



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ  
ESPECIALIZAÇÃO EM ELABORAÇÃO E GERENCIAMENTO DE PROJETOS  
PARA A GESTÃO MUNICIPAL DE RECURSOS HÍDRICOS**

**COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO ESPACIAL PARA A  
PRECIPITAÇÃO MÁXIMA DIÁRIA DE DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO  
EM UMA ÁREA DO CENTRO-OESTE BRASILEIRO, NO DISTRITO FEDERAL E  
ESTADO DE GOIÁS**

**BRASÍLIA**

**2016**

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO  
ESPECIALIZAÇÃO EM ELABORAÇÃO E GERENCIAMENTO DE PROJETOS  
PARA A GESTÃO MUNICIPAL DE RECURSOS HÍDRICOS**

**GABRIEL STARKE**

**COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO ESPACIAL PARA A  
PRECIPITAÇÃO MÁXIMA DIÁRIA DE DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO  
EM UMA ÁREA DO CENTRO-OESTE BRASILEIRO, NO DISTRITO FEDERAL E  
ESTADO DE GOIÁS**

**BRASÍLIA**

**2016**

**GABRIEL STARKE**

**COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO ESPACIAL PARA A  
PRECIPITAÇÃO MÁXIMA DIÁRIA DE DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO  
EM UMA ÁREA DO CENTRO-OESTE BRASILEIRO, NO DISTRITO FEDERAL E  
ESTADO DE GOIÁS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Especialização em Elaboração e Gerenciamento de Projetos para a Gestão Municipal de Recursos Hídricos do Instituto Federal do Ceará como requisito para obtenção do título de Especialista em Elaboração e Gerenciamento de Projetos para a Gestão Municipal de Recursos Hídricos.

Orientador: Ms. Sara Ferrigo

**BRASÍLIA**

**2016**

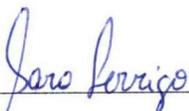
GABRIEL STARKE

COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO ESPACIAL PARA A  
PRECIPITAÇÃO MÁXIMA DIÁRIA DE DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO  
EM UMA ÁREA DO CENTRO-OESTE BRASILEIRO, NO DISTRITO FEDERAL E  
ESTADO DE GOIÁS

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Coordenação do Curso de Especialização em  
Elaboração e Gerenciamento de Projetos para a  
Gestão Municipal de Recursos Hídricos do Instituto  
Federal do Ceará como requisito para obtenção do  
título de Especialista em Elaboração e  
Gerenciamento de Projetos para a Gestão Municipal  
de Recursos Hídricos.

Aprovado em 25/11/2016.

BANCA EXAMINADORA



---

Profª. Ms. Sara Ferrigo (Orientadora)  
Centro Universitário do Distrito Federal – UDF



---

Profª. Ms. Erica Acioli Canamary  
Instituto de Ensino Superior Planalto – IESPLAN



---

Prof. Ms. Carlos da Costa Ferreira  
Universidade Católica de Brasília - UCB

## RESUMO

A precipitação máxima é entendida como a ocorrência extrema, com duração, distribuição temporal e espacial crítica para uma área ou bacia hidrográfica, e pode atuar sobre a erosão do solo, inundações em áreas rurais e urbanas, obras hidráulicas, dentre outros. As precipitações máximas são retratadas pontualmente pelas curvas de intensidade-duração-frequência, cuja determinação apresenta dificuldades em função da escassez de registros, da baixa densidade da rede de pluviógrafos e o pequeno período de observações disponível. Em locais onde não há disponibilidade de dados, a precipitação máxima é estimada a partir da transferência ou interpolação de valores registrados na vizinhança, o que pode ser realizado por meio do uso de técnicas de geoprocessamento. O presente trabalho avaliou os métodos de interpolação espacial IDW, Spline de Tensão e Krigagem Ordinária para a interpolação de dados de precipitação máxima diária para períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos, em uma área do centro-oeste brasileiro que compreende a bacia hidrográfica do rio Descoberto, no Distrito Federal e estado de Goiás. Os resultados foram avaliados utilizando-se a técnica de validação cruzada e comparando os erros absoluto médio, percentual médio e quadrático médio encontrados. Os erros médios aumentaram de acordo com o aumento do período de retorno interpolado. Os erros ficaram muito próximos quando comparando os três métodos de interpolação, de forma que não é possível destacar um método como o mais adequado para a situação analisada.

**Palavras-chave:** precipitação máxima; métodos de interpolação espacial; validação cruzada.

## ABSTRACT

The maximum precipitation is understood as the extreme occurrence with duration, critical temporal and spatial distribution for an area or watershed, and can act on soil erosion, floods in rural and urban areas, water structures, among others. The maximum precipitation is portrayed for an exact location by the intensity-duration-frequency curve, which determination is difficult due to the lack of records, the low density of rain gauge network and the short period of available observations. In places where there is no data available, maximum precipitation is estimated from the transference or interpolation of values recorded in the neighborhood, which can be accomplished using GIS techniques. This study evaluated the spatial interpolation methods IDW, Spline with Tension and Ordinary Kriging for the interpolation of maximum daily precipitation data for return periods of 2, 5, 10, 25, 50 and 100 years in an area of the center-western Brazil comprising the Descoberto river basin, in the Federal District and the state of Goiás. The results were evaluated using cross-validation technique and comparing the mean absolute error, mean absolute percentage error and mean squared error. The mean errors increased in accordance with increasing interpolated return period. The errors are very close when comparing the three interpolation methods, so it is not possible to point out a method as the most suitable for the situation analyzed.

**Keywords:** maximum precipitation; spatial interpolation methods; cross-validation.

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 – Mapa para obtenção do parâmetro G da equação IDF apresentada por TCBR 2008 (Fonte: PDDU/DF)</i> .....	22
<i>Figura 2 – Localização da área de estudo</i> .....	27
<i>Figura 3 – Estações pluviométricas utilizadas no estudo</i> .....	30
<i>Figura 4 - Número de anos com dados utilizados no estudo, por estação pluviométrica</i> .....	32
<i>Figura 5 - Comparação entre valores de precipitação máxima obtidos pela Distribuição de Gumbel para a Estação Brasília e por diferentes curvas IDF para o Distrito Federal</i> .....	38
<i>Figura 6 – Comparação entre interpolações utilizando os parâmetros padrão e os parâmetros otimizados – IDW – TR 2 anos</i> .....	39
<i>Figura 7 – Comparação entre interpolações utilizando os parâmetros padrão e os parâmetros otimizados – Spline – TR 10 anos</i> .....	39
<i>Figura 8 – Comparação entre interpolações utilizando os parâmetros padrão e os parâmetros otimizados – Krigagem – TR 50 anos</i> .....	40
<i>Figura 9 – Mapas de estimativa da precipitação diária de TR 2 anos gerados pelos três métodos de interpolação</i> .....	41
<i>Figura 10 – Precipitação medida e estimada, e erro percentual das estimativas – IDW – TR 2 anos</i> .....	42
<i>Figura 11 – Precipitação medida e estimada, e erro percentual das estimativas – Spline – TR 2 anos</i> .....	43
<i>Figura 12 – Precipitação medida e estimada, e erro percentual das estimativas – Krigagem – TR 2 anos</i> .....	43
<i>Figura 13 – Precipitação medida e estimada pelos 3 métodos para TR 2 anos</i> .....	44
<i>Figura 14 – Erro das estimativas geradas pelos 3 métodos para TR 2 anos</i> .....	44
<i>Figura 15 – Gráficos de precipitação medida (Measured) versus precipitação estimada (Predicted) e erro (Error) – TR 2 anos</i> .....	46
<i>Figura 16 – Mapas de estimativa da precipitação diária de TR 5 anos gerados pelos três métodos de interpolação</i> .....	48
<i>Figura 17 – Precipitação medida e estimada, e erro percentual das estimativas – IDW – TR 5 anos</i> .....	49
<i>Figura 18 – Precipitação medida e estimada, e erro percentual das estimativas – Spline – TR 5 anos</i> .....	50
<i>Figura 19 – Precipitação medida e estimada, e erro percentual das estimativas – Krigagem – TR 5 anos</i> .....	50
<i>Figura 20 – Precipitação medida e estimada pelos 3 métodos para TR 5 anos</i> .....	51
<i>Figura 21 – Erro das estimativas geradas pelos 3 métodos para TR 5 anos</i> .....	51
<i>Figura 22 – Gráficos de precipitação medida (Measured) versus precipitação estimada (Predicted) e erro (Error) – TR 5 anos</i> .....	52
<i>Figura 23 – Mapas de estimativa da precipitação diária de TR 10 anos gerados pelos três métodos de interpolação</i> .....	54

<i>Figura 24 – Precipitação medida e estimada, e erro percentual das estimativas – IDW – TR 10 anos.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 25 – Precipitação medida e estimada, e erro percentual das estimativas – Spline – TR 10 anos.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 26 – Precipitação medida e estimada, e erro percentual das estimativas – Krigagem – TR 10 anos.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 27 – Precipitação medida e estimada pelos 3 métodos para TR 10 anos.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 28 – Erro das estimativas geradas pelos 3 métodos para TR 10 anos .....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 29 – Gráficos de precipitação medida (Measured) versus precipitação estimada (Predicted) e erro (Error) – TR 10 anos .....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 30 – Mapas de estimativa da precipitação diária de TR 25 anos gerados pelos três métodos de interpolação.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 31 – Precipitação medida e estimada, e erro percentual das estimativas – IDW – TR 25 anos.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 32 – Precipitação medida e estimada, e erro percentual das estimativas – Spline – TR 25 anos.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 33 – Precipitação medida e estimada, e erro percentual das estimativas – Krigagem – TR 25 anos.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 34 – Precipitação medida e estimada pelos 3 métodos para TR 25 anos.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 35 – Erro das estimativas geradas pelos 3 métodos para TR 25 anos .....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 36 – Gráficos de precipitação medida (Measured) versus precipitação estimada (Predicted) e erro (Error) – TR 25 anos .....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 37 – Mapas de estimativa da precipitação diária de TR 50 anos gerados pelos três métodos de interpolação.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 38 – Precipitação medida e estimada, e erro percentual das estimativas – IDW – TR 50 anos.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 39 – Precipitação medida e estimada, e erro percentual das estimativas – Spline – TR 50 anos.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 40 – Precipitação medida e estimada, e erro percentual das estimativas – Krigagem – TR 50 anos.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 41 – Precipitação medida e estimada pelos 3 métodos para TR 50 anos.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 42 – Erro das estimativas geradas pelos 3 métodos para TR 50 anos .....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 43 – Gráficos de precipitação medida (Measured) versus precipitação estimada (Predicted) e erro (Error) – TR 50 anos .....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 44 – Mapas de estimativa da precipitação diária de TR 100 anos gerados pelos três métodos de interpolação.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 45 – Precipitação medida e estimada, e erro percentual das estimativas – IDW – TR 100 anos.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 46 Precipitação medida e estimada, e erro percentual das estimativas – Spline – TR 100 anos.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 47 Precipitação medida e estimada, e erro percentual das estimativas – Krigagem – TR 100 anos.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 48 – Precipitação medida e estimada pelos 3 métodos para TR 100 anos.....</i>	<i>74</i>

<i>Figura 49 – Erro das estimativas geradas pelos 3 métodos para TR 100 anos .....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 50 – Gráficos de precipitação medida (Measured) versus precipitação estimada (Predicted) e erro (Error) – TR 100 anos .....</i>	<i>76</i>

## LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 – Parâmetros da equação de Pfaftetter (1957) para o Distrito Federal.....</i>	<i>21</i>
<i>Tabela 2 – Estações pluviométricas utilizadas no estudo.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabela 3 – Precipitação máxima diária por período de retorno.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabela 4 – Comparação entre valores de precipitação máxima obtidos pela Distribuição de Gumbel para a Estação Brasília e por diferentes curvas IDF para o Distrito Federal.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabela 5 – Erros médios gerados na validação cruzada – TR 2 anos.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabela 6 – Erros médios gerados na validação cruzada – TR 5 anos.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabela 7 – Erros médios gerados na validação cruzada – TR 10 anos.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabela 8 – Erros médios gerados na validação cruzada – TR 25 anos.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabela 9 – Erros médios gerados na validação cruzada – TR 50 anos.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabela 10 – Erros médios gerados na validação cruzada – TR 100 anos.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabela 11 – Erros médios gerados nas interpolações para os diversos períodos de retorno .</i>	<i>78</i>
<i>Tabela 12 – Médias dos erros gerados nas interpolações dos diversos períodos de retorno .</i>	<i>78</i>

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>14</b>
2.1 - OBJETIVO GERAL.....	14
2.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>15</b>
3.1 - PRECIPITAÇÃO .....	15
3.1.1 – <i>Formação das precipitações</i> .....	15
3.1.2 – <i>Tipos de precipitação</i> .....	15
3.1.3 – <i>Pluviometria</i> .....	16
3.2 - ANÁLISE DE FREQUÊNCIA EM HIDROLOGIA .....	17
3.2.1 – <i>Distribuição de Gumbel (Máximos)</i> .....	17
3.3 - MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO ESPACIAL.....	18
3.3.1 – <i>Inverse Distance Weighted - IDW</i> .....	19
3.3.2 – <i>Spline</i> .....	19
3.3.3 – <i>Krigagem</i> .....	19
3.3.4 – <i>Validação Cruzada</i> .....	20
3.4 - CURVAS IDF PARA O DISTRITO FEDERAL .....	21
3.5 - TRABALHOS RELACIONADOS AO ASSUNTO.....	23
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>26</b>
4.1 - ÁREA DE ESTUDO .....	26
4.1.1 - <i>Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto (BHRD)</i> .....	27
4.1.2 – <i>Clima</i> .....	29
4.2 - DADOS UTILIZADOS.....	29
4.2.1 – <i>Seleção das estações pluviométricas</i> .....	29
4.2.2 – <i>Verificação e seleção dos dados</i> .....	31
4.3 - ESTIMATIVA DAS PRECIPITAÇÕES MÁXIMAS DIÁRIAS .....	32
4.4 - INTERPOLAÇÃO DOS DADOS DE CHUVA .....	33
4.4.1 – <i>IDW</i> .....	33
4.4.2 – <i>Spline de Tensão (Spline)</i> .....	34
4.4.3 – <i>Krigagem Ordinária (Krigagem)</i> .....	34
4.5 - AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DAS INTERPOLAÇÕES .....	34
4.6 - SOFTWARES UTILIZADOS .....	35
<b>5. RESULTADOS</b> .....	<b>36</b>
5.1 - ESTIMATIVA DAS PRECIPITAÇÕES MÁXIMAS DIÁRIAS .....	36
5.2 - COMPARAÇÃO ENTRE A METODOLOGIA UTILIZADA E CURVAS IDF DISPONÍVEIS PARA O DISTRITO FEDERAL .....	37
5.3 - OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS INTERPOLADORES.....	38

5.4 - INTERPOLAÇÃO DOS DADOS DE CHUVA – TR 2 ANOS .....	40
5.5 - INTERPOLAÇÃO DOS DADOS DE CHUVA – TR 5 ANOS .....	47
5.6 - INTERPOLAÇÃO DOS DADOS DE CHUVA – TR 10 ANOS .....	53
5.7 - INTERPOLAÇÃO DOS DADOS DE CHUVA – TR 25 ANOS .....	59
5.8 - INTERPOLAÇÃO DOS DADOS DE CHUVA – TR 50 ANOS .....	65
5.9 - INTERPOLAÇÃO DOS DADOS DE CHUVA – TR 100 ANOS .....	71
5.10 - ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS.....	77
<b>6. CONCLUSÃO .....</b>	<b>79</b>
<b>7. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>80</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A precipitação é um processo aleatório e sua previsão pode ser realizada com antecedência de somente poucos dias, e mesmo assim com margem de erro significativa. A sua previsão, na maioria dos problemas, é realizada com base na estatística de eventos passados. Na prática, o conhecimento estatístico das precipitações apresenta interesses de ordem técnica por sua frequente aplicação nos projetos associados a aproveitamentos de recursos hídricos. Os estudos estatísticos permitem verificar com que frequência as precipitações ocorreram com uma dada magnitude, estimando as probabilidades teóricas de ocorrência das mesmas.

A precipitação máxima é entendida como a ocorrência extrema, com duração, distribuição temporal e espacial crítica para uma área ou bacia hidrográfica. A precipitação pode atuar sobre a erosão do solo, inundações em áreas rurais e urbanas, obras hidráulicas, entre outros. O estudo das precipitações máximas é também um dos caminhos para se conhecer a vazão de enchente de uma bacia, uma vez que a disponibilidade de longas séries de dados de precipitação é em geral muito mais frequente que a de vazão (Tucci 2012).

As precipitações máximas são retratadas pontualmente pelas curvas de intensidade-duração-frequência (IDF), cuja determinação é deduzida das observações das chuvas intensas durante um período de tempo suficientemente longo e representativo dos eventos extremos do local. Os dados das observações são extraídos de pluviogramas.

A determinação da relação IDF apresenta grandes dificuldades em função da escassez e dos obstáculos para a obtenção de registros pluviográficos, da baixa densidade da rede de pluviógrafos e o pequeno período de observações disponível. Além disso, a metodologia para sua obtenção exige um exaustivo trabalho de tabulação, análise e interpretação de um grande número de pluviogramas. Por essa razão, poucos trabalhos no Brasil têm sido desenvolvidos com esta finalidade.

Existem também algumas metodologias desenvolvidas no Brasil para a obtenção de chuvas de menor duração a partir de dados pluviométricos, pois existe no território nacional uma vasta rede pluviométrica (Oliveira et al., 2005; Tucci 2012).

Mesmo determinando-se dados de precipitações máximas a partir de um pluviômetro, trata-se ainda uma informação pontual, que representa o local onde os dados foram obtidos. Para a obtenção de informações em locais onde não há disponibilidade de dados, é necessária a sua estimativa a partir da transferência ou interpolação de valores registrados na vizinhança, o que pode ser realizado por meio do uso de técnicas de Geoprocessamento.

O termo “Geoprocessamento” denota uma área do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica. As ferramentas computacionais para Geoprocessamento, chamadas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), permitem realizar análises complexas ao integrar dados de diversas fontes e ao criar bancos de dados georreferenciados, e tornam possível automatizar a produção de documentos cartográficos. Utilizando SIG pode-se processar informações espaciais por meio do uso de interpoladores, os quais permitem a espacialização de dados pontuais e consequente estimativa em locais distantes daqueles nos quais os dados foram coletados (Mesquita et al., 2009).

Existe grande quantidade de estudos sobre métodos de interpolação de dados de precipitação, sendo que a maioria interpolou valores médios de precipitação anual, sazonal ou mensal (Alves e Vecchia 2011; Borges et al., 2015; Costa et al., 2012b; Marcuzzo et al., 2011; Otieno et al., 2014; Viola et al., 2010).

Quanto às precipitações máximas, na ausência de pluviógrafos ou pluviômetros, diversos trabalhos sugerem a interpolação dos parâmetros das equações de chuvas intensas ou curvas IDF de estações meteorológicas adjacentes (Cecílio et al., 2009; Mello et al., 2003; Silva 1999 *apud* Mello et al., 2003).

Já alguns outros trabalhos estudaram a interpolação direta dos próprios dados da precipitação máxima com certa duração para determinado período de retorno (Costa et al., 2012a; Mesquita et al., 2009; Vieira et al., 1991 *apud* Mello et al., 2003).

Neste sentido, o presente trabalho avaliou três métodos de interpolação espacial para dados de precipitação máxima diária para períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos, em uma área do centro-oeste brasileiro que compreende a bacia hidrográfica do rio Descoberto, no Distrito Federal e estado de Goiás.

O trabalho utilizou dados de precipitação diária de 25 estações pluviométricas localizadas dentro da área de estudo.

Foram testados os métodos IDW, Spline de Tensão e Krigagem Ordinária, já utilizados em diversos estudos sobre interpolação de dados de precipitação (Alves e Vecchia 2011; Borges et al., 2015; Marcuzzo et al., 2011; Mello et al., 2003; Otieno et al., 2014; Viola et al., 2010). A avaliação dos métodos foi feita por meio de validação cruzada.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 - OBJETIVO GERAL**

O objetivo do trabalho é comparar o uso de três métodos diferentes para a interpolação espacial de dados de precipitação máxima diária para diferentes períodos de retorno, em uma área do centro-oeste brasileiro que compreende a bacia hidrográfica do rio Descoberto, no Distrito Federal e estado de Goiás.

### **2.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Interpolação dos valores de precipitação máxima diária pelos métodos IDW, Spline de Tensão e Krigagem Ordinária para períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos, na área de estudo.
- Geração de mapas de distribuição espacial da precipitação máxima diária na área de estudo;
- Avaliação dos métodos de interpolação utilizados por meio de validação cruzada.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 - PRECIPITAÇÃO

Entende-se por precipitação toda água proveniente do meio atmosférico que atinge a superfície terrestre. As diferentes formas de precipitação se diferenciam pelo estado em que a água se encontra: neblina, chuva, granizo, orvalho, geada e neve, por exemplo.

As principais formas de precipitação são chuva e neve. Como a ocorrência de neve é incomum no Brasil, a chuva é tratada como o tipo de precipitação mais importante, principalmente pela sua capacidade de gerar escoamento (Pinto et al., 1976; Tucci 2012; Viessman e Lewis 2003).

##### 3.1.1 – Formação das precipitações

Segundo Tucci (2012) o vapor de água contido na atmosfera constitui um reservatório potencial de água que, ao condensar-se, possibilita a ocorrência de precipitações. A origem das precipitações está ligada ao crescimento das gotículas das nuvens, que ocorre quando certas condições forem reunidas.

A ascensão das massas de ar, que pode ocorrer devido convecção térmica, relevo ou ação frontal de massas, provoca um resfriamento do ar que possibilita fazê-lo atingir seu ponto de saturação. Seguirá então a condensação do vapor de água em forma de minúsculas gotas que se mantêm em suspensão como nuvens ou nevoeiros.

Para ocorrer a precipitação, é necessário então que essas gotas cresçam a partir de núcleos, que podem ser gelo, poeira ou outras partículas, até atingirem o peso suficiente para vencerem as forças de sustentação e caírem (Pinto et al., 1976).

##### 3.1.2 – Tipos de precipitação

As precipitações são classificadas conforme o mecanismo responsável pela ascensão da massa de ar:

- a) **Frontais ou ciclônicas:** ocorrem por meio da interação de massas de ar quentes e frias, quando o ar mais quente e úmido é violentamente impulsionado para cima, resultando no seu resfriamento e na condensação do vapor de água,

produzindo então chuvas. São chuvas de grande duração, atingindo grandes áreas e com intensidade média.

- b) **Orográficas:** ocorrem quando o ar é forçado a transpor barreiras de montanhas. Ventos quentes e úmidos soprados geralmente do oceano para o continente, ao encontrarem uma barreira montanhosa, elevam-se e se resfriam adiabaticamente, resultando na condensação do vapor, formação de nuvens e precipitação. São chuvas de pequena intensidade e de grande duração.
- c) **Convectivas:** provocadas pela ascensão de ar úmido aquecido próximo ao solo que tem seu equilíbrio com as camadas de ar vizinhas perturbado. Com a brusca ascensão do ar menos denso, este atinge seu nível de condensação com formação de nuvens e muitas vezes precipitações. São características de regiões equatoriais e podem ocorrer nas regiões temperadas por ocasião do verão. Geralmente são chuvas de grande intensidade e pequena duração, restritas a áreas pequenas. Podem provocar inundações em pequenas bacias (Pinto et al., 1976; Tucci 2012).

### 3.1.3 – Pluviometria

De acordo com Tucci (2012) as grandezas que caracterizam uma chuva são:

- a) **Altura pluviométrica (P):** espessura média da lâmina de água precipitada que recobriria a região atingida. A unidade de medição é o milímetro de chuva (mm), definido como a quantidade de precipitação correspondente ao volume de 1 litro por metro quadrado de superfície.
- b) **Duração (t):** período de tempo durante o qual a chuva cai. Normalmente são utilizadas as unidades de minuto ou hora.
- c) **Intensidade (i):** precipitação por unidade de tempo, obtida pela relação  $i = P/t$ , e expressa normalmente em mm/h ou mm/min.
- d) **Tempo de recorrência ou período de retorno (Tr):** a precipitação é um fenômeno de tipo aleatório. Na análise das alturas pluviométricas (ou intensidades) máximas, o Tr é interpretado como o número médio de anos durante o qual espera-se que a precipitação analisada seja igualada ou superada. O seu inverso é a probabilidade de um fenômeno igual ou superior ao analisado ocorrer em um ano qualquer.

## 3.2 - ANÁLISE DE FREQUÊNCIA EM HIDROLOGIA

Os fenômenos hidrológicos naturais não podem ser reproduzidos na escala em que ocorrem. No campo da estatística, os dados observados de determinado processo hidrológico são reunidos formando uma amostra. Esta amostra é submetida à análise estatística visando à definição de probabilidades de certos eventos. Já no campo da teoria das probabilidades, em paralelo, são desenvolvidos modelos teóricos de probabilidades para processos hipotéticos que tem determinadas características. Comparando as características do processo teórico com o processo natural é possível então selecionar alguns modelos probabilísticos para ajustar esse processo (Tucci 2012).

A frequência de um evento hidrológico é a probabilidade de que um valor de uma variável discreta ocorra ou que um valor de uma variável contínua seja igualado ou excedido em um ano qualquer. A frequência é a probabilidade, e não tem unidade de medida. Já o inverso da frequência, que é o período de retorno, é medido em anos (Viessman e Lewis 2003).

De acordo com Naghettini e Pinto (2007), existe um conjunto não muito extenso de funções de distribuição de probabilidades que podem ser empregadas para a modelação de eventos máximos anuais de variáveis hidrológicas e hidrometeorológicas. Dentro desse conjunto, o autor cita as distribuições oriundas da teoria clássica de valores, que são Gumbel, Fréchet, Weibull e a Generalizada de Valores Extremos (GEV), e aquelas ditas não-extremais, dentre as quais as de maior uso são as distribuições Exponencial e sua forma mais geral, que é a Generalizada de Pareto, Pearson III, Log-Pearson III e Log-Normal de 2 parâmetros.

### 3.2.1 – Distribuição de Gumbel (Máximos)

A distribuição de valores extremos do Tipo I é também denominada distribuição de Gumbel, Fisher-Tippet tipo I e dupla exponencial.

A distribuição de Gumbel (máximos) é a distribuição extremal mais usada na análise de frequência de variáveis hidrológicas, com inúmeras aplicações na determinação de relações intensidade-duração-frequência de precipitações intensas e estudos de vazões de enchentes (Naghettini e Pinto 2007).

A função de probabilidades acumuladas da distribuição de Gumbel e dada por:

$$F(x) = 1 - \exp\left\{-\exp\left[-\frac{x - \mu}{\sigma}\right]\right\}, \text{ para } -\infty \leq x \leq \infty \quad (1)$$

Onde  $\alpha$  representa o parâmetro de escala e  $\beta$  o parâmetro de posição.

O valor esperado (média) e a variância são:

$$\mu = \frac{1}{\alpha} \left( \beta + \frac{1}{\alpha} \right) \quad (2)$$

$$\sigma^2 = \frac{6}{\alpha^2} \quad (3)$$

A função inversa da função de probabilidades acumuladas de Gumbel, na qual T denota o período de retorno em anos e F representa a probabilidade anual de não superação é expressa por (Naghetini e Pinto 2007; Viessman e Lewis 2003):

$$T = \frac{1}{\alpha} \left( \beta + \frac{1}{\alpha} \right) \ln \left( \frac{1}{1 - F} \right) \quad (4)$$

### 3.3 - MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO ESPACIAL

Existem dois grupos principais de técnicas de interpolação espacial: determinísticos e geoestatísticos. Métodos de interpolação determinísticos criam superfícies a partir de medições pontuais, com base no grau de similaridade (método IDW, por exemplo) ou no grau de suavização (método Spline). Já os métodos de interpolação geoestatísticos (Krigagem, por exemplo) utilizam as propriedades estatísticas das medições pontuais. Os métodos geoestatísticos quantificam a autocorrelação espacial entre os pontos medidos e representam a configuração espacial dos pontos amostrados ao redor do local a ser estimado.

Métodos de interpolação podem forçar a superfície resultante a passar pelos valores das medições ou não. Um método que estima valor idêntico ao medido no ponto de amostragem é chamado interpolador exato. Um interpolador inexato estima um valor diferente do medido (Johnston et al., 2003).

No presente trabalho serão usados dois métodos determinísticos, o *Inverse Distance Weighted* (IDW) e o Spline, e um método geoestatístico, a Krigagem. O trabalho não objetiva discutir as equações e algoritmos matemáticos dos métodos, mas sim sua aplicação prática.

Os métodos IDW e Spline são interpoladores exatos.

No método da Krigagem, quando se tem múltiplas medições por local e se usa estes diferentes dados na interpolação, o interpolador será inexato. Já no caso de somente uma medição por local, a Krigagem funciona como um interpolador exato (Johnston et al., 2003).

### **3.3.1 – *Inverse Distance Weighted* - IDW**

A interpolação por IDW determina os valores dos pontos usando uma combinação linear ponderada dos pontos amostrados. O peso de cada ponto é o inverso de uma função da distância.

É utilizado um parâmetro de potência que influencia no peso da localização do valor medido no valor estimado de um ponto, ou seja, com o aumento da distância entre os pontos de medição e o ponto a ser estimado, o peso (ou influência) que o ponto medido terá na estimativa diminuirá exponencialmente. Desta forma, parâmetros de potência maiores enfatizam pontos mais próximos, tornando o resultado menos suave, e parâmetros de potência menores enfatizam pontos mais distantes, tornando o resultado mais suave (Johnston et al., 2003; Marcuzzo et al., 2011).

