

Revista Brasileira de Cartografia (2017), Nº 69/3: 607-620
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

DISTRIBUIÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DAS PRECIPITAÇÕES E A RELEVÂNCIA DA OROGRAFIA DO MUNICÍPIO DE CAXIAS DO SUL (RS)

Space-time Precipitation Distribution and the Relevance of the Orography of Caxias do Sul, Brazil

Rossano Belladonna & Tiago De Vargas

**¹Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto – SAMAE
Divisão de Recursos Hídricos**

Rua Nestor Moreira, 719. Bairro Nossa Senhora de Lourdes. Caxias do Sul – RS, Brasil
{rbelladonna, tvargas}@samaecaxias.com.br

*Recebido em 27 de Agosto, 2016/ Aceito em 4 de Novembro, 2016
Received on August 27, 2016/ Accepted on November 4, 2016*

RESUMO

A distribuição espaço-temporal de precipitações permite identificar tendências pluviométricas, possibilitando aplicar investimentos corretos em projetos agrícolas, hidráulicos, hidrológicos e, até mesmo, orientando uma adequada ocupação do solo. Este trabalho tem por objetivo apresentar o comportamento espaço-temporal da chuva acumulada no município de Caxias do Sul (RS) durante os anos de 2013 e 2014 e relacionar com as características orográficas da região. Foi realizada avaliação geomorfológica e climatológica e, de posse de dados de 9 estações pluviométricas distribuídas no município, aplicou-se uma ferramenta de Sistema de Informação Geográfica (SIG), a geoestatística. A validação cruzada permitiu determinar o método de interpolação com o menor erro médio da raiz quadrada (EMRQ), sendo a Krigagem o que apresentou os menores EMRQs. O resultado foi a geração de imagens mensais e anuais de interpolação evidenciando a distribuição das chuvas. Este estudo permitiu concluir que a orografia contribui na alteração e na reorganização da chuva em Caxias do Sul, ocorrendo maiores precipitações na região dos vales da Serra Geral e sobre a sede urbana do município, onde a variação altimétrica é abrupta, com valores de 30 até 760 metros. Os menores índices pluviométricos foram identificados nos locais do Planalto dos Campos Gerais, local que não há grandes descontinuidades de altitude, ficando elas próximas aos 1.000 metros de altitude.

Palavras-chave: Precipitação, Orografia, Sistema de Informação Geográfica.

ABSTRACT

The space-time precipitation distribution allows the identification of the pluviometric behavior of an area, thus making it easier to apply adequate investments in agricultural, hydraulics and hydrologic projects, as well as giving the guidelines for a correct use of the land. The objective of this paper is to show the space-time behavior of the rainfall in Caxias do Sul (RS) during the years of 2013 and 2014 and to verify its relations with the orography of the region. Geomorphologic and climatic analyses were performed and, with the data of 9 pluviometric stations spread throughout Caxias do Sul, a Geographic Information System was used: the geostatistics. With the use of cross validation, it was possible to determine the interpolation method with the lowest root-mean-square, being the Kriging the best method. The result was a monthly and annual interpolation showing the rainfall distribution. Based on this study, it was possible to conclude that the orography alters and reorganizes the rainfall in Caxias do Sul, higher precipitations were registered

over the valleys of the Serra Geral and over the urban area of the city where altitude variation is abrupt, varying from 30 to 760 meters. The lower rainfall indices were identified over the Planalto dos Campos Gerais, place with little altitude discontinuity: being around 1.000 meters high.

Keywords: Precipitation, Orography, Geographic Information System.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento sobre a distribuição espaço-temporal das precipitações pluviométricas é necessário para realizar corretamente o gerenciamento de projetos hidráulicos e hidrológicos. O dimensionamento e controle de barragens, manutenção de reservatórios, elaboração de projetos de drenagem, controle de áreas agrícolas, manejo de monoculturas, projetos de pontes e para o abastecimento público são exemplos de obras que aplica-se a distribuição espaço-temporal.

Cerlini *et al.* (2005) relatam que a variabilidade espaço-temporal das precipitações depende de vários fatores que incluem a estrutura termodinâmica da atmosfera local com suas interações com as circulações atmosféricas de escala global. Davie (2008) esclarece que os fatores que influenciam na distribuição de precipitação podem ser divididos em estáticos e dinâmicos. Os estáticos são a altitude e a forma da encosta, ou seja, os fatores orográficos; estes fatores não sofrem alteração entre cada evento de precipitação. Os dinâmicos são originados ou modificados pelas variações do padrão climático.

O uso de Sistema de Informação Geográfica (SIG) possui grande relevância na representação espacial das precipitações. Diversos pesquisadores têm demonstrado, através de SIG, o comportamento espaço-temporal das precipitações em diferentes regiões do Brasil. Braz *et al.* (2009) e Mancuzzo *et al.* (2011) utilizaram o SIG para compreender a distribuição temporal e espacial das chuvas na Bacia Barra Seca no Estado do Espírito Santo e das chuvas no Estado do Mato Grosso, respectivamente. Aínda, Tsuyuguchi *et al.* (2010) realizaram uma análise multitemporal da bacia do Rio Taperoá, na parte central do Estado da Paraíba, a qual objetivou subsidiar estudos hidrológicos daquela região.

O município de Caxias do Sul está localizado no nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, apresentando uma área de 1.644,29 km². A sede municipal dista 96 quilômetros da capital

do Estado, Porto Alegre, e 130 quilômetros da costa com o Oceano Atlântico no sentido noroeste-sudeste (Figura 1). De acordo com o censo demográfico de 2010, o município possui uma população de 435.564 habitantes, sendo 419.406 urbana e 16.158 rural (IBGE, 2015). Conforme Caxias do Sul (2014), a economia caxiense é a terceira maior do Rio Grande do Sul, com Produto Interno Bruto (PIB) de RS 15,69 bilhões, possuindo um dos maiores PIBs agrícolas do Estado. As indústrias estão concentradas na área urbana, enquanto que a agricultura e pecuária estão distribuídas na área rural onde o minifúndio predomina e as culturas de uva, maçã, pêssego, alho, beterraba e cenoura contribuem para posicionar o município como maior produtor de hortifrutigranjeiros do Estado. Caxias do Sul (2014) elucida que a avicultura e a criação de gado bovino são as principais atividades pecuárias, representando 60% da produção de origem animal.

A precipitação é um fenômeno meteorológico que está relacionado à queda de água da atmosfera sobre a superfície do planeta. O nome dado aos tipos de precipitação está vinculado à forma física em que a água se encontra, sendo os mais comuns: chuvisco, chuva, neve, saraiva e granizo. Todas estas formas de precipitação são registradas no município de Caxias do Sul.

Caxias do Sul possui a Lei Complementar nº 246 de 6 de dezembro de 2005 que estabelece as bacias hidrográficas de captação para o abastecimento público e dá outras providências. Nesta Lei estão mapeadas as 9 bacias de captação para Caxias do Sul, sendo que as maiores bacias estão localizadas na área rural na região nordeste do município.

O Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto (SAMAEE) de Caxias do Sul opera desde 2005 uma rede composta de 8 pluviômetros automáticos que monitora as precipitações nas 6 bacias de captação que abastecem o município e em outras 3 que são reservas futuras. Há uma compreensão popular de que ocorre as maiores precipitações nas regiões mais altas,

em que as altitudes estão próximas a 1.000 metros. Entretanto, muito pouco é conhecido cientificamente sobre a espacialização das precipitações em toda a área municipal. Segundo Belladonna *et al.* (2014), o SAMAE abastece a população do município, em quase sua totalidade, com água superficial proveniente do represamento de arroios. Essas represas estão distribuídas ao longo de todo o território onde

suas respectivas bacias hidrográficas de captação possuem variações altimétricas que acompanham as características geomorfológicas da região.

