

Camila Carvalho Ferreira

**DESENVOLVIMENTO DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA  
A DETERMINAÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE LUZ  
NATURAL NO CREPÚSCULO PARA A CIDADE DE BELO  
HORIZONTE**

Belo Horizonte

Escola de Arquitetura da UFMG

2010

Camila Carvalho Ferreira

# **DESENVOLVIMENTO DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA A DETERMINAÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE LUZ NATURAL NO CREPÚSCULO PARA A CIDADE DE BELO HORIZONTE**

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável da Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável  
Área de concentração: Bens Culturais, Tecnologia e Território

Orientadora: Profa. Roberta Vieira Gonçalves de Souza  
Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte

Escola de Arquitetura da UFMG

2010

# FOLHA DE APROVAÇÃO

## **AGRADECIMENTOS**

A minha orientadora, Prof<sup>a</sup> Roberta Vieira Gonçalves de Souza, por ter me dado uma nova paixão, pelas oportunidades, pelo acompanhamento nas novas descobertas e por toda confiança.

A Prof<sup>a</sup> Eleonora Sad de Assis, pelos ensinamentos transmitidos ao longo destes anos e às boas oportunidades.

A CEMIG, instituição financiadora do projeto de pesquisa a que este trabalho está vinculado, através do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento CEMIG/ANEEL P&D 128 intitulado de “Estudo da Disponibilidade de Luz Natural em Belo Horizonte como Base para Programação da Iluminação Pública Artificial Noturna”, em especial a Mara Amorim e Sérgio Blaso.

A equipe do GREEN Solar da PUC Minas, pelo apoio e auxílio em vários momentos.

A Prof. Ilka Afonso Reis do Departamento de Estatística da UFMG por todo auxílio e colaboração no processo de tratamento de dados.

Aos bolsistas de iniciação científica Cláudia Guidi, Renata Oliveira e Jeferson Silveira Martins pela atividades realizadas e pelo acompanhamento durante o trabalho.

Aos colegas do Labcon, pelo convívio sempre agradável e pelos bons momentos no dia a dia.

Aos amigos pelos constantes apoio e ajuda. À Daniele e Rejane, pelas boas experiências compartilhadas. À Iraci, por estar sempre disponível para auxiliar e pelos bons conselhos. À Kátia, pela companhia pela longa caminhada e por compartilharmos cada momento. À Jussara e a Simone, pelo companheirismo. A todas obrigada pela amizade.

Ao meu avô, Prof. Omar Campos Ferreira, pelo seu exemplo sempre inspirador e motivador.

À minha família, pelo carinho, apoio a toda prova e colaboração constante e ao Henrique, por todo carinho e paciência.

## RESUMO

Este trabalho apresenta uma abordagem para a determinação da disponibilidade de luz natural da abóbada celeste durante o período do crepúsculo para a cidade de Belo Horizonte, por meio de modelos de regressão múltipla, como ferramenta auxiliar à estimativa das horas de faturamento da iluminação pública artificial noturna por concessionárias de energia elétrica. Para a determinação da disponibilidade de luz natural, através do levantamento do período mensal de iluminâncias de céu, foram consideradas as variáveis meteorológicas locais e a geometria solar. Os dados referentes às variáveis meteorológicas foram coletados pela Estação de Medição de Luz Natural (EMIN-BH) e pela estação PUC/CEMIG. Nessa última, foram coletados dados de iluminância no intervalo de um minuto para o intervalo de agosto de 2007 a novembro de 2008 para o período crepuscular. Foram também medidos dados de iluminância e irradiância global, difusa e vertical norte, sul, leste e oeste. Adicionalmente foram realizados registros fotográficos do céu para averiguar as diferentes coberturas de céu. Os dados de iluminância global para o período crepuscular foram coletados, organizados e tratados de forma a se extrair do conjunto os dados espúrios. A partir dos dados tratados, são apresentados modelos para cada condição de céu desenvolvidos no *software* Excel® através de regressões múltiplas, que consideram as variáveis independentes a altura solar, conteúdo de vapor de água e índice de brilho e como variável dependente iluminância global. Os modelos que obtiveram melhor desempenho foram os modelos polinomiais de 5º grau para a iluminância global em função da altura solar. A análise de duração da noite em função dos modelos e tipos de céu foi feita a partir da aplicação dos modelos desenvolvidos aos respectivos tipos de céu característicos para cada mês ao longo do ano. A duração da noite predita encontrada foi, então, confrontada com a duração da noite medida e apresentou resultados bastante satisfatórios, uma vez que foi constatada aproximação significativa, dentro da faixa de incerteza das medições. A duração da noite média medida foi de 11 horas e 30 minutos enquanto a duração da noite média predita foi de 11 horas e 29 minutos. Assim, concluiu-se a adequação dos modelos desenvolvidos para a determinação da disponibilidade de luz natural na cidade de Belo Horizonte