A ferramenta *ArcGIS Geostatistical Analyst* permite determinar um valor ótimo para o parâmetro de potência por meio da minimização do erro das estimativas, que é calculado por um processo de validação cruzada.

### **3.3.2 – Spline**

O método Spline pertence ao grupo dos métodos de função de base radial, que são conceitualmente similares a ajustar uma membrana de borracha através dos valores medidos e ao mesmo tempo minimizar a curvatura total da superfície.

O Spline é um método de interpolação que estima valores usando uma combinação de funções que minimiza a curvatura da superfície resultando em uma superfície suave que passa exatamente pelos pontos de entrada (pontos de medição). Diferente do IDW, o Spline pode estimar valores acima do máximo e abaixo do mínimo medidos (Borges et al., 2015; Johnston et al., 2003; Marcuzzo et al., 2011).

### **3.3.3 – Krigagem**

A Krigagem é um método geoestatístico baseado na ideia de que valores medidos em locais próximos tendem a ser estatisticamente mais relacionados do que valores medidos em outros locais. A krigagem depende das relações espaciais e estatísticas para estimar pontos não medidos.

O método é dividido em duas tarefas distintas: quantificar a estrutura espacial dos dados e produzir uma estimativa. Quantificar a estrutura é quando se ajusta um modelo de dependência espacial aos dados. Para fazer a estimativa do valor para um local sem medição, a krigagem usa o modelo ajustado, a configuração espacial dos dados, e os valores dos pontos amostrados ao redor do local a ser estimado.

A variação espacial no método da Krigagem é quantificada por um semivariograma. O semivariograma é um gráfico de dispersão da semivariância versus distância dos pontos amostrados, sendo que a semivariância é uma medida de dispersão, a metade da variância. O semivariograma serve para analisar a dependência espacial entre as amostras, e é calculado a partir dos pontos amostrados. Supõe-se que pares que estão mais próximos diferem menos do que os que estão distantes uns dos outros (Borges et al., 2015; Johnston et al., 2003; Marcuzzo et al., 2011).

Para se determinar os pesos dos pontos amostrados é necessário ajustar o semivariograma usando um modelo que depende do problema. De acordo com Viola et al. (2010) os modelos de semivariograma mais frequentes em estudos sobre a continuidade espacial da precipitação são o esférico e o exponencial, e o modelo a ser aplicado deve ser escolhido com base no erro médio produzido pela validação cruzada. Johnston et al. (2003) também se refere aos modelos esférico e exponencial como comumente utilizados.

### **3.3.4 – Validação Cruzada**

Antes de produzir mapas de distribuição espacial, a precisão das estimativas feitas pelo método de interpolação deve ser avaliada. A validação cruzada pode auxiliar na decisão de qual modelo fornece as melhores previsões. As estatísticas calculadas fornecem um diagnóstico para saber se o modelo e/ou seus valores de parâmetros associados são razoáveis.

De acordo com Borges et al. (2015), a validação cruzada é provavelmente o método mais aplicado na climatologia.

Na validação cruzada, um ponto com dado de medição é deixado de fora da amostra de dados, enquanto todos os outros pontos com medição são utilizados para estimar o valor para o ponto de interesse excluído. Este procedimento é repetido até que um valor é calculado para cada ponto de dados originais. Desta forma, é feita uma comparação entre valores medido e estimado para todos os pontos (Borges et al., 2015; Johnston et al., 2003).

A ferramenta *ArcGIS Geostatistical Analyst* possibilita realizar a validação cruzada para avaliação das interpolações realizadas pelos diferentes métodos.

### 3.4 - CURVAS IDF PARA O DISTRITO FEDERAL

O Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal – PDDU/DF (GDF 2009) apresenta algumas relações intensidade-duração-frequência (IDF) para o Distrito Federal.

A curva IDF apresentada por Pfafstetter (1957) *apud* GDF (2009) se baseia em dados coletados na cidade de Formosa – GO:

$$P = \frac{P_{max}}{1 + \frac{t}{a}} \left( \frac{R}{b} \right)^{\frac{1}{c}} \quad (5)$$

Onde  $P$  é a precipitação máxima em mm,  $t$  a duração da precipitação em horas,  $a$ ,  $b$  e  $c$  constantes definidas para cada posto e  $R$  um fator de probabilidade, definido como:

$$R = \frac{1}{1 - \frac{1}{Tr}^{\alpha}} \quad (6)$$

Onde  $Tr$  é o tempo de retorno em anos,  $\alpha$  e  $\beta$  valores que dependem da duração da precipitação e  $\gamma$  uma constante cujo valor adotado para todos os postos é igual a 0,25.

A Tabela 1 apresenta os valores de  $\alpha$  e  $\beta$  em função da duração da precipitação, o valor adotado para  $\gamma$ , e os valores de  $a$ ,  $b$  e  $c$  correspondentes ao DF.

Tabela 1 – Parâmetros da equação de Pfafstetter (1957) para o Distrito Federal

Duração (min)	$\alpha$	$\gamma$	$\beta$	$a$	$b$	$c$
5	0,108	0,25	0,08	0,5	27	20
15	0,122	0,25	0,08	0,5	27	20
30	0,138	0,25	0,08	0,5	27	20
45	0,147	0,25	0,04	0,5	27	20
60	0,156	0,25	0,04	0,5	27	20
120	0,166	0,25	0,04	0,5	27	20
240	0,174	0,25	0,04	0,5	27	20
480	0,176	0,25	0,04	0,5	27	20
840	0,174	0,25	0,04	0,5	27	20
1440	0,170	0,25	0,04	0,5	27	20

Fonte: PDDU/DF (GDF 2009)

A Companhia Urbanizadora da Nova Capital do Brasil – NOVACAP recomenda a curva IDF expressa pela seguinte equação:

$$I = \frac{21,7 \cdot \text{mm} \cdot \text{min}}{(T_r + 11)} \quad (7)$$

Onde  $I$  é a intensidade em mm/min,  $T_r$  o tempo de retorno em anos e  $t$  a duração da chuva em minutos.

TCBR (2008) *apud* GDF (2009) construiu uma curva IDF com base no trabalho de Pfafstetter (1957) e utilizando dados de pluviômetros para espacializar as relações de forma a regionalizar os parâmetros. A equação resultante é:

$$I = \frac{0,16 \cdot \text{mm} \cdot \text{min}}{(T_r + 8)} \quad (8)$$

Onde  $I$  é a intensidade de precipitação em mm/min,  $T_r$  o tempo de retorno em anos,  $t$  a duração em minutos, e  $G$  um parâmetro que representa a chuva diária de 2 anos de tempo de retorno, obtido de um mapa como o apresentado na Figura 1, que compreende o Distrito Federal.

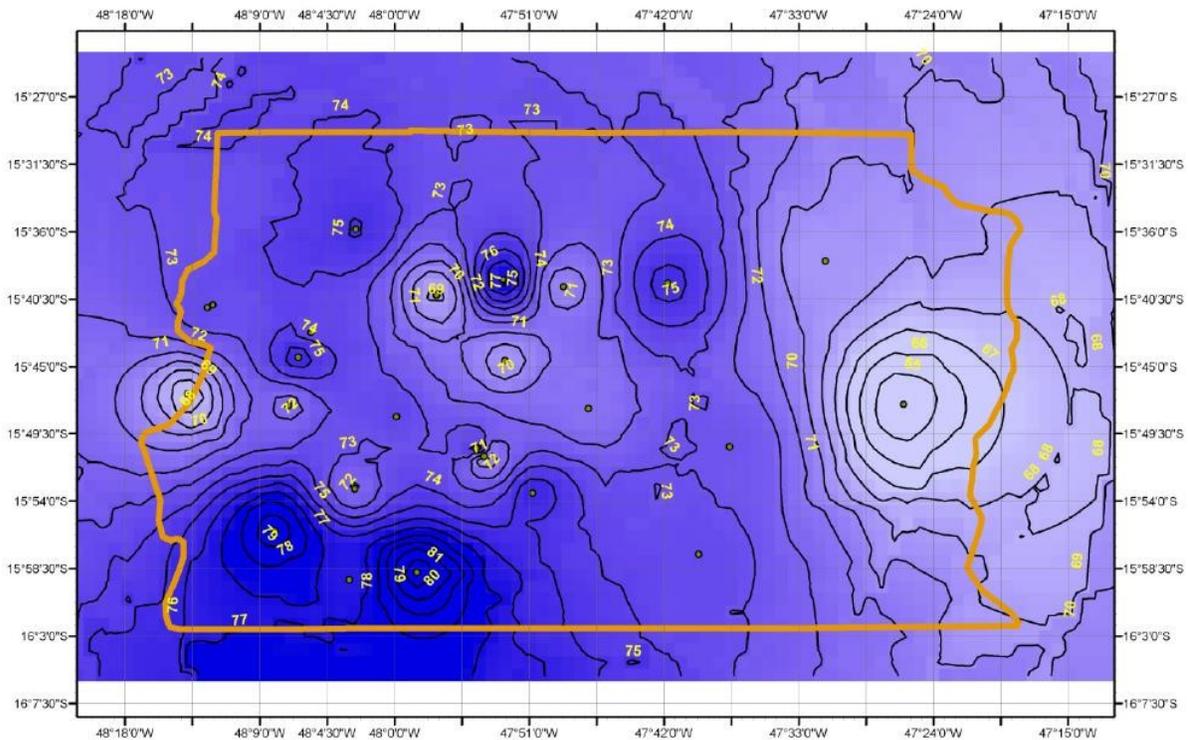


Figura 1 – Mapa para obtenção do parâmetro  $G$  da equação IDF apresentada por TCBR 2008 (Fonte: PDDU/DF)

Na elaboração do PDDU/DF foi construída uma nova curva IDF para o Distrito Federal, a partir de dados do pluviógrafo do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (Estação Brasília – Código 1547004). A equação resultante é:

$$I = \frac{1574,70 \cdot Tr^{0,074}}{(t + 11)^{0,074}} \quad (9)$$

Onde  $I$  é a intensidade em mm/h,  $Tr$  o tempo de retorno em anos e  $t$  a duração da chuva em minutos.

### 3.5 - TRABALHOS RELACIONADOS AO ASSUNTO

Borges et al. (2015) comparou métodos de interpolação espacial para estimar a distribuição da precipitação anual e sazonal no Distrito Federal. Foram encontrados menores erros e maiores coeficientes de correlação e de Nash-Sutcliffe nos métodos IDW, Krigagem Ordinária, e nas interpolações residuais, nas quais foram feitas combinações de regressão múltipla linear com IDW, e regressão múltipla linear com Krigagem Ordinária. O autor afirma ainda que em geral os métodos de interpolação fornecem distribuições espaciais similares da precipitação em qualquer rede de observação densa.

Alves e Vecchia (2011) avaliou diferentes métodos de interpolação (IDW, Krigagem, Spline, Triangulação) para a distribuição da precipitação anual do estado de Goiás utilizando informações de 70 postos pluviométricos. O melhor resultado foi apresentado pelo método Spline, seguido pelo IDW.

Marcuzzo et al. (2011) estudou métodos de interpolação (IDW, Krigagem, Spline de Tensão, Topo-to-Raster) para a espacialização da precipitação sazonal no estado do Mato Grosso, a partir de uma série histórica de 30 anos de dados de 76 estações pluviométricas. O estudo concluiu que para o estado do Mato Grosso, os melhores resultados foram obtidos através do método de interpolação Topo-to-Raster.

Costa et al. (2012b) apresentou um estudo da sazonalidade, distribuição espacial total e mensal da precipitação pluviométrica do estado de Goiás e do Distrito Federal. Foram utilizados dados da série histórica de 1974 a 2008 de um total de 107 estações pluviométricas. O estudo apresentou mapas com a distribuição espacial e temporal, total e sazonal das chuvas. Foi utilizado o método Topo-to-Raster para espacializar os dados de chuva.

Mello et al. (2003) utilizou a Krigagem e o Inverso do Quadrado da Distância (IDW) para a interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas no estado de São Paulo. Foram utilizadas 140 estações meteorológicas que dispõem da respectiva equação de chuvas intensas estimada com base em dados pluviométricos. Constatou-se que ambos os métodos apresentaram boa precisão, mas a Krigagem produziu menores erros médios, verificando-se melhorias consideráveis em especial para tempos de retorno e tempos de duração da precipitação usuais em projetos em pequenas bacias hidrográficas.

Costa et al. (2012a) propôs a geração de uma superfície interpolada pelo método da Krigagem com os valores de precipitação máxima média para a Bacia Hidrográfica do Rio Doce, com período de retorno variando em 10, 25 e 50 anos e duração de precipitação definida em 30 minutos. Variações de 4,5% a 33,6% entre os parâmetros da validação cruzada indicaram decaimento da precisão do ajuste com o aumento dos períodos de retorno.

Mesquita et al. (2009) determinou a precipitação máxima esperada para diferentes períodos de retorno para as regiões central e sudeste do estado de Goiás por meio da metodologia de Kimball. Foram utilizados dados diários de precipitação de 36 estações pluviométricas. A diferença entre valores extremos de precipitações máximas para um mesmo TR ultrapassaram em 50% a menor intensidade, evidenciando a necessidade do conhecimento da precipitação máxima local para o dimensionamento de obras hidráulicas.

Cecílio et al. (2009) avaliou metodologias para a interpolação dos parâmetros das equações de chuvas intensas no estado do Espírito Santo. O estudo utilizou o método IDW, avaliando o uso de quatro diferentes expoentes da distância (2, 3, 4 e 5). O melhor desempenho para a espacialização dos parâmetros foi obtido com o expoente 5.

Otieno et al. (2014) avaliou, por meio de validação cruzada, quatro métodos de interpolação (Polígonos de Thiessen, IDW, Thinplate, Krigagem) de dados de precipitação mensal em uma bacia experimental em South West England com 3 densidades de estações diferentes. A densidade de estações teve efeito na acurácia dos resultados das interpolações, uma vez que houve uma melhora gradual nos resultados juntamente com o aumento da densidade. Os resultados mostraram também que os métodos IDW e Krigagem foram os melhores nas 3 densidades de estações.

Bega et al. (2005), em um estudo sobre variabilidade espacial de precipitações diárias em Pindorama – SP, concluiu que à medida que a distância entre os pluviômetros aumentou, o coeficiente de correlação dos dados de chuvas por eles medidos diminuiu, revelando que a precipitação pluvial depende das posições onde se localizam os pluviômetros. As médias diárias

mostraram que pluviômetros próximos, porém sob maiores variações de altitude, possuem diferenças superiores a pluviômetros mais distantes, mas sob altitudes similares.

Gervais et al. (2014) observou que à medida que a densidade de estações diminui, a influência de estações mais distantes do ponto analisado aumenta e, portanto, se as distribuições são não homogêneas no espaço, o ponto analisado é influenciado por estações com distribuição de precipitação muito diferentes.

Hofstra et al. (2008), em um estudo que comparou 6 métodos para a interpolação de dados climáticos diários na Europa, encontrou que o principal fator de influência na habilidade de interpolar padrões espaciais é a densidade de estações, tendo a topografia como um fator complementar. De acordo com o estudo, os métodos apresentam habilidade para interpolar eventos extremos inferior do que para médias.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 - ÁREA DE ESTUDO

Foi definida como área de estudo a bacia hidrográfica do rio Descoberto (BHRD). Diante do fato de que dentro desta bacia há poucas estações pluviométricas com dados suficientes para a utilização neste trabalho, que por sua vez estão concentradas somente em parte da bacia, foram pesquisadas as estações existentes dentro de um raio de 35 km a partir do limite da BHRD.

Identificadas estas estações pluviométricas, foi definida então a área a ser utilizada neste trabalho, que toma como limites as estações mais distantes a norte, sul, leste e oeste.

A área de estudo possui 5.982 Km<sup>2</sup>, está situada no Planalto Central Brasileiro e no bioma do Cerrado, abrange a porção oeste do Distrito Federal (DF) e pequena parte do estado de Goiás (GO), e compreende toda a bacia hidrográfica do rio Descoberto (Figura 2).

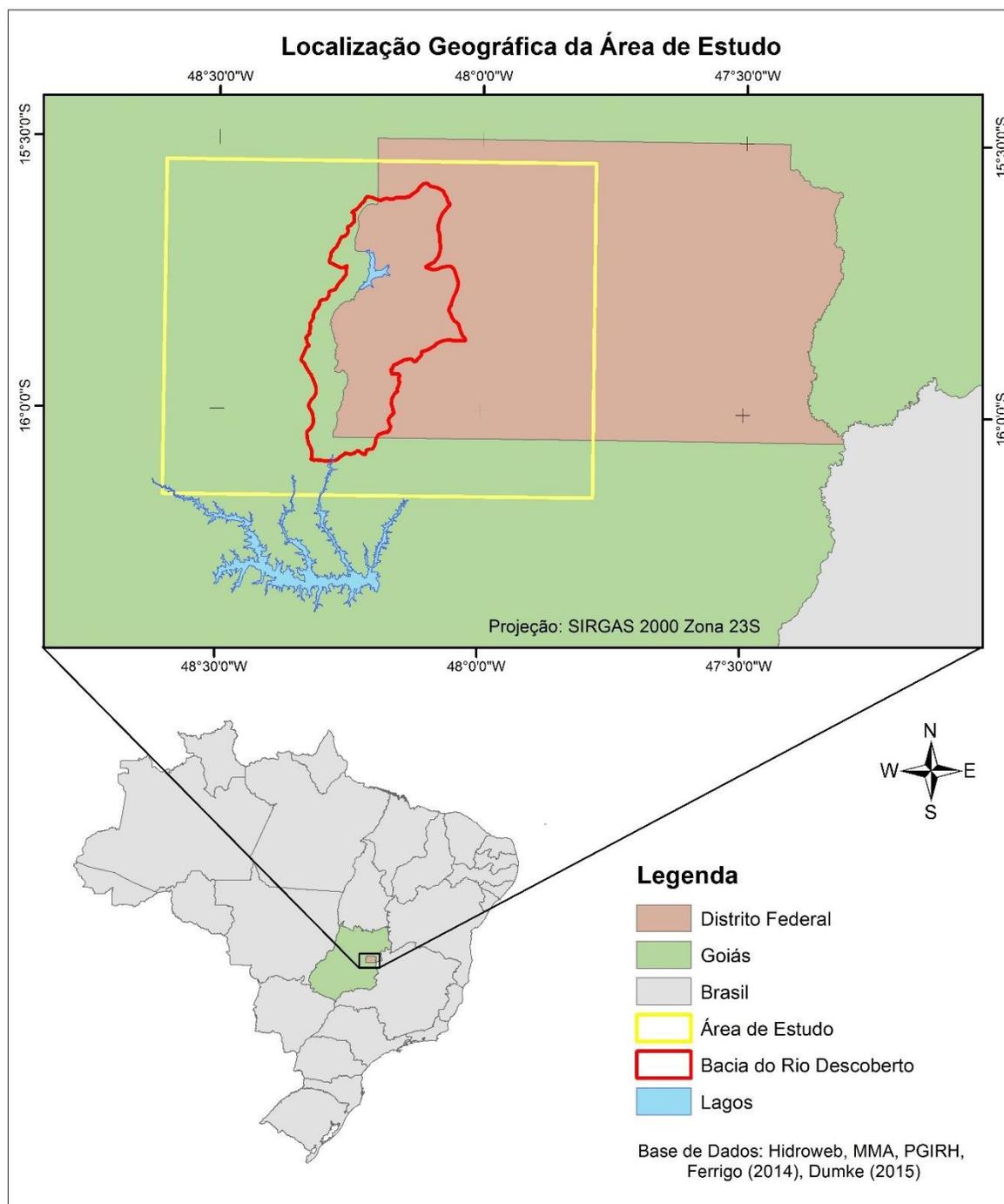


Figura 2 – Localização da área de estudo

#### 4.1.1 - Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto (BHRD)

A bacia hidrográfica do rio Descoberto está incluída na região hidrográfica do Paraná.

A BHRD possui uma área de 1.098 km<sup>2</sup> que compreende parte do Distrito Federal e parte do estado de Goiás. Ela está relacionada a dois importantes lagos: o lago Descoberto,

dentro da própria BHRD; e o lago Corumbá IV, que tem o rio Descoberto como um de seus afluentes.

De acordo com o Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos do Distrito Federal – PGIRH/DF (GDF 2005), a BHRD contém o principal manancial de abastecimento público (lago Descoberto), vários núcleos urbanos em desenvolvimento (Brazlândia, Ceilândia e Taguatinga) e vocação agrícola e de agroturismo na área rural. Nas áreas a montante do lago, verificam-se conflitos de uso entre as zonas urbanas (demandas para abastecimento público) e rurais (demandas para irrigação). A jusante da barragem, o lançamento de esgotos sem tratamento nos afluentes do rio Descoberto tem gerado conflitos face às interferências nos padrões de qualidade das águas. O tratamento dos esgotos dos núcleos urbanos da região é prioritário, pois as águas poluídas afluem ao lago Corumbá IV, destinado à geração de energia elétrica, mas com potencial para abastecimento público do Distrito Federal.

O lago Descoberto, formado pela barragem inaugurada em 1974, está localizado entre o Distrito Federal e o município de Águas Lindas de Goiás – GO, e é o manancial que abastece o principal sistema de produção de água para abastecimento público do DF, responsável por aproximadamente 65% da água distribuída (CAESB 2016).

A porção da BHRD a montante do lago Descoberto está incluída na Área de Proteção Ambiental da bacia do rio Descoberto (APA do Descoberto), que abrange 391 km<sup>2</sup> com a finalidade de assegurar condições ecológicas satisfatórias aos mananciais, e no Projeto Integrado de Colonização Alexandre de Gusmão (PICAG), que foi implantado com o objetivo da fixação de agricultores e hoje é responsável pela produção de cerca de 40% dos produtos hortifrutigranjeiros consumidos no Distrito Federal. Existem dentro da bacia ainda três áreas da Floresta Nacional de Brasília (FLONA de Brasília) somando 83,5 km<sup>2</sup>, que foram criadas com o objetivo de constituir um cinturão verde que assegurasse a preservação dos mananciais (Ferrigo 2014).

O lago Corumbá IV não está dentro da área de estudo, porém o rio Descoberto é um de seus afluentes. Portanto, um dos braços do lago começa no exutório da BHRD.

A Usina Hidrelétrica – UHE Corumbá IV é um projeto realizado e gerenciado pela Corumbá Concessões S/A, e foi inaugurada em 04 de abril de 2006. Possui capacidade instalada de 129,6 Megawatts (MW) médios, potencial que garante energia para cerca de 250 mil habitantes do Distrito Federal (DF).

O empreendimento está localizado no rio Corumbá, próximo ao município de Luziânia (GO). O reservatório tem uma área de 173 km<sup>2</sup> e abrange os municípios de Luziânia, Alexânia, Abadiânia, Corumbá de Goiás, Silvânia, Santo Antônio do Descoberto e Novo Gama.

O reservatório da UHE Corumbá IV é de uso múltiplo, podendo ser aproveitado para várias atividades, dentre elas, o turismo e o fornecimento de água para consumo humano (Corumbá Concessões S. A. 2016).

#### **4.1.2 – Clima**

De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima da região é tropical de altitude do tipo Cwa.

A Região Centro-Oeste sofre influência tanto de sistemas tropicais como de latitudes médias, com estação seca bem definida no inverno e estação chuvosa de verão com chuvas convectivas (CPTEC 2016).

A estação chuvosa se inicia em outubro e termina em abril, representando cerca de 90% do total precipitado no ano. O trimestre mais chuvoso é o de novembro a janeiro. A estação seca vai de maio a setembro, sendo o trimestre de junho a agosto o mais seco, responsável por somente cerca de 2% do total anual precipitado (GDF 2012).

## **4.2 - DADOS UTILIZADOS**

Neste estudo foram utilizados dados de precipitação disponibilizados pela Agência Nacional de Águas – ANA por meio do sistema HIDROWEB.

### **4.2.1 – Seleção das estações pluviométricas**

Foram selecionadas as estações pluviométricas, dentro da área de estudo, que possuíam no mínimo 10 anos de dados diários de precipitação.

Desta forma, o estudo compreendeu um total de 25 estações pluviométricas distribuídas em uma área total de 5.982 Km<sup>2</sup>. A Figura 3 mostra a área de estudo e as estações pluviométricas utilizadas.

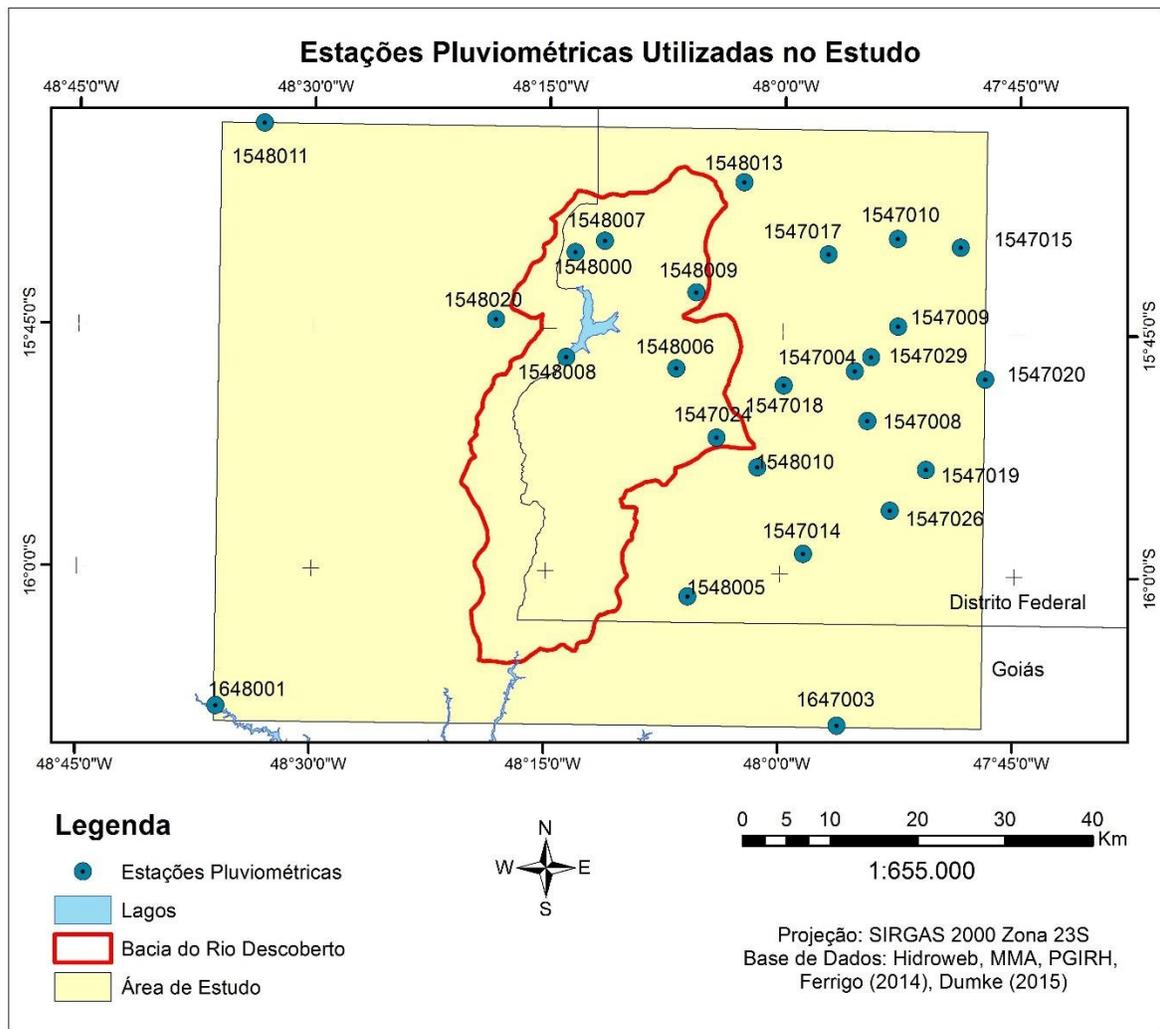


Figura 3 – Estações pluviométricas utilizadas no estudo

A Tabela 2 apresenta as estações pluviométricas utilizadas no trabalho com respectivos nomes e coordenadas geográficas.

Tabela 2 – Estações pluviométricas utilizadas no estudo

<b>Código</b>	<b>Nome</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>
1547004	BRASÍLIA	-15.79000	-47.92278
1547008	ETE SUL	-15.84139	-47.90861
1547009	ETE NORTE	-15.74333	-47.87722
1547010	CONTAGEM	-15.65306	-47.87889
1547014	ÁREA ALFA	-15.97917	-47.97500
1547015	ETE - SOBRADINHO	-15.66111	-47.81167
1547017	SANTA MARIA	-15.67000	-47.95250
1547018	JOCKEY CLUB	-15.80583	-47.99806
1547019	ETA CABEÇA DE VEADO	-15.89083	-47.84556
1547020	ETE PARANOÁ	-15.79667	-47.78361
1547024	BRASÍLIA SUL - SE	-15.86056	-48.06889
1547026	RONCADOR	-15.93333	-47.88333
1547029	CAESB-HIDROLOGIA	-15.77556	-47.90556
1548000	BRAZLÂNDIA (QUADRA 18)	-15.67111	-48.22194
1548005	GAMA ETE ALAGADO	-16.02472	-48.09778
1548006	TAGUATINGA - ETA RD	-15.78972	-48.11278
1548007	ETA - BRAZLÂNDIA	-15.65917	-48.19056
1548008	DESCOBERTO	-15.77944	-48.23028
1548009	JATOBAZINHO	-15.71111	-48.09250
1548010	ETE RIACHO FUNDO-GM-3	-15.89056	-48.02500
1548011	FAZENDA MARAJÁ	-15.54139	-48.55417
1548013	FAZENDA SANTA ELISA	-15.59667	-48.04306
1548020	ÁGUAS LINDAS	-15.74139	-48.30556
1647003	MINGONE	-16.15583	-47.93667
1648001	PONTE ANÁPOLIS - BRASÍLIA	-16.14306	-48.60000

#### 4.2.2 – Verificação e seleção dos dados

Após a obtenção dos dados, foi feita uma verificação da consistência dos mesmos.