O presente estudo tem como objetivo estudar a distribuição espaço-temporal das precipitações pluviométricas acumuladas durante os anos de 2013 e 2014, relacionando com as características orográficas da região na qual o município está inserido.

Mapa de Localização da Área de Estudo

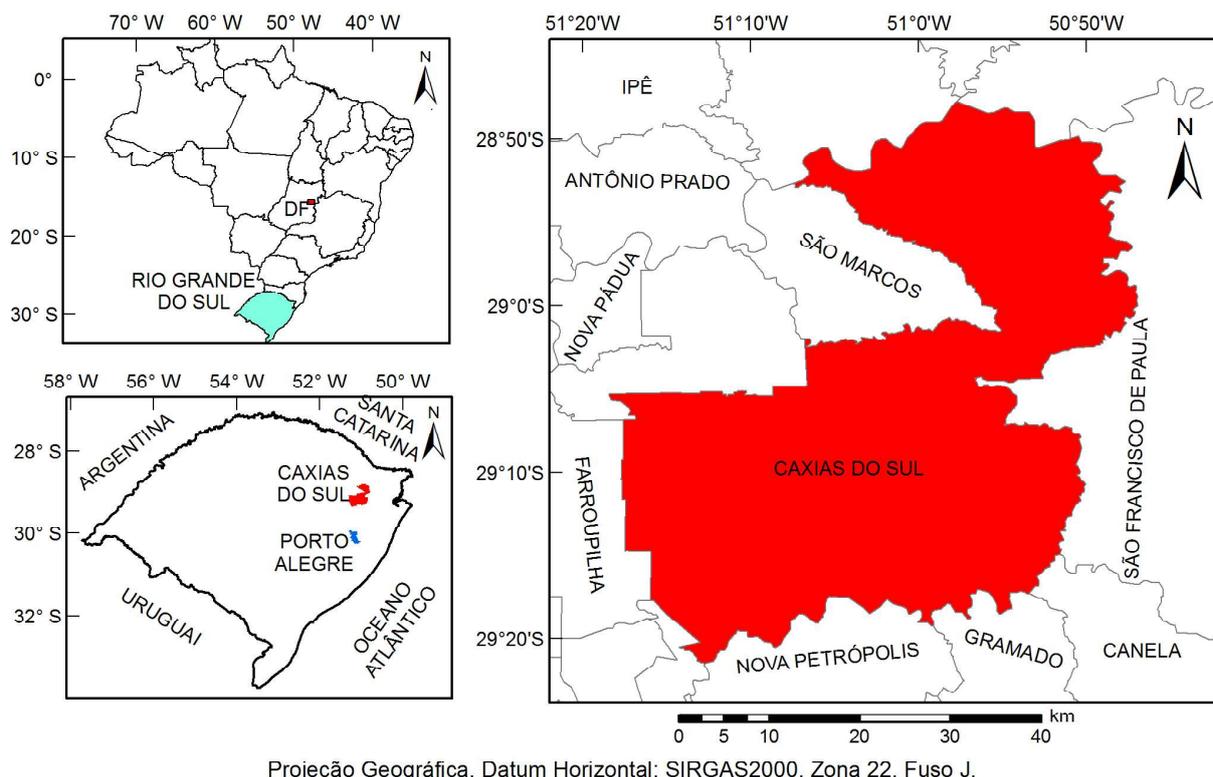


Fig. 1 - Localização do município de Caxias do Sul.

2. ASPECTOS FÍSICOS DA ÁREA EM ESTUDO

A área de estudo está inserida na bacia intracratônica da Província Paraná que detém o Grupo São Bento, este composto pelas unidades sedimentares das Formações Guará e Botucatu e pelo pacote vulcânico da Formação Serra Geral, relacionado com a abertura do Atlântico Sul. As litologias que constituem o pacote vulcânico são representadas por derrames de basaltos toleíticos a andesi-basaltos, na base da sequência, e derrames vulcânicos ácidos na porção superior. Nestes últimos, são reconhecidos dois tipos, denominados como Palmas e Chapecó (ROISENBERG & VIERO, 2000). Na região

metropolitana de Caxias do Sul predomina em superfície as unidades ácidas ignimbríticas do tipo Palmas, fácies Caxias e Gramado (PEATE, 1997; NARDY *et al.*, 2008).

O Município de Caxias do Sul integra a Região Geomorfológica Planalto das Araucárias, nas Unidades Geomorfológicas Planalto dos Campos Gerais e da Serra Geral (IBGE – Projeto RADAMBRASIL, 1986). Nas porções norte e sul do município pode ser observada a unidade geomorfológica Serra Geral, sendo estas delimitadas pelas margens do Rio das Antas com variação altimétrica entre 290 a 430 metros e pelas margens do Rio Caí em altitudes próximas a 30 metros com relação ao nível médio dos

mares, respectivamente. Já a região nordeste, no Planalto dos Campos Gerais, as altitudes atingem até 1.000 metros (Figura 2).

O clima da região pode ser classificado como subtropical muito úmido com invernos frios e verões frescos. Esta região possui a menor influência dos sistemas polares nas regiões do Estado do Rio Grande do Sul, porém exerce a maior atuação dos sistemas tropicais marítimos conjugados com o efeito do relevo de altitude, tendo os sistemas frontais como responsáveis pela maior parte das precipitações. A temperatura média anual varia entre 14 e 17°C, enquanto que

a temperatura média do mês mais frio oscila entre 8 e 14°C e a temperatura média do mês mais quente varia entre 17 e 23°C (ROSSATO, 2011). O Município de Caxias do Sul apresenta direção predominante dos ventos para norte (INMET, 2015). Camargo *et al.* (2002) expuseram que, apesar da aparente imprevisibilidade, o vento é resultante da circulação de massas de ar provocada pela energia radiante do Sol e pela rotação da Terra, sendo que o aquecimento desigual da superfície terrestre é o principal mecanismo atuante tanto a nível global (latitudes e ciclo diurno) quanto local (mar-terra, montanha-vale).

