

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"**  
FACULDADE DE CIÊNCIAS - CAMPUS BAURU  
DEPARTAMENTO DE COMPUTAÇÃO  
BACHARELADO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

PAULO HORTELAN RIBEIRO

**COEFICIENTES DA EQUAÇÃO DE ANGSTRÖM-PRESCOTT  
PARA ESTIMAR A RADIAÇÃO SOLAR NOS CLIMAS  
BRASILEIROS, SEGUNDO A CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA DE  
KÖPPEN**

BAURU  
Junho/2020

PAULO HORTELAN RIBEIRO

**COEFICIENTES DA EQUAÇÃO DE ANGSTRÖM-PRESCOTT  
PARA ESTIMAR A RADIAÇÃO SOLAR NOS CLIMAS  
BRASILEIROS, SEGUNDO A CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA DE  
KÖPPEN**

Trabalho de Conclusão de Curso do Curso  
de Ciência da Computação da Universidade  
Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”,  
Faculdade de Ciências, Campus Bauru.  
Orientador: Prof. Dr. João Eduardo Machado  
Perea Martins

BAURU  
Junho/2020

Paulo Hortelan Ribeiro    Coeficientes da equação de Angström-Prescott para estimar a radiação solar nos climas brasileiros, segundo a classificação climática de Köppen/ Paulo Hortelan Ribeiro. – Bauru, Junho/2020-    113 p. : il.  
(algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. João Eduardo Machado Perea Martins  
Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”  
Faculdade de Ciências  
Ciência da Computação, Junho/2020.  
1. Radiação Solar 2. Modelagem Computacional 3. Angström-Prescott 4. Classificação Climática de Köppen 5. Clima

Paulo Hortelan Ribeiro

## **Coeficientes da equação de Angström-Prescott para estimar a radiação solar nos climas brasileiros, segundo a classificação climática de Köppen**

Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Ciência da Computação da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Ciências, Campus Bauru.

Banca Examinadora

---

**Prof. Dr. João Eduardo Machado Perea  
Martins**

Orientador

Departamento de Ciência da Computação  
Faculdade de Ciências  
Universidade Estadual Paulista "Júlio de  
Mesquita Filho"

---

**Profa. Dra. Simone das Graças  
Domingues Prado**

Departamento de Ciência da Computação  
Faculdade de Ciências  
Universidade Estadual Paulista "Júlio de  
Mesquita Filho"

---

**Profa. Dra. Andréa Carla Gonçalves  
Vianna**

Departamento de Ciência da Computação  
Faculdade de Ciências  
Universidade Estadual Paulista "Júlio de  
Mesquita Filho"

Bauru, 21 de junho de 2020.

# Agradecimentos

Agradeço a toda a minha família, por todo o incentivo e ajuda que demonstraram. Em especial aos meus pais e a minha irmã pelo apoio e incentivo durante todos esses anos e por sempre estarem ao meu lado durante essa jornada.

Aos meus amigos, por sempre me apoiarem em qualquer decisão que eu tenha tomado e por todo o companheirismo demonstrado.

Aos meus professores da Unesp, que sempre, com muita paciência, compartilharam todo o seu conhecimento. Em especial ao Prof. Dr. João Perea, pela orientação durante todo esse período e a Profa. Dra. Simone por todo o auxílio e paciência.

*"The mind is its own place, and in itself can make a heaven of hell, a hell of heaven.."*

John Milton, Paradise Lost

# Resumo

A radiação solar sempre foi objeto de estudo dentre as mais diversas áreas da ciência e, nos últimos tempos, com o avanço da tecnologia e novos estudos sobre energia limpa e renovável, o interesse sobre ela tem aumentado. Sabendo disso, estações meteorológicas já possuem aparelhos capazes de medir a radiação solar. Porém, muitas regiões, cidades e estações meteorológicas ainda não possuem tais aparelhos, pois os mesmos são caros e necessitam de uma determinada estrutura organizacional. Por isso, o modelo de Angström-Prescott, que é capaz de estimar a radiação solar de uma determinada localização, surge como uma alternativa muito comum em diversos estudos científicos. Tendo isso em vista, o presente trabalho tem por objetivo desenvolver um software capaz de aplicar esse modelo e obter os coeficientes empíricos dessa equação, de acordo com a melhor metodologia aplicada. Além disso, ele também busca estabelecer uma relação direta entre o clima e a radiação solar. Para isso, nove cidades (cada uma com um tipo de clima, de acordo com a classificação climática de Köppen) foram analisadas e os seus resultados debatidos. Com a finalização do projeto, chegou-se a conclusão de que o modelo de Angström-Prescott apresentou resultados satisfatórios e que a relação da radiação solar com o clima de fato existe, com os climas quentes apresentando resultados melhores que os temperados.

**Palavras-chave:** Radiação Solar; Modelagem Computacional; Clima; Classificação Climática de Köppen; Angström-Prescott.

# Abstract

The solar radiation has always been object of study among the most diverse areas of science and, recently, with the advancement of technology and new studies on clean and renewable energy, the interest in it has increased. Aware of this, weather stations already have devices able to measure the solar radiation. However, many regions, cities and weather stations still do not own such devices since they are expensive and need a certain organizational structure to work properly. That's why the model of Angström-Prescott, which is capable of estimating the solar radiation in a certain location, comes as a very usual alternative in many scientific studies. Therefore, this paper intends to develop a software capable of applying this model and obtain the empirical coefficients of this equation, according to the best methodology applied. Besides, it also seeks to establish a direct relation between climate and solar radiation. For this purpose, nine cities (each one with a type of climate, according to the Köppen's climate classification) had been analyzed and their results debated. Finally, the conclusion was that the model of Angström-Prescott presented satisfactory results in most cities analyzed, and the relation between the solar radiation and the climate in fact exists, with the hot climates presenting better results than the temperate ones.

**Keywords:** Solar Radiation; Computational Modeling; Climate; Köppen Climate Classification; Angström-Prescott.

# Listas de figuras

Figura 1 – Ilustração da radiação solar global e seus componentes.	18
Figura 2 – Tipos de climas no Brasil, segundo a classificação de Köppen, para as médias do período de 1961-2015 e lista das siglas dos estados brasileiros utilizados no texto.	22
Figura 3 – Amplitude de valores do ângulo de declinação.	26
Figura 4 – Ilustração do processamento de dados.	33
Figura 5 – Frequências dos tipos de climas anuais na cidade de Aracajú/SE	43
Figura 6 – Comparação dos valores da dispersão diária, mensal e anual da razão entre a radiação solar e a extraterrestre( $H/H_0$ ) e a razão da insolação ( $n/N$ ) no período de 2004 a 2018, na cidade de Aracajú/SE	44
Figura 7 – Comparação dos valores da dispersão das quatro estações do ano da razão entre a radiação solar e a extraterrestre ( $H/H_0$ ) e a razão da insolação ( $n/N$ ) no período de 2004 a 2018, na cidade de Aracajú/SE	45
Figura 8 – Comparação dos valores da radiação solar medida com a estimada, calculada através dos métodos: diário, mensal, anual e estacional no período de 2004 a 2018, na cidade de Aracajú/SE	47
Figura 9 – Frequências dos tipos de climas anuais na cidade de Aragarças/GO	49
Figura 10 – Comparação dos valores da dispersão diária, mensal e anual da razão entre a radiação solar e a extraterrestre ( $H/H_0$ ) e a razão da insolação ( $n/N$ ) no período de 2008 a 2018, na cidade de Aragarças/GO	50
Figura 11 – Comparação dos valores da dispersão das quatro estações do ano da razão entre a radiação solar e a extraterrestre ( $H/H_0$ ) e a razão da insolação ( $n/N$ ) no período de 2008 a 2018, na cidade de Aragarças/GO	51
Figura 12 – Comparação dos valores da radiação solar medida com a estimada, calculada através dos métodos: diário, mensal, anual e estacional no período de 2008 a 2018, na cidade de Aragarças/GO	53
Figura 13 – Frequências dos tipos de climas anuais na cidade de Bagé/RS	56
Figura 14 – Comparação dos valores da dispersão diária, mensal e anual da razão entre a radiação solar e a extraterrestre ( $H/H_0$ ) e a razão da insolação ( $n/N$ ) no período de 2008 a 2018, na cidade de Bagé/RS	57
Figura 15 – Comparação dos valores da dispersão das quatro estações do ano da razão entre a radiação solar e a extraterrestre ( $H/H_0$ ) e a razão da insolação ( $n/N$ ) no período de 2008 a 2018, na cidade de Bagé/RS	58
Figura 16 – Comparação dos valores da radiação solar medida com a estimada, calculada através dos métodos: diário, mensal, anual e estacional no período de 2008 a 2018, na cidade de Bagé/RS	60
Figura 17 – Frequências do tipo climático Cwb no território brasileiro	63

Figura 18 – Comparação dos valores da dispersão diária, mensal e anual da razão entre a radiação solar e a extraterrestre ( $H/H_0$ ) e a razão da insolação ( $n/N$ ) no período de 2003 a 2018, na cidade de Barbacena/MG . . . . .	65
Figura 19 – Comparação dos valores da dispersão das quatro estações do ano da razão entre a radiação solar e a extraterrestre ( $H/H_0$ ) e a razão da insolação ( $n/N$ ) no período de 2003 a 2018, na cidade de Barbacena/MG . . . . .	66
Figura 20 – Comparação dos valores da radiação solar medida com a estimada, calculada através dos métodos: diário, mensal, anual e estacional no período de 2003 a 2018, na cidade de Barbacena/MG . . . . .	68
Figura 21 – Frequências dos tipos de climas anuais na cidade de Belém/PA . . . . .	71
Figura 22 – Comparação dos valores da dispersão diária, mensal e anual da razão entre a radiação solar e a extraterrestre ( $H/H_0$ ) e a razão da insolação ( $n/N$ ) no período de 2004 a 2018, na cidade de Belém/PA . . . . .	72
Figura 23 – Comparação dos valores da dispersão das quatro estações do ano da razão entre a radiação solar e a extraterrestre ( $H/H_0$ ) e a razão da insolação ( $n/N$ ) no período de 2004 a 2018, na cidade de Belém/PA . . . . .	73
Figura 24 – Comparação dos valores da radiação solar medida com a estimada, calculada através dos métodos: diário, mensal, anual e estacional no período de 2004 a 2018, na cidade de Belém/PA . . . . .	75
Figura 25 – Frequências dos tipos de climas anuais na cidade de Campos Sales/CE . . . . .	78
Figura 26 – Comparação dos valores da dispersão diária, mensal e anual da razão entre a radiação solar e a extraterrestre ( $H/H_0$ ) e a razão da insolação ( $n/N$ ) no período de 2009 a 2018, na cidade de Campos Sales/CE . . . . .	79
Figura 27 – Comparação dos valores da dispersão das quatro estações do ano da razão entre a radiação solar e a extraterrestre ( $H/H_0$ ) e a razão da insolação ( $n/N$ ) no período de 2009 a 2018, na cidade de Campos Sales/CE . . . . .	80
Figura 28 – Comparação dos valores da radiação solar medida com a estimada, calculada através dos métodos: diário, mensal, anual e estacional no período de 2009 a 2018, na cidade de Campos Sales/CE . . . . .	82
Figura 29 – Frequências dos tipos de climas anuais na cidade de Curitiba/PR . . . . .	84
Figura 30 – Frequências do tipo climático Cfb no território brasileiro . . . . .	85
Figura 31 – Comparação dos valores da dispersão diária, mensal e anual da razão entre a radiação solar e a extraterrestre ( $H/H_0$ ) e a razão da insolação ( $n/N$ ) no período de 2004 a 2018, na cidade de Curitiba/PR . . . . .	86
Figura 32 – Comparação dos valores da dispersão das quatro estações do ano da razão entre a radiação solar e a extraterrestre ( $H/H_0$ ) e a razão da insolação ( $n/N$ ) no período de 2004 a 2018, na cidade de Curitiba/PR . . . . .	87

Figura 33 – Comparação dos valores da radiação solar medida com a estimada, calculada através dos métodos: diário, mensal, anual e estacional no período de 2004 a 2018, na cidade de Curitiba/PR . . . . .	89
Figura 34 – Frequências dos tipos de climas anuais na cidade de Juiz de Fora/MG . . . . .	91
Figura 35 – Comparação dos valores da dispersão diária, mensal e anual da razão entre a radiação solar e a extraterrestre ( $H/H_0$ ) e a razão da insolação ( $n/N$ ) no período de 2008 a 2018, na cidade de Juiz de Fora/MG . . . . .	92
Figura 36 – Comparação dos valores da dispersão das quatro estações do ano da razão entre a radiação solar e a extraterrestre ( $H/H_0$ ) e a razão da insolação ( $n/N$ ) no período de 2008 a 2018, na cidade de Juiz de Fora/MG . . . . .	93
Figura 37 – Comparação dos valores da radiação solar medida com a estimada, calculada através dos métodos: diário, mensal, anual e estacional no período de 2008 a 2018, na cidade de Juiz de Fora/MG . . . . .	95
Figura 38 – Frequências dos tipos de climas anuais na cidade de Manaus/AM . . . . .	97
Figura 39 – Comparação dos valores da dispersão diária, mensal e anual da razão entre a radiação solar e a extraterrestre ( $H/H_0$ ) e a razão da insolação ( $n/N$ ) no período de 2001 a 2018, na cidade de Manaus/AM . . . . .	98
Figura 40 – Comparação dos valores da dispersão das quatro estações do ano da razão entre a radiação solar e a extraterrestre ( $H/H_0$ ) e a razão da insolação ( $n/N$ ) no período de 2001 a 2018, na cidade de Manaus/AM . . . . .	99
Figura 41 – Comparação dos valores da radiação solar medida com a estimada, calculada através dos métodos: diário, mensal, anual e estacional no período de 2001 a 2018, na cidade de Manaus/AM . . . . .	101

# **Lista de quadros**

Quadro 1 – Sigla e descrição de cada tipo climático de acordo com a classificação de Köppen.	23
Quadro 2 – Critério de interpretação do desempenho dos métodos de estimativa da evaporação, pelo índice <i>c</i> .	30
Quadro 3 – Cidades escolhidas para a aplicação do modelo e as suas respectivas informações	34
Quadro 4 – Classificação dos melhores desempenhos, do melhor para o pior	104

# **Lista de tabelas**

Tabela 1 – Resultados da regressão linear para Aracajú/SE (2004-2018) . . . . .	46
Tabela 2 – Resultados da comparação entre a radiação solar medida e a estimada para Aracajú/SE (2004-2018) . . . . .	48
Tabela 3 – Resultados da regressão linear para Aragarças/GO (2008-2018) . . . . .	52
Tabela 4 – Resultados da comparação entre a radiação solar medida e a estimada para Aragarças/GO (2008-2018) . . . . .	54
Tabela 5 – Resultados da regressão linear para Bagé/RS (2008-2018) . . . . .	59
Tabela 6 – Resultados da comparação entre a radiação solar medida e a estimada para Bagé/RS (2008-2018) . . . . .	61
Tabela 7 – Resultados da regressão linear para Barbacena/MG (2003-2018) . . . . .	67
Tabela 8 – Resultados da comparação entre a radiação solar medida e a estimada para Barbacena/MG (2003-2018) . . . . .	69
Tabela 9 – Resultados da regressão linear para Belém/PA (2004-2018) . . . . .	74
Tabela 10 – Resultados da comparação entre a radiação solar medida e a estimada para Belém/PA (2004-2018) . . . . .	76
Tabela 11 – Resultados da regressão linear para Campos Sales/CE (2009-2018) . . . .	81
Tabela 12 – Resultados da comparação entre a radiação solar medida e a estimada para Campos Sales/CE (2009-2018) . . . . .	83
Tabela 13 – Resultados da regressão linear para Curitiba/PR (2004-2018) . . . . .	88
Tabela 14 – Resultados da comparação entre a radiação solar medida e a estimada para Curitiba/PR (2004-2018) . . . . .	90
Tabela 15 – Resultados da regressão linear para Juiz de Fora/MG (2008-2018) . . . .	94
Tabela 16 – Resultados da comparação entre a radiação solar medida e a estimada para Juiz de Fora/MG (2008-2018) . . . . .	96
Tabela 17 – Resultados da regressão linear para Manaus/AM (2001-2018) . . . . .	100
Tabela 18 – Resultados da comparação entre a radiação solar medida e a estimada para Manaus/AM (2001-2018) . . . . .	102
Tabela 19 – Comparação entre os principais resultados obtidos nas análises específicas de cada cidade . . . . .	103

# **Lista de abreviaturas e siglas**

BDMPE	Banco de Dados Meteorológicos para Pesquisa e Ensino
SCC	Sistema de Classificação Climática
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
NC	Normais Climatológicas
OMM	Organização Meteorológica Mundial
TCA	Tipo de Clima Anual

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
<b>1.1</b>	<b>Problema</b>	<b>18</b>
<b>1.2</b>	<b>Justificativa</b>	<b>19</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos</b>	<b>19</b>
1.3.1	Objetivos Gerais	19
1.3.2	Objetivos Específicos	19
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>21</b>
<b>2.1</b>	<b>Clima</b>	<b>21</b>
2.1.1	Classificação climática de Köppen	21
<b>2.2</b>	<b>Estações Meteorológicas</b>	<b>23</b>
<b>2.3</b>	<b>Modelo de Angström-Prescott</b>	<b>24</b>
2.3.1	Radiação solar extraterrestre	25
2.3.1.1	Ângulo de declinação	25
2.3.1.2	Ângulo horário do pôr do sol	26
2.3.2	Insolação máxima	27
<b>2.4</b>	<b>Modelos estatísticos</b>	<b>27</b>
2.4.1	Coeficiente de determinação $R^2$	27
2.4.2	Coeficiente de relação $r$	28
2.4.3	Índice de Willmott $d$	29
2.4.4	Índice de confiança ou desempenho $c$	29
2.4.5	Root Mean Squared Error (RMSE)	30
2.4.6	Mean Bias Error (MBE)	31
2.4.7	Teste estatístico $t$ -statistic	31
<b>3</b>	<b>IMPLEMENTAÇÃO</b>	<b>32</b>
<b>3.1</b>	<b>Método de Pesquisa</b>	<b>32</b>
<b>3.2</b>	<b>Dados</b>	<b>34</b>
3.2.1	Padronização dos dados	35
3.2.1.1	Radiação solar global	35
3.2.1.2	Insolação	35
3.2.2	Formatação das tabelas	36
3.2.3	Conclusão	37
<b>3.3</b>	<b>Software desenvolvido</b>	<b>37</b>
3.3.1	Funções	38
3.3.2	Scripts	38

<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES . . . . .</b>	<b>42</b>
<b>4.1</b>	<b>Aracajú/SE . . . . .</b>	<b>43</b>
4.1.1	Regressão Linear . . . . .	44
4.1.2	Radiação solar estimada . . . . .	47
4.1.3	Discussão . . . . .	48
<b>4.2</b>	<b>Aragarças/GO . . . . .</b>	<b>49</b>
4.2.1	Regressão Linear . . . . .	50
4.2.2	Radiação solar estimada . . . . .	53
4.2.3	Discussão . . . . .	54
<b>4.3</b>	<b>Bagé/RS . . . . .</b>	<b>56</b>
4.3.1	Regressão Linear . . . . .	57
4.3.2	Radiação solar estimada . . . . .	60
4.3.3	Discussão . . . . .	61
<b>4.4</b>	<b>Barbacena/MG . . . . .</b>	<b>63</b>
4.4.1	Regressão Linear . . . . .	65
4.4.2	Radiação solar estimada . . . . .	68
4.4.3	Discussão . . . . .	69
<b>4.5</b>	<b>Belém/PA . . . . .</b>	<b>71</b>
4.5.1	Regressão Linear . . . . .	72
4.5.2	Radiação solar estimada . . . . .	75
4.5.3	Discussão . . . . .	76
<b>4.6</b>	<b>Campos Sales/CE . . . . .</b>	<b>78</b>
4.6.1	Regressão Linear . . . . .	79
4.6.2	Radiação solar estimada . . . . .	82
4.6.3	Discussão . . . . .	83
<b>4.7</b>	<b>Curitiba/PR . . . . .</b>	<b>84</b>
4.7.1	Regressão Linear . . . . .	86
4.7.2	Radiação solar estimada . . . . .	89
4.7.3	Discussão . . . . .	90
<b>4.8</b>	<b>Juiz de Fora/MG . . . . .</b>	<b>91</b>
4.8.1	Regressão Linear . . . . .	92
4.8.2	Radiação solar estimada . . . . .	95
4.8.3	Discussão . . . . .	96
<b>4.9</b>	<b>Manaus/AM . . . . .</b>	<b>97</b>
4.9.1	Regressão Linear . . . . .	98
4.9.2	Radiação solar estimada . . . . .	101
4.9.3	Discussão . . . . .	102
<b>4.10</b>	<b>Interpretações e discussão geral . . . . .</b>	<b>103</b>
<b>4.11</b>	<b>Trabalhos similares e validação . . . . .</b>	<b>105</b>

<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>108</b>
<b>5.1</b>	<b>Trabalhos futuros</b>	<b>109</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>110</b>

# 1 Introdução

Este é um trabalho de computação aplicada, focado na área ambiental e que visa estudar o modelo de radiação solar Angström-Prescott e desenvolver programas que permitam a análise e simulação deste parâmetro físico.

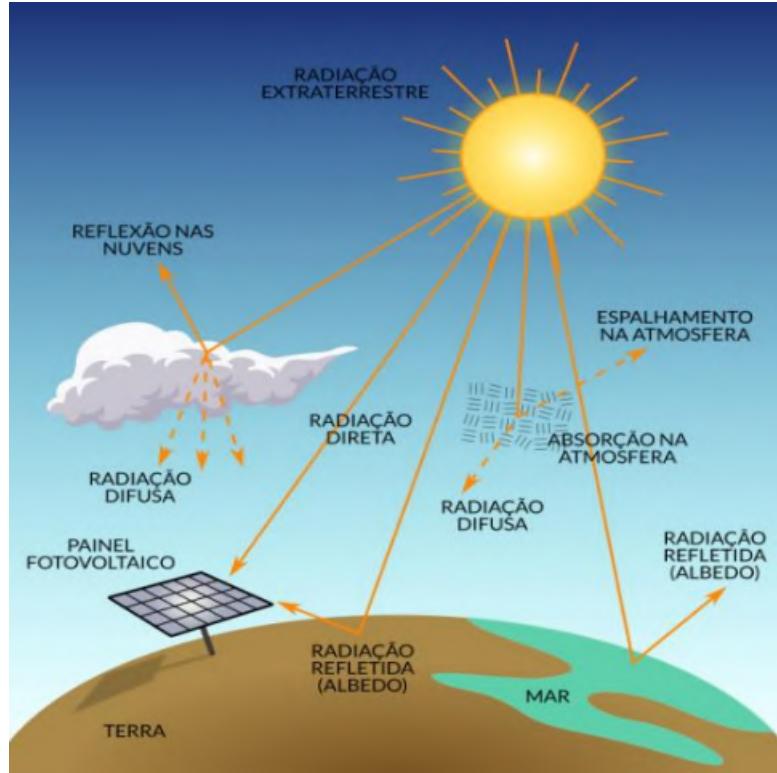
A energia emitida e transmitida pelo sol sob a forma de radiação eletromagnética é denominada de radiação solar, a qual é a maior fonte de energia para o nosso planeta. Para Gómez et al. (2018), as variações dessa energia possuem impacto nas mais diversas áreas, sejam elas físicas, químicas ou biológicas. As variações no balanço de radiação são fundamentais nos processos atmosféricos e terrestres alterando, por exemplo, a temperatura à superfície, o perfil da taxa vertical de aquecimento e a circulação atmosférica (SOUZA; SILVA; CEBALLOS, 2008).

A radiação solar é medida com instrumentos, geralmente instalados em estações meteorológicas, como o pirânometro. Mas segundo Borges et al. (2010), para localidades com ausência de coleta de dados de radiação solar, valores estimados podem ser obtidos através de modelos matemáticos que foram propostos e adaptados ao longo de anos.

A radiação solar global é o principal parâmetro físico deste trabalho e será muito mencionada ao longo do mesmo, por isso a sua definição é crucial. De acordo com Souza et al. (2018) e Pinho e Galdino (2014), ela pode ser definida como a quantidade resultante da soma das radiações solares difusa e direta, e albedo (também chamada de radiação solar refletida).

A Figura 1 mostra todos esses elementos que formam a radiação solar global. Para definir tais elementos, Pinho e Galdino (2014) determinam que a radiação difusa é a radiação solar que atinge a superfície após sofrer espalhamento pela atmosfera terrestre; a radiação direta é a radiação solar que incide diretamente sobre a superfície, sem sofrer qualquer influencia; e o albedo é a parte da radiação solar que chega à superfície da Terra e é refletida pelo ambiente do entorno (solo, vegetação, água, terrenos rochosos, obstáculos, etc.).

Figura 1 – Ilustração da radiação solar global e seus componentes.



Fonte: Souza et al. (2018)

Tendo em vista a sua importância, diversos modelos matemáticos de radiação solar global foram criados. Em 1924 Angström propôs um modelo que relaciona linearmente a radiação solar global com a duração do brilho solar (LIU et al., 2009). Carvalho et al. (2011) descrevem que Prescott, posteriormente, sugeriu o uso da radiação solar extraterrestre, criando um novo modelo, que ficou conhecido como equação de Angström-Prescott. A radiação solar extraterrestre é a intensidade solar no topo da atmosfera da Terra, diferentemente da radiação solar global, que é a soma da radiação solar difusa, direta e refletida.

## 1.1 Problema

A cada ano que passa, a meteorologia evolui e disponibiliza mais dados medidos através das estações meteorológicas. Esses dados são úteis nas mais diversas áreas de estudos e são essenciais em diversos modelos matemáticos. Porém, o alto custo da manutenção e instalação dessas estações não permite que elas existam em muitas cidades do Brasil.

O Brasil é um país com 5570 municípios espalhados por 26 estados (CASTRO, 2013). Porém, o INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) possui uma rede de 500 estações automáticas e 258 estações convencionais espalhadas pelo país. Apesar de existirem muitas outras estações que não pertencem ao INMET, muitas localizações não possuem dados precisos

e medidos através de instrumentos específicos. Um desses dados, de grande importância, é a radiação solar que é medida através de um piranômetro

## 1.2 Justificativa

Com os problemas apresentados anteriormente, relativos a falta de instrumentos de medições, uma solução é a utilização de modelos matemáticos que podem estimar a radiação solar de uma determinada localização. Esses modelos utilizam dados meteorológicos medidos pelas estações e geram uma base de dados capaz de estimar a radiação solar de uma determinada localização.

Dentre os diversos modelos estudados, o de Angström-Prescott é o mais utilizado e referenciado por autores como Liu et al. (2009) e Carvalho et al. (2011). Para o presente projeto esse modelo é ideal, pois das variáveis meteorológicas medidas ele necessita apenas da radiação solar global e da insolação, que são itens mais aprofundados no Capítulo 2. Isso porque as estações convencionais e automáticas do INMET medem tanto a radiação solar global quanto a insolação. Porém, o motivo de os dois tipos de estações serem utilizados no atual trabalho é porque o INMET fornece os dados da radiação solar global provenientes apenas das estações automáticas, enquanto os dados da insolação são provenientes apenas das estações convencionais (esse assunto é abordado de forma mais completa na Seção 2.2 e na Seção 3.2).

## 1.3 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo analisar a radiação solar global nos diferentes climas brasileiros. Essa análise é feita através da implementação de um software que simula o modelo de Angström-Prescott em nove cidades e estações meteorológicas espalhadas pelo país, fornecendo análises e calibrações para futuros estudos.

### 1.3.1 Objetivos Gerais

Organizar os dados das estações meteorológicas e desenvolver um programa capaz de implementar o modelo de Angström-Prescott. Obter os valores dos coeficientes do modelo, de acordo com a entrada de dados fornecida, e com esses resultados simular uma radiação solar estimada para o período analisado. Analisar os resultados obtidos e chegar a uma determinada conclusão.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Realizar uma análise e estudo sobre a equação de Angström-Prescott e sobre a classificação climática de Köppen;

- b) Determinar as cidades e estações meteorológicas que representarão os tipos climáticos predominantes no território brasileiro;
- c) Organizar os dados recebidos das estações automáticas e convencionais;
- d) Desenvolver um software capaz de simular o modelo de Angström-Prescott;
- e) Aplicar o programa desenvolvido para todas cidades e estações meteorológicas brasileiras escolhidas (uma para cada tipo de clima);
- f) Analisar estatisticamente os resultados obtidos;
- g) Discutir e debater os resultados, buscando realizar uma relação entre a radiação solar e o clima;
- h) Realizar uma comparação entre os resultados obtidos no presente trabalho e os resultados obtidos em trabalhos correlatos.

## 2 Fundamentação Teórica

### 2.1 Clima

O Brasil é um vasto país sul-americano com uma extensão territorial de 8.514.876 km<sup>2</sup>. Por essa razão, ele é um país com muitas transações climáticas e objeto de estudo de profissionais das áreas ambientais.

De acordo com o IBGE (2002), os climas por zona do Brasil são: Equatorial, Tropical Zona Equatorial, Tropical Nordeste Oriental, Tropical Brasil Central e Temperado. Porém, essa é apenas uma das várias classificações possíveis, e não considera toda a variação e transação de climas. Tendo isso em vista, os Sistemas de Classificação Climática (SCC) foram criados e, de acordo com Rolim et al. (2007), são essenciais, pois definem os climas de diferentes regiões considerando elementos climático variados, facilitando e modularizando o entendimento e a realização de trabalhos posteriores.

A radiação solar e a insolação tendem a variar bruscamente de acordo com a latitude da localização e o período anual da estação climática analisada. Portanto, definir uma classificação adequada a ser utilizada é essencial na obtenção de bons e concretos resultados.

#### 2.1.1 Classificação climática de Köppen

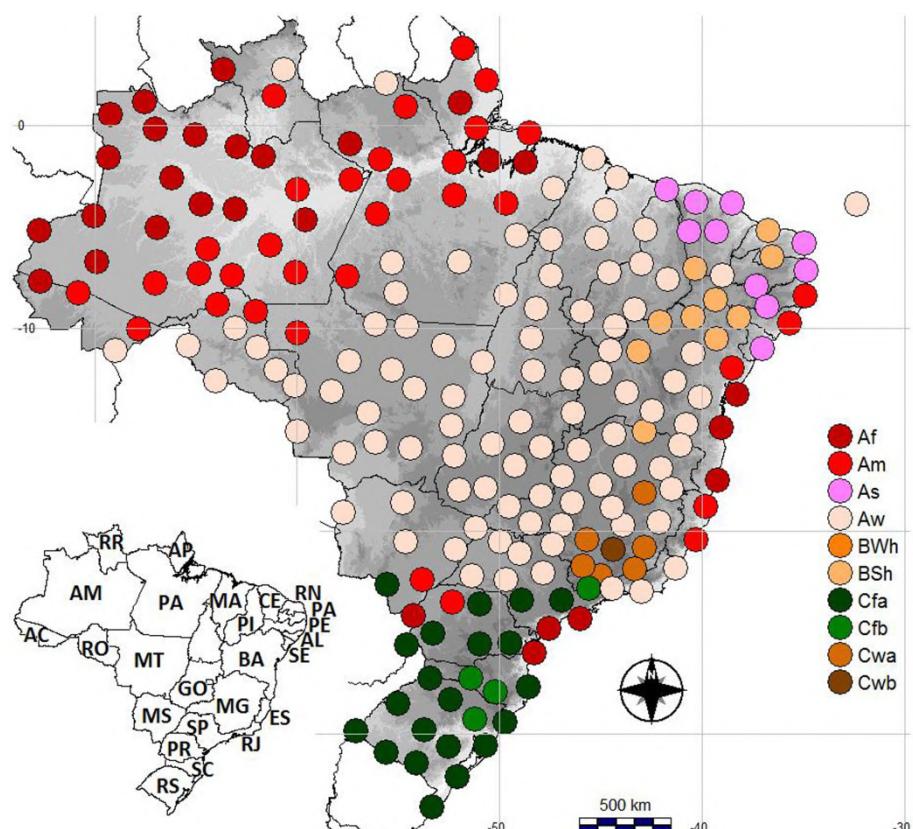
Um dos SCC mais abrangentes é o de Köppen-Geiger (KÖPPEN; GEIGER, 1928), que partindo do pressuposto que a vegetação natural é a melhor expressão do clima de uma região, desenvolveu um SCC ainda hoje largamente utilizado, em sua forma original ou com modificações (DUBREUIL et al., 2017).

Para corrigir o aspecto estático da classificação de Köppen (motivo de crítica de autores como Monteiro (1968)), diversos autores têm estudado maneiras de adaptá-la. Uma dessas maneiras é aplicá-la por ano, ao invés de Normais Climatológicas (NC), que segundo a Organização Meteorológica Mundial (OMM) são “valores médios calculados para um período relativamente longo e uniforme, compreendendo no mínimo três décadas consecutivas” e padrões climatológicos normais como “médias de dados climatológicos calculadas para períodos consecutivos de 30 anos” (INMET, 2017d). Assim, a expressão “Tipo de Clima Anual” (TCA) foi utilizada para definir o padrão climático de um determinado ano (BRISSE; GRANDJOUAN; RUFFRAY, 1982).

Essa é a abordagem utilizada por Dubreuil et al. (2017) em seu trabalho, que se propôs a realizar uma análise a partir das mais de 200 estações meteorológicas do Brasil no período de 1961 a 2015. A Figura 2 mostra a classificação de Köppen utilizada no território brasileiro, realizada pelo Dubreuil et al. (2017).

Como pode ser observado, alguns tipos de clima são mais predominantes em algumas regiões. O tipo de clima mais recorrente é o Aw, que aparece em 95 estações brasileiras.

Figura 2 – Tipos de climas no Brasil, segundo a classificação de Köppen, para as médias do período de 1961-2015 e lista das siglas dos estados brasileiros utilizados no texto.



Fonte: Dubreuil et al. (2017)

O que cada sigla significa nessa classificação está explicado no Quadro 1. Essa classificação proposta por Dubreuil et al. (2017) foi escolhida para este trabalho pois ela resume e categoriza os climas do Brasil. Como a radiação solar muda bruscamente de um tipo de clima para o outro, possuir uma classificação para avaliar todo o território brasileiro é fundamental.

Quadro 1 – Sigla e descrição de cada tipo climático de acordo com a classificação de Köppen.

<b>Sigla</b>	<b>Tipo de clima</b>
Af	Quente, sem estação seca
Am	Quente de monção
As	Quente com chuva de inverno
Aw	Quente com chuva de verão
BWh	Árido e quente
BSh	Semi-árido e quente
Cfa	Temperado, sem estação seca e verão quente
Cfb	Temperado, sem estação seca e verão fresco
Cwa	Temperado com verão quente e úmido
Cwb	Temperado com verão fresco e úmido
Csa	Temperado com verão quente e seco
Csb	Temperado com verão seco e fresco

Fonte: Adaptado e traduzido de Dubreuil et al. (2017)

## 2.2 Estações Meteorológicas

O estudo científico dos fenômenos atmosféricos, assim como dos climas e da sua mudança ao longo do tempo é de grande relevância para as mais diversas áreas do conhecimento. Esses estudos utilizam dados e informações que precisam ser coletadas, medidas ou estimadas através de instrumentos e modelos matemáticos.

A aquisição de dados relativos ao tempo é um objetivo do ramo da ciência denominada meteorologia. Os fenômenos meteorológicos são estudados a partir das observações, experiências e métodos científicos de análise. A observação meteorológica é uma avaliação ou uma medida de um ou vários parâmetros meteorológicos (INMET, 2017c).

As observações sobre o tempo mencionadas na citação acima podem ser feitas através de instrumentos meteorológicos. A união desses instrumentos em um único conjunto forma uma estação meteorológica, que mede parâmetros diferentes, com o objetivo de se adquirir dados do clima. Existem, basicamente, dois tipos de estações meteorológicas: a estação meteorológica convencional e a estação meteorológica automática.