Observou-se a existência de dias, ou até períodos maiores que um mês sem dados de precipitação.

Desta forma, utilizou-se como critério neste trabalho excluir das séries de dados qualquer ano que tivesse um mês com mais de 4 dias sem medição da precipitação, ou um total de 15 dias sem medição no ano.

Após exclusão dos anos dentro destes critérios estabelecidos, foram então selecionados os dados a serem utilizados no trabalho. A Figura 4 apresenta o número de anos com dados efetivamente utilizados em cada estação pluviométrica.

É importante salientar que este critério utilizado, aparentemente conservador, não diminuiu muito o número de anos disponíveis para o estudo. As estações que aparecem na Figura 4 com poucos anos utilizados realmente tiveram um período de medição menor que a

maioria. O número máximo de anos excluídos de uma série foi 7, que ocorreu em somente duas estações com 30 ou mais anos de medição. Em metade das estações não houve a exclusão de sequer um ano.

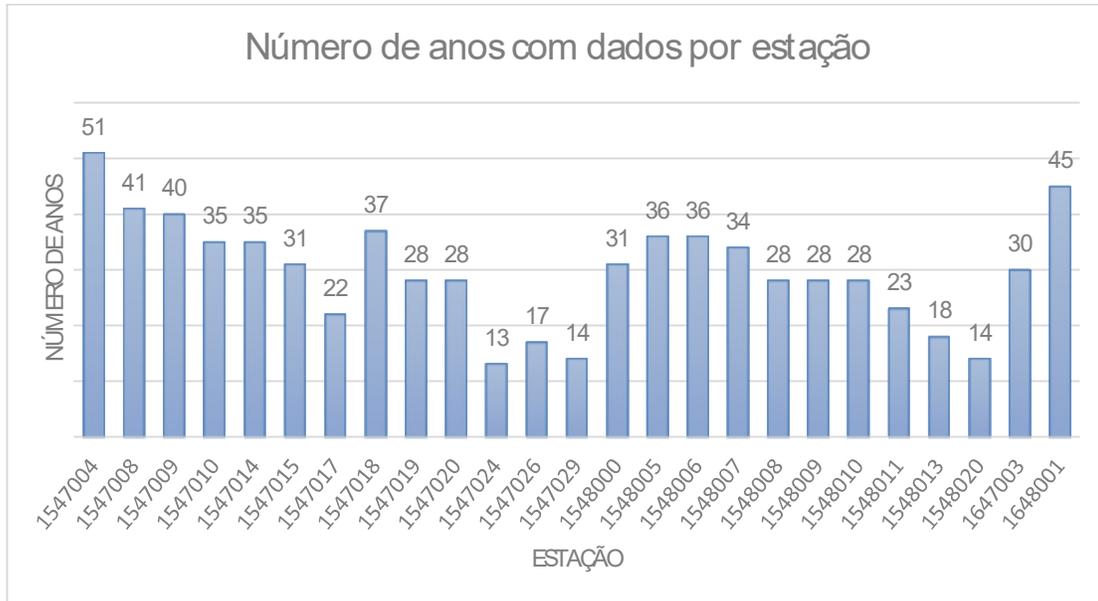


Figura 4 - Número de anos com dados utilizados no estudo, por estação pluviométrica

#### 4.3 - ESTIMATIVA DAS PRECIPITAÇÕES MÁXIMAS DIÁRIAS

A partir dos dados devidamente selecionados e consolidados, foram construídas séries anuais com a precipitação máxima diária de cada ano para cada estação.

Utilizou-se então o método da Distribuição de Gumbel para calcular as precipitações máximas diárias para os períodos de retorno ( $Tr$ ) de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos em cada estação, a partir das séries anuais:

$$P = \eta \left[ 1 - \exp\left(-\left(\frac{P}{\eta}\right)^\alpha\right)\right] \quad (10)$$

Onde  $P$  é a altura pluviométrica associada a um período de retorno  $Tr$  em mm, e  $\alpha$  e  $\beta$  os parâmetros da distribuição de Gumbel.

Os parâmetros foram obtidos pelo método dos momentos:

$$\bar{P} = \eta \cdot 0,5772 \cdot \alpha \quad (11)$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (12)$$

Onde  $\bar{x}$  é a média dos valores máximos anuais e  $\hat{\sigma}^2$  a sua variância.

A partir dos valores da média e da variância dos dados da série anual, utilizando-se as Equações (11) e (12), encontrou-se os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$ .

Estas precipitações máximas diárias calculadas para cada estação a partir dos dados pluviométricos foram denominadas como “dados medidos” nas etapas posteriores deste trabalho, para efeito de comparação com os “dados estimados” a serem obtidos pelos métodos de interpolação.

Importante ressaltar que foram calculadas as precipitações máximas de um dia, que não devem ser confundidas com as precipitações máximas de 24 horas.

As leituras nos pluviômetros são realizadas sempre no mesmo horário, uma vez por dia, de forma que a precipitação diária corresponde ao total de chuva acumulado diariamente até este horário. Já as precipitações de 24 horas são registradas continuamente a partir de qualquer instante com o uso do pluviógrafo.

#### 4.4 - INTERPOLAÇÃO DOS DADOS DE CHUVA

Os dados de precipitações máximas diárias foram utilizados para realizar interpolações e gerar mapas para a área de estudo, para cada período de retorno.

No presente trabalho foram usados três métodos de interpolação distintos: dois métodos determinísticos, IDW e Spline de Tensão, e um método geoestatístico, a Krigagem Ordinária.

##### 4.4.1 – IDW

O parâmetro de potência ótimo foi determinado para cada interpolação por meio da ferramenta *ArcGIS Geostatistical Analyst*, que utiliza um procedimento de validação cruzada para encontrar o parâmetro que resulta no menor erro das estimativas.

#### 4.4.2 – Spline de Tensão (Spline)

A ferramenta *ArcGIS Geostatistical Analyst* disponibiliza diversos métodos de interpolação Spline, como thin-plate spline, spline com tensão, spline completamente regularizada, função multiquadrática e spline multiquadrática inversa. Estes diversos métodos foram testados previamente, e observou-se uma performance um pouco melhor no Spline de Tensão. Este método também foi utilizado em outros estudos sobre interpolação de dados de chuva (Borges et al., 2015; Marcuzzo et al., 2011).

Desta forma, utilizou-se neste trabalho o método Spline de Tensão, que será denominado ao longo do trabalho simplesmente Spline.

#### 4.4.3 – Krigagem Ordinária (Krigagem)

A ferramenta *ArcGIS Geostatistical Analyst* disponibiliza diversos métodos de interpolação por Krigagem, como Simples, Ordinária e Universal. Foi escolhido para este trabalho a Krigagem Ordinária, já utilizado em outros estudos (Borges et al., 2015; Marcuzzo et al., 2011; Viola et al., 2010) e que também apresentou resultados melhores que os demais em uma avaliação prévia.

Ao longo do trabalho, o método de Krigagem Ordinária utilizado será denominado simplesmente Krigagem.

Foi testado o uso dos semivariogramas esférico e exponencial para os diversos períodos de retorno, encontrando resultados um pouco melhores (erros menores) para o exponencial na maioria dos casos. Assim, foi escolhido utilizar o semivariograma exponencial.

### 4.5 - AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DAS INTERPOLAÇÕES

Para avaliação dos métodos de interpolação utilizou-se a técnica de validação cruzada, que foi realizada por meio da ferramenta *ArcGIS Geostatistical Analyst* para cada interpolação.

Os dados obtidos dos processos de validação cruzada foram utilizados então para se calcular o erro absoluto, que é a diferença em módulo entre os valores medidos e estimados, o erro percentual, que é a representação percentual da razão entre o erro absoluto e o valor medido, e o erro quadrático, que é o quadrado da diferença entre os valores medidos e estimados.

A partir disso, calculou-se o erro absoluto médio (EAM), o erro percentual médio (EPM) e o erro quadrático médio (EQM) para cada método de interpolação, por período de retorno.

$$P_{est} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_{med} - P_{est}| \quad (13)$$

$$P_{est} = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|P_{med} - P_{est}|}{P_{med}} \quad (14)$$

$$P_{est} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{med} - P_{est})^2 \quad (15)$$

Onde,  $P_{est}$  é a precipitação estimada,  $P_{med}$  a precipitação medida, e  $n$  é o número de estações pluviométricas (número de medições).

O EQM é uma medida de erro comumente utilizada como critério para comparar resultados de métodos de interpolação, ele indica se os valores estimados não desviaram muito dos valores medidos, e deve ser o mais baixo possível (Tveito et al., 2008 *apud* Borges et al., 2015; Esri 2010).

Foi feita também uma avaliação visual dos mapas gerados observando a consistência das estimativas espaciais.

#### 4.6 - SOFTWARES UTILIZADOS

Para a elaboração dos mapas, realização das interpolações espaciais e validações cruzadas foi utilizado o software ArcGIS 10.2.2 *for Desktop Advanced*, incluindo o uso das extensões *ArcGIS Geostatistical Analyst* e *ArcGIS Spatial Analyst*, desenvolvidos pela *Environmental Systems Research Institute* (ESRI), Redlands, California, EUA.

A organização dos dados e resultados, realização de cálculos e análises gráficas foram feitos utilizando o programa Microsoft Excel 2016, e a formatação do trabalho escrito foi feita utilizando o Microsoft Word 2016, ambos desenvolvidos pela *Microsoft Corporation*.

## 5. RESULTADOS

### 5.1 - ESTIMATIVA DAS PRECIPITAÇÕES MÁXIMAS DIÁRIAS

A Tabela 3 apresenta as precipitações máximas diárias para os períodos de retorno (Tr) de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos em cada estação, calculados a partir das séries anuais utilizando-se o método da Distribuição de Gumbel. Cada coluna da tabela possui uma coloração graduada, na qual a cor mais fraca representa o menor valor e a mais escura o maior.

Estas precipitações máximas diárias calculadas para cada estação a partir dos dados pluviométricos foram denominadas como “dados medidos” nas etapas posteriores deste trabalho, para efeito de comparação com os “dados estimados” obtidos pelos métodos de interpolação.

Tabela 3 – Precipitação máxima diária por período de retorno

Estação Pluviométrica		Precipitação diária (mm)					
Código	Nome	TR 2	TR 5	TR 10	TR 25	TR 50	TR 100
1547004	BRASÍLIA	79.35	95.29	105.84	119.18	129.07	138.89
1547008	ETE SUL	75.18	90.58	100.77	113.65	123.21	132.69
1547009	ETE NORTE	69.19	88.18	100.75	116.64	128.42	140.12
1547010	CONTAGEM	78.44	98.31	111.46	128.08	140.41	152.65
1547014	ÁREA ALFA	81.85	104.70	119.83	138.95	153.13	167.21
1547015	ETE - SOBRADINHO	70.68	92.58	107.09	125.41	139.01	152.50
1547017	SANTA MARIA	65.66	92.35	110.02	132.34	148.90	165.34
1547018	JOCKEY CLUB	76.95	93.18	103.92	117.50	127.57	137.57
1547019	ETA CABEÇA DE VEADO	75.65	96.08	109.60	126.68	139.36	151.94
1547020	ETE PARANOÁ	72.24	91.08	103.56	119.32	131.01	142.62
1547024	BRASÍLIA SUL - SE	73.05	89.23	99.95	113.49	123.53	133.50
1547026	RONCADOR	78.46	101.89	117.40	137.00	151.54	165.97
1547029	CAESB-HIDROLOGIA	73.40	92.42	105.02	120.94	132.74	144.46
1548000	BRAZLÂNDIA (QUADRA 18)	76.48	101.24	117.64	138.35	153.72	168.98
1548005	GAMA ETE ALAGADO	77.22	93.70	104.61	118.40	128.63	138.79
1548006	TAGUATINGA - ETA RD	72.78	90.57	102.35	117.24	128.28	139.24
1548007	ETA - BRAZLÂNDIA	74.74	88.66	97.88	109.53	118.17	126.74
1548008	DESCOBERTO	70.35	87.34	98.59	112.81	123.35	133.82
1548009	JATOBAZINHO	74.27	88.70	98.25	110.32	119.28	128.16
1548010	ETE RIACHO FUNDO-GM-3	72.32	90.69	102.85	118.22	129.62	140.94
1548011	FAZENDA MARAJÁ	78.69	92.78	102.11	113.89	122.63	131.31
1548013	FAZENDA SANTA ELISA	76.39	86.97	93.98	102.83	109.40	115.92
1548020	ÁGUAS LINDAS	80.52	94.86	104.35	116.34	125.23	134.06
1647003	MINGONE	68.08	86.34	98.43	113.71	125.04	136.29
1648001	PONTE ANÁPOLIS - BRASÍLIA	74.74	87.56	96.05	106.77	114.73	122.62

## 5.2 - COMPARAÇÃO ENTRE A METODOLOGIA UTILIZADA E CURVAS IDF DISPONÍVEIS PARA O DISTRITO FEDERAL

Foi realizada uma comparação entre os valores de precipitações máximas calculadas pela Distribuição de Gumbel para a Estação Brasília (Código 1547004) e valores obtidos por curvas IDF recomendadas para o Distrito Federal.

Uma vez que as curvas IDF apresentam resultados de intensidade da precipitação por período de retorno, por duração da chuva, optou-se por comparar os valores obtidos para precipitações de 24 horas para os períodos de retorno utilizados neste trabalho.

Os valores calculados e apresentados na Tabela 3 referem-se a precipitações máximas diárias. Para transformar estes dados em precipitações máximas de 24 horas, utilizou-se a relação 24h/1dia de 1,14, recomendada por CETESB (1979) *apud* Tucci (2012). Desta forma, os valores obtidos para precipitações máximas diárias foram multiplicados por 1,14.

A Tabela 4 apresenta os valores de precipitação máxima de 24 horas obtidos pela Distribuição de Gumbel e pelas curvas IDF relacionadas no Item 3.4 deste trabalho.

Para o cálculo pela equação de Pfafstetter, os valores dos parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $a$ ,  $b$  e  $c$  foram obtidos pela Tabela 1, e são respectivamente: 0,170; 0,04; 0,25; 0,5; 27; 20.

Para o parâmetro  $G$  da equação proposta por TCBR, foi utilizado o valor 70, obtido no mapa apresentado na Figura 1.

Tabela 4 – Comparação entre valores de precipitação máxima obtidos pela Distribuição de Gumbel para a Estação Brasília e por diferentes curvas IDF para o Distrito Federal

Tr (anos)	Precipitação de 24hr (mm)				
	Gumbel	Pfafstetter	Novacap	PDDU-DF	TCBR
2	90,45	97,22	92,52	69,95	78,87
5	108,63	115,87	107,13	84,56	92,84
10	120,66	131,50	119,69	97,61	105,03
25	135,86	154,56	138,59	118,00	123,64
50	147,14	174,11	154,85	136,20	139,88
100	158,33	195,76	173,01	157,22	158,24

Estes valores foram plotados no gráfico apresentado na Figura 5, para que se possa observar as diferenças entre a metodologia utilizada no trabalho e as diversas curvas IDF disponíveis.

Neste caso, para a Estação Brasília, observa-se que os valores obtidos pela Distribuição de Gumbel ficaram mais próximos dos valores da curva IDF recomendada pela NOVACAP

para períodos de retorno menores que 50 anos. Já para períodos de retorno maiores, os valores se aproximaram mais da curva IDF obtida por TCBR e pelo PDDU-DF.

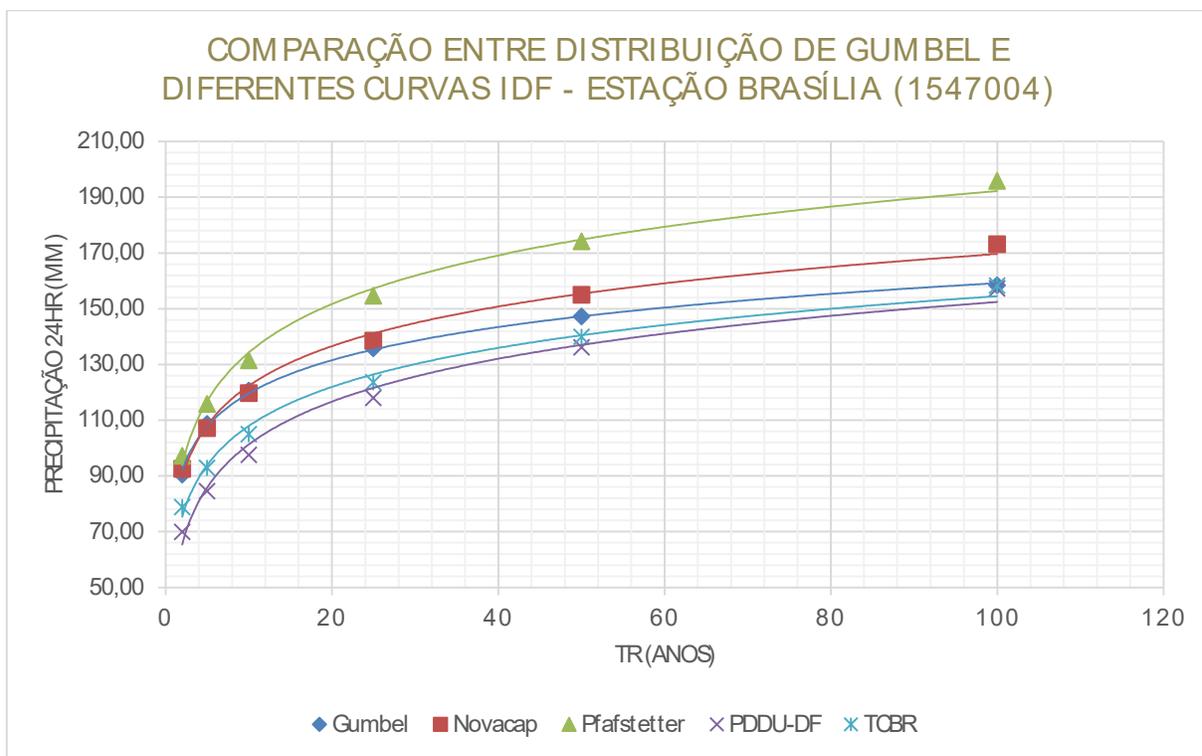


Figura 5 - Comparação entre valores de precipitação máxima obtidos pela Distribuição de Gumbel para a Estação Brasília e por diferentes curvas IDF para o Distrito Federal

### 5.3 - OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DOS INTERPOLADORES

Por meio da ferramenta *ArcGIS Geostatistical Analyst*, os parâmetros de cada método de interpolação foram otimizados, ou seja, ajustados automaticamente de forma que o interpolador apresente o melhor resultado. Esta otimização utiliza um procedimento de validação cruzada para encontrar os parâmetros que resultam no menor erro das estimativas do interpolador.

A seguir, nas Figura 6, Figura 7 e Figura 8 são apresentados um exemplo para cada método de interpolação empregado com uma comparação entre os resultados utilizando-se as configurações padrão e as configurações otimizadas.

Nesta comparação, utilizou-se a raiz do erro quadrático médio (*root-mean-square error*) calculada pelo próprio programa. Esta medida de erro consiste na raiz quadrada do erro quadrático médio (EQM).

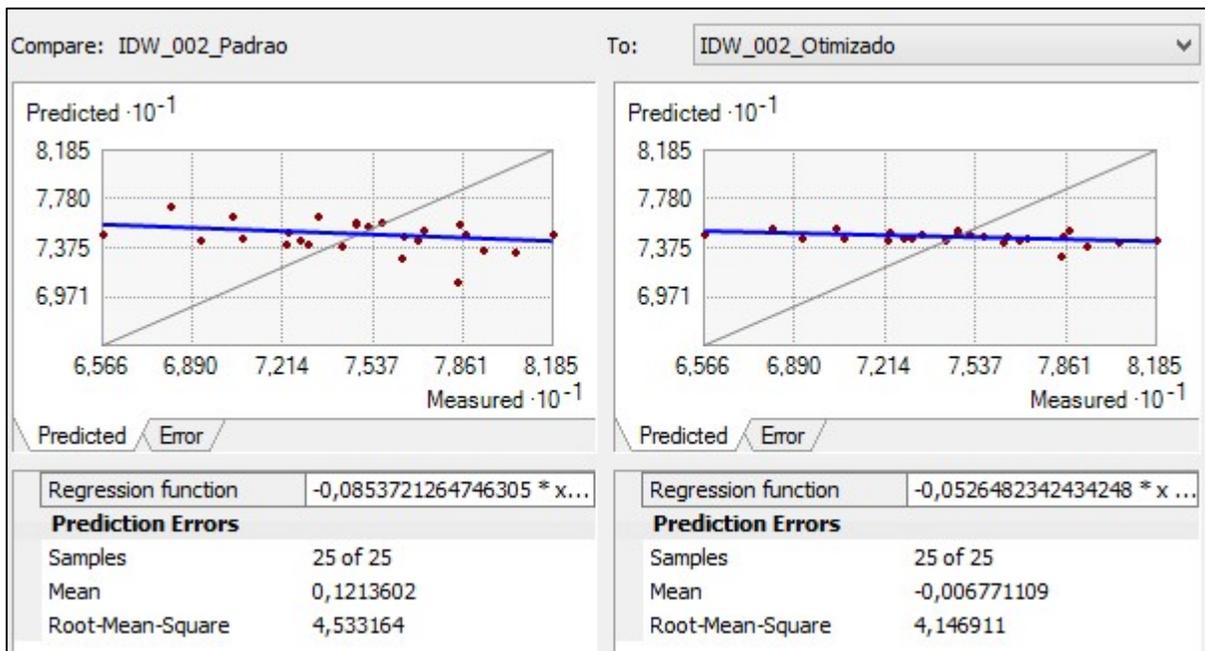


Figura 6 – Comparação entre interpolações utilizando os parâmetros padrão e os parâmetros otimizados – IDW – TR 2 anos

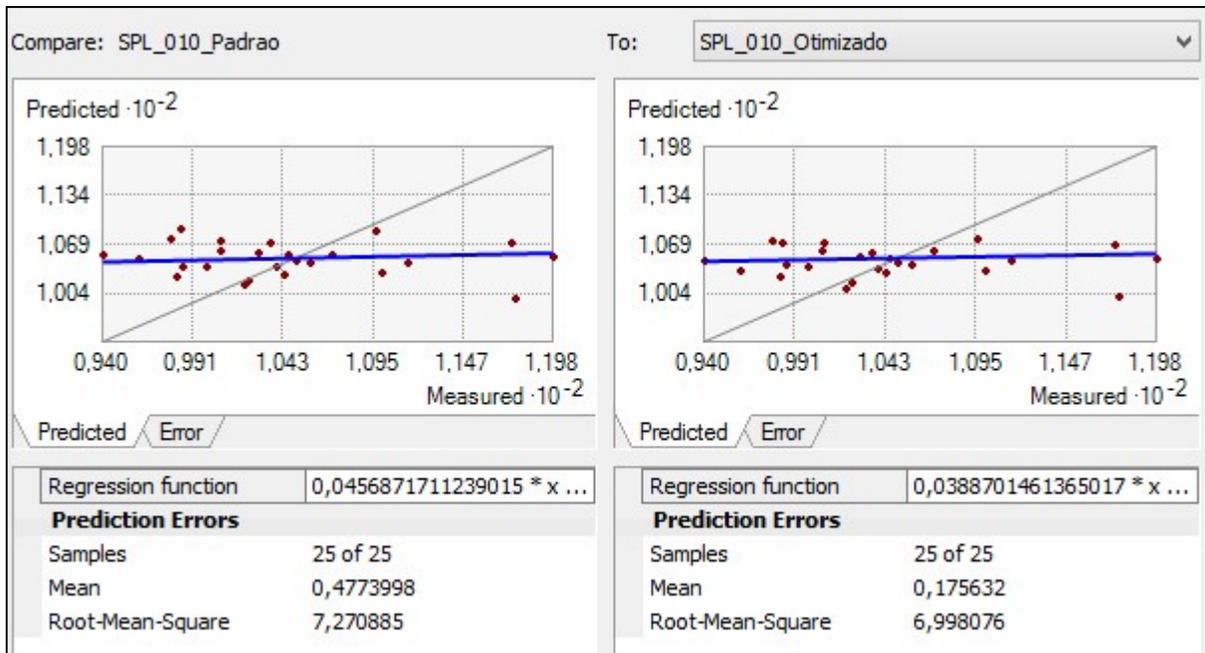


Figura 7 – Comparação entre interpolações utilizando os parâmetros padrão e os parâmetros otimizados – Spline – TR 10 anos

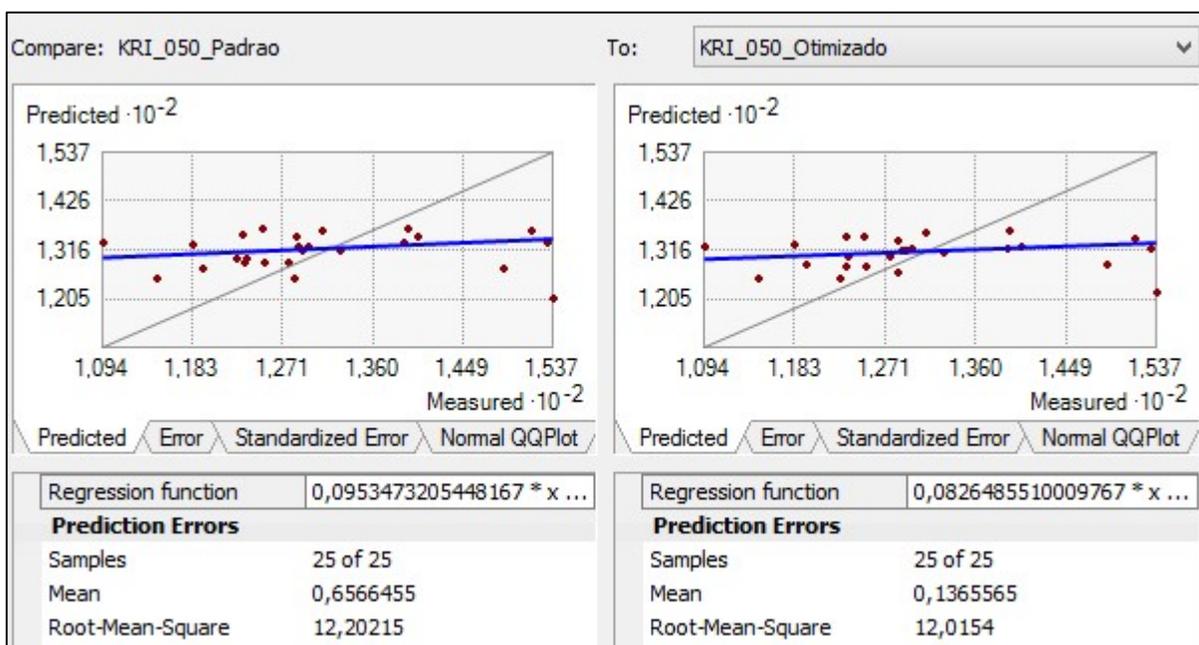


Figura 8 – Comparação entre interpolações utilizando os parâmetros padrão e os parâmetros otimizados – Krigagem – TR 50 anos

Observa-se que a raiz do erro quadrático médio é menor nas interpolações em que os parâmetros utilizados foram otimizados.

Diante disso, optou-se pela utilização da otimização dos parâmetros em todas as interpolações realizadas neste trabalho.

#### 5.4 - INTERPOLAÇÃO DOS DADOS DE CHUVA – TR 2 ANOS

A Figura 9 apresenta os mapas gerados pelas interpolações da precipitação máxima diária de período de retorno de 2 anos.

Os mapas gerados pelos métodos interpoladores IDW e Spline apresentam bastante semelhança quanto à distribuição espacial da precipitação. O IDW, no entanto, aparenta gerar mais “ilhas”, enquanto a interpolação com o Spline apresenta curvas mais suaves.

Já o mapa da interpolação pelo método da Krigagem visualmente não representa bem a distribuição espacial da precipitação e possui muitas descontinuidades e bordas irregulares entre as diversas faixas de valor da precipitação.

Estas observações vão de encontro ao que BORGES (2015) afirma em seu trabalho, que métodos determinísticos podem produzir “ilhas” isoladas enquanto métodos geoestatísticos podem criar bordas descontínuas.