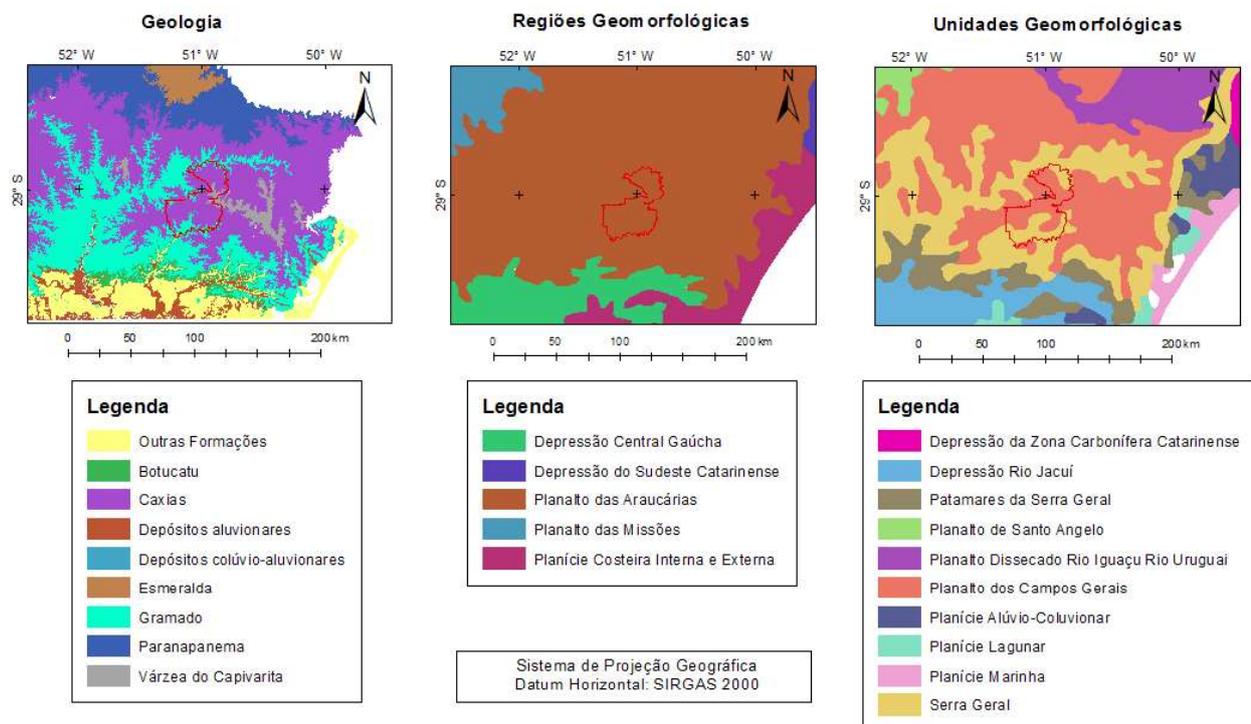


Fig. 2 - Geologia, Regiões e Unidades Geomorfológicas do nordeste do Estado do Rio Grande do Sul. Fonte: Adaptado de CPRM (2015) e de IBGE (1986).

3. METODOLOGIA

O Modelo Digital de Elevação (MDE) do município de Caxias do Sul foi construído a partir da geração de um polígono no entorno da área municipal, utilizado como área limite de modelagem. A superfície de elevação foi desenvolvida com o auxílio do Software ArcGIS 10.3 da ESRI através de ferramenta de análise 3D e utilizando um modelo de grade regular retangular (*TopotoRaster*). Este modelo foi obtido a partir do MDE do TOPODATA (INPE, 2015), a fim de obter um melhor detalhamento das linhas de vertentes, especialmente junto aos

vales encaixados da Serra Geral. O TOPODATA é um MDE elaborado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) a partir dos dados do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), com refino de 3 arco-segundo para 1 arco-segundo.

A rede pluviométrica utilizada neste estudo foi adquirida, instalada e monitorada pelo SAMAE. O primeiro pluviômetro automático da rede foi instalado no ano de 2005 e o último em 2014. Os equipamentos são automáticos do tipo basculante, *tipping bucket*, com resolução de 0,2 mm, munidos de registrador eletrônico (*datalogger*) com memória cíclica que permite coleta *in loco*. Neste estudo, também foram

utilizadas as informações de chuva registradas pela Estação Pluviométrica Nova Palmira, pertencente a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM).

A amostragem, distribuição dos pluviômetros, foi realizada de forma aleatória simples com uma distribuição semirregular. Foram diversos os fatores que contribuíram para a distribuição semirregular, tais como a possibilidade de acesso e estradas, a localização das bacias hidrográficas de captação e a segurança dos equipamentos. A disponibilidade financeira e operacional para a implantação do projeto de monitoramento foi a causa de a rede possuir os quantitativos de pluviômetros

enumerados na Tabela 1. Em pesquisa conduzida na Áustria, Ahrens (2006) utilizou 900 estações com dados entre 1971 a 2002 para investigar o comportamento da chuva em uma área de 84.000 km² e descreve que para a avaliação do método de interpolação de chuvas é necessário possuir uma densa malha de estações. O estudo aqui apresentado possui uma malha de 9 estações, representando uma densidade de aproximadamente metade daquela utilizada por Ahrens (2006), muito embora o período de análise seja somente os anos de 2013 e 2014.

A Tabela 1 apresenta os dados da rede pluviométrica e a variação da cota altimétrica entre as estações (64 - 929 metros).

Tabela 1: Identificação da rede pluviométrica utilizada no estudo

Nome ¹	COD ²	Tipo de Instrumento	Início de Operação	Forma de Aquisição dos Dados	Operador	Altitude (m)
Piaí	1	Pluviômetro Automático	2005	Coleta "in loco"	SAMAE	736
Parque da Imprensa	2	Pluviômetro Automático	2010	Coleta "in loco"	SAMAE	809
Sepultura	3	Pluviômetro Automático	2011	Coleta "in loco"	SAMAE	757
Ana Rech	4	Pluviômetro Automático	2011	Coleta "in loco"	SAMAE	773
Maestra	5	Pluviômetro Automático	2011	Coleta "in loco"	SAMAE	709
Morro Alegre	6	Pluviômetro Automático	2011	Coleta "in loco"	SAMAE	929
Galópolis	7	Pluviômetro Automático	2012	Coleta "in loco"	SAMAE	541
São Paulo da Cruz	8	Pluviômetro Automático	2012	Coleta "in loco"	SAMAE	740
Nova Palmira ³	9	Pluviômetro Automático	1944	Coleta pelo banco de dados da ANA	CPRM	64

O ¹Nome do pluviômetro está associado ao local em que se encontra ou à bacia de captação na qual se insere. ² COD = Código da estação. ³ Os dados do pluviômetro de Nova Palmira são periodicamente obtidos junto ao banco de dados do sistema Hidroweb disponível no endereço eletrônico da Agência Nacional de Águas.

Para observar a relação dos pluviômetros automáticos operados pelo SAMAE com as bacias de captação apresentadas pela Lei Complementar 246/2005, a rede de monitoramento foi espacializada em mapa georreferenciado (Figura 3).

Neste estudo, foram testados os métodos de interpolação mais utilizados nas pesquisas que envolvem dados pluviométricos, sendo eles: o Método da Mínima Curvatura (Spline do tipo Tension), o Método do Inverso Ponderado da Distância (IDW, do inglês, Inverse Distance Weighting), o Método da Krigagem e o Método da Cokrigagem, este último com a altimetria

como variável secundária.

O Método da Mínima Curvatura utiliza polinômios para ajustar uma superfície com a curvatura mínima passando por todas amostras, resultando em uma superfície suavizada. O interpolador IDW assume que a área de influência de cada amostra diminui com o aumento da distância em relação a outra amostra. A Krigagem é um método geoestatístico que leva em consideração as características espaciais de autocorrelação de variáveis regionalizadas, sendo que nelas deve existir uma certa continuidade espacial, o que permite que os dados obtidos por amostragem possam ser usados para

parametrizar a estimação de pontos onde não se possui a informação (LANDIM, 2000). Carvalho e Queiroz (2002) descrevem que a Cokrigagem, extensão multivariada da Krigagem, é utilizada quando existe dependência espacial para cada variável em estudo e também entre as variáveis.

