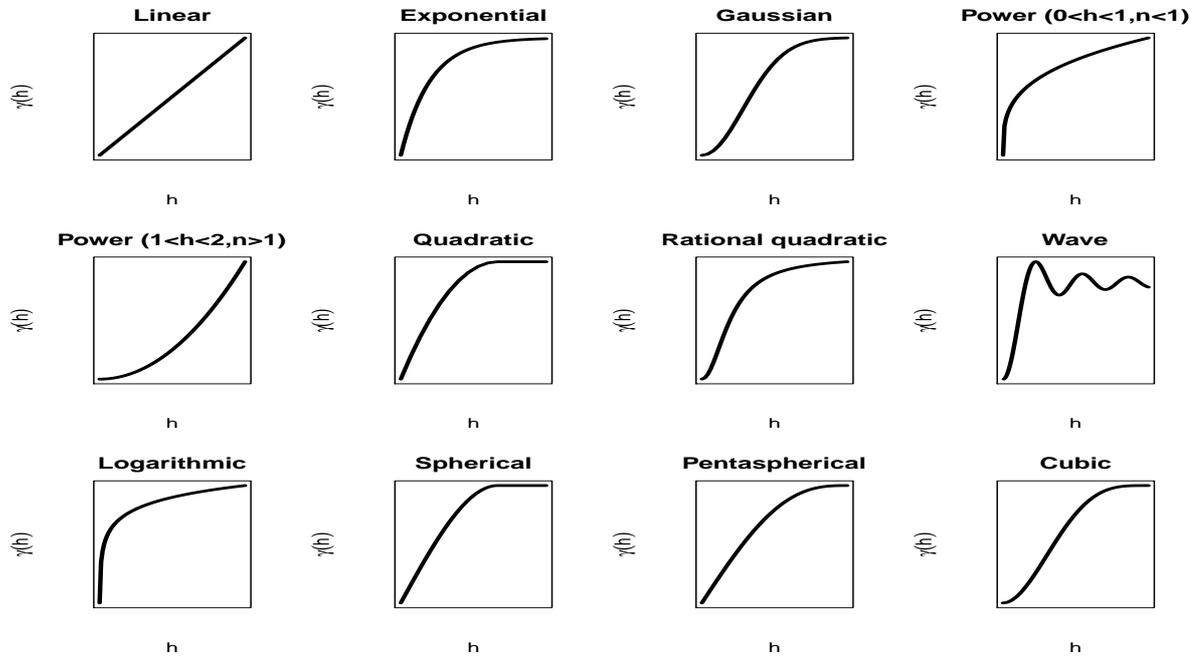
lidade; contribuição (C_1), reflete as diferenças espaciais entre os valores de uma variável analisada em pontos com distâncias sucessivamente maiores.

Diversos tipos de modelos de variogramas teóricos estão disponíveis na literatura, sendo aqui apresentado, na Tabela 5, os principais variogramas teóricos (*Linear*, *Exponential*, *Gaussian*, *Power*, *Quadratic*, *Rational quadratic*, *Wave*, *Logarithmic*, *Spherical*, *Pentaspheical* e *Cubic*) bem como uma ilustração gráfica (Figura 13) para estes modelos, respectivamente. Uma discussão crítica sobre a interpretação de variogramas e sua modelagem pode ser encontrada em Gringarten e Deutsch (2001).

Tabela 5 – Forma analítica dos principais modelos de variograma teórico e suas referências.

Modelos teóricos	Forma analítica $\gamma(h)$	Referência
<i>Linear</i>	Ch	Kitanidis (1997)
<i>Power</i>	Ch^n	Paninatier (1996)
<i>Exponential</i>	$C[1 - \exp\{-h\}]$	Cressie (1991)
<i>Gaussian</i>	$C[1 - \exp\{-h^2\}]$	Paninatier (1996)
<i>Quadratic</i>	$\begin{cases} C[2h - h^2], & h < 1 \\ C, & h \geq 1 \end{cases}$	Sironvalle (1980)
<i>Rational Quadratic</i>	$C\left(\frac{h^2}{1+h^2}\right)$	Cressie (1991)
<i>Wave</i>	$C\left[1 - \frac{\text{sen}(h)}{h}\right]$	Cressie (1991)
<i>Logarithmic</i>	$C[\log(h)], h > 0$	Kitanidis (1997)
<i>Spherical</i>	$\begin{cases} C(1,5 - 0,5h^3), & h < 1 \\ C, & h \geq 1 \end{cases}$	Paninatier (1996)
<i>Pentaspheical</i>	$C(1,875h - 1,25h^3 + 0,375h^5)$	Olea (1999)
<i>Cubic</i>	$C(7h^2 - 8,75h^3 + 3,5h^5 - 0,75h^7)$	Olea (1999)

Figura 13 – Exemplos de variogramas teóricos comumente utilizados na interpolação de dados georreferenciados.



4.5.7.2 Ajuste do variograma

Segundo Landim (2003), após a construção do semivariograma experimental, é necessário ajustar um modelo teórico que melhor represente a variabilidade em estudo. De acordo com Jian, Olea e Yu (1996) os métodos analíticos para ajuste de modelos podem ser divididos em duas categorias: métodos de máxima verossimilhança e mínimos quadrados. O problema com o método de máxima verossimilhança é que ele é altamente dependente das pressuposições da distribuição gaussiana, levando, muitas vezes, estimativas tendenciosas dos parâmetros populacionais (CRESSIE, 1991).

Na estimação pelo método dos mínimos quadrados ordinários, os valores desconhecidos do vetor de parâmetros $\boldsymbol{\theta} = (a, C_0, C_1)$ do modelo teórico são estimados minimizando a soma dos quadrados dos desvios entre as estimativas e o variograma teórico. Conforme Cressie (1991), o vetor de parâmetros $\boldsymbol{\theta}$ para o variograma teórico é estimado minimizando

$$E = \sum_h [\hat{\gamma}(\mathbf{h}) - \gamma(\mathbf{h}; \boldsymbol{\theta})]^2, \quad (38)$$

onde $\hat{\gamma}(\mathbf{h})$ denota a semivariância experimental descrito na Equação (37) e $\gamma(\mathbf{h}; \boldsymbol{\theta})$ o variograma teórico com vetor de parâmetros $\boldsymbol{\theta} = (a, C_0, C_1)$.

4.5.7.3 Ordinary Kriging

A diferença entre o *kriging* e outros métodos de interpolação é a maneira como os pesos são atribuídos às diferentes amostras. No *kriging*, o procedimento é semelhante ao IDW (subseção 4.5.1), exceto que aqui os pesos são determinados a partir de uma análise espacial, com base na semivariância experimental. Além disso, o *kriging* fornece, em média, estimativas não tendenciosas e com variância mínima (CAMARGO, 1998).

Segundo Webster e Oliver (1990), o *Kriging* engloba um conjunto de métodos de estimação, a saber: *Simple Kriging*, *Ordinary Kriging* (pontual e bloco), *Universal Kriging*, *Co-Kriging*, *Ordinary Co-kriging*, etc. Este trabalho tem como foco de aplicação o *Ordinary Kriging* pontual. De acordo com Gebbers e Bruin (2010) e Oliver (2010), no *Ordinary Kriging* é pressuposto que a média é desconhecida e, para uma variável aleatória Z que tenha sido observada nos pontos \mathbf{x}_i , $i = 1, 2, \dots, N$, pode-se estimar o valor no ponto \mathbf{x}_0 por meio da seguinte expressão

$$\hat{Z}(\mathbf{x}_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(\mathbf{x}_i), \quad (39)$$

onde n representa o número de pontos observados no interior de uma certa vizinhança, sendo n menor que o número total de pontos N , e λ_i são os pesos. Para assegurar que a estimativa não seja tendenciosa é posto que:

$$E[\hat{Z}(\mathbf{x}_0) - Z(\mathbf{x}_0)] = 0 \quad (40)$$

A Equação 40 implica na igualdade entre as médias de $\hat{Z}(\mathbf{x}_0)$ e $Z(\mathbf{x}_0)$, ou seja, $E[\hat{Z}(\mathbf{x}_0)] = E[Z(\mathbf{x}_0)]$. Assim, com base nas Equações (39) e (40) pode-se concluir que

$$E[\hat{Z}(\mathbf{x}_0)] = E\left[\sum_{i=1}^n \lambda_i Z(\mathbf{x}_i)\right] = \sum_{i=1}^n \lambda_i E[Z(\mathbf{x}_i)] = \mu \sum_{i=1}^n \lambda_i. \quad (41)$$

Diferente do *Kriging* simples, o *Ordinary Kriging* não exige o conhecimento prévio da média μ . Neste sentido, para que a igualdade na Equação 40 seja válida é necessário que $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$. A variância da estimativa pode ser calculada como:

$$\begin{aligned} Var[Z(\mathbf{x}_0)] &= E\left\{[\hat{Z}(\mathbf{x}_0) - Z(\mathbf{x}_0)]^2\right\} \\ &= 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_0) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j \gamma(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j), \end{aligned} \quad (42)$$

onde $\gamma(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$ é a semivariância obtida entre os pontos \mathbf{x}_i e \mathbf{x}_j , e $\gamma(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_0)$ é o valor da semivariância entre o i -ésimo e o ponto a ser estimado \mathbf{x}_0 . Com base em Journel (1988), o próximo passo no *kriging* consiste em encontrar os pesos que minimizem a variância da estimativa sujeito a condição que $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$. Isto é feito utilizando o método dos multiplicadores de Lagrange a partir de uma função $f(\lambda_i, \psi)$ que contém a variância que gostaríamos de minimizar mais um termo referente ao multiplicador de Lagrange, ψ , obtendo então

$$T(\lambda_i, \psi) = Var[\hat{Z}(\mathbf{x}_0) - Z(\mathbf{x}_0)] - 2\psi \left\{ \sum_{i=1}^n \lambda_i - 1 \right\}. \quad (43)$$

Fazendo cada uma das derivadas parciais iguais a zero bem como derivando em relação a λ_i , obtém-se um sistema de equações com $n + 1$ equações e $n + 1$ incógnitas:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) + \psi(\mathbf{x}_0) = \gamma(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_0), & \forall j \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \end{cases} \quad (44)$$

O erro correspondente a variância minimizada, o qual é chamado de variância do *Ordinary Kriging*, pode ser obtido pela seguinte expressão:

$$\sigma^2(\mathbf{x}_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_0) + \psi(\mathbf{x}_0). \quad (45)$$

O sistema de equações apresentado na Equação 44 pode ser escrito de forma matricial como:

$$\begin{bmatrix} \gamma(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_1) & \gamma(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) & \dots & \gamma(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_n) & 1 \\ \gamma(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_1) & \gamma(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_2) & \dots & \gamma(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_n) & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma(\mathbf{x}_n, \mathbf{x}_1) & \gamma(\mathbf{x}_n, \mathbf{x}_2) & \dots & \gamma(\mathbf{x}_n, \mathbf{x}_n) & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \psi(\mathbf{x}_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_0) \\ \gamma(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_0) \\ \vdots \\ \gamma(\mathbf{x}_n, \mathbf{x}_0) \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (46)$$

Denotando \mathbf{A} como a matriz de semivariância dos pontos amostrais envolvidos na interpolação de \mathbf{x}_0 , $\boldsymbol{\lambda}$ como a matriz coluna que contém os pesos λ_i e o multiplicador de Lagrange e \mathbf{b} como a matriz coluna das semivariâncias entre os pontos amostrais e ponto estimado, tem-se que

$$\mathbf{A}\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{b} \Leftrightarrow \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{b}. \quad (47)$$

onde \mathbf{A}^{-1} é a matriz inversa de \mathbf{A} . A variância do *Ordinary Kriging* também pode ser escrito em forma matricial por:

$$\sigma^2(\mathbf{x}_0) = \mathbf{b}^T \boldsymbol{\lambda}, \quad (48)$$

em que \mathbf{b}^T é a matriz transposta de \mathbf{b} .

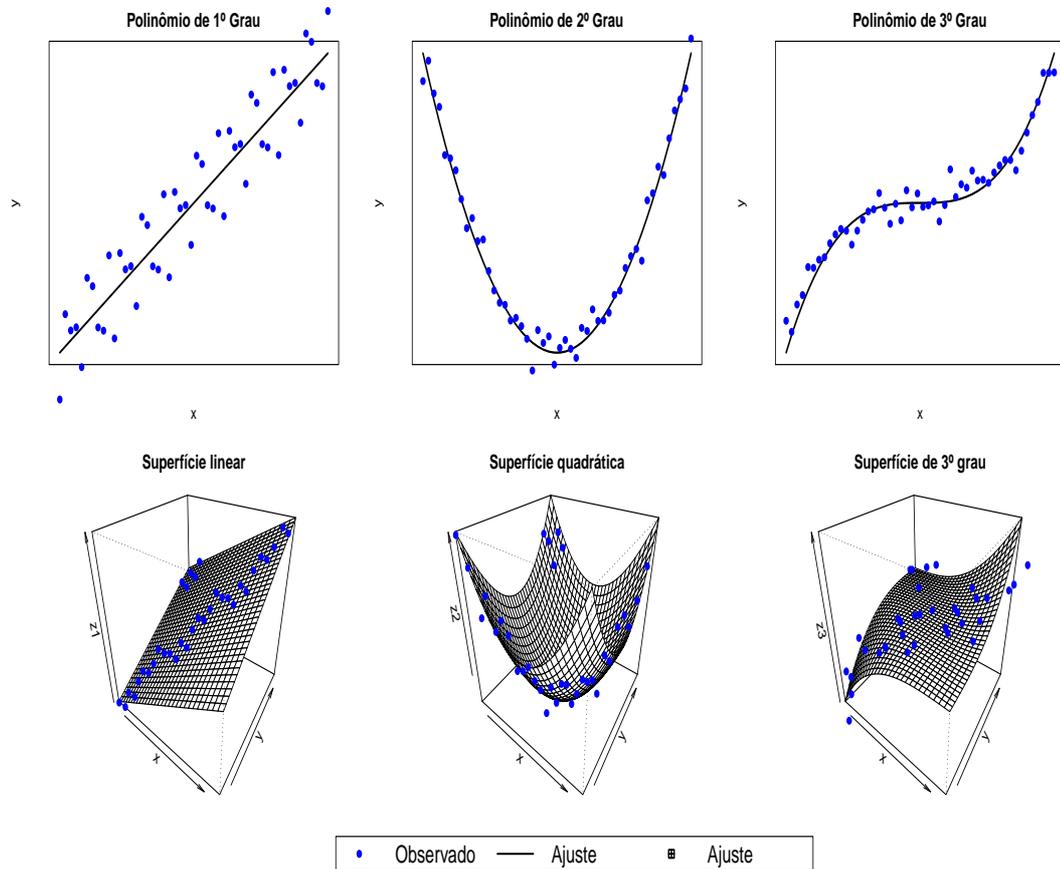
4.5.8 Trend Surface Analysis

Trend Surface Analysis, também conhecida como análise de superfície de tendência ou regressão polinomial, é um método de interpolação que permite, a partir dos dados georreferenciados originais, tanto a obtenção de um mapa mostrando a tendência regional, como um mapa com as flutuações locais, representadas pelos valores residuais (EMIDIO; LANDIM, 2008). De acordo com Camargo, Fucks e Câmara (2004), *Trend Surface Analysis* são interpoladores determinísticos globais que consistem em um ajuste polinomial aos dados por meio de um processo de regressão múltipla entre os valores do atributo e as localizações geográficas. Essa função polinomial é então utilizada para estimar os valores dos pontos em todas as localizações de uma grade que se aproxima a superfície.

Segundo Landim (2003), é possível fazer uma analogia entre o ajuste de um modelo linear (polinômio com uma variável dependente) com o ajuste de um modelo linear geral (polinômio com duas variáveis dependentes). Ou seja, supondo um conjunto de dados nos quais foram medidas duas variáveis x e y , cuja correlação entre si indica um comportamento linear, pode-se ajustar uma reta que melhor se encaixe a esses pares de valores pelo método dos mínimos quadrados.

Partindo do caso bidimensional, para o modelo linear geral, a analogia é óbvia com o caso tridimensional, em que se deseja correlacionar a distribuição de uma variável dependente z em função das coordenadas x (sentido Leste-Oeste) e y (sentido Norte-Sul). Nessas circunstâncias deve-se calcular, em vez de uma reta, uma superfície que melhor se adapte ao conjunto de observações. A Figura 14 ilustra o ajuste de uma reta/curva ou uma superfície a dados observados em um espaço bidimensional e tridimensional, respectivamente.

Figura 14 – Comportamento espacial de variáveis dependentes condicionadas por uma variável independente (linha/curva) e por duas variáveis independentes (superfícies).



Sobre esta ótica, a interpolação pelo *Trend Surface Analysis* consiste basicamente em um ajuste de uma regressão polinomial sobre duas variáveis independentes, as coordenadas de longitude e latitude. Conforme Webster e Oliver (1990), a expressão geral para o *Trend Surface Analysis* é dada por

$$F(x, y) = f(x_i, y_i) + \epsilon_{ij}, \quad (49)$$

onde $F(x, y)$ corresponde ao valor interpolado em função das coordenadas (x_i, y_i) , f denota uma função baseada nas coordenadas de longitude e latitude, e ϵ_{ij} representa os resíduos, ou seja, a fonte não-sistemática de variação.

Em geral, a função f é adotada como sendo uma função polinomial bivariada (regressão polinomial) de grau n . Assim, segundo Hengl (2007), a interpolação na coordenada

(x, y) é dada por:

$$\hat{F}(x, y) = \sum_{k=0}^n \alpha_k x^i y^j, \quad \text{com } i + j \leq k, \quad (50)$$

onde n é o grau da superfície e $\boldsymbol{\theta} = (\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_n)$ é o vetor de parâmetros associados ao modelo que proporcionam o melhor ajuste aos dados observados.

A estimativa desse vetor de parâmetros $\boldsymbol{\theta}$ pode ser determinada pelo método dos mínimos quadrados, o qual adota como estimativa dos parâmetros os valores que minimizam a soma de quadrados de resíduos (GOMES et al., 2014), isto é:

$$\sum_{i=1}^n \epsilon_{ij}^2 = \sum_{i=1}^n [\hat{F}(x, y) - F(x, y)]^2. \quad (51)$$

A forma de como se obter estimativas para os parâmetros de uma regressão polinomial de primeiro grau (superfície linear) são descritos por Davis e Sampson (2002) através de um sistema de equações normais da seguinte forma:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n z_i = n\hat{\alpha}_0 + \hat{\alpha}_1 \sum_{i=1}^n x_i + \hat{\alpha}_2 \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n z_i x_i = \hat{\alpha}_0 \sum_{i=1}^n x_i + \hat{\alpha}_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 + \hat{\alpha}_2 \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ \sum_{i=1}^n z_i y_i = \hat{\alpha}_0 \sum_{i=1}^n y_i + \hat{\alpha}_1 \sum_{i=1}^n x_i y_i + \hat{\alpha}_2 \sum_{i=1}^n y_i^2 \end{cases} \quad (52)$$

ou em forma matricial como:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} n & \sum x_i & \sum y_i \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i y_i \\ \sum y_i & \sum x_i y_i & \sum y_i^2 \end{bmatrix}}_{\mathbf{XY}} \times \underbrace{\begin{bmatrix} \hat{\alpha}_0 \\ \hat{\alpha}_1 \\ \hat{\alpha}_2 \end{bmatrix}}_{\boldsymbol{\theta}} = \underbrace{\begin{bmatrix} \sum z_i \\ \sum z_i x_i \\ \sum y_i z_i \end{bmatrix}}_{\mathbf{Z}}. \quad (53)$$

Desta forma, para obter o vetor de parâmetros $\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\hat{\alpha}_0, \hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2)$ basta inverter a matriz \mathbf{XY} e multiplicar pelo vetor \mathbf{Z} , ou seja, $\hat{\boldsymbol{\theta}} = [\mathbf{XY}]^{-1} \times \mathbf{Z}$. Levando em conta uma regressão polinomial de segundo grau (superfície quadrática) pode-se determinar o vetor de parâmetros $\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_5)$ da seguinte forma (GOMES et al., 2014; LANDIM,

2003):

$$\begin{bmatrix} \hat{\alpha}_0 \\ \hat{\alpha}_1 \\ \hat{\alpha}_2 \\ \hat{\alpha}_3 \\ \hat{\alpha}_4 \\ \hat{\alpha}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & \sum x_i & \sum y_i & \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum y_i^2 \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i^3 & \sum x_i^2 y_i & \sum x_i y_i^2 \\ \sum y_i & \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum x_i^2 y_i & \sum x_i y_i^2 & \sum y_i^3 \\ \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^2 y_i & \sum x_i^4 & \sum x_i^3 y_i & \sum x_i^2 y_i^2 \\ \sum x_i y_i & \sum x_i^2 y_i & \sum x_i y_i^2 & \sum x_i^3 y_i & \sum x_i^2 y_i^2 & \sum x_i y_i^3 \\ \sum y_i^2 & \sum x_i y_i^2 & \sum y_i^3 & \sum x_i^2 y_i^2 & \sum x_i y_i^3 & \sum y_i^4 \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \sum z_i \\ \sum z_i x_i \\ \sum y_i z_i \\ \sum x_i^2 z_i \\ \sum x_i y_i z_i \\ \sum y_i^2 z_i \end{bmatrix}. \quad (54)$$

Nota-se que a medida que se aumenta o grau do polinômio também aumenta-se o número de parâmetros a serem estimados. Segundo Dessaint e Caussanel (1994) o número de parâmetros a serem estimados em um polinômio de grau n é dado por:

$$\frac{(n+1)(n+2)}{2}, \quad (55)$$

contudo, de acordo com Landim (2011), para superfícies de maior grau adota-se o mesmo procedimento de desenvolvimento polinomial por série de Taylor.