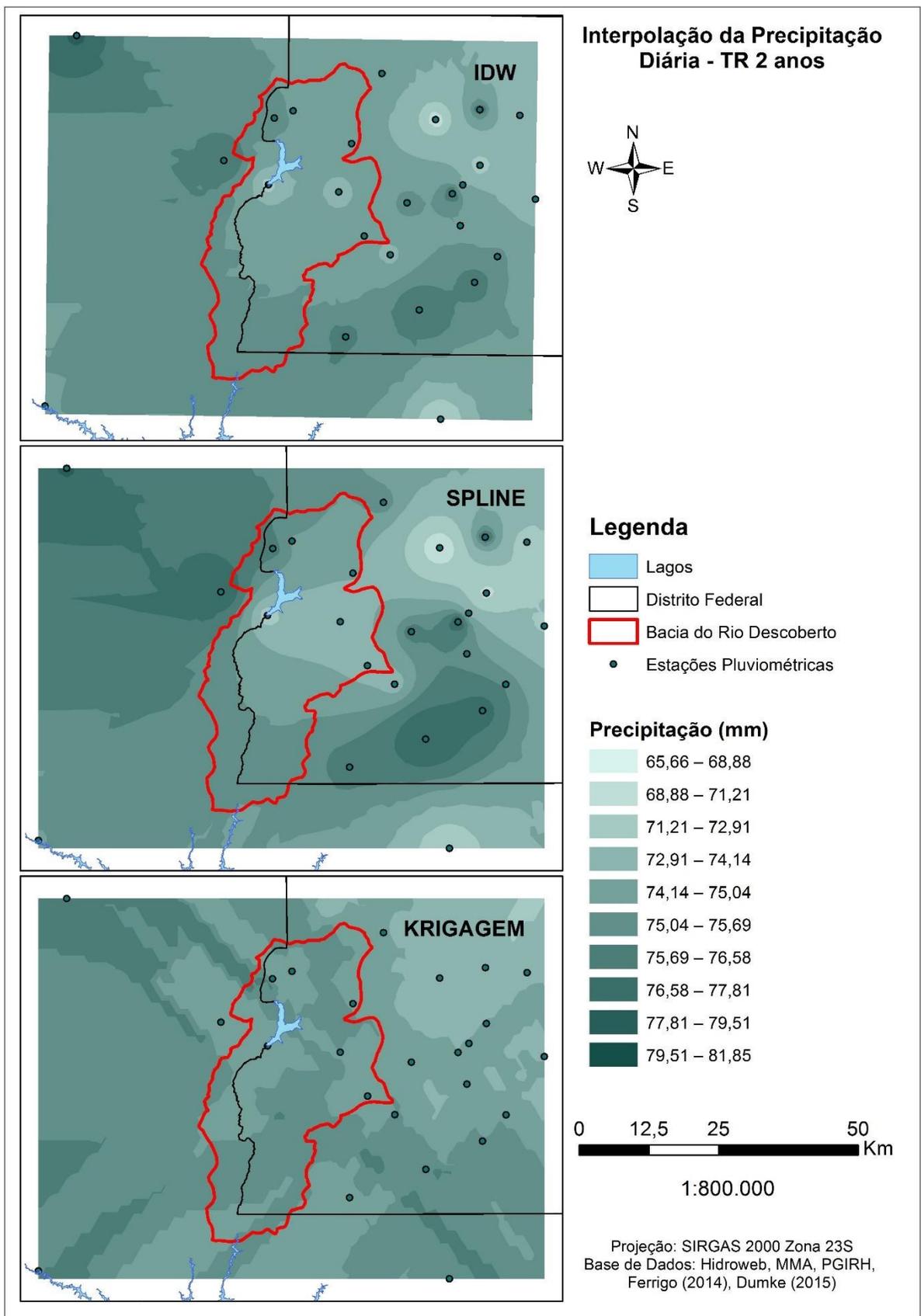


Figura 9 – Mapas de estimativa da precipitação diária de TR 2 anos gerados pelos três métodos de interpolação

Nos mapas gerados pelo IDW e Spline pode-se observar que em algumas áreas existe alta variação entre os valores da precipitação de TR 2 anos de estações pluviométricas vizinhas. Provavelmente a distribuição não uniforme das estações pluviométricas na área estudada, assim como a variação existente entre as precipitações medidas em estações vizinhas, provocam parte das irregularidades observadas nos mapas.

É possível observar ainda que na porção oeste da área de estudo, onde a densidade de estações pluviométricas é muito menor, as irregularidades nos mapas são maiores.

Nas Figura 10 a Figura 12 são apresentados, para cada método de interpolação, gráficos com a precipitação diária de TR 2 anos medida e estimada, assim como o erro percentual das estimativas.

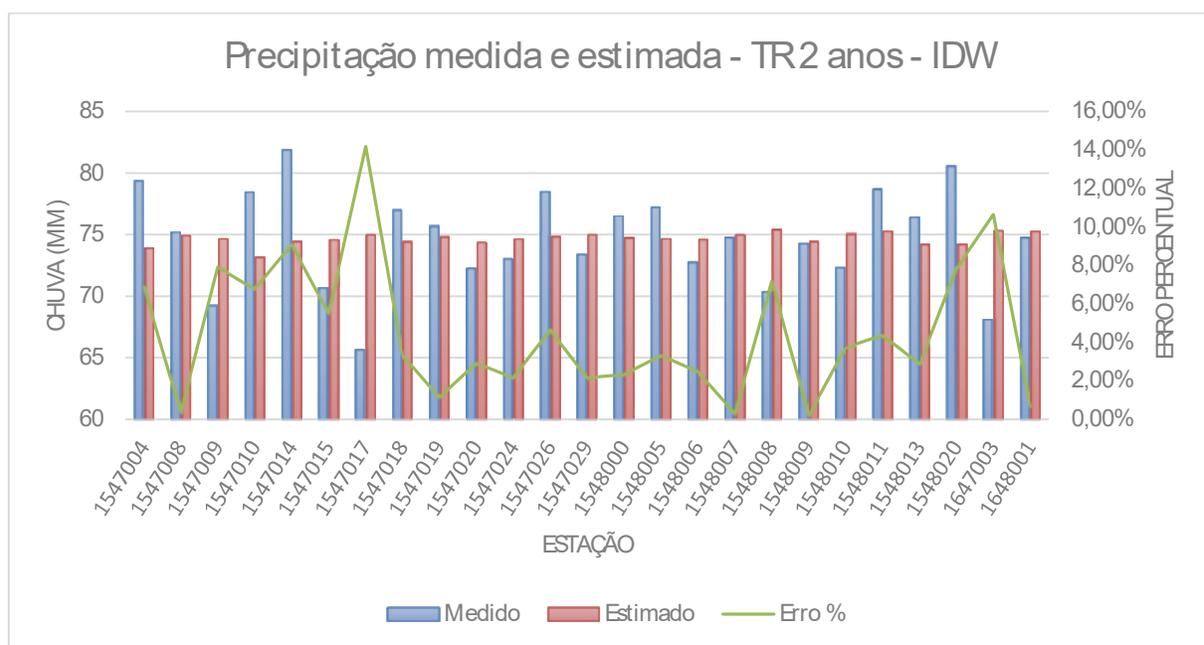


Figura 10 – Precipitação medida e estimada, e erro percentual das estimativas – IDW – TR 2 anos

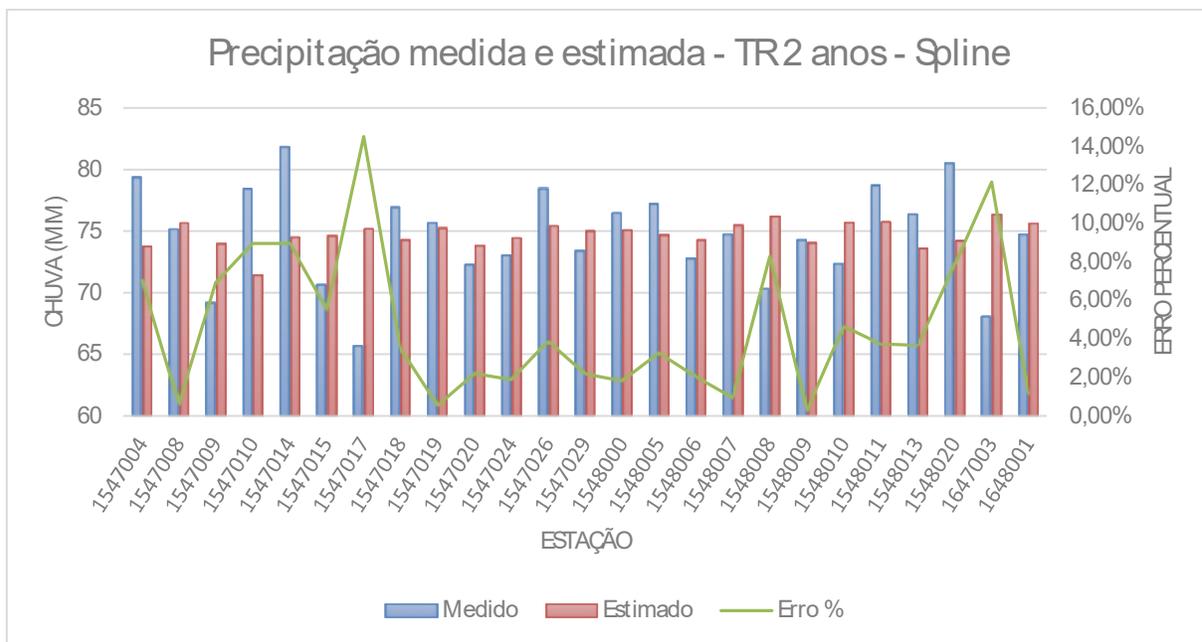


Figura 11 – Precipitação medida e estimada, e erro percentual das estimativas – Spline – TR 2 anos

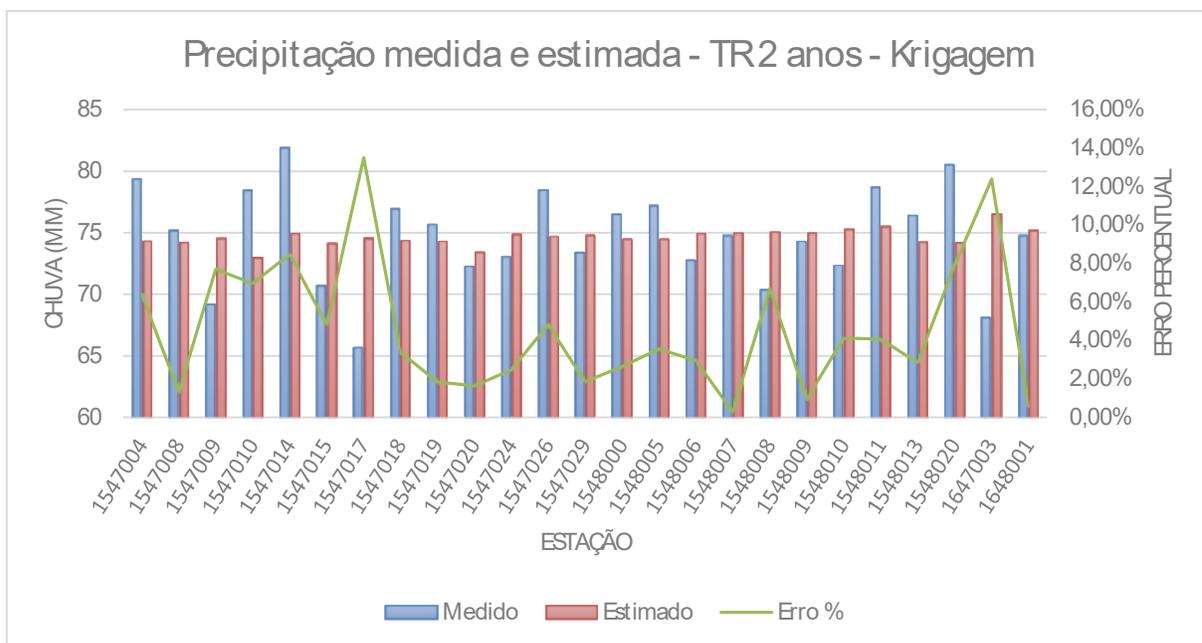


Figura 12 – Precipitação medida e estimada, e erro percentual das estimativas – Krigagem – TR 2 anos

Observa-se que em geral os maiores erros de estimativa ocorreram nas estações cujos valores medidos se distanciam mais da média. Isso pode ser observado também na Figura 13, que mostra que os valores estimados ficaram sempre próximos da média dos valores medidos, de forma que os valores mais extremos da série de dados possuem os maiores erros em sua estimativa pelos interpoladores.

Na Figura 13 é possível observar também a proximidade entre os valores estimados pelos diferentes métodos, o que é confirmado na Figura 14, que mostra que os erros de estimativa dos diferentes métodos para o TR de 2 anos são muito parecidos.

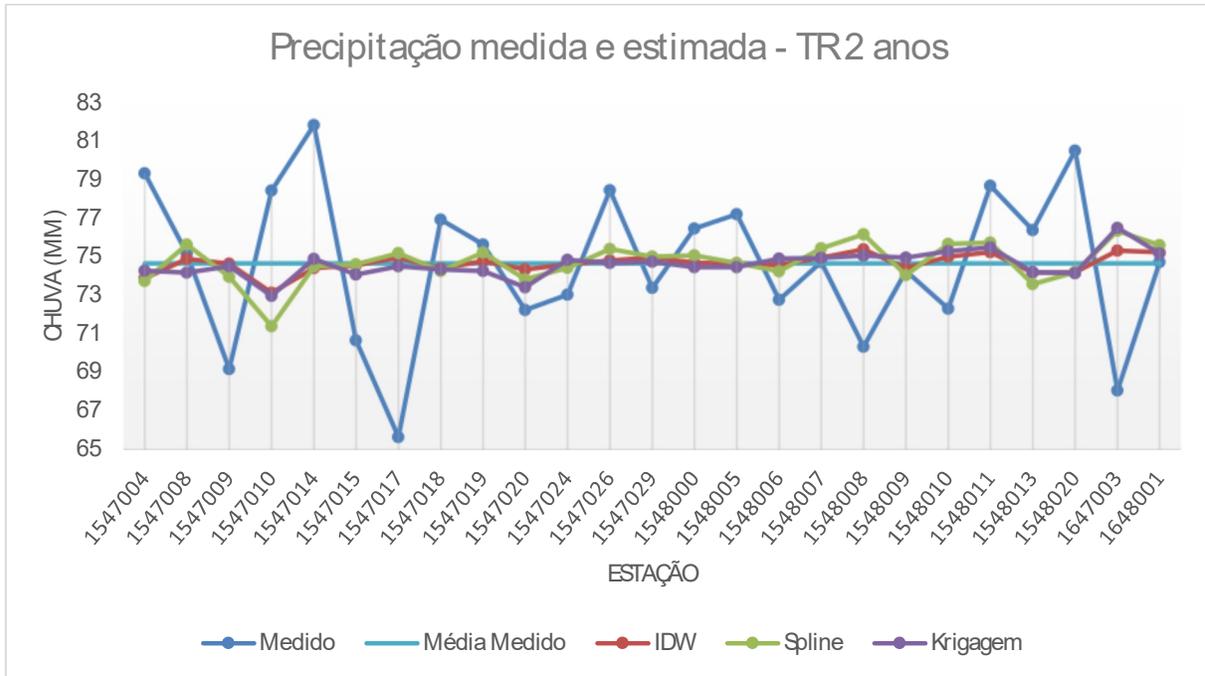


Figura 13 – Precipitação medida e estimada pelos 3 métodos para TR 2 anos

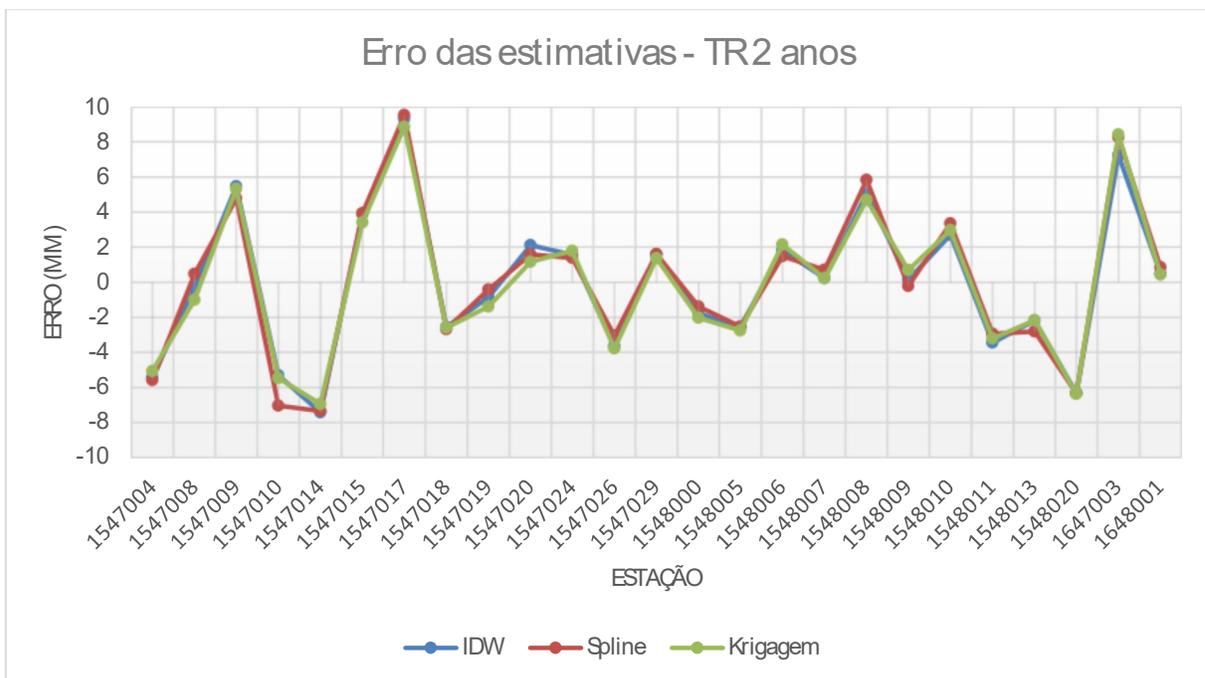


Figura 14 – Erro das estimativas geradas pelos 3 métodos para TR 2 anos

A Figura 15 apresenta gráficos gerados pelas interpolações. No gráfico de precipitação medida (*Measured*) versus precipitação estimada (*Predicted*), quanto mais próximos os pontos

estão da linha cinza, melhor a estimativa. A linha cinza representa a situação de valores idênticos para medidos e estimados.

No gráfico que apresenta a precipitação medida (*Measured*) versus o erro (*Error*), quanto mais próximos os pontos do valor 0,00 no eixo das ordenadas, melhor o resultado.

O gráfico Medido versus Estimado do método Spline aparentemente possui alguns pontos mais distantes da linha cinza que os gráficos dos outros métodos.

Observando o gráfico Medido versus Erro e o gráfico da Figura 14, nota-se também que o método Spline apresentou o maior erro em diversos pontos, o que provavelmente está relacionado com o fato de este método possuir o maior valor de Erro Quadrático Médio (Tabela 5).

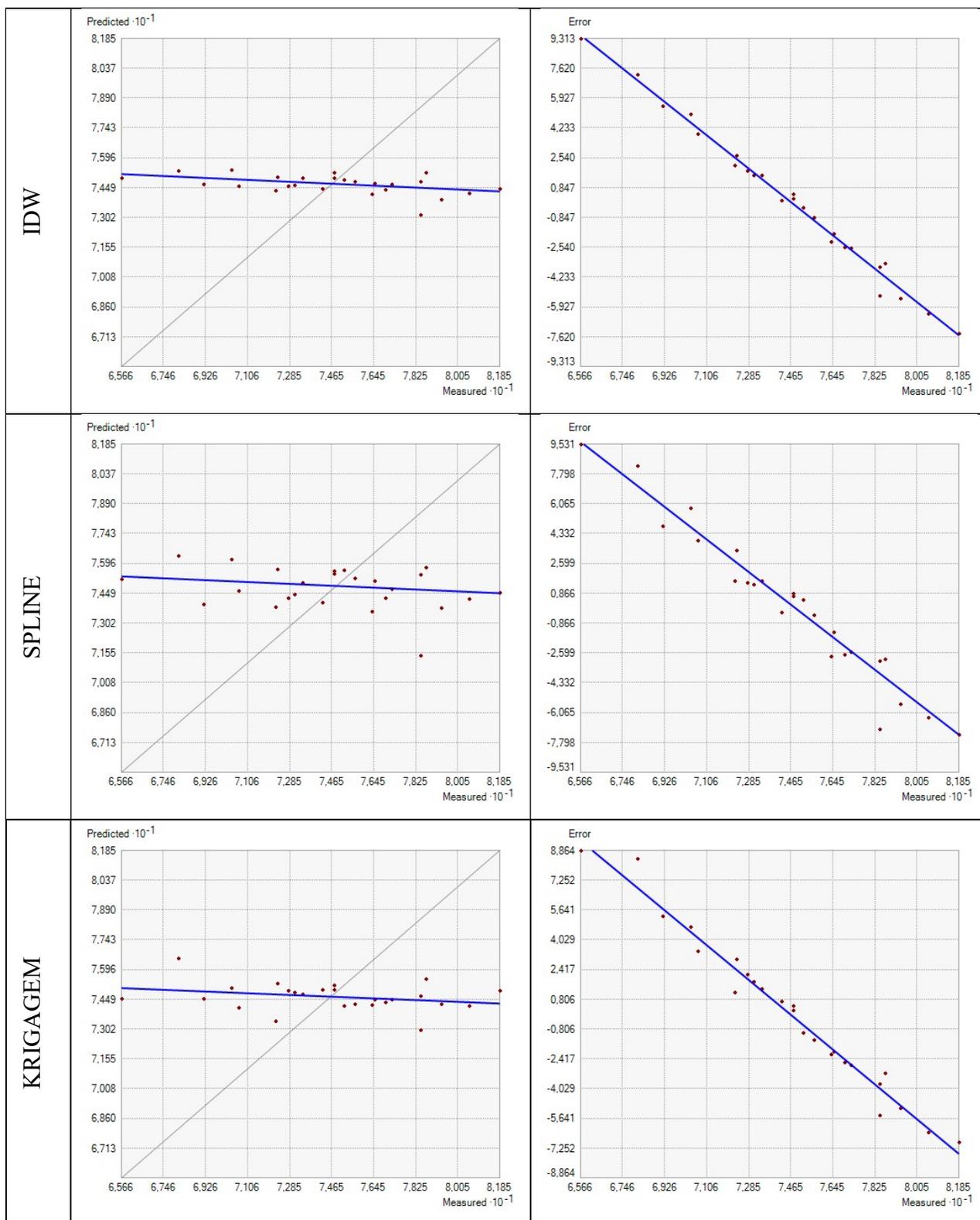


Figura 15 – Gráficos de precipitação medida (*Measured*) versus precipitação estimada (*Predicted*) e erro (*Error*) – TR 2 anos

A Tabela 5 apresenta os erros absoluto, percentual e quadrático médio calculados a partir dos resultados da validação cruzada, realizada para cada método de interpolação. Foram grifados na tabela os menores valores de cada erro.

Tabela 5 – Erros médios gerados na validação cruzada – TR 2 anos

		<b>IDW</b>	<b>Spline</b>	<b>Krigagem</b>
EAM	Erro Absoluto Médio	3,34	3,45	3,37
EPM	Erro Percentual Médio	4,52%	4,67%	4,56%
EQM	Erro Quadrático Médio	17,20	18,79	17,09

O método IDW apresentou menor EAM e EPM, enquanto a interpolação por Krigagem apresentou o menor EQM. Observa-se, no entanto, que a diferença entre os erros gerados em cada método é muito pequena.

### 5.5 - INTERPOLAÇÃO DOS DADOS DE CHUVA – TR 5 ANOS

A Figura 16 apresenta os mapas gerados pelas interpolações da precipitação diária de período de retorno de 5 anos.

Neste caso, o mapa gerado pelo método da Krigagem apresentou um resultado visualmente melhor que na interpolação da precipitação de TR 2 anos pelo mesmo método (Figura 9).

Os mapas das interpolações pelos métodos IDW e Spline apresentam algumas “ilhas” .

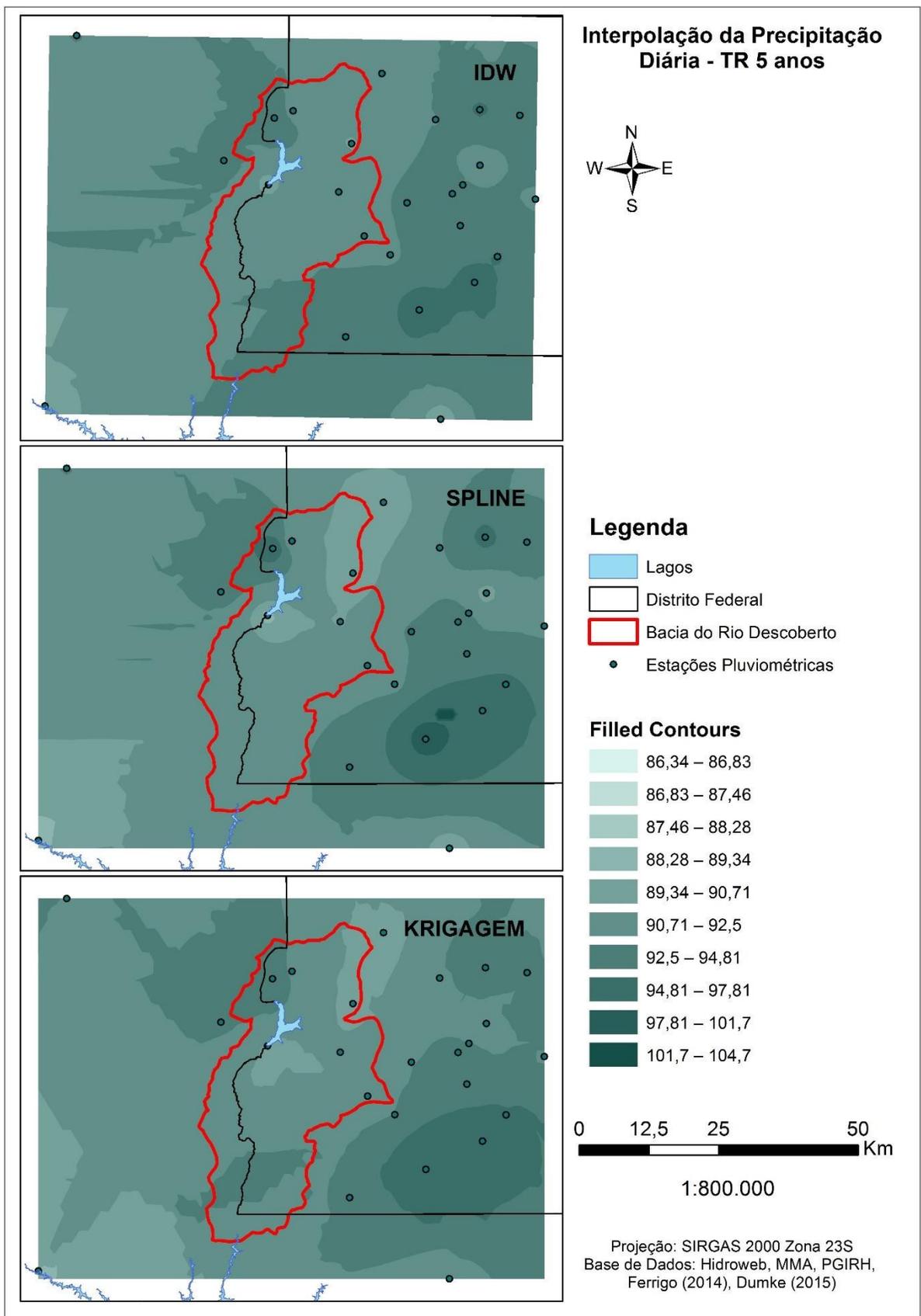


Figura 16 – Mapas de estimativa da precipitação diária de TR 5 anos gerados pelos três métodos de interpolação

Novamente observa-se maiores irregularidades na porção oeste da área de estudo nos três mapas, onde a densidade de estações pluviométricas é muito menor. Em algumas áreas também existe alta variação entre os valores da precipitação de TR 5 anos de estações pluviométricas vizinhas.

Nas Figura 17 a Figura 19 são apresentados, para cada método de interpolação, gráficos com a precipitação diária de TR 5 anos medida e estimada, assim como o erro percentual das estimativas.