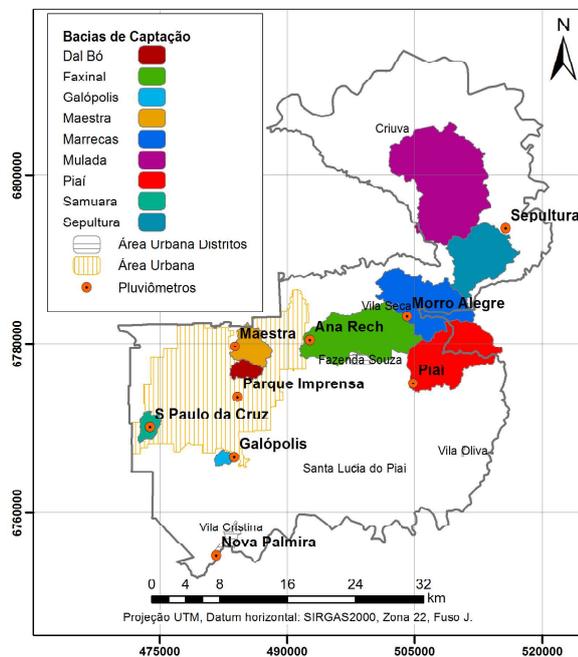


Fig. 3 - Identificação da localização dos pluviômetros automáticos com relação as bacias de captação do município de Caxias do Sul e as áreas urbanas deste a Sede até os Distritos.

A maioria dos métodos testados foram avaliados com a utilização do Software ArcGIS 10.3 da ESRI através das ferramentas do *Geostatistical Analyst*, com exceção do Método da Mínima Curvatura (validação cruzada com a técnica do *leave-one-out*) que foi aplicado de forma tradicional obtendo o erro médio da raiz quadrada (EMRQ).

A validação cruzada é um método de mensurar erros através do uso de informações retidas. Existem diversas técnicas de validação cruzada, e uma das mais comuns é a *leave-one-out*, sendo representada pela equação (1) (adaptado de SYED, 2011):

$$LOO = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (\text{valor}_{\text{estimado}} - \text{valor}_{\text{medido}})^2 \quad (1)$$

onde n corresponde a quantidade de estações pluviométricas utilizada na pesquisa, $\text{valor}_{\text{estimado}}$ representa o valor obtido a partir da modelagem

sem a presença da estação n, $\text{valor}_{\text{medido}}$ é o valor efetivamente obtido na estação n.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Estudos recentes utilizaram o MDE obtido a partir do SRTM, e observaram que a metodologia *TopotoRaster* gerou resultados satisfatórios no mapeamento digital do solo na região da bacia hidrográfica do Rio São Domingos (RJ) e na simulação da reconstituição do relevo após atividades de mineração (Chagas et al., 2010; Da Rocha, 2011). O MDE obtido através do modelo de grade regular retangular (*TopotoRaster*) identificou adequadamente as conformações geomorfológicas do município de Caxias do Sul e suas imediações. Neste modelo observa-se a transição das áreas da Serra Geral para o Planalto dos Campos Gerais (sentido NE) e Planalto dos Campos Gerais para a Serra Geral (sentido N), evidenciando o escarpamento abrupto da unidade geomorfológica na área de estudo.

Através do ArcScene do ArcGIS 10.3 da ESRI, demonstrou-se a espacialização da rede pluviométrica no município, sendo possível relacionar o posicionamento dos pluviômetros com a altimetria (Figura 5). As cotas variam de aproximadamente 30 a 1.000 metros de altitude.

As Tabelas 2 e 3 apresentam as chuvas acumuladas nos anos de 2013 e 2014, respectivamente, que foram registradas nos nove pluviômetros distribuídos ao longo do município. Os quantitativos anuais das precipitações variaram de 1.750 a 2.400 mm. Na avaliação dos métodos de interpolação, a Krigagem (*leave-one-out*) apresentou o menor erro médio da raiz quadrada (EMRQ) em três dos cinco eventos testados. Todos os métodos demonstraram EMRQ aceitáveis, sendo que o Método da Mínima Curvatura (MMC) apontou os maiores erros. O Método do IDW apresentou o menor EMRQ em dois dos cinco eventos (Tabela 4).

A Figura 4 mostra um comparativo entre as precipitações acumuladas nos anos de 2013 e 2014. Os gráficos apresentam as precipitações medidas nos pluviômetros versus as precipitações estimadas pelo método da validação cruzada (*leave-one-out*), onde verifica-se que a variação é de somente 6,3 milímetros no Pluviômetro 1 em 2013, porém atingindo 386,4 milímetros no Pluviômetro 9 neste mesmo ano.

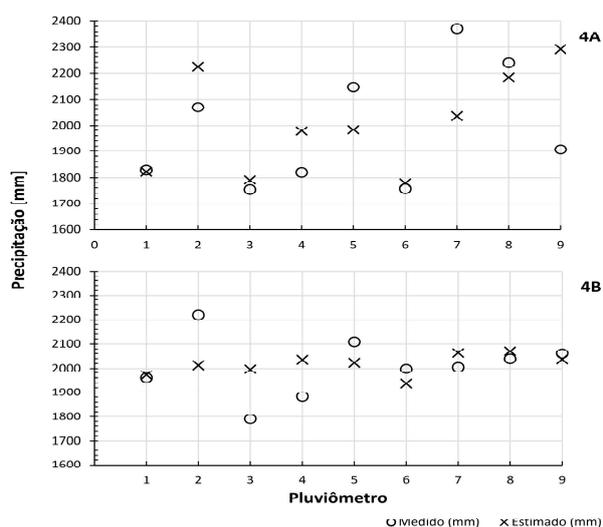


Fig. 4 - Comparativo entre as precipitações medidas nos pluviômetros versus as precipitações estimadas pelo método da validação cruzada (*leave-one-out*). O Gráfico 4A apresenta o acumulado anual das precipitações medidas e estimadas em 2013, enquanto que o Gráfico 4B mostra essas condições em 2014.

A determinação dos eventos testados foi baseada no tipo de distribuição da chuva observada nos pluviômetros, por exemplo, o mês de junho de 2013 houve uma variação superior ao dobro entre o pluviômetro com a menor precipitação média e aquele com a maior. Já no mês de janeiro de 2014 essa variação não passou de 50% entre a menor e a maior precipitação registrada. A utilização dos eventos anuais se deve ao fato destes poderem ser comparados aos dados de precipitação existentes na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, que são administrados por outras operadoras.

Loureiro e Lisboa (2011) compararam 4 métodos de interpolação: IDW, Radial Basin Multiquadrada, Mínima Curvatura e Krigagem usando valores de precipitação pluvial média de 125 postos pluviométricos distribuídos na área da bacia hidrográfica Tocantins-Araguaia (957.069 km²), de 1977 a 2006, constataram que o método geostatístico da Krigagem ordinária apresentou o melhor desempenho, tanto visual quanto estatístico, quando comparado com os demais métodos estudados.

As interpolações apresentadas no conjunto de imagens que são representadas nas Figuras 6a, 6b, 7a e 7b foram obtidas através do método da Krigagem ordinária com semivariograma do

tipo esférico. Este apresentou um dos menores EMRQs entre os semivariogramas testados (gaussiano, circular, exponencial e linear) e demonstrou o melhor ajuste visual das curvas de interpolação ao longo da área estudada.

Em 16 dos 24 meses as maiores concentrações pluviométricas estão localizadas nas regiões sudoeste e oeste (sede urbana) do município. Estas áreas demonstram uma descontinuidade altimétrica acentuada devido à sobrelevação da Serra Geral ao Planalto dos Campos Gerais. Esse tipo de distribuição pluviométrica pode ser explicado pela perda de energia cinética e resfriamento do ar, à medida em que se eleva, ao deparar-se com uma superfície montanhosa. Esse ar pode se condensar formando colunas de nuvens, normalmente situadas sobre essas regiões montanhosas (CÂNDIDO & NUNES, 2008). Assim, nas áreas a sotavento há uma queda dos totais pluviométricos devido ao fato do ar já ter perdido parte de sua umidade.