4.6 Avaliação dos métodos de interpolação espacial

Uma vez que a verdadeira superfície da variável interpolada é desconhecida, não se pode afirmar, em geral, qual das técnicas de interpolação apresenta melhor desempenho, pois alguns dos métodos mostram superfícies de resultados visualmente semelhantes. Portanto, antes de selecionar a melhor técnica de interpolação, é necessário previamente avaliar o quão essas técnicas foram capazes de prever os valores em locais desconhecidos. Neste sentido, a metodologia denominada *cross validation*, ou simplesmente validação cruzada, é bastante utilizada como uma técnica prévia para determinar quais dos métodos proporcionam os melhores resultados.

Segundo Furtado e Negreiros (2010), o processo de validação cruzada fornece uma ideia do quão o modelo se adaptou, servindo assim como medida de incerteza da predição realizada. Operacionalmente, a técnica de validação cruzada consiste na omissão de um ponto amostral do conjunto de dados inicial estimando-se seu valor usando os demais pontos restantes. Este processo é realizado sucessivamente para cada um dos pontos amostrais remanescentes. Por fim, as técnicas de interpolação são comparadas, com base nos dados estimados e observados, e posteriormente avaliadas através das medidas indicadas por Vicente-Serrano et al. (2003) e descritas na Tabela 6.

Tabela 6 – Medidas utilizadas para avaliar o desempenho dos métodos de interpolação espacial.

Medida	Notação	Forma analítica ^a
Erro médio	EM	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\hat{F}(x_i, y_i) - F(x_i, y_i)]$
Erro absoluto médio	EAM	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{F}(x_i, y_i) - F(x_i, y_i) $
Erro quadrático médio	EQM	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\hat{F}(x_i, y_i) - F(x_i, y_i)]^2$
Raiz do erro quadrático médio	$REQM$	$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\hat{F}(x_i, y_i) - F(x_i, y_i)]^2}$
Eficiência do modelo	EFM	$1 - \frac{\sum_{i=1}^N [\hat{F}(x_i, y_i) - F(x_i, y_i)]^2}{\sum_{i=1}^N [F(x_i, y_i) - \bar{F}(x, y)]^2}$
D de Willmott	D	$1 - \frac{\sum_{i=1}^N [\hat{F}(x_i, y_i) - \bar{F}(x, y)]^2}{\sum_{i=1}^N [\hat{F}(x_i, y_i) - \bar{F}(x, y) + F(x_i, y_i) - \bar{F}(x, y)]^2}$
Coefficiente de determinação	R^2	$\left\{ \frac{\sum_{i=1}^N [F(x_i, y_i) - \bar{F}(x, y)] [\hat{F}(x_i, y_i) - \bar{F}(x, y)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N [F(x_i, y_i) - \bar{F}(x, y)]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N [\hat{F}(x_i, y_i) - \bar{F}(x, y)]^2}} \right\}^2$

^a N : número de observações ou de pontos amostrais; $F(x_i, y_i)$: valor observado na coordenada (x_i, y_i) ; $\hat{F}(x_i, y_i)$: valor interpolado ou estimado na coordenada (x_i, y_i) ; $\bar{F}(x, y)$: média dos valores observados ou dos pontos amostrais; $\bar{\hat{F}}(x, y)$: média dos valores interpolados ou estimados.

As medidas de avaliação de desempenho descritas na Tabela 6 possuem interpretações distintas e se destacam entre as mais utilizadas na literatura, a saber Tabios e Salas (1985), Vicente-Serrano et al. (2003), Luo, Taylor e Parker (2008) e Li e Heap (2011).

A correlação entre valores observados e estimados, geralmente descrito como coeficiente de correlação de Pearson ou coeficiente de determinação (R^2), é comumente utilizado como medida de avaliação. No entanto, Li e Heap (2008) sugerem que seja evitado, ou utilizado com cuidado extremo. Por esta razão, é necessário a adição de outras medidas de avaliação, ou seja, o erro médio (EM), o erro absoluto médio (EAM), o erro quadrático médio (EQM) e a raiz do erro quadrático médio ($REQM$).

Conforme Hallak e Filho (2011), de um ponto de vista estatístico, o EM ou viés é o primeiro momento da distribuição da diferença entre valor estimado e observado. O EM

não traz informação a respeito dos erros individuais e, portanto, não deve ser utilizada como medida de precisão da simulação. Além disso, apesar de fornecer uma ideia da tendência ou erro sistemático, o *EM* é afetado pelo fato de que estimativas negativas e positivas podem neutralizá-lo e resultar em um erro menor que o real (NALDER; WEIN, 1998). Esta deficiência do *EM* é contornada pelo *EAM*, o qual é considerado robusto como medida da habilidade de modelos de interpolação em reproduzir a realidade (FOX, 1981).

O *EQM* é outra medida também frequentemente utilizada na acurácia de métodos de interpolação. De acordo com Hernandez-Stefanoni e Ponce-Hernandez (2006), o *EQM* é similar ao *EAM*, contudo é sensível a grandes erros, pois eleva as diferenças entre valores estimados e observados ao quadrado. Em adição ao *EQM*, a raiz quadrada do *EQM* (*REQM*), é habitualmente utilizada para expressar a acurácia dos resultados na interpolação, com a vantagem de que o *REQM* apresenta valores nas mesmas unidades de medida que a variável analisada (HALLAK; FILHO, 2011).

Willmott (1982) afirma que o *REQM* e o *EAM* estão entre as melhores medidas globais de avaliação de estimativas, pois resumem a diferença média entre valores observados e estimados. Contudo, o *REQM* possui a inconveniência de atribuir pesos altos para grandes erros, enquanto o *EAM* é menos sensível a valores extremos (VICENTE-SERRANO et al., 2003).

Medidas de avaliação do desempenho de técnicas de interpolação como eficiência do modelo (*EFM*) e índice de concordância (*D* de Willmott) podem também serem levados em consideração. A *EFM*, proposta por Nash e Sutcliffe (1970), é definido como um menos a soma do quadrado da diferença entre o valores observados e estimados normalizado pela variância dos valores observados. A eficiência do modelo pode assumir valores no intervalo $(-\infty, 1]$. O melhor método é obtido para o valor de eficiência igual a 1 ($EFM = 1$), uma eficiência igual a zero ($EFM = 0$) indica que as estimativas do modelo são tão precisas quanto a média dos dados observados e, para a eficiência menor que zero ($-\infty < EFM < 0$), conclui-se que a média dos dados observados é uma estimativa melhor que a predição do modelo (KRAUSE; BOYLE; BÄSE, 2005).

O índice de concordância ou *D* de Willmott (WILLMOTT, 1981) determina a exatidão do método e indica o grau de afastamento dos valores estimados em relação aos valores observados. Para valores de $D = 0$ ou $D = 1$ obtêm-se respectivamente nenhuma concordância ou concordância perfeita (ANDRADE JÚNIOR et al., 2003).

A partir da nova base dados, obtida da junção entre as informações de precipitação cedidas pelo ITEP e pelo INMET, foi realizada uma análise em escala mensal, levando em conta cada umas das estações pertencentes a um mês específico e seu respectivo ano, o que

equivale a um total de 756 meses analisados, ou seja, 12 meses (janeiro a dezembro) em 63 anos (1950 a 2012). A análise em cada mês foi efetuada empregando a metodologia *cross validation* seguida da execução de cada uma das técnicas de interpolação apresentadas na seção 4.5 (exceto para o *Kernel smoothing*), visando posteriormente comparar e identificar qual dentre os métodos de interpolação apresenta melhor conjunto de medidas de avaliação (*EM*, *EAM*, *EQM*, *REQM*, *EFM*, *D* e R^2 ,) em todos os meses analisados.

A quantidade de pontos amostrais omitidos utilizando-se a metodologia *cross validation*, para execução das interpolações, foram selecionados de forma aleatória e correspondem a 30% da soma total de pontos em cada mês, conforme realizado por Vicente-Serrano et al. (2003). Para as interpolações ainda foram consideradas, em cada um dos 7 métodos, diferentes variações, no que diz respeito a escolha de parâmetros, variogramas, função base e grau da superfície.

A interpolação utilizando o método *Inverse Distance Weighting* foi realizada para 3 diferentes valores p , isto é, para valores de parâmetro de ponderação igual a 2, 3 e 4. Na interpolação pelo método *Shepard modified* foram considerados como número de pontos amostrais N_W e N_Q , dentro dos círculos de raios R_W e R_Q , os valores respectivamente iguais a 13 e 19, como sugerido por Renka (1988).

Para a interpolação via a técnica *Radial Basis Function* utilizou-se as funções *Multiquadric*, *Inverse Multiquadric*, *Multilog*, *Natural Cubic Spline* e *Thin Plate Spline* (Tabela 3) com valores de $R^2 = \text{Diag}^2 / (25N)$ em cada uma destas funções e em cada mês, onde *Diag* é o comprimento da diagonal da grade de dados a ser interpolado e N é o número total estações pluviométricos.

Na interpolação por meio do *Ordinary Kriging* foi considerado cada um dos 11 variogramas descritos na Tabela 5: *Linear*, *Exponential*, *Gaussian*, *Power*, *Quadratic*, *Rational quadratic*, *Wave*, *Logarithmic*, *Spherical*, *Pentaspheical* e *Cubic*. Tais variogramas foram previamente ajustados para cada um dos 756 meses pelo método dos mínimos quadrados (subseção 4.5.7.2) e posteriormente utilizados no *Ordinary Kriging*.

O uso do método *Trend Surface Analysis* se deu utilizando superfícies de primeiro, segundo, terceiro e quarto grau ($n = 1, 2, 3$ e 4). Assim como nos demais métodos, as interpolações foram realizadas para cada um dos 756 meses e ainda sobre cada uma das superfícies.

5 Resultados

5.1 Windows Century – WinCent

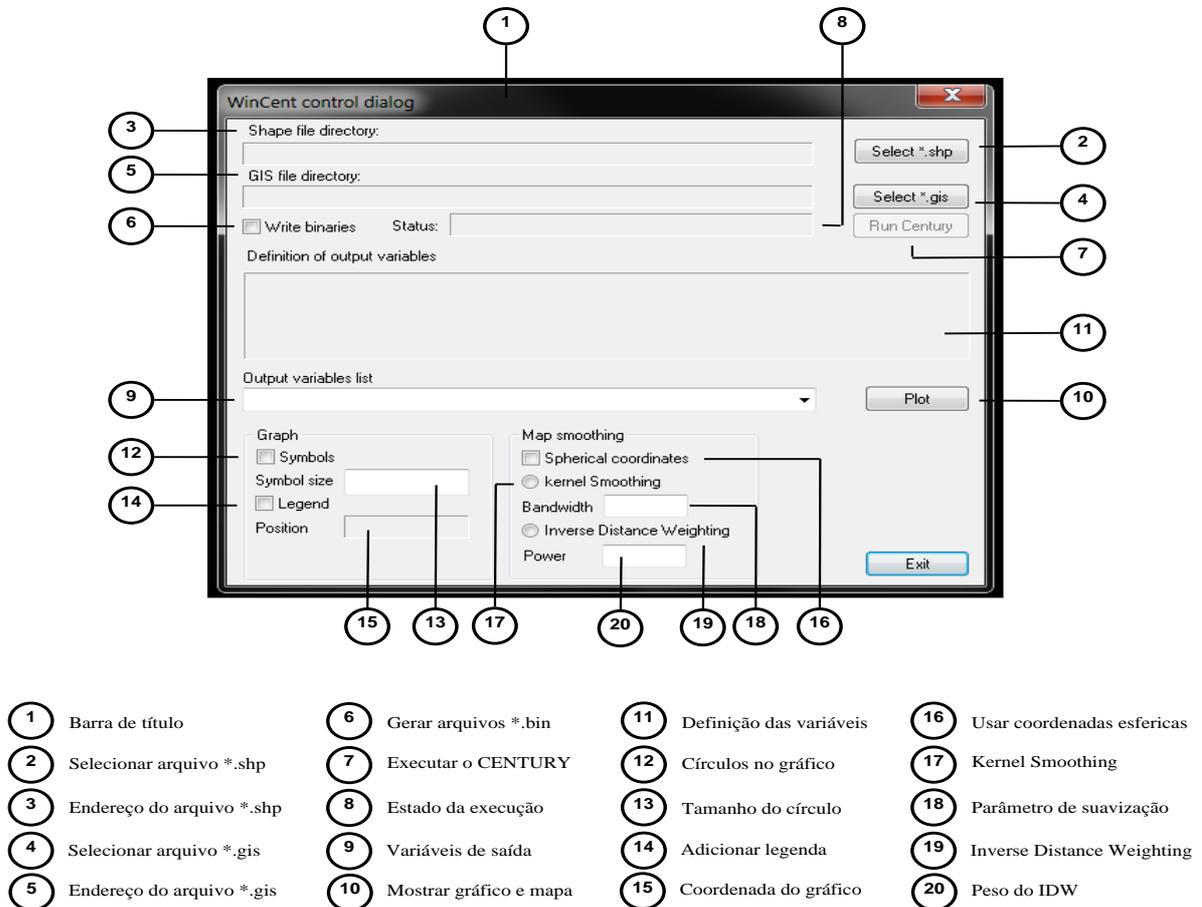
5.1.1 A interface WinCent

O resultado final das adaptações feitas ao código fonte do modelo Century 4.5, através do algoritmo implementado em linguagem C para execução de múltiplas simulações e uma posterior análise gráfica e espacial interativa, é um único módulo denominado WinCent, que pode ser utilizado em qualquer plataforma Windows. Sua funcionalidade é mostrada esquematicamente na Figura 6 e aqui são sintetizados os seis passos necessários para executar múltiplas simulações:

- I. definir a região de estudo (escolha do *shape file*);
- II. definir o número N de unidades de simulação;
- III. utilizar o programa auxiliar FILE100 para atualizar valores ou criar novas opções em qualquer um dos arquivos **.100*;
- IV. utilizar o programa auxiliar EVENT100 para estabelecer um período de simulação e agendar eventos que venham a ocorrer durante a simulação;
- V. preparar o arquivo auxiliar de extensão **.gis* com formatação conforme apresentada na Tabela 1;
- VI. executar a interface WinCent para realizar múltiplas simulações e analisar os resultados utilizando as ferramentas gráficas implementadas.

A GUI desenvolvida (Windows Century – WinCent) para o programa concebido é composta de uma janela principal (*WinCent control dialog*) e pelas janelas auxiliares *WinCent Graph*, *Graph control dialog* e *WinCent GIS Graph*. Os itens indicados na Figura 15 indicam a função dos componentes individuais da janela *WinCent control dialog*. Os componentes possuem funções específicas para escolha do *shape file*, execução da simulação, ajuste do gráfico de linhas e seleção do método de interpolação.

Figura 15 – Interface WinCent e a função de seus componentes.

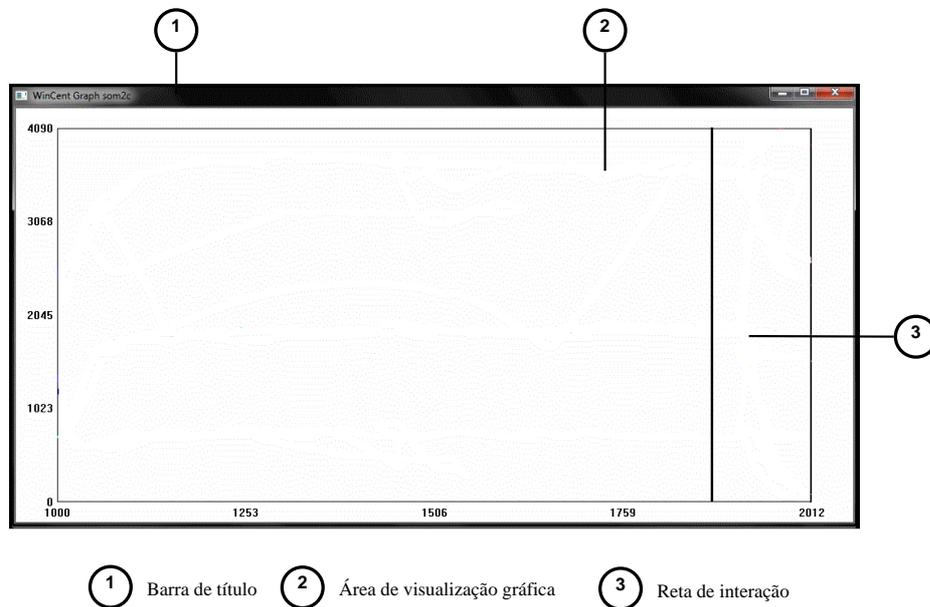


Os botões *Select *.shp* e *Select *.gis* permitem ao usuário escolher o diretório de trabalho e selecionar os arquivos *.shp e *.gis desejados, sendo o endereço destes mostrados respectivamente nos campos *Shape file directory* e *GIS file directory*. Assim como na versão 4.5 do modelo Century, o WinCent mantém a escrita dos resultados da simulação em arquivos binários, desde que ativada a opção *Write binaries*. Caso a opção não seja ativada os arquivos binários não serão salvos no disco rígido.

O botão *Run Century* ativa a execução das simulações e o estado da atual destas é apresentado no campo *Status*. Para prosseguir com a análise gráfica e espacial dos resultados é necessário selecionar uma das variáveis de saída na caixa de listagem *Output variables list*, obtendo assim, instantaneamente, a definição e unidade de medida da variável no campo de definição das variáveis de saída (*Definition of output variables*). Gráficos de linha da evolução temporal e interpolação espacialmente explícita para variável selecionada são ativados pelo botão *Plot*. É ainda possível inserir (componente 12) e dimensionar (componente 13) círculos ao longo dos gráfico de linhas com o objetivo de auxiliar a visualização dos mesmos.