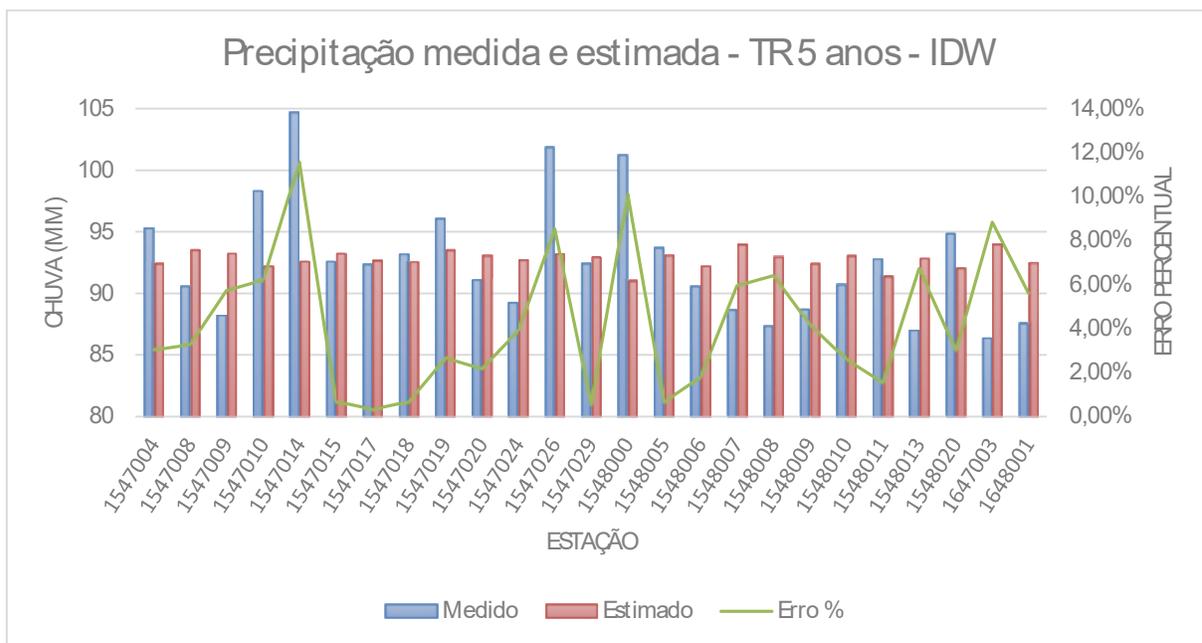


Figura 17 – Precipitação medida e estimada, e erro percentual das estimativas – IDW – TR 5 anos

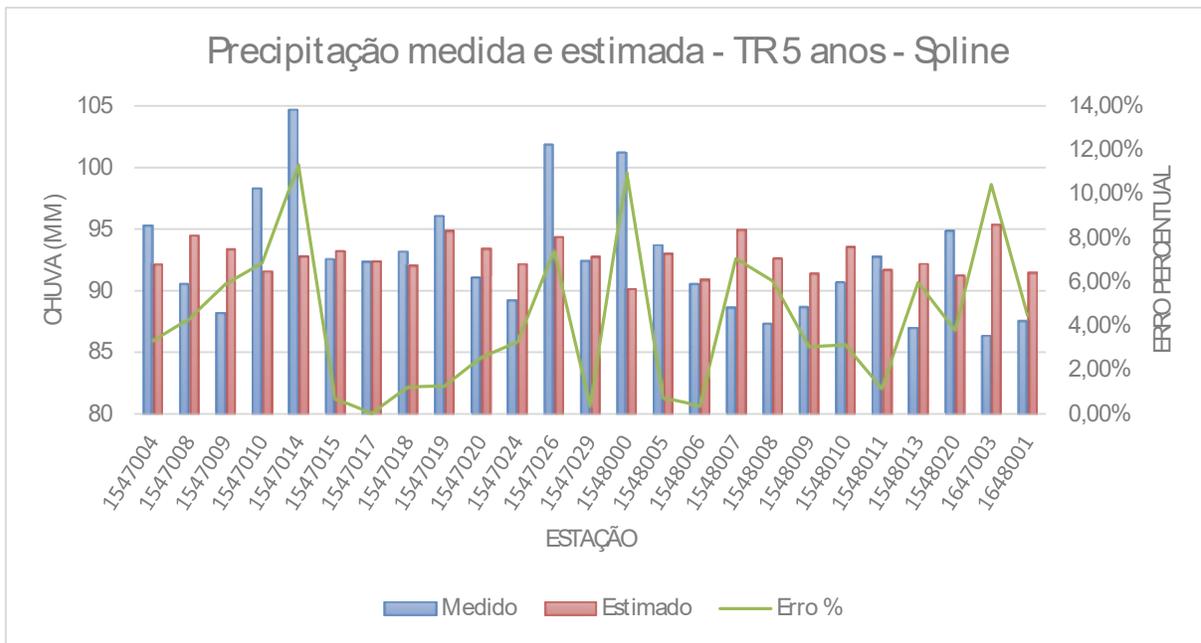


Figura 18 – Precipitação medida e estimada, e erro percentual das estimativas – Spline – TR 5 anos

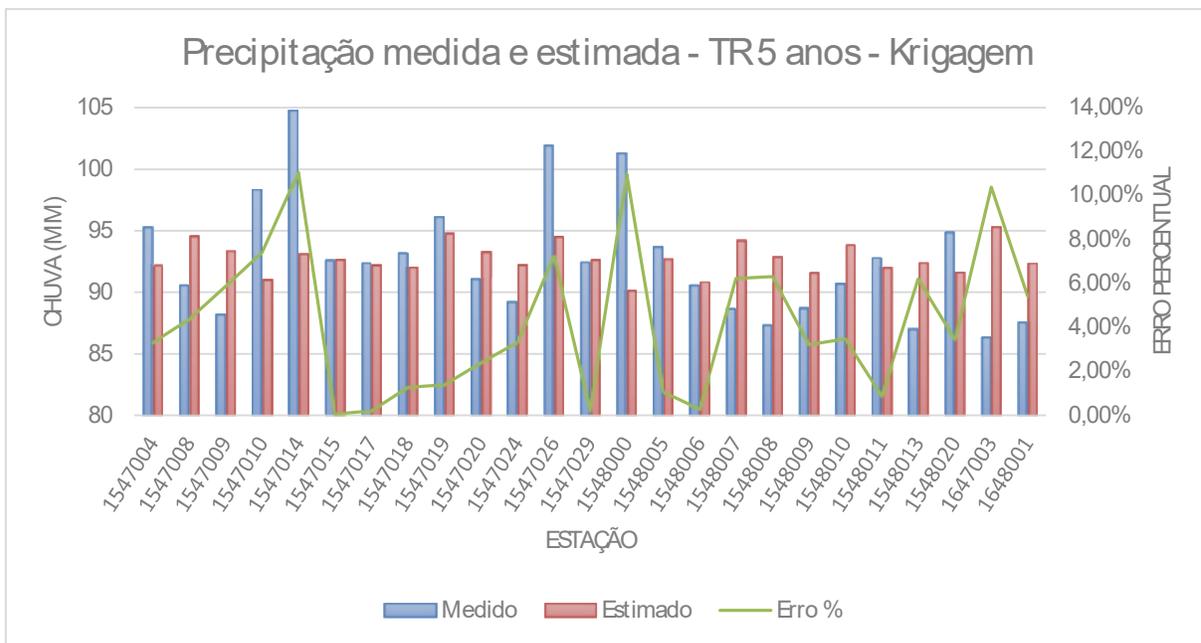


Figura 19 – Precipitação medida e estimada, e erro percentual das estimativas – Krigagem – TR 5 anos

A Figura 20 apresenta um gráfico com a precipitação diária de TR 5 anos medida, e estimada por cada método de interpolação empregado. Aparentemente os valores gerados na interpolação pelo método IDW ficaram mais próximos do valor médio, enquanto nas interpolações por Spline e Krigagem houve um pouco mais de variação nos valores estimados entre as estações.

Isto pode ser observado também nos gráficos Medido *versus* Estimado apresentados na Figura 22, nos quais se percebe maior dispersão nos valores estimados pelos métodos Spline e Krigagem.

No entanto, apesar destas pequenas diferenças, os métodos novamente apresentaram resultados e erros parecidos, conforme observa-se nas Figura 20 e Figura 21.

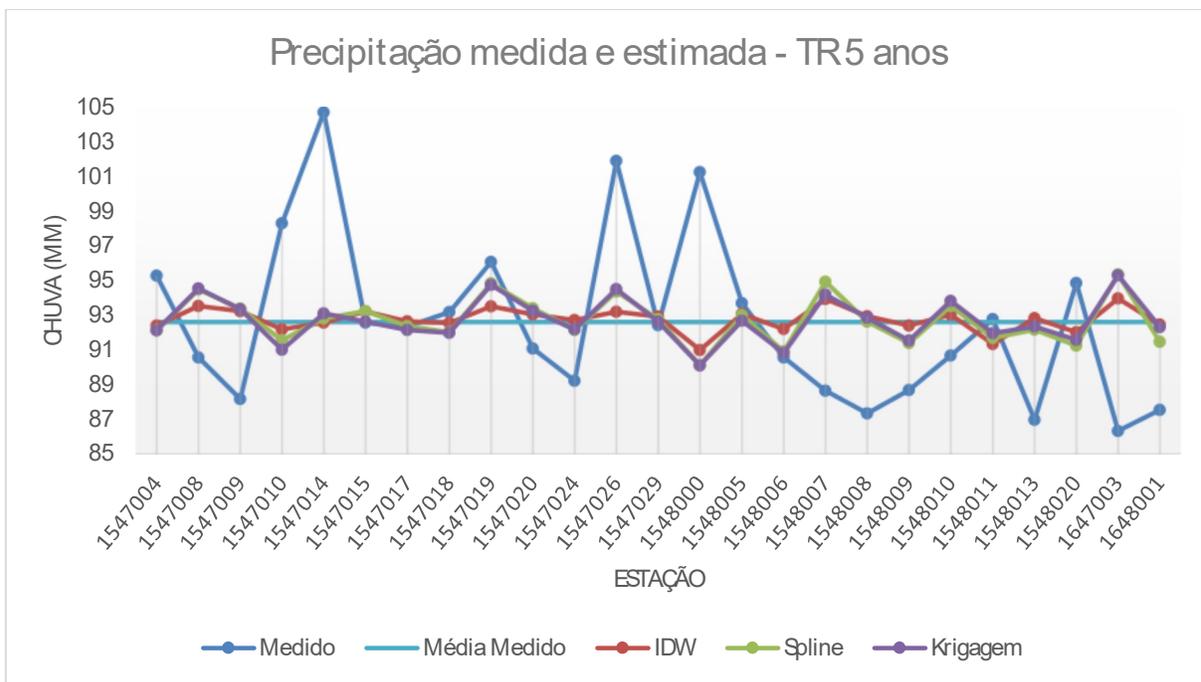


Figura 20 – Precipitação medida e estimada pelos 3 métodos para TR 5 anos

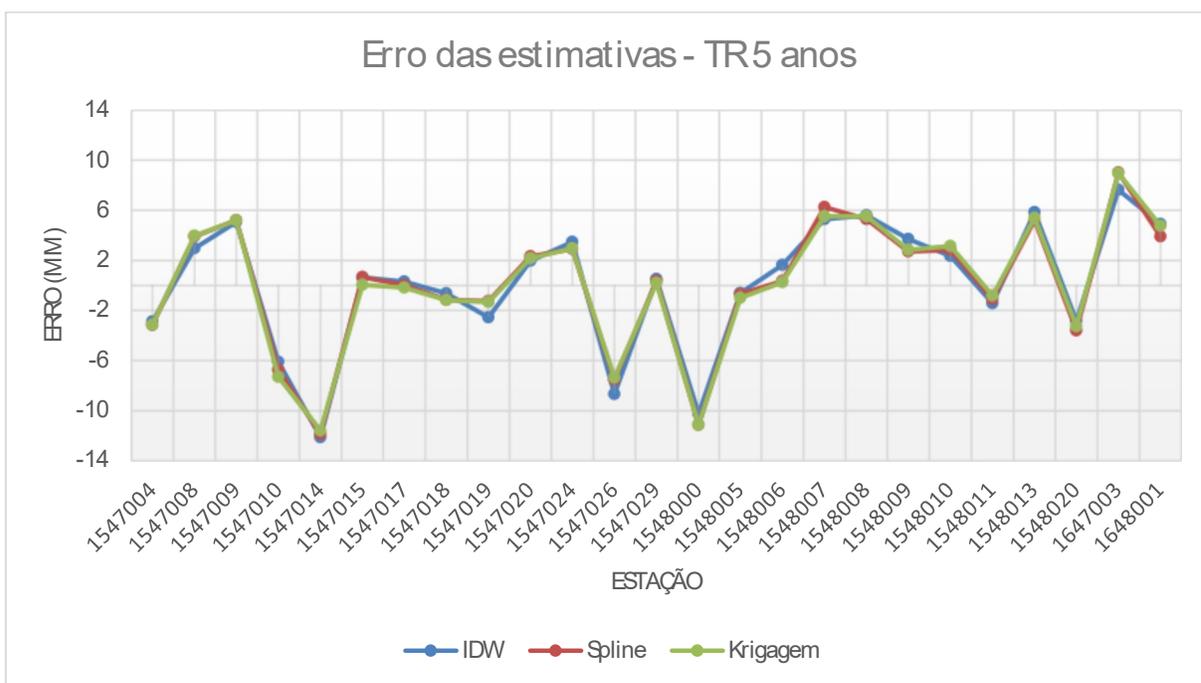


Figura 21 – Erro das estimativas geradas pelos 3 métodos para TR 5 anos

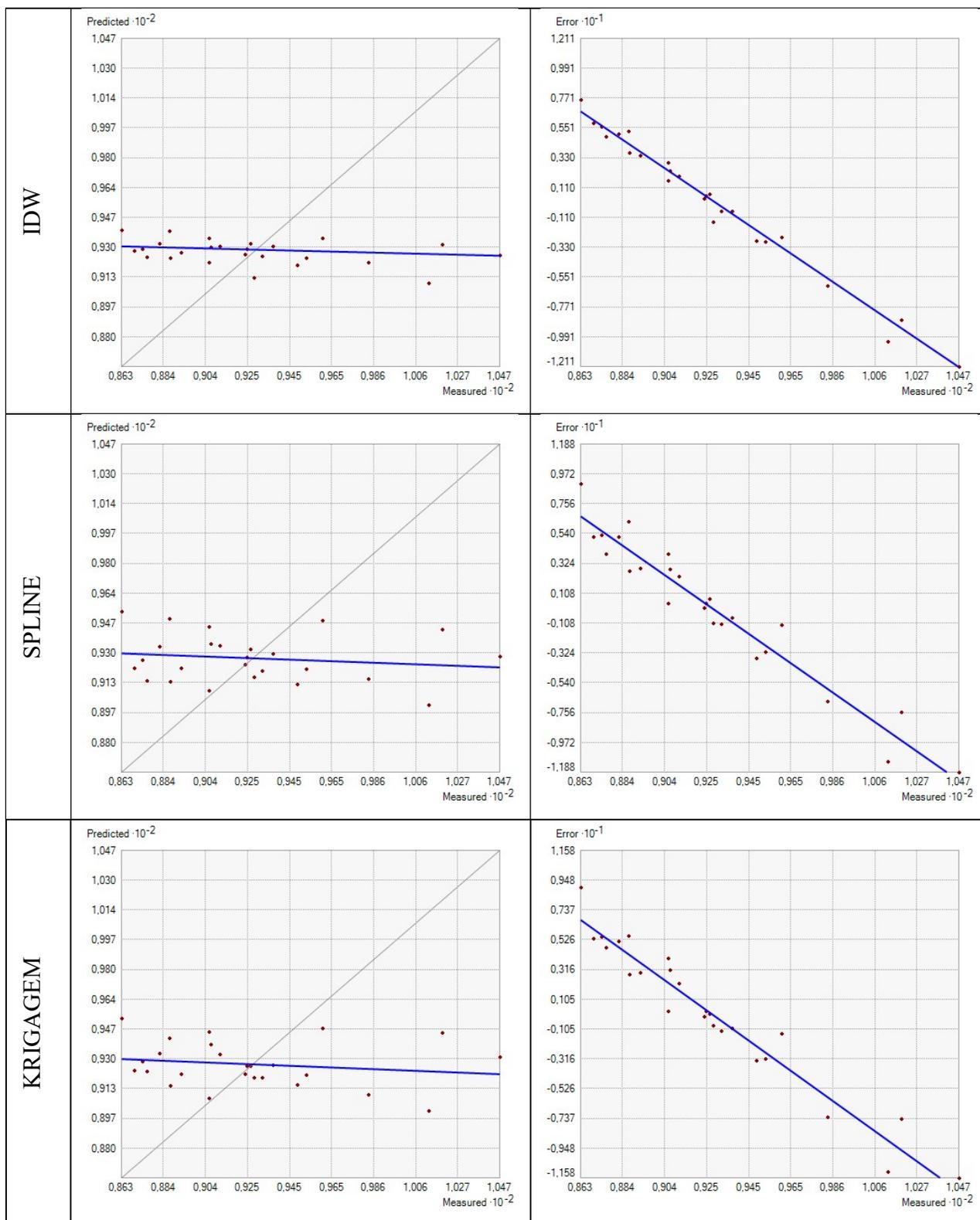


Figura 22 – Gráficos de precipitação medida (*Measured*) versus precipitação estimada (*Predicted*) e erro (*Error*) – TR 5 anos

A Tabela 6 apresenta os erros absoluto, percentual e quadrático médio calculados a partir dos resultados da validação cruzada, realizada para cada método de interpolação.

Tabela 6 – Erros médios gerados na validação cruzada – TR 5 anos

		<b>IDW</b>	<b>Spline</b>	<b>Krigagem</b>
EAM	Erro Absoluto Médio	4,00	3,97	3,97
EPM	Erro Percentual Médio	4,27%	4,23%	4,24%
EQM	Erro Quadrático Médio	25,57	26,30	26,32

Com pouca diferença dos demais métodos, o Spline apresentou menor EAM e EPM. Já quanto ao EQM, o método IDW obteve melhor resultado.

#### 5.6 - INTERPOLAÇÃO DOS DADOS DE CHUVA – TR 10 ANOS

A Figura 23 apresenta os mapas gerados pelas interpolações da precipitação diária de período de retorno de 10 anos.

Os mapas de interpolação gerados pelos métodos Spline e Krigagem são visualmente mais semelhantes, sendo que o método Spline gerou algumas “ilhas”, assim como o IDW.

O mapa da interpolação por Krigagem apresenta um pouco mais de bordas irregulares, porém isso ocorre na área onde há menor densidade de estações pluviométricas.

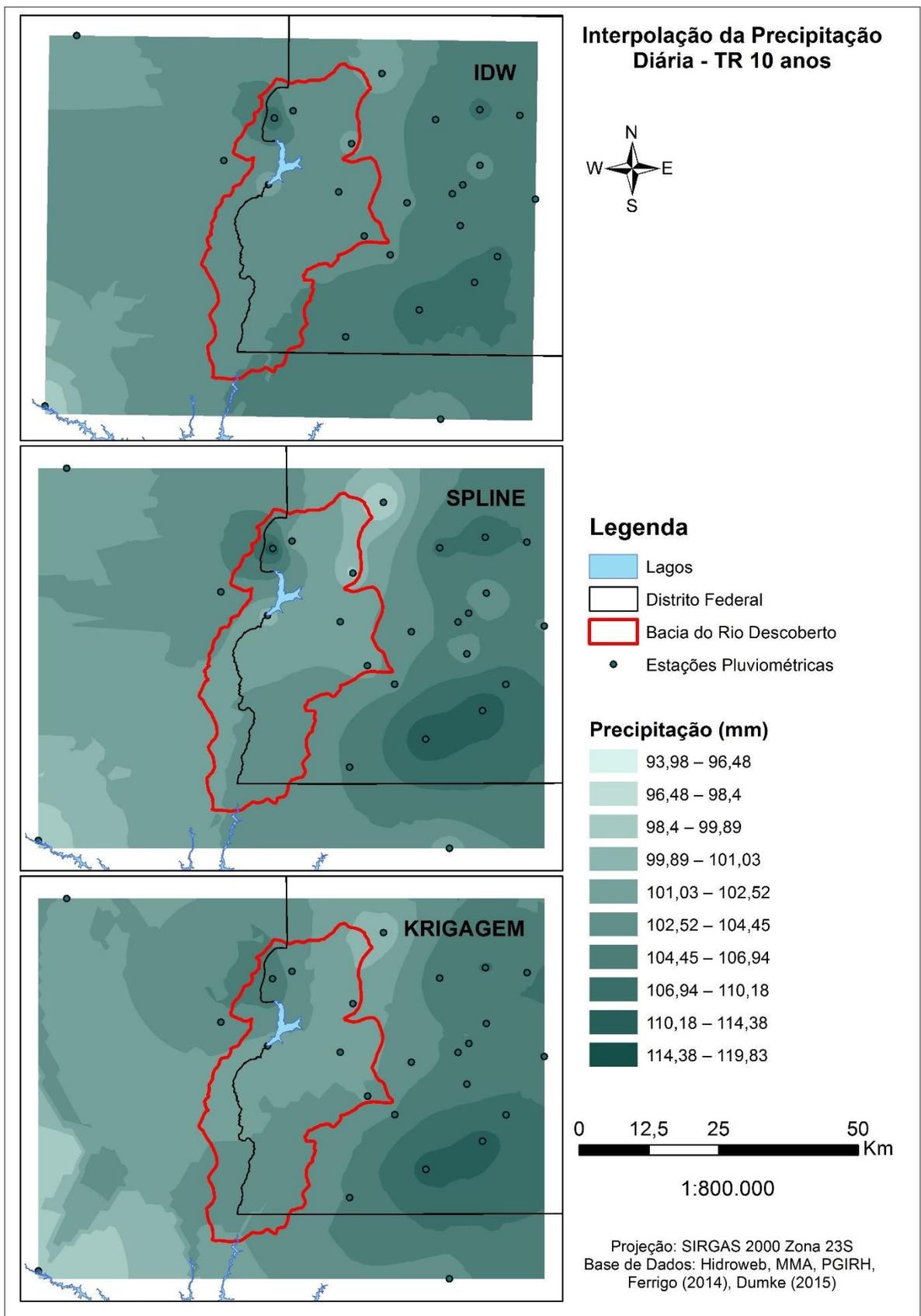


Figura 23 – Mapas de estimativa da precipitação diária de TR 10 anos gerados pelos três métodos de interpolação

Nas Figura 24 a Figura 26 são apresentados, para cada método de interpolação, gráficos com a precipitação diária de TR 10 anos medida e estimada, assim como o erro percentual das estimativas.

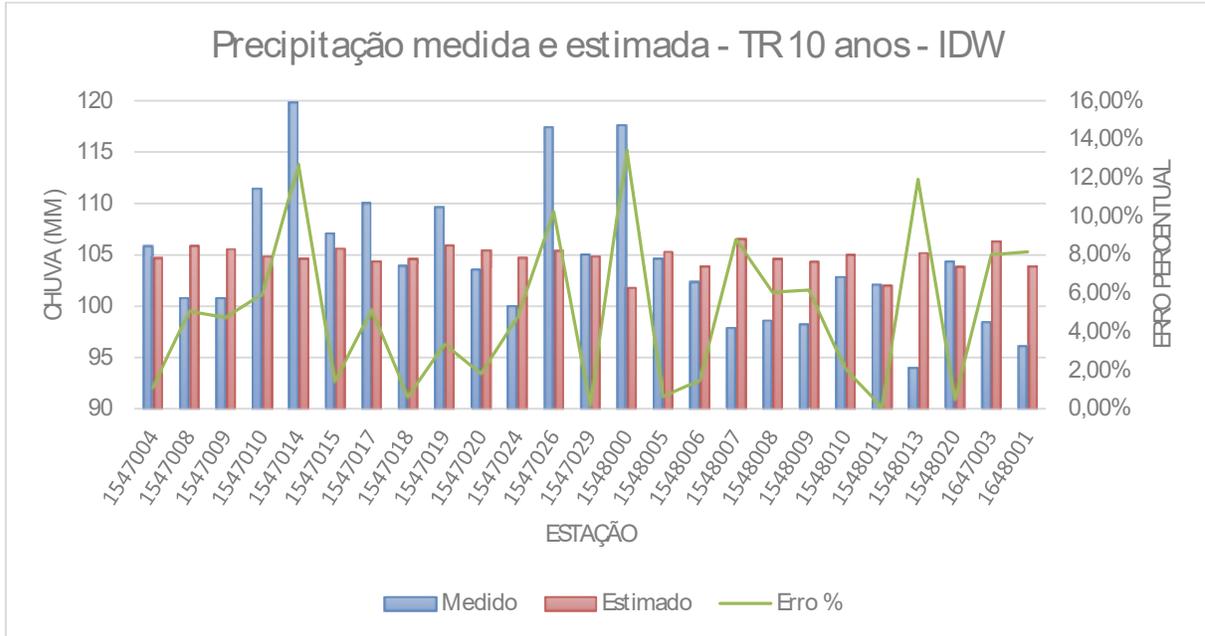


Figura 24 – Precipitação medida e estimada, e erro percentual das estimativas – IDW – TR 10 anos

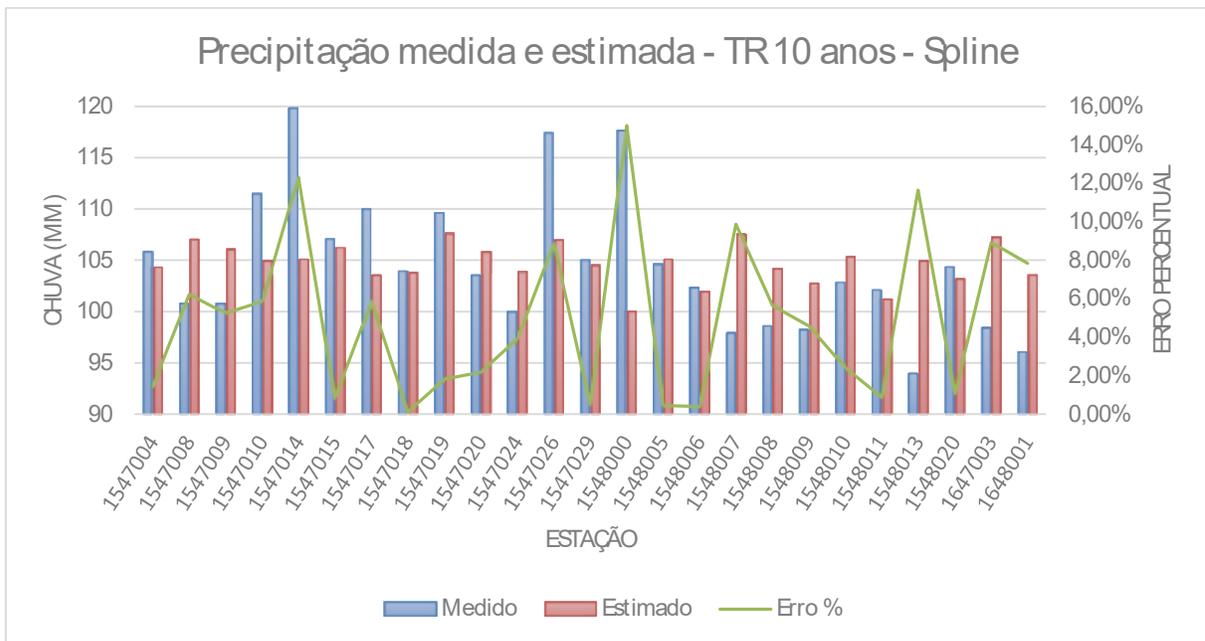


Figura 25 – Precipitação medida e estimada, e erro percentual das estimativas – Spline – TR 10 anos

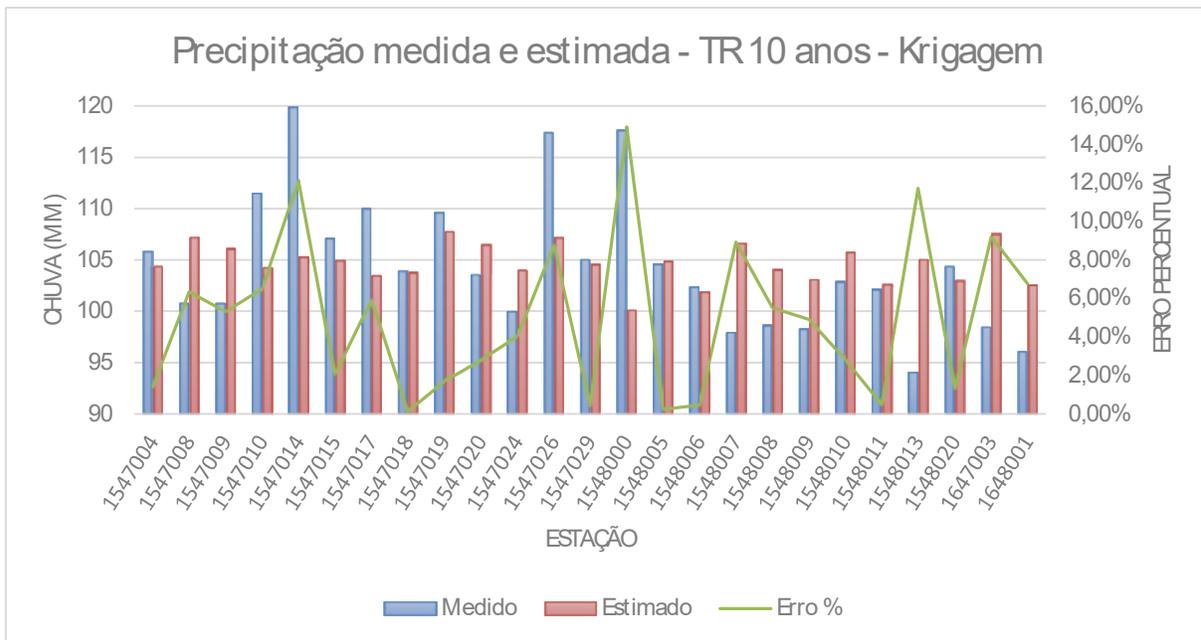


Figura 26 – Precipitação medida e estimada, e erro percentual das estimativas – Krigagem – TR 10 anos

A Figura 27 apresenta um gráfico com a precipitação diária de TR 10 anos medida, e estimada por cada método de interpolação empregado. Já no gráfico da Figura 28 são apresentados os erros das estimativas geradas pelos três métodos.

Da mesma forma que nas análises anteriores referentes a outros períodos de retorno, nota-se que os valores estimados ficaram próximos da média dos valores medidos, assim como os erros de estimativa são semelhantes nas interpolações pelos diferentes métodos.