Em 5 dos 24 meses observou-se uma distribuição uniforme da chuva sobre a área de estudo. Nestes períodos a variação pluviométrica foi muito pequena ao longo de cada mês. Somente em 3 dos 24 meses a precipitação apresentou valores maiores na região nordeste do município. Esta região possui altitude mais elevada e a concentração das maiores áreas de bacias de captação.

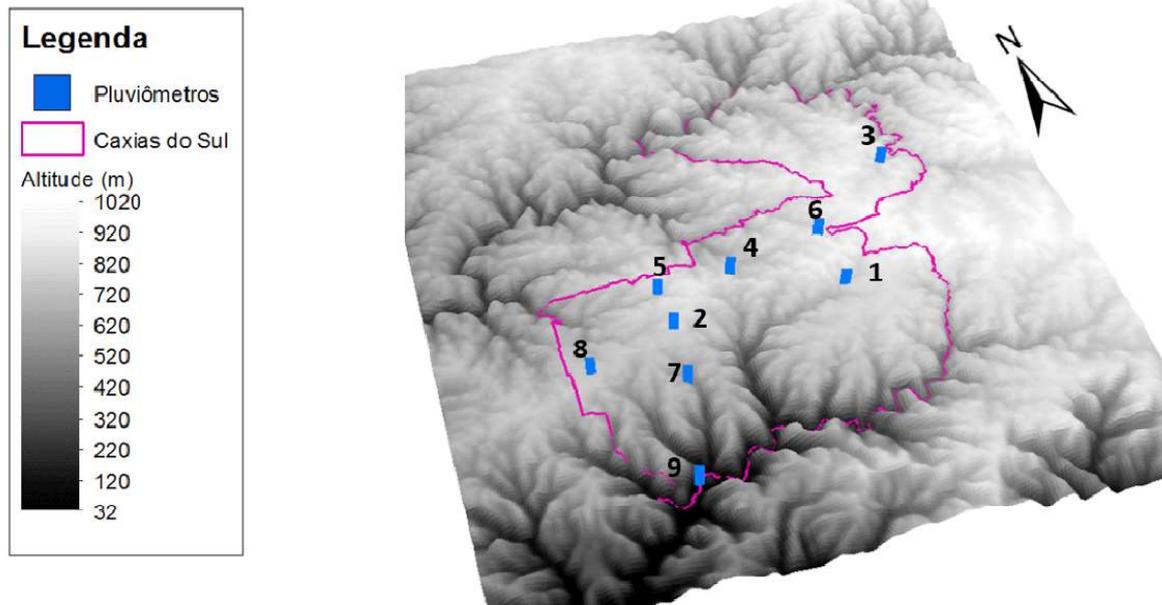


Fig. 5 - Modelo Digital de Elevação (MDE) do município de Caxias do Sul e de suas imediações. Modelo gerado através de grade regular retangular, *TopotoRaster*, a partir do TOPODATA. As barras representam a distribuição geoespacial dos pluviômetros automáticos que compõem a rede de monitoramento. Os códigos dos pluviômetros são apresentados na Tabela 1.

Tabela 2: Precipitação acumulada durante o ano de 2013 (mm)

Pluviômetro	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
1	82,1	169,5	152,8	87,2	77,4	122,6	89,8	301,0	163,0	155,8	230,8	197,2	1829,2
2	114,5	154,0	167,9	92,7	103,6	161,2	103,3	364,7	213,1	162,0	279,9	153,0	2070,2
3	64,4	165,2	190,8	72,8	69,4	135,0	59,4	312,0	153,2	142,6	161,6	227,8	1754,2
4	109,6	139,2	151,0	81,0	98,6	159,2	92,0	323,6	164,8	148,0	174,6	179,4	1821,0
5	161,0	106,6	175,6	100,6	112,6	177,8	98,4	341,2	236,6	178,0	286,2	173,0	2147,6
6	78,4	198,0	147,6	55,4	76,6	142,0	89,0	333,4	158,6	141,4	172,0	164,4	1756,8
7	146,4	176,5	221,0	120,0	147,0	199,0	121,0	370,5	219,4	179,0	286,0	186,1	2371,9
8	120,0	123,0	210,0	120,0	145,0	185,0	120,0	380,0	234,0	142,0	280,0	180,0	2239,0
9	109,7	167,2	163,6	80,5	81,2	94,7	118,0	377,5	158,5	136,2	281,3	138,1	1906,5

Tabela 3: Precipitação acumulada durante o ano de 2014 (mm)

Pluviômetro	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
1	131,2	219,0	108,7	93,22	115,6	294,4	130,2	112,8	194,2	196,0	136,4	228,8	1960,5
2	222,2	237,9	161,1	107,9	127,2	298,1	161,8	103,1	242,6	196,5	136,1	224,7	2219,3
3	144,6	156,8	142,0	56,0	120,0	345,4	93,2	122,0	182,8	159,8	83,0	185,4	1791,1
4	134,0	209,6	115,4	120,2	138,8	270,2	107,6	91,6	195,6	145,8	162,2	191,8	1882,8
5	155,7	225,8	181,3	116,9	142,6	323,8	122,8	115,4	205,4	158,2	147,6	213,6	2109,1
6	168,6	211,6	134,8	117,8	131,4	305,2	100,6	99,0	192,0	151,8	153,6	231,6	1998,0
7	159,0	281,0	175,0	121,0	122,0	222,6	140,2	96,0	194,4	174,8	128,2	191,2	2005,4
8	113,2	166,0	199,2	138,2	131,3	278,3	138,7	102,6	195,0	175,8	144,7	256,2	2039,2
9	148,9	243,4	143,1	125,0	90,0	249,8	148,8	94,4	199,6	171,2	174,8	272,0	2061,0

Tabela 4: Erro médio da raiz quadrada (EMRQ) para os quatro interpoladores avaliados (mm)

Período	MMC	Krigagem	Cokrigagem	IDW
Junho de 2013	48,0	39,4	35,1	34,4
Ano de 2013	282,5	203,5	189,1	180,6
Janeiro de 2014	54,1	33,5	33,5	37,0
Julho de 2014	20,0	15,5	16,5	20,1
Ano de 2014	178,2	112,4	114,7	119,4

Fonte: Autor.

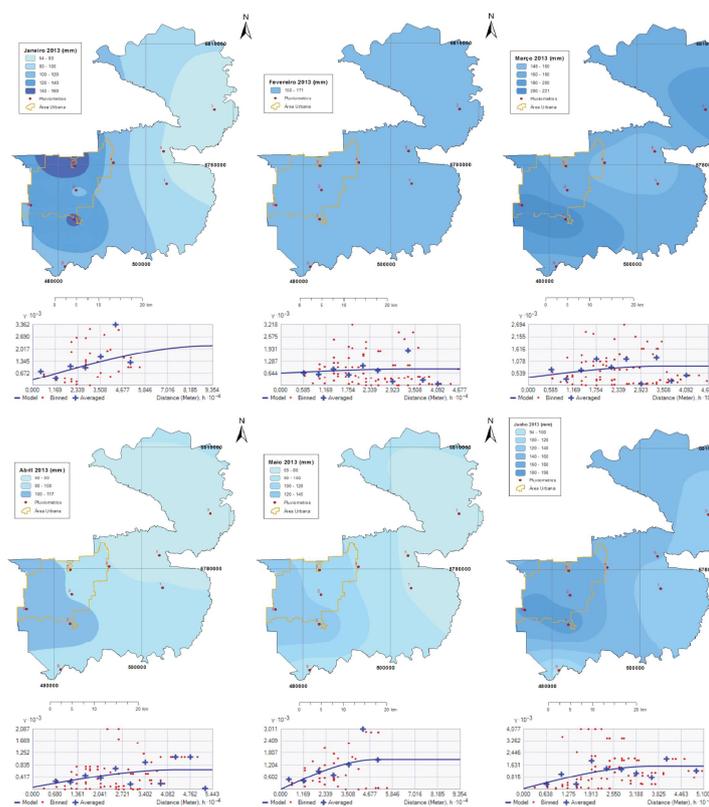


Fig. 6a - Distribuição espaço-temporal da chuva no município de Caxias do Sul durante o primeiro semestre do ano de 2013. Os semivariogramas estão apresentados sob o respectivo mês avaliado onde o eixo das ordenadas representa o valor de semivariograma (γ) e o eixo das abscissas corresponde à distância dada em metros.