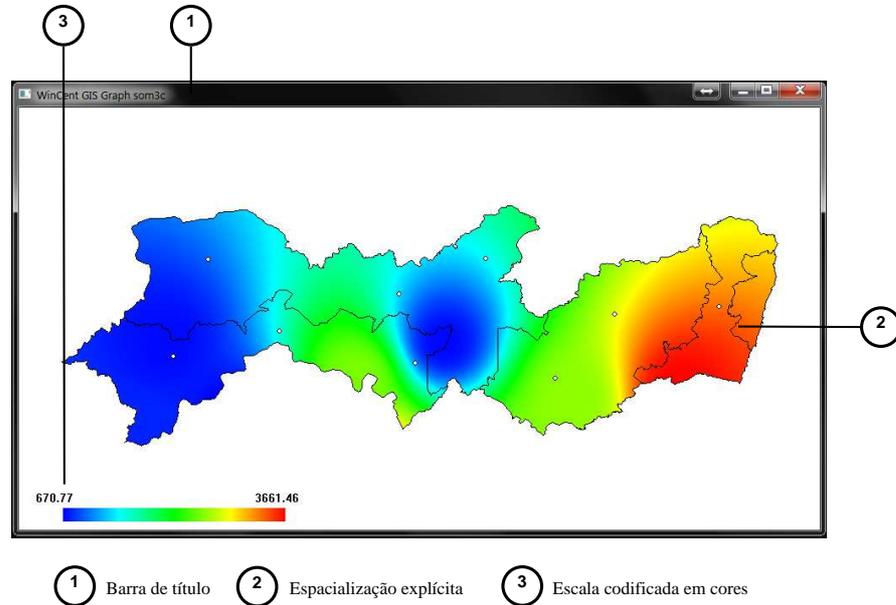
Imediatamente após acionar o botão *Plot* surgem as duas janelas *WinCent Graph* e *WinCent GIS Graph*. A janela *WinCent Graph* (Figura 16) é responsável por mostrar o resultado em gráfico de linhas da variável selecionada, e contém uma reta vertical que designa-se a escolha de um período (“clitando” com o botão esquerdo em um período específico) no qual a interpolação espacialmente explícita é realizada e dinamicamente exibida em um mapa em intensidade de cores na janela *WinCent GIS Graph*, o mapa é atualizado quando mudado a posição da reta vertical.

Figura 16 – Janela *WinCent Graph* para visualização do resultado da simulação através de gráfico de linhas.



A janela *WinCent GIS Graph* (Figura 17) exibe o resultado da interpolação. A interpolação pode ser realizada selecionando o método IDW ou *Kernel Smoothing*, quando ativado respectivamente os campos *Inverse Distance Weighting* ou *Kernel Smoothing* na janela *WinCent control dialog*. A interpolação ainda pode ser executada utilizando o sistema de coordenadas esféricas (selecionando *Spherical coordinates*) para obtenção da função distância, caso contrário será utilizada a distância Euclidiana no plano como função distância. Os parâmetros de suavização (h) e peso (p) nos métodos *Kernel Smoothing* e IDW podem ser respectivamente informados nos campos *Bandwidth* e *Powerna* na janela *WinCent control dialog*.

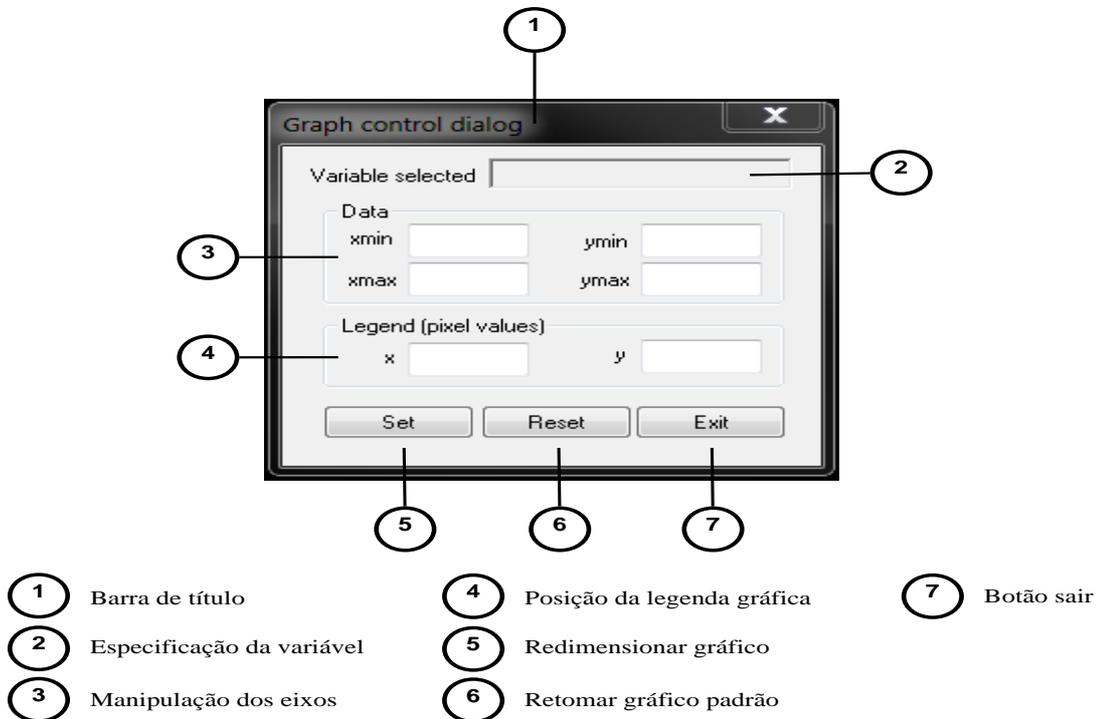
Figura 17 – Janela *WinCent GIS Graph* para visualização espacialmente explícita do resultado da simulação através de mapas em intensidade de cores, obtida a partir das técnicas de interpolação *Inverse Distance Weighting* e *Kernel Smoothing*.



A espacialização explícita mostrada na janela *WinCent GIS Graph* é delimitada sobre a região de estudo (*shape file*) e uma escala em intensidade de cores mostra o valor da variável de saída selecionada. A escala de cores é constituída continuamente pelas cores primárias (vermelho, verde e azul – modelo RGB) e é definido o azul como a cor de menor intensidade, o verde como intensidade intermediária e o vermelho como a cor de maior intensidade. Na janela *WinCent GIS Graph* é também exibida a localização geográfica das unidades de simulação (representadas por pequenos círculos) informadas no arquivo auxiliar *.gis.

A janela *Graph control dialog* possibilita a visualização em detalhes do gráfico de linhas e a inserção de uma legenda identificando cada uma das unidades de simulação. Esta janela é acionada quando o botão direito do mouse é “clicado” sobre a janela *WinCent Graph*. Seus componentes são apresentados na Figura 18.

Figura 18 – Janela de controle de visualização gráfica.



A janela *Graph control dialog* é constituída pela depressão retangular que mostra qual variável está sendo exibida na janela *WinCent graph* e pelos campos de dados (*Data*) e legenda (*Legend*). Detalhes para um período específico no gráfico de linha podem ser analisados modificando os valores *xmin* e *xmax* nas caixas de edição do campo de dados. A posição da legenda (em pixels⁶) também podem ser especificadas utilizando as caixas de edição no campo *Legend*, uma vez que ativado o campo *Legend* na janela *WinCent control dialog*. O botão *Set* ativa as escolhas especificadas nos campos de dados e legenda, ao clicar no botão *Reset* a configuração inicial da visualização gráfica é retomada (extraída automaticamente a partir da simulação).

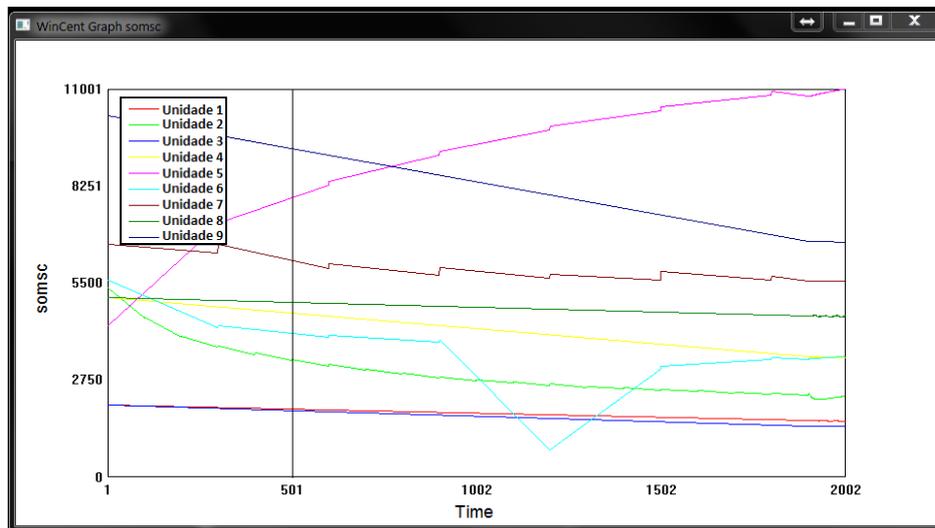
5.1.2 Simulação espacialmente explícita através da interface WinCent

Para testar a proposta desenvolvida foram consideradas nove unidades de simulação e distribuídas aleatoriamente sobre o *shape file* referente ao estado de Pernambuco, como descrito na subseção 4.2.1. Após a simulação, foi tomada a variável de saída que representa a quantidade total de carbono (*somsc*) presente nos compartimentos lento (*som2c*), ativo (*som1c(1)*) e passivo (*som3c*) da MOS.

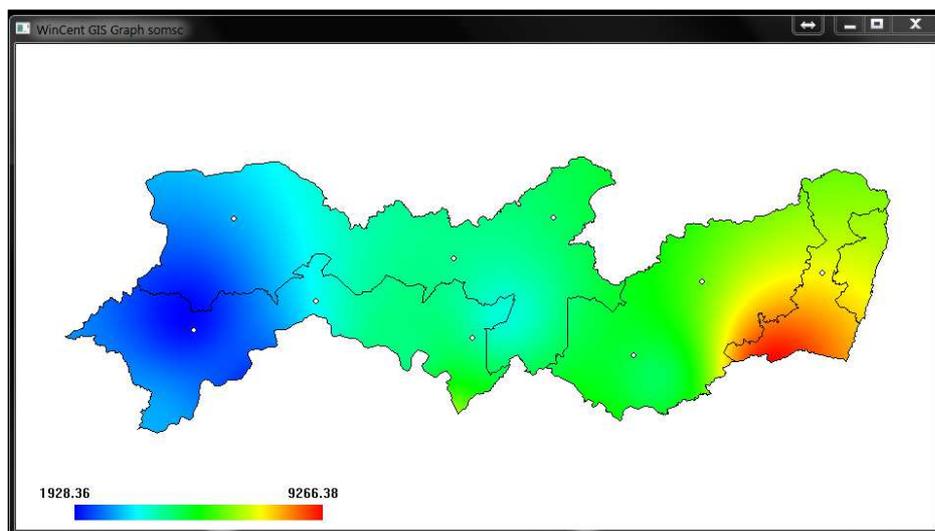
⁶Pixel (aglutinação de Picture e Element) é o menor elemento num dispositivo de exibição (como por exemplo, um monitor), ao qual é possível atribuir-se uma cor. É o menor ponto que forma uma imagem digital.

Na Figura 19 está apresentado o resultado da simulação temporal em gráfico de linhas (Figura 19(a)) para cada uma das unidades de simulação e a distribuição espacialmente explícita (Figura 19(b)) desta variável no instante de tempo igual a 501. Na espacialização foi utilizada a técnica de interpolação IDW com $p = 2$ como parâmetro de suavização e o sistema de coordenadas esféricas para obtenção da função distância, respectivamente informados nos campos *Power* e *Spherical coordinates* da janela *WinCent control dialog*.

Figura 19 – Interação entre as janelas *WinCent Graph* e *WinCent GIS Graph*: representação do resultado da simulação em gráfico de linhas para as nove unidades de simulação (a) e a distribuição espacialmente explícita, através do IDW ($p = 2$) (b), para os estoques de carbono no solo (*somsc*) no instante de tempo igual a 501 em Pernambuco.



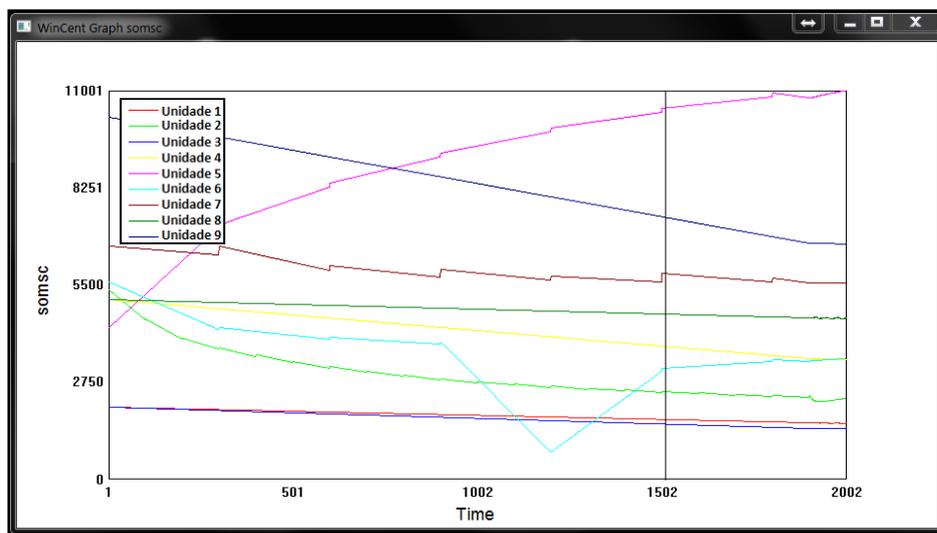
(a)



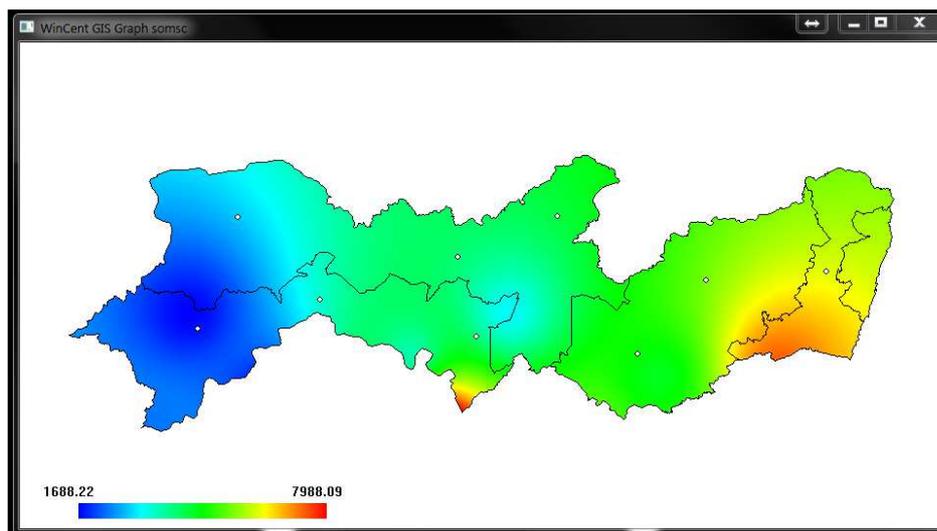
(b)

Já na Figura 20, é apresentada a interação entre as janelas *WinCent Graph* e *WinCent GIS Graph* quando considerado o período que corresponde o instante de tempo igual a 1502. Na interpolação também foi considerado o IDW ($p = 2$) e o sistema de coordenadas esféricas para obtenção da função distância.

Figura 20 – Interação entre as janelas *WinCent Graph* e *WinCent GIS Graph*: representação do resultado da simulação em gráfico de linhas para as nove unidades de simulação (a) e a distribuição espacialmente explícita, através do IDW ($p = 2$) (b), para os estoques de carbono no solo (*somsc*) no instante de tempo igual a 1502 em Pernambuco.



(a)

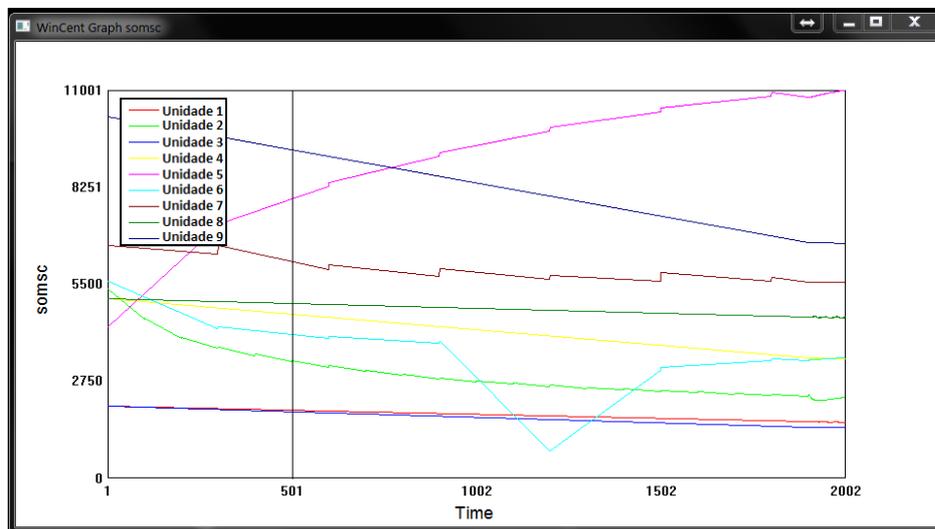


(b)

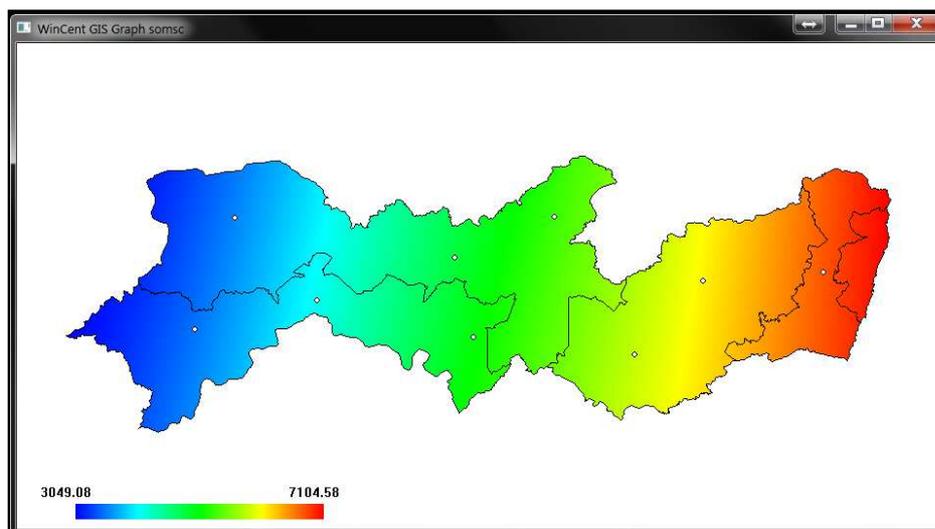
A espacialização explícita também foi realizada utilizando a técnica de interpolação *Kernel Smoothing* ($h = 0.10$). Para o produto desta interpolação foi novamente

considerado o sistema de coordenadas esféricas e o resultado obtido nas simulações a partir da variável correspondente a quantidade total de carbono (*somsc*) nos compartimentos lento, ativo e passivo da MOS, nos instantes de tempo correspondentes a 501 e 1502. Na Figura 21 observa-se os resultados da simulação em gráfico de linhas (Figura 21(a)) e da interpolação (Figura 21(b)) referente ao instante de tempo igual a 501.

Figura 21 – Interação entre as janelas *WinCent Graph* e *WinCent GIS Graph*: representação do resultado da simulação em gráfico de linhas para as nove unidades de simulação (a) e a distribuição espacialmente explícita, através do *Kernel Smoothing* ($h = 0.10$) (b), para os estoques de carbono no solo (*somsc*) no instante de tempo igual a 501 em Pernambuco.