As estações meteorológicas convencionais no Brasil podem ser seculares e medir diferentes variáveis atmosféricas. A maioria dessas estações são de propriedade do INMET.

Uma estação meteorológica convencional é composta de vários sensores isolados que registram continuamente os parâmetros meteorológicos (pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar, precipitação, radiação solar, direção e velocidade do vento, etc), que são lidos e anotados por um observador a cada intervalo e este os envia a um centro coletor por um meio de comunicação qualquer (INMET, 2017b).

Já as estações meteorológicas automáticas trabalham com a coleta de dados totalmente automática e tem como vantagem o recebimento contínuo de dados, sem necessitar de um observador ou de qualquer interferência humana. "Nesse tipo de estação os sensores operam com princípios que permitem a emissão de sinais elétricos, que são captados por um sistema de aquisição de dados (Datalogger), possibilitando que o armazenamento e o processamento dos dados sejam informatizados." (GALINA; VERONA, 2004).

Para a realização deste trabalho, foram escolhidas cidades que possuem tanto uma estação meteorológica automática quanto uma estação meteorológica convencional.

## 2.3 Modelo de Angström-Prescott

Devido a importância da radiação solar e a sua contribuição para estudos ambientais, agronômicos e energéticos, Liu et al. (2009) e Carvalho et al. (2011) ressaltam que em 1924 Angstrom (1924) propôs uma relação linear entre a razão da radiação solar global média e o seu valor correspondente a um dia completamente claro e a razão entre a duração média diária do brilho solar com a sua máxima duração. Porém, naquela época não existia um método confiável de se calcular a radiação sob um céu limpo e completamente claro, restringindo o uso da equação apenas em lugares com dados medidos da radiação solar. Por isso, posteriormente (em 1940), Prescott (1940) sugeriu o uso da radiação extraterrestre como solução para este problema. Assim, foi criado um novo modelo conhecido como Angström-Prescott e que é amplamente usado em diversos estudos. Essa equação é:

$$\frac{H}{H_0} = a + b \left( \frac{n}{N} \right) \quad (2.1)$$

onde,  $H$  e  $H_0$  são, respectivamente, a radiação solar global ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ) e a radiação solar extraterrestre em uma superfície horizontal ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ );  $a$  e  $b$  são coeficientes empíricos determinadas através da regressão linear;  $n$  e  $N$  são, respectivamente, a insolação observada ( $\text{h d}^{-1}$ ) e a insolação máxima ou fotoperíodo ( $\text{h d}^{-1}$ ).

A radiação solar global ( $H$ ) já foi explicada no Capítulo 1, porém, é importante ressaltar que os valores utilizados na equação de Angström-Prescott são valores observados e medidos

através de aparelhos meteorológicos (diferentemente da radiação solar extraterrestre que é estimada através de uma equação). Os dados diários da radiação solar foram gentilmente fornecidos pelo INMET.

Duração do brilho solar, insolação observada, *sunshine duration*, ou simplesmente insolação (*n*) são todos sinônimos dentro deste campo de pesquisa. Ela pode ser definida como sendo a quantidade de tempo (neste caso, em horas por dia) em que o brilho solar atinge ou passa um determinado limite energético ( $\phi \geq 120 \text{ W m}^{-2}$ , por exemplo) do aparelho meteorológico medidor (cada aparelho possui sua própria calibração e configuração). Isso quer dizer que assim como a radiação solar global, a insolação também é um valor observado e medido (diferentemente da insolação máxima que é estimada através de uma equação) através de aparelhos. Os dados da insolação diária foram gentilmente fornecidos pelo INMET.

### 2.3.1 Radiação solar extraterrestre

A radiação solar extraterrestre pode ser explicada como a intensidade ou poder do Sol no topo da atmosfera da Terra. Ela possui um valor de acordo com a latitude da localização e do dia do ano a ser analisado, e pode ser calculada pela seguinte equação:

$$H_0 = \frac{24 \cdot 3600 \cdot I_{sc}}{\pi} \cdot \left[ 1 + 0.033 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot d}{365}\right) \right] \cdot \left[ \cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega + \left(\frac{\pi \cdot \omega}{180}\right) \cdot \sin\phi \cdot \sin\delta \right] \quad (2.2)$$

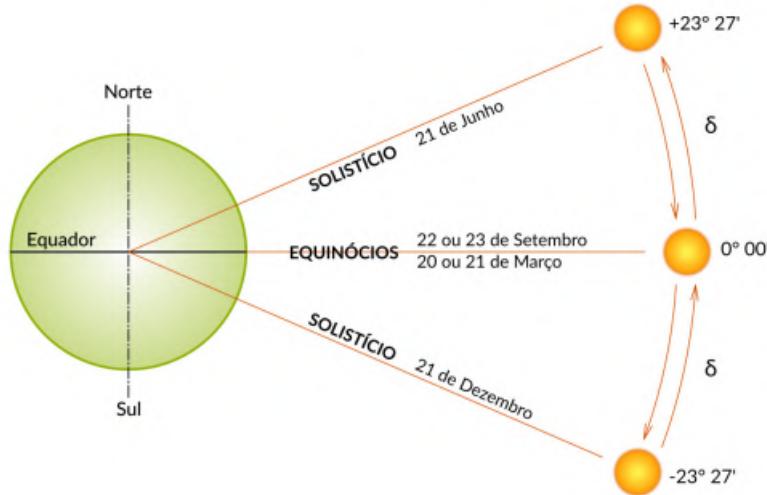
onde,  $H_0$  é a radiação extraterrestre;  $I_{sc}$  é constante solar de valor  $1367 \text{ W m}^{-2}$ ;  $d$  é o dia sequencial do ano ou dia Juliano, associando o valor um ao dia 1 de janeiro e seguindo assim sucessivamente com valores até 366;  $\phi$  é a latitude da localização (em graus decimais);  $\delta$  é o ângulo de declinação ou declinação solar ( $^{\circ}$ );  $\omega$  é ângulo horário do pôr-do-Sol ou *sunset hour angle* ( $^{\circ}$ ).

#### 2.3.1.1 Ângulo de declinação

O ângulo de declinação ( $\delta$ ) é expresso em graus e, como Pilau (2014) aponta, pode ser explicado como o ângulo formado entre uma linha imaginária ligando o centro da Terra ao centro do sol, com o plano do Equador. Ao longo do ano, a declinação varia entre  $-23^{\circ}27'$  (solstício de verão) e  $+23^{\circ}27'$  (solstício de inverno).

A Figura 3 ilustra o funcionamento do cálculo do ângulo de declinação, assim como a sua amplitude de valores.

Figura 3 – Amplitude de valores do ângulo de declinação.



Fonte: Pereira et al. (2017)

O ângulo de declinação é definido pela equação de Cooper (1969), mostrada abaixo:

$$\delta = 23.45 \cdot \sin \left[ 360 \cdot \left( \frac{284 + d}{365} \right) \right] \quad (2.3)$$

onde,  $\delta$  é o ângulo de declinação;  $d$  é o já comentado dia sequencial do ano ou dia Juliano, associando o valor um ao dia 1 de janeiro e seguindo assim sucessivamente com valores até 366.

### 2.3.1.2 Ângulo horário do pôr do sol

De acordo com Vorobieff (2008), o ângulo horário solar ( $\omega$ ) é a posição angular do sol a leste (ou oeste), a partir do meridiano local. É negativo pela manhã, positivo pela tarde e igual a zero ao meio dia solar. Segundo Pereira et al. (2017), ele corresponde ao deslocamento angular do movimento aparente do Sol devido a rotação da Terra e varia entre  $-180^\circ$  a  $+180^\circ$ , sendo que cada hora corresponde a  $15^\circ$  de variação do ângulo horário solar.

Já o ângulo horário do pôr do sol ou *sunset hour angle* (que neste trabalho será chamado de  $\omega$ ) corresponde ao horário quando o sol se põe no horizonte local. Ele é expresso em graus e calculado pela equação abaixo:

$$\omega = \cos^{-1} \cdot (-\tan \phi \cdot \tan \delta) \quad (2.4)$$

onde,  $\omega$  é o ângulo horário do pôr do sol;  $\phi$  é a já comentada latitude da localização (em graus decimais);  $\delta$  é o ângulo de declinação ( $^\circ$ ) explicado na Seção 2.3.1.1

### 2.3.2 Insolação máxima

A insolação máxima ( $N$ ) é também conhecida em outros estudos como a duração máxima do brilho solar, *maximum possible sunshine duration* ou fotoperíodo.

Como BASTOS et al. (2002) afirma, o fotoperíodo é a duração do dia astronômico e corresponde ao número máximo possível de horas de insolação ou brilho solar, na ausência de nuvens e varia em torno de doze horas. Esse número de horas varia de acordo com a latitude da localização e com o ângulo de declinação da data analisada.

A insolação máxima, como comentado nas seções acima, não é observada ou medida, mas sim calculada ou estimada. Ela é um valor teórico que é obtido através da equação abaixo:

$$N = \left( \frac{2 \cdot \omega}{15} \right) \quad (2.5)$$

onde,  $N$  é a insolação máxima;  $\omega$  é o ângulo horário do pôr do sol ( $^{\circ}$ ) cuja maneira de obtê-lo já foi descrita na Seção 2.3.1.2.

## 2.4 Modelos estatísticos

Os resultados desse trabalho são divididos em duas partes. A primeira parte busca realizar uma explicação sobre os valores dos coeficientes  $a$  e  $b$  obtidos através de uma regressão linear entre  $H/H_0$  e  $n/N$ . A segunda parte utiliza esses valores para calcular uma radiação solar estimada e compará-la com a radiação solar medida.

Uma avaliação estatística precisa ser realizada para que se possa discutir os resultados obtidos. Para isso, alguns modelos e técnicas de análise e comparação estatística foram selecionados com base em trabalhos similares.

### 2.4.1 Coeficiente de determinação $R^2$

Para avaliar o ajuste linear, o coeficiente de determinação  $R^2$  é o mais utilizado entre os autores dessa área. Como, por exemplo, Carvalho et al. (2011), que calculou os coeficientes de determinação para o município de Seropédica, no Rio de Janeiro. Outros exemplos que também foram estudados e utilizados como referência e merecem ser citados foram: o trabalho de SILVA (2014) e o de Dornelas et al. (2006) que avaliaram os coeficientes da equação de Ångström-Prescott para, respectivamente, os municípios de Petrolina em Pernambuco e de Brasília em Goiás.

Como explica Martins (2014), o coeficiente de determinação é o quadrado do coeficiente de correlação amostral  $r$ , que por sua vez é uma medida da direção e grau com que duas variáveis, de tipo quantitativo, se associam linearmente. O coeficiente de determinação é um indicador usado para medir a qualidade do ajustamento de uma linha de regressão.

Ele assume valores entre 0 e 1, sendo que quanto mais próximo de um, melhor é o resultado obtido. Neste trabalho, ele pode ser interpretado como a proporção da variância em  $H/H_0$  que pode ser atribuída à variância em  $n/N$  (equação 2.1) (JÚNIOR et al., 2012). Ele é dado pela equação:

$$R^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \right)^2 \quad (2.6)$$

onde,  $R^2$  é o coeficiente de determinação;  $n$  é o número de pares de dados;  $x_i$  é o valor observado da razão da insolação ( $n/N$ );  $\bar{x}$  é a média dos valores observados da razão da insolação ( $n/N$ );  $y_i$  é o valor observado da razão de radiação ( $H/H_0$ );  $\bar{y}$  é a media dos valores observados da razão de radiação ( $H/H_0$ ).

Porém, apenas o  $R^2$  não é suficiente para avaliar com certa precisão os resultados obtidos. Isso porque se apenas alguns dados da dispersão estiverem com valores incorretos (com grande diferença da média), poderá mudar drasticamente o ajuste da curva. Outro motivo é que o  $R^2$  será grande caso a amplitude dos  $x$ 's for muito alta, e pequeno caso a amplitude for muito baixa (impedindo que uma relação com os  $y$ 's seja estabelecida).

Logo, outros modelos estatísticos de comparação e avaliação precisam ser aplicados para que se chegue em uma conclusão concisa. A ideia aplicada neste trabalho foi a de utilizar os valores obtidos de  $a$  e  $b$ , através das diversas metodologias, para gerar uma radiação solar estimada, ou seja, um cálculo de como seriam os valores da radiação solar se ela seguisse o ajuste de linha encontrado. Após isso, realizar uma comparação entre esses valores estimados e os valores medidos (observados) e verificar a sua precisão.

#### 2.4.2 Coeficiente de relação $r$

Como Camargo e Sentelhas (1997) explica, o coeficiente de correlação  $r$  indica o grau de dispersão dos dados obtidos em relação a média, ou seja, o erro aleatório. Ele é conhecido por analisar a precisão dos dados analisados e seu valor varia de 0, para nenhuma relação, até 1, para a relação perfeita. Ele é dado pela equação:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2.7)$$

onde,  $r$  é o coeficiente de determinação;  $n$  é o número de pares de dados;  $x_i$  é o valor da radiação solar medida;  $\bar{x}$  é a média dos valores da radiação solar medida;  $y_i$  é o valor da radiação solar estimada;  $\bar{y}$  é a media dos valores da radiação solar estimada.

### 2.4.3 Índice de Willmott *d*

O índice Willmott (*d*) avalia a exatidão dos dados. Ele foi proposto por (WILLMOTT et al., 1985) e está relacionado ao afastamento dos valores estimados em relação aos observados (LEITÃO; OLIVEIRA; LEITÃO, 2007). Seu valor varia de 0, para nenhuma concordância, até 1, para a concordância perfeita. Ele é dado pela equação:

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - O| - |O_i - O|)^2} \right] \quad (2.8)$$

onde, *d* é o índice de Willmott; *n* é o número de pares de dados; *P<sub>i</sub>* é o valor da radiação solar estimada; *O<sub>i</sub>* é o valor da radiação solar observada (medida); *O* é a média dos valores observados (medidos).

### 2.4.4 Índice de confiança ou desempenho *c*

Como Leitão, Oliveira e Leitão (2007) contam, esses indicadores estatísticos foram propostos por Camargo e Sentelhas (1997) e tem por objetivo unir a precisão com a exatidão, obtendo o desempenho. Eles são definidos da seguinte maneira:

- Precisão: coeficiente de correlação *r*
- Exatidão: índice de Willmott *d*
- Confiança ou desempenho *c*

Ele indica o desempenho dos método utilizado e é dado pelo produto dos índices de precisão e exatidão, expresso da seguinte forma:

$$c = r * d \quad (2.9)$$

onde, *c* é o índice de confiança ou desempenho; *r* é o coeficiente de relação; *d* é o índice de Willmott.

Para interpretar os resultados desse índice, Camargo e Sentelhas (1997) definiram critérios de avaliação do desempenho dos métodos de estimativa da evaporação. Neste trabalho esses critérios serão usados para avaliar a comparação entre a radiação solar estimada e a medida. O Quadro 2 mostra esses critérios e as suas determinadas interpretações de desempenho.

Apesar desse critério ter sido, inicialmente, utilizado para interpretar o desempenho de métodos de estimativa de evaporação (como é dito na legenda do Quadro 2), Dornelas et al. (2006) utiliza e demonstra que ele também serve para comparar a radiação solar estimada com a medida.

Quadro 2 – Critério de interpretação do desempenho dos métodos de estimativa da evaporação, pelo índice  $c$ .

Valor de $c$	Desempenho
$> 0,85$	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
$\leq 0,40$	Péssimo

Fonte: Camargo e Sentelhas (1997)

A avaliação servirá para complementar o coeficiente de determinação  $R^2$  da regressão linear. Ela dará uma maior noção sobre o desempenho do modelo analisado, indicando o quanto os valores estimados se ajustam aos valores medidos.

#### 2.4.5 Root Mean Squared Error (RMSE)

De acordo com Hallak e Filho (2011), a Raiz do Erro Quadrático Médio, ou, em inglês, *Root Mean Squared Error* (RMSE), é um teste estatístico comumente utilizado para medir a acurácia dos resultados numéricos e apresenta valores do erro nas mesmas dimensões da variável analisada. Ele é dado pela equação:

$$RMSE = \left( \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n d_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.10)$$

onde,  $RMSE$  é a Raiz do Erro Quadrático Médio,  $n$  é o número de pares de dados;  $d_i$  é a diferença entre a radiação solar estimada e a medida.

Ele é comumente utilizado para avaliar os coeficientes de Angström-Prescott e se encontra presente em diversos trabalhos relacionados como Srivastava e Pandey (2013) e Borges et al. (2010). Quanto menor o seu valor, melhor é a performance do modelo analisado. Contudo, a presença de *outliers*<sup>1</sup> e alguns outros grandes erros que afetem a sua soma, podem aumentar o seu valor de forma significativa, pois ele realiza uma comparação termo a termo.

---

<sup>1</sup> Em estatística, é uma observação que apresenta um grande afastamento das demais da série (que está "fora" dela), ou que é inconsistente. Também chamado de valor aberrante ou atípico.

#### 2.4.6 Mean Bias Error (MBE)

O Erro Médio de Tendencia ou Viés, ou, em inglês, *Mean Bias Error* (MBE), indica a tendencia do modelo (positiva ou negativa). De acordo com Alves e Vecchia (2011), ele é o desvio das médias e indica o quanto o modelo está sendo subestimado (valor negativo) ou superestimado (valor positivo). Ele é dado pela seguinte equação:

$$MBE = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n d_i \quad (2.11)$$

onde, *MBE* é o Erro Médio de Tendencia; *n* é o número de pares de dados; *d<sub>i</sub>* é a diferença entre a radiação solar estimada e a medida.

O ideal, assim como no RMSE, é o valor do MBE tendendo a zero. Uma desvantagem apresentada é no cancelamento de um valor positivo por um negativo (STONE, 1993; ALMOROX; BENITO; HONTORIA, 2005; TOĞRUL; TOĞRUL; EVIN, 2000).

#### 2.4.7 Teste estatístico *t*-statistic

De acordo com Toğrul, Toğrul e Evin (2000), é possível possuir um alto valor de RMSE e ao mesmo tempo um pequeno valor de MBE. Por outro lado, também é possível ter um RMSE relativamente pequeno e um MBE relativamente alto. Isso mostra que apesar desses testes fornecerem resultados razoavelmente bons, de forma isolada, eles não conseguem avaliar a performance de um modelo ou método efetivamente.

Por isso, Toğrul, Toğrul e Evin (2000) utilizam o teste estatístico *t*-statistic, ou simplesmente *t*. Eles também demonstram em seu trabalho que o uso desse índice estatístico é a melhor opção, pois ele permite que os modelos analisados sejam comparados, ajudando a avaliar qual é o mais adequado. Esse é teste é mais simplista e esclarecedor, pois ele une o RMSE e o MBE, produzindo uma única avaliação. Ele é dado pela seguinte equação:

$$t = \left[ \frac{(n - 1) \cdot MBE^2}{RMSE^2 - MBE^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.12)$$

onde, *t* é o teste estatístico *t*-statistic; *n* é o número de pares de dados; *MBE* é o mean bias error; *RMSE* é o root mean squared error.

Quanto menor for o valor de *t*, melhor é a performance do modelo. Para determinar se um modelo é estatisticamente relevante, Almorox, Benito e Hontoria (2005) e Toğrul, Toğrul e Evin (2000) dizem que o valor absoluto de *t* calculado deve ser menor que o valor crítico de *t*, calculado a partir da distribuição de *t* Student com *t<sub>α/2</sub>* a um nível *α* de significância (neste trabalho, *α* = 0.05) e um grau de liberdade de *n* - 1.

# 3 Implementação

O desenvolvimento e elaboração de uma aplicação que simule uma equação matemática é o objetivo principal deste trabalho. Essa aplicação é feita computacionalmente, através de um programa sequencial, com uma entrada e saída de dados. Com isso, a prática de pôr em execução uma determinada tarefa, plano ou projeto é chamada de implementação e é isso que esse capítulo irá abordar.

Implementação é a fase do ciclo de vida de um software (programa computacional, documentação e dados), no contexto de um sistema de informação, que corresponde à elaboração e preparação dos módulos necessários à sua execução (LAUDON et al., 2007).

Tendo isso em vista, esse capítulo tem como objetivo apresentar e explicar como este trabalho foi desenvolvido. Nas próximas seções essa explicação é discorrida detalhadamente, mostrando as ferramentas e abordagens utilizadas, assim como as metodologias adotadas.

## 3.1 Método de Pesquisa

Pesquisas e estudos sobre modelos, dados e estações meteorológicas, climas, linguagens de programação, ambientes de desenvolvimento e ferramentas foram realizados para a elaboração deste trabalho. Esses estudos foram essenciais para determinar o escopo e os objetivos do trabalho.

Conforme explicado anteriormente, para a realização da implementação do modelo Angström-Prescott nos climas brasileiros, é necessário uma base de dados sobre a radiação solar global e insolação para cada uma das estações escolhidas. Como já foi mencionado nas Seções 1.2 e 2.2, as estações automáticas, neste caso específico, fornecem os dados da radiação solar enquanto as estações convencionais fornecem os dados da insolação. Logo, uma pesquisa foi realizada sobre quais estações do INMET se encaixavam nas classificações de clima e também possuíam dados disponíveis tanto de uma estação automática quanto de uma convencional.

Depois, tais dados foram padronizados e organizados em forma de tabelas para que o programa desenvolvido pudesse utilizá-los da maneira esperada. Essa organização foi feita através de macros no programa Microsoft Office Excel. Informações mais detalhadas e fundamentadas sobre como os dados foram tratados e geridos estão nas seções mais abaixo.

A implementação do modelo foi feita pelo software MATLAB, pois o mesmo fornece uma linguagem de programação simples e completa, além de ferramentas matemáticas e estatísticas que permitem analisar os resultados obtidos.

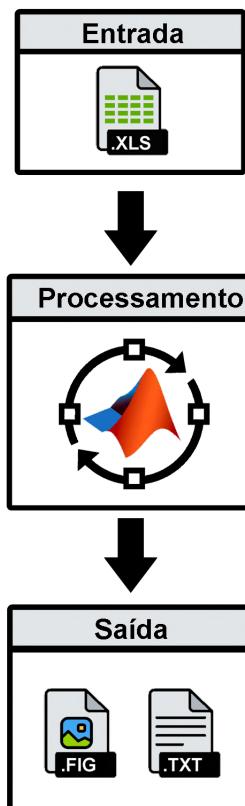
O processamento de dados é simples e, assim como é comum na computação, é realizado em três etapas descritas abaixo e, posteriormente, ilustradas pela Figura 4.

A entrada de dados é um arquivo no formato .xls<sup>1</sup> (ou qualquer outro tipo de arquivo de planilha), ou seja, é uma tabela com os dados necessários. Como já dito anteriormente e será fundamentado nas seções seguintes, esses dados passam por processos de padronização e verificação de integridade.

O processamento é a fase em que o programa, desenvolvido no MATLAB, utiliza esses dados para realizar operações conforme será mostrado na Seção 3.3. Com isso, ele produz resultados em forma de arquivos.

A saída são os arquivos produzidos pelo software. Dois tipos de arquivos serão produzidos: um tipo .fig<sup>2</sup>, ou qualquer outra extensão de imagem suportada pelo MATLAB, que são os gráficos; e outro tipo .txt<sup>3</sup>, que são as avaliações estatísticas de desempenho.

Figura 4 – Ilustração do processamento de dados.



Fonte: Elaborado pelo autor

<sup>1</sup> Extensão de arquivo, geralmente utilizada pelo software Microsoft Excel, e mundialmente conhecida como o principal tipo de arquivo de planilhas

<sup>2</sup> Extensão de arquivo utilizada pelo software MATLAB e comumente associada a uma imagem vetorial

<sup>3</sup> Extensão de arquivo para arquivos de texto que não contém formatação (ex: sem negrito ou itálico).

### 3.2 Dados

Este trabalho utiliza anos de dados diários da radiação solar global e da insolação, e de nove estações meteorológicas, localizadas em nove cidades. Logo, existe uma grande quantidade de dados a ser tratada e padronizada.

As cidades escolhidas para a aplicação do modelo implementado foram escolhidas seguindo alguns critérios. Elas precisam pertencer a um dos climas brasileiros predominantes descritos na Seção 2.1.1 e não pode haver climas repetidos (ou seja, uma cidade para cada tipo de clima). Além disso, a localidade escolhida precisa possuir uma estação automática e uma convencional com dados, respectivamente, da radiação solar global e da insolação. Tais dados precisam estar minimamente íntegros (com pelo menos 60% dos dados sem falhas ou faltantes) e durante um período de no mínimo 5 anos (esses critérios foram determinados baseados na quantidade e qualidade dos dados recebidos das estações meteorológicas). O Quadro 3 abaixo mostra as cidades escolhidas e as suas informações, de acordo com os padrões já mencionados:

Quadro 3 – Cidades escolhidas para a aplicação do modelo e as suas respectivas informações

Cidade	Latitude	Período	Clima	Dados úteis
Aracajú/SE	10°57'S	2004 - 2018	As	72.99%
Aragarças/GO	15°54'S	2008 - 2018	Aw	82.02%
Bagé/RS	31°20'S	2008 - 2018	Cfa	85.16%
Barbacena/MG	21°13'S	2003 - 2018	Cwb	78.42%
Belém/PA	01°24'S	2003 - 2018	Af	66.18%
Campos Sales/CE	07°04'S	2009 - 2018	BSh	86.77%
Curitiba/PR	25°26'S	2004 - 2018	Cfb	73.31%
Juiz de Fora/MG	21°46'S	2008 - 2018	Cwa	85.61%
Manaus/AM	03°07'S	2001 - 2018	Am	78.29%

Fonte: Elaborado pelo autor

Porém, inicialmente, foi realizada uma coleta de dados. Essa coleta foi feita com a colaboração do INMET e de duas maneiras:

- Para obter os dados da radiação solar global diária (advindos das estações automáticas), entrou-se em contato com o INMET (através do e-mail), e eles gentilmente enviaram todos os dados requisitados, de todas as estações. Os dados enviados por e-mail vieram em forma de tabelas do Excel, devidamente organizados e seguindo as normas do instituto.
- Os dados da insolação diária (advindos das estações convencionais) foram obtidos pelo Banco de Dados Meteorológicos para Pesquisa e Ensino (BDMPE). De acordo com o INMET, ele é um banco de dados para apoiar as atividades de ensino e pesquisa e outras aplicações em meteorologia, hidrologia, recursos hídricos, saúde pública, meio ambiente, etc. O acesso ao BDMPE está disponível na referência (INMET, 2017a). Os dados são salvos em formato *txt*, com a padronização do instituto

### 3.2.1 Padronização dos dados

Como já mencionado acima, apesar da padronização do próprio INMET, uma nova organização, adequação e estruturação dos dados é necessária. Isso porque o próprio INMET diz que os dados são brutos e não possuem consistência.

Essa operação é diferente para os dois tipos de dados obtidos: a radiação solar global e a insolação; pois a origem de cada um é diferente, como já foi fundamentado em outros capítulos e seções. Portanto, abaixo estão as explicações e os procedimentos executados para cada uma das variáveis.

#### 3.2.1.1 Radiação solar global

Os dados da radiação solar enviados pelo INMET vêm em formato *xls*, ou seja, em tabelas, e a medição fornecida é diária e por horas. Isso significa que para cada dia são 14 valores de radiação (um para cada hora do dia em que há brilho solar). Reforçando que esses dados, como é informado pelo INMET, são brutos e não passaram por um processo de consistência e, logo, precisam ser analisados e revisados.

Essa checagem de consistência começa logo no primeiro processo que é somar todos os 14 valores mencionados acima para chegar no valor da radiação diária. Diversos campos possuem o valor *NULL*, o que quer dizer que ocorreram possíveis falhas decorrentes de problemas (pane) nos sensores ou sinal de satélite. Por isso é importante realizar um preenchimento estatístico de valores faltantes através de uma média ponderada. O procedimento seguido para cada dia foi o seguinte:

1. Se a quantidade de campos *NULL* for maior ou igual a 9, a soma da medição daquele dia é considerada 0, pois durante a maioria das horas do dia houveram falhas nos equipamentos.
2. Caso contrário, ou seja, se a quantidade de campos *NULL* for menor que 9, uma média ponderada é feita dentre os campos restantes. Essa média é utilizada como um preenchimento dos campos faltantes (*NULL*) e a soma da radiação solar das horas do dia é feita normalmente.

Com esses procedimentos simplistas, uma certa consistência dos dados da radiação solar é atingida, garantindo que a medição diária, assim como, posteriormente, a média mensal e anual, seja um valor correspondente ao esperado.

#### 3.2.1.2 Insolação

Os dados da insolação, obtidos através do banco de dados histórico BDMEP, comentado e explicado neste capítulo, vêm em formato *txt* e separados por ; (ponto e vírgula). Portanto,

é essencial coloca-los no mesmo padrão da radiação solar global, ou seja, em modo de tabela no formato *xls*.

O procedimento dos dados da insolação foi bem mais simples do que o da radiação, pois eles já vem somados, possuindo apenas um valor para cada dia. No entanto, vários dias dos mais diversos períodos e estações analisadas, estavam em falta. Por isso, o procedimento de verificação foi o de analisar quais dias estavam com dados em falta e colocar o valor 0 para aquele determinado dia. Esse procedimento foi realizado manualmente para todas as estações.

### 3.2.2 Formatação das tabelas

Após a conclusão de todo o procedimento de integração e validação dos dados, eles ficam dispostos em duas colunas, sendo uma da radiação solar diária e outra da insolação diária.

Porém, para que o software desenvolvido consiga ler, coletar e utilizar esses dados, mais algumas colunas foram criadas. Ao todo, são 5 colunas essenciais, mostradas e explicadas abaixo:

- **LAT:** essa coluna possui apenas duas linhas. A primeira é o valor em graus e a segunda o valor em minutos. Ou seja, se a latitude for 03°07'S, a primeira linha terá o valor 3.0 e a segunda o valor 7.0. Considerando que todas as localizações são ao Sul, essa informação não precisa ser informada. Os dados das latitudes das cidades escolhidas foram fornecidos pelo INMET.
- **DATA:** coluna com a quantidade de linhas igual a quantidade de dias do período analisado. Cada linha contém a data daquele determinado dia em um formato sem ambiguidade e que facilite os cálculos e programação do software desenvolvido. O formato é "dd-mm-aaaa"; exemplo: 05-10-2005.
- **RADIACAO:** coluna com a quantidade de linhas igual a quantidade de dias do período analisado. Cada linha contém a radiação solar daquele determinado dia ( $KJ\ m^{-2}\ d^{-1}$ ). A obtenção desse valor já foi explicada na Seção 3.2.1.1. Posteriormente, esse valor será convertido de  $KJ\ m^{-2}\ d^{-1}$  para  $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$ .
- **MEDIA\_RAD:** coluna com a quantidade de linhas igual a quantidade de meses do período analisado. Cada linha contém a média mensal da radiação solar diária ( $KJ\ m^{-2}\ d^{-1}$ ). A obtenção desse valor é feita através de uma média simples, somando todos os valores de radiação diária do mês e dividindo pela quantidade de dias não-nulos (que possuem algum valor maior que zero). Posteriormente, esse valor será convertido de  $KJ\ m^{-2}\ d^{-1}$  para  $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$ .

- **INSOLACAO:** coluna com a quantidade de linhas igual a quantidade de dias do período analisado. Cada linha contém a insolação daquele determinado dia ( $\text{h d}^{-1}$ ). A obtenção e padronização desses dados foi explicada na Seção 3.2.1.2.
- **MEDIA\_INS:** coluna com a quantidade de linhas igual a quantidade de meses do período analisado. Cada linha contém a média mensal da insolação daquele determinado dia ( $\text{h d}^{-1}$ ). A obtenção desse valor é feita através de uma média simples, somando todos os valores de insolação diária do mês e dividindo pela quantidade de dias não-nulos (que possuem algum valor maior que zero).

### 3.2.3 Conclusão

Com essa formatação definida, o software desenvolvido é capaz de ler os dados diretamente de uma determinada tabela. A formatação explicada acima foi feita através das já comentadas macros no software Excel. Como essas macros servem apenas para otimizar o processo de formatação dos dados de entrada, elas não são mencionadas e nem fundamentadas detalhadamente neste trabalho.

O mais importante para a compreensão do trabalho é saber a formatação dos dados e a maneira com que eles foram tratados. Isso serve para que haja um nível de confiança e uma certificação de que os dados foram polidos e que os resultados obtidos condizem com a realidade dos dados colhidos.

## 3.3 Software desenvolvido

O programa foi desenvolvido através do software e ambiente de programação MATLAB que é definido como um sistema interativo e uma linguagem de programação para computação técnica e científica em geral, integrando a capacidade de fazer cálculos, visualização gráfica e programação (TONINI; COUTO, 2018).

Esse software de desenvolvimento foi escolhido porque ele facilita a programação numérica, a construção de gráficos e o cálculo com matrizes. Além disso, os problemas e soluções são expressos no MATLAB quase da mesma maneira que seriam escritos matematicamente. Como trabalho desenvolvido requer uma quantidade muito grande de cálculos, gráficos e análises estatísticas, ele se apresenta como a solução ideal.

O programa criado é composto de várias funções e *scripts*<sup>4</sup>. As funções recebem um ou mais valores como entrada, realiza operações com os mesmos e devolvem um ou mais valores como saída. Já os scripts são partes de código executados a parte, sem nenhum valor de entrada ou de saída; todas as operações realizadas nos scripts ficam salvas no *workspace*<sup>5</sup>

<sup>4</sup> Conjunto de instruções em código para os programas de computador, escritas em linguagem que possa ser entendida pelos programadores, definindo as execuções no programa.

<sup>5</sup> Espaço do MATLAB que contém as variáveis, e seus respectivos valores, criadas ou importadas pelo usuário

do MATLAB. Além disso, os scripts possuem uma ordem de execução e são eles que fazem a chamada das funções.

O objetivo dessa seção é apresentar os scripts e funções criadas para implementar o modelo de radiação solar Angström-Prescott. O foco será na didática, ou seja, explicar como uma pessoa que possua o programa precisaria adaptá-lo para que o mesmo funcione perfeitamente e apresente os resultados prometidos.

### 3.3.1 Funções

Foram desenvolvidas cinco funções que auxiliam e fazem pequenos cálculos para o programa principal (que é dividido em scripts). O nome de cada uma das funções e as suas funcionalidades, de modo simplificado, são mostrados abaixo:

- **f\_angdecl:** função que calcula o ângulo de declinação ( $\delta$ ), fundamentado na Seção 2.3.1.1. Ela recebe dois valores como entrada: dia (01 até 31) e mês (fornecido no formato '-xx-', em que xx é o valor numérico do mês); e apresenta apenas um valor como saída: o ângulo de declinação.
- **f\_horaangsolar:** função que calcula o ângulo horário do pôr do sol ( $\omega$ ), fundamentado na Seção 2.3.1.2. Ela recebe dois valores como entrada: a latitude da cidade ( $\phi$ ) em graus decimais e o ângulo de declinação solar ( $\delta$ ) em graus; e apresenta apenas um valor como saída: o ângulo horário do pôr do sol.
- **f\_convertelati:** função que converte a latitude dada no formato GMS (Graus, Minutos e Segundos), porém sem os segundos, pois assim é fornecido pelo INMET, para o formato GDEC (Graus Decimais). Ela recebe três valores como entrada: graus, minutos e hemisfério ('S' se for sul ou 'N' se for norte); e apresenta apenas um valor como saída: o valor da latitude convertida para graus decimais.
- **f\_isneg:** função que verifica se o valor dado como entrada é negativo ou não. Ela recebe apenas um valor qualquer como entrada; e apresenta apenas um valor como saída: 1 se o valor da entrada for negativo e 0 se o valor não for.

Nenhuma das funções precisa ser adaptada ou alterada para algum possível uso futuro com dados diferentes. Elas possuem a extensão ".m", pois são arquivos do MATLAB, e servem apenas como um auxílio as operações executadas nos scripts, que são explicados na próxima seção.