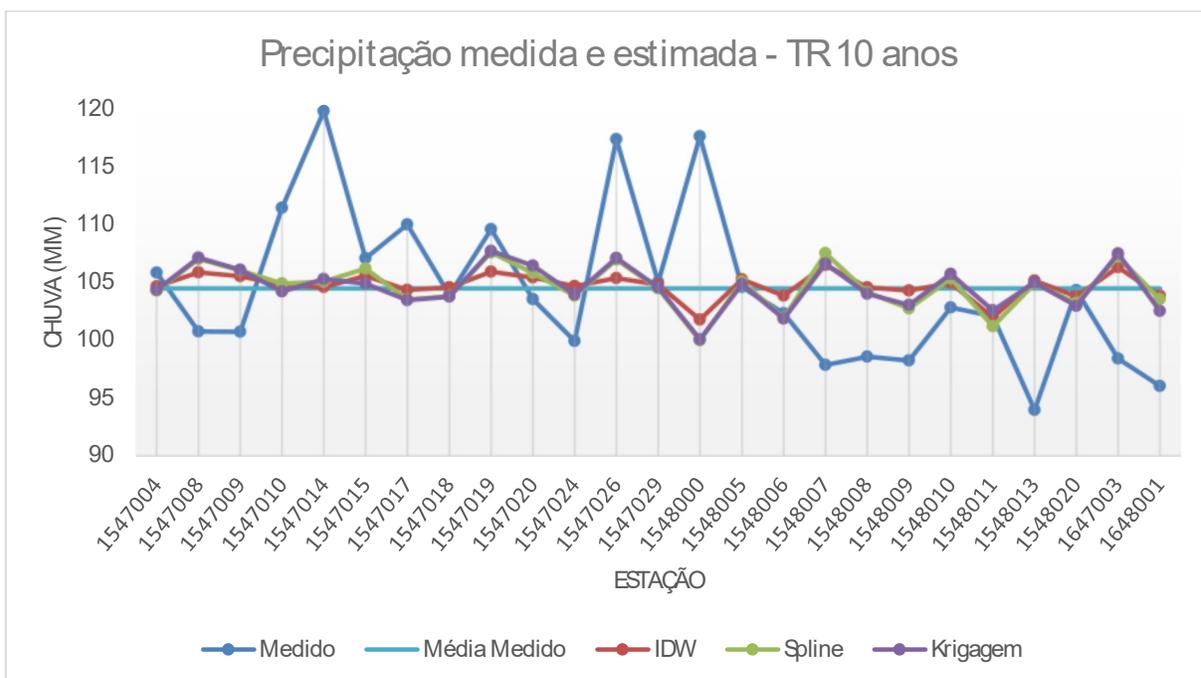


Figura 27 – Precipitação medida e estimada pelos 3 métodos para TR 10 anos

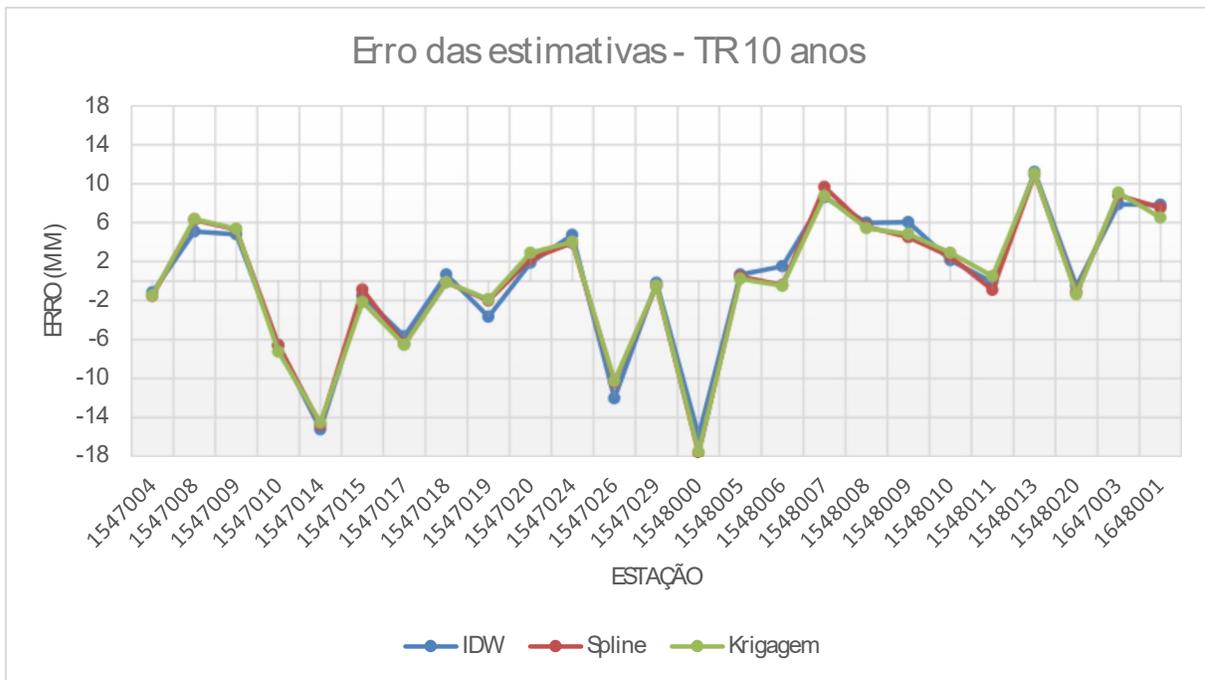


Figura 28 – Erro das estimativas geradas pelos 3 métodos para TR 10 anos

A Figura 29 apresenta gráficos de precipitação medida *versus* precipitação estimada e de precipitação medida *versus* erro da estimativa, para as interpolações realizadas pelos três métodos. Percebe-se maior dispersão nos valores estimados pelos métodos Spline e Krigagem.

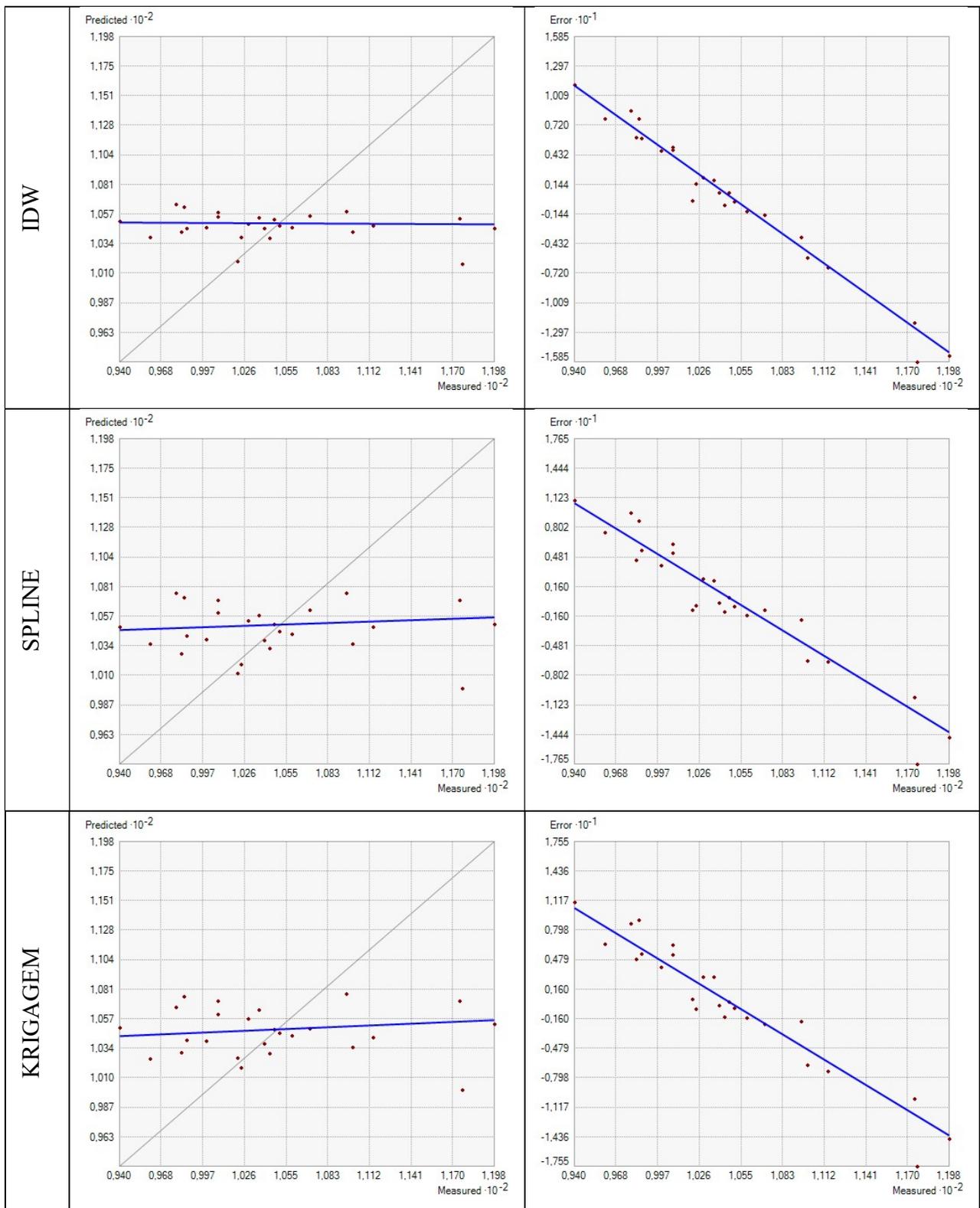


Figura 29 – Gráficos de precipitação medida (*Measured*) versus precipitação estimada (*Predicted*) e erro (*Error*) – TR 10 anos

A Tabela 7 apresenta os erros absoluto, percentual e quadrático médio calculados a partir dos resultados da validação cruzada para cada método de interpolação.

Tabela 7 – Erros médios gerados na validação cruzada – TR 10 anos

		<b>IDW</b>	<b>Spline</b>	<b>Krigagem</b>
EAM	Erro Absoluto Médio	5,26	5,24	5,28
EPM	Erro Percentual Médio	4,98%	4,96%	4,99%
EQM	Erro Quadrático Médio	47,97	48,97	48,42

Obteve-se o menor EAM e EPM na interpolação pelo método Spline, e o menor EQM pelo método IDW.

### 5.7 - INTERPOLAÇÃO DOS DADOS DE CHUVA – TR 25 ANOS

A Figura 30 apresenta os mapas gerados pelas interpolações da precipitação diária de período de retorno de 25 anos.

Notam-se algumas “ilhas” nos mapas gerados pelos métodos Spline e IDW.

Na área do mapa onde a densidade de estações pluviométricas é menor ocorrem irregularidades nas bordas, sendo que este efeito é aparentemente mais acentuado no mapa gerado pela Krigagem.

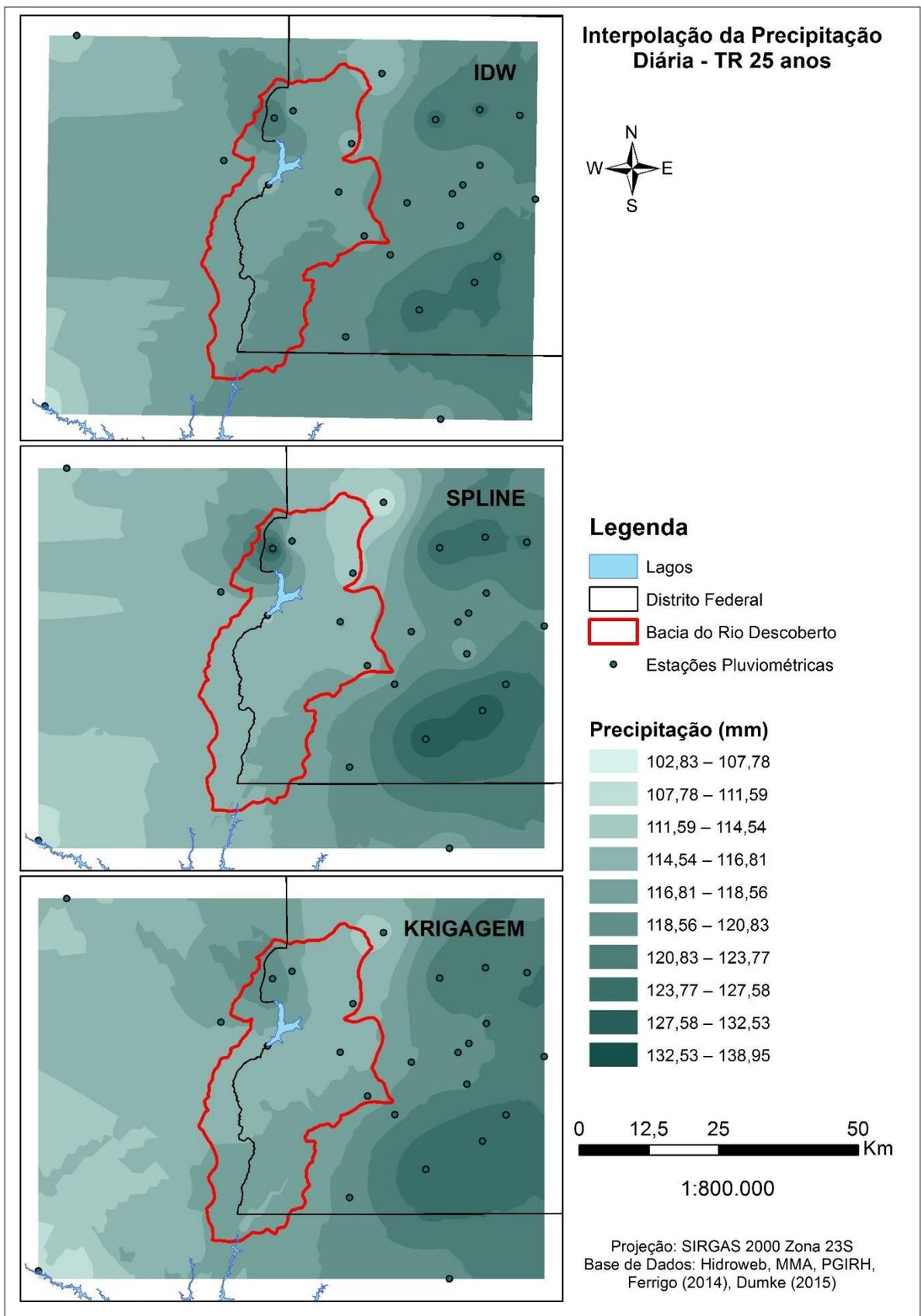


Figura 30 – Mapas de estimativa da precipitação diária de TR 25 anos gerados pelos três métodos de interpolação

Nas Figura 31 a Figura 33 são apresentados, para cada método de interpolação, gráficos com a precipitação diária de TR 25 anos medida e estimada, assim como o erro percentual das estimativas.

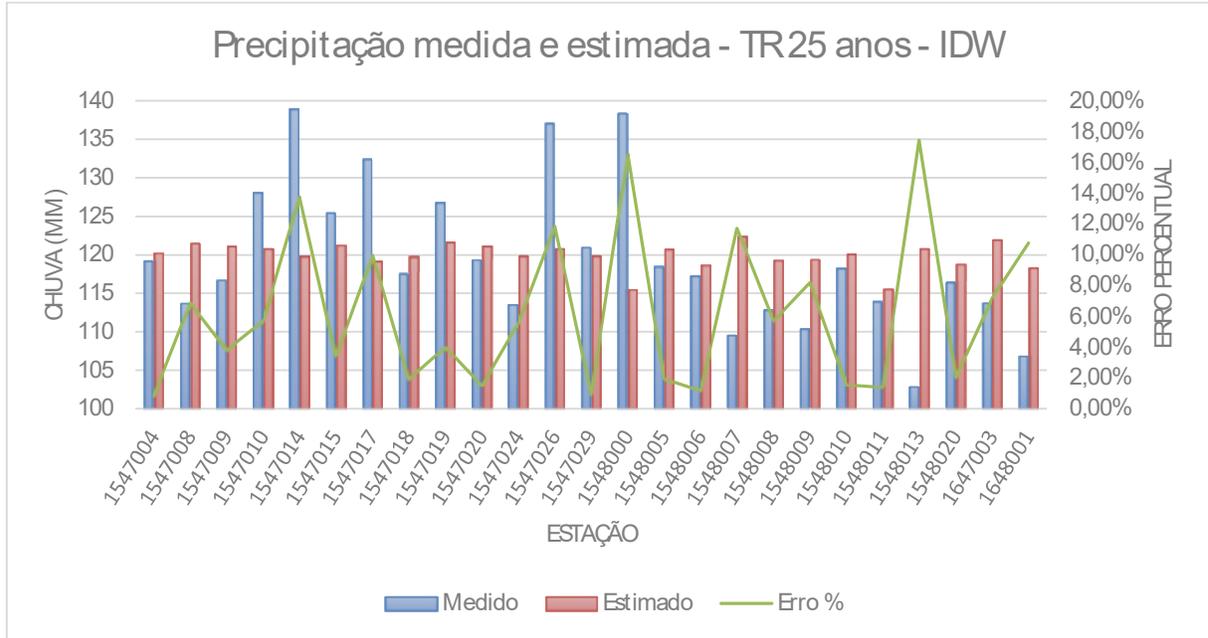


Figura 31 – Precipitação medida e estimada, e erro percentual das estimativas – IDW – TR 25 anos

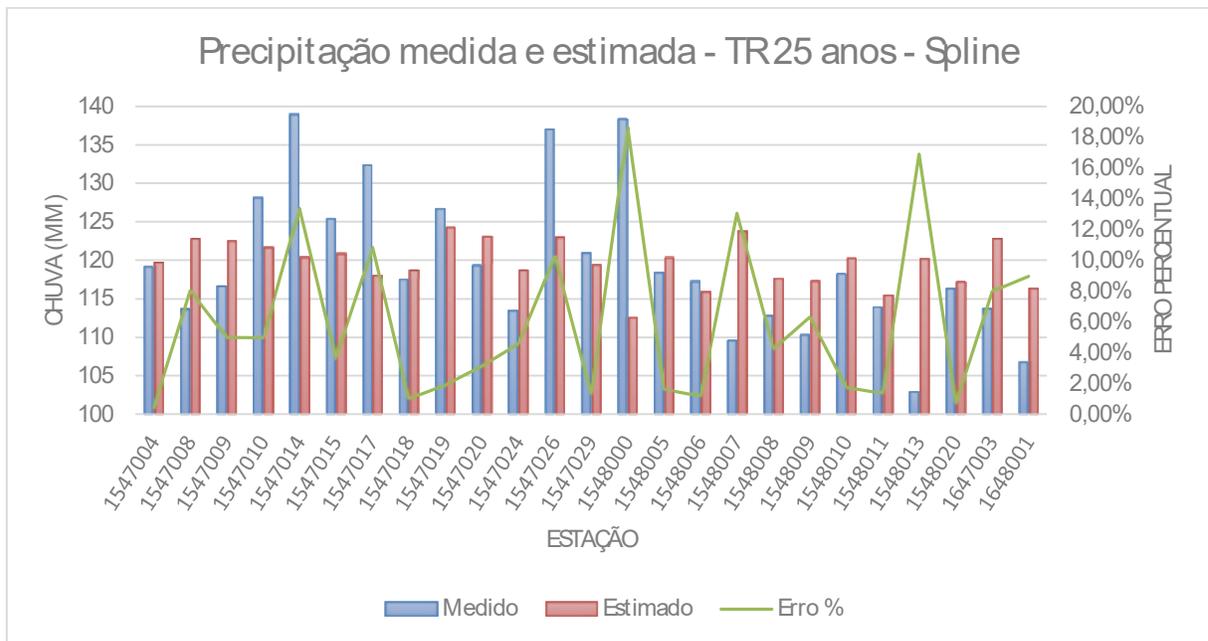


Figura 32 – Precipitação medida e estimada, e erro percentual das estimativas – Spline – TR 25 anos

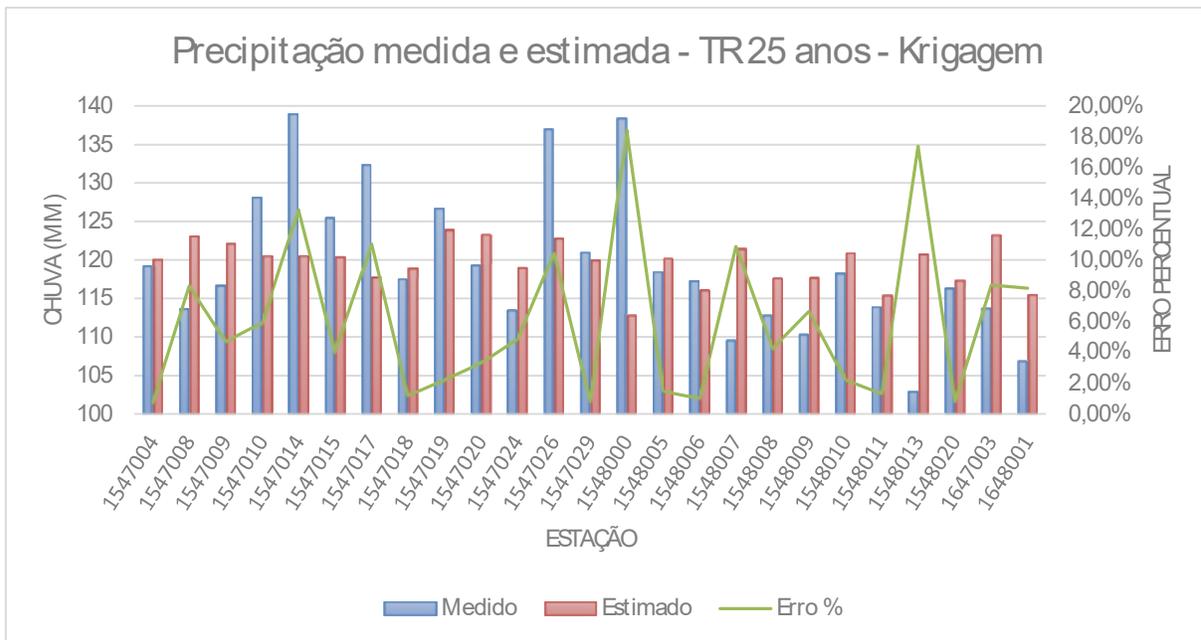


Figura 33 – Precipitação medida e estimada, e erro percentual das estimativas – Krigagem – TR 25 anos

A Figura 34 apresenta um gráfico com a precipitação diária de TR 25 anos medida, e estimada por cada método de interpolação empregado. Já no gráfico da Figura 35 são apresentados os erros das estimativas geradas pelos três métodos.

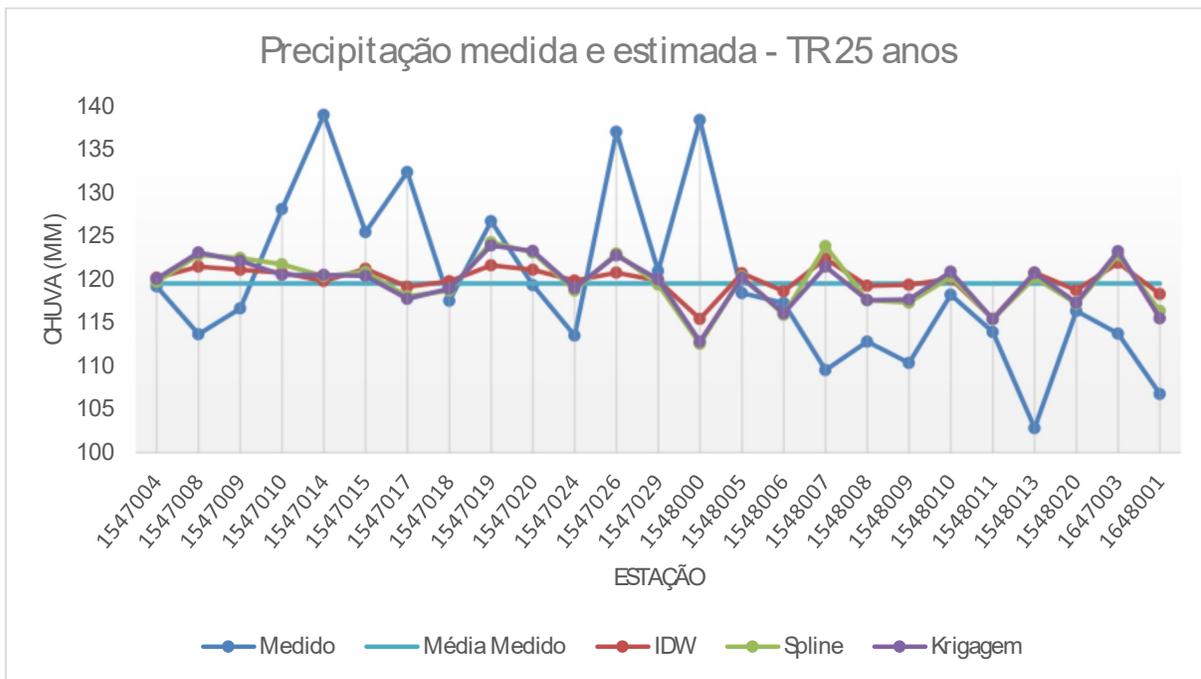


Figura 34 – Precipitação medida e estimada pelos 3 métodos para TR 25 anos

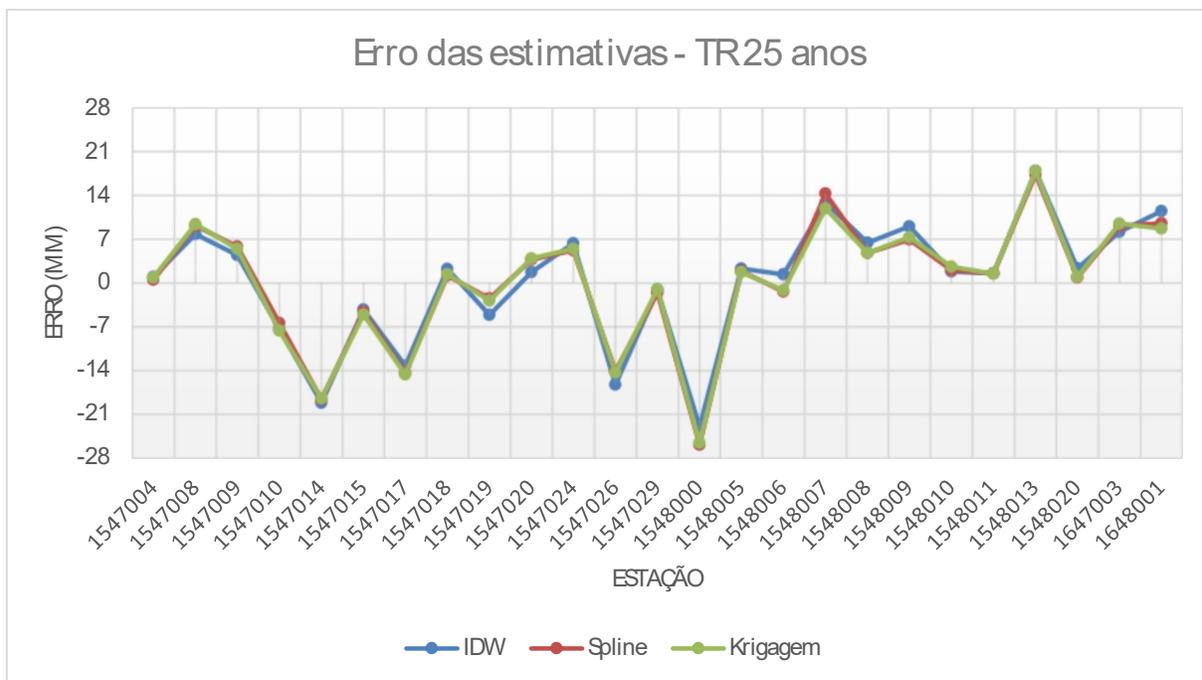


Figura 35 – Erro das estimativas geradas pelos 3 métodos para TR 25 anos

A Figura 36 apresenta gráficos de precipitação medida *versus* precipitação estimada e de precipitação medida *versus* erro da estimativa, para as interpolações realizadas pelos três métodos. Novamente é possível notar maior dispersão nos valores estimados pelos métodos Spline e Krigagem, o que provavelmente está relacionado ao menor EQM gerado pelo método IDW (Tabela 8).

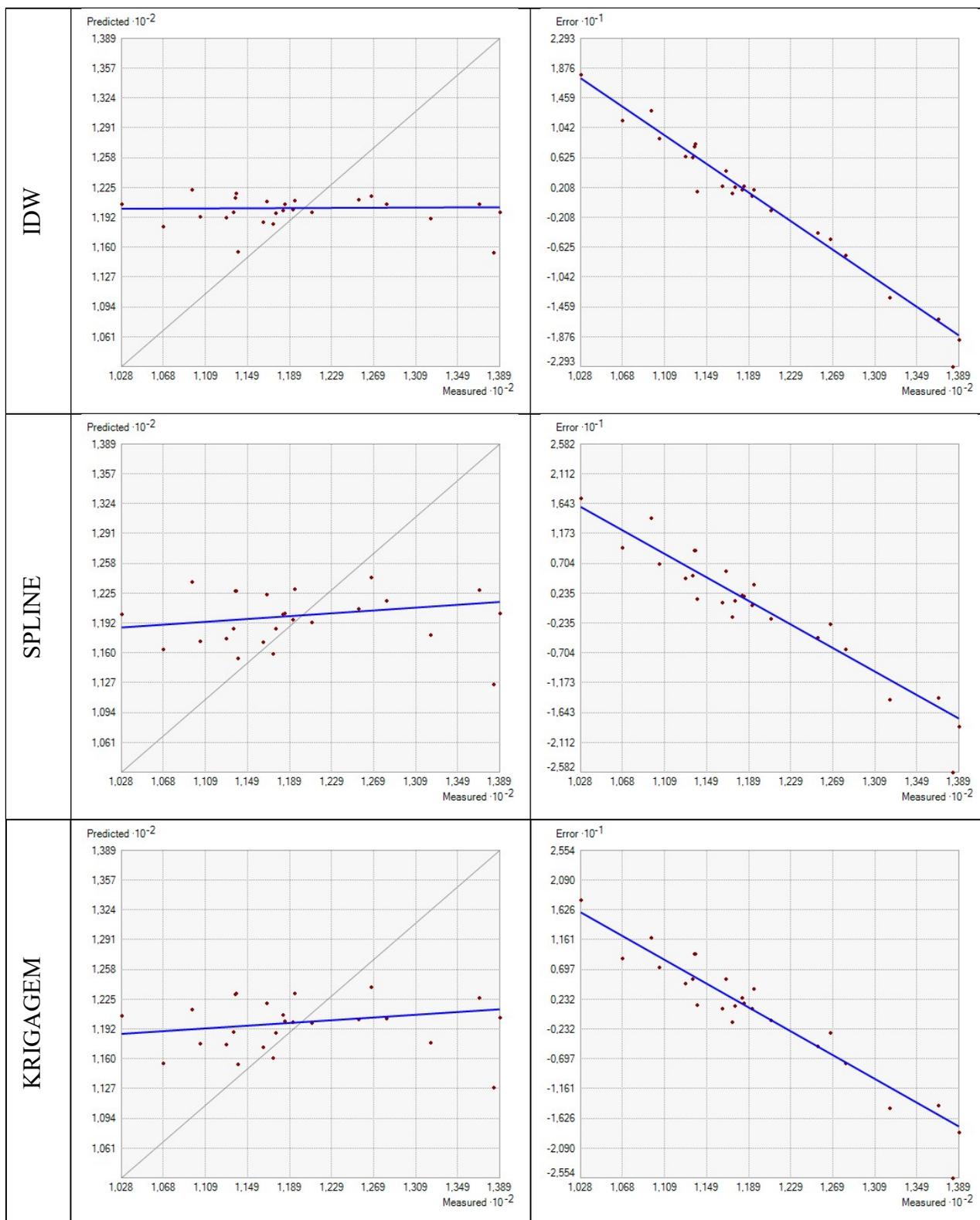


Figura 36 – Gráficos de precipitação medida (*Measured*) versus precipitação estimada (*Predicted*) e erro (*Error*) – TR 25 anos

A Tabela 8 apresenta os erros absoluto, percentual e quadrático médio calculados a partir dos resultados da validação cruzada para cada método de interpolação.