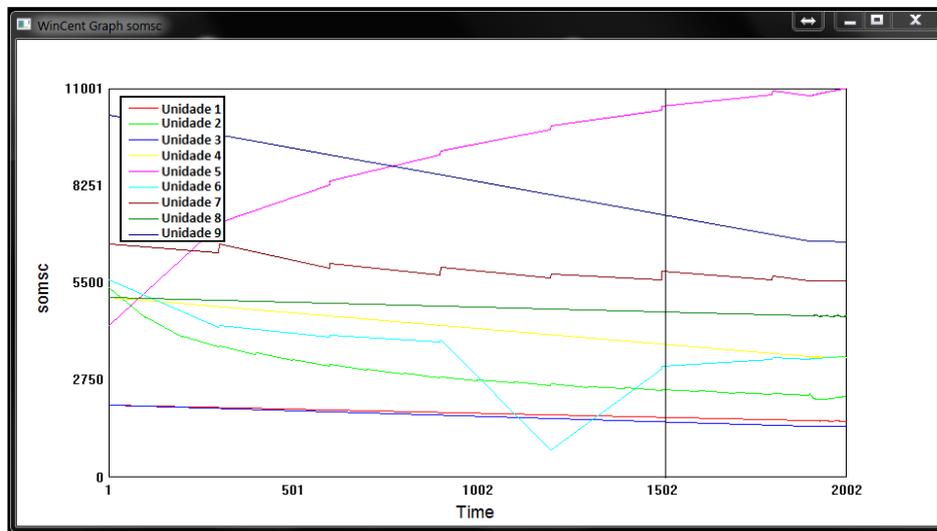
(a)



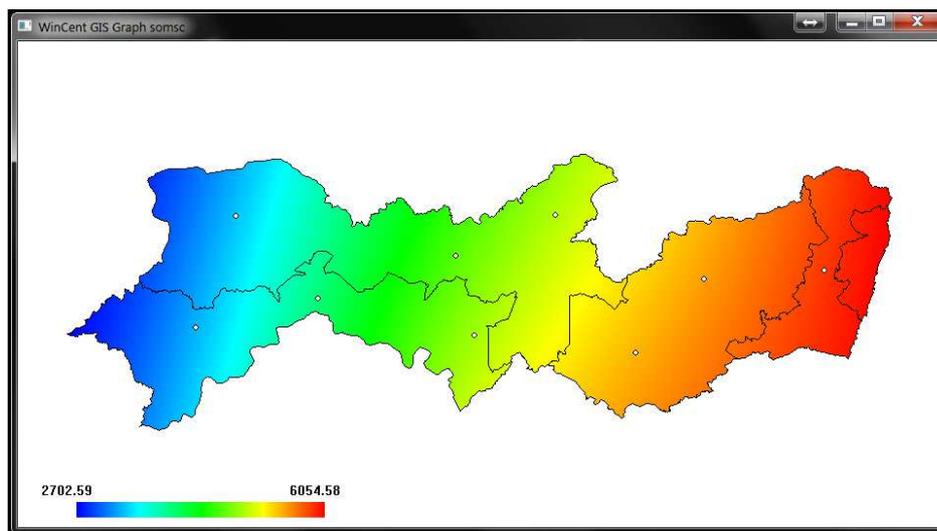
(b)

Para o instante de tempo igual a 1502, a Figura 22 apresenta a interação entre as janelas *WinCent Graph* e *WinCent GIS Graph* e, em gráfico de linhas (Figura 22(a)) e através da interpolação espacialmente explícita (Figura 22(b)), o resultado da simulação obtido com base nas nove unidades de simulação.

Figura 22 – Interação entre as janelas *WinCent Graph* e *WinCent GIS Graph*: representação do resultado da simulação em gráfico de linhas para as nove unidades de simulação (a) e a distribuição espacialmente explícita, através do *Kernel Smoothing* ($h = 0.10$) (b), para os estoques de carbono no solo (*somsc*) no instante de tempo igual a 1502 em Pernambuco.



(a)



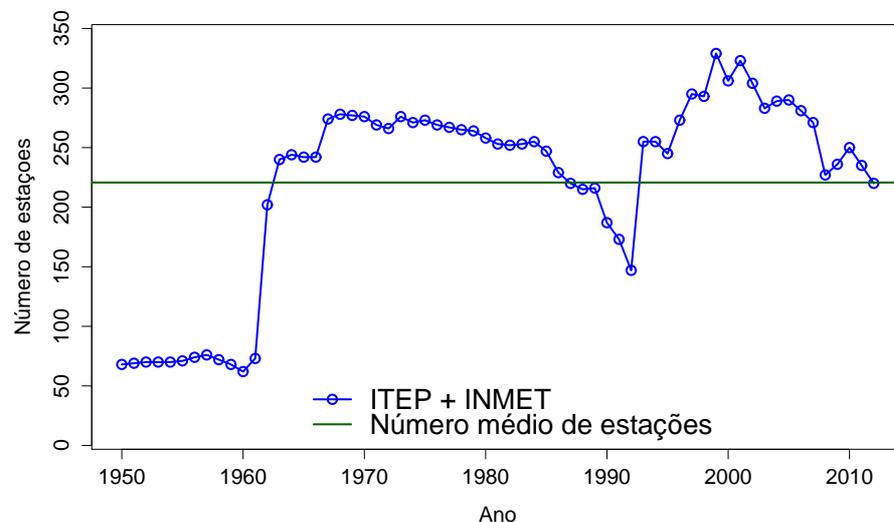
(b)

5.2 Windows Precipitation – WinPreci

5.2.1 Comparação dos métodos de interpolação espacial

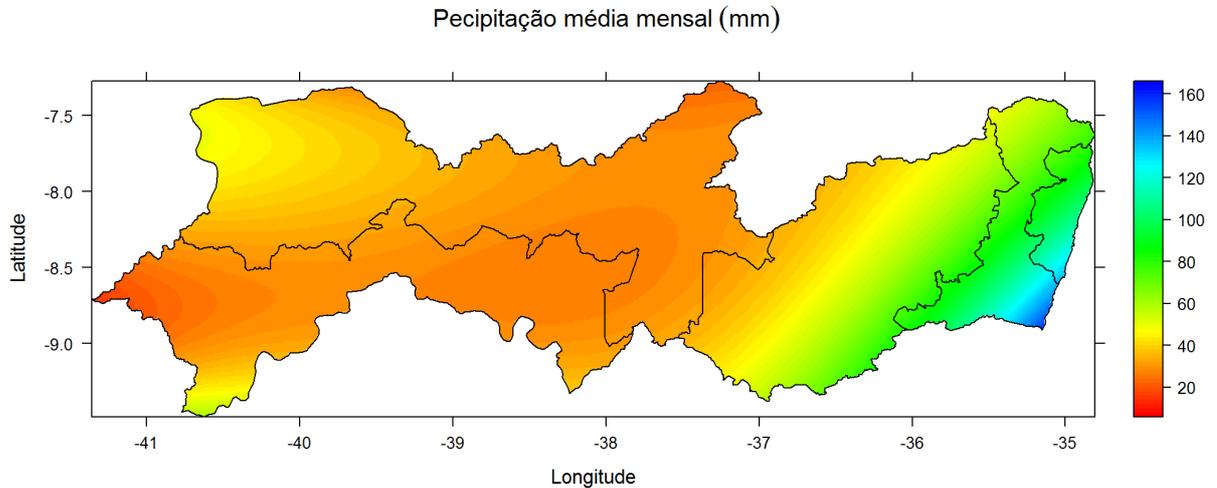
Assim como descrito na subseção 4.2.2, as informações de precipitação mensal cedidas pelo ITEP e os registros de precipitação disponibilizados pelo INMET, foram agrupadas formando assim uma única base de dados que possui uma quantidade total de 329 estações distribuídas sobre o interior e o contorno do estado de Pernambuco e compreende o período de 1950 a 2012, podendo um ano específico conter um número mínimo de 62 e máximo de 329 estações, com média anual igual a 220 estações pluviométricas (Figura 23). Nota-se que, em relação ao número médio anual de estações, os períodos de 1963 a 1986 e 1993 a 2011 destacam-se com maior quantidade de estações pluviométricas, ficando os demais anos abaixo do número médio de estações.

Figura 23 – Quantidade total e número médio anual de estações pluviométricas para as séries de precipitação do ITEP e do INMET no período de 1950 a 2012 no estado de Pernambuco.



A partir da junção dos registros de precipitação foram realizadas inicialmente análises do comportamento espacialmente explícito da precipitação média mensal e do desvio padrão. Para isto foram calculadas médias mensais e os desvios padrão para cada uma das estações ao longo dos anos na nova base de dados. As médias obtidas para cada uma das estações pluviométricas foram interpoladas, a partir da técnica de interpolação *Trend surface analysis* ($n = 4$), obtendo como resultado um mapa codificado em intensidades de cores, atribuindo altos valores de precipitação para tons de azul, baixos valores de precipitação para tons de vermelho e valores intermediários ou moderados de precipitação para tons de verde (Figura 24).

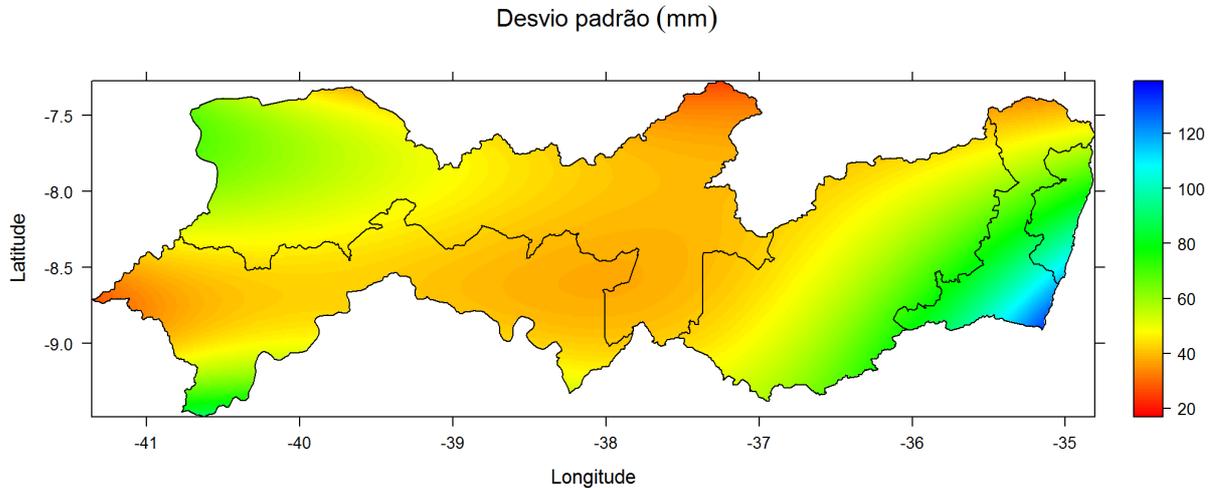
Figura 24 – Precipitação média mensal no estado de Pernambuco para o período de 1950 a 2012.



De acordo com o mapa de precipitação média mensal apresentado na Figura 24, pode-se observar valores de precipitação entre moderado e forte nas mesorregiões da Zona da Mata Pernambucana, Metropolitana do Recife e parte do Agreste Pernambucano, destacado-se maior incidência de precipitação (em torno de 160 $mm/mês$) nas cidades de São José da Coroa Grande, Barreiros e Tamandaré, e em uma pequena porção da região metropolitana. Quanto as mesorregiões do Sertão de São Francisco Pernambucano e Sertão Pernambucano, a precipitação média mensal é mais baixa (20-40 $mm/mês$), mas com uma leve acentuação próximo a Represa de Sobradinho e em uma pequena parte da região limitada pela Chapada do Araripe.

Os desvios padrão calculados em cada uma das estações pluviométricas foram interpoladas utilizando-se a técnica *Trend Surface Analysis* ($n = 4$), assim como para as médias mensais. Posteriormente estes valores foram apresentados no mapa correspondente ao estado de Pernambuco, codificando altos valores de desvio em tons de azul, valores intermediários em tons de verde e tons vermelho como valores baixo de desvio. O resultado desta codificação é mostrado na Figura 25 e pode-se notar uma variação na amplitude em torno de 20 a 120 $mm/mês$.

Figura 25 – Desvio padrão da precipitação média mensal no estado de Pernambuco para o período de 1950 a 2012.



As menores variações de precipitação média mensal ($40\text{-}45\text{ mm/mês}$) concentram-se a partir de um limiar formado no Agreste Pernambucano que se estende as mesorregiões do Sertão Pernambucano e São Francisco Pernambucano, com exceção da região localizada no Sertão de São Francisco, próxima a Represa de Sobradinho, e na área do Sertão Pernambucano que engloba a Chapada do Araripe. Maiores variações de precipitação ($90\text{-}120\text{ mm/mês}$) são vistas no litoral Pernambucano, sendo mais intensa na região Sudeste da Zona da Mata Pernambucana. Com isto conclui-se que houve uma variação mais elevada onde encontra-se maior incidência de precipitação média mensal, característica da região Nordeste que possui certa irregularidade nas ocorrências de chuva.

Uma posterior análise visou comparar e identificar qual dentre os métodos de interpolação apresenta melhor desempenho em todos os meses analisados. Após a execução dos métodos de interpolação para cada um dos 756 meses analisados, tomando como base o procedimento proposto na metodologia *cross validation*, obteve-se para cada mês valores interpolados que foram comparados com os valores reais coletados pelos postos pluviométricos. Através dos valores interpolados e coletados foi possível avaliar o desempenho dos métodos de interpolação utilizando-se as medidas de avaliação de desempenho (EM , EAM , EQM , $REQM$, EFM , D e R^2) descritas na Tabela 6. Os valores obtidos para estas medidas de avaliação estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Resumo dos valores obtidos através das medidas de avaliação de desempenho para os 7 métodos de interpolação.

Métodos	Avaliadores						
	<i>EM</i>	<i>EAM</i>	<i>EQM</i>	<i>REQM</i>	<i>EFM</i>	<i>D</i>	<i>R</i> ²
<i>Inverse Distance Weighting</i>							
<i>p</i> = 2	0.06 ^a	27.10	2253.81 ^a	47.47 ^a	0.72 ^b	0.91	0.72 ^b
<i>p</i> = 3	0.14	26.9 ^a	2321.72	48.18	0.71	0.92 ^b	0.72 ^b
<i>p</i> = 4	0.23	27.53	2454.56	49.54	0.70	0.91	0.70
<i>Kriging</i>							
<i>Cubic</i>	-0.16	54.38	34013.45	184.43	-3.25	0.46	0.13
<i>Exponential</i>	-0.14	27.70	2361.10	48.59	0.71 ^b	0.91	0.71 ^b
<i>Gaussian</i>	13.47	232.77	12415309.00	3523.54	-1549.18	0.00	0.00
<i>Linear</i>	-0.12	27.60 ^a	2354.38 ^a	48.52 ^a	0.71 ^b	0.92 ^b	0.71 ^b
<i>Logarithmic</i>	105.79	1022.60	8.76E+08	29593.97	-109352.00	0.00	0.00
<i>Pentaspheical</i>	-0.10	28.08	2399.73	48.99	0.70	0.91	0.71 ^b
<i>Power</i>	0.02	30.63	3361.22	57.98	0.58	0.89	0.62
<i>Quadratic</i>	-0.08	28.05	2398.12	48.97	0.70	0.91	0.71 ^b
<i>Rational Quadratic</i>	-1.58	164.34	1710690.00	1307.93	-212.60	0.03	0.00
<i>Spherical</i>	-0.09	28.31	2447.71	49.47	0.69	0.91	0.70
<i>Wave</i>	-7.15 ^{a,c}	201.26	3233551.00	1798.21	-402.74	0.01	0.00
<i>Shepard Modified</i>	0.52	29.93	13015.28	114.08	-0.63	0.67	0.29
<i>Natural Neighbour</i>	0.54	26.4	2203.97	46.95	0.71	0.92	0.72
<i>Radial Basis Function</i>							
<i>Inverse multiquadric</i>	-1.68 ^a	66.85	316123.30	562.25	-38.47	0.09	0.01
<i>Multilog</i>	1.96	78.77	353463.80	594.53	-43.13	0.09	0.01
<i>Multiquadric</i>	2.88	61.76 ^a	98500.63 ^a	313.85 ^a	-11.3 ^b	0.25 ^b	0.05 ^b
<i>Natural cubic spline</i>	3.45	72.09	248202.10	498.20	-29.99	0.12	0.02
<i>Thin plate spline</i>	1.17	70.92	245108.70	495.08	-29.60	0.12	0.02
<i>Nearest Neighbour</i>	0.10	31.83	3250.23	57.01	0.59	0.89	0.63
<i>Trend Surface Analysis</i>							
<i>n</i> = 1	0.03	37.39	3312.01	57.55	0.59	0.86	0.59
<i>n</i> = 2	0.04	31.81	2564.40	50.64	0.68	0.90	0.68
<i>n</i> = 3	-0.09 ^a	28.58	2138.61	46.25	0.73	0.92	0.73
<i>n</i> = 4	0.19	26.37 ^{a,c}	1911.15 ^{a,c}	43.72 ^{a,c}	0.76 ^{b,d}	0.93 ^{b,d}	0.76 ^{b,d}

^{a,b}: Os menores e os maiores valores respectivamente encontrados para cada medida de avaliação dentro dos métodos de interpolação; ^{c,d}: O menor e o maior valor respectivamente encontrado para cada medida de avaliação entre os métodos de interpolação.

Conforme mostrado na Tabela 7, pode-se observar quais entre os 7 métodos de interpolação e quais das variações dos métodos *Inverse Distance Weighting*, *Kriging*, *Radial Basis Function* e *Trend Surface Analysis* apresentam o melhor conjunto de medidas de avaliadores, ou seja, os menores valores para as medidas de avaliação ME , MAE , MSE e $RMSE$, e os maiores valores (próximo de 1) para as medidas NSE , D e R^2 .

Na interpolação pelo *Inverse Distance Weighting* o melhor conjunto de medidas de avaliação foi obtido utilizando-se o parâmetro de ponderação $p = 2$, ou seja, para o conjunto de valores $EM = 0.06$; $EAM = 27.1$; $EQM = 2253.81$; $REQM = 47.47$; $EFM = 0.72$; $D = 0.91$ e $R^2 = 0.72$. Contudo, para $p = 3$, é importante ressaltar que os valores de EAM e D foram os melhores dentre os três valores de p analisados, e ainda que os valores obtidos para os coeficientes de determinação foram iguais, quando realizada a interpolação com parâmetros de ponderação iguais a 2 e 3.

Por outro lado, na interpolação através do *Shepard Modified*, o qual se trata de uma modificação no IDW, não foram encontrados bons resultados, uma vez que os valores de medidas de avaliação obtidos não foram tão vantajosos quanto os obtidos nas interpolações realizadas utilizando o IDW ($p = 1, 2$ e 3), particularmente no valor calculado para a eficiência do modelo ($EFM = -0.63$). Isto mostra que a média dos valores observados nos postos pluviométricos seria uma estimativa mais representativa que os valores interpolados.

Nas técnicas de interpolação *Natural Neighbour* e *Nearest Neighbour*, as quais utilizam a geração de diagramas de Voronoi no cálculo da interpolação, pode-se observar que as melhores medidas de avaliação foram obtidas para o método *Natural Neighbour*, exceto para o valor do erro médio ($EM = 0.10$) obtido no *Nearest Neighbour*.

O *Natural Neighbour*, quando comparado ao IDW, apresenta valores de EAM , EQM e $REQM$ menores que os valores obtidos na interpolação pelo IDW ($p = 2, 3$ e 4). Já para as medidas de concordância e coeficiente de determinação, nota-se que houve igualdade entre os valores obtidos na interpolação com o *Natural Neighbour* e na interpolação com IDW, respectivamente para os parâmetros $p = 3$ e $p = 2$ e 3 . Ainda é importante mencionar que os valores obtidos para o EM e para a EFM na interpolação pelo IDW ($p = 2$) foram mais satisfatórios do que os valores encontrados na interpolação com o *Natural Neighbour*. Contudo, o método *Natural Neighbour* apresenta melhor conjunto de medidas de avaliação de que o método IDW ($p = 2, 3$ e 4).