### 3.3.2 Scripts

Esses conjuntos de códigos que já foram esclarecidos neste capítulo são o programa como um todo, mas divididos em partes. Essa divisão de um programa em pequenos pedaços é

bem comum na computação pois facilita o compreendimento, além da documentação ficar mais organizada e completa e de definir funções específicas para cada uma das partes.

Listado e explicado abaixo estão todos os scripts criados para a execução deste trabalho. Além das orientações que são mostradas, todos os arquivos também estão com o código comentado, possuindo uma documentação completa.

- **ExecutaScripts:** Como já dito anteriormente, os scripts precisam ser executados em uma determinada ordem. Esse script tem a função de executar os demais, na ordem correta. Além disso, ele possui instruções para que quem esteja usando o programa saiba o que fazer para obter os resultados gerados pelo software.
- **Principal:** É a base de todos os scripts e realiza operações essenciais. Dentre elas, ele lê a tabela dos dados, mencionada na seção 3.2, gera tabelas e vetores e define constantes que serão utilizadas posteriormente, em outros programas. Para que o software possa ser utilizado corretamente, alguns ajustes em algumas constantes devem ser feitos:
  - '**linhas**': deve possuir o valor da quantidade de linhas da coluna RADIACAO da tabela de dados a ser lida.
  - '**linhas\_media**': deve possuir o valor da quantidade de linhas da coluna chamada RAD\_MEDIA da tabela de dados a ser lida.
  - '**nome\_arquivo**': deve possuir o diretório da tabela a ser lida. Exemplo de uso:  
nome\_arquivo = 'C:\Users\pauli\Documents\Manaus.xls';
  - '**nome\_cidade**': deve possuir o nome da cidade a ser analisada. Exemplo de uso:  
nome\_cidade = 'Manaus';
  - '**str1**': Essa string deve possuir a localização da coluna DATA. Um exemplo de uso é o seguinte: str1 = 'Q11:Q'; em que o que pode ser alterado é o 'Q11:Q', que identifica a localização do inicio da coluna DATA. Essa string, posteriormente, é concatenada com a variável 'linhas', delimitando a quantidade de linhas da coluna (ficando, por exemplo, 'Q11:Q5000').
  - '**Tlati**': essa variável é uma tabela da coluna LAT, que contém duas linhas, que são os dois valores da latitude. Um exemplo de uso é o seguinte: Tlati = readtable(nome\_arquivo,'Range','D5:D7'); em que o pode ser alterado para se ajustar a tabela é o 'D5:D7', identificando qual a posição da coluna LAT e quais valores dela serão lidos.
- **Rad\_MediaMensalAnual:** Calcula os valores da média mensal e da média anual da radiação solar global.
- **Ins\_MediaMensalAnual:** Calcula os valores da média mensal e da média anual da insolação.

- **Div\_Diaria:** Realiza a divisão da radiação solar global medida ( $H$ ) pela radiação solar extraterrestre ( $H_0$ ) e a divisão da insolação medida ( $n$ ) pela insolação máxima ( $N$ ), utilizando dados da medição de cada dia. Ou seja, realiza as operações:  $H/H_0$  e  $n/N$ , para valores diários.
- **Div\_MediaMensal:** Realiza a divisão da radiação solar global medida ( $H$ ) pela radiação solar extraterrestre ( $H_0$ ) e a divisão da insolação medida ( $n$ ) pela insolação máxima ( $N$ ), utilizando a média mensal dos dados da medição diária. Ou seja, realiza as operações:  $H/H_0$  e  $n/N$ , para valores das médias mensais.
- **Div\_MediaAnual:** Realiza a divisão da radiação solar global medida ( $H$ ) pela radiação solar extraterrestre ( $H_0$ ) e a divisão da insolação medida ( $n$ ) pela insolação máxima ( $N$ ), utilizando a média anual dos dados da medição diária. Ou seja, realiza as operações:  $H/H_0$  e  $n/N$ , para valores das médias anuais.
- **Div\_Estacoes:** Realiza a divisão da radiação solar global medida ( $H$ ) pela radiação solar extraterrestre ( $H_0$ ) e a divisão da insolação medida ( $n$ ) pela insolação máxima ( $N$ ), utilizando as medições diárias de cada estação climática para criar uma média daquela determinada estação. Ou seja, realiza as operações:  $H/H_0$  e  $n/N$ , para cada estação. Cada estação possui um período de tempo, padronizado pela meteorologia para facilitar cálculos, mostrado abaixo:
  - **Primavera:** 1 setembro até 30 novembro
  - **Verão:** 1 dezembro até 28 fevereiro
  - **Outono:** 1 março até 31 maio
  - **Inverno:** 1 junho até 31 agosto
- **Plot\_Regressão:** Gera duas figuras (que podem ser editadas, configuradas e exportadas para o formato desejado, utilizando a interface do MATLAB) e um arquivo no formato texto (.txt).
  - A primeira figura contém quatro gráficos: a regressão linear do período o outono, da primavera, do verão e do inverno.
  - A segunda figura contém três gráficos: a regressão linear do método diário, mensal e anual.
  - O arquivo texto contém os valores de  $a$ ,  $b$ ,  $a + b$  e  $R^2$ , para todos os períodos e métodos analisados; o nome desse arquivo utiliza a constante 'nome\_cidade' definida no script Principal. O nome padrão desse arquivo, assim com o diretório em que ele será salvo, estão definidos na variável 'fid', localizados no inicio do script.

- **Calculo\_Estimada:** Utiliza os valores de  $a$  e  $b$  obtidos por cada método ou período anterior para determinar estimativas dos valores de radiação solar. Gera a radiação solar estimada diária, mensal, anual e estacional.
- **Plot\_Estimada:** Gera uma figura (que pode ser editada, configurada e exportada para o formato desejado, utilizando a interface do MATLAB). A figura contém quatro gráficos: a comparação entre a radiação solar medida (representada pelos pontos azuis) e a radiação solar estimada (representada pelos pontos vermelhos) nos quatro tipos de métodos de calibração: diário, mensal, anual e estacional.
- **Estimada\_Analise:** Gera um arquivo texto contendo os valores de  $r$ ,  $d$ ,  $c$ , RMSE, MBE,  $t$ -statistic e  $t$ -critical, analisados comparando os valores da radiação solar medida com a estimada, para todos os métodos de calibração utilizados; o nome desse arquivo utiliza a constante 'nome\_cidade' definida no script Principal. O nome padrão desse arquivo, assim com o diretório em que ele será salvo, estão definidos na variável 'fid', localizados no inicio do script.

## 4 Resultados e discussões

Após aplicar os dados obtidos no programa desenvolvido, diversos resultados foram coletados. Como já foi comentado anteriormente, foram usados quatro tipos de métodos de calibração: diário, mensal, anual e estacional. Este capítulo mostra, através de gráficos e tabelas, os resultados obtidos para cada uma das calibrações e estimativas nas cidades analisadas.

A apresentação dos resultados é padronizada. A cada cidade analisada serão mostrados os gráficos das regressões lineares e uma tabela apresentando as conclusões e os dados obtidos através dos gráficos; após isso, uma discussão será realizada sobre o que esses dados significam e qual a importância dos mesmos. A segunda parte é a apresentação dos gráficos comparativos entre a radiação estimada, também chamada de radiação calculada, e a radiação medida, e da tabela com os resultados analisados por modelos estatísticos; e depois disso também será feita uma discussão sobre a importância dos dados obtidos e da comparação realizada.

É bom relembrar o que foi dito na descrição do script 'Div\_Estacoes', mostrado na Seção 3.3.2. Isto é, que a regressão linear trabalha com as quatro estações do ano, obtendo valores de  $a$  e  $b$  para cada uma. Esses valores são, posteriormente, utilizados em conjunto para calcular a radiação solar estimada no método estacional. Exemplo: nos meses de setembro, outubro e novembro, os valores da regressão linear da primavera são utilizados; e assim por diante, para o restante das estações do ano.

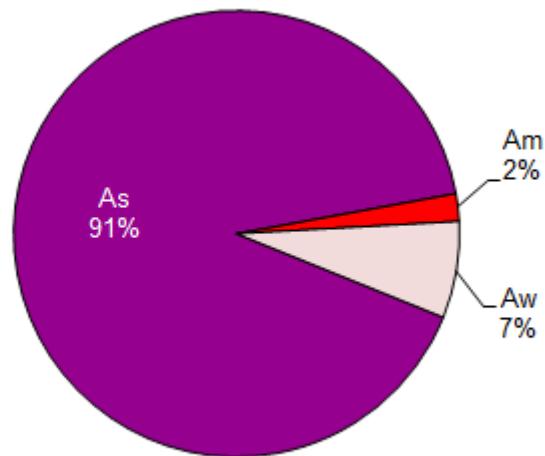
No final, uma comparação entre as cidades e os climas é realizada. Com isso, eles são classificados de acordo com o seu desempenho, levando em consideração os resultados das análises estatísticas assim como a porcentagem de dados úteis. Posteriormente, os coeficientes  $a$  e  $b$  obtidos no atual trabalho são comparados com os de outras cidades e climas, obtidos por trabalhos similares.

## 4.1 Aracajú/SE

A cidade analisada a seguir é a de Aracajú, que se encontra no estado do Sergipe. De acordo com o estudo realizado por Dubreuil et al. (2017), cada localização brasileira possui um ou mais tipos climáticos que são detectados ao longo do ano. A Figura 5 mostra as frequências dos tipos de climas anuais para a cidade de Aracajú.

Como é possível perceber, o clima mais predominante, com 91% de frequência, é o As. Esse tipo de classificação climática é proposto por Köppen e adaptado por (DUBREUIL et al., 2017). O clima As é conhecido por ser quente com chuva de inverno, conforme foi mostrado no Quadro 1.

Figura 5 – Frequências dos tipos de climas anuais na cidade de Aracajú/SE



Fonte: Adaptado de Dubreuil et al. (2017)

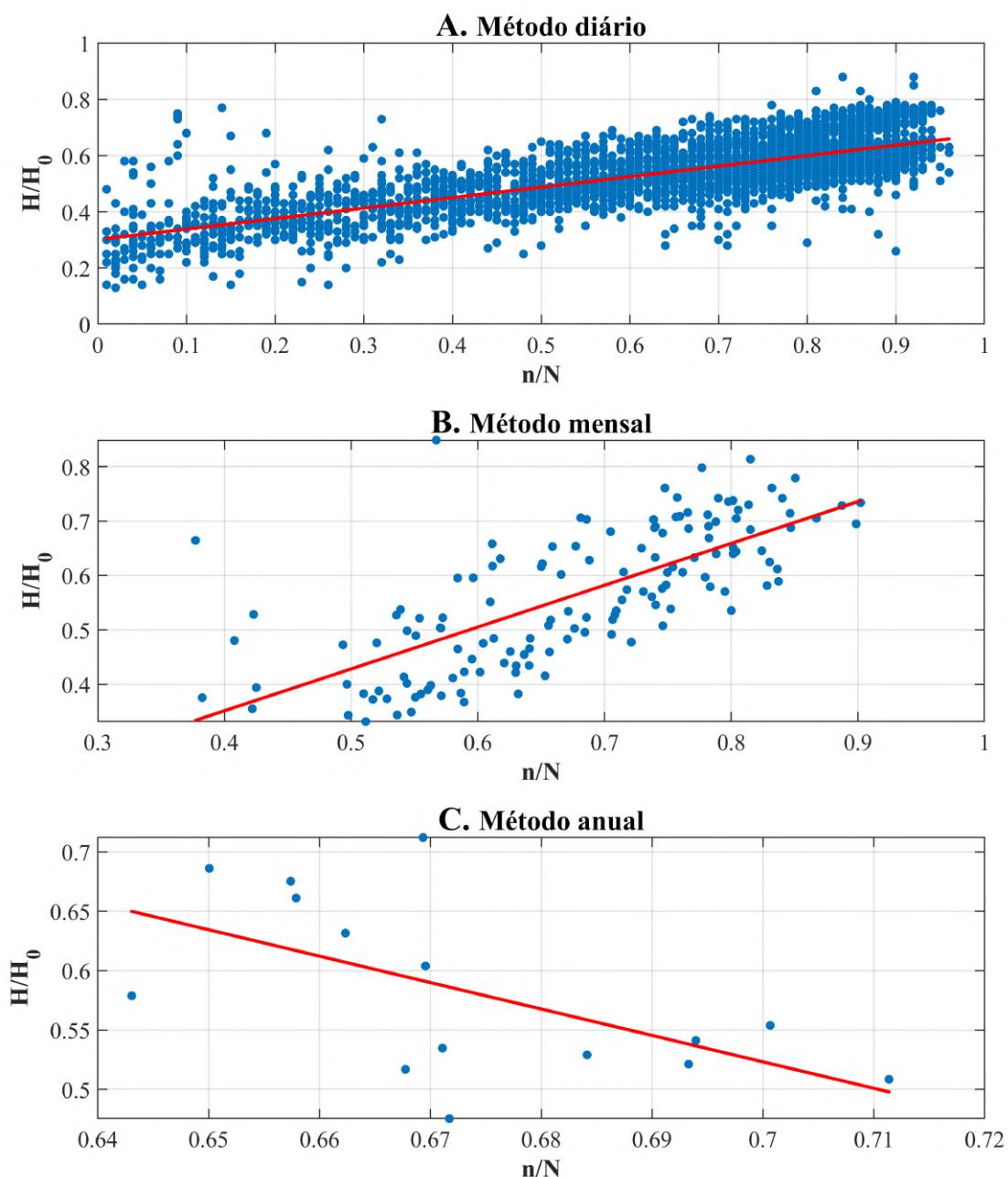
A estação meteorológica automática desta cidade está localizada na latitude 10°57'S, longitude 37°03'W e altitude 4.72m. Já a estação meteorológica convencional está localizada na latitude 10°95'S, longitude 37°04'W e altitude 4.72m. Os valores de latitude escolhidos foram os da estação automática, pois ela fornece os dados da radiação solar global, que é o elemento central desse estudo.

O período analisado foi de 2004 até 2018. Nesse período, 5479 dados foram coletados, e 3999 desses dados foram utilizados (mais informações sobre a coleta e utilização de dados na Seção 3.2). Com isso, têm-se um aproveitamento de 72.99% das informações.

#### 4.1.1 Regressão Linear

Os gráficos da Figura 6 mostram as regressões lineares obtidas através dos métodos: diário, mensal e anual. No diário existe um grande agrupamento de dados, principalmente no final, na forma de uma linha inclinada ascendente. No mensal existem agrupamentos dispersos de dados mas que também formam uma linha inclinada ascendente. O método anual possui dados completamente dispersos, e a regressão linear obtida é uma linha descendente.

Figura 6 – Comparação dos valores da dispersão diária, mensal e anual da razão entre a radiação solar e a extraterrestre( $H/H_0$ ) e a razão da insolação ( $n/N$ ) no período de 2004 a 2018, na cidade de Aracajú/SE

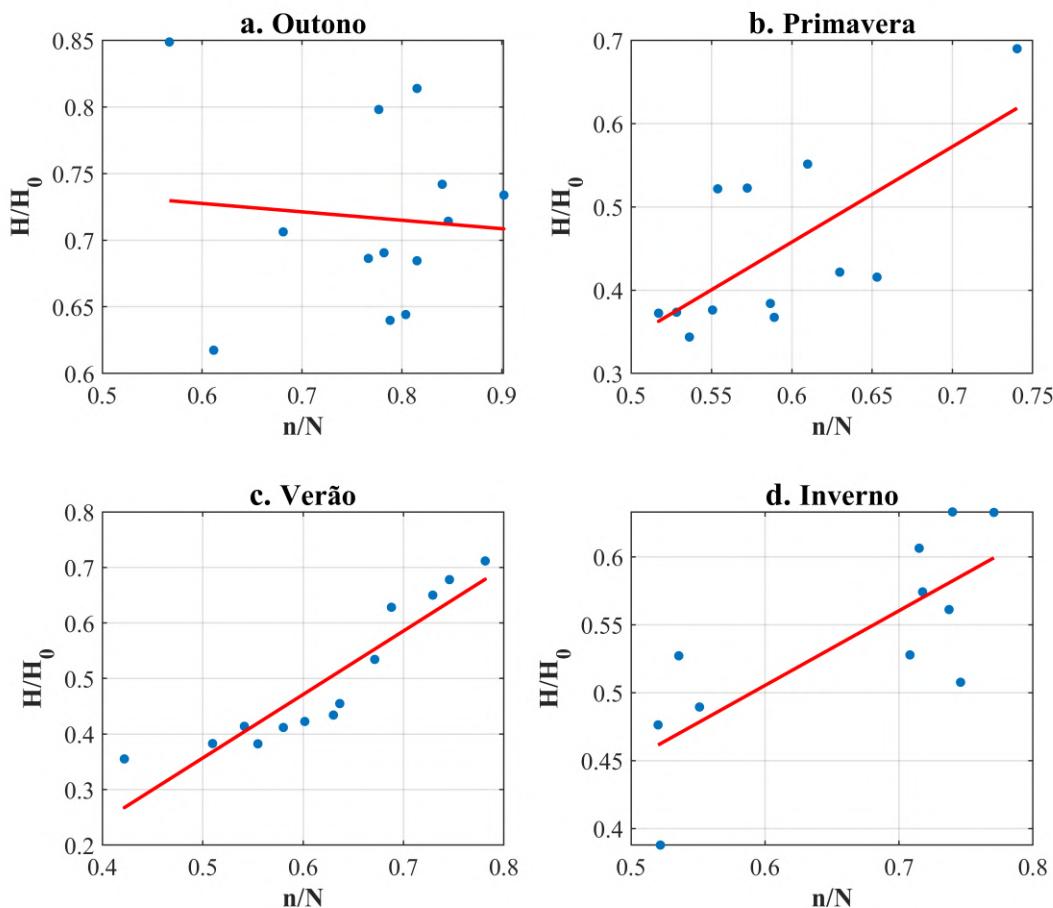


Fonte: Elaborado pelo autor

Os gráficos da Figura 7 mostram as regressões lineares obtidas pelo método estacional, ou seja, analisando o período de cada estação. No outono observa-se uma linha descendente, com valores dispersos e sem padrão. A primavera apresenta uma linha ascendente com dados esparsos e uma anomalia. O verão possui um padrão bem definido ao longo de uma linha ascendente. O inverno possui anomalias e dados dispersos, mas consegue gerar uma linha ascendente.

Figura 7 – Comparação dos valores da dispersão das quatro estações do ano da razão entre a radiação solar e a extraterrestre ( $H/H_0$ ) e a razão da insolação ( $n/N$ ) no período de 2004 a 2018, na cidade de Aracajú/SE

#### D. Método estacional



Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 1 mostra os resultados obtidos a partir da regressão linear dos gráficos da Figura 6 e da Figura 7. Observa-se que o valor de  $a$  e  $b$ , assim como o valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), variam muito de acordo com a metodologia utilizada. A constante empírica  $a$  vai de -0.2308 na primavera até 2.08 no método anual e  $b$  de -2.2239 no método anual até 1.1474 na primavera.

A coluna  $a + b$  mostra que, apesar da disparidade dos valores de  $a$  e  $b$  nos métodos analisados, a soma deles tende a ter uma menor variância, de cerca de 0.2. A única exceção é no método anual, pois como o gráfico C mostra, poucos valores foram analisados (apenas um para cada ano analisado), ficando mais suscetível a erros e discrepâncias.

O melhor valor de  $R^2$  foi de 0.8495 durante o período do verão, o que faz sentido considerando que é a estação que possui mais incidência solar e, logo, os melhores dados de radiação solar. Já analisando os gráficos A, B e C, e seus respectivos desempenhos mostrados da Tabela 1, vemos que o que apresenta melhor resultado é o A, ou seja, o método diário, com um valor de  $R_2$  igual a 0.577. Além disso, esse método é o que analisa a maior quantidade de dados.

Tabela 1 – Resultados da regressão linear para Aracajú/SE (2004-2018)

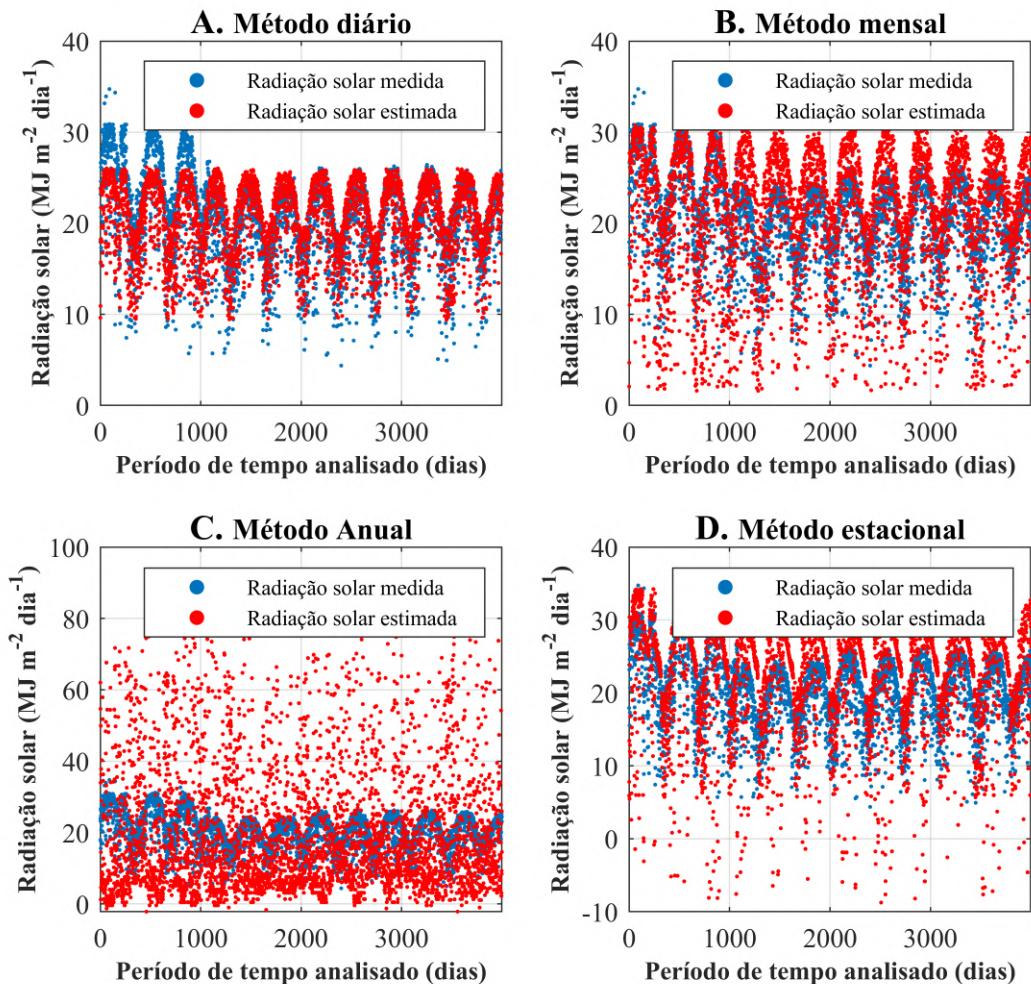
<b>Período/método</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>a + b</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Outono	0.7655	-0.0632	0.7023	0.0074
P <small>rimavera</small>	-0.2308	1.1474	0.9166	0.4799
V <small>erão</small>	-0.2155	1.1445	0.929	0.8495
I <small>nverno</small>	0.1755	0.5497	0.7252	0.5929
D <small>iário</small>	0.3012	0.3732	0.6744	0.577
M <small>ensal</small>	0.0439	0.7689	0.8128	0.525
A <small>nual</small>	2.08	-2.2239	-0.1439	0.3352

Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.1.2 Radiação solar estimada

Os gráficos apresentados na Figura 8 mostram uma razoável discrepância entre os valores da radiação solar medida e estimada. O método que, aparentemente, se adequa melhor e consegue estimar mais precisamente é o diário (A); e, mesmo assim, no período analisado até 1000 dias, ele se mostra muito falho. Os gráficos B, C e D possuem um alto índice de erro. Porém os gráficos B e D ainda conseguem acompanhar a variância dos dados, e por esse motivo podem apresentar resultado aparentemente bons em algumas análises estatísticas.

Figura 8 – Comparação dos valores da radiação solar medida com a estimada, calculada através dos métodos: diário, mensal, anual e estacional no período de 2004 a 2018, na cidade de Aracajú/SE



Fonte: Elaborado pelo autor

Analizando o índice  $c$ , mostrado na Tabela 2, pode-se observar que ele teve seu maior valor, de 0.7665, no método diário, com um  $r$  de valor 0.8454 e um  $d$  de valor 0.9067; se enquadrando como um desempenho muito bom, de acordo com os critérios de Camargo e Sentelhas (1997), apresentados na Seção 2.4.4. O método mensal obteve desempenho bom, de

0.7088, enquanto o estacional foi ruim, valendo 0.4825 e o anual péssimo, com um valor de -0.033.

O melhor RMSE e MBE apresentados foram de 2.6432 e 0.0346, respectivamente, e ambos foram pelo método diário. O teste  $t$  descarta os métodos mensal e estacional, pois possuem um valor maior que o  $t_{crit}$  de 1.96. Curiosamente, a melhor performance de  $t$  foi no método anual, com um valor de 0.1373, mas com um RMSE muito ruim, de 21.2789.

Tabela 2 – Resultados da comparação entre a radiação solar medida e a estimada para Aracajú/SE (2004-2018)

Método	r	d	c	RMSE (MJ m <sup>-2</sup> m <sup>-1</sup> )	MBE (MJ m <sup>-2</sup> m <sup>-1</sup> )	t
Diário	0.8454	0.9067	0.7665	2.6432	0.0346	0.8278
Mensal	0.8145	0.8702	0.7088	4.1686	-0.4558	6.9553
Anual	-0.6722	0.0491	-0.033	21.2789	-0.0462	0.1373
Estacional	0.6495	0.7429	0.4825	6.3015	-2.0347	21.5718

$t_{crit}$  a 5% = 1.96.

Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.1.3 Discussão

Apesar dos relativamente baixos resultados de  $R^2$  nos métodos analisados, a relação entre os dados se mostrou boa nos métodos diário e mensal. O método anual possui diversas anomalias e se destoa do restante, apresentando valores de  $r$  e  $c$  negativos, além de um  $R^2$  abaixo da média. Apesar do método mensal apresentar resultados levemente inferiores ao diário, o seu MBE apresenta resultados ruins e longe do esperado. Isso faz com que o seu  $t$  seja maior que o  $t_{crit}$ , descredитando esse método.

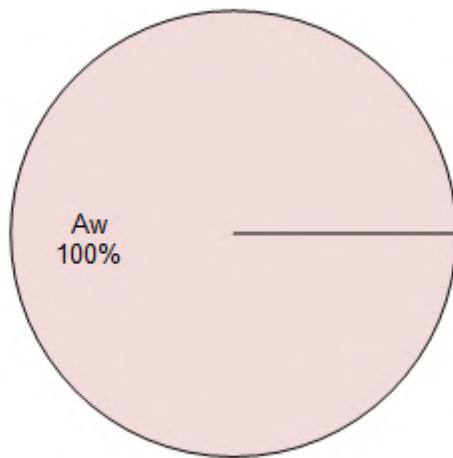
Logo, é possível dizer que todas as análises apontaram que o método diário é o mais eficiente para a cidade de Aracajú e, consequentemente, para o clima As. Ele obteve boas avaliações tanto na análise da regressão linear quanto na estimativa da radiação solar, com um valor de  $t$ -statistic passando no critério adotado. De forma geral, a equação de Angström-Prescott consegue ter um grau de eficiência razoável nesta cidade e, possivelmente, neste clima, apesar do baixo valor de  $R^2$ . Com isso, a melhor calibração para os coeficientes  $a$  e  $b$  para Aracajú é de 0.3012 e 0.3732, respectivamente, obtida através do método diário.

## 4.2 Aragarças/GO

A cidade analisada a seguir é a de Aragarças, que se encontra no estado de Goiás. De acordo com o estudo realizado por Dubreuil et al. (2017), cada localização brasileira possui um ou mais tipos climáticos que são detectados ao longo do ano. A Figura 9 mostra as frequências dos tipos de climas anuais para a cidade de Aragarças.

Como é possível perceber, o clima completamente predominante, com 100% de frequência, é o Aw. Esse tipo de classificação climática é proposto por Köppen e adaptado por (DUBREUIL et al., 2017). O clima Aw é conhecido por ser quente com chuvas de verão, conforme mostrado no Quadro 1.

Figura 9 – Frequências dos tipos de climas anuais na cidade de Aragarças/GO



Fonte: Adaptado de Dubreuil et al. (2017)

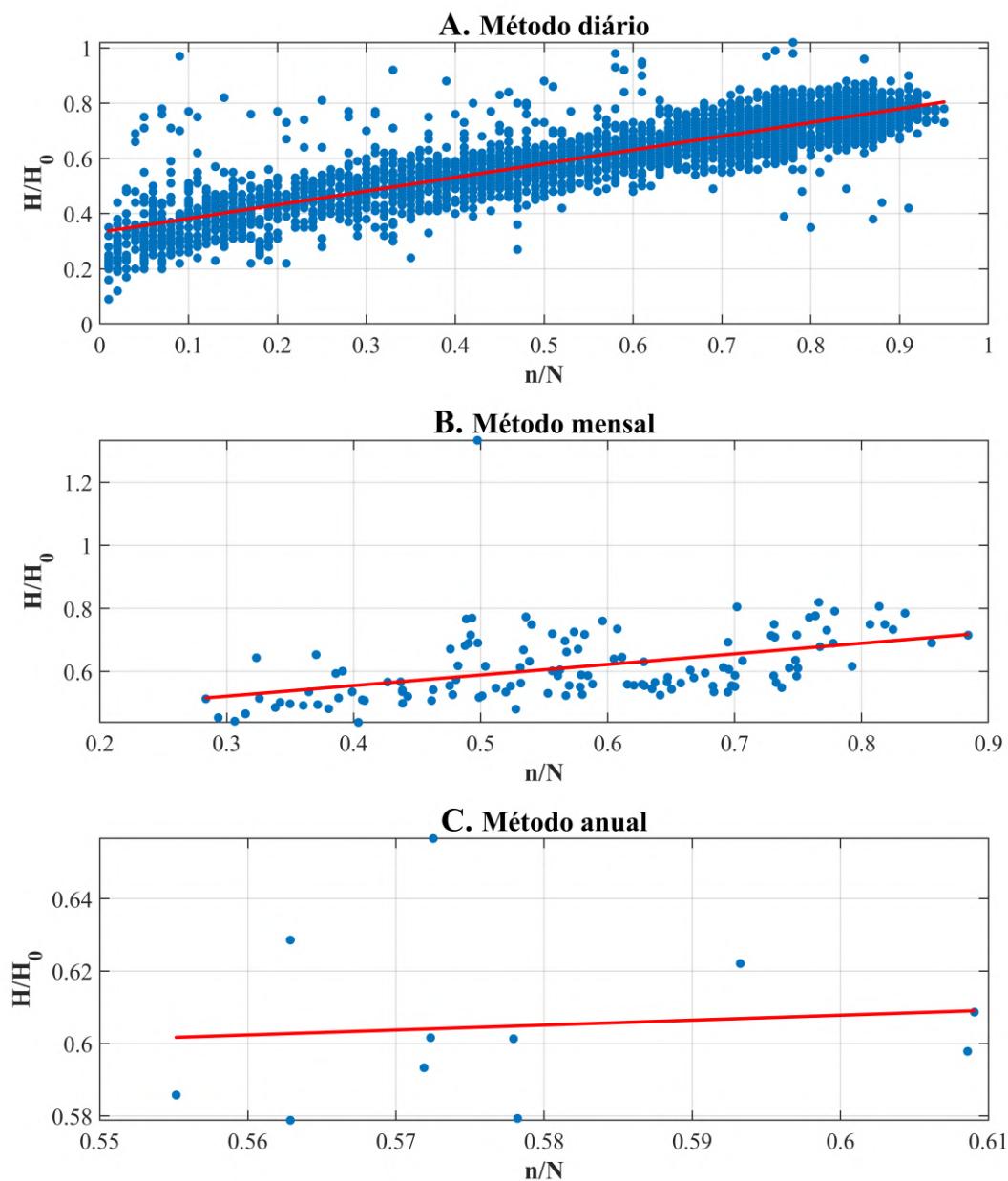
A estação meteorológica automática desta cidade está localizada na latitude 15°54'S, longitude 52°14'W e altitude 347m. Já a estação meteorológica convencional está localizada na latitude 15°09'S, longitude 52°23'W e altitude 345m. Os valores de latitude escolhidos foram os da estação automática, pois ela fornece os dados da radiação solar global, que é o elemento central desse estudo.

O período analisado foi de 2008 até 2018. Nesse período, 4018 dados foram coletados, e 3577 desses dados foram utilizados (mais informações sobre a coleta e utilização de dados na Seção 3.2). Com isso, têm-se um aproveitamento de 82.02% das informações.

#### 4.2.1 Regressão Linear

Os gráficos da Figura 10 mostram as regressões lineares obtidas através dos métodos: diário, mensal e anual. No diário existe um grande agrupamento de dados, na forma de uma linha inclinada ascendente. No mensal existem agrupamentos dispersos de dados mas que formam uma linha inclinada ascendente. O método anual possui dados completamente dispersos, e a regressão linear obtida é uma linha levemente ascendente, quase horizontal e que cobre poucos valores.

Figura 10 – Comparação dos valores da dispersão diária, mensal e anual da razão entre a radiação solar e a extraterrestre ( $H/H_0$ ) e a razão da insolação ( $n/N$ ) no período de 2008 a 2018, na cidade de Aragarças/GO

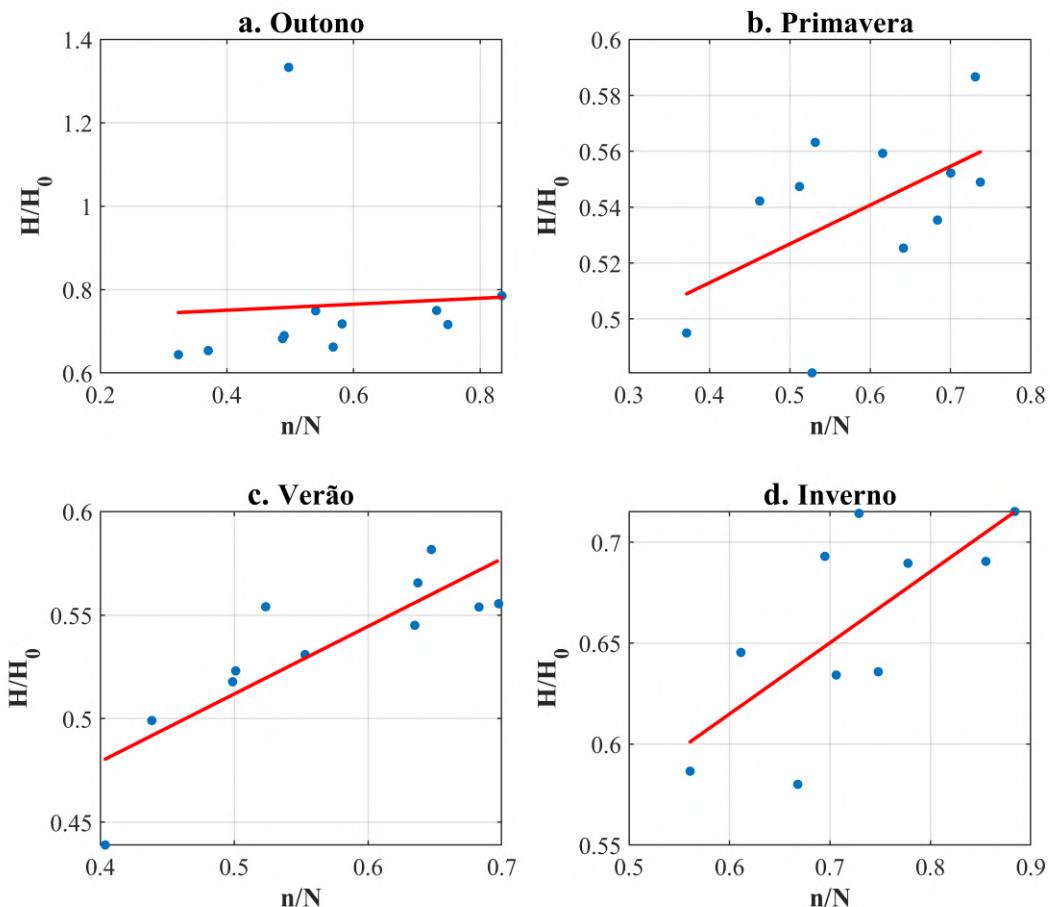


Fonte: Elaborado pelo autor

Os gráficos da Figura 11 mostram as regressões lineares obtidas pelo método estacional, ou seja, analisando o período de cada estação. No outono observa-se uma linha quase horizontal, com valores agrupados abaixo dessa linha mas com um valor muito disperso, bem acima. Na primavera e no inverno, apesar da linha ser mais inclinada ascendentemente, os valores estão dispersos. No verão, a linha é inclinada ascendentemente e os valores estão agrupados e distribuídos ao longo da mesma.