Tabela 8 – Erros médios gerados na validação cruzada – TR 25 anos

		<b>IDW</b>	<b>Spline</b>	<b>Krigagem</b>
EAM	Erro Absoluto Médio	7,53	7,32	7,36
EPM	Erro Percentual Médio	6,23%	6,05%	6,07%
EQM	Erro Quadrático Médio	95,50	96,33	95,51

Obeve-se o menor EAM e EPM na interpolação pelo método Spline, e o menor EQM pelo método IDW.

#### 5.8 - INTERPOLAÇÃO DOS DADOS DE CHUVA – TR 50 ANOS

A Figura 37 apresenta os mapas gerados pelas interpolações da precipitação diária de período de retorno de 50 anos.

Notam-se novamente algumas “ilhas” nos mapas gerados pelos métodos Spline e IDW, assim como bordas irregulares na área de menor densidade de estações pluviométricas dos três mapas.

A distribuição espacial da precipitação diária de TR 50 anos é semelhante nos três mapas gerados.

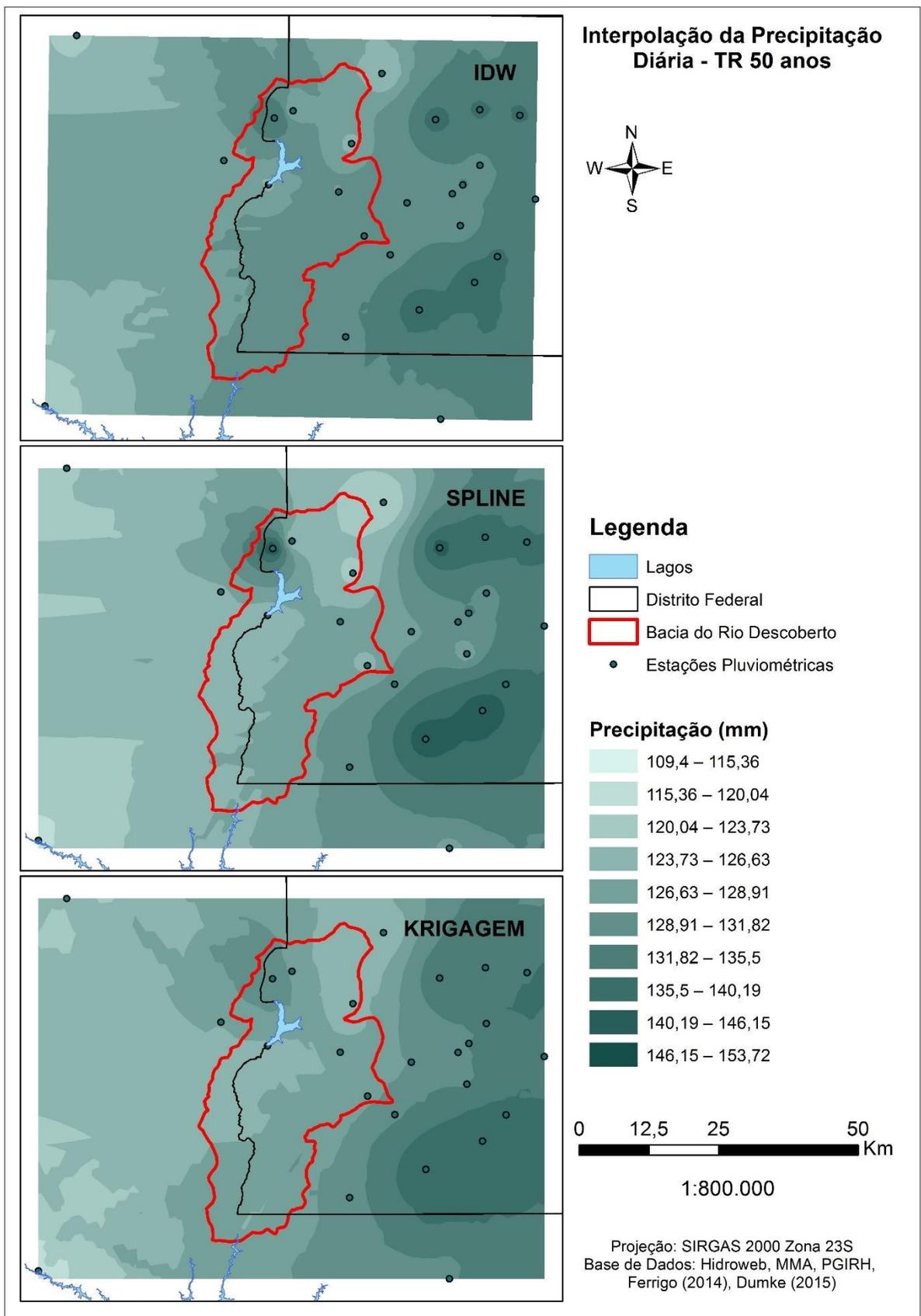


Figura 37 – Mapas de estimativa da precipitação diária de TR 50 anos gerados pelos três métodos de interpolação

Nas Figura 38 a Figura 40 são apresentados, para cada método de interpolação, gráficos com a precipitação diária de TR 50 anos medida e estimada, assim como o erro percentual das estimativas.

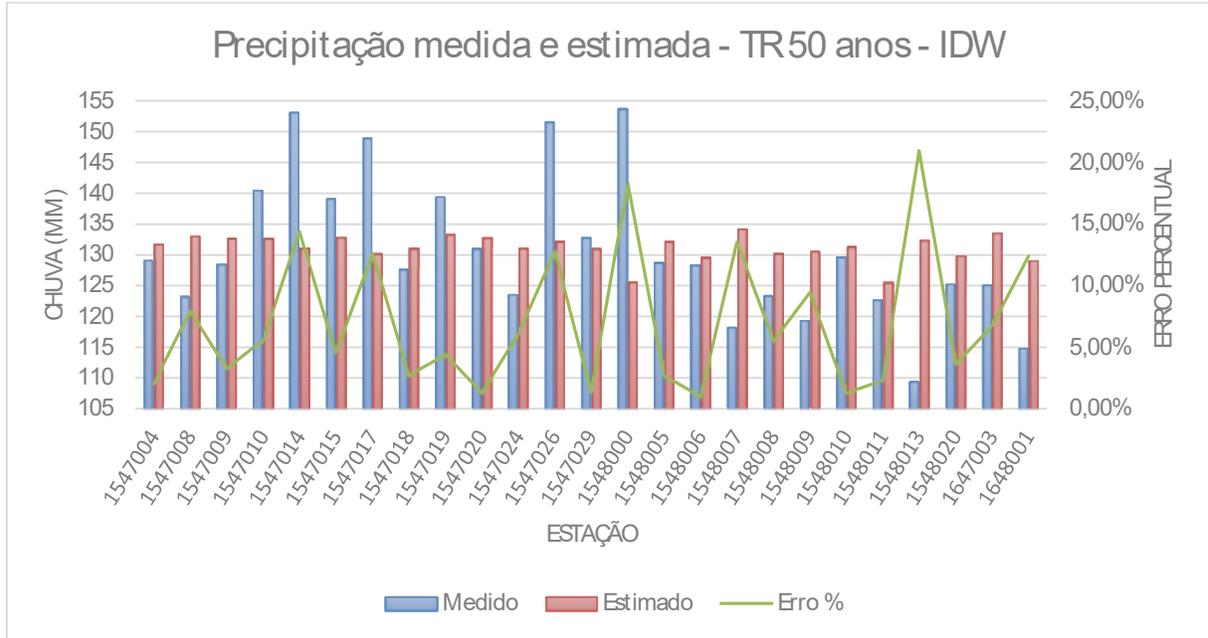


Figura 38 – Precipitação medida e estimada, e erro percentual das estimativas – IDW – TR 50 anos

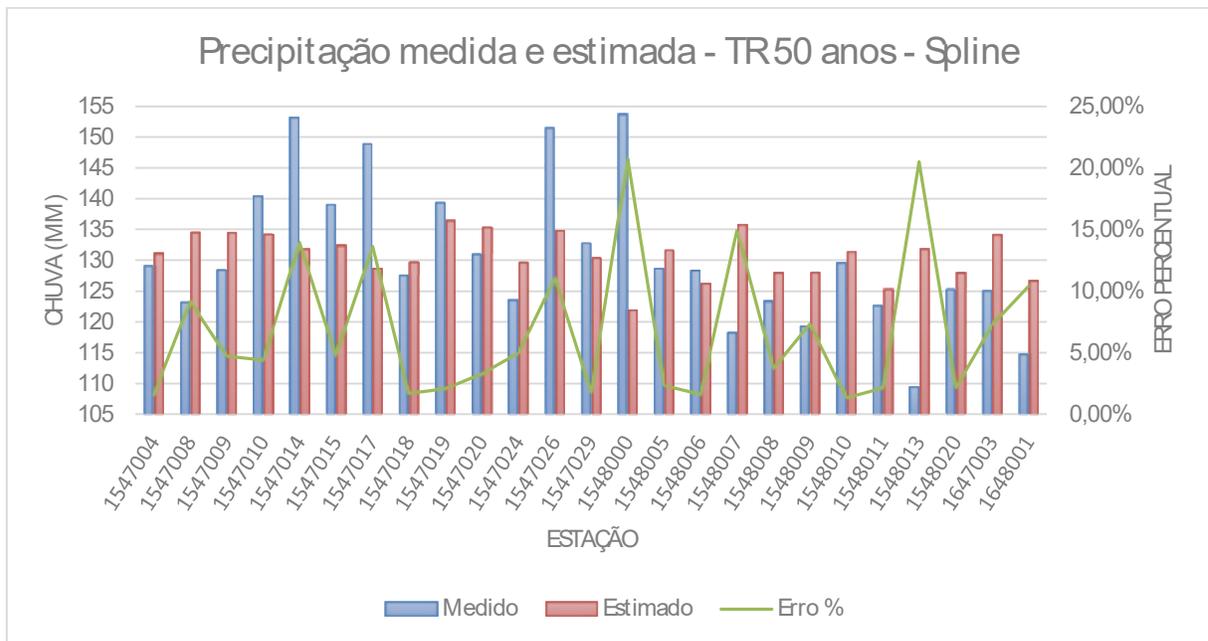


Figura 39 – Precipitação medida e estimada, e erro percentual das estimativas – Spline – TR 50 anos

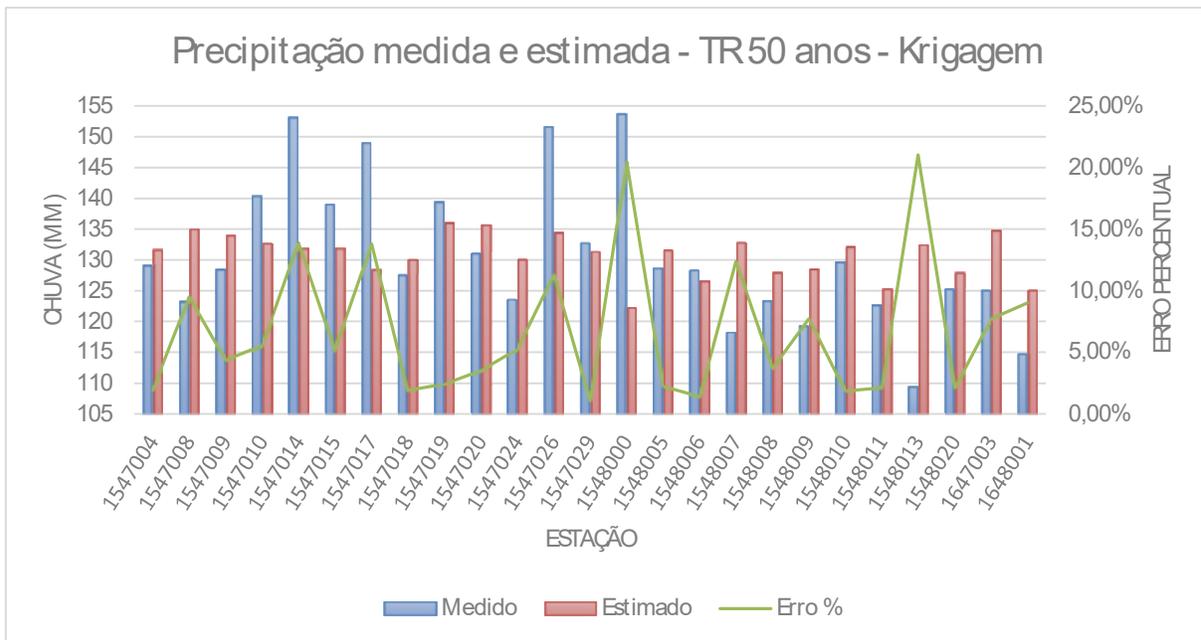


Figura 40 – Precipitação medida e estimada, e erro percentual das estimativas – Krigagem – TR 50 anos

A Figura 41 apresenta um gráfico com a precipitação diária de TR 50 anos medida, e estimada por cada método de interpolação empregado, e no gráfico da Figura 42 são apresentados os erros das estimativas geradas pelos três métodos.

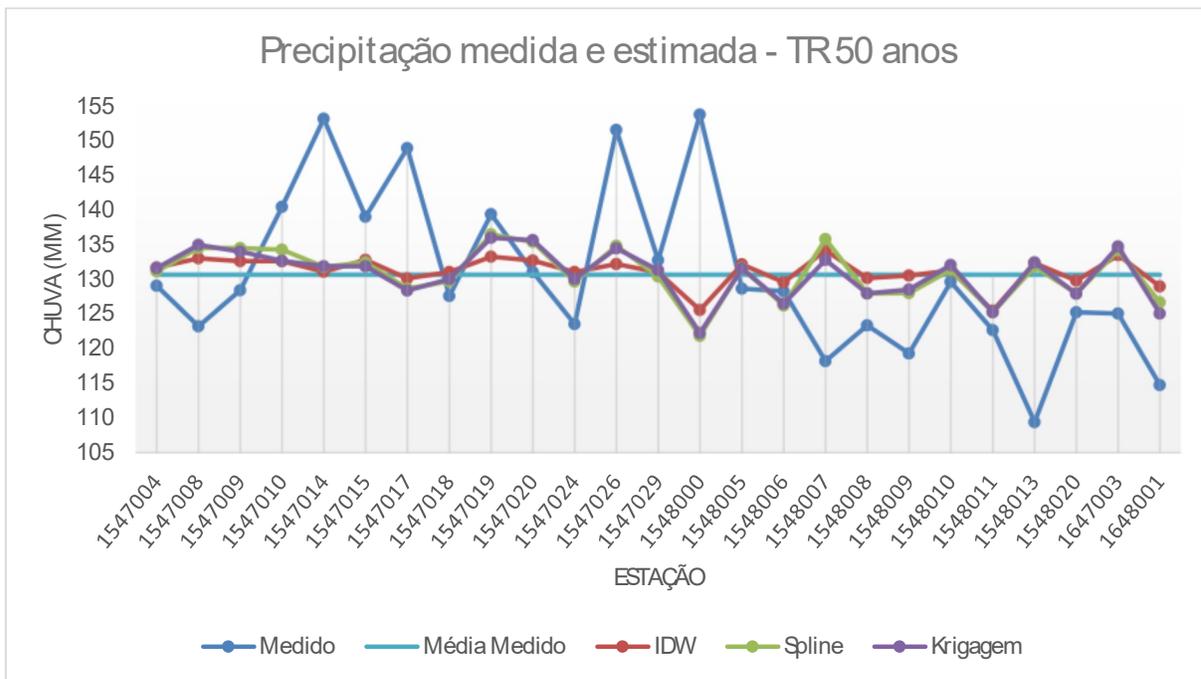


Figura 41 – Precipitação medida e estimada pelos 3 métodos para TR 50 anos

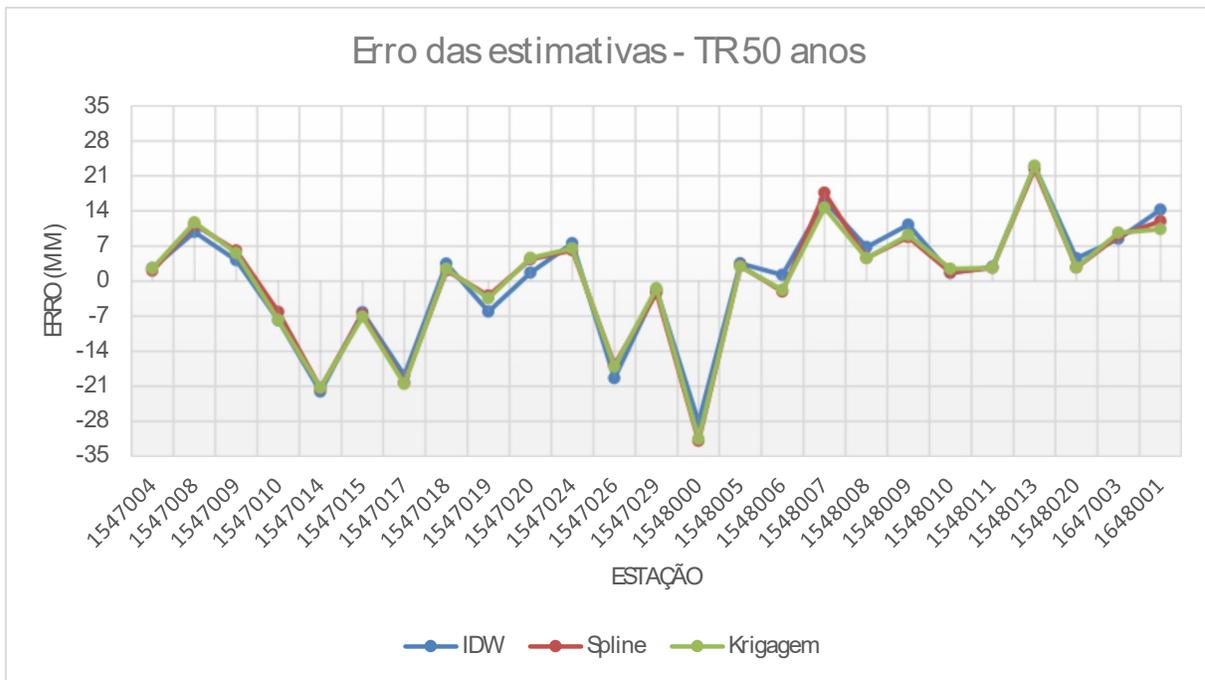


Figura 42 – Erro das estimativas geradas pelos 3 métodos para TR 50 anos

A Figura 43 apresenta gráficos de precipitação medida *versus* precipitação estimada e de precipitação medida *versus* erro da estimativa, para as interpolações realizadas pelos três métodos. Novamente é possível notar maior dispersão nos valores estimados pelos métodos Spline e Krigagem, no entanto o menor EQM foi o gerado pelo método da Krigagem, diferente do que ocorreu nas interpolações das precipitações de TR 5, 10 e 25 anos.

O fato de os valores estimados estarem mais dispersos não leva necessariamente a um EQM maior, pois os “valores dispersos” podem estar mais próximos dos valores medidos do que no método em que as estimativas ficaram sempre próximas da média dos valores medidos, neste caso o IDW.

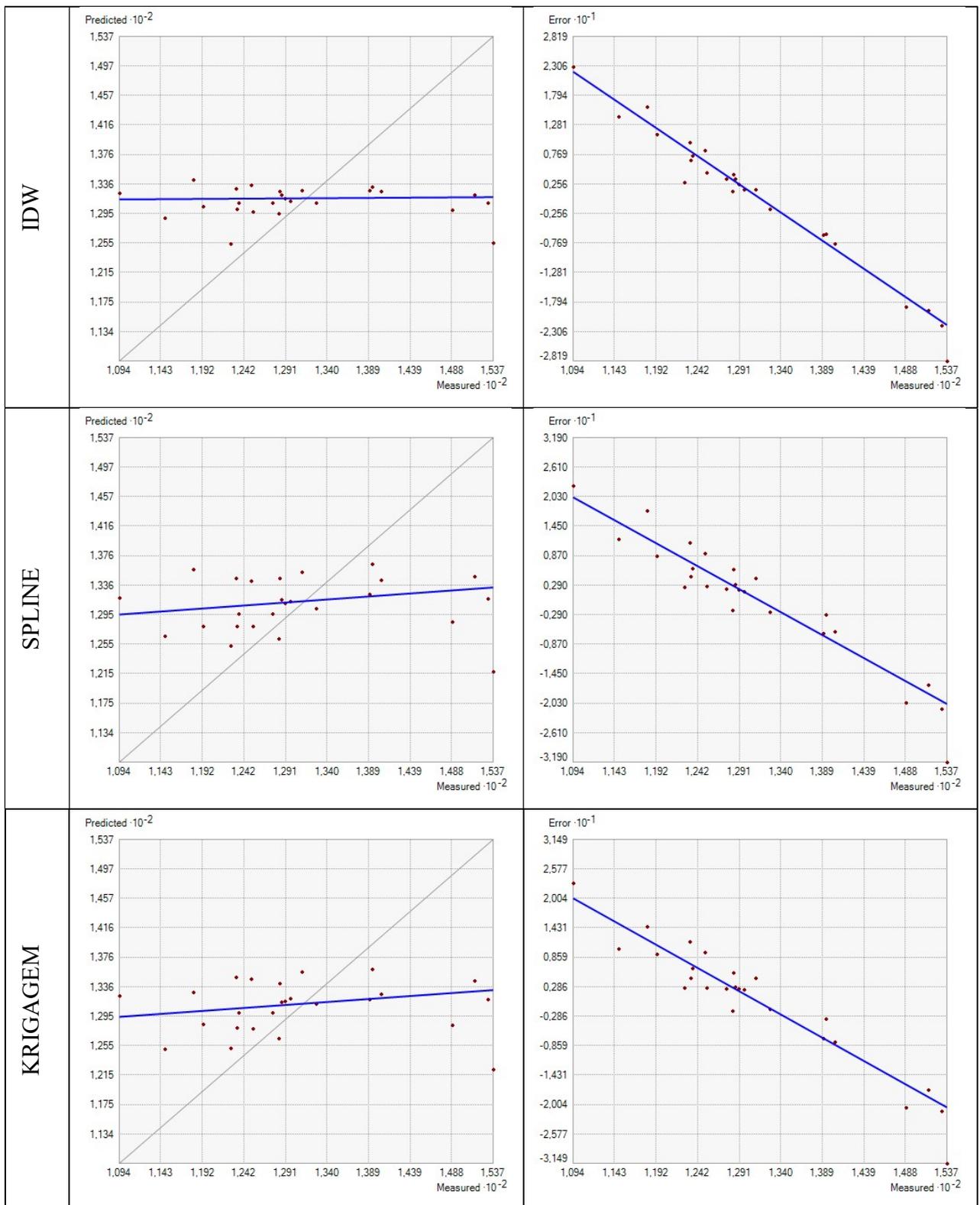


Figura 43 – Gráficos de precipitação medida (*Measured*) versus precipitação estimada (*Predicted*) e erro (*Error*) – TR 50 anos

A Tabela 9 apresenta os erros absoluto, percentual e quadrático médio calculados a partir dos resultados da validação cruzada para cada método de interpolação.

Tabela 9 – Erros médios gerados na validação cruzada – TR 50 anos

		<b>IDW</b>	<b>Spline</b>	<b>Krigagem</b>
EAM	Erro Absoluto Médio	9,32	9,07	9,10
EPM	Erro Percentual Médio	7,07%	6,86%	6,86%
EQM	Erro Quadrático Médio	144,62	146,22	144,37

Obeve-se o menor EAM e EPM na interpolação pelo método Spline, e o menor EQM pelo método da Krigagem.

### 5.9 - INTERPOLAÇÃO DOS DADOS DE CHUVA – TR 100 ANOS

A Figura 44 apresenta os mapas gerados pelas interpolações da precipitação diária de período de retorno de 100 anos.

Notam-se várias “ilhas” no mapa gerado pelo método IDW.

Nos três mapas ocorreram descontinuidades e bordas irregulares na área de menor densidade de estações pluviométricas.

Os mapas apresentam distribuição espacial da precipitação diária de TR 100 anos, sendo que visualmente ocorre maior semelhança entre os mapas gerados pelos métodos Spline e Krigagem.

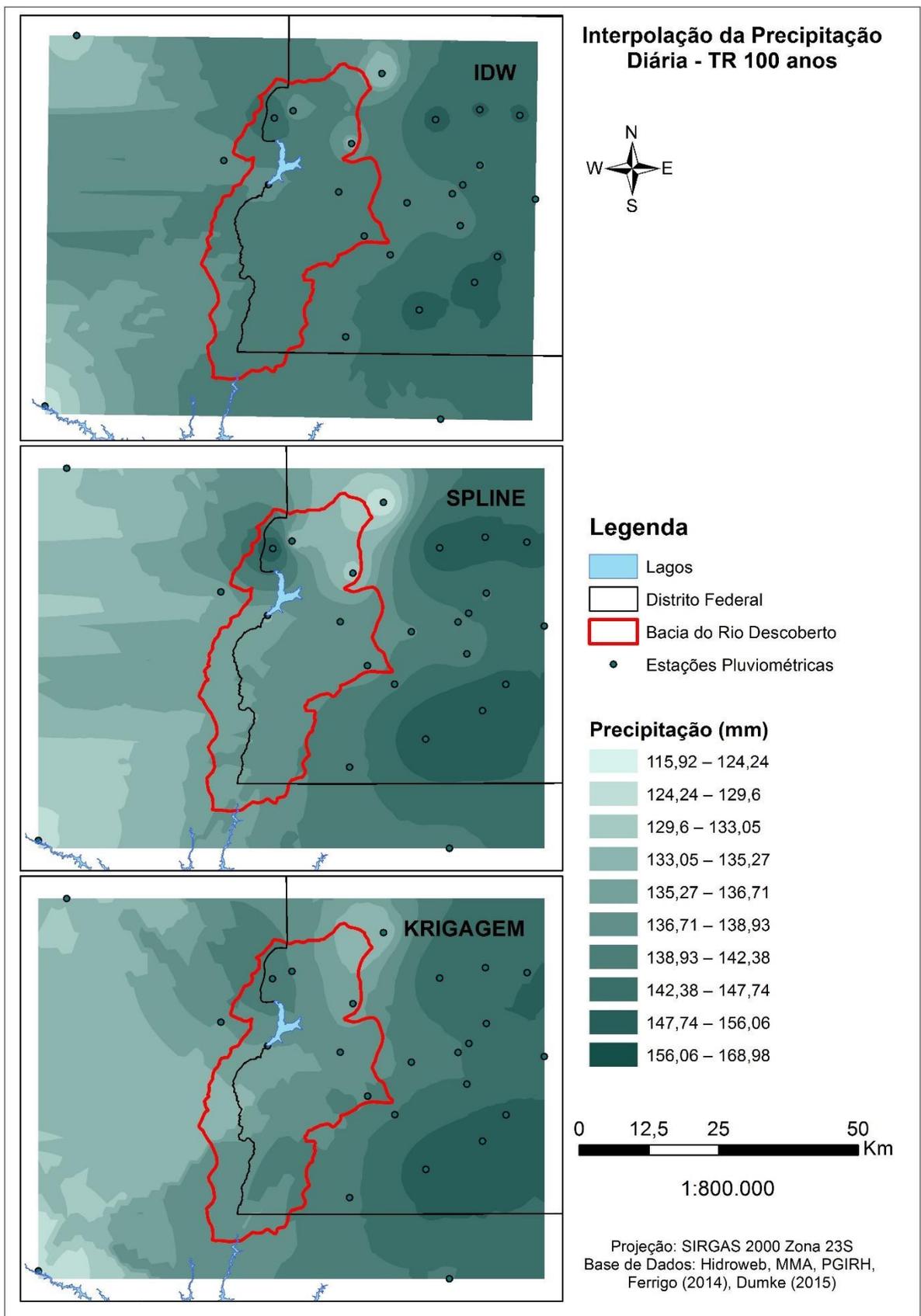


Figura 44 – Mapas de estimativa da precipitação diária de TR 100 anos gerados pelos três métodos de interpolação

Nas Figura 45 a Figura 47 são apresentados, para cada método de interpolação, gráficos com a precipitação diária de TR 100 anos medida e estimada, assim como o erro percentual das estimativas.