Na interpolação por meio do *Ordinary Kriging*, o melhor conjunto de medidas de avaliação foi obtido quando utilizado na interpolação o variograma *Linear*, com exceção

do EM, o qual o teve menor valor encontrado quando utilizado o variograma *Wave*. Contudo, na interpolação tomando como base o variograma *Wave*, as medidas de eficiência ($EFM = -402.74$), concordância ($D = 0.01$) e coeficiente de determinação ($R^2 = 0.00$) não apresentaram bons resultados e se destacam entre os menos eficazes. A interpolação com base nos variogramas *Exponential*, *Pentaspherical* e *Quadratic* também apresentaram bons resultados. O melhor conjunto de medidas de avaliação para estes três tipos de variogramas foi encontrado no variograma *Exponential*, mas é importante mencionar que a diferença é pequena e que houve igualdade nos valores obtidos para as medidas de concordância ($D = 0.91$) e coeficiente de determinação ($R^2 = 0.71$) para estes três tipos de variogramas. Os conjuntos de avaliadores mais pessimistas foram obtidos quando realizada a interpolação com os variogramas *Gaussian*, *Logarithmic*, *Wave* e *Rational Quadratic*.

A interpolação com a técnica *Radial Basis Function* não se mostrou adequada, ficando atrás somente da interpolação por meio do *Ordinary Kriging*, quando utilizado os variogramas *Gaussian*, *Logarithmic*, *Wave* e *Rational Quadratic*. Entre as diferentes funções (*Multiquadric*, *Inverse Multiquadric*, *Multilog*, *Natural Cubic Spline* e *Thin Plate Spline*) utilizadas na interpolação com a técnica *Radial Basis Function*, pode-se destacar que a melhor estimativa foi obtida com o uso da função *Multiquadric*. Segundo Mazzini e Schettini (2009), esta função apresenta bons resultados para a maioria das interpolações.

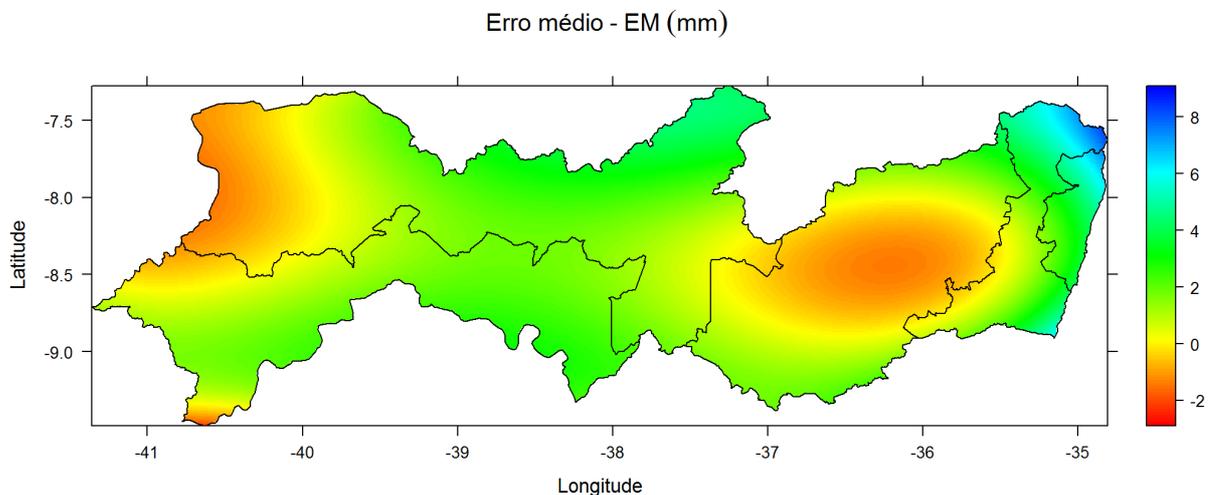
Os melhores conjuntos de medidas de avaliação dentre todas as técnicas de interpolação foram encontrados quando realizada a interpolação com a técnica *Trend Surface Analysis*, levando em conta as superfícies de terceiro e quarto grau, $n = 3$ e 4 . Este mesmo resultado foi obtido por Gomes et al. (2014) e Gomes et al. (2015), quando interpolado a precipitação pluviométrica no estado da Paraíba. Entre estas duas superfícies, a superfície de quarto grau exibiu melhor resultado, com o seguinte conjunto de medidas de avaliação: $EM = 0,19$, $EAM = 26.37$, $EQM = 1911.15$, $REQM = 43.72$, $EFM = 0.76$, $D = 0.93$, $R^2 = 0.76$. O fato de que o erro médio obtido na interpolação com a superfície de quarto grau não ter sido o menor entre todos os obtidos, não induz a prejuízos na utilização do método de interpolação *Trend Surface Analysis* ($n = 4$), já que, segundo Nalder e Wein (1998), esta medida deve ser aplicada com cautela, pois estimativas negativas e positivas podem ser anuladas e resultar em um erro menor que o real.

Ao concluir que o método *Trend Surface Analysis* ($n = 4$) apresentou melhor desempenho, quando comparado com as demais técnicas de interpolação expostas na seção 4.5, foi realizada uma análise espacialmente explícita para cada uma das medidas de avaliação. Esta análise visa identificar em quais regiões houve maior deficiência da técnica em obter boas estimativas. Para isto, calculou-se para cada uma das estações omitidas no procedimento de *cross validation*, as medidas de avaliação de desempenho descritas na Ta-

bela 6. Os resultados encontrados através destas medidas foram interpolados utilizando-se o método *Trend Surface Analysis* ($n = 4$) e mostrados no mapa do estado de Pernambuco, subdividido pelas mesorregiões. Aos mapas foram atribuídos tons de azul para altos valores, tons de verde para valores moderados ou intermediários e tons de vermelho para baixos valores, assim como nos mapas de precipitação média mensal e desvio padrão da precipitação mensal.

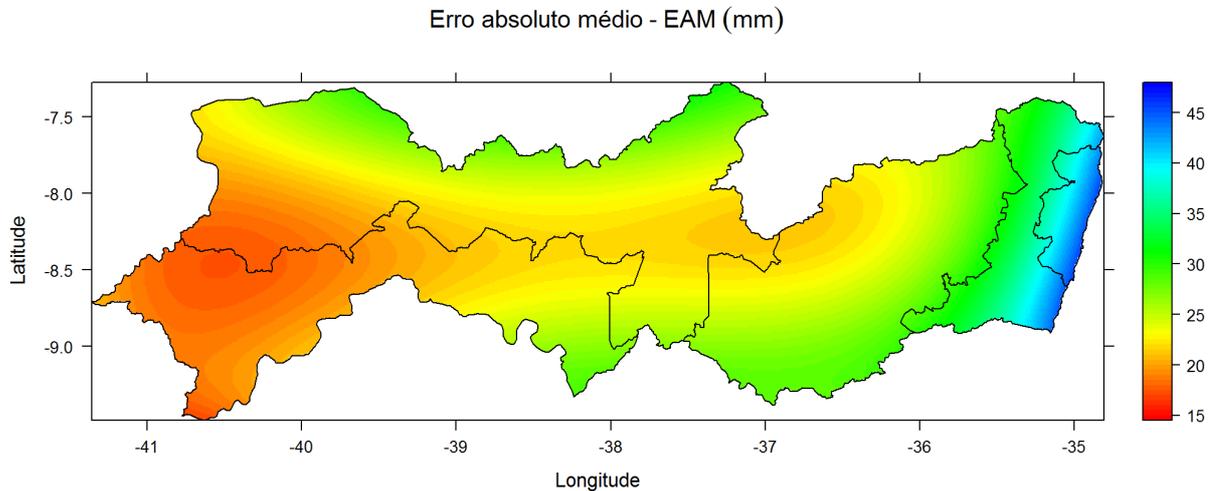
Na Figura 26 está apresentado de forma espacialmente explícita o *EM* obtido sobre todo o estado de Pernambuco quando utilizado o método de interpolação *Trend Surface Analysis*, $n = 4$. O *EM* encontrado apresenta-se com valores intermediários (entre 2 e 4 *mm*) sobre quase todo o estado, com exceção de uma pequena área situada em parte da região Metropolitana do Recife e da Zona da Mata Pernambucana, a qual atinge os maiores valores de *EM*. Os baixos valores de *EM* (entre 0 e -2 *mm*) concentraram-se em grande parte do Agreste Pernambucano, uma porção do Sertão Pernambucano e uma pequena área no Sertão de São Francisco, próxima a Represa de Sobradinho.

Figura 26 – Visualização espacialmente explícita do erro médio (*EM*) obtido quando utilizado a técnica de interpolação *Trend Surface Analysis* ($n = 4$) para interpolar a precipitação mensal para o estado de Pernambuco.



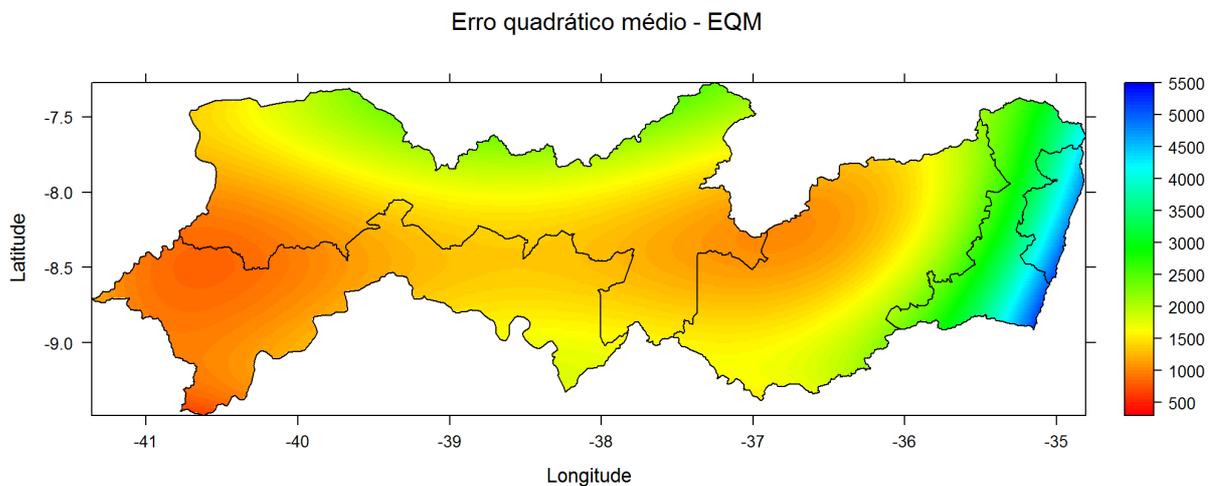
O erro médio absoluto obtido na interpolação (*Trend Surface Analysis*, $n = 4$) para o estado de Pernambuco pode ser visto através da Figura 27. Nota-se que os maiores valores de erro médio obtido concentram-se na região litoral (em torno de 45 *mm*), ou seja, na região onde houve incidência entre moderada e forte da precipitação média mensal (Figura 24). Valores abaixo de moderado para o *EAM* (em volta 23 *mm*) foram encontrados em uma faixa que se inicia no Agreste Pernambucano e se estende as mesorregiões do Sertão Pernambucano e Sertão de São Francisco Pernambucano, diminuindo gradativamente até atingir valores em torno de 16 *mm*.

Figura 27 – Visualização espacialmente explícita do erro absoluto médio (EAM) obtido quando utilizado a técnica de interpolação *Trend Surface Analysis* ($n = 4$) para interpolar a precipitação mensal para o estado de Pernambuco.



Assim como na visualização espacialmente explícita do EAM (Figura 27), os maiores valores de erro médio quadrático (valores entre 4000 e 5000) foram encontrados no litoral pernambucano (Figura 28). Os altos valores obtidos na escala do EQM podem ser justificados, segundo Hallak e Filho (2011), pelo fato desta medida ser mais sensível a grandes erros, ou seja, por elevar as diferenças individuais entre valor observado e estimado ao quadrado (Tabela 6).

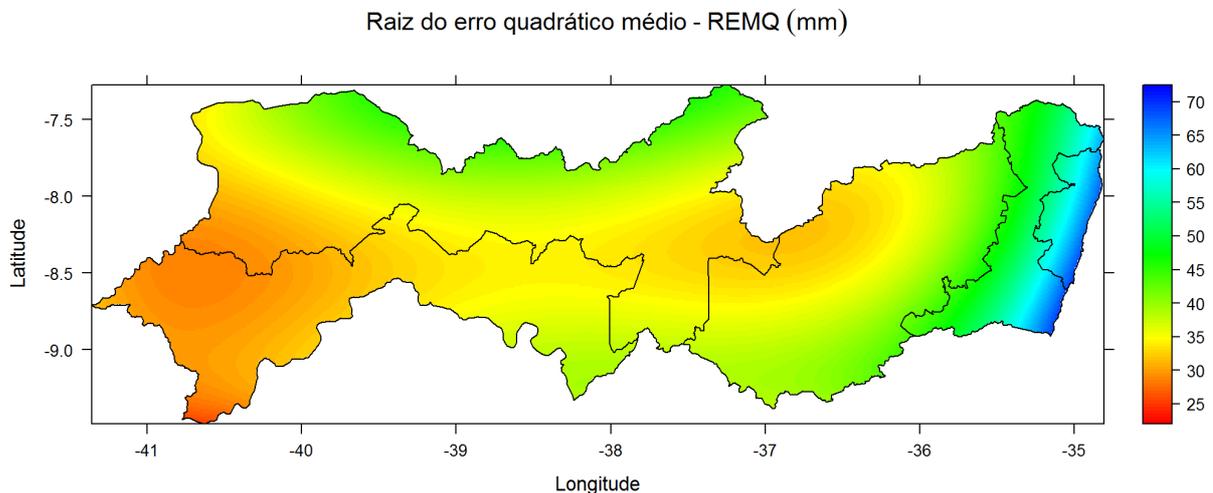
Figura 28 – Visualização espacialmente explícita do erro quadrático médio (EQM) obtido quando utilizado a técnica de interpolação *Trend Surface Analysis* ($n = 4$) para interpolar a precipitação mensal para o estado de Pernambuco.



Em adição ao EQM , a raiz do erro médio quadrático ($REQM$) é comumente usada para expressar a acurácia dos resultados, uma vez que possui a vantagem de apresentar valores nas mesmas dimensões que da variável analisada, ou seja, milímetro (mm). Neste

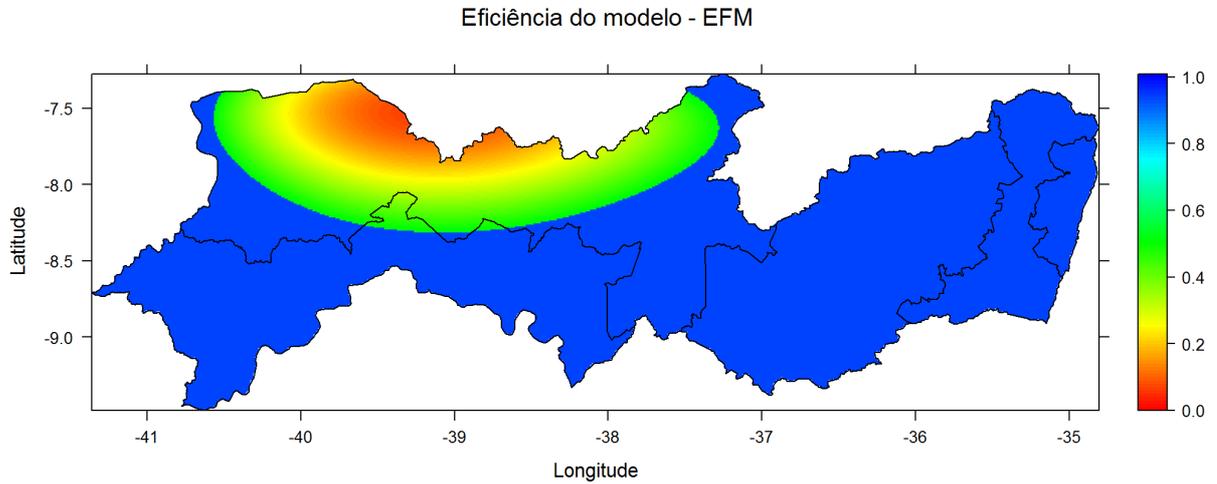
sentido, está apresentado na Figura 29 o comportamento espacialmente explícito para o $REQM$ (mm) obtido quando utilizado o método *Trend Surface Analysis*, $n = 4$. Assim como no mapa de EAM (Figura 27), os maiores valores de $REQM$ encontrados (65 a 70 mm) se localizaram no litoral pernambucano, onde houve incidência entre moderada e forte da precipitação média mensal (Figura 24). Ainda como no mapa de EAM , pode-se observar menores valores de $REQM$ (em torno de 35 mm) em um limiar que se inicia no Agreste Pernambucano e se propaga sobre parte das mesorregiões do Sertão de Francisco e Sertão Pernambucano, diminuindo lentamente até atingir valores próximos a 27 mm .

Figura 29 – Visualização espacialmente explícita da raiz do erro quadrático médio ($REQM$) obtida quando utilizado a técnica de interpolação *Trend Surface Analysis* ($n = 4$) para interpolar a precipitação mensal para o estado de Pernambuco.



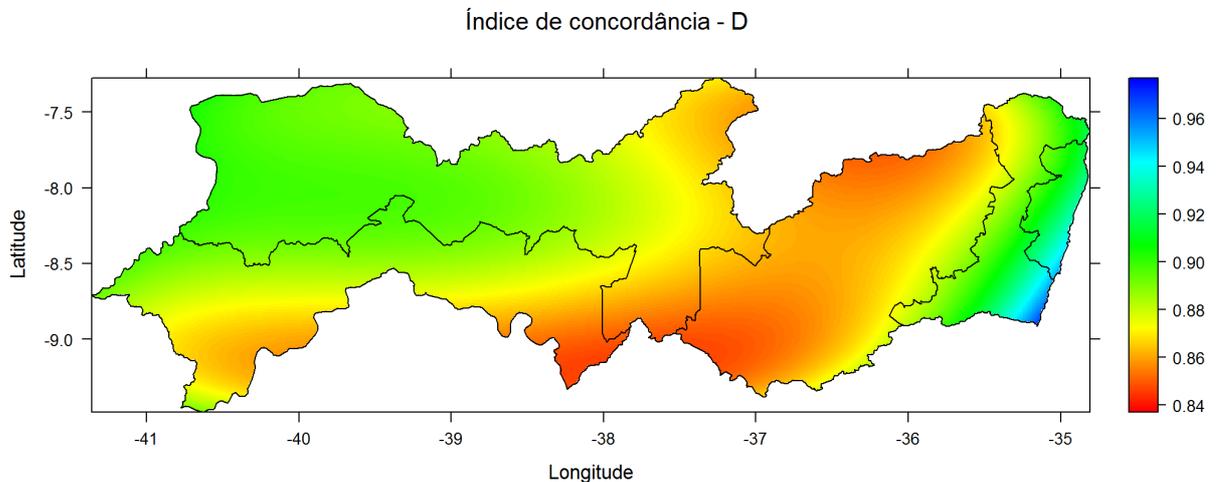
Na Figura 30 é apresentada de forma espacialmente explícita a eficiência do modelo – EFM (modelo ou método *Trend Surface Analysis* ($n = 4$)) em interpolar a precipitação mensal para o estado de Pernambuco. Pode-se observar que os valores de EFM obtidos variam de 0 a 1. De acordo com Machado e Vettorazzi (2003) a EFM é um dos critérios mais importantes para avaliar o ajuste de modelos e, segundo Silva et al. (2008), quando a EFM resultar valores maiores que 0.75, o desempenho do modelo é considerado bom. Para valores de EFM entre 0.36 e 0.75, o desempenho é considerável aceitável, enquanto valores de EFM inferiores a 0.36 fazem com que o modelo seja inaceitável. Assim, pode-se concluir que a técnica *Trend Surface Analysis* ($n = 4$) é considerada de aceitável a boa para estimar a precipitação mensal para grande parte do estado de Pernambuco. O método mostrou-se menos adequado na área em vermelho, próximo ao estado do Ceará. Os valores de EFM encontrado nesta área variam em torno de 0, mostrando que, conforme Krause, Boyle e Bäse (2005), nesta área as estimativas através do método *Trend Surface Analysis* ($n = 4$) são tão precisas quanto a média da precipitação coletada nos postos pluviométricos.

Figura 30 – Visualização espacialmente explícita da eficiência do modelo (EFM) obtida quando utilizado a técnica de interpolação *Trend Surface Analysis* ($n = 4$) para interpolar a precipitação mensal para o estado de Pernambuco.