Figura 11 – Comparação dos valores da dispersão das quatro estações do ano da razão entre a radiação solar e a extraterrestre ( $H/H_0$ ) e a razão da insolação ( $n/N$ ) no período de 2008 a 2018, na cidade de Aragarças/GO

#### D. Método estacional



Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 3 mostra os resultados obtidos a partir da regressão linear dos gráficos da Figura 10 e da Figura 11. Observa-se que o valor de  $a$  manteve uma relativa constância dentre os métodos vistos, exceto no outono; com seu valor variando, na média, entre 0.3 e 0.4. O valor de  $b$  não obteve uma constância tão boa quanto o valor de  $a$ , com o outono obtendo um valor bem abaixo dos outros, e o período diário bem acima; com seu valor variando, na média,

entre 0.6 e 0.7

A coluna  $a + b$  mostra que, apesar da disparidade dos valores de  $a$  e  $b$  nos métodos analisados, a soma deles tende a ter uma menor variância, de cerca de 0.2. Isso significa que sempre que o valor de  $a$  é muito alto, o de  $b$  tende a ser muito baixo, e o mesmo vale para o oposto.

O melhor valor de  $R^2$  foi de 0.7713 no método diário. O período do verão também apresenta um bom coeficiente de determinação, de valor 0.7032; o que faz sentido considerando que é a estação que possui mais incidência solar e, logo, os melhores dados de radiação solar. Como era de se esperar, pela análise dos gráficos D.a e C, o período do outono obteve o pior resultado, com um  $R^2$  valendo 0.0034, seguido pelo método anual de valor 0.0109. Já o método mensal foi inesperadamente ruim, pois foi afetado por um único dado completamente disperso e fora da média, visto no gráfico B (lembrando que esse método analisa poucos dados, fazendo com que apenas um erro tenha impacto no coeficiente de determinação).

Tabela 3 – Resultados da regressão linear para Aragarças/GO (2008-2018)

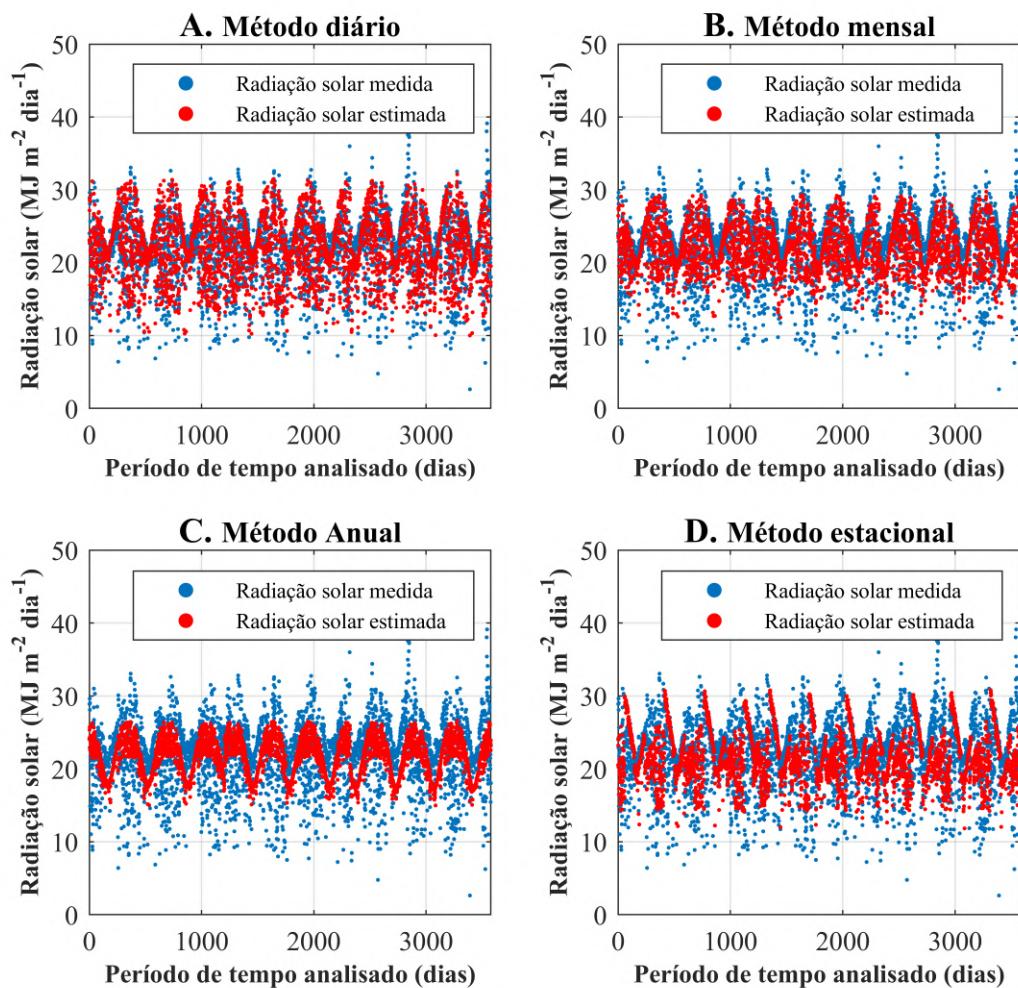
<b>Período/método</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>a + b</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Outono	0.7216	0.0718	0.7934	0.0034
Primavera	0.4574	0.1389	0.5963	0.3017
Verão	0.3486	0.3266	0.6752	0.7032
Inverno	0.4032	0.3528	0.756	0.5058
Diário	0.3325	0.4967	0.8292	0.7713
Mensal	0.4213	0.3353	0.7566	0.1852
Anual	0.526	0.1364	0.6624	0.0109

Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.2.2 Radiação solar estimada

Os gráficos apresentados na Figura 12 mostram uma razoável discrepância entre os valores da radiação solar medida e estimada. O método que, aparentemente, se adéqua melhor e consegue estimar mais precisamente é o diário. Os gráficos B, C e D possuem um alto índice de erro. Porém os gráficos B e D ainda conseguem acompanhar a variância dos dados, e por esse motivo podem apresentar resultados aparentemente bons em algumas análises estatísticas.

Figura 12 – Comparação dos valores da radiação solar medida com a estimada, calculada através dos métodos: diário, mensal, anual e estacional no período de 2008 a 2018, na cidade de Aragarças/GO



Fonte: Elaborado pelo autor

Analizando o índice  $c$ , mostrado na Tabela 4, pode-se observar que ele teve seu maior valor, de 0.752, no método diário, com um  $r$  valendo 0.8291 e um  $d$  de valor 0.907; se enquadrando como um desempenho bom, de acordo com os critérios de Camargo e Sentelhas (1997), apresentados na Seção 2.4.4. O método mensal obteve desempenho mediano, com um

$c$  valendo 0.6351, enquanto o estacional e o anual foram péssimos, com valores de 0.2378 e 0.2214, respectivamente.

Os resultados do RMSE foram satisfatórios para todos os métodos, mas os melhores foram no diário e no mensal, com valores de 2.6485 e 3.0599, respectivamente. O melhor valor do MBE foi de 0.0026, no método mensal; porém o valor do método diário, de -0.0839, também pode ser considerado satisfatório. Para aliar essas duas avaliações, o teste  $t$  é usado, e ele descarta os métodos anual e estacional, pois ambos apresentam um valor maior que o  $t_{crit}$  de 1.96. Já o melhor valor apresentado para esse teste é de 0.0508, apresentado pelo método mensal. um valor de 0.1373, mas com um RMSE muito ruim, de 21.2789.

Tabela 4 – Resultados da comparação entre a radiação solar medida e a estimada para Aragarças/GO (2008-2018)

Método	r	d	c	RMSE (MJ m <sup>-2</sup> m <sup>-1</sup> )	MBE (MJ m <sup>-2</sup> m <sup>-1</sup> )	t
Diário	0.8291	0.907	0.752	2.6485	-0.0839	1.8953
Mensal	0.7613	0.8342	0.6351	3.0599	0.0026	0.0508
Anual	0.3982	0.5561	0.2214	4.3584	0.279	3.8359
Estacional	0.383	0.6208	0.2378	4.6705	0.287	3.6816

$t_{crit}$  a 5% = 1.96.

Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.2.3 Discussão

Combinando os resultados observados pelas regressões lineares e pela radiação estimada é possível verificar que apenas dois métodos obtiveram avaliações satisfatórias: o diário e o mensal. O método anual foi o pior, com dados discrepantes e sem relação. O método estacional foi mediano em algumas estações, mas péssimo no outono; além disso, ele não conseguiu estimar a radiação de modo satisfatório, com dados muito agrupados e centralizados.

O método diário foi o que obteve a melhor linha de ajuste, com os dados muito bem dispersos pelo gráfico. Seu desempenho foi classificado como bom no critério de interpretação do índice  $c$ . Ele apresentou o melhor valor de RMSE e o segundo melhor MBE, mas o seu teste  $t$  teve um valor alto, chegando próximo ao limite do  $t_{crit}$ .

O método mensal possui uma linha de ajuste não muito bem distribuída, e o seu coeficiente de determinação é muito baixo; porém esse valor pode ser explicado por ele possuir alguns dados discrepantes ou anomalias. Ele consegue estimar bem os valores da radiação, e o seu desempenho no critério de interpretação do índice  $c$  foi mediano. O seu RMSE foi o segundo melhor, enquanto o seu MBE e  $t$  foram os melhores.

Logo, é possível dizer que o método diário é o mais consistente e o mais adequado para a cidade de Aragarças e, consequentemente, para o clima Aw. Ele obteve boas avaliações

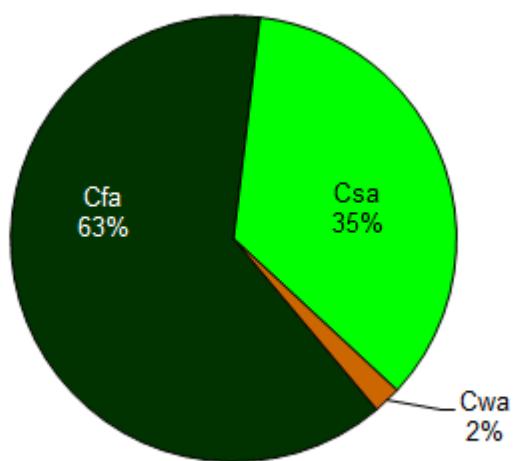
tanto na análise da regressão linear quanto na estimativa da radiação solar, com um valor de  $t$ -statistic passando no critério adotado. De forma geral, a equação de Angström-Prescott consegue ter um grau de eficiência bom nesta cidade e, possivelmente, neste clima. Com isso, a melhor calibração para os coeficientes  $a$  e  $b$  para Aragarças é de 0.3325 e 0.4967, respectivamente, obtida através do método diário.

### 4.3 Bagé/RS

A cidade analisada a seguir é a de Bagé, que se encontra no estado do Rio Grande do Sul. De acordo com o estudo realizado por Dubreuil et al. (2017), cada localização brasileira possui um ou mais tipos climáticos que são detectados ao longo do ano. A Figura 13 mostra as frequências dos tipos de climas anuais para a cidade de Bagé.

Como é possível perceber, o clima mais predominante, com 63% de frequência, é o Cfa. Esse tipo de classificação climática é proposto por Köppen e adaptado por (DUBREUIL et al., 2017). O clima Cfa é conhecido por ser temperado, sem estação seca e verão quente, conforme mostrado no Quadro 1.

Figura 13 – Frequências dos tipos de climas anuais na cidade de Bagé/RS



Fonte: Adaptado de Dubreuil et al. (2017)

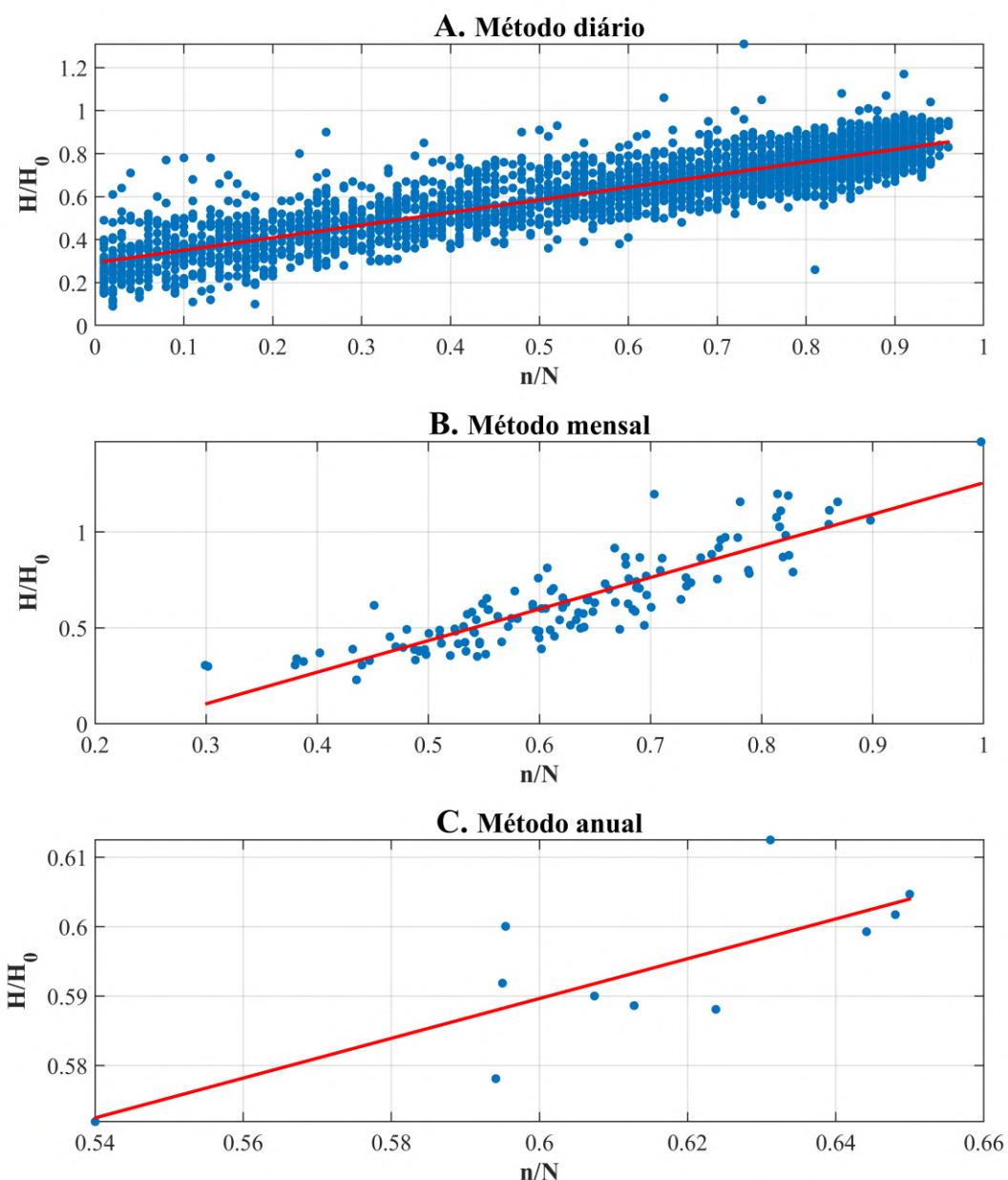
A estação meteorológica automática desta cidade está localizada na latitude 31°20'S, longitude 54°00'W e altitude 230m. Já a estação meteorológica convencional está localizada na latitude 31°33'S, longitude 54°01'W e altitude 242m. Os valores de latitude escolhidos foram os da estação automática, pois ela fornece os dados da radiação solar global, que é o elemento central desse estudo.

O período analisado foi de 2008 até 2018. Nesse período, 4018 dados foram coletados, e 3422 desses dados foram utilizados (mais informações sobre a coleta e utilização de dados na Seção 3.2). Com isso, têm-se um aproveitamento de 85.16% das informações.

### 4.3.1 Regressão Linear

Os gráficos da Figura 14 mostram as regressões lineares obtidas através dos métodos: diário, mensal e anual. Nos três métodos o ajuste é uma linha inclinada e ascendente. No diário existe um grande agrupamento de dados ao longo da linha, com poucos dados atípicos. O método mensal possui os dados mais afastados uns dos outros, com algumas poucas discrepâncias. O método anual possui dados completamente dispersos e espalhados, mas capazes de gerar uma linha de ajuste satisfatória.

Figura 14 – Comparação dos valores da dispersão diária, mensal e anual da razão entre a radiação solar e a extraterrestre ( $H/H_0$ ) e a razão da insolação ( $n/N$ ) no período de 2008 a 2018, na cidade de Bagé/RS

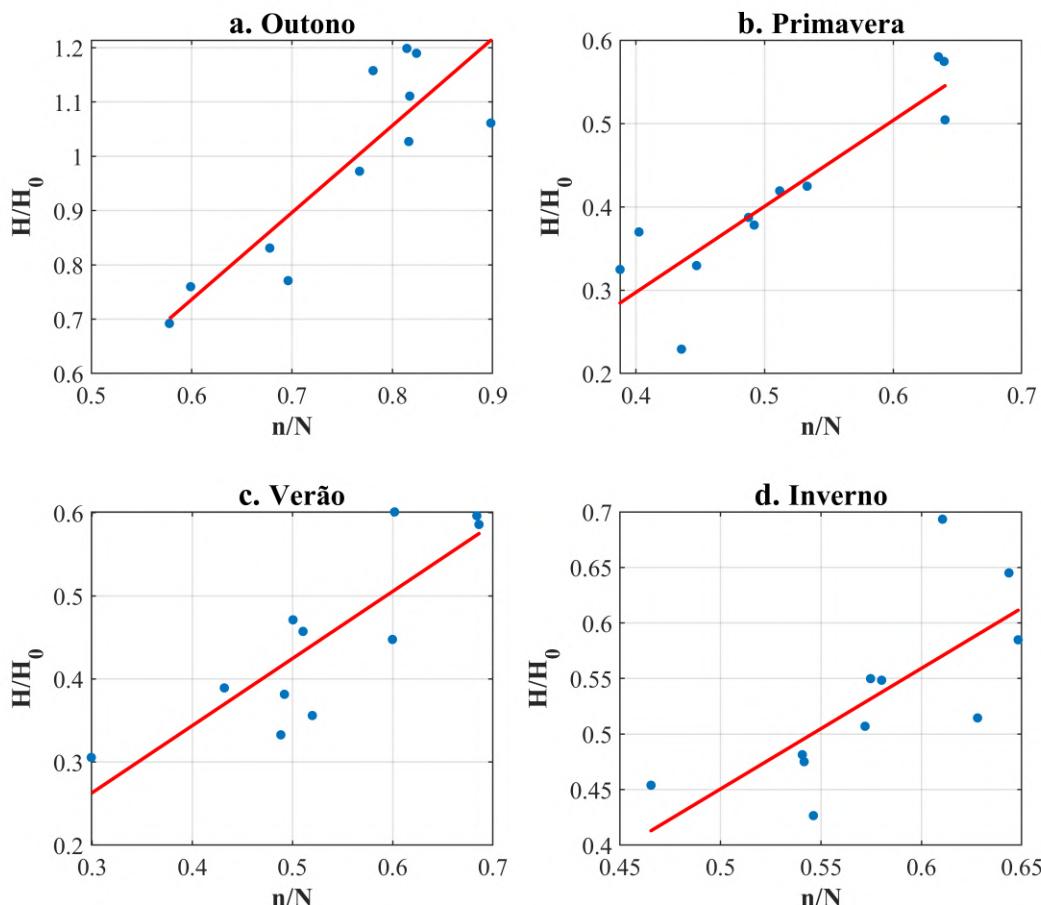


Fonte: Elaborado pelo autor

Os gráficos da Figura 15 mostram as regressões lineares obtidas pelo método estacional, ou seja, analisando o período de cada estação. As linhas de ajuste de todas as estações são bem parecidas, todas inclinadas ascendentemente. Os destaque estão nos dados mais agrupados e bem distribuídos da primavera, e nos dados discrepantes e esparsos do inverno.

Figura 15 – Comparação dos valores da dispersão das quatro estações do ano da razão entre a radiação solar e a extraterrestre ( $H/H_0$ ) e a razão da insolação ( $n/N$ ) no período de 2008 a 2018, na cidade de Bagé/RS

#### D. Método estacional



Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 5 mostra os resultados obtidos a partir da regressão linear dos gráficos da Figura 14 e da Figura 15. Observa-se que o valor de  $a$  é sempre muito baixo e negativo na maioria das vezes, com uma variância média de 0.2 (excluindo o valor do método anual, que é um valor atípico e discrepante). Os valores de  $b$  tendem a ser mais altos, mas são bem diferentes de um método ou período, para o outro; indo de 0.5859 e 0.2868 nos métodos diário e anual, respectivamente, até 1.6024 no período do outono e 1.6469 no método mensal.

A coluna  $a + b$  mostra que, apesar da disparidade dos valores de  $a$  e  $b$  nos métodos

analizados, a soma deles tende a ter uma relativa constância; o período do outono e o método mensal são as exceções. Isso significa que sempre que o valor de  $a$  é muito alto, o de  $b$  tende a ser muito baixo, e o mesmo vale para o oposto.

O melhor valor de  $R^2$  foi de 0.8058 no período da primavera. O método diário e o mensal também apresentam bons coeficientes de determinação, de 0.7843 e 0.7707, respectivamente. Como era de se esperar, pela análise dos gráficos D.d e C, o período do inverno obteve o pior resultado, com um  $R^2$  valendo 0.5216 seguido pelo método anual, que possui um  $R^2$  de valor 0.6079. Porém, de modo geral, todos os métodos e períodos apresentaram um resultado satisfatório e acima de 0.5.

Tabela 5 – Resultados da regressão linear para Bagé/RS (2008-2018)

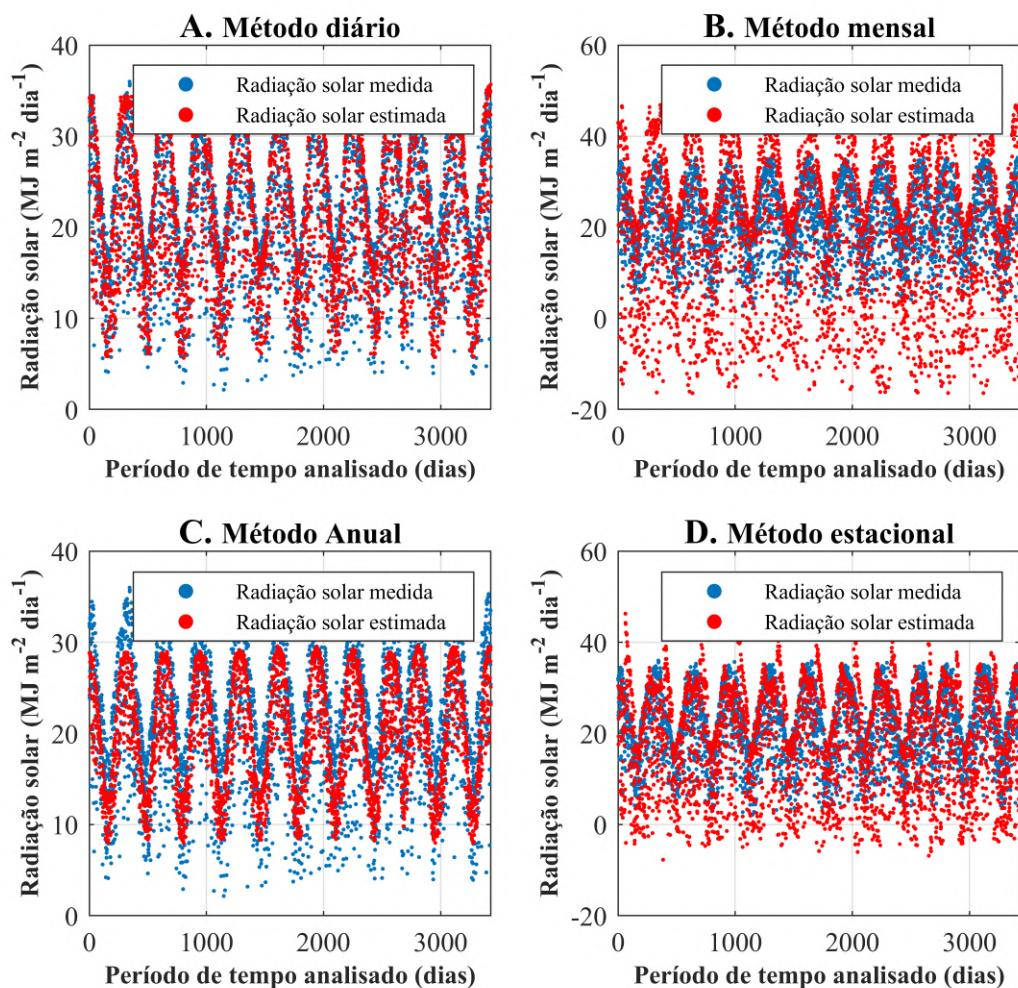
<b>Período/método</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>a + b</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Outono	-0.2251	1.6024	1.3773	0.7566
Primavera	-0.1156	1.0326	0.917	0.8058
Verão	0.0206	0.8081	0.8287	0.7123
Inverno	-0.093	1.0869	0.9939	0.5216
Diário	0.292	0.5859	0.8779	0.7843
Mensal	-0.3898	1.6469	1.2571	0.7707
Anual	0.4175	0.2868	0.7043	0.6079

Fonte: Elaborado pelo autor

### 4.3.2 Radiação solar estimada

Os gráficos apresentados na Figura 16 mostram uma razoável discrepância entre os valores da radiação solar medida e estimada. O método que, aparentemente, se ajusta melhor e consegue estimar mais precisamente é o diário (A). O gráfico B mostra dados estimados que não acompanham os altos e baixos dos valores medidos. O gráfico C, por outro lado, acompanha esses altos e baixos mas erra nos valores, tendo muitas discrepâncias. O gráfico D apresenta dados agrupados e muitas anomalias, com valores estimados muito abaixo dos reais.

Figura 16 – Comparação dos valores da radiação solar medida com a estimada, calculada através dos métodos: diário, mensal, anual e estacional no período de 2008 a 2018, na cidade de Bagé/RS



Fonte: Elaborado pelo autor

Analizando o índice  $c$ , mostrado na Tabela 6, pode-se observar que ele teve seu maior valor, de 0.9165, no método diário, com um  $r$  valendo 0.9449 e  $d$  de valor 0.9699; se enquadrando como um desempenho ótimo, de acordo com os critérios de Camargo e Sentelhas (1997), apresentados na Seção 2.4.4. O método anual obteve desempenho muito bom, com

um valor de  $c$  de 0.8032, enquanto o estacional e o mensal foram bons, com valores de 0.7167 e 0.7169, respectivamente.

Os valores do RMSE foram variados, tendo os seus melhores resultados no métodos diário e anual, com valores de 2.692 e 3.974, respectivamente. Já o MBE não obteve bons resultados, possuindo três valores positivos e apenas um negativo, que é o encontrado no método diário (coincidentemente, o menor valor de MBE). Essa diferença entre os valores de RMSE e MBE levaram a resultados péssimos do  $t$ -statistic, com todos os métodos obtendo valores acima do  $t_{crit}$  de 1.96. Os dois menores resultados do teste  $t$  foram do método mensal e diário, com valores de 2.318 e 8.1467, respectivamente. Se esse teste estivesse sendo usado de forma isolada, todos os métodos seriam descartados; porém, outras avaliações foram realizadas anteriormente e serão levadas em consideração.

Tabela 6 – Resultados da comparação entre a radiação solar medida e a estimada para Bagé/RS (2008-2018)

Método	r	d	c	RMSE (MJ m <sup>-2</sup> m <sup>-1</sup> )	MBE (MJ m <sup>-2</sup> m <sup>-1</sup> )	t
Diário	0.9449	0.9699	0.9165	2.692	-0.371	8.1467
Mensal	0.8908	0.8048	0.7169	10.5004	0.4154	2.318
Anual	0.8812	0.9115	0.8032	3.974	1.6051	25.8504
Estacional	0.8325	0.8609	0.7167	6.8924	1.8448	16.2645

$$t_{crit} \text{ a } 5\% = 1.96.$$

Fonte: Elaborado pelo autor

### 4.3.3 Discussão

Combinando os resultados observados pelas regressões lineares e pela radiação estimada é possível verificar que todos os métodos tiveram resultados satisfatórios na maioria das avaliações. Porém, no RMSE, MBE e, consequentemente, no teste  $t$ , a maioria dos métodos obteve valores indesejáveis. Isso acaba acontecendo porque esses métodos compararam a distância entre o valor estimado e o medido, ou seja, uma comparação termo a termo. E, como visto nos gráficos da figura 16, os valores estão de fato espalhados e distantes, mas isso não quer dizer que o método é ineficiente.

O método diário apresenta excelentes valores de  $r$ ,  $d$  e  $c$  e valores consistentes de  $R^2$ , e RMSE; o que gera o resultado ruim de  $t$  é o valor atípico do MBE, de -0.371. Inclusive, todos os resultados obtidos pela técnica MBE foram ruins. No método anual, o RMSE mostrou um valor razoável, mas ele acaba tendo um valor de  $R^2$  mediano e um  $t$  muito anormal. O método estacional e o mensal apresentaram um RMSE alto, e, apesar do  $t$  do mensal ser o menor de todos, o índice  $c$  de ambos é apenas bom.

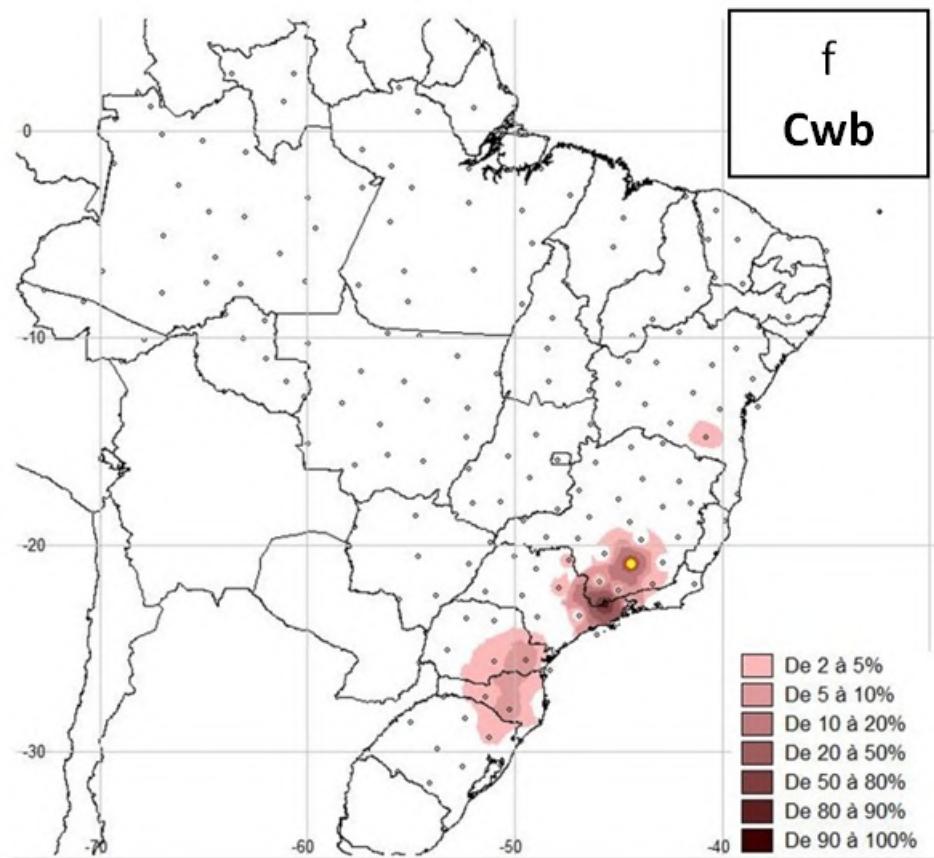
Logo, é possível dizer que o método diário é o mais consistente e o mais adequado para a cidade de Bagé e, consequentemente, para o clima Cfa. Porém, é importante ressaltar que o seu *t*-statistic não passou nos critérios adotados, mostrando que o modelo não obteve um bom desempenho. Segundo a maioria dos métodos de calibração, o modelo de Angström-Prescott não consegue ter um grau de eficiência razoável nesta cidade e, possivelmente, neste clima. Porém, o método diário prova o contrário e mostra resultados minimamente satisfatórios. Com isso, a melhor calibração para os coeficientes *a* e *b* para Bagé é de 0.2920 e 0.5859, respectivamente, obtida através do método diário.

## 4.4 Barbacena/MG

A cidade analisada a seguir é a de Barbacena, que se encontra no estado de Minas Gerais. De acordo com o estudo realizado por Dubreuil et al. (2017), cada localização brasileira possui um ou mais tipos climáticos que são detectados ao longo do ano. Porém, diferentemente das outras estações e cidades, Barbacena não possui uma representação dos seus tipos climáticos e das suas respectivas frequências.

Mas Dubreuil et al. (2017) afirmam que, dentre as estações analisadas em seu trabalho, a de Barbacena/MG é a única que mostra nuances do clima de altitude Cwb. A Figura 17, elaborada por Dubreuil et al. (2017), mostra a frequência do clima Cwb no Brasil. Os símbolos pontuais em amarelo representam as estações meteorológicas analisadas no trabalho de (DUBREUIL et al., 2017). O único símbolo amarelo mostrado na Figura 17 é o da estação meteorológica de Barbacena/MG.

Figura 17 – Frequências do tipo climático Cwb no território brasileiro



Fonte: Adaptado de Dubreuil et al. (2017)

CLIMATE-DATA (S/da) também afirmam que o clima da cidade de Barbacena é o Cwb. Com tudo isso dito e analisado, o presente trabalho irá considerar que o clima predominante na cidade de Barbacena é o Cwb. Esse tipo de classificação climática é proposto por Köppen e adaptado por (DUBREUIL et al., 2017). O clima Cwb é conhecido por ser temperado com verão fresco e úmido, conforme foi mostrado no Quadro 1.