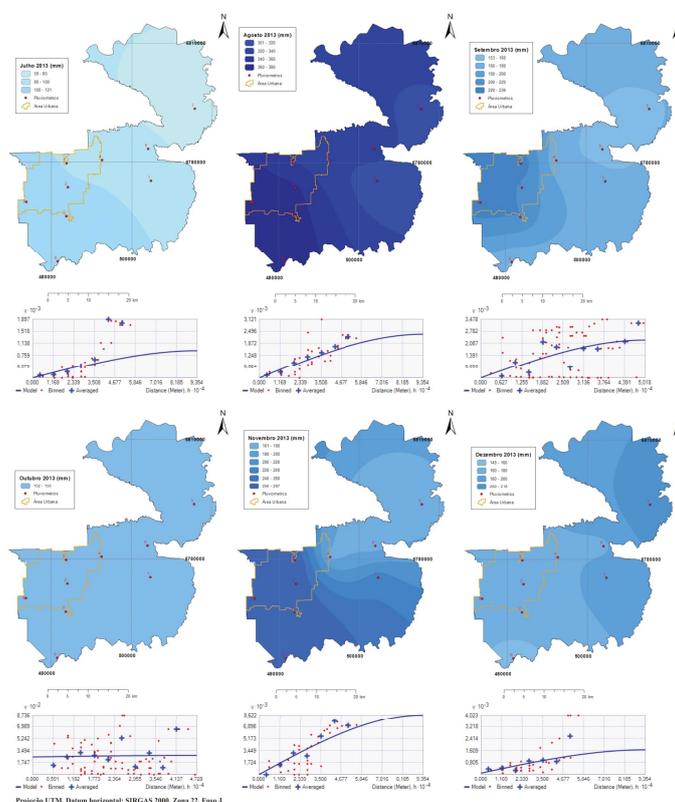


Fig. 6b - Distribuição espaço-temporal da chuva no município de Caxias do Sul durante o segundo semestre do ano de 2013. Os semivariogramas estão apresentados sob o respectivo mês avaliado onde o eixo das ordenadas representa o valor de semivariograma (γ) e o eixo das abscissas corresponde à distância dada em metros.

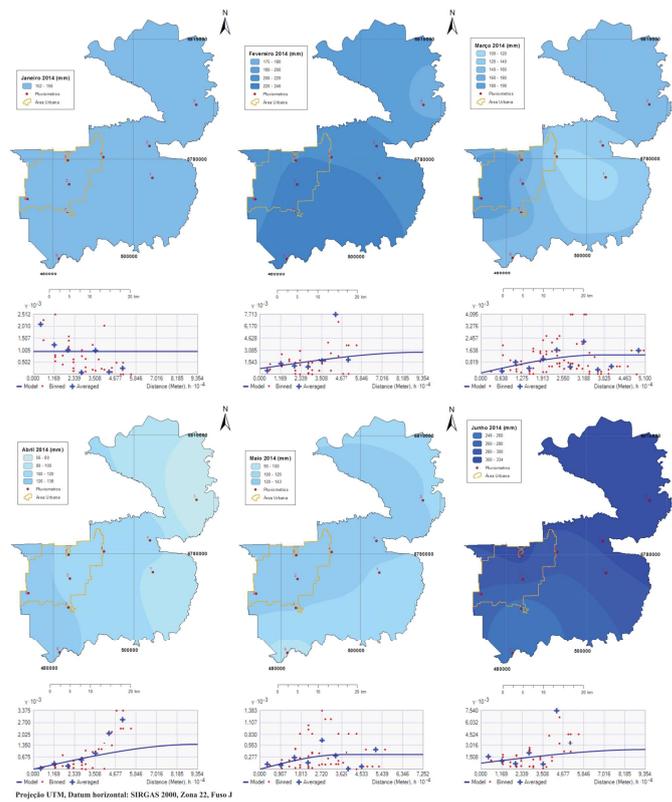


Fig. 7a - Distribuição espaço-temporal da chuva no município de Caxias do Sul durante o primeiro semestre do ano de 2014. Os semivariogramas estão apresentados sob o respectivo mês avaliado onde o eixo das ordenadas representa o valor de semivariograma (γ) e o eixo das abscissas corresponde à distância dada em metros.

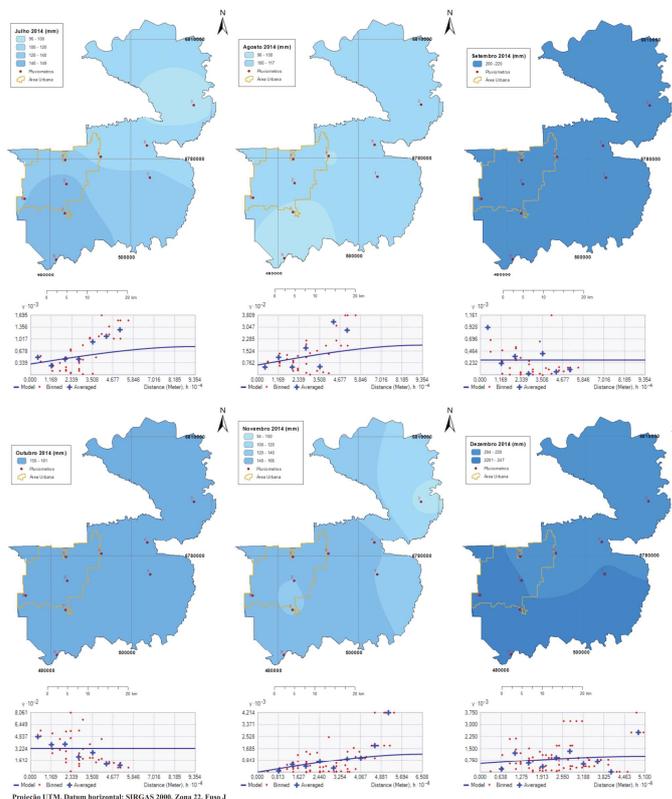


Fig. 7b - Distribuição espaço-temporal da chuva no município de Caxias do Sul durante o segundo semestre do ano de 2014. Os semivariogramas estão apresentados sob o respectivo mês avaliado onde o eixo das ordenadas representa o valor de semivariograma (γ) e o eixo das abscissas corresponde à distância dada em metros.

Avaliando a distribuição geomorfológica da região estudada (figuras 2 e 5) e o resultado das interpolações (figuras 6 e 7) observa-se que o quantitativo pluviométrico diminui à medida que a altitude se eleva, partindo de precipitações elevadas na região dos vales da Serra Geral até índices pluviométricos menores no Planalto dos Campos Gerais.