para a definição dos períodos necessários de iluminação pública artificial noturna ao longo do ano.

Palavras-chave: disponibilidade de luz natural, medições de iluminância, crepúsculo, duração da noite.

## ABSTRACT

This study presents an approach to the determination of the availability of daylight in the twilight to the city of Belo Horizonte, by means of the creation of multiple regression models as a support in the computation of invoicing hours of artificial lighting for power utility. To determine the availability of daylight, through the measurement of the monthly illuminance of the sky, the local climatic variables and solar geometry were considered. The data relating to climatic variables was collected by the Measuring Station Natural Light of Belo Horizonte (EMIN-BH) and by the meteorological station of PUC / CEMIG. Illuminance data was collected within one minute intervals during the period of August 2007 to November 2008 for the twilight. Global and diffuse irradiance and vertical north, south, east and west illuminances and irradiances were also measured. Additionally, photographic records of the sky were made to verify the different sky coverages. The data from global illuminance for the twilight was collected, organized and processed to extract the set of spurious data. From the data processed, models are developed for each condition of sky in Excel<sup>®</sup> software through multiple regression, considering as the independent variable the solar altitude, the total precipitable water and brightness, and the dependent variable was the global illuminance. The models that performed better were the polynomial models of 5th degree of global illuminance on solar altitude. Analysis of the duration of the night depending on the model and sky types was made from the application of models developed for each type of typical sky for each month throughout the year. The predicted night duration was found and then faced with the measured night duration, showing satisfactory results. The average measured night duration was of 11 hours and 30 minutes while the average predicted night duration was of 11 hours and 29 minutes. In conclusion, the developed models for determining the availability of daylight in Belo Horizonte denote good adequacy for the definition of time needed for the estimation of artificial public lighting use throughout the year.

Keywords: availability of natural light, illuminance measurements, twilight, duration of the night.



## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 1</b> Distribuição dos pontos de iluminação pública no Brasil por região.....	27
<b>FIGURA 2</b> Mapa da localização das estações de medição de iluminação natural e radiação solar da IDMP.....	31
<b>FIGURA 3</b> Latitude ( $\phi$ ) e longitude ( $\lambda$ ) de um determinado local.....	33
<b>FIGURA 4</b> Latitudes do globo terrestre: (A) Divisão da Terra em paralelos; (B) Latitude do um determinado local.....	33
<b>FIGURA 5</b> Divisão da Terra em meridianos.....	34
<b>FIGURA 6</b> Desenho esquemático apresentando o ângulo de declinação Solar ( $\delta$ ).....	35
<b>FIGURA 7</b> Ângulo zenital ( $\theta_z$ ) e altura Solar ( $\alpha_s$ ).....	37
<b>FIGURA 8</b> Valores da Equação da Hora.....	39
<b>FIGURA 9</b> Crepúsculos Solares, de acordo com o ângulo zenital: Civil, Náutico, Astronômico..	43
<b>FIGURA 10</b> Tipos de céus homogêneos proposto pela CIE: céu encoberto, céu encoberto intermediário, céu médio intermediário, céu claro intermediário e céu claro.....	50
<b>FIGURA 11</b> Imagens dos tipos de céu: (A) Imagem de céu claro; (B) Imagem de céu parcialmente encoberto; (C) Imagem de céu encoberto.....	51
<b>FIGURA 12</b> Distribuição de luminâncias para céu claro.....	51
<b>FIGURA 13</b> Distribuição de luminâncias para céu encoberto.....	52
<b>FIGURA 14</b> Curva Teórica de Iluminância para Belo Horizonte.....	57
<b>FIGURA 15</b> Representação esquemática do <i>boxplot</i> (vertical).....	61
<b>FIGURA 15</b> Fluxograma esquemático da metodologia adotada.....	65
<b>FIGURA 16</b> Localização de Belo Horizonte no Brasil.....	67
<b>FIGURA 17</b> Mapa das cidades de Belo Horizonte por regionais.....	67
<b>FIGURA 18</b> Entorno da EMIN-BH em um raio de 800m.....	67
<b>FIGURA 19</b> Entorno imediato da EMIN-BH.....	67
<b>FIGURA 21</b> Estação fixa EMIN-BH. Em (A) torre com os sensores de temperatura, umidade relativa, velocidade e direção do vento, radiação solar global e três plataformas com os sensores de iluminância norte, sul, leste e oeste; em (B) os sensores de radiação solar e iluminância difusas e ao fundo o pireliômetro com rastreador Eppley; em (C) o imageador de céu.....	71
<b>FIGURA 22</b> Imageamento de céu de diferentes coberturas de céu: (A) fotografia de céu sob condição de céu claro e (B) fotografia de céu sob condição de céu encoberto.....	71
<b>FIGURA 23</b> Foto do pôr-do-Sol tirada com câmera digital acoplada à lente olho-de-peixe.....	72
<b>FIGURA 24</b> Vista do entorno da estação a leste.....	73

<b>FIGURA 25</b> Vista do entorno da estação a oeste.....	73
<b>FIGURA 26</b> Vista do entorno da estação a norte.....	73
<b>FIGURA 27</b> Vista do entorno da estação a sul.....	73
<b>FIGURA 28</b> Projeção de obstrução em uma hemisfera unitária e projeção de obstrução no entorno da estação.....	73
<b>FIGURA 29</b> Classificação dos tipos de céu conforme a ABNT: (A) céu claro; (B) céu parcialmente encoberto; (C) céu encoberto, no crepúsculo.....	74
<b>FIGURA 39</b> Fluxograma da metodologia adotada para desenvolvimento dos modelos de regressão.....	77
<b>FIGURA 40</b> Fotos do imageador de céu claro nos horários de ocorrência dos níveis de iluminância de 3 lux no dia 01/10/2007: (A) pela parte da manhã às 05:28 hs; (B) pela parte da tarde às 18:31 hs.....	79
<b>FIGURA 32</b> Box-plot para os dados para todos os tipos de céu. Em (A) para a variável de altura solar e em (B) para a variável de iluminância global.....	83
<b>FIGURA 32</b> Box-plot para os dados em condições de céu claro. Em (A) para a variável de altura solar e em (B) para a variável de iluminância global.....	84
<b>FIGURA 33</b> Box-plot para os dados em condições de céu parcialmente encoberto. Em (A) para a variável de altura solar e em (B) para a variável de iluminância global.....	84
<b>FIGURA 35</b> Box-plot para os dados em condições de céu encoberto. Em (A) para a variável de altura solar e em (B) para a variável de iluminância global.....	85
<b>FIGURA 35</b> Gráficos de dispersão para todas as condições de céu.....	86
<b>FIGURA 36</b> Gráfico de dispersão para dados na condição de céu claro.....	86
<b>FIGURA 37</b> Gráfico de dispersão para dados na condição de céu parcialmente encoberto.....	87
<b>FIGURA 38</b> Gráfico de dispersão para dados na condição de céu encoberto.....	87
<b>FIGURA 41</b> Gráfico de dispersão para todas as condições de céu: (A) modelo exponencial; (B) modelo polinomial de 5º grau.....	90
<b>FIGURA 42</b> Gráfico de dispersão para a condição de céu claro: (A) modelo exponencial; (B) modelo polinomial de 5º grau.....	92
<b>FIGURA 43</b> Gráfico de dispersão para a condição de céu encoberto: (A) modelo exponencial; (B) modelo polinomial de 5º grau.....	94
<b>FIGURA 44</b> Gráfico de dispersão para a condição de céu parcialmente encoberto: (A) modelo exponencial; (B) modelo polinomial de 5º grau.....	96
<b>FIGURA 45</b> Gráficos de dispersão para condição de céu encoberto: (A) modelo polinomial único; (B) modelo polinomial em faixas de altura solar; (C) modelo final unificado das faixas.....	104
<b>FIGURA 46</b> Gráfico de dispersão com a nuvem de pontos gerada pelas equações das faixas para a condição de céu encoberto.....	107