Na Figura 31 está descrito o comportamento espacialmente explícito para índice de concordância (D) calculado como medida de avaliação quando utilizado o método *Trend Surface Analysis*, $n = 4$. Os valores obtidos para esta medida encontram-se entre 0.84 e 0.96, aproximadamente. De acordo com Andrade Júnior et al. (2003) índice de concordância avalia o grau de afastamento dos valores interpolados em relação aos medidos nas estações pluviométricos e, conforme Santos et al. (2011), esta medida varia de zero a um (0 - 1), sendo zero, nenhuma concordância e um, concordância perfeita.

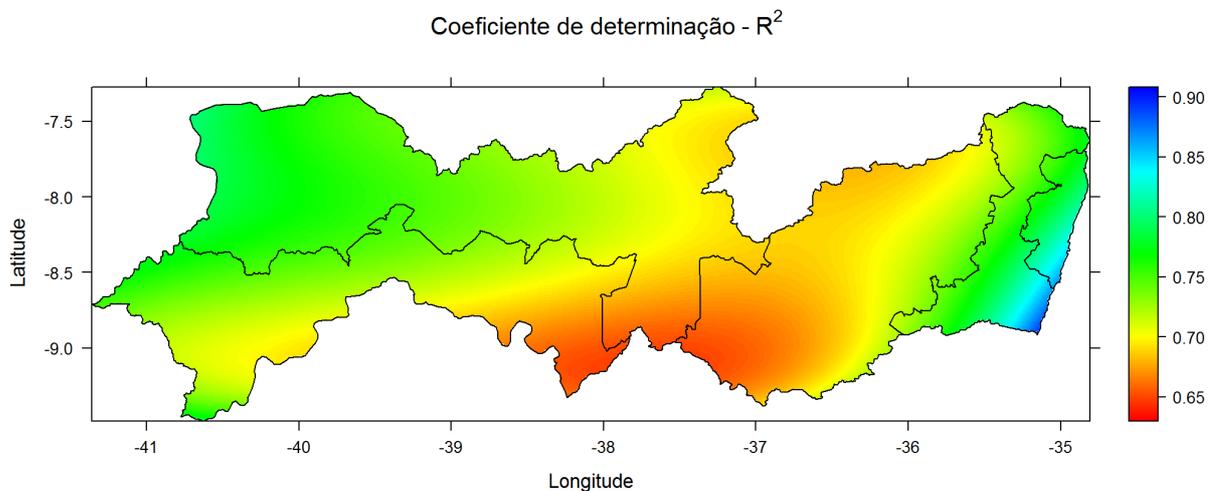
Figura 31 – Visualização espacialmente explícita do índice de concordância (D de Willmott) obtido quando utilizado a técnica de interpolação *Trend Surface Analysis* ($n = 4$) para interpolar a precipitação mensal para o estado de Pernambuco.



Diante disto, pode-se afirmar que o uso da técnica *Trend Surface Analysis* apresenta bons índices de concordância (entre 0.84 e 1) sobre todo o estado de Pernambuco (Figura 31), isto é, baixo grau de afastamento entre os valores estimados e medidos pelas estações pluviométricas. Os menores valores do índice de concordância ($D = 0.84$) concentram-se na região próxima ao Rio São Francisco e ao estado de Alagoas.

A dinâmica de distribuição dos diferentes tons de cores (vermelho, verde e azul) mostrados na Figura 32, para o coeficiente de determinação (R^2), se assemelham aos obtidos para os índices de concordância (Figura 31). Os altos valores obtidos de coeficiente de determinação (por volta de 0.75 a 0.90) são expressos em tons de verde e azul sobre quase todo o mapa do estado, com exceção de parte do Agreste Pernambucano e áreas próximas ao Rio São Francisco e ao estado de Alagoas, resultado semelhante ao obtido no comportamento do índice de concordância.

Figura 32 – Visualização espacialmente explícita do coeficiente de determinação (R^2) obtido quando utilizado a técnica de interpolação *Trend Surface Analysis* ($n = 4$) para interpolar a precipitação mensal para o estado de Pernambuco.



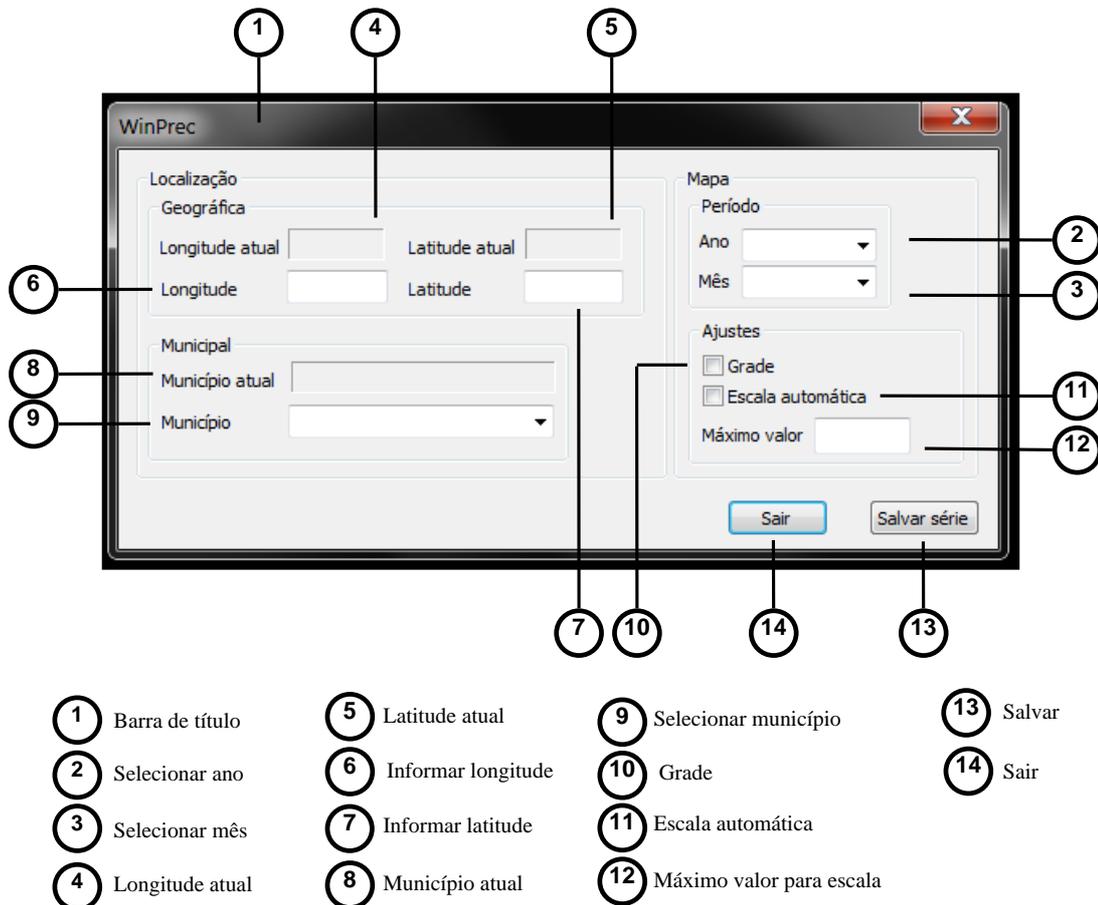
5.2.2 A interface WinPreci

Posteriormente a identificação do método de interpolação *Trend Surface Analysis* ($n = 4$) como a técnica que melhor apresentou desempenho, quando comparado aos diferentes métodos de interpolação para dados georreferenciados descritos na seção 4.5, foi realizada a interpolação mensal para os 63 anos (1950 a 2012). A interpolação se deu com o uso da técnica *Trend Surface Analysis* ($n = 4$) e foi executada sobre uma grade com espaçamento de aproximadamente 0.01 grau de longitude (Leste - Oeste) e 0.01 grau de latitude (Norte - Sul). Este espaçamento equivale a cerca de 1 quilômetro e 113 metros e soma um total de 81544 pontos distribuídos uniformemente sobre o estado de Pernambuco

(uma resolução de aproximadamente $1km^2$), os quais contém informações de precipitação mensal durante o período de 1950 a 2012.

As informações contidas em cada um dos 81544 pontos, ou em cada uma das coordenadas de longitude e latitude, foram concatenadas e construiu-se então uma única base de dados que retém informações de precipitação mensal para os anos de 1950 a 2012. Especificamente, para uma dada coordenada tem-se a série histórica de precipitação mensal para o período de 1950 a 2012. A partir desta base de dados foi concebido um programa através de um algoritmo implementado em linguagem de programação C e desenvolvido uma interface de fácil utilização denominada “Windows Precipitation” – WinPreci (Figura 33).

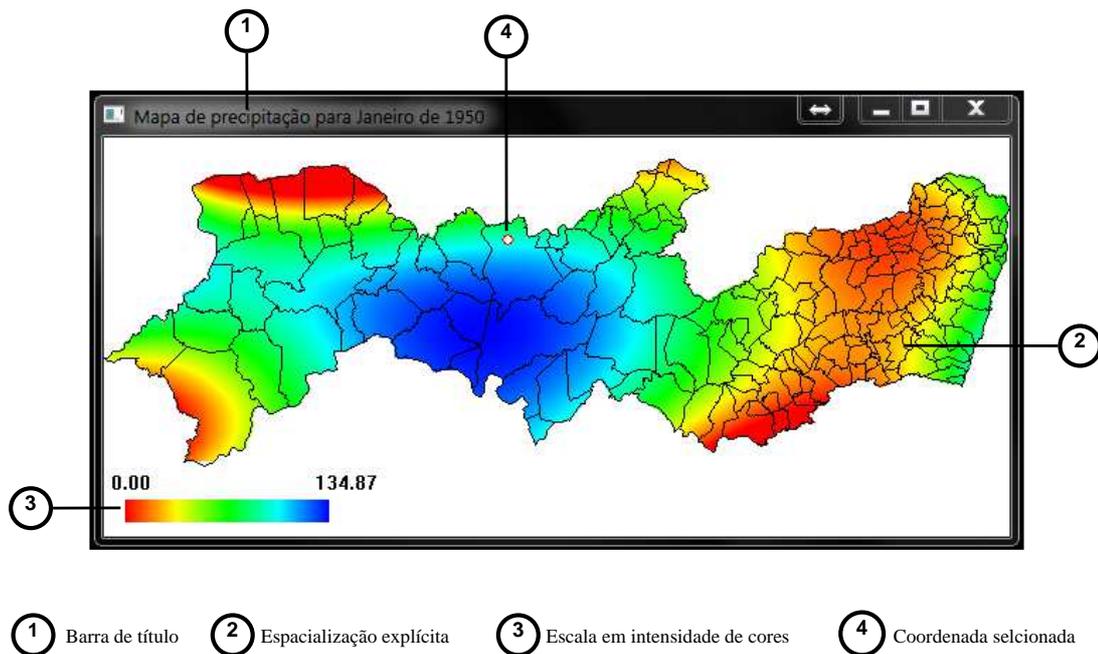
Figura 33 – A interface WinPreci e a função de seus componentes.



O programa desenvolvido tem como objetivo o acesso as séries históricas de precipitação mensal para cada uma das 81544 coordenadas, bem como a visualização espacialmente explícita do comportamento da precipitação mensal para o estado de Pernambuco. Para este fim, o programa concebido é formado por duas janelas que interagem entre si: uma janela principal (interface WinPreci) (Figura 33) e uma janela de visualização

especialmente explícita do comportamento da precipitação mensal em pernambuco para os anos de 1950 a 2012. Na (Figura 34) é mostrada a janela de visualização espacialmente explícita da precipitação mensal (*mm*) e o mapa de precipitação para o mês de janeiro de 1950.

Figura 34 – Janela de visualização espacialmente explícita para a precipitação mensal (*mm*) no estado de Pernambuco e o mapa de precipitação para janeiro de 1950.

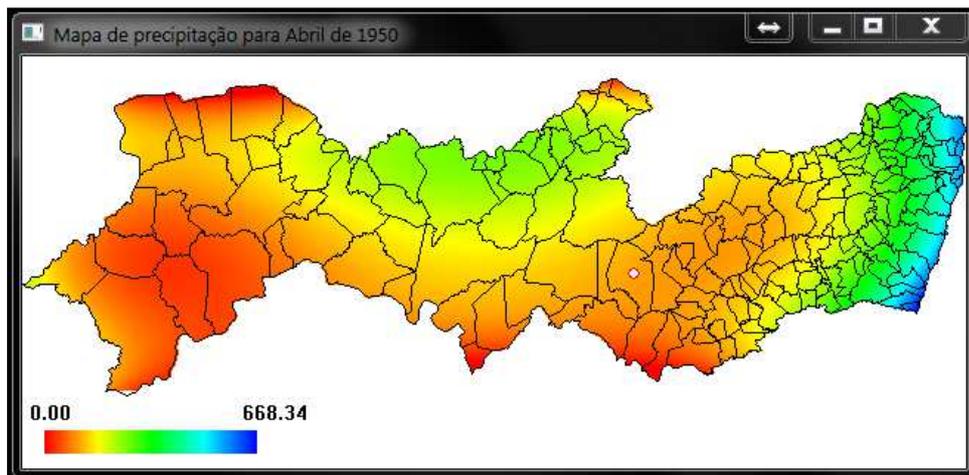


A interface WinPreci é constituída pelos seguintes grupos: “Localização” e “Mapa”. Cada um destes grupos ainda são respectivamente formados pelos pares de subgrupos “Geográfica”, “Município” e “Período”, “Ajustes”. Os botões “Sair” e “Salvar série” também constituem a interface WinPreci. Já a janela de visualização espacialmente explícita, é composta pelo mapa municipal do estado de Pernambuco, no qual é mostrado em intensidade de cores a dinâmica da precipitação mensal sobre todo o estado. Para as diferentes intensidade de cores expostas no mapa (vermelho, verde e azul – modelo RGB), foi atribuído tons de vermelho para valores de precipitação de baixas intensidade, tons de verde para valores de precipitação intermediários ou moderados e tons de azul para valores precipitação de alta intensidade.

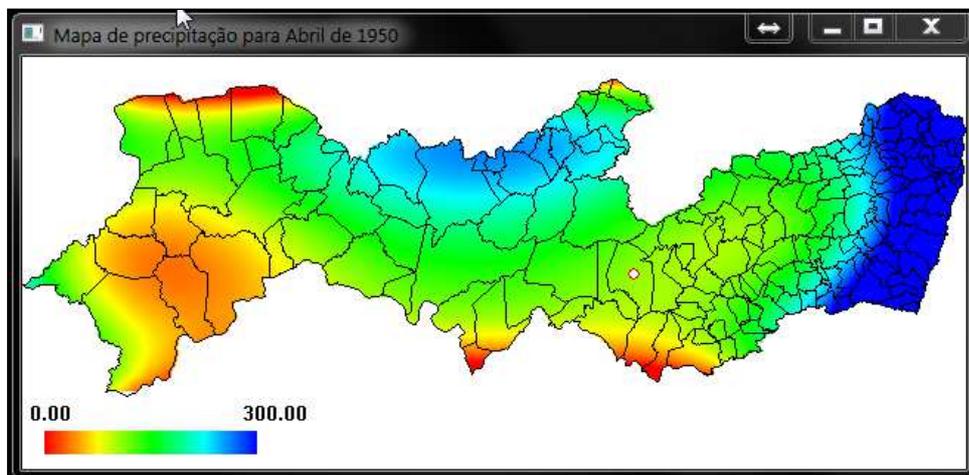
Através dos campos “Ano” e “Mês” do subgrupo “Período” na interface WinPreci pode-se selecionar respectivamente para qual ano (1950 a 2012) e mês (janeiro a dezembro) será mostrado o comportamento espacialmente explícito da precipitação. Este comportamento é mostrado na janela de visualização e os valores de menor e maior precipitação mensal são mostrados na “Escala em intensidade de cores”, respectivamente em tons de

vermelho e azul (Figura 34). O valor máximo mostrado na “Escala em intensidade de cores” pode ser modificado (campo “Máximo valor”), atribuindo-se um número entre o menor e o maior valor de precipitação. Assim, a dinâmica da precipitação mensal mostrada na janela de visualização é recalculada e redesenhada tomando como base o valor máximo de precipitação atribuído. Para exemplificar, está mostrado na Figura 35, mapas de precipitação para o mês abril de 1950, sendo expresso na Figura 35(a) o mapa de precipitação com valores entre 0 e 668.34 *mm* (valores obtidos na interpolação) e, na Figura 35(b), expresso o mapa de precipitação com valores entre 0 e 300 *mm* (informado no campo “Máximo valor”).

Figura 35 – Mapa de visualização espacialmente explícita da precipitação (*mm*) em Pernambuco para o mês de abril de 1950: (a) mapa de precipitação para valores obtidos na interpolação (0-668.34 *mm*); (b) mapa de precipitação para valor máximo de precipitação informado no campo “Máximo valor” (0-300 *mm*).



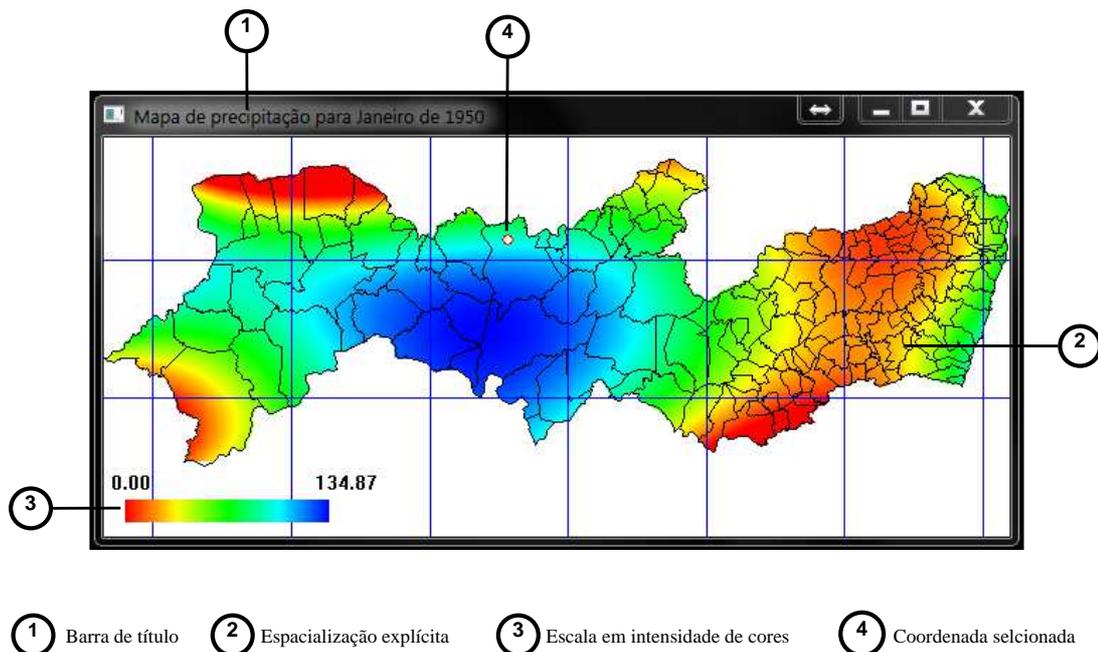
(a)



(b)

Na janela de visualização espacialmente explícita ainda é possível inserir uma grade sobre todo o mapa. A opção da inserção desta grade se dá com a ativação do campo “Grade”, objetivando auxiliar na identificação visual de células com características específicas de precipitação Figura 36.

Figura 36 – Janela de visualização espacialmente explícita (com grade) para a precipitação mensal (*mm*) no estado de Pernambuco e o mapa de precipitação para janeiro de 1950.