Em 16 dos 24 meses as maiores concentrações pluviométricas estão localizadas nas regiões sudoeste e oeste (sede urbana) do município. Estas áreas demonstram uma descontinuidade altimétrica acentuada devido à sobrelevação da Serra Geral ao Planalto dos Campos Gerais. Esse tipo de distribuição pluviométrica pode ser explicado pela perda de energia cinética e resfriamento do ar, à medida em que se eleva, ao deparar-se com uma superfície montanhosa. Esse ar pode se condensar formando colunas de nuvens, normalmente situadas sobre essas regiões montanhosas (CÂNDIDO & NUNES, 2008). Assim, nas áreas a sotavento há uma queda dos totais pluviométricos devido ao fato do ar já ter perdido parte de sua umidade.

Em 5 dos 24 meses observou-se uma distribuição uniforme da chuva sobre a área de estudo. Nestes períodos a variação pluviométrica foi muito pequena ao longo de cada mês. Somente em 3 dos 24 meses a precipitação apresentou valores maiores na região nordeste do município. Esta região possui altitude mais elevada e a concentração das maiores áreas de bacias de captação.

As Figuras 8 e 9 apresentam a distribuição da precipitação acumulado dos anos 2013 e 2014 na área de estudo. Estes valores seguem a tendência observada nas distribuições mensais, demonstrando as maiores concentrações pluviométricas nas regiões sudoeste e oeste. Estas regiões apontam grandezas superiores a 2.000 milímetros, enquanto que na região nordeste as precipitações foram de aproximadamente 1.800 milímetros.

Durante o ano de 2013 a precipitação acumulada no município de Caxias do Sul variou entre 1.748 e 2.327 mm, representando um aporte 33,1% maior a barlavento. A variação pluviométrica no ano de 2014 não foi tão expressiva quanto ao ano anterior, porém

registrou uma amplitude entre 1.852 e 2.103 mm, equivalendo uma contribuição 13,5% maior a barlavento. Observação semelhante foi feita na região central do Estado do Rio Grande do Sul onde Forgiarini *et al.* (2013) registraram a ocorrência de uma pluviosidade 9,46% maior a barlavento do que a sotavento de uma descontinuidade altimétrica, após coleta de dados durante 30 eventos de chuva em 10 pluviômetros linearmente distribuídos. Este tipo de fenômeno foi percebido também na região hidrográfica da baía da Ilha Grande no Estado do Rio de Janeiro, onde Soares *et al.* (2014) relataram que as chuvas anual, sazonal e mensal são fortemente influenciadas pela topografia e pela distância do litoral, sendo que os máximos de precipitação ocorreram a barlavento da Serra do Mar.

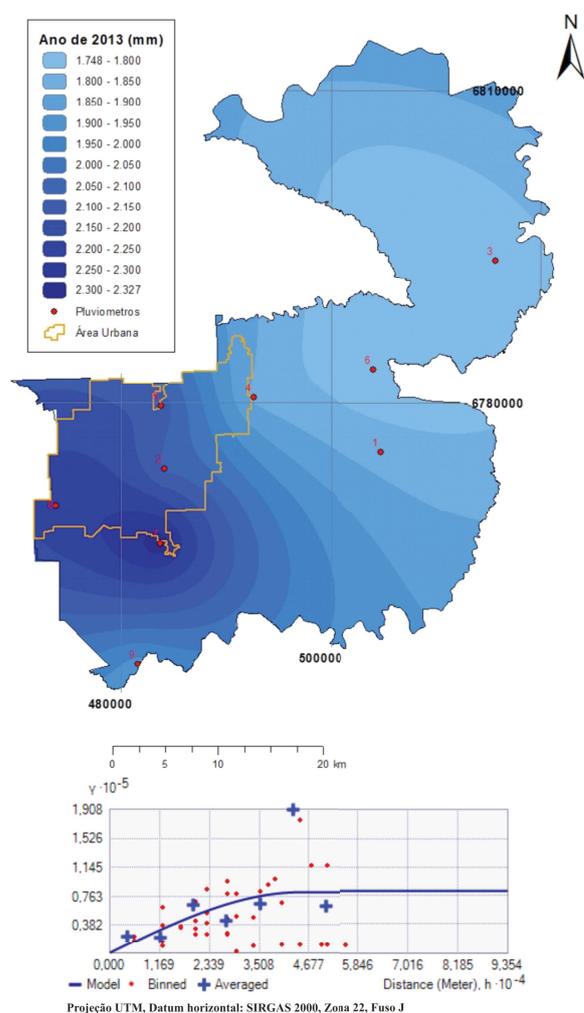


Fig. 8 - Distribuição espacial da chuva no município de Caxias do Sul no ano de 2013. Quanto ao respectivo semivariograma mostrado abaixo da imagem, o eixo das ordenadas representa o valor (γ) e o eixo das abscissas corresponde à distância dada em metros.

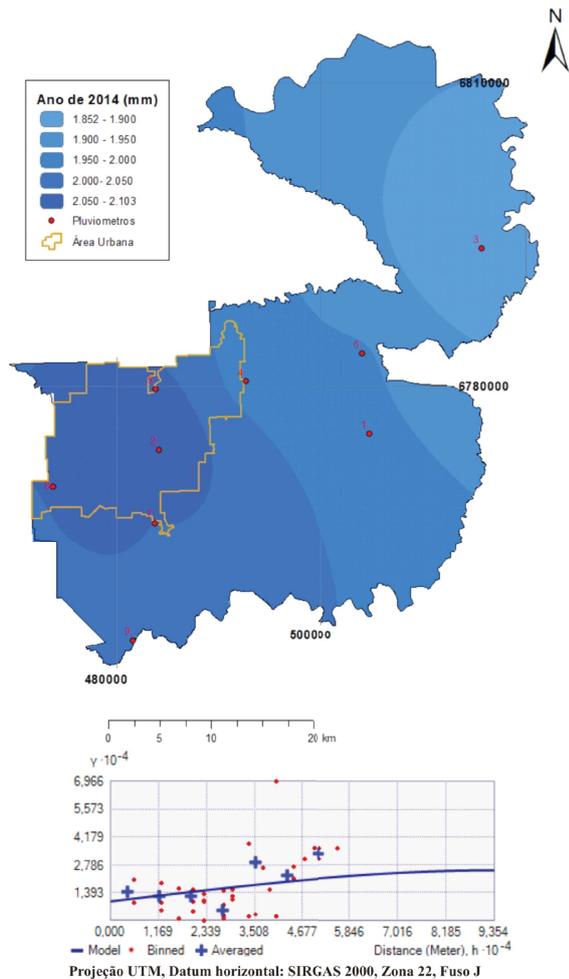


Fig. 9 - Distribuição espacial da chuva no município de Caxias do Sul no ano de 2014. Quanto ao respectivo semivariograma mostrado abaixo da imagem, o eixo das ordenadas representa o valor (γ) e o eixo das abscissas corresponde à distância dada em metros.

5. CONCLUSÃO

O SIG oportunizou a visualização da variabilidade pluviométrica em toda a área municipal e possibilitou a realização de cálculos geoestatísticos com maior rapidez e praticidade, além de permitir a realização dos testes de validação através do método da validação cruzada pela metodologia “leave-one-out”. Com base nos resultados obtidos observa-se que nenhum modelo de interpolação pode representar as dinâmicas da natureza com exatidão. A partir deste estudo é possível constatar que quanto maior for a quantidade de equipamentos de medição e controle, mais preciso será o resultado dos métodos.