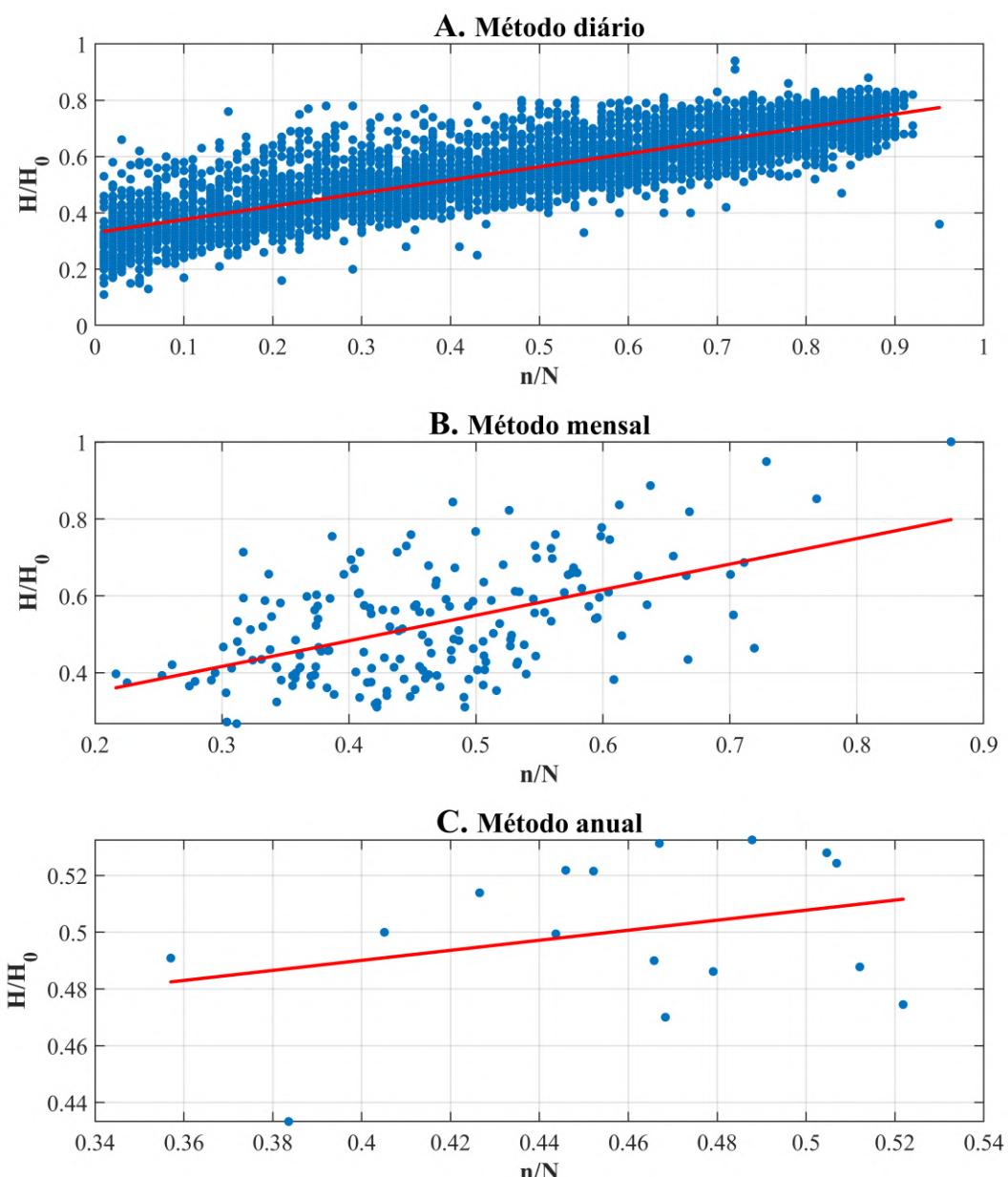
A estação meteorológica automática desta cidade está localizada na latitude 21°13'S, longitude 43°46'W e altitude 1155m. Já a estação meteorológica convencional está localizada na latitude 21°25'S, longitude 43°76'W e altitude 1126m. Os valores de latitude escolhidos foram os da estação automática, pois ela fornece os dados da radiação solar global, que é o elemento central desse estudo.

O período analisado foi de 2003 até 2018. Nesse período, 5844 dados foram coletados, e 4583 desses dados foram utilizados (mais informações sobre a coleta e utilização de dados na Seção 3.2). Com isso, têm-se um aproveitamento de 78.42% das informações.

#### 4.4.1 Regressão Linear

Os gráficos da Figura 18 mostram as regressões lineares obtidas através dos métodos: diário, mensal e anual. Nos três métodos o ajuste é uma linha inclinada e ascendente. No diário existe um grande agrupamento de dados distribuídos ao longo da linha, com poucos dados atípicos. O método mensal tem os dados muito dispersos e sem padrão, com muitas anomalias. O método anual possui dados completamente dispersos, espalhados e anormais, gerando uma linha de ajuste pouco inclinada.

Figura 18 – Comparação dos valores da dispersão diária, mensal e anual da razão entre a radiação solar e a extraterrestre ( $H/H_0$ ) e a razão da insolação ( $n/N$ ) no período de 2003 a 2018, na cidade de Barbacena/MG

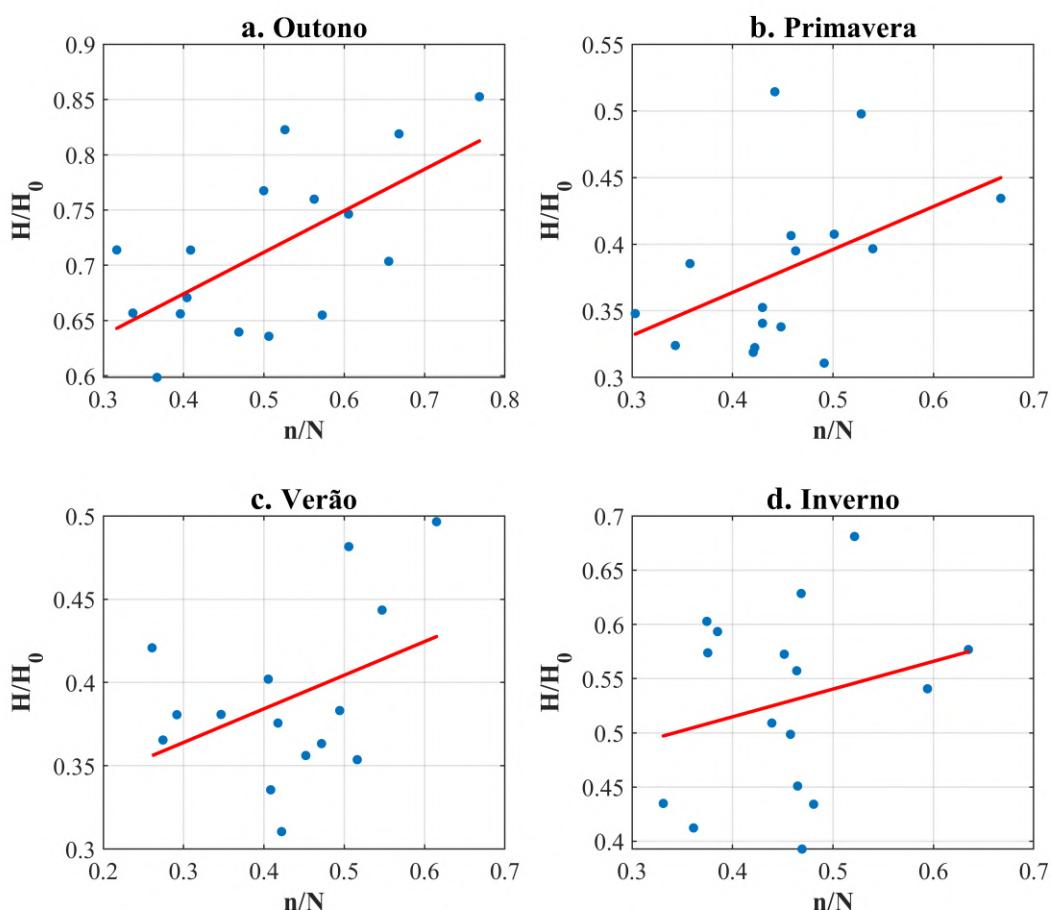


Fonte: Elaborado pelo autor

Os gráficos da Figura 19 mostram as regressões lineares obtidas pelo método estacional, ou seja, analisando o período de cada estação. As linhas de ajuste de todas as estações são bem parecidas, todas inclinadas ascendentemente. Em todos os gráficos os dados estão esparsos e não seguem nenhum padrão específico; o única que acompanha levemente a linha de ajuste é o D.b, que representa o período da primavera.

Figura 19 – Comparação dos valores da dispersão das quatro estações do ano da razão entre a radiação solar e a extraterrestre ( $H/H_0$ ) e a razão da insolação ( $n/N$ ) no período de 2003 a 2018, na cidade de Barbacena/MG

#### D. Método estacional



Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 7 mostra os resultados obtidos a partir da regressão linear dos gráficos da Figura 18 e da Figura 19. Observa-se que o valor de  $a$  costuma variar entre 0.3 e 0.4; com exceção do período do outono que tem valor 0.5238, da primavera com valor de 0.2347 e do método mensal com 0.2168. Os valores de  $b$ , por sua vez, tendem a variar entre 0.2 e 0.4; com exceção do método mensal que tem valor 0.4674, do mensal com 0.6654 e do anual com 0.1768.

A coluna  $a + b$ , que geralmente possui valores próximos, mostra uma grande disparidade. Ela vai de valores como 0.5053 no período do verão e 0.5961 no método anual, até 0.8996 no período do outono e 0.7974 no método diário. Isso significa que, provavelmente, diversos métodos são ineficientes e não seguem nenhum padrão.

O único método ou período que apresentou um resultado razoável de  $R^2$  foi o diário, com valor de 0.7229. Períodos e métodos que apresentaram bons resultados nas análises das cidades anteriores, como o período do verão e o método mensal, mostraram resultados péssimos nesta cidade, com valores de 0.1618 e 0.275, respectivamente. Com as análises dos gráficos e dos valores de  $a + b$ , esses resultados ruins já eram esperados e foram confirmados pelo coeficiente de determinação.

Tabela 7 – Resultados da regressão linear para Barbacena/MG (2003-2018)

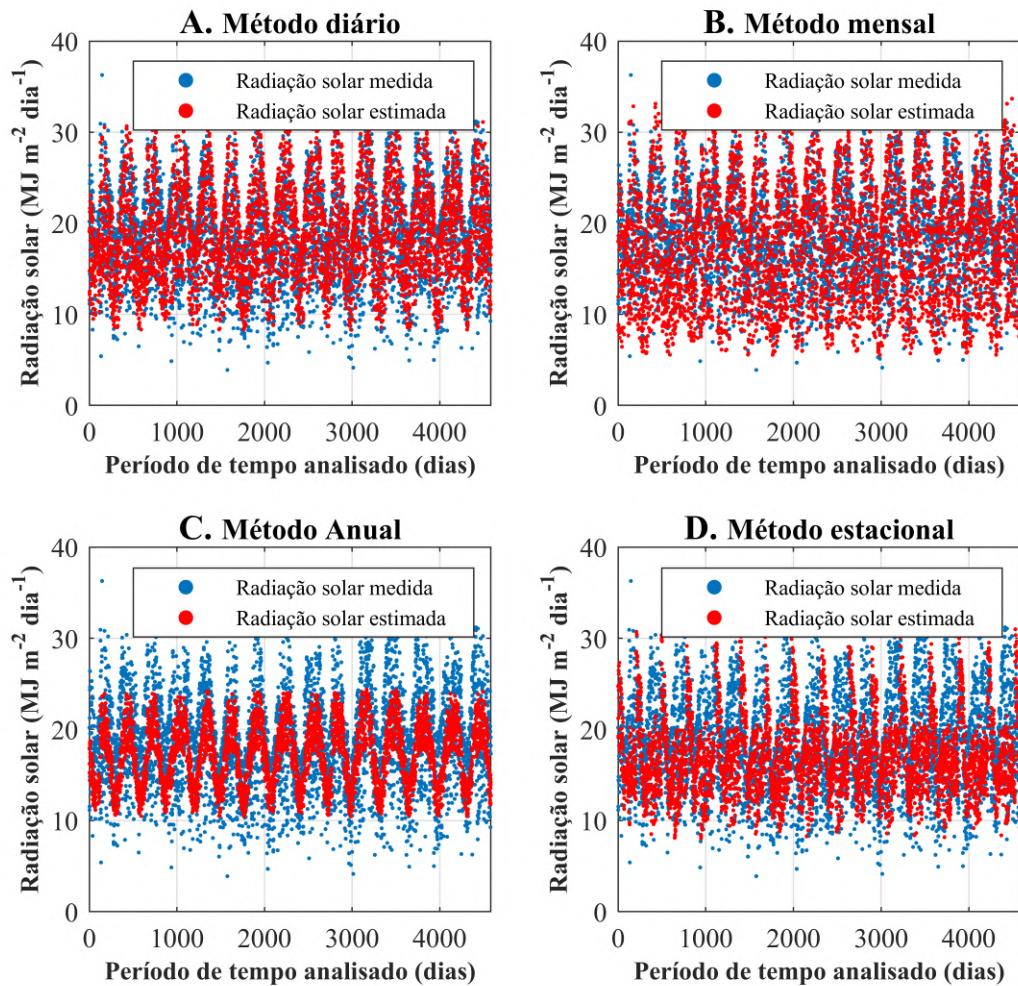
<b>Período/método</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b><math>a + b</math></b>	<b><math>R^2</math></b>
Outono	0.5238	0.3758	0.8996	0.4187
Primavera	0.2347	0.3226	0.5573	0.2003
Verão	0.3034	0.2019	0.5053	0.1618
Inverno	0.4124	0.2558	0.6682	0.0607
Diário	0.33	0.4674	0.7974	0.7229
Mensal	0.2168	0.6654	0.8822	0.275
Anual	0.4193	0.1768	0.5961	0.0935

Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.4.2 Radiação solar estimada

Os gráficos apresentados na Figura 20 mostram uma razoável discrepância entre os valores da radiação solar medida e estimada. O método que, aparentemente, se ajusta melhor e consegue estimar mais precisamente é o diário (A). O gráfico B mostra dados da estimativa espalhados e sem padrão. O gráfico C, por outro lado, possui um padrão mas está com dados estimados agrupados e centralizados, bem distante dos dados reais. O gráfico D apresenta dados agrupados e um certo padrão, mas ele possui valores estimados subestimados, não conseguindo estimar os dados medidos de alto valor.

Figura 20 – Comparação dos valores da radiação solar medida com a estimada, calculada através dos métodos: diário, mensal, anual e estacional no período de 2003 a 2018, na cidade de Barbacena/MG



Fonte: Elaborado pelo autor

Analizando o índice  $c$ , mostrado na Tabela 8, pode-se observar que ele teve seu maiores valores nos métodos diário e mensal, com valores de 0.8172 e 0.8153, respectivamente. De acordo com os critérios de Camargo e Sentelhas (1997), apresentados na Seção 2.4.4, ambos

possuem desempenho muito bom. Já os métodos anual e estacional não tiveram bons resultados, com um índice de confiança  $c$  de 0.5489 e 0.324, respectivamente. O método anual teve um desempenho classificado como sofrível, e o estacional como péssimo.

Os valores do RMSE obtidos foram bem próximos, tendo os seus melhores resultados no métodos diário e mensal, com valores de 2.6013 e 3.1878, respectivamente. Já o MBE não obteve bons resultados, possuindo três valores positivos e apenas um negativo, que é o encontrado no método diário (coincidentemente, o menor valor de MBE). Essa diferença entre os valores de RMSE e MBE levaram a resultados péssimos do  $t$ -statistic, com todos os métodos obtendo valores acima do  $t_{crit}$  de 1.9605. O menor resultado do teste  $t$  foi o do método diário, com valor de 4.0144; enquanto todo o resto teve valores altíssimos. Se esse teste estivesse sendo usado de forma isolada, todos os métodos seriam descartados; porém, outras avaliações foram realizadas anteriormente e serão levadas em consideração.

Tabela 8 – Resultados da comparação entre a radiação solar medida e a estimada para Barbacena/MG (2003-2018)

Método	r	d	c	RMSE (MJ m <sup>-2</sup> m <sup>-1</sup> )	MBE (MJ m <sup>-2</sup> m <sup>-1</sup> )	t
Diário	0.875	0.9339	0.8172	2.6013	-0.154	4.0144
Mensal	0.8822	0.9242	0.8153	3.1878	0.6099	13.1945
Anual	0.7105	0.7726	0.5489	3.9702	1.3777	25.0456
Estacional	0.4831	0.6707	0.324	5.1912	1.5258	20.815

$t_{crit}$  a 5% = 1.9605.

Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.4.3 Discussão

Combinando os resultados observados pelas regressões lineares e pela radiação estimada é possível verificar que o único método que obteve um resultado satisfatório em praticamente todas as avaliações foi o diário. Outro que apresentou um bom resultado no índice  $c$  (além do método diário) foi o mensal, mas ele obteve um péssimo coeficiente de determinação assim como um péssimo valor de  $t$ . O restante apresenta valores péssimos em todas as avaliações.

Como já dito, o método diário apresenta excelentes valores de  $c$ , assim como de  $r$ ,  $d$  e valores consistentes de  $R^2$ , e RMSE; o que gera o resultado ruim de  $t$  é o valor atípico do MBE, de -0.154.

Logo, é possível dizer que o método diário é o mais consistente e o mais adequado para a cidade de Barbacena e, consequentemente, para o clima Cwb. Porém, é importante ressaltar que o seu  $t$ -statistic não passou nos critérios adotados, mostrando que o modelo não obteve um bom desempenho. Segundo a maioria dos métodos de calibração, o modelo de Angström-Prescott não consegue ter um grau de eficiência bom nesta cidade e, possivelmente, neste

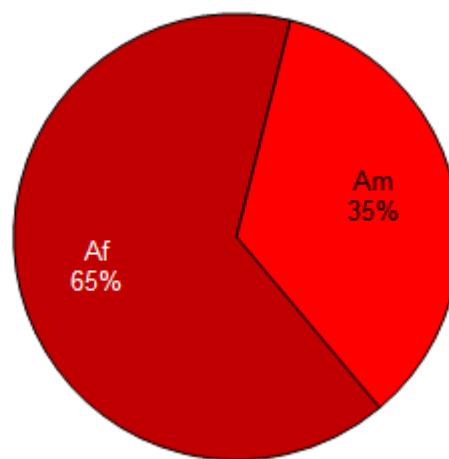
clima. Mas o método diário prova o contrário e mostra resultados razoavelmente satisfatórios. Com isso, a melhor calibração para os coeficientes  $a$  e  $b$  para Barbacena é de 0.3300 e 0.4674, respectivamente, obtida através do método diário.

## 4.5 Belém/PA

A cidade analisada a seguir é a de Belém, que se encontra no estado do Pará. De acordo com o estudo realizado por Dubreuil et al. (2017), cada localização brasileira possui um ou mais tipos climáticos que são detectados ao longo do ano. A Figura 21 mostra as frequências dos tipos de climas anuais para a cidade de Belém.

Como é possível perceber, o clima mais predominante, com 65% de frequência, é o Af. Esse tipo de classificação climática é proposto por Köppen e adaptado por (DUBREUIL et al., 2017). O clima Af é conhecido por ser quente, sem estação seca, conforme mostrado no Quadro 1.

Figura 21 – Frequências dos tipos de climas anuais na cidade de Belém/PA



Fonte: Adaptado de Dubreuil et al. (2017)

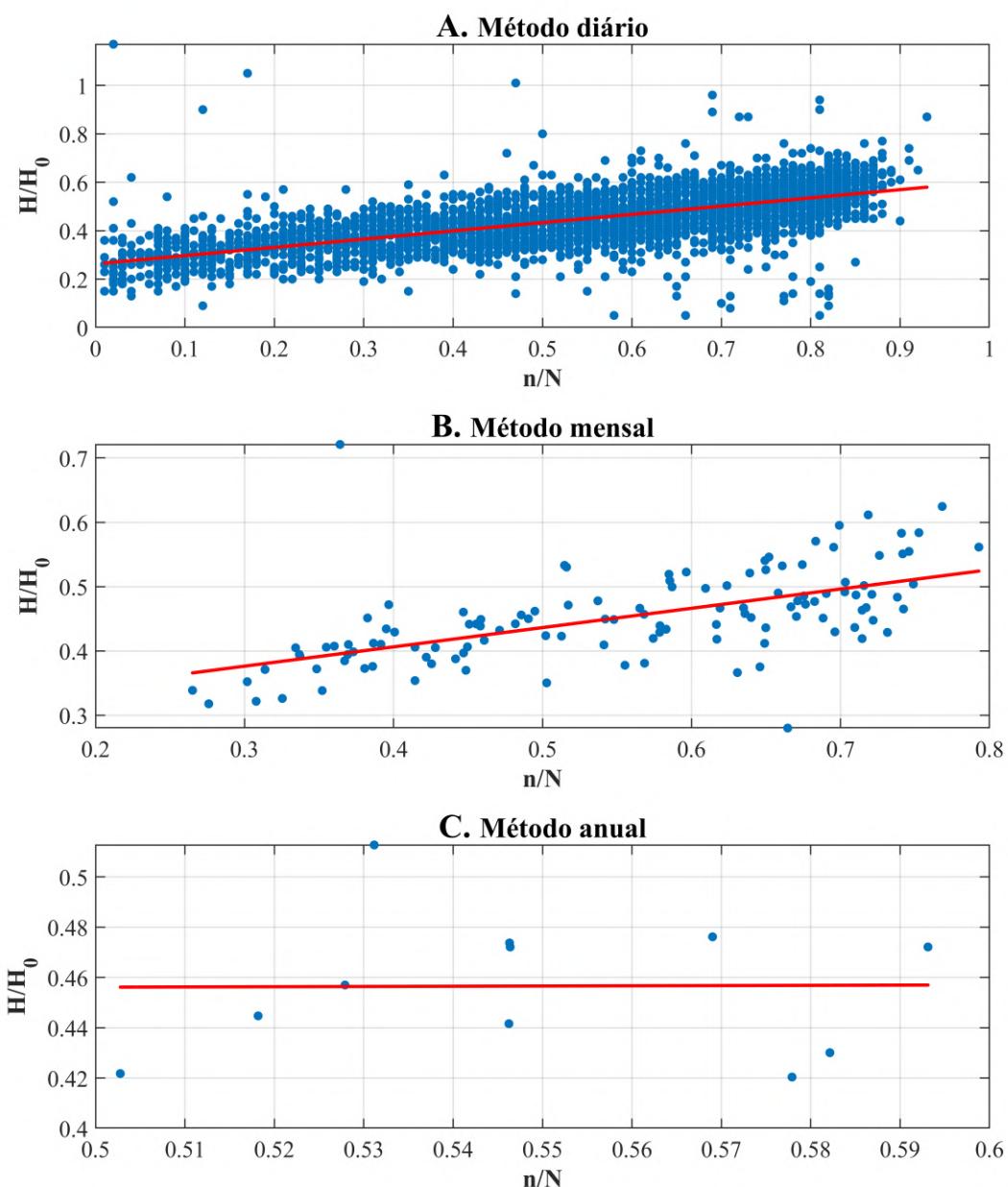
A estação meteorológica automática desta cidade está localizada na latitude 01°24'S, longitude 48°26'W e altitude 24m. Já a estação meteorológica convencional está localizada na latitude 01°43'S, longitude 48°43'W e altitude 10m. Os valores de latitude escolhidos foram os da estação automática, pois ela fornece os dados da radiação solar global, que é o elemento central desse estudo.

O período analisado foi de 2004 até 2018. Nesse período, 5479 dados foram coletados, e 3626 desses dados foram utilizados (mais informações sobre a coleta e utilização de dados na Seção 3.2). Com isso, têm-se um aproveitamento de 66.18% das informações.

#### 4.5.1 Regressão Linear

Os gráficos da Figura 18 mostram as regressões lineares obtidas através dos métodos: diário, mensal e anual. Em dois métodos o ajuste é uma linha inclinada e ascendente: o diário e o mensal. No diário existe um grande agrupamento de dados distribuídos ao longo da linha, mas com muitas anomalias e *outliers*. O método mensal tem os dados muito dispersos e distantes entre si. O método anual gera uma linha horizontal, com uma distribuição de dados completamente atípicas e sem nexo.

Figura 22 – Comparação dos valores da dispersão diária, mensal e anual da razão entre a radiação solar e a extraterrestre ( $H/H_0$ ) e a razão da insolação ( $n/N$ ) no período de 2004 a 2018, na cidade de Belém/PA

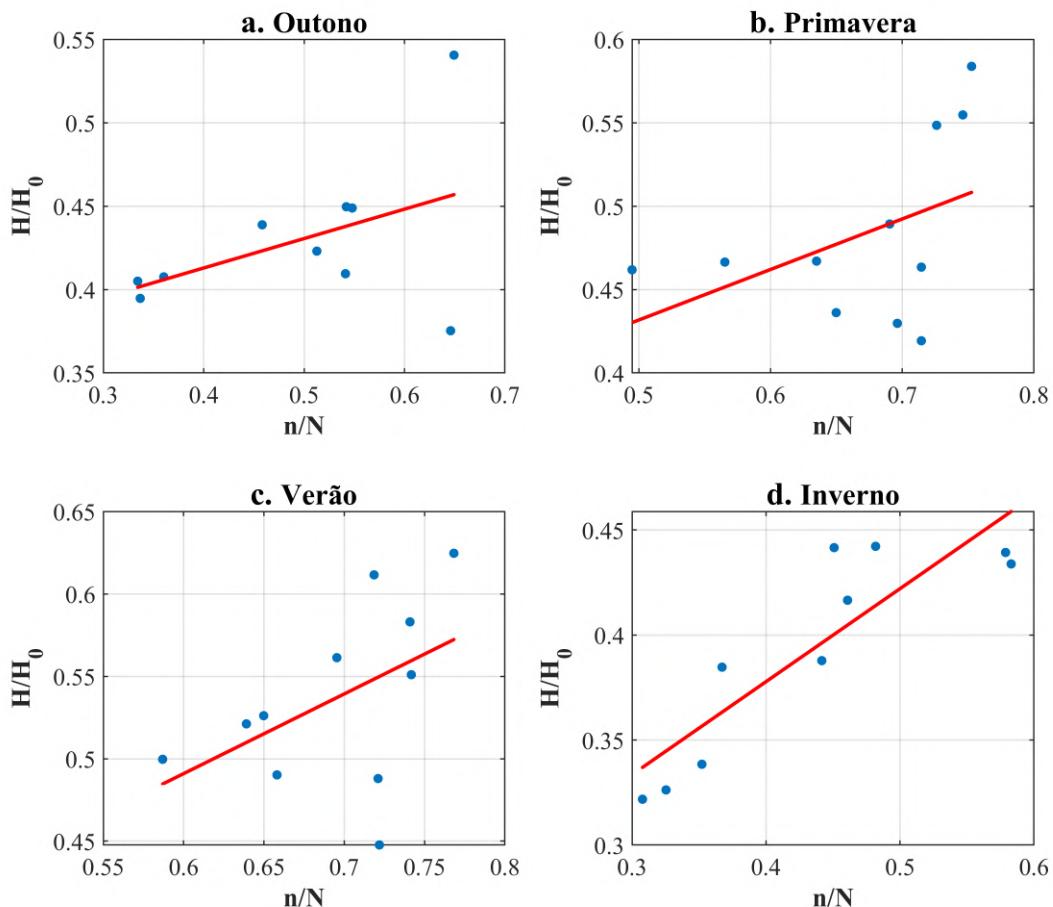


Fonte: Elaborado pelo autor

Os gráficos da Figura 19 mostram as regressões lineares obtidas pelo método estacional, ou seja, analisando o período de cada estação. As linhas de ajuste de todas as estações são bem parecidas, todas inclinadas ascendentemente. O período do outono e da primavera possui dados dispersos, com diversas anomalias e sem formar um padrão definido. O verão possui dados mais padronizados mas muito distantes e com valores atípicos. O inverno possui uma reta muito inclinada, com valores formando um padrão ao longo dela.

Figura 23 – Comparação dos valores da dispersão das quatro estações do ano da razão entre a radiação solar e a extraterrestre ( $H/H_0$ ) e a razão da insolação ( $n/N$ ) no período de 2004 a 2018, na cidade de Belém/PA

#### D. Método estacional



Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 9 mostra os resultados obtidos a partir da regressão linear dos gráficos da Figura 22 e da Figura 23. Observa-se que o valor de  $a$  é muito constante, tendo um valor, em média, de 0.2, em quase todos os métodos; com exceção do período do outono que tem valor 0.3423 e do método anual, valendo 0.4516. Os valores de  $b$ , por sua vez, tendem a variar entre 0.3 e 0.4; com exceção, novamente, do período do outono e do método anual, com valores de

0.1764 e 0.009, respectivamente.

A coluna  $a + b$  mostra que, apesar da disparidade dos valores de  $a$  e  $b$  nos métodos analisados, a soma deles tende a ter uma relativa constância, com valores médios de 0.6. Isso significa que sempre que o valor de  $a$  é muito alto, o de  $b$  tende a ser muito baixo, e o mesmo vale para o oposto.

O único método ou período que apresentou um resultado razoável de  $R^2$  foi o período do inverno, com valor de 0.7697. Esse resultado é muito incomum e diferente dos anteriores, que costumavam apresentar bons resultados no período do verão e no método diário. Essa diferença ocorre, provavelmente, porque essa cidade teve muitos dados com falhas, utilizando apenas 66.18% deles. Além disso, esse clima é quente e não possui estação seca, sendo úmido o ano todo, inclusive no inverno. O método diário obteve o segundo melhor resultado, de valor 0.4406, enquanto o método anual obteve o pior, de valor 0.0001.

Tabela 9 – Resultados da regressão linear para Belém/PA (2004-2018)

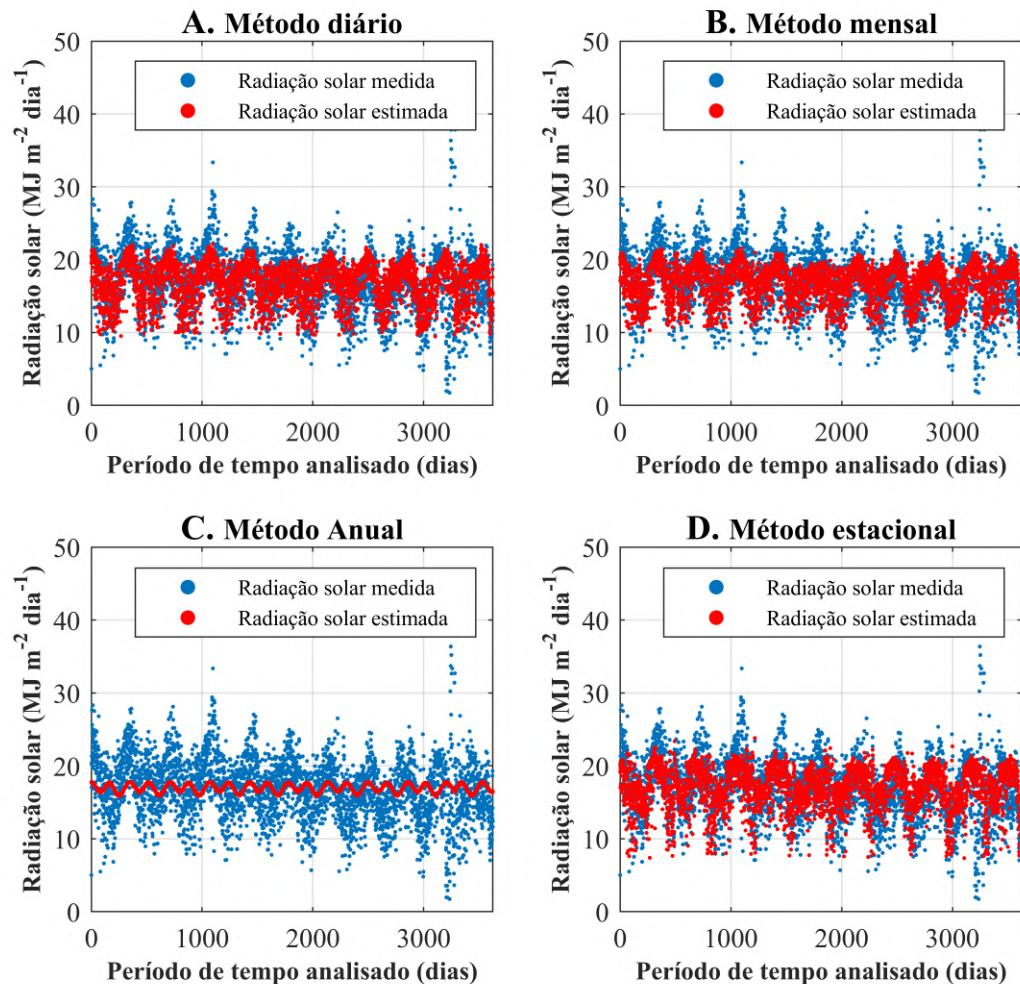
<b>Período/método</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>a + b</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Outono	0.3423	0.1764	0.5187	0.205
Primavera	0.2802	0.303	0.5832	0.1955
Verão	0.2009	0.4835	0.6844	0.2286
Inverno	0.2006	0.4429	0.6435	0.7697
Diário	0.263	0.3405	0.6035	0.4406
Mensal	0.2864	0.2998	0.5862	0.3554
Anual	0.4516	0.009	0.4606	0.0001

Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.5.2 Radiação solar estimada

Os gráficos apresentados na Figura 24 mostram uma razoável discrepância entre os valores da radiação solar medida e estimada. Os valores da radiação medida foram bem diferentes dos medidos em outras cidades, com valores bem concentrados no centro do gráfico. Os métodos que, aparentemente, se ajustam melhor e conseguem estimar mais precisamente é o diário e o mensal. O gráfico C é o pior e apresenta uma estimativa horrível. O gráfico D é parecido com o A e o B, mas possui dados mais espalhados e com mais erros.

Figura 24 – Comparação dos valores da radiação solar medida com a estimada, calculada através dos métodos: diário, mensal, anual e estacional no período de 2004 a 2018, na cidade de Belém/PA



Fonte: Elaborado pelo autor

Analizando o índice  $c$ , mostrado na Tabela 10, pode-se observar que ele teve seu maiores valores nos métodos diário e mensal, com valores de 0.5091 e 0.4914, respectivamente. De acordo com os critérios de Camargo e Sentelhas (1997), apresentados na Seção 2.4.4, o método diário possui um desempenho sofrível, enquanto o mensal possui um desempenho classificado

como mau. Já os métodos anual e estacional não tiveram bons resultados, com um índice de confiança  $c$  de 0.0165 e 0.4739, respectivamente. O método anual teve um desempenho classificado como péssimo, e o estacional como mau.

Os valores do RMSE obtidos foram bem próximos e relativamente baixos, o que mostra que não houveram muitas anomalias em nenhum dos métodos ou períodos. O MBE também obteve bons resultados em todos os métodos, sendo todos com valores negativos. Com isso, todos os valores do teste  $t$  foram bons e tiveram valores inferior ao  $t_{crit}$  de 1.9606. O seu menor valor foi de 0.2253, obtido pelo método diário.

Tabela 10 – Resultados da comparação entre a radiação solar medida e a estimada para Belém/PA (2004-2018)

Método	r	d	c	RMSE (MJ m <sup>-2</sup> m <sup>-1</sup> )	MBE (MJ m <sup>-2</sup> m <sup>-1</sup> )	t
Diário	0.6575	0.7743	0.5091	3.0994	-0.0116	0.2253
Mensal	0.6557	0.7495	0.4914	3.1177	-0.0354	0.6837
Anual	0.0931	0.1771	0.0165	4.1007	-0.1314	1.9303
Estacional	0.6237	0.7599	0.4739	3.232	-0.0458	0.8533

$$t_{crit} \text{ a } 5\% = 1.9606.$$

Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.5.3 Discussão

Combinando os resultados observados pelas regressões lineares e pela radiação estimada é possível verificar que nenhum método obteve resultados satisfatórios. As únicas avaliações boas foram as do RMSE, MBE e  $t$ -statistic. Mas, como o restante das avaliações mostra, esses valores apenas indicam que houveram poucas falhas e poucos dados atípicos.

Como os valores do coeficiente de relação  $r$  mostram, a relação entre os dados é baixa e levam a um índice de desempenho ou confiança  $c$  muito baixo. O coeficiente de determinação confirma isso, mostrando que nenhuma regressão linear teve um resultado satisfatório ou regular. Apesar de todos os métodos terem resultados ruins, o melhor dentre os ruins é o método diário, com um valor  $c$  de 0.5091 e  $R^2$  de 0.4406.