<b>FIGURA 47</b> Gráficos de dispersão para condição de céu parcialmente encoberto: (A) modelo polinomial único; (B) modelo polinomial em faixas de altura solar; (C) modelo final unificado das faixas.....	110
<b>FIGURA 48</b> Gráfico de dispersão com a nuvem de pontos gerada pelas equações das faixas para a condição de céu parcialmente encoberto.....	112
<b>FIGURA 49</b> Gráfico representando as curvas de tendência dos modelos polinomiais para cada condição de céu e a curva teórica.....	114
<b>FIGURA 50</b> Gráfico de dispersão para modelo polinomial de $\alpha_s$ , $w$ e $\Delta$ para todas as condições de céu.....	116
<b>FIGURA 51</b> Gráfico de dispersão para modelo polinomial de $\alpha_s$ , $w$ e $\Delta$ para a condição de céu claro.....	118
<b>FIGURA 52</b> Gráfico de dispersão para modelo polinomial de $\alpha_s$ , $w$ e $\Delta$ para a condição de céu encoberto.....	120
<b>FIGURA 53</b> Gráfico de dispersão para modelo polinomial de $\alpha_s$ , $w$ e $\Delta$ para a condição de céu parcialmente encoberto.....	122
<b>FIGURA 54</b> Gráfico de dispersão para modelo polinomial de $\alpha_s$ e $\Delta$ para todas as condições de céu.....	125
<b>FIGURA 55</b> Gráfico de dispersão para modelo polinomial de $\alpha_s$ e $\Delta$ para a condição de céu claro.....	126
<b>FIGURA 56</b> Gráfico de dispersão para modelo polinomial de $\alpha_s$ e $\Delta$ para a condição de céu encoberto.....	127
<b>FIGURA 57</b> Gráfico de dispersão para modelo polinomial de $\alpha_s$ e $\Delta$ para a condição de céu parcialmente encoberto.....	128
<b>FIGURA 58</b> Gráfico representativo da duração da noite média medida (horas), teórica e do modelo para a cidade de Belo Horizonte.....	136
<b>FIGURA 59</b> Fotocélula Li-Cor LI-210SZ.....	163
<b>FIGURA 60</b> Base para sensor de iluminação difusa: sensor com o anel de sombreamento....	166
<b>FIGURA 61</b> Cruzeta em acrílico para fixação dos sensores de iluminâncias verticais (norte, sul, leste e oeste).....	166
<b>FIGURA 62</b> Base para o sensor de medição da iluminância global e a cruzeta.....	167
<b>FIGURA 63</b> Datalogger utilizado para leitura e armazenamento dos dados.....	168