Este estudo permitiu evidenciar que as menores precipitações ocorrem na região onde estão inseridas as maiores bacias de captação do Município de Caxias do Sul, reserva para o abastecimento atual e futuro. A diferença entre estes locais e a área na qual está disposta a sede municipal atingiu 579 mm em 2013 e 251 mm em 2014. Apesar de ainda não possuir estatística pluviométrica com um período de tempo mais extenso, esse resultado corrobora com a sensação popular de que historicamente na região do Planalto dos Campos Gerais de Caxias do Sul a pluviometria é inferior a observada nos vales da Serra Geral e na sede urbana municipal.

A orografia de Caxias do Sul demonstrou ser fator relevante na análise da distribuição espacial das precipitações, pois as chuvas do ano de 2013 foram 33,1% maiores a barlavento. Em 2014 a variação pluviométrica permaneceu maior a barlavento em 13,5%. Houze (2012), mesmo observando que a topografia é inativa em relação às precipitações atmosféricas, concluiu que a orografia permite uma alteração ou reorganização de umas das três formas de precipitação: convectivas, frontais ou tropicais.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHRENS, B. Distance in spacial interpolation of daily rain gauge data. **Hydrology and Earth System Sciences**. 10, pp. 197-208, 2006.
- BELLADONA, R.; ADAMI, M. V. D.; VARGAS, T.; D'AGOSTINI, R.; ZAGO, M. A.; FRIZZO, E. E. Batimetria das represas do complexo Dal Bó em Caxias do Sul –RS. *In 4º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente*, Bento Gonçalves – RS, 7 p. 2014.
- BRAZ, R. L.; RIBEIRO, C. A.; FERREIRA, D. S.; CECÍLIO, R. A. Uso de séries históricas e técnicas de SIG no estudo da distribuição temporal e espacial da pluviosidade na Bacia Barra Seca localizada ao norte do estado do Espírito Santo. *In XI Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e VII Encontro Latino Americano de Pós-Graduação* – Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos – SP, 3 p. 2009.
- CAMARGO, O. A.; SILVA, F. J. L. **Atlas eólico: Rio Grande do Sul**. Secretaria de Energia Minas e Comunicações. Porto Alegre: SEMC, 69 p., 2002.

- CÂNDIDO, D. H., NUNES, L. H. Influência da orografia na precipitação da área entre o vale do rio tietê e a serra da Mantiqueira. *In GEOUSP: Espaço e Tempo*, nº 24: pp. 08-27, 2008.
- CARVALHO, J. R. P. DE; QUEIROZ, E. F. DE. Uso de cokrigagem colocalizada na determinação da distribuição espacial de precipitação. **EMBRAPA: Comunicado Técnico 21**, Campinas, SP, 4 p., 2002.
- CAXIAS DO SUL. **Perfil sócio-econômico de Caxias do Sul**. Disponível em: <http://www.caxias.rs.gov.br/_uploads/desenv_economico/perfil_caxias.pdf>. Acesso: 3 abril 2015.
- CERLINI, P. B.; EMANUEL, K. A.; TODINI, E. Orographic effects on convective precipitation and space-time rainfall variability: preliminary results. **Hydrology and Earth System Science**. vol. 9, n. 4: pp. 285-299, 2005.
- CHAGAS, C. S.; FERNANDES FILHO, E. I.; ROCHA, M. F.; CARVALHO JÚNIOR, W. de; SOUZA NETO, N. C. Avaliação de modelos digitais de elevação para aplicação em um mapeamento digital de solos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 2: pp. 218-226, Campina Grande, PB, 2010.
- CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **Mapas geológicos estaduais**. Disponível em: <http://geobank.sa.cprm.gov.br/pls/publico/geobank.download.downloadVetoriais?p_webmap=N&p_usuario=1>. Acesso: 26 abril 2015.
- DAROCHA, V. **Utilização do geoprocessamento para simular reconstituição do relevo após atividades de mineração**. Monografia de Especialização em Geoprocessamento. Belo Horizonte: UFMG/Instituto de Geociências, 39 p., 2011.
- DAVIE, T. **Fundamentals of Hydrology**. 2nd ed. New York: Routledge, 200 p., 2008.
- FORGIARINI, F. R.; VENDRUSCOLO, D. S.; RIZZI, E. S. Análise de chuvas orográficas no centro do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Climatologia**. ISSN 2237-8642 (Eletrônica), ano 9, vol. 13: pp. 107-119, 2013.
- HOUZE, R. A. Jr. Orographic effects on precipitating clouds. **Reviews of Geophysics**, 50, RG1001, American Geophysical Union, 47 p., 2012.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Projeto RADAMBRASIL: Folha SH.22 Porto Alegre e parte das folhas SH.21 Uruguaiana e SI. 22 Lagoa Mirim: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra**. IBGE, Vol. 33, Rio de Janeiro – RJ, 791 p., 1986.
- _____. **Censo demográfico de 2010**. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=430510&search=||in fogr%E1fi-cos:informa%E7%F5es-completas>>. Acesso: 15 abril 2015.
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais climatológicas do Brasil 1961-1990**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>>. Acesso: 4 abril 2015.
- INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **TOPODATA Banco de dados geomorfométricos do Brasil**. Disponível em <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/acesso.php>>. Acesso: 18 abril 2015.
- LANDIM, P. M. B. **Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas**. DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Lab. Geomatemática, Texto Didático 02: 20 pp., 2000. Disponível em <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/DIDATICOS/LANDIM/interpo.pdf>>. Acesso: 25 abril 2015.
- LOUREIRO, G. E.; LISBOA, É. G. Comparação dos métodos de interpolação espacial aplicados a dados pluviométricos da região hidrográfica Tocantins-Araguaia. *In XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Maceió – AL, 20 p., 2011.
- MANCUZZO, F. F. N.; MELO, D. C. R.; ROCHA, H. M. Distribuição espaço-temporal e sazonalidade das chuvas no Estado do Mato Grosso. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Vol. 16, n.4: pp. 157-167, 2011.
- NARDY, A.J.R.; MACHADO, F.B.; OLIVEIRA, M.A.F.; As rochas vulcânicas mesozoicas ácidas da Bacia do Paraná: litoestratigrafia e considerações geoquímico-estratigráficas. **Revista Brasileira de Geociências**. 38(1): pp.178-195, março de 2008.

- PEATE, D.W. The Paraná-Etendeka Province. *In* MAHONEY J.J. & COFFIN M.F. (eds.) **Large igneous provinces: continental, oceanic and planetary flood volcanism**. Geophysical Monograph, 100, AGU: pp.217-245. 1997.
- ROISENBERG, A., VIERO, A. P.O. Vulcanismo Mesozóico da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul. *In* HOLZ, M., DE ROS, F. **Geologia do Rio Grande do Sul**. Ed – Porto Alegre: CIGO/UFRGS Porto Alegre. 444 p. (355-374). il. CDU 55 (816.5), 2000.
- ROSSATO, M. S. **Os climas do Rio Grande do Sul: variabilidade, tendências e tipologia**. Tese de doutorado. Porto Alegre: UFRGS/PPGEA, 240 p., 2011.
- SOARES, F. S.; FRANCISCO, C. N.; SENNA, M. C. Distribuição espaço-temporal da precipitação na região hidrográfica da baía da Ilha Grande – RJ. **Revista Brasileira de Meteorologia**. V. 29, n. 1: pp. 125-138, 2014.
- SYED, A. R. **A review of cross validation and adaptive model selection**. Dissertação de mestrado. Georgia State University, 26 p., 2011.
- TSUYUGUCHI, B. B.; CUNHA, J. L. B. L.; RUFINO, I. A. A. Uso de geotecnologias para espacialização de dados de precipitação, NDVI e temperatura de superfície da bacia do rio Taperoá. *In* **III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**. Recife – PE, 9 p., 2010.