Com isso dito, nenhum método obteve avaliações satisfatórias na maioria dos testes, técnicas ou métodos estatístico. Os gráficos interpretados anteriormente mostram valores de radiação bem atípicos, se comparado com as cidades anteriores, e indicam que, possivelmente, esse clima não pode ser descrito por essa equação. Mas é importante lembrar também que apenas 66.18% dos dados coletados foram estavam sem erros e foram utilizados, aumentando a chance de uma ter acontecido uma interpretação errônea. Logo, é possível determinar, segundo os dados obtidos e as avaliações realizadas, que a equação de Angström-Prescott não consegue ter um grau de eficiência adequado na cidade de Belém do Pará e, possivelmente, no clima Af.

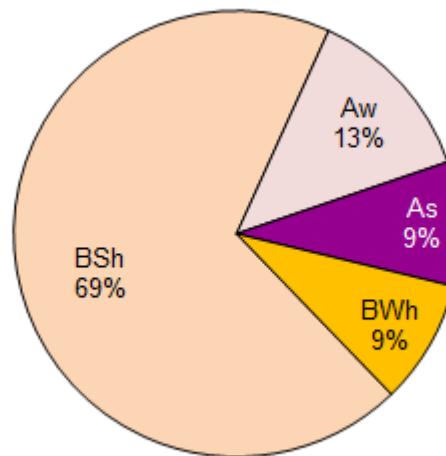
O método com os melhores resultados (que também se mostram ineficientes e inadequados) é o diário, com um  $a$  valendo 0.263 e  $b$  valendo 0.3405.

## 4.6 Campos Sales/CE

A cidade analisada a seguir é a de Campos Sales, que se encontra no estado do Ceará. De acordo com o estudo realizado por Dubreuil et al. (2017), cada localização brasileira possui um ou mais tipos climáticos que são detectados ao longo do ano. A Figura 25 mostra as frequências dos tipos de climas anuais para a cidade de Campos Sales.

Como é possível perceber, o clima mais predominante, com 69% de frequência, é o BSh. Esse tipo de classificação climática é proposto por Köppen e adaptado por (DUBREUIL et al., 2017). O clima BSh é conhecido por ser semi-árido e quente, conforme mostrado no Quadro 1.

Figura 25 – Frequências dos tipos de climas anuais na cidade de Campos Sales/CE



Fonte: Adaptado de Dubreuil et al. (2017)

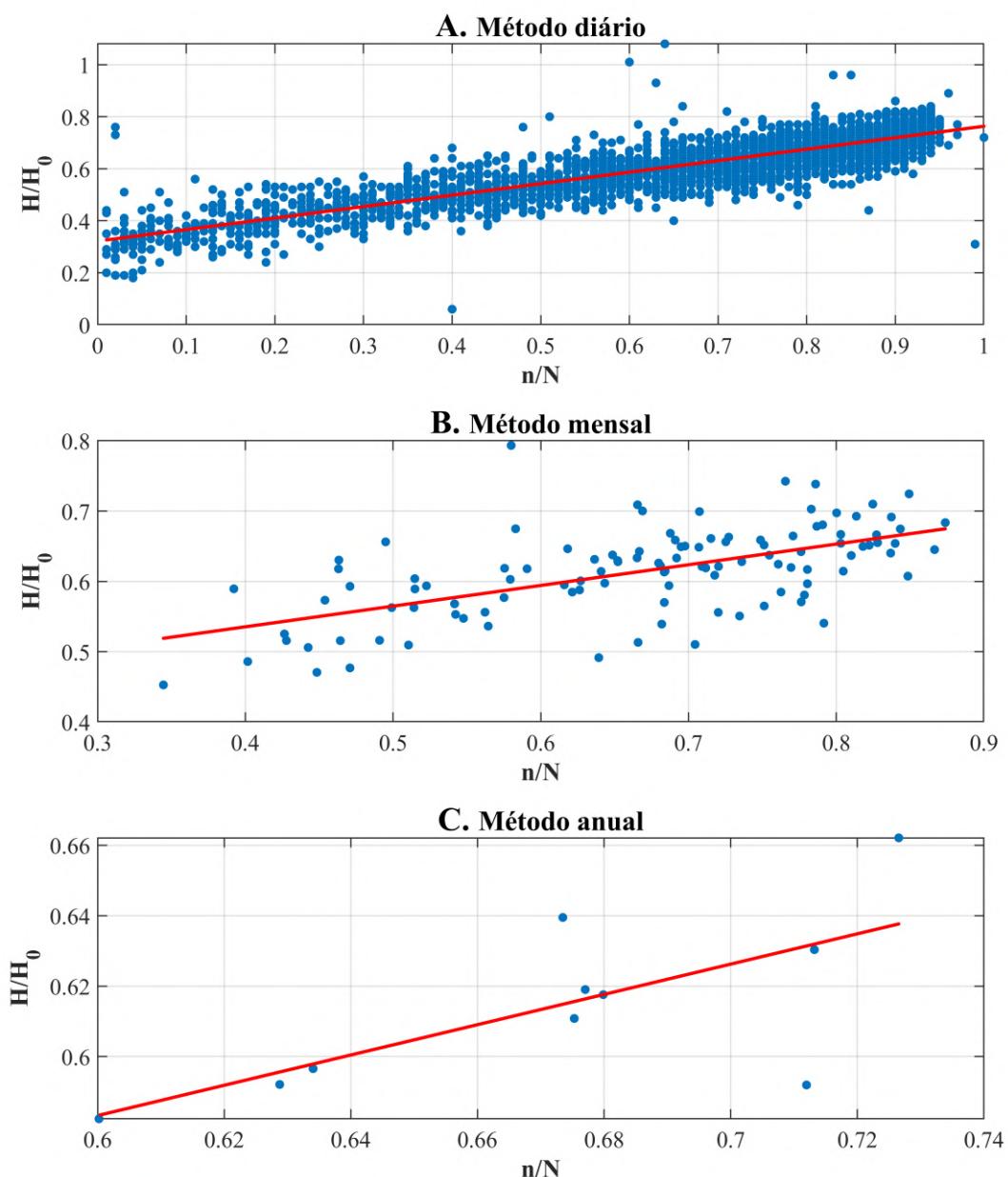
A estação meteorológica automática desta cidade está localizada na latitude 07°04'S, longitude 40°21'W e altitude 572m. Já a estação meteorológica convencional está localizada na latitude 07°00'S, longitude 40°38'W e altitude 583.5m. Os valores de latitude escolhidos foram os da estação automática, pois ela fornece os dados da radiação solar global, que é o elemento central desse estudo.

O período analisado foi de 2009 até 2018. Nesse período, 3652 dados foram coletados, e 3169 desses dados foram utilizados (mais informações sobre a coleta e utilização de dados na Seção 3.2). Com isso, têm-se um aproveitamento de 86.77% das informações.

#### 4.6.1 Regressão Linear

Os gráficos da Figura 26 mostram as regressões lineares obtidas através dos métodos: diário, mensal e anual. Em todos os métodos o ajuste é uma linha inclinada e ascendente. No diário existe um grande agrupamento de dados distribuídos ao longo da linha, com algumas anomalias e *outliers*. O método mensal tem os dados muito dispersos e distantes entre si, mas formam um padrão. O método anual possui pequenos grupos de dados distantes entre si, mas bem distribuídos ao longo da reta.

Figura 26 – Comparação dos valores da dispersão diária, mensal e anual da razão entre a radiação solar e a extraterrestre ( $H/H_0$ ) e a razão da insolação ( $n/N$ ) no período de 2009 a 2018, na cidade de Campos Sales/CE

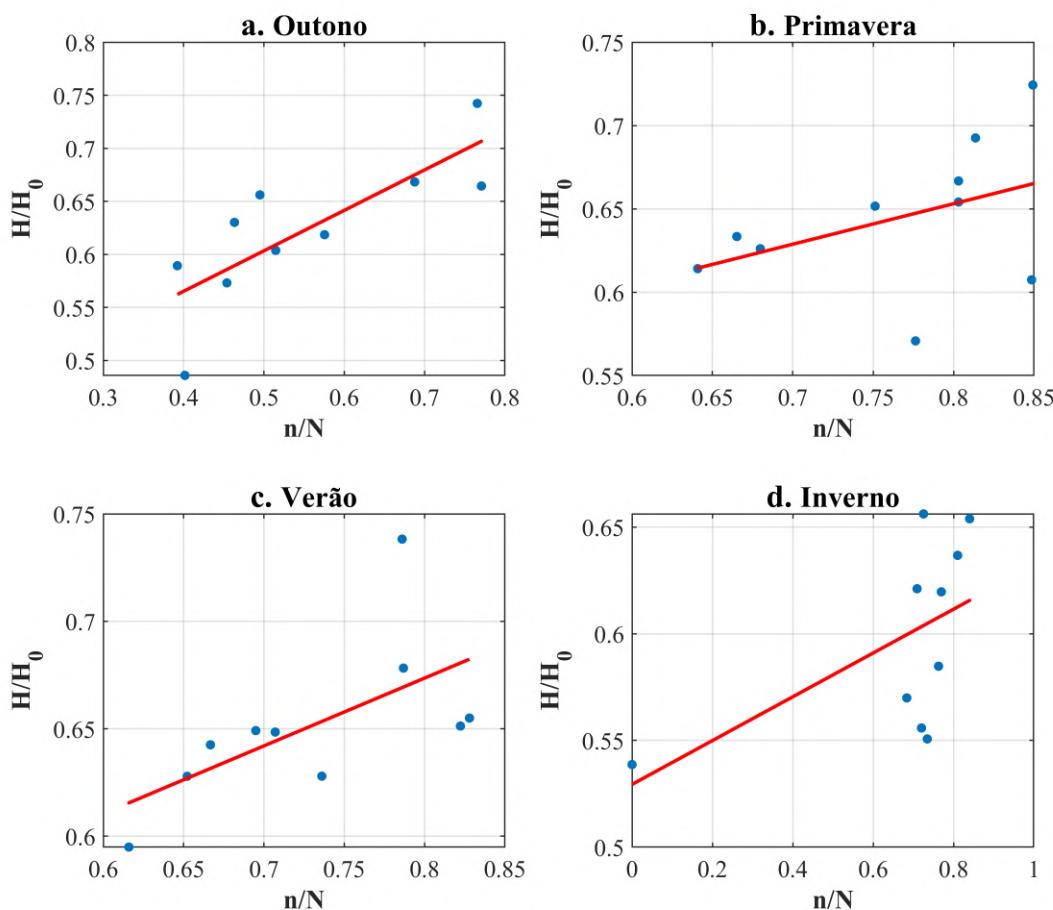


Fonte: Elaborado pelo autor

Os gráficos da Figura 27 mostram as regressões lineares obtidas pelo método estacional, ou seja, analisando o período de cada estação. As linhas de ajuste de todas as estações são bem parecidas, todas inclinadas ascendentemente. O outono e o verão parecem ter os melhores ajustes, com dados bem distribuídos ao longo da reta e com poucas anomalias. A primavera possui dados relativamente distantes uns dos outros e a sua linha não é tão inclinada quanto a dos outros períodos. O inverno possui a maioria dos dados no final da curva e bem dispersos, sem nenhum padrão.

Figura 27 – Comparação dos valores da dispersão das quatro estações do ano da razão entre a radiação solar e a extraterrestre ( $H/H_0$ ) e a razão da insolação ( $n/N$ ) no período de 2009 a 2018, na cidade de Campos Sales/CE

#### D. Método estacional



Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 11 mostra os resultados obtidos a partir da regressão linear dos gráficos da Figura 26 e da Figura 27. Observa-se que o valor de  $a$  é muito constante, tendo um valor, em média, de 0.4. Os valores de  $b$ , por sua vez, tendem a variar entre 0.3 e 0.4; com exceção do período da primavera e do inverno, com valores de 0.243 e 0.1027, respectivamente.

A coluna  $a + b$  mostra que, apesar da disparidade dos valores de  $a$  e  $b$  nos métodos analisados, a soma deles possui uma grande constância, com praticamente todos os valores sendo em média 0.7. Isso significa que sempre que o valor de  $a$  é muito alto, o de  $b$  tende a ser muito baixo, e o mesmo vale para o oposto.

O método que apresentou um bom resultado de  $R^2$  foi o diário, com valor de 0.7701. O período do outono apresentou um resultado razoável, de valor 0.6333. O restante obteve resultados ruins, todo com um coeficiente de determinação abaixo de 0.5.

Tabela 11 – Resultados da regressão linear para Campos Sales/CE (2009-2018)

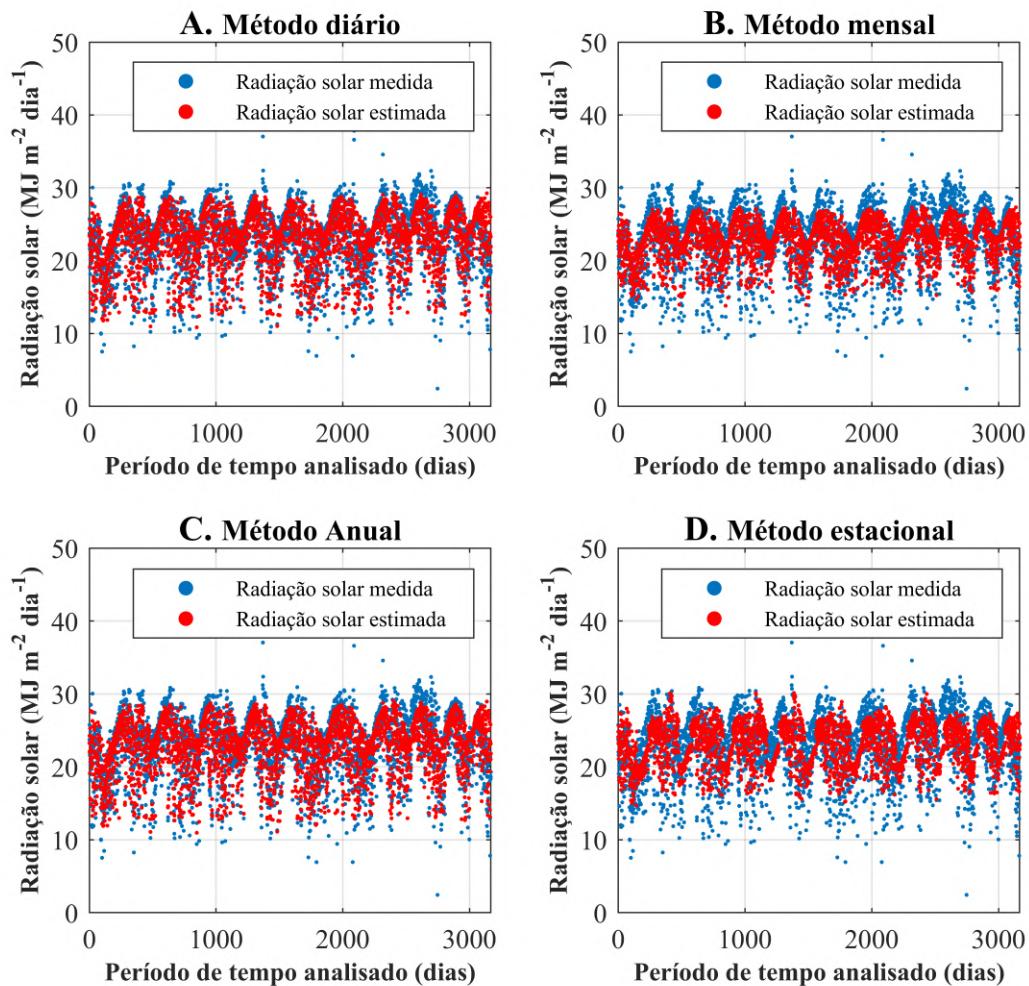
<b>Período/método</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>a + b</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Outono	0.4127	0.3814	0.7941	0.6333
Primavera	0.4587	0.243	0.7017	0.176
Verão	0.4212	0.3154	0.7366	0.3878
Inverno	0.5294	0.1027	0.6321	0.3174
Diário	0.3219	0.4414	0.7633	0.7701
Mensal	0.4176	0.2942	0.7118	0.3556
Anual	0.3251	0.4303	0.7554	0.494

Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.6.2 Radiação solar estimada

Os gráficos apresentados na Figura 28 mostram que a estimativa do método diário é muito parecida com a do anual. Em ambos, tanto no gráfico A como no C, a estimativa parece ser boa, falhando apenas próximo a faixa dos 2500 dias. Os gráficos B e D são similares e apresentam valores estimados muito agrupados e abaixo dos valores medidos.

Figura 28 – Comparação dos valores da radiação solar medida com a estimada, calculada através dos métodos: diário, mensal, anual e estacional no período de 2009 a 2018, na cidade de Campos Sales/CE



Fonte: Elaborado pelo autor

Analizando o índice  $c$ , mostrado na Tabela 12 acima, pode-se observar que ele teve seu maiores valores nos métodos diário e anual, com valores de 0.8225 e 0.8209, respectivamente. De acordo com os critérios de Camargo e Sentelhas (1997), apresentados na Seção 2.4.4, esses dois métodos possuem um desempenho muito bom. O método mensal, apesar de possuir valor mais baixo, também teve um desempenho classificado como muito bom, com um  $c$  valendo 0.7687. Já o método estacional foi classificado como mediano, com um valor de  $c$  de 0.6146.

Os valores do RMSE obtidos foram bem próximos e relativamente baixos, o que mostra que não houveram muitas anomalias em nenhum dos métodos ou períodos. O MBE também obteve bons resultados em todos os métodos, com o melhor valor sendo do método diário, de 0.0151. Com isso, todos os valores do teste  $t$  foram razoáveis, mas apenas dois tiveram valores inferior ao  $t_{crit}$  de 1.9607: o diário, com valor 0.4012, e o estacional, valendo 1.4661.

Tabela 12 – Resultados da comparação entre a radiação solar medida e a estimada para Campos Sales/CE (2009-2018)

Método	r	d	c	RMSE (MJ m <sup>-2</sup> m <sup>-1</sup> )	MBE (MJ m <sup>-2</sup> m <sup>-1</sup> )	t
Diário	0.8818	0.9327	0.8225	2.1185	0.0151	0.4012
Mensal	0.8779	0.8756	0.7687	2.4831	0.1423	3.2309
Anual	0.8822	0.9305	0.8209	2.1288	0.173	4.5893
Estacional	0.7516	0.8177	0.6146	3.0108	-0.0784	1.4661

$t_{crit}$  a 5% = 1.9607.

Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.6.3 Discussão

Combinando os resultados observados pelas regressões lineares e pela radiação estimada é possível verificar que o único método que obteve um resultado satisfatório em praticamente todas as avaliações foi o diário. Outros que apresentaram um bons resultados no índice  $c$  (além do método diário) foram o anual e o mensal, mas eles tiveram péssimos coeficientes de determinação assim como um valor de  $t$  ruim e acima do  $t_{crit}$ . Já o método estacional possui um valor mediano no índice  $c$ , mas bons valores de MBE e passa no teste  $t$ , mas seus coeficientes de determinação são apenas razoáveis; se colocando como um método mediano, mas melhor que o mensal e o anual.

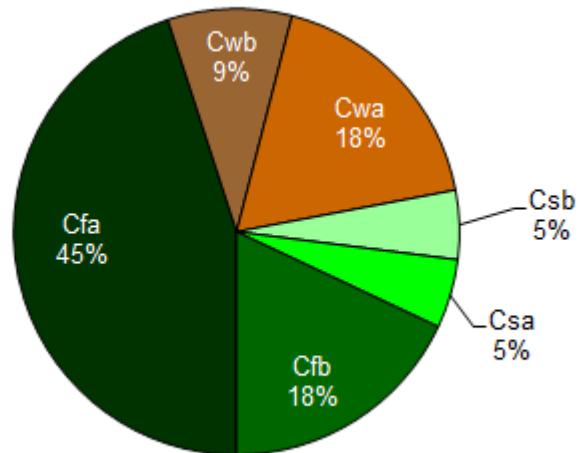
Logo, é possível dizer que o método diário é o mais consistente e o mais adequado para a cidade de Campos Sales e, consequentemente, para o clima BSh. Segundo a maioria dos método, especialmente o diário, o modelo de Angström-Prescott consegue ter um grau de eficiência bom nesta cidade e, possivelmente, neste clima. Com isso, a melhor calibração para os coeficientes  $a$  e  $b$  para Campos Sales é de 0.3219 e 0.4414, respectivamente, obtida através do método diário.

## 4.7 Curitiba/PR

A cidade analisada a seguir é a de Curitiba, que se encontra no estado do Paraná. De acordo com o estudo realizado por Dubreuil et al. (2017), cada localização brasileira possui um ou mais tipos climáticos que são detectados ao longo do ano.

A Figura 29 mostra as frequências dos tipos de climas anuais para a cidade de Curitiba. Como é possível perceber, o clima mais predominante, com 45% de frequência, é o Cfa seguido pelo Cfb, com 18% de frequência.

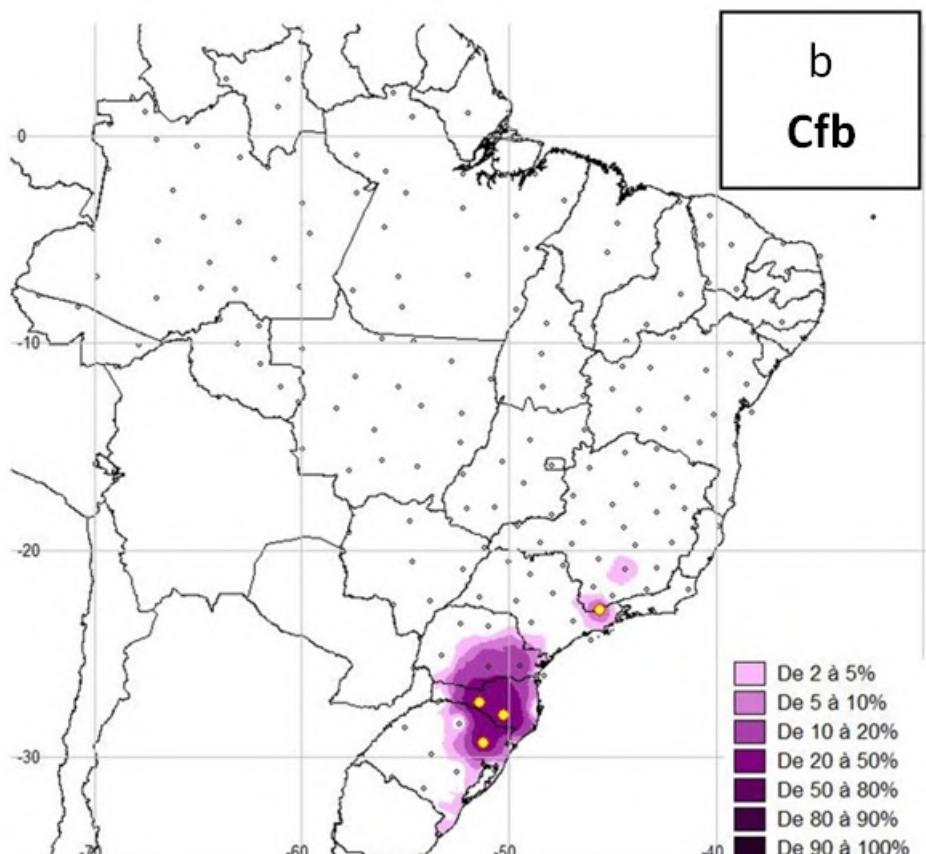
Figura 29 – Frequências dos tipos de climas anuais na cidade de Curitiba/PR



Fonte: Adaptado de Dubreuil et al. (2017)

O clima Cfb possui frequência relevante em apenas quatro estações ou cidades, como é mostrado pelos símbolos pontuais em amarelo na Figura 30. Porém, em nenhuma dessas cidades foram encontrados dados seguindo os padrões utilizados no presente trabalho, mostrados na Seção 3.2. Como, por exemplo, a cidade de Lages, que possui 53% de frequência do clima Cfb mas que a sua estação automática do INMET foi criada no final do ano de 2014 e, considerando que o atual trabalho começou a ser desenvolvido em 2019, não cumpria o requisito proposto no atual trabalho (de que todas as cidades analisadas devem possuir, no mínimo, cinco anos de dados).

Figura 30 – Frequências do tipo climático Cfb no território brasileiro



Fonte: Adaptado de Dubreuil et al. (2017)

Dubreuil et al. (2017) diz que os climas Cfa e Cfb são bem similares e divergem, principalmente, na altitude; em que o clima Cfb representa localizações com maior altitude. Além disso, alguns outros trabalhos e sites meteorológicos, como o (CLIMATE-DATA, S/db), classificam a cidade de Curitiba como pertencente ao tipo climático Cfb. Com tudo isso dito e analisado, o presente trabalho irá considerar que o clima predominante na cidade de Curitiba é o Cfb. Esse tipo de classificação climática é proposto por Köppen e adaptado por (DUBREUIL et al., 2017). O clima Cfb é conhecido por ser temperado, sem estação seca e verão fresco, conforme mostrado no Quadro 1.

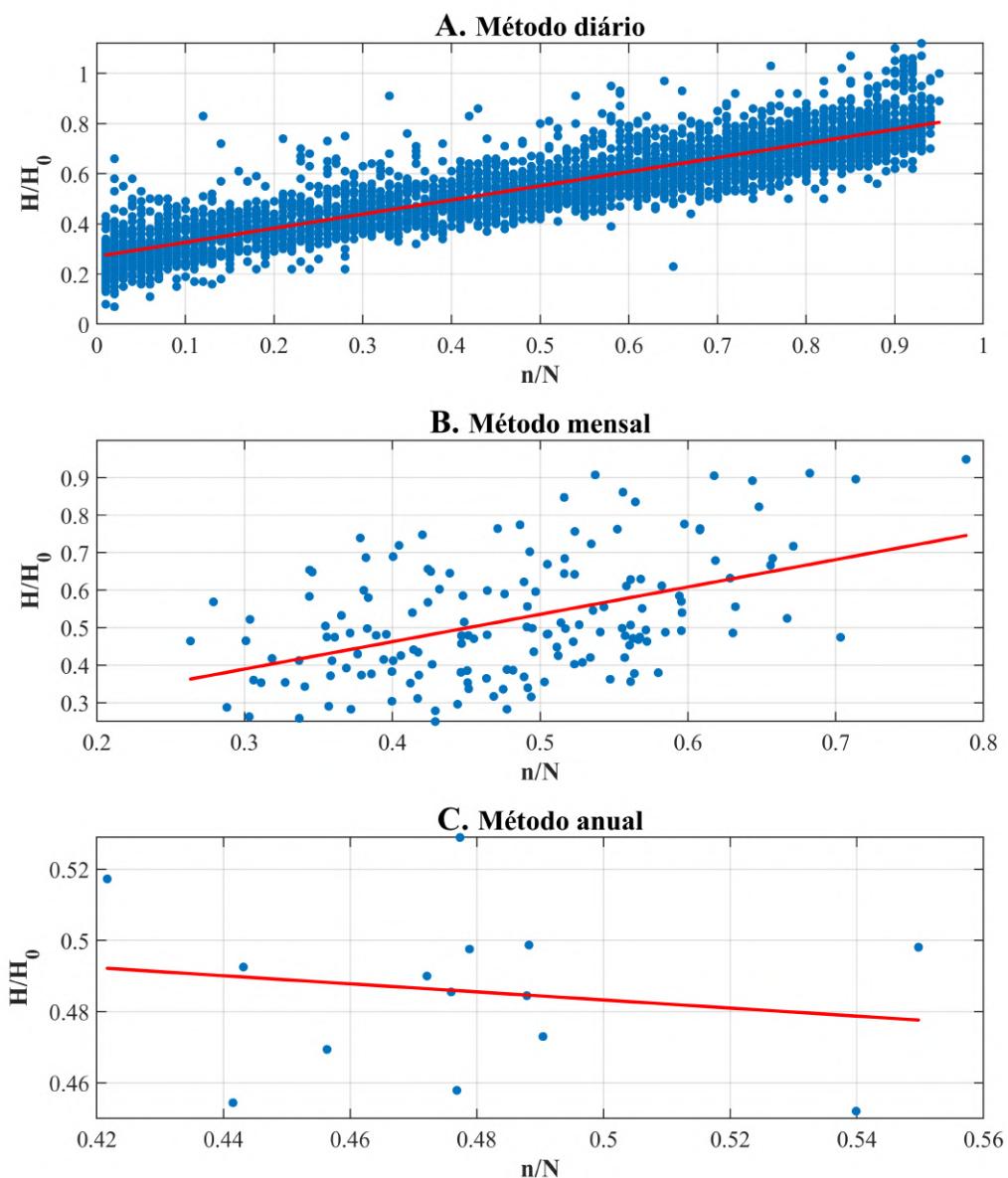
A estação meteorológica automática desta cidade está localizada na latitude 25°26'S, longitude 49°13'W e altitude 923.5m. Já a estação meteorológica convencional está localizada na latitude 25°43'S, longitude 49°26'W e altitude 923.5m. Os valores de latitude escolhidos foram os da estação automática, pois ela fornece os dados da radiação solar global, que é o elemento central desse estudo.

O período analisado foi de 2004 até 2018. Nesse período, 5479 dados foram coletados, e 4017 desses dados foram utilizados (mais informações sobre a coleta e utilização de dados na Seção 3.2). Com isso, têm-se um aproveitamento de 73.31% das informações.

#### 4.7.1 Regressão Linear

Os gráficos da Figura 31 mostram as regressões lineares obtidas através dos métodos: diário, mensal e anual. Nos métodos diário e mensal o ajuste é uma linha inclinada e ascendente, enquanto no anual ela é descendente. No gráfico A existe um grande agrupamento de dados distribuídos ao longo da linha, com algumas anomalias e *outliers* (principalmente no final da reta). O gráfico B tem os dados muito dispersos e distantes entre si, com muitas anomalias e sem formar um padrão exato. O método anual possui dados distantes entre si e sem nenhum padrão.

Figura 31 – Comparação dos valores da dispersão diária, mensal e anual da razão entre a radiação solar e a extraterrestre ( $H/H_0$ ) e a razão da insolação ( $n/N$ ) no período de 2004 a 2018, na cidade de Curitiba/PR

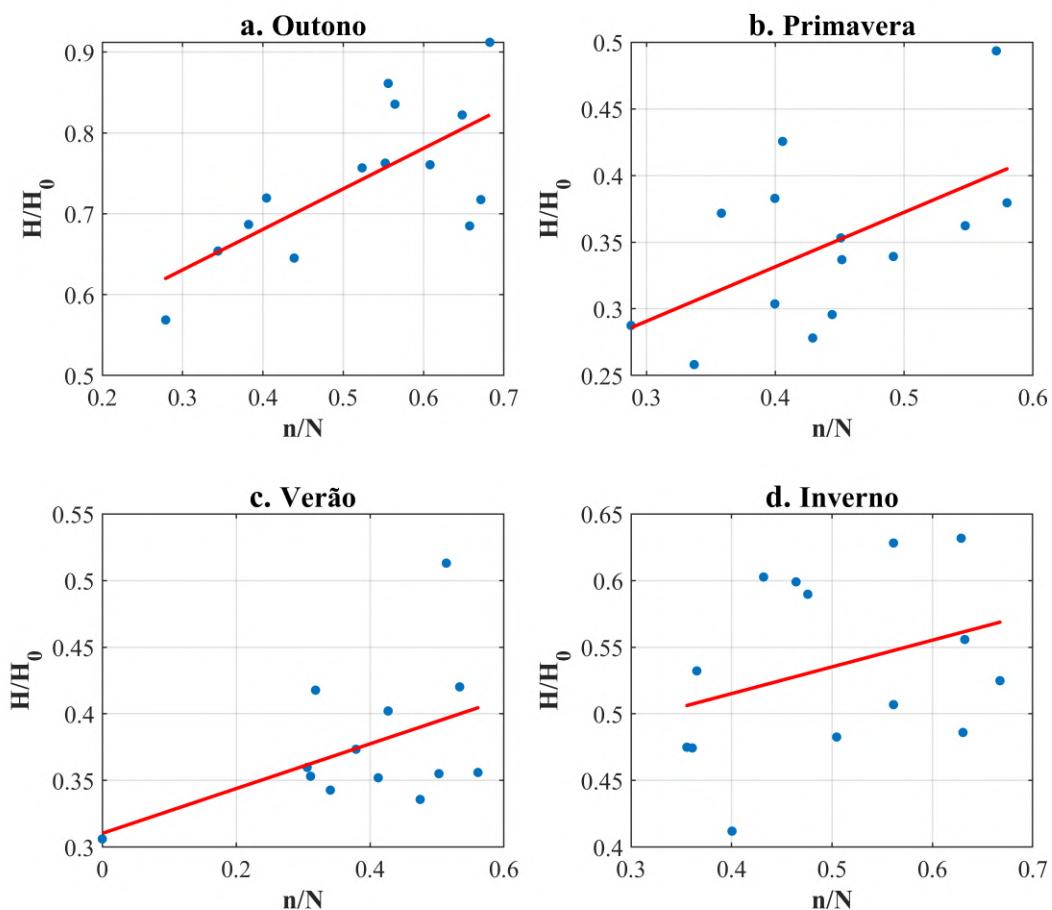


Fonte: Elaborado pelo autor

Os gráficos da Figura 32 mostram as regressões lineares obtidas pelo método estacional, ou seja, analisando o período de cada estação. As linhas de ajuste de todas as estações são bem parecidas, todas inclinadas ascendentemente. O outono parece ter o melhor ajuste, com dados bem distribuídos ao longo da reta e com poucas anomalias. A primavera possui dados relativamente distantes e com alguns valores atípicos, mas seguem um padrão. O verão possui dados concentrados no final da reta, sem nenhum padrão e com *outliers*. O inverno possui dados dispersos, distantes uns dos outros e sem padrão, formando uma reta com pouca inclinação.

Figura 32 – Comparação dos valores da dispersão das quatro estações do ano da razão entre a radiação solar e a extraterrestre ( $H/H_0$ ) e a razão da insolação ( $n/N$ ) no período de 2004 a 2018, na cidade de Curitiba/PR

#### D. Método estacional



Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 13 mostra os resultados obtidos a partir da regressão linear dos gráficos da Figura 31 e da Figura 32. Observa-se que o valor de  $a$  varia bastante e assume diversos valores, variando entre 0.1 e 0.5. Os valores de  $b$  seguem o mesmo padrão, assumindo valores altos em alguns métodos ou períodos, como 0.7299 no mensal, e valores baixos em outros, como -0.1134 no anual.

A coluna  $a + b$  mostra que, apesar da disparidade dos valores de  $a$  e  $b$  nos métodos analisados, a soma deles tende a possuir uma relativa constância. Mas, mesmo assim, essa constância se mantém em apenas alguns métodos ou períodos, como: outono, diário e mensal. Isso indica que deve haver uma grande disparidade nas avaliações dos métodos.

O único método que apresentou um bom resultado de  $R^2$  foi o diário, com valor de 0.8087. O restante dos períodos ou métodos obteve coeficientes de determinação abaixo de 0.5, não sendo considerados satisfatórios.