O acesso as séries históricas de precipitação mensal em cada um dos 81544 pontos distribuídos uniformemente sobre o estado de Pernambuco pode ser realizado de duas formas. A primeira é atribuindo as coordenadas de longitude e latitude desejadas respectivamente nos campos “Longitude” e “Latitude”. A segunda é “passando” o *mouse* sobre o mapa de Pernambuco na janela de visualização (os campos de “Longitude atual”, “Latitude atual” e “Município atual” mostram as coordenadas atuais de longitude e latitude e o município atual), seguido de um único *click* com o botão esquerdo do *mouse* para selecionar a coordenada desejada. Em ambas as formas de obtenção das séries históricas é necessário acionar o botão “Salvar série” para salvar as informações. Estas informações são salvas em um arquivo de formato ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*), separado por tabulação, com extensão *.dat* e nome referente a coordenada e município selecionado. O arquivo possui uma formatação que pode ser aberto em planilhas eletrônicas, banco de dados e softwares estatísticos.

6 Considerações finais

As ferramentas desenvolvidas (WinCent e WinPreci) neste trabalho mostram-se como instrumentos de grande valia para fomentar estudos direcionados ao levantamento de dados para políticas agrícolas, hídricas, ambientais e socioeconômicas para o estado de Pernambuco.

A integração entre o código fonte do modelo Century 4.5 e o algoritmo implementado em linguagem de programação C foi bem sucedida. As modificações em trechos do código para entrada e saída de dados contribuíram na realização de múltiplas simulações e conseqüentemente no acoplamento do modelo aos métodos de interpolação espacial para dados georreferenciados *Inverse Distance Weighting* e *Kernel Smoothing*, assim como no desenvolvimento da interface Windows Century (WinCent). Portanto, a interface WinCent apresenta-se como uma ferramenta unificada, fundamentada na versão 4.5 do modelo Century, e capaz de distribuir de forma espacialmente explícita a dinâmica entre as unidades de simulação definidas para a região de estudo adotada.

É importante ainda ressaltar que a adição da escolha de arquivos *shape file*, como arquivos de entrada, possibilita a realização de estudos em escala municipal, regional, ou até mesmo em regiões específicas. A visualização espacialmente explícita e interativa entre a interface gráfica e o usuário fornece um grande ganho nas análises realizadas. Conseqüentemente, o âmbito de aplicabilidade do modelo é significativamente estendido para estudos em larga escala e sobre diferentes situações, com uma grande redução de tempo e esforço operacional. Futuras versões da interface WinCent incluirão um parâmetro de suavização no método IDW, visando minimizar o efeito de mira. Os próximos passos também incluem o desenvolvimento e integração de ambientes GUI's para os administradores de arquivos FILE100 e EVENT100 a interface WinCent, bem como a utilização de dados observados em campo e execução de projeções futuras através do WinCent.

A interface WinPreci concebida apresenta-se como uma grande aliada ao modelo Century, no sentido que pode-se obter séries históricas de precipitação pluviométrica para alimentar o modelo para a execução de simulações pontual ou em larga escala. Este acervo de informações possibilita também a obtenção e preenchimento de informações de precipitação onde não tinha sido coletada a precipitação pelos postos pluviométricos. Através da interface é ainda possível analisar o comportamento em larga escala para a precipitação mensal no estado de Pernambuco, sendo fundamental para identificar o ano, o

mês e a região com menor ou maior intensidade de chuva. Esforços futuros, se concentrarão na atualização da base de dados integrada à interface WinPreci, a qual consta atualmente de séries históricas de precipitação mensal para o período de 1950 a 2012.

A comparação das diferentes técnicas de interpolação espacial aplicadas aos dados de precipitação mensal para o estado de Pernambuco somam uma grande contribuição no estudo comparativo de métodos aplicados a esta variável, tendo em vista a vasta quantidade de técnicas de interpolação espacial encontradas na literatura. Portanto, a identificação do método *Trend Surface Analysis* ($n = 4$) como a técnica que apresentou melhor desempenho, quando comparado com os demais métodos apresentados, para estimar a precipitação mensal que atua como um indicador fundamental na escolha entre esses diversos métodos.

Um passo futuro comum a ambas as ferramentas desenvolvidas, destina-se a promoção das interfaces concebidas através da construção de *webpage's* para acesso livre as informações de precipitação e o uso do WinCent. Desta forma, espera-se que as ferramentas passem a ser amplamente utilizadas, podendo contribuir em diversas áreas de pesquisas.

Referências Bibliográficas

- ALI, A. Nonparametric spatial rainfall characterization using adaptive kernel estimator. **Journal of Geographic Information and Decision Analysis**, v. 2, n. 2, p. 34–43, 1998.
- ALTHOFF, T. D. et al. Calibração do Century para simulação da produtividade do milho em um Neossolo Regolítico no semiárido. In: ANAIS DO CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO. Fortaleza–CE, 2009. p. 241.
- ALVES, E. D. L.; BIUDES, M. S.; VECCHIA, F. A. S. Interpolação espacial na climatologia: análise dos critérios que precedem sua aplicação. **Revista Geonorte, Edição Especial**, v. 2, p. 606–618, 2012.
- AMORIM, R. C. F. et al. Avaliação do desempenho de dois métodos de espacialização da precipitação pluvial para o estado de Alagoas. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 30, n. 1, p. 87–91, 2008.
- ANDRADE JÚNIOR, A. d. et al. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para parnaíba e teresina, piauí. **Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria**, v. 11, n. 1, p. 63–68, 2003.
- ANDRIOTTI, J. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. São Leopoldo - RS: Editora UNISINOS, 2003. 168 p.
- ARAH, J. The soil submodel of the ITE (edinburgh) forest and hurley pasture models. In: POWLSON, D.; SMITH, P.; SMITH, J. (Ed.). **Evaluation of Soil Organic Matter Models**. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 1996, (NATO ASI Series, v. 38). p. 225–230. ISBN 978-3-642-64692-8.
- ARAH, J. et al. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using the ITE (edinburgh) forest and hurley pasture ecosystem models. **Geoderma**, Elsevier, v. 81, n. 1, p. 61–74, 1997.
- ARAUJO, F. C. et al. Comparação de técnicas de interpolação para espacialização da precipitação pluvial na bacia do rio Piquiri (PR). In: XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO – SBSR. João Pessoa–PB: INPE, 2015. p. 5485–5490.
- ARCGIS, E. 9.2 desktop help. **ESRI, Redlands, CA. ArcGIS**, v. 9, 2008.
- ASSIS, J.; LACERDA, F. F.; SOBRAL, M. d. C. M. Análise de detecção de tendências no padrão pluviométrico na bacia hidrográfica do rio Capibaribe. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, n. 2, p. 320–331, 2012.

ASSIS, J. M. O.; SOBRAL, M. d. C. M.; SOUZA, W. M. Análise de detecção de variabilidades climáticas com base na precipitação nas bacias hidrográficas do sertão de pernambuco (analysis of climate variability detection based on watershed precipitation in the sertão of pernambuco). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, n. 3, p. 630–645, 2012.

AURENHAMMER, F. Voronoi diagrams – A survey of a fundamental geometric data structure. **ACM Computing Surveys (CSUR)**, ACM, v. 23, n. 3, p. 345–405, 1991.

AYODE, J. O. **Introdução à climatologia para os trópicos**. São Paulo: Bertrand, 1994. 350 p.

BAKKALI, S.; AMRANI, M. About the use of spatial interpolation methods to denoising Moroccan resistivity data phosphate “Disturbances” map. **Acta Montanistica Slovaca**, v. 13, n. 2, p. 216–222, 2008.

BARBOSA, N. F. M. et al. Kernel smoothing dos dados de chuva no Nordeste. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Scielo, v. 18, p. 742 – 747, 2014.

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.

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.

BASSO, K.; ZINGANO, P. R. A.; FREITAS, C. M. D. S. Interpolation of scattered data: investigating alternatives for the modified shepard method. In: IEEE. **Computer Graphics and Image Processing, 1999. Proceedings. XII Brazilian Symposium on**. [S.l.], 1999. p. 39–47.

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.

BORTOLON, E. S. O. et al. Validation of the century model to estimate the impact of agriculture on soil organic carbon in southern Brazil. **Geoderma**, v. 167, p. 156–166, 2011.

BOSTAN, P.; HEUVELINK, G. B. M.; AKYUREK, S. Z. Comparison of regression and kriging techniques for mapping the average annual precipitation of Turkey. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 19, p. 115–126, 2012.

BRADBURY, N. J. et al. Modelling the fate of nitrogen in crop and soil in the years following application of ¹⁵N-labelled fertilizer to winter wheat. **The Journal of Agricultural Science**, v. 121, n. 03, p. 363–379, 1993.

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.

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. **Principles of geographical information systems**. [S.l.]: Oxford university press Oxford, 1998.

CAMARGO, E. C. G. Geoestatística: fundamentos e aplicações. **Geoprocessamento para projetos ambientais**. São José dos Campos: INPE, 1998.

CAMARGO, E. C. G.; FUCKS, S. D.; CÂMARA, G. Análise espacial de superfícies. **Análise espacial de dados geográficos**. Planaltina: Embrapa Cerrados, p. 79–122, 2004.

CARD. **Center for Agricultural and Rural Development. iCentury software. Iowa State University, Ames, Iowa, USA**. 2008. Disponível em: <http://www.public.iastate.edu/~tdc/i_century_main.html>. Acesso em: 27/12/2014.

CARLSON, R.; FOLEY, T. Interpolation of track data with radial basis methods. **Computers & Mathematics with applications**, Elsevier, v. 24, n. 12, p. 27–34, 1992.

CARNEIRO, E. O.; SANTOS, R. L. Análise espacial aplicada na determinação de áreas de risco para algumas doenças endêmicas (calazar, dengue, diarreia, DST–doenças sexualmente transmissíveis e tuberculose), no bairro de Campo Limpo–Feira de Santana (BA). **Sitientibus, Feira de Santana**, v. 28, p. 51–75, 2003.

CARVALHO, J. R. P.; ASSAD, E. D. Análise espacial da precipitação pluviométrica no estado de são paulo: comparação de métodos de interpolação. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 2, p. 377–384, 2005.

CECÍLIO, R. A.; PRUSKI, F. F. Interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas com uso do inverso de potências da distância. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 3, p. 501–504, 2003.

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.

CHERTOV, O. G.; KOMAROV, A. S. Somm: A model of soil organic matter dynamics. **Ecological Modelling**, v. 94, n. 2, p. 177–189, 1997.

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.

CONG, R. et al. Evaluation of the century model using long-term fertilization trials under corn-wheat cropping systems in the typical croplands of china. **PloS one**, v. 9, n. 4, p. e95142, 2014.

COSTA, A. J. O fenômeno el niño e as secas no nordeste do brasil. **EDUCTE: Revista Científica do Instituto Federal de Alagoas**, v. 3, n. 1, 2014.

- CRESSIE, N. The origins of kriging. **Mathematical geology**, Springer, v. 22, n. 3, p. 239–252, 1990.
- CRESSIE, N. **Statistics for spatial data**. New York: John Wiley and Sons, 1991. 900 p.
- CUNHA, A. M. et al. Espacialização da precipitação pluvial por meio de krigagem e cokrigagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 9, p. 1179–1191, 2013.
- DAVIS, J. C.; SAMPSON, R. J. **Statistics and data analysis in geology**. New York: Wiley, 2002.
- DELAUNAY, B. Sur la sphere vide. **Izv. Akad. Nauk SSSR, Otdelenie Matematicheskii i Estestvennyka Nauk**, v. 7, n. 793-800, p. 1–2, 1934.
- DESSAINT, F.; CAUSSANEL, J.-P. Trend surface analysis: a simple tool for modelling spatial patterns of weeds. **Crop Protection**, v. 13, n. 6, p. 433–438, 1994.
- EMIDIO, Z. P. d. O.; LANDIM, P. M. B. Análise de superfície de tendência aplicada à chuva, medida por radar meteorológico, nas regiões de Assis e Piracicaba, SP. **Geociências**, São Paulo, v. 27, n. 4, p. 439–449, 2008.
- FERNANDES, R. C.; CARVALHO, A. L. Espacialização da precipitação pluvial no município de piranhas, alagoas. **Ciência e Natura**, v. 35, n. 2, p. 295–303, 2013.
- FERREIRA, J. A. et al. Caracterização espectroscópica da matéria orgânica do solo 24. **Society**, v. 7, p. 1–3, 2004.
- FOLEY, T. A. Interpolation and approximation of 3-D and 4-D scattered data. **Computers & Mathematics with Applications**, v. 13, n. 8, p. 711–740, 1987.
- FOLLETT, R. F. Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soils. **Soil Tillage Research**, v. 61, p. 77–92, 2001.
- FORNBERG, B.; LARSSON, E.; WRIGHT, G. A new class of oscillatory radial basis functions. **Computers & Mathematics with Applications**, v. 51, n. 8, p. 1209–1222, 2006.
- FOX, D. G. Judging air quality model performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 62, n. 5, p. 599–609, 1981.
- FRANKE, R. Scattered data interpolation: Tests of some methods. **Mathematics of computation**, v. 38, n. 157, p. 181–200, 1982.
- FRANKE, R.; NIELSON, G. Smooth interpolation of large sets of scattered data. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, v. 15, n. 11, p. 1691–1704, 1980.
- 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.

- FURTADO, A.; NEGREIROS, J. Modelação espacial da temperatura na ilha de santiago, cabo verde, com o geostatistical analyst©. **Revista Captar: Ciência e Ambiente para Todos**, v. 2, n. 3, 2010.
- GALVÍNCIO, J. D.; MOURA, M. S. B. Aspectos climáticos da captação de água de chuva no estado de pernambuco. **Revista de Geografia**, v. 22, n. 2, p. 15–35, 2006.
- GARDIMAN, B. S. et al. Análise de técnicas de interpolação para espacialização da precipitação pluvial na bacia do rio itapemirim (es). **Ambiência**, v. 8, n. 1, p. 61–71, 2012.
- GEBBERS, R.; BRUIN, S. D. **Application of geostatistical simulation in precision agriculture**. New York: Springer, 2010. 331 p.
- GENTON, M. G. Highly robust variogram estimation. **Mathematical Geology**, Springer, v. 30, n. 2, p. 213–221, 1998.
- GERVASI, O. et al. **Computational Science and Its Applications-ICCSA 2008: International Conference, Perugia, Italy, June 30-July 3, 2008, Proceedings**. [S.l.]: Springer, 2008.
- GOLD, C. M. Surface interpolation, spatial adjacency and gis. **Three dimensional applications in geographic information systems**, p. 21–35, 1989.
- GOMES, O. M. et al. Análise de superfície de tendência aplicada a dados de precipitação pluvial do estado da paraíba. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 32, n. 3, p. 412–429, 2014.
- GOMES, O. M. et al. Análise comparativa da precipitação no estado da Paraíba utilizando modelos de regressão polinomial. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 1, p. 47–58, 2015.
- GRACE, P.; LADD, J. Socrates (soil organic carbon reserves and transformations in agro-ecosystems): A decision support system for sustainable farming systems in southern australia. **Cooperative Research Centre for Soil and Land Management, Adelaide**, 1995.
- GRINGARTEN, E.; DEUTSCH, C. Teacher's aide variogram interpretation and modeling. **Mathematical Geology**, Kluwer Academic Publishers-Plenum Publishers, v. 33, n. 4, p. 507–534, 2001.
- GROSSO, S. D. et al. Simulated interaction of carbon dynamics and nitrogen trace gas fluxes using the daycent model. **Modeling carbon and nitrogen dynamics for soil management**, CRC Press: Boca Raton, FL, p. 303–332, 2001.
- GUIDOUM, A. C. Kernel estimator and bandwidth selection for density and its derivatives. 2013.
- GUMUS, K.; SEN, A. Comparison of spatial interpolation methods and multi-layer neural networks for different point distributions on a digital elevation model. **Geodetski vestnik**, v. 57, p. 3, 2013.

- GUNNEWIEK, H. Organic matter dynamics simulated with the “Verberne”-model. In: POWLSON, D.; SMITH, P.; SMITH, J. (Ed.). **Evaluation of Soil Organic Matter Models Using Existing Long-Term Datasets**. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 1996, (NATO ASI Series, v. 38). p. 255–261. ISBN 978-3-642-64692-8.
- HALLAK, R.; FILHO, A. J. P. Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de São Paulo com o modelo ARPS: sensibilidade a variações com os esquemas de advecção e assimilação de dados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 4, p. 591–608, 2011.
- HANSEN, S. et al. DAISY: Soil plant atmosphere system model. **NPO Report**, The National Agency for Environmental Protection, n. A 10, p. 272, 1990.
- HÄRDLE, W. **Smoothing techniques: with implementation in S**. New York: Springer, 1991. 257 p.
- HARDY, R. L. Multiquadric equations of topography and other irregular surfaces. **Journal of geophysical research**, v. 76, n. 8, p. 1905–1915, 1971.
- HASTIE, T. et al. **The elements of statistical learning**. New York: Springer, 2009.
- HENGL, T. **A practical guide to geostatistical mapping of environmental variables**. Italy: [s.n.], 2007.
- HERNANDEZ-STEFANONI, J. L.; PONCE-HERNANDEZ, R. Mapping the spatial variability of plant diversity in a tropical forest: comparison of spatial interpolation methods. **Environmental Monitoring and Assessment**, Springer, v. 117, n. 1-3, p. 307–334, 2006.
- HINGRAY, B.; PICOUET, C.; MUSY, A. **Hydrology: A Science for Engineers**. 1. ed. New York: CRC Press, 2014. 10–11 p.
- HOFSTRA, N. et al. Comparison of six methods for the interpolation of daily, european climate data. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)**, Wiley Online Library, v. 113, n. D21, 2008.
- HOOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. **Agricultural and forest meteorology**, v. 103, n. 1, p. 137–157, 2000.
- HOSSEINI, E.; GALLICHAND, J.; CARON, J. Comparison of several interpolators for smoothing hydraulic conductivity data in South–West Iran. **American Society of Agricultural Engineers**, v. 36(6), 1993.
- HOWARTH, R. J. Statistics and data analysis in geochemical prospecting. Elsevier scientific publishing company, 1983.
- HU, S.-M. et al. Modifying the shape of NURBS surfaces with geometric constraints. **Computer-Aided Design**, v. 33, n. 12, p. 903–912, 2001.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **Applied geostatistics**. New York: Oxford University Press New York, 1989.

ITEP. Instituto de Tecnologia de Pernambuco. 2014. Disponível em: <<http://www.itep.br/>>. Acesso em: 17/05/2015.

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.

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.

JIAN, X.; OLEA, R. A.; YU, Y.-S. Semivariogram modeling by weighted least squares. **Computers & Geosciences**, v. 22, n. 4, p. 387–397, 1996.

JIANQING, F.; IRENE, G. **Local polynomial modelling and its applications**. [S.l.]: London: Chapman and Hall, 1996. (Monographs on statistics and applied probability series, 66).

JOHANSSON, H. et al. Simulated nitrogen dynamics and losses in a layered agricultural soil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 18, n. 4, p. 333–356, 1987.

JOU, P. H.; AKHOOND-ALI, A.; NAZEMOSADAT, M. Nonparametric kernel estimation of annual precipitation over Iran. **Theoretical and applied climatology**, Springer, v. 112, n. 1-2, p. 193–200, 2013.

JOURNAL, A. G. **Fundamentals of geostatistics in five lessons**. California: Stanford Center for Reservoir Forecasting, Applied Earth Sciences Department, 1988.

JUNIOR, B. S. G. et al. Análise de técnicas de interpolação para espacialização da precipitação pluvial na bacia do rio Itapemirim (ES). **Ambiência**, v. 8, n. 1, p. 61–71, 2012.

KANSA, E. J. Multiquadrics—a scattered data approximation scheme with applications to computational fluid-dynamics—ii solutions to parabolic, hyperbolic and elliptic partial differential equations. **Computers & mathematics with applications**, v. 19, n. 8, p. 147–161, 1990.

KELLY, R. et al. Intra-annual and interannual variability of ecosystem processes in short-grass steppe. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)**, Wiley Online Library, v. 105, n. D15, p. 20093–20100, 2000.

KITANIDIS, P. K. **Introduction to geostatistics: applications in hydrogeology**. London: Cambridge University Press, 1997.

KOLAHDOUZAN, M.; SHAHABI, C. Voronoi-based K nearest neighbor search for spatial network databases. In: **Proceedings of the Thirtieth International Conference on Very Large Data Bases - Volume 30**. [S.l.: s.n.], 2004. p. 840–851.