## LISTA DE TABELAS

<b>TABELA 1</b> Valores de nível de iluminação para acionamento dos relés fotoelétricos da iluminação pública (NBR 5123/97).....	28
<b>TABELA 2</b> Limite de dias Julianos para cada mês do ano.....	34
<b>TABELA 3</b> Variação da iluminância de acordo com a altura solar.....	42
<b>TABELA 4</b> Classificação simplificada de condições de céus para Belo Horizonte.....	47
<b>TABELA 5</b> Valores médios aproximados de conteúdo de vapor de água por tipos climáticos...	53
<b>TABELA 6</b> Coeficientes para Cálculo da Iluminância da Luz Solar.....	55
<b>TABELA 7</b> Equações para cálculo da Iluminância (E) para diferentes valores de Altura Solar...	57
<b>TABELA 8</b> Análise descritiva dos dados para todo o conjunto de dados.....	79
<b>TABELA 8</b> Análise descritiva dos dados para céu claro.....	80
<b>TABELA 9</b> Análise descritiva dos dados de céu parcialmente encoberto.....	80
<b>TABELA 10</b> Análise descritiva dos dados de céu encoberto.....	81
<b>TABELA 11</b> Valores utilizados para gerar os gráficos de <i>boxplot</i> .....	81
<b>TABELA 12</b> Resumo das equações e $r^2$ para os modelos exponencial e polinomial de acordo com o tipo de céu.....	97
<b>TABELA 13</b> Tabela ANOVA para modelo exponencial único para todos tipos de céu.....	98
<b>TABELA 14</b> Tabela ANOVA para modelo polinomial único para todos tipos de céu.....	98
<b>TABELA 15</b> Tabela ANOVA para modelo exponencial para céu claro.....	98
<b>TABELA 16</b> Tabela ANOVA para modelo polinomial para céu claro.....	98
<b>TABELA 17</b> Tabela ANOVA para modelo exponencial para céu encoberto.....	99
<b>TABELA 18</b> Tabela ANOVA para modelo polinomial para céu encoberto.....	99
<b>TABELA 19</b> Tabela ANOVA para modelo exponencial para céu parcialmente encoberto.....	99
<b>TABELA 20</b> Tabela ANOVA para modelo polinomial para céu parcialmente encoberto.....	99
<b>TABELA 21</b> Equações das faixas de dados de céu encoberto.....	104
<b>TABELA 22</b> Derivadas das equações do modelo por faixas para céu encoberto.....	104
<b>TABELA 23</b> Equações das faixas de dados de céu encoberto após derivada.....	105
<b>TABELA 24</b> Equação final para o modelo para a condição de céu encoberto e seu respectivo $r^2$ .....	107
<b>TABELA 25</b> Tabela ANOVA para modelo polinomial unificado para céu encoberto.....	107
<b>TABELA 26</b> Equações das faixas de dados de céu parcialmente encoberto.....	110
<b>TABELA 27</b> Derivadas das equações do modelo por faixas para céu parcialmente encoberto.....	110