Tabela 13 – Resultados da regressão linear para Curitiba/PR (2004-2018)

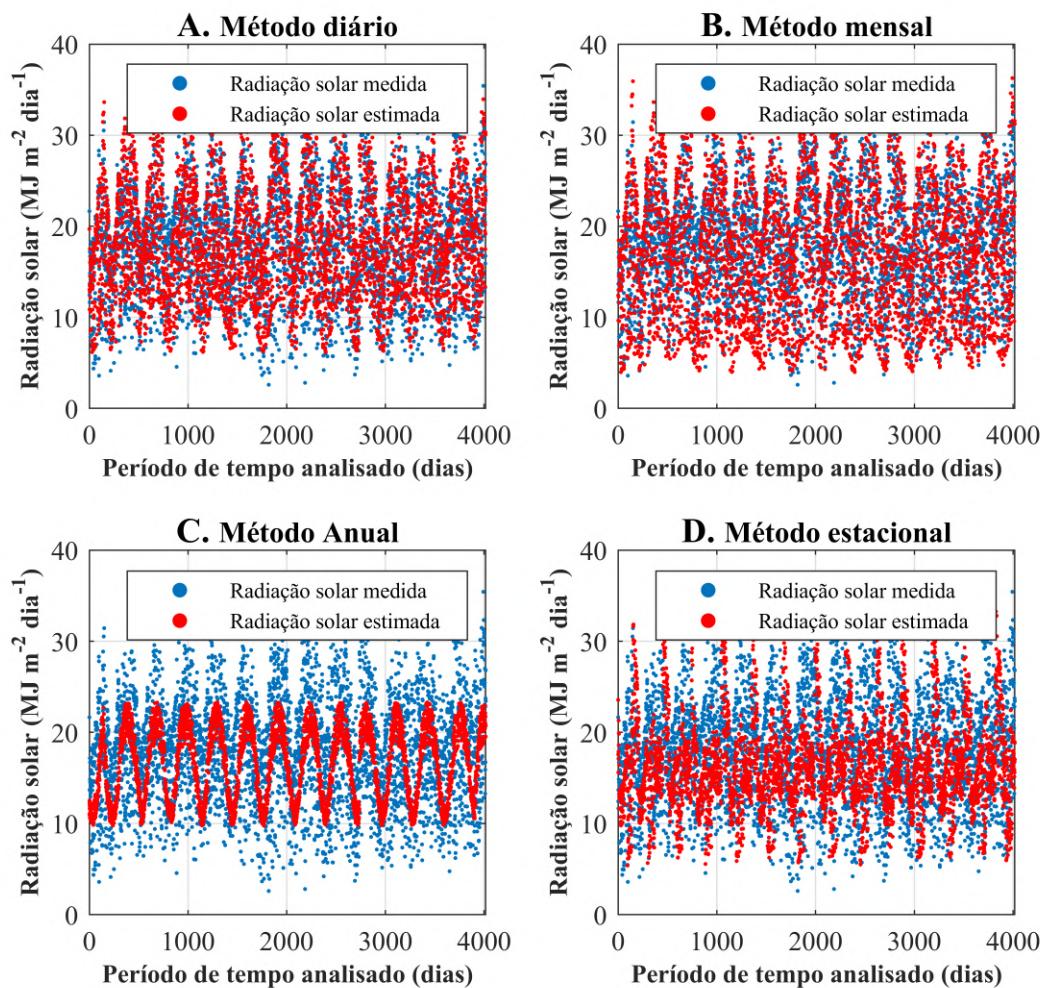
Período/método	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>a + b</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Outono	0.4802	0.5011	0.9813	0.495
Primavera	0.1681	0.4086	0.5767	0.3107
Verão	0.3103	0.1679	0.4782	0.2224
Inverno	0.4349	0.2007	0.6356	0.1107
Diário	0.2702	0.563	0.8332	0.8087
Mensal	0.1705	0.7299	0.9004	0.2171
Anual	0.54	-0.1134	0.4266	0.0298

Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.7.2 Radiação solar estimada

Os gráficos apresentados na Figura 33 mostram que a estimativa varia muito de acordo com cada método adotado. O gráfico A e o B são parecidos, mas o A apresenta dados mais próximos e, aparentemente, consegue fazer uma estimativa melhor. O gráfico C é muito falho, com os dados estimados concentrados e distantes dos medidos. O D não parece ser tão ruim quanto o C, mas estima valores bem inferiores em comparação com os medidos.

Figura 33 – Comparação dos valores da radiação solar medida com a estimada, calculada através dos métodos: diário, mensal, anual e estacional no período de 2004 a 2018, na cidade de Curitiba/PR



Fonte: Elaborado pelo autor

Analizando o índice  $c$ , mostrado na Tabela 14, pode-se observar que ele teve seu maiores valores nos métodos diário e mensal, com valores de 0.8736 e 0.8731, respectivamente. De acordo com os critérios de Camargo e Sentelhas (1997), apresentados na Seção 2.4.4, esses dois métodos possuem um desempenho ótimo. Já os métodos anual e estacional tiveram resultados

horríveis, tendo os seus desempenhos classificados como péssimo, com valores de 0.0273 e 0.3645, respectivamente.

Os valores do RMSE obtidos foram bem próximos e razoavelmente satisfatórios, o que mostra que não houveram muitas anomalias nos métodos analisados. O MBE, por outro lado, não obteve resultados satisfatórios; com o método diário indicando que o modelo está subestimado (valor negativo), enquanto o restante indica que ele está superestimado (valor positivo). Com isso, todos os valores do teste  $t$  foram ruins e nenhum foi inferior ao  $t_{crit}$  de 1.9606; o menos ruim foi o método diário, com valor de 6.6474.

Tabela 14 – Resultados da comparação entre a radiação solar medida e a estimada para Curitiba/PR (2004-2018)

Método	r	d	c	RMSE (MJ m <sup>-2</sup> m <sup>-1</sup> )	MBE (MJ m <sup>-2</sup> m <sup>-1</sup> )	t
Diário	0.9151	0.9546	0.8736	2.522	-0.2631	6.6474
Mensal	0.9245	0.9444	0.8731	3.0993	0.4609	9.5301
Anual	0.068	0.4016	0.0273	6.9736	1.388	12.8708
Estacional	0.5231	0.6968	0.3645	5.639	1.6126	18.9125

$t_{crit} \text{ a } 5\% = 1.9606$ .

Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.7.3 Discussão

Combinando os resultados observados pelas regressões lineares e pela radiação estimada é possível verificar que o único método que obteve um resultado satisfatório em praticamente todas as avaliações foi o diário. Outro que apresentou um bom resultado no índice  $c$  (além do método diário) foi o mensal, mas ele obteve um péssimo coeficiente de determinação assim como um péssimo valor de MBE e  $t$ . O restante apresenta valores péssimos em todas as avaliações.

Como já dito, o método diário apresenta excelentes valores de  $c$ , assim como de  $r$ ,  $d$  e bons valores de  $R^2$ , e RMSE; o que gera o resultado ruim de  $t$  é o valor atípico do MBE, de -0.2631.

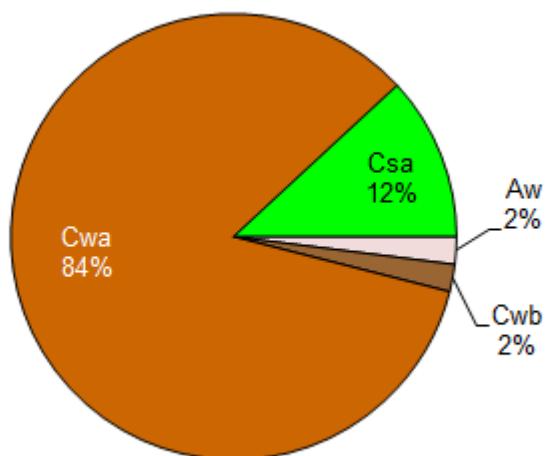
Logo, é possível dizer que o método diário é o mais consistente e o mais adequado para a cidade de Curitiba e, consequentemente, para o clima Cfb. Porém, é importante ressaltar que o seu  $t$ -statistic não passou nos critérios adotados, mostrando que o modelo não obteve um bom desempenho. Segundo a maioria dos métodos de calibração, o modelo de Angström-Prescott não consegue ter um grau de eficiência bom nesta cidade e, possivelmente, neste clima. Mas o método diário prova o contrário e mostra resultados razoavelmente satisfatórios. Com isso, a melhor calibração para os coeficientes  $a$  e  $b$  para Curitiba é de 0.2702 e 0.563, respectivamente, obtida através do método diário.

## 4.8 Juiz de Fora/MG

A cidade analisada a seguir é a de Juiz de Fora, que se encontra no estado de Minas Gerais. De acordo com o estudo realizado por Dubreuil et al. (2017), cada localização brasileira possui um ou mais tipos climáticos que são detectados ao longo do ano. A Figura 34 mostra as frequências dos tipos de climas anuais para a cidade de Juiz de Fora.

Como é possível perceber, o clima mais predominante, com 84% de frequência, é o Cwa. Esse tipo de classificação climática é proposto por Köppen e adaptado por (DUBREUIL et al., 2017). O clima Cwa é conhecido por ser temperado, com verão quente e úmido, conforme mostrado no Quadro 1.

Figura 34 – Frequências dos tipos de climas anuais na cidade de Juiz de Fora/MG



Fonte: Adaptado de Dubreuil et al. (2017)

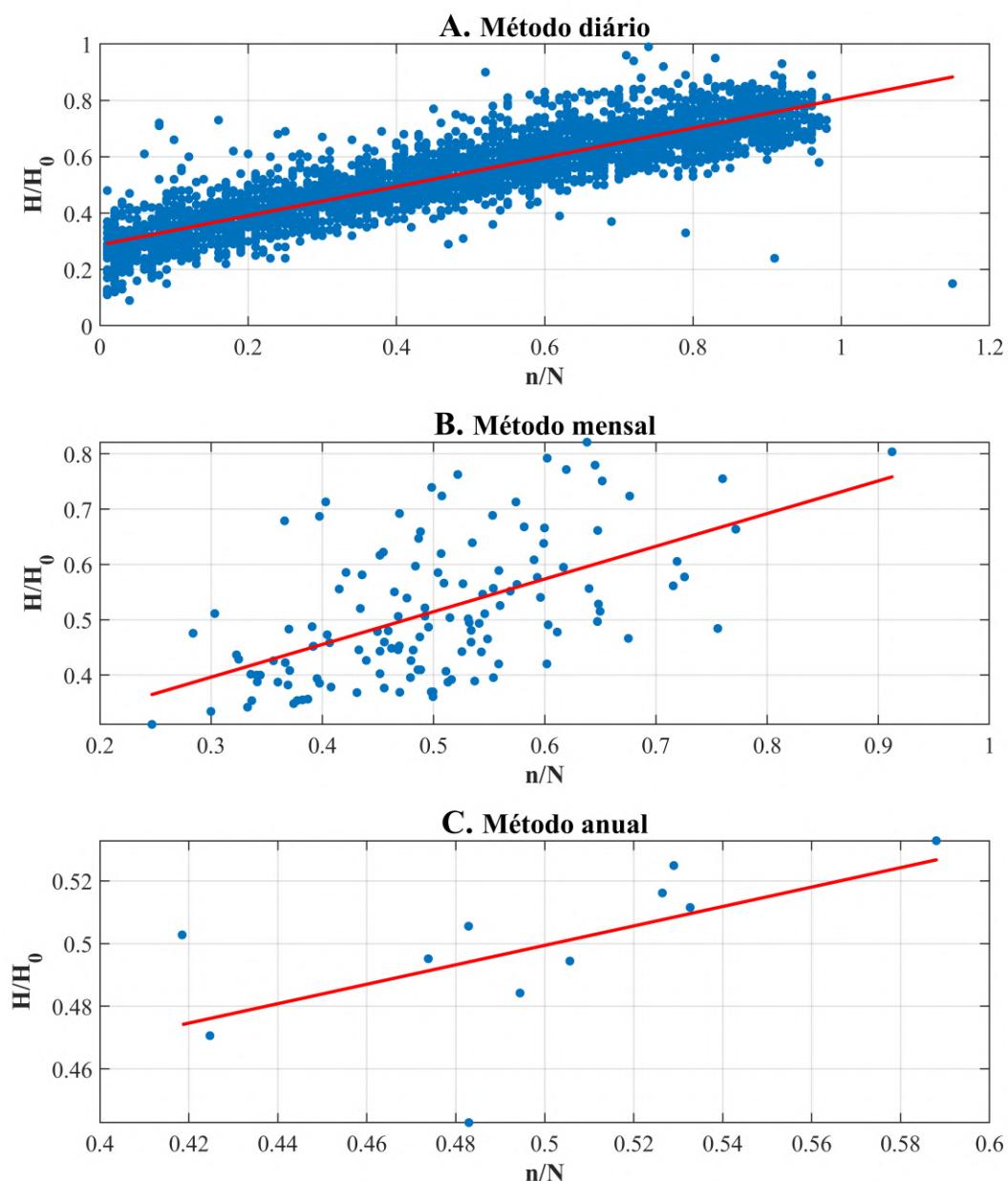
A estação meteorológica automática desta cidade está localizada na latitude 21°46'S, longitude 43°21'W e altitude 950m. Já a estação meteorológica convencional está localizada na latitude 21°76'S, longitude 43°36'W e altitude 939.96m. Os valores de latitude escolhidos foram os da estação automática, pois ela fornece os dados da radiação solar global, que é o elemento central desse estudo.

O período analisado foi de 2008 até 2018. Nesse período, 4018 dados foram coletados, e 3440 desses dados foram utilizados (mais informações sobre a coleta e utilização de dados na Seção 3.2). Com isso, têm-se um aproveitamento de 85.61% das informações.

#### 4.8.1 Regressão Linear

Os gráficos da Figura 35 mostram as regressões lineares obtidas através dos métodos: diário, mensal e anual. Em todos os métodos o ajuste é uma linha inclinada e ascendente. No diário existe um grande agrupamento de dados distribuídos ao longo da linha, com poucas anomalias e *outliers*. O método mensal tem os dados muito dispersos e distantes entre si, levemente formando um padrão. O método anual possui pequenos grupos de dados distantes entre si, mas bem distribuídos ao longo da reta.

Figura 35 – Comparação dos valores da dispersão diária, mensal e anual da razão entre a radiação solar e a extraterrestre ( $H/H_0$ ) e a razão da insolação ( $n/N$ ) no período de 2008 a 2018, na cidade de Juiz de Fora/MG

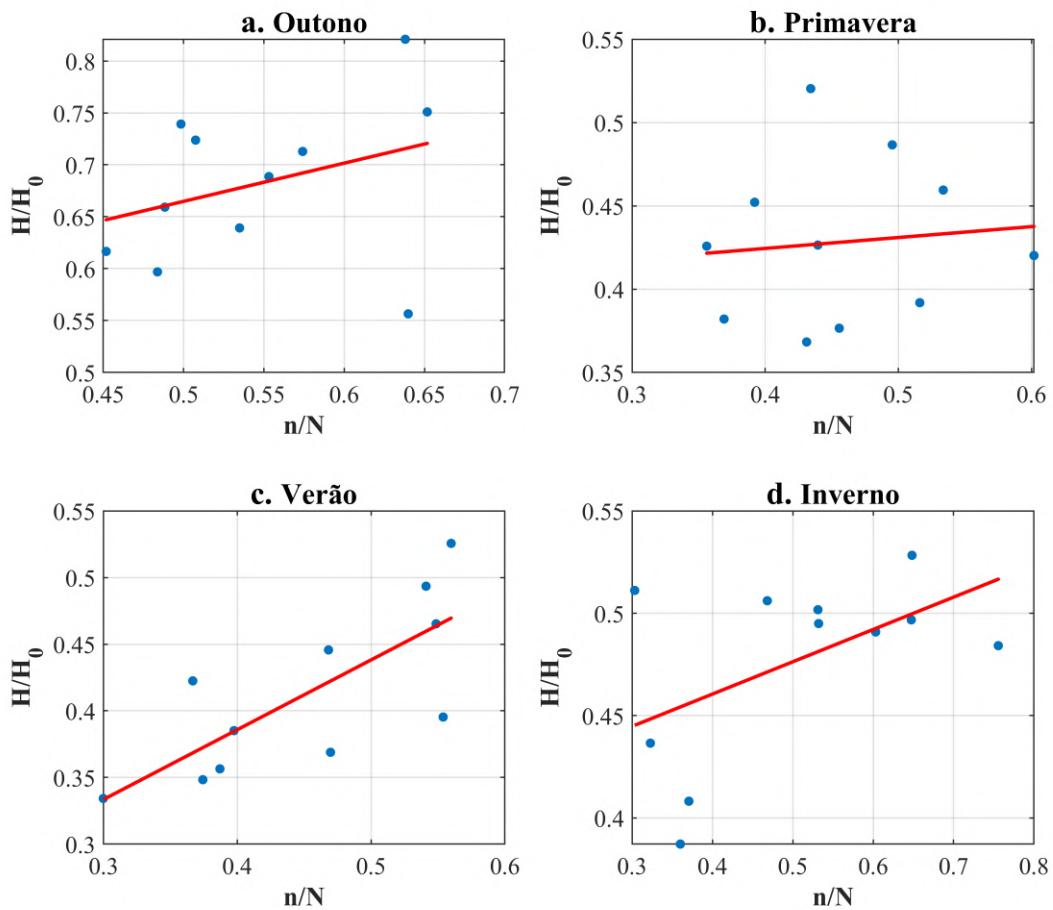


Fonte: Elaborado pelo autor

Os gráficos da Figura 36 mostram as regressões lineares obtidas pelo método estacional, ou seja, analisando o período de cada estação. As linhas de ajuste são todas ascendentes, algumas mais inclinadas e outras menos. O outono possui algumas anomalias e dados distantes entre si, mas gera uma reta bem inclinada. A primavera possui dados distantes entre si e espalhados pelo gráfico, sem nenhum padrão, formando uma linha levemente inclinada, quase horizontal. O verão tem dados concisos, distribuídos ao longo da reta, que é bem inclinada. O inverno também gera uma linha bem inclinada, mas possui dados mal distribuídos e diversas anomalias.

Figura 36 – Comparação dos valores da dispersão das quatro estações do ano da razão entre a radiação solar e a extraterrestre ( $H/H_0$ ) e a razão da insolação ( $n/N$ ) no período de 2008 a 2018, na cidade de Juiz de Fora/MG

#### D. Método estacional



Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 15 mostra os resultados obtidos a partir da regressão linear dos gráficos da Figura 35 e da Figura 36. Observa-se que o valor de  $a$  varia bastante e assume diversos valores, variando entre 0.1764 e 0.4808. Os valores de  $b$  seguem o mesmo padrão, assumindo valores altos em alguns métodos ou períodos, como 0.5913 no mensal, e valores baixos em outros, como 0.0654 no anual.

A coluna  $a + b$  mostra que, apesar da disparidade dos valores de  $a$  e  $b$  nos métodos analisados, a soma deles tende a possuir uma relativa constância. Mas, mesmo assim, essa constância se mantém em apenas alguns métodos ou períodos, como: outono, diário e mensal. Isso indica que deve haver uma grande disparidade nas avaliações dos métodos.

O único método que apresentou um bom resultado de  $R^2$  foi o diário, com valor de 0.7936. O restante dos períodos ou métodos obteve coeficientes de determinação abaixo de 0.5 (com exceção do verão, que obteve 0.5769), não sendo considerados satisfatórios.

Tabela 15 – Resultados da regressão linear para Juiz de Fora/MG (2008-2018)

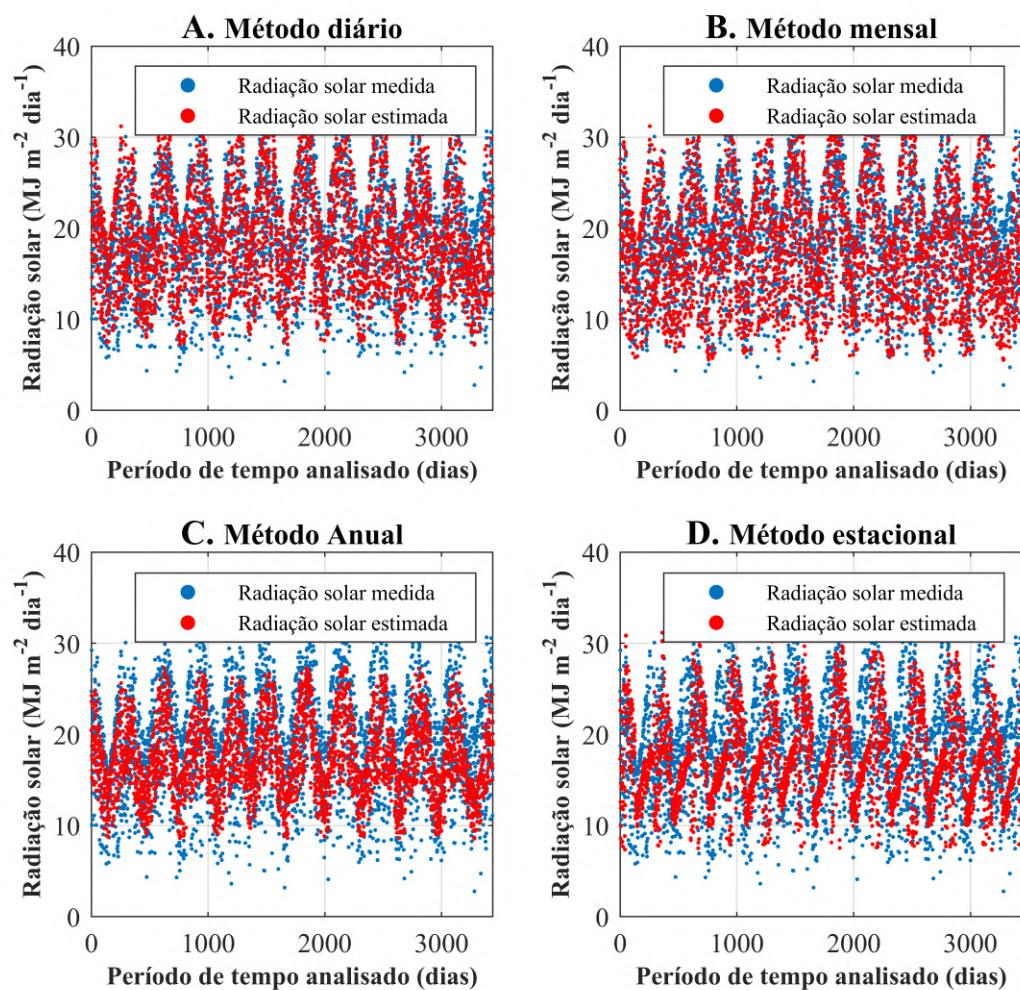
Período/método	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>a + b</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Outono	0.4808	0.3681	0.8489	0.1116
Primavera	0.3983	0.0654	0.4637	0.0102
Verão	0.1764	0.5237	0.7001	0.5769
Inverno	0.3974	0.1578	0.5552	0.2761
Diário	0.2872	0.518	0.8052	0.7936
Mensal	0.2188	0.5913	0.8101	0.3043
Anual	0.3444	0.3101	0.6545	0.3512

Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.8.2 Radiação solar estimada

Os gráficos apresentados na Figura 37 mostram que a estimativa varia muito de acordo com cada método adotado. O gráfico A e o B são parecidos, mas o A apresenta dados mais próximos e, aparentemente, consegue fazer uma estimativa melhor. O gráfico C não apresenta uma estimativa tão boa, mas consegue prever o padrão de variação dos dados medidos. O D mostra muitas falhas, com dados agrupados e longe dos valores medidos.

Figura 37 – Comparação dos valores da radiação solar medida com a estimada, calculada através dos métodos: diário, mensal, anual e estacional no período de 2008 a 2018, na cidade de Juiz de Fora/MG



Fonte: Elaborado pelo autor

Analizando o índice  $c$ , mostrado na Tabela 16, pode-se observar que ele teve seu maiores valores nos métodos mensal e diário, com valores de 0.8655 e 0.8650, respectivamente. De acordo com os critérios de Camargo e Sentelhas (1997), apresentados na Seção 2.4.4, esses dois métodos possuem um desempenho ótimo. O método anual obteve um resultado classificado

como muito bom, de valor 0.7583. O estacional, por outro lado, teve um desempenho classificado como mau, de valor 0.4383.

Os valores do RMSE obtidos foram bem próximos e razoavelmente satisfatórios, o que mostra que não houveram muitas anomalias nos métodos analisados. O MBE, por outro lado, não obteve resultados satisfatórios; com o método diário indicando que o modelo está subestimado (valor negativo), enquanto o restante indica que ele está superestimado (valor positivo). Com isso, todos os valores do teste  $t$  foram ruins e nenhum foi inferior ao  $t_{crit}$  de 1.9607; o menos ruim foi o método diário, com valor de 3.3869.

Tabela 16 – Resultados da comparação entre a radiação solar medida e a estimada para Juiz de Fora/MG (2008-2018)

Método	r	d	c	RMSE (MJ m <sup>-2</sup> m <sup>-1</sup> )	MBE (MJ m <sup>-2</sup> m <sup>-1</sup> )	t
Diário	0.9083	0.9523	0.865	2.4732	-0.1426	3.3869
Mensal	0.9137	0.9472	0.8655	2.7308	0.9754	22.4257
Anual	0.86	0.8817	0.7583	3.3656	1.4372	27.6941
Estacional	0.5893	0.7438	0.4383	5.0686	1.5519	18.8611

$t_{crit} \text{ a } 5\% = 1.9607$ .

Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.8.3 Discussão

Combinando os resultados observados pelas regressões lineares e pela radiação estimada é possível verificar que o único método que obteve um resultado satisfatório em praticamente todas as avaliações foi o diário. Outro que apresentou um bom resultado no índice  $c$  (além do método diário) foi o mensal, mas ele obteve um péssimo coeficiente de determinação assim como um péssimo valor de MBE e  $t$ . O restante apresenta valores péssimos em todas as avaliações.

Como já dito, o método diário apresenta excelentes valores de  $c$ , assim como de  $r$ ,  $d$  e bons valores de  $R^2$ , e RMSE; o que gera o resultado ruim de  $t$  é o valor indesejado do MBE, de -0.1426.

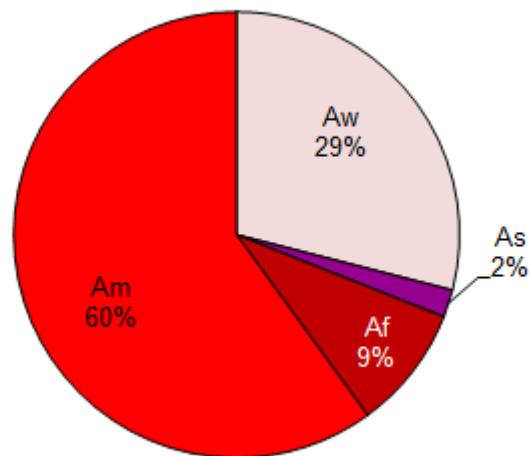
Logo, é possível dizer que o método diário é o mais consistente e o mais adequado para a cidade de Juiz de Fora e, consequentemente, para o clima Cwa. Porém, é importante ressaltar que o seu  $t$ -statistic não passou nos critérios adotados, mostrando que o modelo não obteve um bom desempenho. Segundo a maioria dos métodos de calibração, o modelo de Angström-Prescott não consegue ter um grau de eficiência bom nesta cidade e, possivelmente, neste clima. Mas o método diário prova o contrário e mostra resultados razoavelmente satisfatórios. Com isso, a melhor calibração para os coeficientes  $a$  e  $b$  para Juiz de Fora é de 0.2872 e 0.5180, respectivamente, obtida através do método diário.

## 4.9 Manaus/AM

A cidade analisada a seguir é a de Manaus, que se encontra no estado do Amazonas. De acordo com o estudo realizado por Dubreuil et al. (2017), cada localização brasileira possui um ou mais tipos climáticos que são detectados ao longo do ano. A Figura 38 mostra as frequências dos tipos de climas anuais para a cidade de Manaus.

Como é possível perceber, o clima mais predominante, com 60% de frequência, é o Am. Esse tipo de classificação climática é proposto por Köppen e adaptado por (DUBREUIL et al., 2017). O clima Am é conhecido por ser quente de monção, conforme mostrado no Quadro 1.

Figura 38 – Frequências dos tipos de climas anuais na cidade de Manaus/AM



Fonte: Adaptado de Dubreuil et al. (2017)

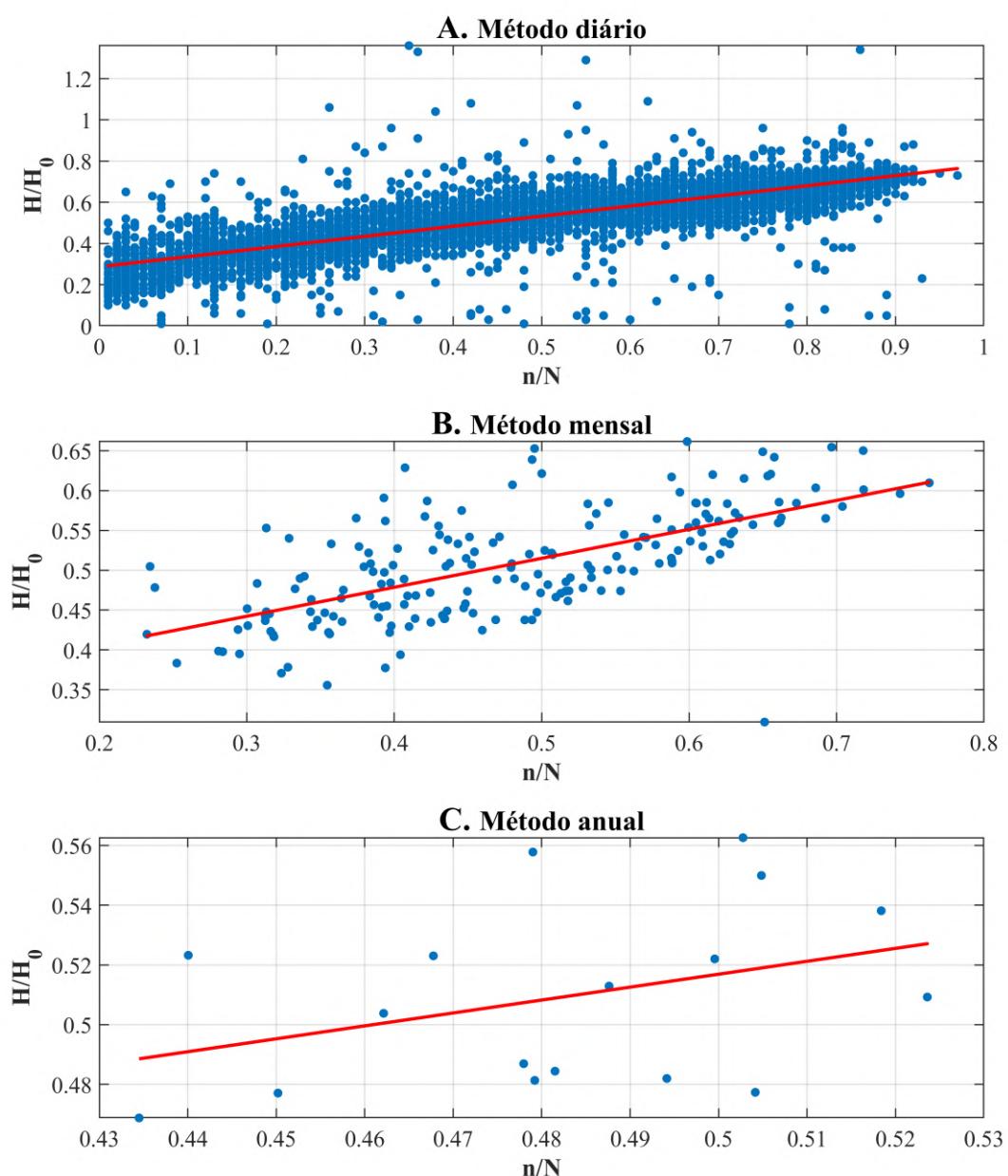
A estação meteorológica automática desta cidade está localizada na latitude 03°07'S, longitude 59°57'W e altitude 67m. Já a estação meteorológica convencional está localizada na latitude 03°01'S, longitude 60°01'W e altitude 61.25m. Os valores de latitude escolhidos foram os da estação automática, pois ela fornece os dados da radiação solar global, que é o elemento central desse estudo.

O período analisado foi de 2001 até 2018. Nesse período, 6574 dados foram coletados, e 5147 desses dados foram utilizados (mais informações sobre a coleta e utilização de dados na Seção 3.2). Com isso, têm-se um aproveitamento de 78.29% das informações.

#### 4.9.1 Regressão Linear

Os gráficos da Figura 39 mostram as regressões lineares obtidas através dos métodos: diário, mensal e anual. Em todos os métodos o ajuste é uma linha inclinada e ascendente. No diário existe um grande agrupamento de dados distribuídos ao longo da linha, com muitas anomalias e *outliers*. O método mensal possui muitos *outliers*, mas consegue ter uma boa distribuição de dados ao longo da reta. O método anual possui dados distantes entre si, sem formar um padrão.

Figura 39 – Comparação dos valores da dispersão diária, mensal e anual da razão entre a radiação solar e a extraterrestre ( $H/H_0$ ) e a razão da insolação ( $n/N$ ) no período de 2001 a 2018, na cidade de Manaus/AM

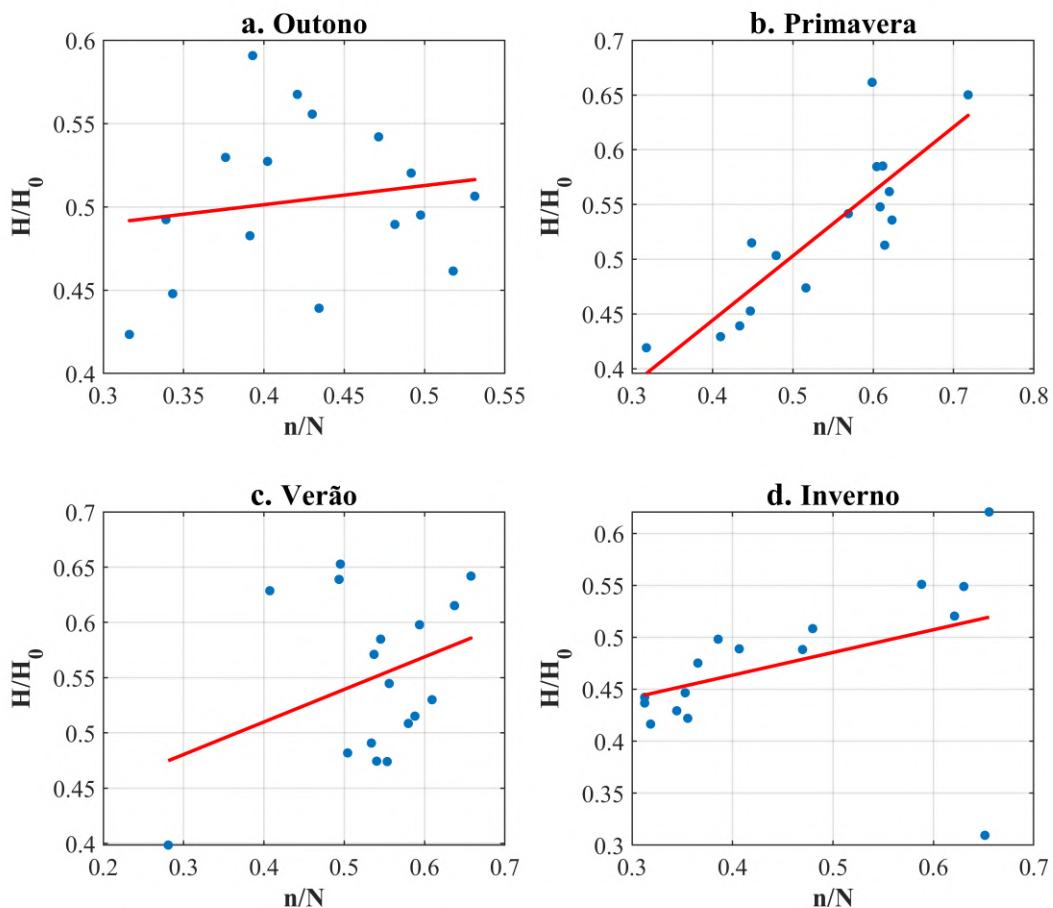


Fonte: Elaborado pelo autor

Os gráficos da Figura 40 mostram as regressões lineares obtidas pelo método estacional, ou seja, analisando o período de cada estação.. O outono forma uma linha ascendente levemente inclinada, com dados esparsos e sem padrão. A primavera possui dados bem distribuídos ao longo de uma reta ascendente muito inclinada, com poucas anomalias. O verão tem dados agrupados no final de uma linha inclinada e ascendente, mas possui muitas anomalias e má distribuição. O inverno também gera uma linha inclinada ascendente, com dados bem distribuídos ao longo dela e com poucas anomalias.