KRAUSE, P.; BOYLE, D.; BÄSE, F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. **Advances in Geosciences**, v. 5, p. 89–97, 2005.

KRAVCHENKO, A.; BULLOCK, D. G. A comparative study of interpolation methods for mapping soil properties. **Agronomy Journal**, American Society of Agronomy, v. 91, n. 3, p. 393–400, 1999.

KRIGE, D. G. A Statistical Approach to Some Basic Mine Valuation Problems on the Witwatersrand. **Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa**, v. 52, n. 6, p. 119–139, 1951.

LAM, N. S.-N. Spatial interpolation methods: a review. **The American Cartographer**, Taylor & Francis, v. 10, n. 2, p. 129–150, 1983.

LANDIM, P. M. B. Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas. **DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Lab. Geomatématica, Texto Didático**, v. 2, p. 20, 2000.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. São Paulo: Unesp, 2003.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos multivariados**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 208 p.

LARK, R. Estimating variograms of soil properties by the method-of-moments and maximum likelihood. **European Journal of Soil Science**, Wiley Online Library, v. 51, n. 4, p. 717–728, 2000.

LASLETT, G. et al. Comparison of several spatial prediction methods for soil ph. **Journal of Soil Science**, Wiley Online Library, v. 38, n. 2, p. 325–341, 1987.

LEDOUX, H.; GOLD, C. An efficient natural neighbour interpolation algorithm for geoscientific modelling. In: **Developments in Spatial Data Handling**. [S.l.: s.n.], 2005. p. 97–108.

LEITE, L. F. C.; MENDONÇA, E. D. S. Modelo century de dinâmica da matéria orgânica do solo: equações e pressupostos. **Ciência Rural**, v. 33, n. 4, p. 679–686, 2003.

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.

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.

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.

LENNON, J. J.; TURNER, J. R. Predicting the spatial distribution of climate: temperature in great britain. **Journal of Animal Ecology**, JSTOR, p. 370–392, 1995.

LI, C.; FROLKING, S.; FROLKING, T. A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. model structure and sensitivity. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)**, Wiley Online Library, v. 97, n. D9, p. 9759–9776, 1992.

LI, C.; FROLKING, S.; FROLKING, T. A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 2. model applications. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)**, Wiley Online Library, v. 97, n. D9, p. 9777–9783, 1992.

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.

LI, J.; HEAP, A. D. **A review of spatial interpolation methods for environmental scientists**. Australia: Geoscience Australia Canberra, 2008. 137 p.

LI, J.; HEAP, A. D. A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: performance and impact factors. **Ecological Informatics**, Elsevier, v. 6, n. 3, p. 228–241, 2011.

LIRA, V. M. et al. Alterações da precipitação em municípios do estado de pernambuco. **Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia**, v. 3, n. 1, 2006.

LONGLEY, P. A. et al. **Sistemas e Ciência da Informação Geográfica**. Porto Alegre - RS: Bookman, 2013.

LOPES, F. et al. Simulação da dinâmica do carbono do solo numa microbacia rural pelo modelo century. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 6, p. 745–753, 2008.

LU, G. Y.; WONG, D. W. An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique. **Computers & Geosciences**, v. 34, n. 9, p. 1044 – 1055, 2008. ISSN 0098-3004.

LUO, W.; TAYLOR, M.; PARKER, S. A comparison of spatial interpolation methods to estimate continuous wind speed surfaces using irregularly distributed data from england and wales. **International Journal of Climatology**, Wiley Online Library, v. 28, n. 7, p. 947–959, 2008.

MACHADO, R. E.; VETTORAZZI, C. A. Simulação da produção de sedimentos para a microbacia hidrográfica do ribeirão dos marins (sp). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Scielo, v. 27, n. 4, p. 735–741, 2003.

MARQUETTI, A.; VIALI, L. Princípios e aplicações de regressão local. **Análise Econômica**, v. 22, n. 42, 2004.

MATHERON, G. *Traité de géostatistique appliquée*, tome i: Mémoires du bureau de recherches géologiques et minières. **Pairs: Editions Technip**, v. 14, 1962.

MATHERON, G. *Traité de géostatistique appliquée*, tome ii: Mémoires du bureau de recherches géologiques et minières. **Pairs: Editions Technip**, v. 24, 1963.

MAZZINI, P. L. F.; SCHETTINI, C. A. F. Avaliação de metodologias de interpolação espacial aplicadas a dados hidrográficos costeiros quase-sinóticos. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**, v. 13, n. 1, p. 53–64, 2009.

MCLAIN, D. H. Drawing contours from arbitrary data points. **The Computer Journal**, v. 17, n. 4, p. 318–324, 1974.

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.

- MICCHELLI, C. Interpolation of scattered data: Distance matrices and conditionally positive definite functions. **Constructive Approximation**, Springer-Verlag, v. 2, n. 1, p. 11–22, 1986.
- MINGOTI, S. A.; ROSA, G. A note on robust and non-robust variogram estimators. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 61, n. 1, p. 87–95, 2008.
- 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**, v. 47, n. 1, p. 85–91, 1983.
- MOLINA, J.-A. E.; SMITH, P. Modeling carbon and nitrogen processes in soils. **Advances in Agronomy**, v. 62, p. 253–298, 1998.
- MOURA, M. S. B. et al. Clima e água de chuva no semiárido. **Água de Chuva no Semi-Árido brasileiro/org. Luiza Teixeira de Lima Brito/Magna Soelma B. de Moura–Petrolina, PE: Embrapa Semi-Árido**, 2007.
- NADARAYA, E. A. On estimating regression. **Theory of Probability & Its Applications**, SIAM, v. 9, n. 1, p. 141–142, 1964.
- NALDER, I. A.; WEIN, R. W. Spatial interpolation of climatic normals: test of a new method in the canadian boreal forest. **Agricultural and forest meteorology**, v. 92, n. 4, p. 211–225, 1998.
- NASH, J.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part i—a discussion of principles. **Journal of hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282–290, 1970.
- NÓBREGA, R. S.; FARIAS, R. F. d. L.; SANTOS, C. A. C. Variabilidade temporal e espacial da precipitação em Pernambuco através de índices de extremos climáticos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, p. 171 – 180, 2015.
- NREL. **Natural Resource Ecology Laboratory**. 2000. Disponível em: <<http://www.nrel.colostate.edu/projects/century/>>. Acesso em: 18/09/2011.
- OJHA, C.; BERNDTSSON, R.; BHUNYA, P. **Engineering hydrology**. [S.l.]: Oxford University Press, 2008. 33–78 p.
- OLEA, R. A. Geostatistics for engineers and earth scientists. Kluwer Academic Publishers, Boston, p. 303, 1999.
- OLIVEIRA, G. G.; PEDROLLO, O. C.; CASTRO, N. M. R. As incertezas associadas às condições climáticas obtidas pelo modelo ETA CPTEC/HADCM3: avaliação comparativa entre os dados simulados e observados de precipitação, evapotranspiração e vazão na bacia hidrográfica do rio Ijuí, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 1, p. 101–121, 2015.
- OLIVER, M. A. An overview of geostatistics and precision agriculture. In: **Geostatistical Applications for Precision Agriculture**. [S.l.]: Springer, 2010. p. 1–34.
- PANINATIER, Y. **Variowin: Software for Spatial Data Analysis in 2-D**. New York: Springer Verlag, 1996.

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.

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.

PARTON, W. J. et al. Daycent and its land surface submodel: description and testing. **Global and Planetary Change**, v. 19, n. 1-4, p. 35–48, 1998.

PARTON, W. J. et al. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. **Soil Science Society of America Journal**, v. 51, n. 5, p. 1173–1179, 1987.

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.

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.

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.

PARZEN, E. On estimation of a probability density function and mode. **The annals of mathematical statistics**, JSTOR, p. 1065–1076, 1962.

PAUSTIAN, K.; PARTON, W. J.; PERSSON, J. Modeling soil organic matter in organic-amended and nitrogen-fertilized long-term plots. **Soil Science Society American Journal**, v. 56, p. 476–488, 1992.

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.

PEREIRA, D. P. et al. Aplicação do diagrama de Taylor para avaliação de interpoladores espaciais em atributos de solo em cultivo com eucalipto. **Revista Árvore**, v. 38, n. 5, p. 899–905, 2014.

PHILLIPS, D. L.; DOLPH, J.; MARKS, D. A comparison of geostatistical procedures for spatial analysis of precipitation in mountainous terrain. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 58, n. 1, p. 119–141, 1992.

PINTO, N. L. d. S. et al. Hidrologia básica. In: **Hidrologia básica**. [S.l.]: Edgard Blucher, 1976. p. 2003.

PRESS, W. H. et al. **Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing. Third Edition**. 3. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 2007. 1195 p.

QUANTUM, G. Development team. Quantum GIS Geographic Information System. **Open Source Geospatial Foundation Project. Vienna, Austria**, 2011. Disponível em: <<http://www.nrel.colostate.edu/projects/century/>>. Acesso em: 01/06/2015. Disponível em: <<http://www.qgis.org/en/site/>>.

R Development Core Team. **R: A Language and Environment for Statistical Computing.** Vienna, Austria, 2006. Disponível em: <<http://www.nrel.colostate.edu/projects/century/>>. Acesso em: 01/06/2015. Disponível em: <<http://www.R-project.org>>.

RENKA, R. J. Multivariate interpolation of large sets of scattered data. **ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)**, v. 14, n. 2, p. 139–148, 1988.

RIPPA, S. An algorithm for selecting a good value for the parameter c in radial basis function interpolation. **Advances in Computational Mathematics**, Springer, v. 11, n. 2-3, p. 193–210, 1999.

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.

ROSCOE, R.; MERCANTE, F. M.; SALTON, J. C. Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas conservacionistas: modelagem matemática e métodos auxiliares. 2006.

ROSENBLATT, M. Remarks on some nonparametric estimates of a density function. **The Annals of Mathematical Statistics**, Institute of Mathematical Statistics, v. 27, n. 3, p. 832–837, 1956.

SALGUEIRO, J. H. P. B. **Avaliação de rede pluviométrica e análise de variabilidade espacial da precipitação: estudo de caso na Bacia do Rio Ipojuca em Pernambuco.** 122 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 2005.

SALGUEIRO, J. H. P. B. et al. Tendência de índices pluviométricos na bacia do rio Caparibe-PE e sua influência na gestão dos recursos hídricos. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 5, p. 1002–1014, 2015.

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**, v. 23, n. 4, p. 364–372, 1991.

SANTOS, K. et al. Análise espacial de dados de precipitação pluvial no agreste pernambucano. In: **II Inovagri Internacional Meeting.** [S.l.: s.n.], 2014.

SANTOS, R. S. et al. Avaliação da relação seca/produtividade agrícola em cenário de mudanças climáticas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 2, p. 313–321, 2011.

SANTOS, T. E. M.; MONTENEGRO, A. A. A. Erosividade e padrões hidrológicos de precipitação no Agreste Central pernambucano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v. 16, n. 8, p. 871–880, 2012.

SARTORI, A. A. d. C. et al. Variabilidade temporal e mapeamento dos dados climáticos de botucatu-sp. **Irriga**, v. 15, n. 2, p. 131–139, 2010.

SCORZA JÚNIOR, R. et al. Modelagem matemática e simulação de sistemas: uma importante ferramenta na pesquisa agropecuária. **ROSCOE, R.; MERCANTE, FM; SALTON, JC Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas conservacionistas. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste**, p. 63–74, 2006.

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.

SEMACE. **Superintendência Estadual do Meio Ambiente**. 2015. Disponível em: <http://www.semace.ce.gov.br/2011/06/shape-definicoes-e-conversao/>. Acesso em: 07/06/2015.

SHEPARD, D. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. In: ACM. **Proceedings of the 1968 23rd ACM national conference**. [S.l.], 1968. p. 517–524.

SIBSON, R. A vector identity for the dirichlet tessellation. In: CAMBRIDGE UNIV PRESS. **Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society**. [S.l.], 1980. v. 87, n. 01, p. 151–155.

SIBSON, R. A brief description of natural neighbour interpolation. **Interpreting multivariate data**, v. 21, 1981.

SILVA, A. O. et al. Análise espaço-temporal da evapotranspiração de referência sob diferentes regimes de precipitações em pernambuco. **Revista caatinga**, v. 24, n. 2, p. 135–142, 2011.

SILVA, A. O.; MOURA, G. B. d. A. M.; KLAR, A. E. Classificação climática de thornthwaite e sua aplicabilidade agroclimatológica nos diferentes regimes de precipitação em Pernambuco. **Irriga**, v. 19, n. 1, p. 46, 2014.

SILVA, A. O.; QUELUZ, J. T. G.; KLAR, A. E. Spatial distribution of climatic water balance in different rainfall regimes in the state of pernambuco. **Applied Research & Agrotechnology**, v. 6, n. 1, p. 7–19, 2013.

SILVA, A. S. A. **Adaptação do modelo Century 4.0 para simulação em escala regional**. 44 p. Dissertação (Mestrado em Biometria e Estatística Aplicada) — Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife-PE, 2012.

SILVA, B. M. et al. Chuvas intensas em localidades do estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 3, p. 135–147, 2012.

SILVA, P. M. O. et al. Modelagem da hidrógrafa de cheia em uma bacia hidrográfica da região alto rio grande. **Revista Brasileira Engenharia. Agrícola. Ambiental**, Scielo, v. 12, n. 3, p. 258–265, 2008.

- SILVA, R. M. et al. Análise da variabilidade espaço-temporal e identificação do padrão da precipitação na bacia do rio tapacurá, pernambuco/analysis of the space-time variability and identification of rainfall pattern within the tapecurá river basin, pernambuco state. **Revista Sociedade & Natureza**, v. 22, n. 2, 2010.
- SILVA, S. A.; LIMA, J. S. d. S.; BOTTEGA, E. L. Variabilidade espacial da precipitação pluviométrica para o estado do espírito santo utilizando métodos multivariados. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 6, n. 4, p. 703–790, 2011.
- SILVERMAN, B. W. **Density estimation for statistics and data analysis**. [S.l.]: CRC press, 1986.
- SIMONOFF, J. S. **Smoothing methods in statistics**. New York: Springer, 1996. 338 p.
- SINCLAIR, T. R.; SELIGMAN, N. Criteria for publishing papers on crop modeling. **Field Crops Research**, v. 68, n. 3, p. 165–172, 2000.
- SIRONVALLE, M. A. The random coin method: Solution of the problem of the simulation of a random function in the plane. **Mathematical Geology**, Springer, v. 12, n. 1, p. 25–32, 1980.
- SMITH, M. J. D.; GOODCHILD, M. F.; LONGLEY, P. **Geospatial analysis: a comprehensive guide to principles, techniques and software tools**. [S.l.]: Troubador Publishing Ltd, 2007.
- SMITH, P. et al. Modelling soil carbon dynamics in tropical ecosystems. **Global climate change and tropical soils**, p. 341–364, 1999.
- 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.
- SOUSA, I. F.; LUNDGREN, W. J. C.; NETTO, A. O. A. Comparação entre distribuições de probabilidades da precipitação mensal no estado de pernambuco. **Scientia Plena**, v. 6, n. 6, p. 1–10, 2010.
- SOUZA, W. M.; AZEVEDO, P. V. Índices de detecção de mudanças climáticas derivados da precipitação pluviométrica e das temperaturas em Recife-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, n. 1, p. 143–159, 2012.
- SURFER, G. software, version 11. **Surface Mapping System, Copyright**, v. 97, 1993.
- TABIOS, G. Q.; SALAS, J. D. A comparative analysis of techniques for spatial interpolation of precipitation. **Journal of the American Water Resources Association**, Blackwell Publishing Ltd, v. 21, n. 3, p. 365–380, 1985.
- TEIXEIRA, M. B. d. R.; SCALON, J. D. Comparação entre estimadores de semivariância. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 31, n. 2, p. 248–269, 2013.
- THIESSEN, A. H. Precipitation averages for large areas. **Monthly weather review**, v. 39, n. 7, p. 1082–1089, 1911.

- TOMCZAK, M. Spatial interpolation and its uncertainty using automated anisotropic inverse distance weighting (IDW)-cross-validation/jackknife approach. **Journal of Geographic Information and Decision Analysis**, v. 2, n. 2, p. 18–30, 1998.
- 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.
- TSYBAKOV, A. B.; ZAIATS, V. **Introduction to nonparametric estimation**. New York: Springer, 2009.
- 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.
- 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.
- VICENTE-SERRANO, S. M. et al. Comparative analysis of interpolation methods in the middle ebro valley (Spain): application to annual precipitation and temperature. **Climate Research**, v. 24, n. 2, p. 161–180, 2003.
- VIOLA, M. R. et al. Métodos de interpolação espacial para o mapeamento da precipitação pluvial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 9, p. 970–978, 2010.
- VORONOÏ, G. Nouvelles applications des paramètres continus à la théorie des formes quadratiques. deuxième mémoire. recherches sur les paralléloèdres primitifs. **Journal für die reine und angewandte Mathematik**, v. 134, p. 198–287, 1908.
- WAGNER, P. D. et al. Comparison and evaluation of spatial interpolation schemes for daily rainfall in data scarce regions. **Journal of Hydrology**, v. 464, p. 388–400, 2012.
- WAND, M. P.; JONES, M. C. **Kernel smoothing**. USA: Chapman and Hall/CRC, 1994. 224 p.
- WANG, S. et al. Comparison of interpolation methods for estimating spatial distribution of precipitation in Ontario, Canada. **International Journal of Climatology**, Wiley Online Library, v. 34, n. 14, p. 3745–3751, 2014.
- WATSON, D. F. **Contouring: a guide to the analysis and display of spatial data**. [S.l.]: Pergamon Press, Oxford, 1992.
- WATSON, G. S. Smooth regression analysis. **Sankhyā: The Indian Journal of Statistics, Series A**, JSTOR, p. 359–372, 1964.
- 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.

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.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. **Statistical methods in soil and land resource survey**. [S.l.]: Oxford University Press (OUP), 1990. 316 p.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. **Geostatistics for environmental scientists**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007. 37–45 p.

WENDLING, B. et al. Simulação dos estoques de carbono e nitrogênio pelo modelo Century em Latossolos, no Cerrado brasileiro. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, n. 2, p. 238–248, 2014.

WILLIAMS, J. R.; RENARD, K. G. Assessment 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.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical geography**, Taylor & Francis, v. 2, n. 2, p. 184–194, 1981.

WILLMOTT, C. J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 63, n. 11, p. 1309–1313, 1982.

WONG, D. W.; YUAN, L.; PERLIN, S. A. Comparison of spatial interpolation methods for the estimation of air quality data. **Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology**, Nature Publishing Group, v. 14, n. 5, p. 404–415, 2004.

WONG, S.; HON, Y.; GOLBERG, M. Compactly supported radial basis functions for shallow water equations. **Applied mathematics and computation**, v. 127, n. 1, p. 79–101, 2002.

YAMAMOTO, J. A review of numerical methods for the interpolation of geological data. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 70, n. 1, p. 91–116, 1998.

ZHOU, F. et al. Scientometric analysis of geostatistics using multivariate methods. **Scientometrics**, v. 73, n. 3, p. 265–279, 2007.

Apêndices

APÊNDICE A – Descrição das tabelas de agendamentos

Nas Tabelas 8 a 16 observa-se a forma 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 8 – Descrição do agendamento do arquivo `arids1.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 9 – 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</i> (<i>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</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	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 10 – 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</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>AND</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 11 – 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</i> (<i>crop.100</i>) seguidos de senescência (<i>SENM</i>) no 10º mês e crescimento final no 12º mês.

Tabela 12 – 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> (<i>H</i>) 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.

Tabela 13 – 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 14 – 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>KNZ</i> (<i>crop.100</i>) e floresta <i>CWT</i> (<i>tree.100</i>), senescência (<i>SENM</i>) no 11º mês e crescimento final no 12º mês.

Tabela 15 – 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 16 – 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>) seguido de remoção de floresta (<i>BLOW</i> , <i>trem.100</i>) no 8º mês e 12º mês como último mês de crescimento;
⋮	⋮	⋮	⋮
9	1201 – 1499	1.0	Repetição do bloco 1;
10	1500 – 1500	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.