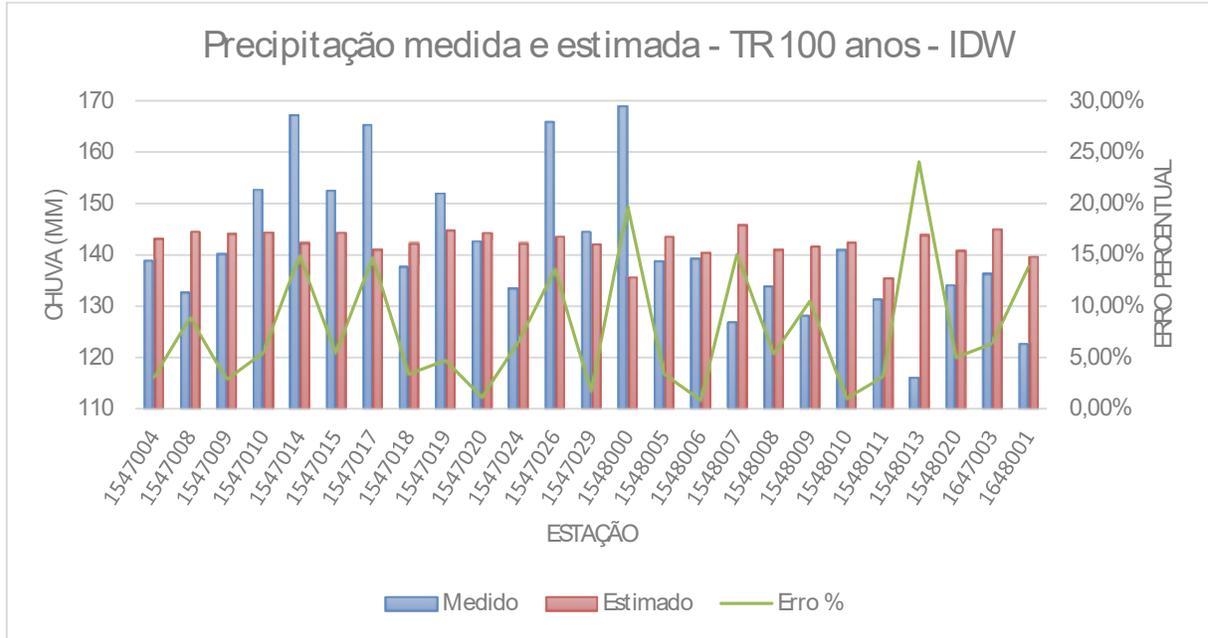


Figura 45 – Precipitação medida e estimada, e erro percentual das estimativas – IDW – TR 100 anos

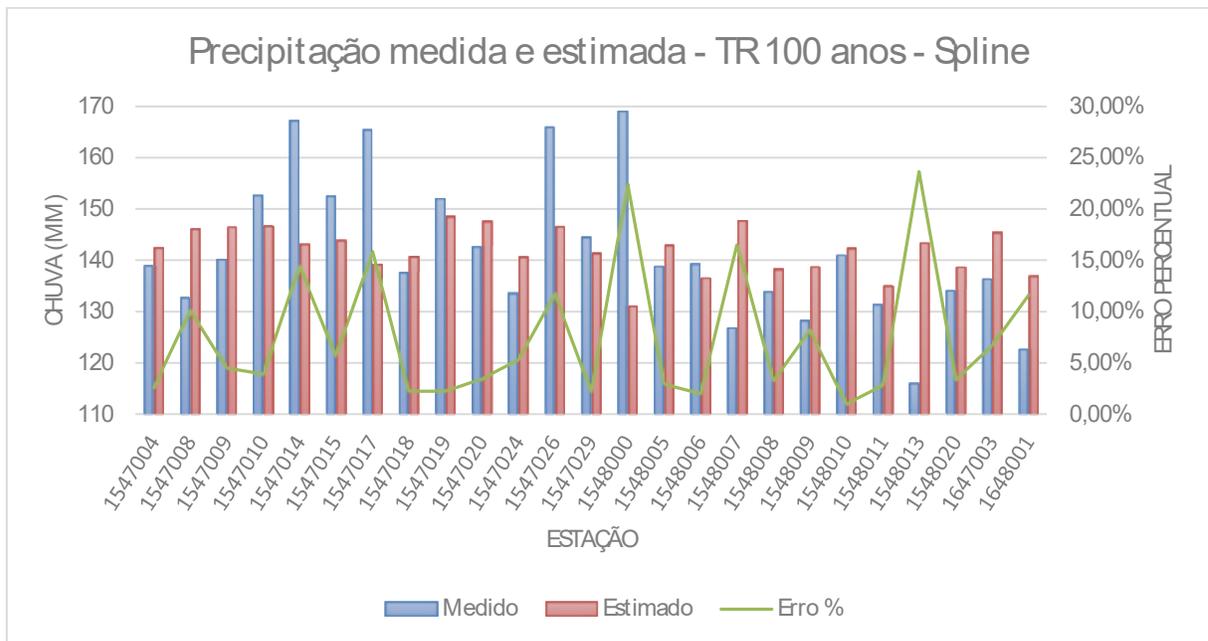


Figura 46 Precipitação medida e estimada, e erro percentual das estimativas – Spline – TR 100 anos

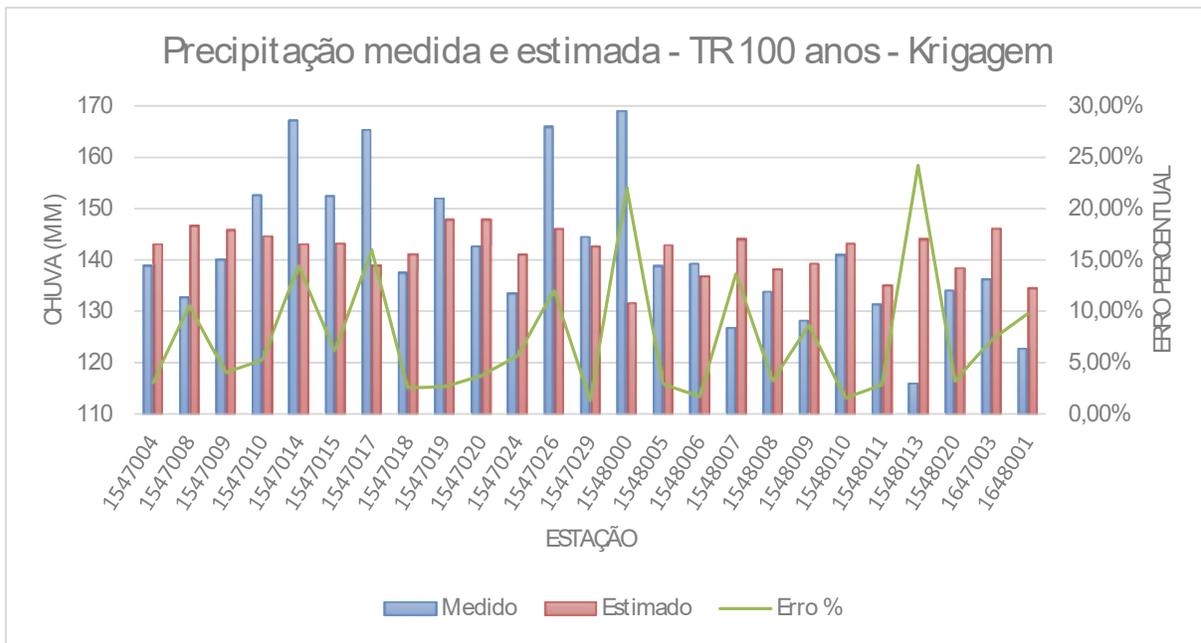


Figura 47 Precipitação medida e estimada, e erro percentual das estimativas – Krigagem – TR 100 anos

A Figura 48 apresenta um gráfico com a precipitação diária de TR 50 anos medida, e estimada por cada método de interpolação empregado, e no gráfico da Figura 49 são apresentados os erros das estimativas geradas pelos três métodos.

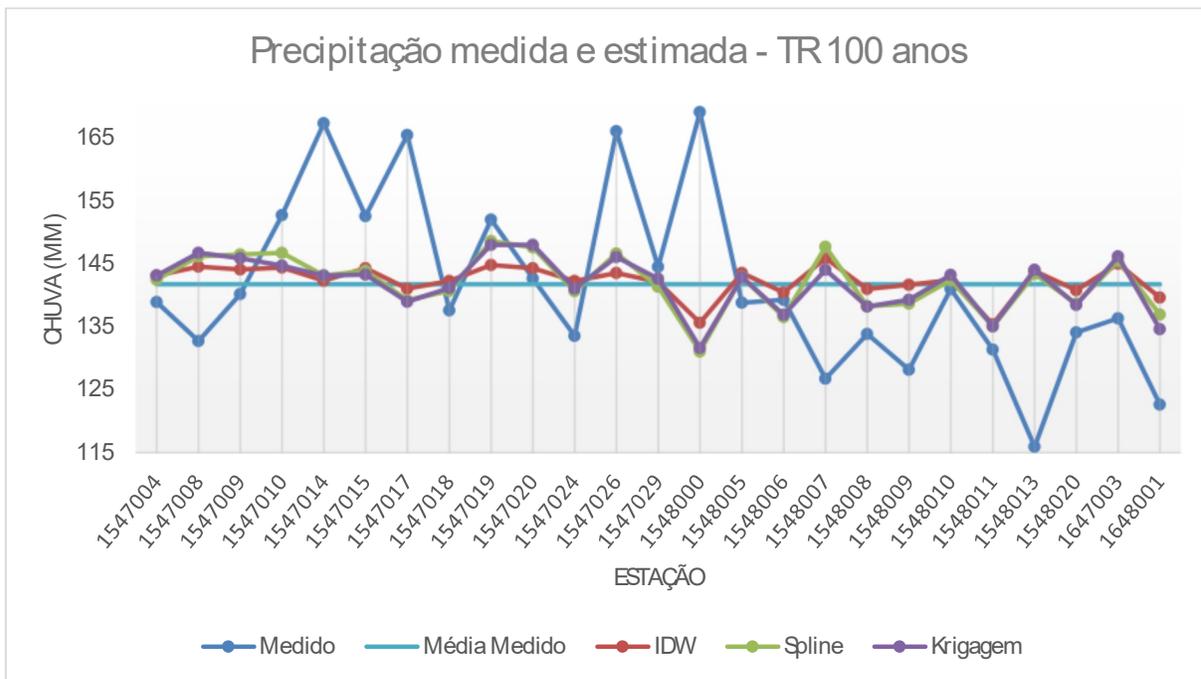


Figura 48 – Precipitação medida e estimada pelos 3 métodos para TR 100 anos

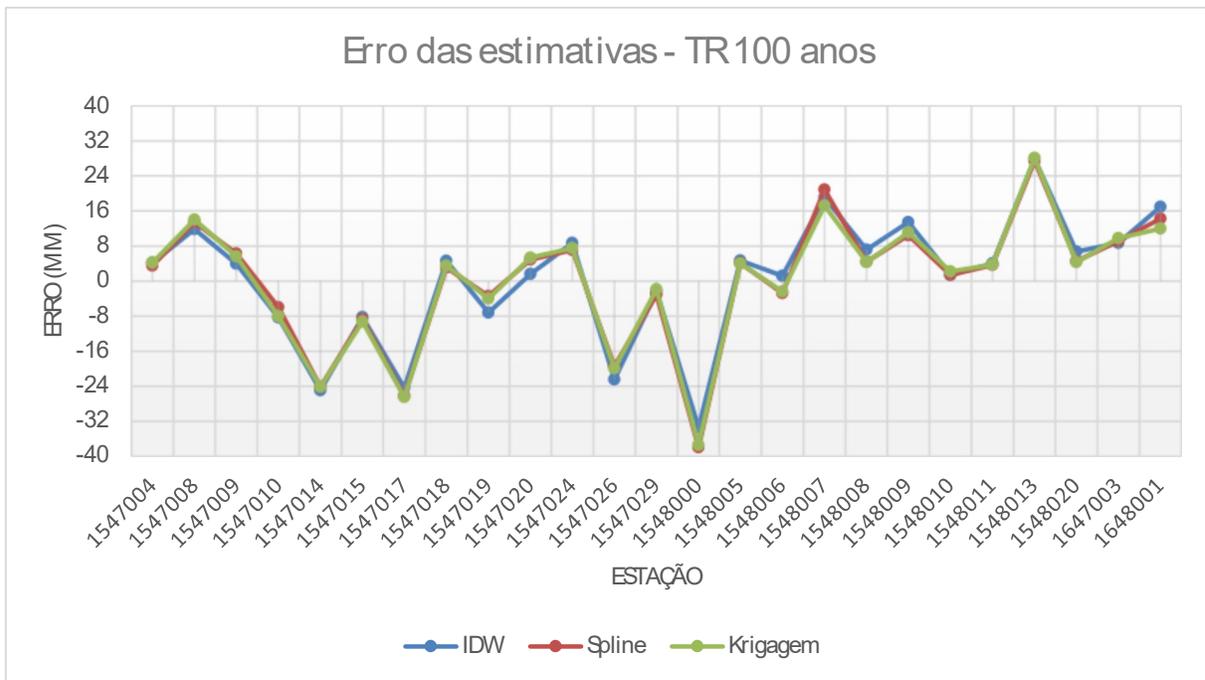


Figura 49 – Erro das estimativas geradas pelos 3 métodos para TR 100 anos

A Figura 50 apresenta gráficos de precipitação medida *versus* precipitação estimada e de precipitação medida *versus* erro da estimativa, para as interpolações realizadas pelos três métodos.

Novamente é possível notar maior dispersão nos valores estimados pelos métodos Spline e Krigagem. Nos gráficos gerados pela interpolação por estes métodos, nota-se também que a linha de tendência dos pontos (linha azul) tem inclinação mais próxima da linha ideal (linha cinza), em comparação ao gráfico gerado pelo método IDW.

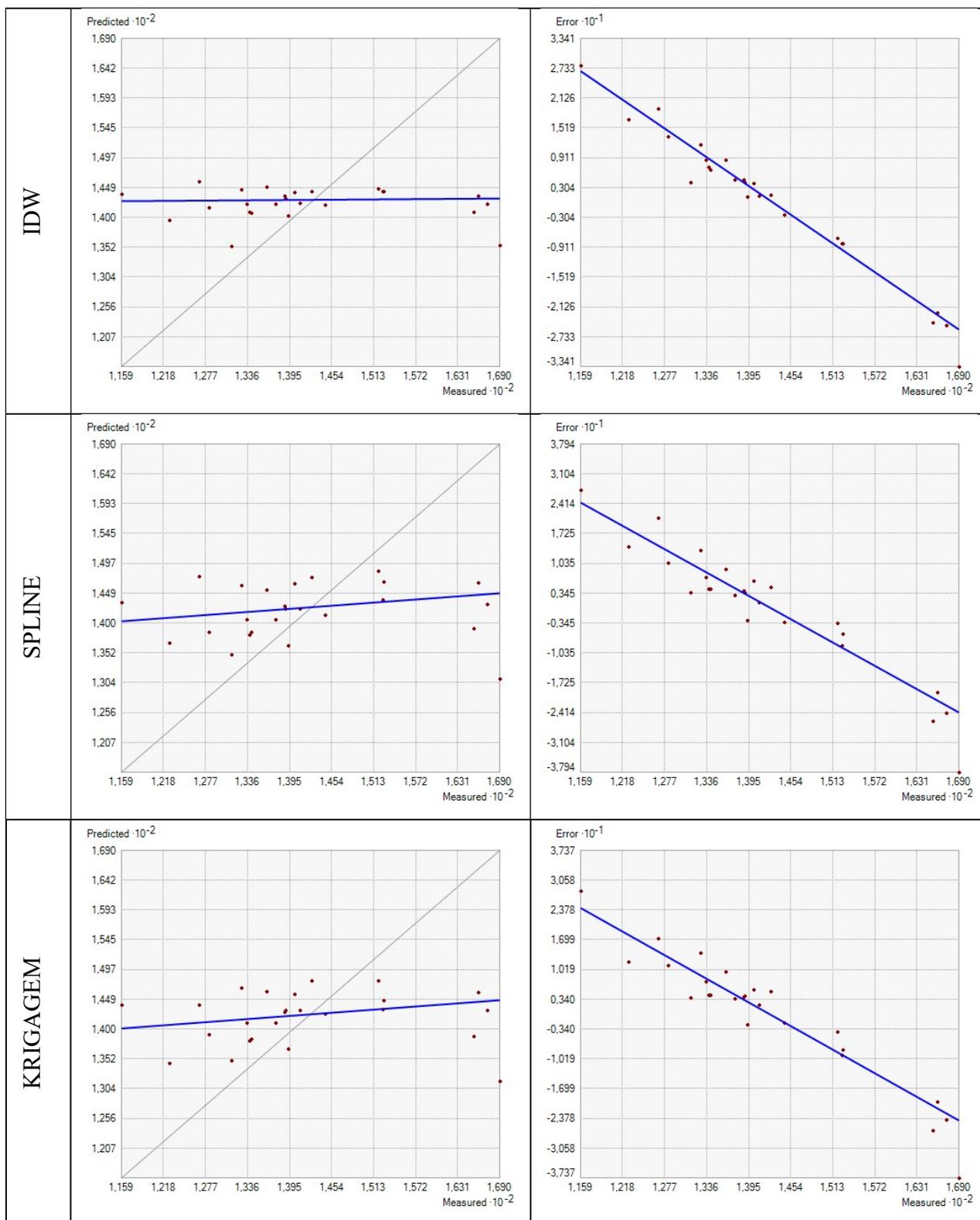


Figura 50 – Gráficos de precipitação medida (*Measured*) versus precipitação estimada (*Predicted*) e erro (*Error*) – TR 100 anos

A Tabela 10 apresenta os erros absoluto, percentual e quadrático médio calculados a partir dos resultados da validação cruzada para cada método de interpolação.

Tabela 10 – Erros médios gerados na validação cruzada – TR 100 anos

		<b>IDW</b>	<b>Spline</b>	<b>Krigagem</b>
EAM	Erro Absoluto Médio	11,09	10,81	10,82
EPM	Erro Percentual Médio	7,77%	7,54%	7,53%
EQM	Erro Quadrático Médio	205,05	207,85	204,55

Obteve-se menor EAM na interpolação pelo método Spline, ainda que muito próximo do valor obtido pela Krigagem. O método da Krigagem gerou o menor EPM e EQM.

## 5.10 - ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS

Em todas as interpolações realizadas, os mapas apresentaram descontinuidades e bordas irregulares na região oeste da área de estudo, como consequência da densidade de estações pluviométricas muito menor nesta região. Estas irregularidades são mais acentuadas nos mapas gerados pela Krigagem.

Em geral, os mapas gerados pelos métodos determinísticos (IDW e Spline) apresentaram algumas “ilhas” isoladas, sendo que aparentemente isto ocorreu mais nos mapas das interpolações pelo método IDW.

Existe grande variação entre os valores de precipitação máxima diária medidos em estações pluviométricas vizinhas, o que deve ter contribuído para o surgimento das “ilhas” nos mapas. Esta variação se deve provavelmente à predominância de chuvas convectivas na região, que ocorrem geralmente em pequenas áreas e possuem pequena duração.

A variação espacial não uniforme das precipitações máximas diárias na área de estudo, mesmo em distâncias pequenas, juntamente com a variação da densidade de estações pluviométricas e a distribuição não homogênea destas estações no espaço, dificultam a geração de mapas com curvas mais suaves. Observa-se também que não há uma tendência espacial clara de distribuição das precipitações máximas diárias na área estudada.

Outros estudos já observaram a influência da densidade e da distribuição das estações na habilidade de se interpolar padrões espaciais (Bega et al., 2005; Gervais et al., 2014; Hofstra et al., 2008).

Observou-se que os valores estimados ficaram sempre próximos da média dos valores medidos, de forma que os valores mais extremos das séries de dados possuem os maiores erros em sua estimativa pelos interpoladores. Isso deve ocorrer também pela já mencionada variação entre valores medidos em estações vizinhas.

A Tabela 11 resume os erros médios encontrados nas interpolações por cada método, para cada período de retorno. Os erros médios menores estão grifados em cinza.

Tabela 11 – Erros médios gerados nas interpolações para os diversos períodos de retorno

	TR 2 anos			TR 5 anos			TR 10 anos		
	IDW	SPL	KRI	IDW	SPL	KRI	IDW	SPL	KRI
EAM	3,34	3,45	3,37	4,00	3,97	3,97	5,26	5,24	5,28
EPM	4,52%	4,67%	4,56%	4,27%	4,23%	4,24%	4,98%	4,96%	4,99%
EQM	17,20	18,79	17,09	25,57	26,30	26,32	47,97	48,97	48,42
	TR 25 anos			TR 50 anos			TR 100 anos		
	IDW	SPL	KRI	IDW	SPL	KRI	IDW	SPL	KRI
EAM	7,53	7,32	7,36	9,32	9,07	9,10	11,09	10,81	10,82
EPM	6,23%	6,05%	6,07%	7,07%	6,86%	6,86%	7,77%	7,54%	7,53%
EQM	95,50	96,33	95,51	144,62	146,22	144,37	205,05	207,85	204,55

Quanto ao EQM, percebe-se melhores resultados para o método IDW nos períodos de retorno de 5 a 25 anos e para a Krigagem nos períodos de retorno maiores, de 50 e 100 anos, além do de 2 anos.

Os erros de estimativa gerados nas interpolações pelos diferentes métodos ficaram sempre muito próximos, de forma que não é possível apontar um método como o melhor para interpolar os dados de precipitação máxima diária.

Nas interpolações realizadas para os 6 diferentes períodos de retorno, o método IDW obteve menor EAM e EPM uma vez, e menor EQM três vezes. O método Spline obteve menor EAM 5 vezes, menor EPM 4 vezes, e menor EQM nenhuma vez. O método da Krigagem obteve menor EPM uma vez, menor EQM 3 vezes, e menor EAM nenhuma vez.

É interessante observar que o método Spline obteve menor EAM em 5 dos 6 períodos de retorno analisados, porém em nenhum deles alcançou o menor EQM.

A Tabela 12 apresenta as médias dos erros encontrados nas interpolações de todos os períodos de retorno, por método de interpolação.

Tabela 12 – Médias dos erros gerados nas interpolações dos diversos períodos de retorno

		IDW	Spline	Krigagem
EAM	Erro Absoluto Médio	6,76	6,64	6,65
EPM	Erro Percentual Médio	5,81%	5,72%	5,71%
EQM	Erro Quadrático Médio	89,32	90,74	89,37

Observa-se a proximidade dos valores calculados para os diferentes métodos, além de que, para cada tipo de erro calculado, um método distinto apresentou a menor média (as médias menores estão grifadas em cinza).

## 6. CONCLUSÃO

Os mapas gerados apresentaram algumas “ilhas” e bordas irregulares, principalmente devido à variação da precipitação máxima diária entre estações próximas, causada provavelmente pela predominância de chuvas convectivas na região, assim como a menor densidade de estações pluviométricas em parte da área de estudo. Outro fator que contribuiu para isso é a distribuição não homogênea das estações no espaço.

Em geral, as “ilhas” se formaram mais nos mapas gerados pelos métodos determinísticos (IDW e Spline de Tensão), e os mapas gerados pela Krigagem Ordinária, método geoestatístico, apresentaram um pouco mais de irregularidades nas áreas com pouca densidade de estações.

Os erros médios encontrados nos resultados das interpolações (EAM, EPM e EQM), para todos os métodos, aumentaram conforme o período de retorno interpolado aumentou. O Erro Percentual Médio, por exemplo, foi de 4,52% para o TR 2 anos a 7,77% para o TR 100 anos.

O Erro Absoluto Médio variou de 3,34 a 11,09 mm para TR's de 2 e 100 anos respectivamente. Já o Erro Quadrático Médio variou de 17,09 a 205,05 para TR's de 2 e 100 anos respectivamente.

Os erros de estimativa gerados nas interpolações pelos diferentes métodos ficaram sempre muito próximos, de forma que não é possível apontar o melhor método, dentre os três avaliados, para a interpolação da precipitação máxima diária na área estudada. Em geral, os métodos IDW, Spline de Tensão e Krigagem Ordinária apresentaram resultados similares na avaliação por validação cruzada.

Em comparação com outros estudos sobre métodos de interpolação que usaram valores de precipitação total anual, mensal ou sazonal, percebe-se que os métodos apresentam mais dificuldade para interpolar e gerar mapas de distribuição espacial de dados de eventos extremos.

Uma sugestão para futuros trabalhos sobre interpolação espacial de precipitação máxima diária é utilizar métodos de interpolação que considerem também a topografia da área de estudo.

## 7. REFERÊNCIAS

- Alves, E. D. L., e Vecchia, F. A. S. (2011). “Análise de diferentes métodos de interpolação para a precipitação pluviométrica no Estado de Goiás.” *Acta Scientiarum. Human and Social Sciences*, 33(2), 193–197.
- Bega, R. M., Vieira, S. R., De Maria, I. C., Dechen, S. C. F., e De Castro, O. M. (2005). “Variabilidade Espacial das Precipitações Pluviais Diárias em Uma Estação Experimental, em Pindorama, SP.” *Bragantia*, 64(1), 149–156.
- Borges, P. D. A., Franke, J., Anunciação, Y. M. T., Weiss, H., e Bernhofer, C. (2015). “Comparison of spatial interpolation methods for the estimation of precipitation distribution in Distrito Federal, Brazil.” *Theoretical and Applied Climatology*, 123(1), 335–348.
- CAESB. (2016). “Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal.” <[www.caesb.df.gov.br](http://www.caesb.df.gov.br)> (set. 10, 2016).
- Cecílio, R. A., Xavier, A. C., Pruski, F. F., Hollanda, P. de, e Pezzopane, J. E. M. (2009). “Avaliação de interpoladores para os parâmetros das equações de chuvas intensas no Espírito Santo.” *Revista Ambiente & Água*, 4(3), 82–92.
- “Corumbá Concessões S. A.” (2016). <[www.corumbaconcessoes.com.br](http://www.corumbaconcessoes.com.br)> (set. 10, 2016).
- Costa, F. F., Oliveira, G. D., Caixeta, P. R. C., e Santos, G. R. (2012a). “Espacialização de Precipitação Máxima Média com Interpolador Geoestatístico: Krigagem.” *IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação*, Recife - PE, 1–8.
- Costa, H. C., Marcuzzo, F. F. N., Ferreira, O. M., e Andrade, L. R. (2012b). “Espacialização e Sazonalidade da Precipitação Pluviométrica do Estado de Goiás e Distrito Federal.” *Revista Brasileira de Geografia Física*, 1, 87–100.
- CPTEC. (2016). “Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos.” <[www.cptec.inpe.br](http://www.cptec.inpe.br)> (set. 10, 2016).
- Esri, I. (2010). *Geostatistical Analyst Tutorial*.
- Ferrigo, S. (2014). “Análise de consistência dos parâmetros do modelo SWAT obtidos por calibração automática – Estudo de caso da bacia do Lago Descoberto - DF.” Universidade de Brasília.
- GDF. (2005). *Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos do Distrito Federal - PGIRH/DF*.
- GDF. (2009). *Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal - PDDU/DF*. Brasília.
- GDF. (2012). *Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos do Distrito Federal - PGIRH/DF*.

- Gervais, M., Tremblay, L. B., Gyakum, J. R., e Atallah, E. (2014). “Representing Extremes in a Daily Gridded Precipitation Analysis over the United States: Impacts of Station Density, Resolution, and Gridding Methods.” *Journal of Climate*, 27, 5201–5218.
- Hofstra, N., Haylock, M., New, M., Jones, P., e Frei, C. (2008). “Comparison of six methods for the interpolation of daily , European climate data.” *Journal of Geophysical Research*, 113.
- Johnston, K., Ver Hoef, J. M., Krivoruchko, K., e Lucas, N. (2003). *ArcGIS 9 - Using ArcGIS geostatistical analyst. Analysis*.
- Marcuzzo, F. F. N., Andrade, L. R., e Melo, D. C. R. (2011). “Métodos de Interpolação Matemática no Mapeamento de Chuvas do Estado do Mato Grosso.” *Revista Brasileira de Geografia Física*, 04, 793–804.
- Mello, C. R., Lima, J. M., Silva, A. M., Mello, J. M., e Oliveira, M. S. (2003). “Krigagem e Inverso do Quadrado da Distância para Interpolação dos Parâmetros da Equação de Chuvas Intensas.” *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 27, 925–933.
- Mesquita, W. O., Griebeler, N. P., e Oliveira, L. F. C. de. (2009). “Precipitações máximas diárias esperadas para as regiões central e sudeste de Goiás.” *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 39(2), 73–81.
- Naghetini, M., e Pinto, É. J. de A. (2007). *Hidrologia Estatística*. CPRM, Belo Horizonte.
- Oliveira, L. F. C. de, Côrtes, F. C., Wehr, T. R., Borges, L. B., Sarmiento, P. H. L., e Griebeler, N. P. (2005). “Intensidade-Duração-Frequência de Chuvas Intensas para Localidades no Estado de Goiás e Distrito Federal.” *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 35(1), 13–18.
- Otieno, H., Yang, J., Liu, W., e Han, D. (2014). “Influence of rain gauge density on interpolation method selection.” *Journal of Hydrologic Engineering*.
- Pinto, N. L. de S., Holtz, A. C. T., Martins, J. A., e Gomide, F. L. S. (1976). *Hidrologia Básica*. Editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo.
- Silva, T. D. da. (2015). “Integração dos modelos QUAL2K e WEAP para modelagem da qualidade da água em corpos de água receptores de efluentes de ETEs em área de adensamento urbano no Distrito Federal.” Universidade de Brasília.
- Tucci, C. E. M. (2012). *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. Editora da UFRGS/ABRH, Porto Alegre.
- Viessman, W., e Lewis, G. L. (2003). *Introduction to Hydrology*. Pearson Education, Inc, Upper Saddle River.
- Viola, M. R., Mello, C. R. De, Pinto, D. B. F., Mello, J. M. De, e Ávila, L. F. (2010). “Métodos de interpolação espacial para o mapeamento da precipitação pluvial.” *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 14(9), 970–978.