Figura 40 – Comparação dos valores da dispersão das quatro estações do ano da razão entre a radiação solar e a extraterrestre ( $H/H_0$ ) e a razão da insolação ( $n/N$ ) no período de 2001 a 2018, na cidade de Manaus/AM

#### D. Método estacional



Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 17 mostra os resultados obtidos a partir da regressão linear dos gráficos da Figura 39 e da Figura 40. Observa-se que o valor de  $a$  é bem constante, com um valor médio entre 0.3 e 0.4. Os valores de  $b$ , por sua vez, variam bastante e vão de 0.1148 no outono até 0.5891 na primavera.

A coluna  $a + b$  mostra que, apesar da disparidade dos valores de  $a$  e  $b$  nos métodos analisados, a soma deles tende a possuir uma relativa constância. Isso significa que quando o valor de  $a$  é alto, o de  $b$  tende a ser baixo, e vice-versa.

Os métodos ou períodos que apresentaram resultados razoáveis de  $R^2$  foram: o período da primavera, valendo 0.726, e o método diário, com valor de 0.6437. O restante dos períodos ou métodos obteve coeficientes de determinação abaixo de 0.5, não sendo considerados satisfatórios.

Tabela 17 – Resultados da regressão linear para Manaus/AM (2001-2018)

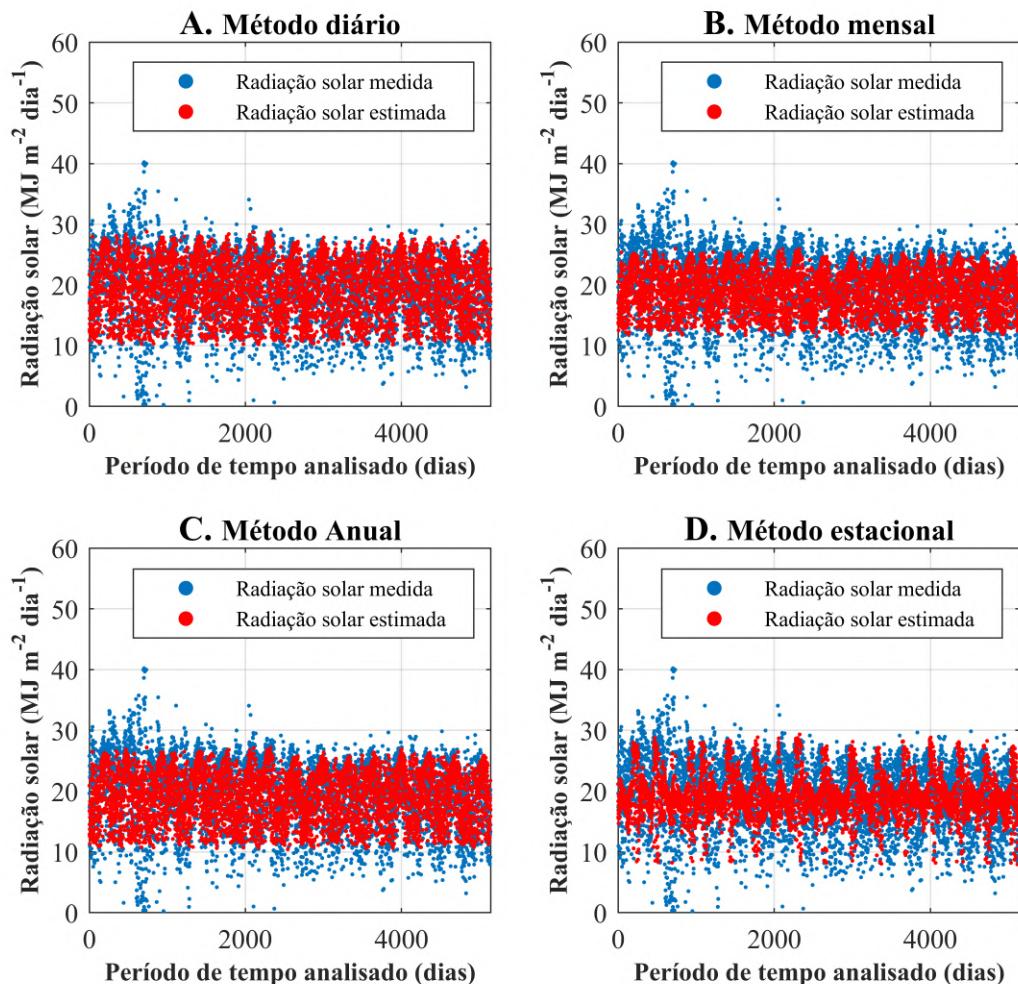
<b>Período/método</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>a + b</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Outono	0.4554	0.1148	0.5702	0.0258
Primavera	0.2084	0.5891	0.7975	0.726
Verão	0.3921	0.2945	0.6866	0.1246
Inverno	0.376	0.2188	0.5948	0.166
Diário	0.2868	0.4914	0.7782	0.6437
Mensal	0.3332	0.3636	0.6968	0.4203
Anual	0.3006	0.4325	0.7331	0.1361

Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.9.2 Radiação solar estimada

Os gráficos apresentados na Figura 41 mostram que a estimativa varia muito de acordo com cada método adotado. O gráfico A parece fazer uma estimativa razoável, mas os dados medidos por volta dos 1000 dias se distanciam muito do padrão encontrado a seguir, e a estimativa realizada não conseguiu prever isso. Os gráficos B e C são parecidos (apesar do C, aparentemente, ser melhor), ambos possuem os dados concentrados, com pouca variância, diferentemente de como os dados medidos se apresentam. Já o gráfico D aparenta ser a pior estimativa, com dados concentrados e mostrando um padrão que não corresponde com os dados reais.

Figura 41 – Comparação dos valores da radiação solar medida com a estimada, calculada através dos métodos: diário, mensal, anual e estacional no período de 2001 a 2018, na cidade de Manaus/AM



Fonte: Elaborado pelo autor

Analizando o índice  $c$ , mostrado na Tabela 18, pode-se observar que ele teve seu maiores valores nos métodos diário e anual, com valores de 0.702 e 0.6861, respectivamente. De acordo com os critérios de Camargo e Sentelhas (1997), apresentados na Seção 2.4.4, os dois métodos tem os seus desempenhos classificados como bom. O método mensal obteve um resultado classificado como mediano, de valor 0.6572. Já o estacional foi pior e teve um desempenho classificado como mau, de valor 0.4542

Os valores do RMSE obtidos foram bem próximos e razoavelmente satisfatórios, o que mostra que não houveram muitas anomalias nos métodos analisados. O MBE, por outro lado, não obteve resultados satisfatórios, exceto pelo o método diário, de valor -0.0057, indicando que o modelo está subestimado (valor negativo), enquanto o restante indica que ele está superestimado (valor positivo). Com isso, apenas o método diário teve o valor do teste  $t$  satisfatório, de 0.118, sendo inferior ao  $t_{crit}$  de 1.9604.

Tabela 18 – Resultados da comparação entre a radiação solar medida e a estimada para Manaus/AM (2001-2018)

Método	r	d	c	RMSE (MJ m <sup>-2</sup> m <sup>-1</sup> )	MBE (MJ m <sup>-2</sup> m <sup>-1</sup> )	t
Diário	0.7979	0.8798	0.702	3.4635	-0.0057	0.118
Mensal	0.7957	0.826	0.6572	3.709	0.5752	11.2568
Anual	0.7974	0.8604	0.6861	3.5474	0.5432	11.1114
Estacional	0.6322	0.7184	0.4542	4.4898	0.4948	7.951

$t_{crit}$  a 5% = 1.9604.

Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.9.3 Discussão

Combinando os resultados observados pelas regressões lineares e pela radiação estimada é possível verificar que o único método que obteve um resultado satisfatório em todas as avaliações foi o diário. Outro que apresentou um bom resultado no índice  $c$  (além do método diário) foi o anual, mas ele obteve um péssimo coeficiente de determinação assim como um péssimo valor de MBE e  $t$ . O restante apresenta valores péssimos em todas as avaliações.

Logo, é possível dizer que o método diário é o mais consistente e o mais adequado para a cidade de Manaus e, consequentemente, para o clima Am. Segundo a maioria dos métodos de calibração, o modelo de Ångström-Prescott não consegue ter um grau de eficiência bom nesta cidade e, possivelmente, neste clima. Mas o método diário prova o contrário e mostra resultados razoavelmente bons e satisfatórios. Com isso, a melhor calibração para os coeficientes  $a$  e  $b$  para Manaus é de 0.2868 e 0.4914, respectivamente, obtidos pelo método diário.

## 4.10 Interpretações e discussão geral

Após todas as análises e interpretações sobre cada cidade e estação meteorológica, realizadas uma a uma, esta seção tem o objetivo de juntar os melhores resultados de cada uma e discutir. Para isso, a tabela abaixo foi elaborada, mostrando o melhor método encontrado para cada cidade e os seus respectivos resultados, permitindo uma comparação mais esclarecida:

Tabela 19 – Comparação entre os principais resultados obtidos nas análises específicas de cada cidade

Cidade	Melhor método	Dados totais	Dados úteis	R <sup>2</sup>	c	t
Aracajú/SE	Diário	5479	72.99%	0.577	0.7665	0.8278
Aragarças/GO	Diário	4018	82.02%	0.7713	0.752	1.8953
Bagé/RS	Diário	4018	85.16%	0.7843	0.9165	8.1467
Barbacena/MG	Diário	5844	78.42%	0.7229	0.8172	4.0144
Belém/PA	Diário	5479	66.18%	0.4406	0.5091	0.2253
Campos Sales/CE	Diário	3652	86.77%	0.7701	0.8225	0.4012
Curitiba/PR	Diário	5479	73.31%	0.8087	0.8736	6.6474
Juiz de Fora/MG	Diário	4018	85.61%	0.7936	0.865	3.3869
Manaus/AM	Diário	6574	78.29%	0.6437	0.702	0.118

$t_{crit}$  a 5% = Arredondado para 1.96.

Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se, pelo Quadro 19 acima, que em todas as cidades, o melhor método obtido foi o diário. Isso significa que quanto maior for a quantidade de dados processada, melhor serão os resultados. Além disso, é possível perceber que os valores obtidos das avaliações estatísticas foram relativamente bons para a maioria das cidades. Diferentemente dos resultados obtidos neste trabalho, Medeiros, Silva e Bezerra (2017) teve valores satisfatórios e melhores, se comparados aos do atual trabalho, utilizando as calibrações estacional e anual nas cidades de Natal, Macau, Apodi e Caicó (todas pertencentes ao estado do Rio Grande do Norte).

Como as avaliações específicas mostraram, na maioria das vezes, as calibrações anual e estacional foram as com pior desempenho. Isso provavelmente ocorre porque na anual são poucos dados sendo analisados, deixando o método suscetível a erros. Já a estacional sofre com a perda de dados e com os climas brasileiros não tendo estações bem definidas.

Uma observação interessante é que nas cidades de Bagé, Barbacena, Curitiba e Juiz de Fora, o valor do teste  $t$  foi acima do valor crítico (o que, de acordo com a teoria apresentada, invalidaria o método), mas o índice de desempenho  $c$  foi alto em todas elas, enquanto que o  $R^2$  se manteve em um valor satisfatório. Isso mostra que a decisão de utilizar diversas análises estatísticas foi acertada, pois apenas uma avaliação é imparcial.

A cidade com o pior desempenho e que o modelo de Ångström-Prescott não consegue ter um resultado satisfatório é a de Belém. Ela apresenta valores de  $R^2$  e  $c$  abaixo do desejado

para ser considerado razoável. Porém, isso pode ter ocorrido devido a grande perca de dados, apenas 66.18% foi utilizado. Logo, fica muito difícil de analisar com certa precisão o desempenho desse modelo aplicado neste cidade mas, de modo simplista e que poderá ser refutado por trabalhos futuros, ele não é bom.

Com o objetivo de realizar uma comparação entre as cidades com os melhores resultados obtidos, as três avaliações ou testes estatísticos mostrados na Tabela 19 foram considerados. Isso porque o índice de desempenho  $c$  junta precisão e exatidão, indicando a relação entre os dados medidos e estimados; o coeficiente de determinação  $R^2$  avalia a regressão linear; e o  $t$ -statistic une o RMSE com o MBE. Três categorias foram criadas para indicar o desempenho de cada cidade, obtido através do seu melhor método de calibração (que foi o método diário em todas elas):

- **Bom:** quando as três comparações são verdadeiras:  $R^2 \geq 0.7$ ;  $c \geq 0.7$ ;  $t < t_{crit}$ .
- **Mediano:** quando duas das três comparações são verdadeiras:  $R^2 \geq 0.7$ ;  $c \geq 0.7$ ;  $t < t_{crit}$ .
- **Ruim:** quando uma ou nenhuma das três comparações são verdadeiras:  $R^2 \geq 0.7$ ;  $c \geq 0.7$ ;  $t < t_{crit}$ .

As cidades, classificadas de acordo com essas categorias, são mostradas no Quadro 4 abaixo e estão ordenadas de acordo com o seu desempenho. Além disso, a comparação com os tipos climáticos é mostrada no quadro e servirá para analisar se existe alguma relação entre o tipo climático e o desempenho da equação de Ångström-Prescott.

Quadro 4 – Classificação dos melhores desempenhos, do melhor para o pior

<b>Desempenho</b>	<b>Cidade</b>	<b>Clima</b>	<b>Equação</b>
Bom	Campos Sales	BSh	$H/H_0 = 0.3219 + 0.4414(n/N)$
	Aragarças	Aw	$H/H_0 = 0.3325 + 0.4967(n/N)$
Mediano	Manaus	Am	$H/H_0 = 0.2868 + 0.4914(n/N)$
	Aracajú	As	$H/H_0 = 0.3012 + 0.3732(n/N)$
	Juiz de Fora	Cwa	$H/H_0 = 0.2872 + 0.5180(n/N)$
	Barbacena	Cwb	$H/H_0 = 0.3300 + 0.4674(n/N)$
	Curitiba	Cfb	$H/H_0 = 0.2702 + 0.5630(n/N)$
	Bagé	Cfa	$H/H_0 = 0.2920 + 0.5859(n/N)$
Ruim	Belém	Af	$H/H_0 = 0.2630 + 0.3405(n/N)$

Fonte – Elaborado pelo autor.

Existe uma relação clara entre os climas e os resultados obtidos. Com exceção do clima Af, presente na cidade de Belém e que teve avaliações ruins possivelmente devido a sua grande perda de dados (mostrado na Tabela 19), todos os outros climas classificados como quente mostraram uma performance melhor do que os classificados como temperado.

Os climas Am e As foram classificados como mediano, mas ficaram bem próximos de serem classificados como bom. Isso aconteceu, provavelmente, porque ambos tiveram uma porcentagem de dados úteis inferior as cidades dos climas BSh e Aw, interferindo nas avaliações estatísticas. Dornelas et al. (2006) obteve uma conclusão parecida ao analisar cidade de Brasília em um período mensal. Ele concluiu que as estimativas da radiação solar global pela equação de Angström-Prescott, quando comparadas com os valores observados, apresentam os piores desempenhos nos meses mais frios e secos.

## 4.11 Trabalhos similares e validação

Para que os resultados obtidos pelo atual trabalho sejam validados, é preciso compara-los com trabalhos e estudos correlatos ou similares. A comparação mais comum e importante a ser realizada é a dos coeficientes  $a$  e  $b$ , principal objeto de estudo da equação de Angström-Prescott.

Como Lena et al. (2020) dizem, Allen et al. (1998) sugerem um valor de  $a$  de 0.25 e um valor de  $b$  de 0.50 para regiões com ausência de medição de variáveis meteorológicas. Porém, diversos estudos demonstraram que esses coeficientes raramente convergem para essa média e possuem uma variância de valores, dependendo da região, das condições climáticas, da latitude, da longitude, do período analisado, entre outros fatores. Apesar disso, o atual trabalho possui valores bem próximos aos recomendados por Allen et al. (1998). Mas é importante frisar que, apesar das comparações ajudarem a validar o trabalho realizado, raramente os valores dos coeficientes serão iguais ou próximos.

Comparando os valores obtidos dos coeficientes  $a$  e  $b$  com o de trabalhos correlatos internacionais, nota-se uma grande diferença (que já era esperada, devido a grande diferença climática). No trabalho atual, o valor de  $a$  é de cerca de 0.3, em sua maioria; e o valor de  $b$  é de cerca de 0.5, em sua maioria. Srivastava e Pandey (2013) em seu trabalho sobre o modelo de Angström-Prescott aplicado em todo o território indiano, obteve um valor de 0.1382 para  $a$  e 0.5564 para  $b$ .

Analizando os trabalhos que calcularam os coeficientes empíricos  $a$  e  $b$  em território nacional, os resultados foram bem similares em alguns casos. Júnior et al. (2012) analisaram a cidade da Parnaíba, localizada no Piauí, e classificada como sendo do clima Aw, de acordo com (CLIMATE-DATA, S/dc). Eles fizeram uma análise em um período seco e outra em um chuvoso, obtendo uma média anual com um valor de  $a$  de 0.3207, um  $b$  de 0.4598 e com um coeficiente de determinação de 0.6298. Comparando esses valores com os resultados obtidos no atual trabalho, pela cidade de Aragarças (pois ela também possui o clima Aw), é possível ver uma similaridade. A cidade de Aragarças obteve, como é mostrado no Quadro 4, um valor de  $a$  de 0.3325, um  $b$  valendo 0.4967 e um coeficiente de determinação de valor 0.7713, como é mostrado na Tabela 19. Nessa comparação é possível notar uma diferença de, aproximadamente, 3.549% entre os valores de  $a$  e de 7.429% entre os valores de  $b$ .

Bexaira et al. (2018) analisam treze locais do estado do Rio Grande do Sul (inclusive Bagé, analisado também no atual trabalho) e em todas o desempenho, de acordo com os autores, é satisfatório. Eles utilizaram métodos de calibração mensal e anual, e os seguintes modelos estatísticos: MBE, MAE, RMSE,  $d$  e  $R^2$ . Ele obteve, na cidade de Bagé e, através do método anual, um coeficiente  $a$  valendo 0.20, um coeficiente  $b$  de valor 0.59 e um coeficiente de determinação  $R^2$  de 0.90. Já o atual trabalho apresentou, para a cidade de Bagé, um valor de  $a$  de 0.2920, um valor de  $b$  de 0.5859, com um coeficiente de determinação  $R^2$  de valor 0.7843. Analisando essa comparação, é possível verificar uma diferença de 31.5% entre os coeficientes  $a$ , e uma diferença de 0.695% entre os coeficientes  $b$ . Essa grande diferença entre os valores encontrados para o coeficiente  $a$  aconteceu porque Bexaira et al. (2018) utilizou dados do período de 2008 a 2013, com uma validação em 2015, e com pouquíssimos erros provenientes das estações meteorológicas; enquanto no atual trabalho, dados de 2008 a 2018 foram utilizados e com uma maior quantidade de erros provenientes das medições das estações meteorológicas. Esses erros podem ser observados pelas análises estatísticas RMSE e MBE, pois enquanto a de Bexaira et al. (2018) apresentou valores aceitáveis e razoáveis, o atual trabalho mostrou valores altos e ruins, indicando uma grande dispersão de dados proveniente de possíveis erros e falhas por parte das medições das estações meteorológicas.

Já Carvalho et al. (2011) analisaram a cidade de Seropédica, localizada no estado do Rio de Janeiro e também pertencente ao clima Aw, de acordo com (CLIMATE-DATA, S/dd). Eles utilizaram as metodologias geral, mensal e anual, e concluíram que o maior desempenho apresentado foi pelo método mensal; contudo o desempenho apresentado por esse método foi similar ao apresentado pelos métodos anual e geral. Para efeito de comparação, os resultados obtidos pelo método geral serão utilizados. Com isso, eles obtiveram um valor de  $a$  de 0.282, um valor de  $b$  de 0.433 e um coeficiente de determinação de valor 0.82. Comparando esses valores com os obtidos pela cidade de Aragarças no atual trabalho, pois ela também é do tipo climático Aw, podemos notar uma diferença de, aproximadamente, 15.19% entre os valores de  $a$  e de 12.82% entre os valores de  $b$ . Isso mostra que os resultados obtidos foram razoavelmente similares, apesar da diferença nos métodos de calibração e na quantidade de dados analisada, e serve para validar os resultados obtidos no atual trabalho.

Lena et al. (2020) analisaram a cidade de Guarapuava, localizada no estado do Paraná e pertencente ao clima Cfb, de acordo com a classificação de Köppen-Geiger (classificação essa utilizada por Lena et al. (2020) em seu trabalho). Eles obtiveram um valor médio de  $a$  de 0.183 e um valor médio de  $b$  de 0.422. Comparando com os resultados do atual trabalho para a cidade de Curitiba, também pertencente ao clima Cfb, nota-se uma considerável diferença. A cidade de Curitiba, como é mostrado no Quadro 4, possui valores de  $a$  e de  $b$  de 0.2702 e 0.5630, respectivamente. Isso mostra uma diferença de 32.27% entre os coeficientes de  $a$  e de 25.04% entre os coeficientes de  $b$ . Essa diferença pode ser explicada porque Lena et al. (2020) utiliza uma classificação climática estática, enquanto o atual trabalho utiliza uma classificação climática proposta por Dubreuil et al. (2017) (que não faz uma análise sobre a

cidade de Guarapuava), impossibilitando saber se as duas cidades de fato pertencem a mesma classificação climática. Lena et al. (2020) utilizam dados diários de 1984 até 2014, possuindo uma base de dados bem maior que a utilizada para a cidade de Curitiba (2004-2018); e, como dito anteriormente, quanto maior for a quantidade de dados analisada, maior a chance de melhores resultados (contanto que tais dados possuam poucas falhas, o que fica difícil de saber, pois Lena et al. (2020) não utilizam modelos estatísticos específicos capazes de analisar a integridade dos dados, como o RMSE e o MBE). Além disso, eles utilizaram informações provenientes da Estação Meteorológica de Guarapuava-PR (CÓDIGO: 02551010) localizada no Campus CEDETEG, da Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO), ou seja, não pertencente ao INMET (diferentemente das estações do atual trabalho).

## 5 Conclusão

Com a crescente onda de estudos, desenvolvimento e utilização da energia solar, o interesse pela radiação solar vêm se tornando cada vez maior. Possuir valores diários dessa radiação é de extrema relevância para diversos campos de estudo, e é essencial para definir outras variáveis meteorológicas como, por exemplo, a evapotranspiração.

Essa radiação solar pode ser medida através de aparelhos meteorológicos, presentes nas estações automáticas e convencionais. Porém, esses aparelhos são uma invenção relativamente recente, se comparada com a medição da insolação (que é feita através de um instrumento já consolidado, chamado heliógrafo). Além disso, a medição da radiação solar é financeiramente custosa, pois, geralmente, ela é medida nas estações meteorológicas automáticas, que requerem uma determinada estrutura. Por isso, modelos matemáticos de estimativa da radiação solar foram criados. E, apesar de diversos modelos e equações terem sido desenvolvidos ou melhorados, o modelo de Angström-Prescott ainda é o mais utilizado por estudiosos da área e o que apresenta resultados mais sólidos.

Sendo assim, este trabalho apresentou possíveis valores dos coeficientes  $a$  e  $b$  do modelo de Angström-Prescott para nove cidades brasileiras, cada uma pertencente a um tipo de clima (de acordo com a classificação de Köppen). Além disso, análises, interpretações e discussões foram realizadas sobre os diferentes métodos de calibração utilizados.

Com as avaliações estatísticas realizadas notou-se que o melhor método de calibração em todos os casos foi o diário. Também foi possível observar que, apesar de o estudo ter sido realizado apenas com uma cidade de cada clima, os climas mais quentes apresentaram resultados melhores e mais consistentes em comparação com os climas temperados.

Finalmente, a avaliação de desempenho desse modelo cientificamente famoso mostra que o Brasil é um país muito vasto, com diferentes tipos climáticos em uma mesma região. Por esse motivo, todo trabalho que tenha por objetivo calibrar coeficientes de um modelo de radiação solar em território brasileiro, deve especificar o clima e a região, além de procurar uma base de dados íntegra e volumosa. As melhores calibrações dos coeficientes  $a$  e  $b$ , para cada cidade, são apresentadas no Quadro 4 e podem ser utilizadas para futuros estudos e aplicações. Desta forma, pode-se concluir que o trabalho obteve resultados satisfatórios através do método diário, especialmente nas cidades com climas quentes como Campos Sales/CE, Aragarças/GO, Manaus/AM e Aracajú/SE. A cidade de Belém/PA foi a única que apresentou um resultado ruim, mas também apresentou uma baixa porcentagem de dados úteis, o que interfere na análise e conclusão sobre a efetividade da equação de Angström-Prescott nessa cidade e neste clima (Af).

## 5.1 Trabalhos futuros

Como sugestão de trabalhos futuros, pode-se considerar a análise de mais cidades pertencentes aos climas brasileiros, de modo a obter uma melhor conclusão na relação entre os tipos climáticos e os coeficientes da equação de Angström-Prescott. Isso deve ser realizado principalmente no clima Af, que foi representado no atual trabalho pela cidade de Belém/PA que, como visto, obteve um desempenho ruim e inconclusivo, provavelmente devido a pouca porcentagem de dados úteis.

# Referências

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Fao irrigation and drainage paper no. 56. crop evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). *Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome*, v. 300, 1998.
- ALMOROX, J.; BENITO, M.; HONTORIA, C. Estimation of monthly angström–prescott equation coefficients from measured daily data in toledo, spain. *Renewable Energy*, Elsevier, v. 30, n. 6, p. 931–936, 2005.
- ALVES, E. D. L.; VECCHIA, F. A. S. Análise de diferentes métodos de interpolação para a precipitação pluvial no estado de goiás. *Acta Scientiarum. Human and Social Sciences*, Universidade Estadual de Maringá, v. 33, n. 2, p. 193–197, 2011.
- ANGSTROM, A. Solar and terrestrial radiation. report to the international commission for solar research on actinometric investigations of solar and atmospheric radiation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Wiley Online Library, v. 50, n. 210, p. 121–126, 1924.
- BASTOS, T. X.; PACHECO, N. A.; NECHET, D.; SÁ, T. d. A. Aspectos climáticos de belém nos últimos cem anos. *Embrapa Amazônia Oriental-Dокументos (INFOTECA-E)*, Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2002., 2002.
- BEXAIRA, K. P.; STRECK, N. A.; CERA, J. C.; PRESTES, S. D. Coeficientes de angströn–prescott para estimar a radiação solar no rio grande do sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*, SciELO Brasil, v. 33, n. 3, p. 401–411, 2018.
- BORGES, V. P.; OLIVEIRA, A. S. d.; FILHO, M. A. C.; SILVA, T. S. da; PAMPONET, B. M. Avaliação de modelos de estimativa da radiação solar incidente em cruz das almas, bahia. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, SciELO Brasil, v. 14, n. 1, p. 74–80, 2010.
- BRISSE, H.; GRANDJOUAN, R.; RUFFRAY, P. D. Les types de climats annuels, un mode d'expression des gradients climatiques intégrant les variations interannuelles. *La Météorologie*, v. 31, p. 39–81, 1982.
- CAMARGO, A. d.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de são paulo, brasil. *Revista Brasileira de agrometeorologia*, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89–97, 1997.
- CARVALHO, D. F. de; SILVA, D. G. da; SOUZA, A. P. de; GOMES, D. P.; ROCHA, H. S. da. Coeficientes da equação de Angström-Prescott e sua influência na evapotranspiração de referência em Seropédica, RJ. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, scielo, v. 15, p. 838 – 844, 08 2011. ISSN 1415-4366. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1415-43662011000800011&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662011000800011&nrm=iso)>.
- CASTRO, J. *Com 5 novos municípios Brasil agora tem 5570 cidades*. 2013. Disponível em: <<https://oglobo.globo.com/brasil/com-5-novos-municípios-brasil-agora-tem-5570-cidades-7235803>>. Acesso em 16 mar. 2020.

- CLIMATE-DATA. *Clima Barbacena*. S/d. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/minas-gerais/barbacena-2894/>>. Acesso em mai. 2020. A.
- CLIMATE-DATA. *Clima Curitiba*. S/d. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/parana/curitiba-2010/>>. Acesso em mai. 2020. B.
- CLIMATE-DATA. *Clima Parnaíba*. S/d. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/piaui/parnaiba-33872/>>. Acesso em mai. 2020. C.
- CLIMATE-DATA. *Clima Seropédica*. S/d. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/rio-de-janeiro/seropedica-15882/>>. Acesso em mai. 2020. D.
- COOPER, P. The absorption of radiation in solar stills. *Solar energy*, Elsevier, v. 12, n. 3, p. 333–346, 1969.
- DORNELAS, K. D.; SILVA, C. L. d.; OLIVEIRA, C. A. d. S. et al. Coeficientes médios da equação de angström-prescott, radiação solar e evapotranspiração de referência em brasília. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, SciELO Brasil, v. 41, n. 8, p. 1213–1219, 2006.
- DUBREUIL, V.; FANTE, K. P.; PLANCHON, O.; NETO, J. L. S. Les types de climats annuels au brésil: une application de la classification de köppen de 1961 à 2015. *EchoGéo*, Pôle de recherche pour l'organisation et la diffusion de l'information . . . , n. 41, 2017.
- GALINA, M. H.; VERONA, J. A. Fontes de observações meteorológicas no Estado de São Paulo. *Estudos Geográficos: Revista Eletrônica de Geografia*, v. 2, n. 1, p. 107–118, 2004.
- GÓMEZ, J. R.; CARLESSO, F.; VIEIRA, L.; SILVA, L. D. A irradiância solar: conceitos básicos. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, scielo, v. 40, 00 2018. ISSN 1806-1117. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1806-11172018000300412&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172018000300412&nrm=iso)>.
- HALLAK, R.; FILHO, A. J. P. Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de São Paulo com o modelo ARPS: sensibilidade a variações com os esquemas de advecção e assimilação de dados. *Revista Brasileira de Meteorologia*, SciELO Brasil, v. 26, n. 4, p. 591–608, 2011.
- IBGE. *Mapa de clima do Brasil*. 2002. Disponível em: <[https://atlassescolar.ibge.gov.br/images/atlas/mapas\\_brasil/brasil\\_clima.pdf](https://atlassescolar.ibge.gov.br/images/atlas/mapas_brasil/brasil_clima.pdf)>. Acesso em abr. 2016.
- INMET. *Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa*. 2017. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em 26 fev. 2020. A.
- INMET. *Estações Convencionais*. 2017. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesConvencionais>>. Acesso em 6 mar. 2020. B.
- INMET. *Instrumentos Meteorológicos*. 2017. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=instrumentos>>. Acesso em 26 fev. 2020. C.
- INMET. *Normais Climatológicas do Brasil 1981-2010*. 2017. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>>. Acesso em 20 fev. 2020. D.

- JÚNIOR, A. S. de A.; NOLETO, D. H.; SILVA, M. E. da; BRAGA, D. L.; BASTOS, E. A. Coeficientes da equação de Angström-Prescott para Parnaíba, Piauí. *Embrapa Meio-Norte-Artigo em periódico indexado (ALICE)*, Comunicata Scientiae, v. 3, n. 1, p. 50-54, 2012., 2012.
- KÖPPEN, W.; GEIGER, R. Klimate der erde. gotha: Verlag justus perthes. *Wall-map 150cmx200cm*, 1928.
- LAUDON, K. C. et al. *Management information systems: Managing the digital firm*. [S.I.]: Pearson Education India, 2007.
- LEITÃO, M. d. M.; OLIVEIRA, G. M. d.; LEITÃO, T. J. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evaporação para duas regiões da paraíba. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, SciELO Brasil, v. 11, n. 6, p. 585–593, 2007.
- LENA, B. P.; JADOSKI, S. O.; JADOSKI, C. J.; RIGO, J. F. Coeficientes da equação de Angström-Prescott para a região de Guarapuava-PR. *Acta Iguaçu*, v. 9, n. 1, p. 123–136, 2020.
- LIU, X.; MEI, X.; LI, Y.; ZHANG, Y.; WANG, Q.; JENSEN, J. R.; PORTER, J. R. Calibration of the Ångström–prescott coefficients (a, b) under different time scales and their impacts in estimating global solar radiation in the yellow river basin. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 149, n. 3, p. 697 – 710, 2009. ISSN 0168-1923. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192308003031>>.
- MARTINS, M. E. G. Coeficiente de correlação amostral. *Revista de Ciência Elementar*, v. 2, n. 2, p. 34–36, 2014.
- MEDEIROS, F. J. d.; SILVA, C. M.; BEZERRA, B. G. Calibration of ångström–prescott equation to estimate daily solar radiation on rio grande do norte state, brazil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, SciELO Brasil, v. 32, n. 3, p. 409–416, 2017.
- MONTEIRO, C. d. F. Clima. *Geografia do Brasil: Grande Região Sul*. Rio de Janeiro: IBGE, v. 4, p. 114–166, 1968.
- PEREIRA, E.; MARTINS, F.; GONÇALVES, A.; COSTA, R.; LIMA, F.; RÜTHER, R.; ABREU, S.; TIEPOLO, G.; PEREIRA, S.; SOUZA, J. 2<sup>a</sup> edição atlas brasileiro de energia solar, inpe, são josé dos campos, brazil. 2017.
- PILAU, F. G. *Energia Solar*. 2014. Disponível em: <[http://www.leb.esalq.usp.br/leb/aulas/leb495/Aula\\_2.pdf](http://www.leb.esalq.usp.br/leb/aulas/leb495/Aula_2.pdf)>. Acesso em 24 mar. 2020.
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. *Rio de Janeiro*, v. 1, p. 47–499, 2014.
- PRESOTT, J. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. *Trans. Roy. Soc. S. Aust.*, v. 46, p. 114–118, 1940.
- ROLIM, G. d. S.; CAMARGO, M. B. P. d.; LANIA, D. G.; MORAES, J. F. L. d. Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o estado de São Paulo. *Bragantia*, scielo, v. 66, p. 711 – 720, 00 2007. ISSN 0006-8705. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0006-87052007000400022&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0006-87052007000400022&nrm=iso)>.

- SILVA, A. D. Coeficientes de angström-prescott e sua influência na radiação solar e eto no perímetro irrigado de bebedouro em petrolina/angstrom-prescott coefficients and its influence on solar radiation and eto in the bebedouroirrigation perimeter, petrolina-pe. *Revista Brasileira de Engenharia de Biossistemas*, v. 8, n. 4, p. 333–342, 2014.
- SOUZA, J. D. d.; SILVA, B. B. d.; CEBALLOS, J. C. Estimativa da radiação solar global à superfície usando um modelo estocástico: caso sem nuvens. *Revista Brasileira de Geofísica*, scielo, v. 26, p. 31 – 44, 03 2008. ISSN 0102-261X. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-261X2008000100003&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-261X2008000100003&nrm=iso)>.
- SOUZA, M.; TONOLO, E.; YANG, R. L.; TIEPOLO, G. M.; JR, J. U. Determinação da irradiação difusa a partir da irradiação global horizontal—estudo para a cidade de curitiba. *Smart Energy*, v. 5, p. 184–190, 2018.
- SRIVASTAVA, R.; PANDEY, H. Estimating angstrom-prescott coefficients for india and developing a correlation between sunshine hours and global solar radiation for india. *ISRN Renewable Energy*, Hindawi Publishing Corporation, v. 2013, 2013.
- STONE, R. Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models. *Solar energy*, Elsevier, v. 51, n. 4, p. 289–291, 1993.
- TOĞRUL, I. T.; TOĞRUL, H.; EVİN, D. Estimation of global solar radiation under clear sky radiation in Turkey. *Renewable Energy*, Elsevier, v. 21, n. 2, p. 271–287, 2000.
- TONINI, A. M.; COUTO, B. Ensinando geometria analítica com uso do matlab. *Departamento de Ciências Exatas e Tecnologia do Centro Universitário de Belo Horizonte/DECET-UniBH*, 2018.
- VOROBIEFF, C. L. *Concentradores solares planos*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Viçosa, 2008.
- WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Wiley Online Library, v. 90, n. C5, p. 8995–9005, 1985.