<b>TABELA 28</b> Equação final para o modelo para a condição de céu parcialmente encoberto e seu respectivo $r^2$ .....	112
<b>TABELA 29</b> Tabela ANOVA para modelo polinomial unificado para céu parcialmente encoberto.....	112
<b>TABELA 30</b> Resumo dos modelos polinomiais gerados para cada uma das condições de céu.....	112
<b>TABELA 31</b> Equação para o modelo com $\alpha_s$ , $w$ e $\Delta$ para todas as condições de céu e seu respectivo $r^2$ .....	116
<b>TABELA 32</b> Tabela ANOVA para o modelo com $\alpha_s$ , $w$ e $\Delta$ para todas as condições de céu.....	116
<b>TABELA 33</b> Equação para o modelo com $\alpha_s$ , $w$ e $\Delta$ para a condição de céu claro e seu respectivo $r^2$ .....	118
<b>TABELA 34</b> Tabela ANOVA para o modelo com $\alpha_s$ , $w$ e $\Delta$ para a condição de céu claro.....	118
<b>TABELA 35</b> Equação para o modelo com $\alpha_s$ , $w$ e $\Delta$ para a condição de céu encoberto e seu respectivo $r^2$ .....	120
<b>TABELA 36</b> Tabela ANOVA para o modelo com $\alpha_s$ , $w$ e $\Delta$ para a condição de céu encoberto.....	120
<b>TABELA 37</b> Equação para o modelo com $\alpha_s$ , $w$ e $\Delta$ para a condição de céu encoberto e seu respectivo $r^2$ .....	122
<b>TABELA 38</b> Tabela ANOVA para o modelo com $\alpha_s$ , $w$ e $\Delta$ para a condição de céu encoberto.....	122
<b>TABELA 39</b> Equações para o modelo com $\alpha_s$ e $\Delta$ para todas as condições de céu e seus respectivos $r^2$ .....	128
<b>TABELA 40</b> Tabela ANOVA para o modelo com $\alpha_s$ e $\Delta$ para todas as condições de céu.....	128
<b>TABELA 41</b> Tabela ANOVA para o modelo com $\alpha_s$ e $\Delta$ para a condição de céu claro.....	129
<b>TABELA 42</b> Tabela ANOVA para o modelo com $\alpha_s$ e $\Delta$ para a condição de céu encoberto.....	129
<b>TABELA 43</b> Tabela ANOVA para o modelo com $\alpha_s$ e $\Delta$ para a condição de céu parcialmente encoberto.....	129
<b>TABELA 44</b> Resumo dos modelos de regressão desenvolvidos com suas respectivas estatísticas de desempenho.....	130
<b>TABELA 45</b> Níveis de iluminância para acionamento dos relés fotoelétricos de acordo com a NBR 5123/97.....	132
<b>TABELA 46</b> Tipos de céu típicos para cada mês para a cidade de Belo horizonte e as respectivas equações.....	132
<b>TABELA 47</b> Duração da noite média mensal medida (horas), teórica e dos modelos para a cidade de Belo Horizonte no período de medições.....	134
<b>TABELA 48</b> Diferença entre os valores de duração da noite (horas) medida, teórica e do modelo para a cidade de Belo Horizonte.....	136

<b>TABELA 49</b> Céus típicos para as cidades de Minas Gerais avaliadas.....	136
<b>TABELA 50</b> Duração da noite pelos modelos desenvolvidos e pelo programa Hélios para cidades de Minas Gerais.....	138
<b>TABELA 51</b> Horários em que os valores limites de iluminância de 80 e 20 lux foram atingidos de acordo com o calculado pelos modelos e a respectiva duração da noite.....	147
<b>TABELA 52</b> Dados dos sensores utilizados na montagem da EMIN-BH (Informações extraídas dos certificados de garantia).....	164

## LISTA DE QUADROS

<b>QUADRO 1</b> Determinação do tipo de céu a partir do percentual de cobertura das nuvens ( $n/N$ ).....	47
---	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CIE	Commission Internationale d'Eclairage (Comissão Internacional de Iluminação)
GREEN	Grupo de Estudos em Energia
IDMP	International Daylight Measurement Programme (Programa Internacional de Medição de Luz Natural)
Labcon	Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética
LICAP	Laboratório de Inteligência Computacional Aplicada
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais



## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras Latinas

$A_s$	azimute solar (°)
$E$	iluminância (lm/m <sup>2</sup> , lux)
$E_t$	correção da hora (min)
$H$	altura acima do nível do mar (m)
$h_s$	hora solar verdadeira (minutos)
$I$	irradiância (W/m <sup>2</sup> )
$I_e$	irradiância extraterrestre (W/m <sup>2</sup> )
$J$	dia Juliano
$K_d$	eficácia luminosa
$n$	horas de insolação (h)
$N$	número máximo de horas de insolação
$N_d$	número de horas de luz natural (h)
$T$	temperatura média (°C)
$T_d$	temperatura de ponto de orvalho (°C)
$S$	brilho relativo de sol
$UR$	umidade relativa (%)
$X$	correção da latitude
$w$	conteúdo de vapor de água

## Letras gregas

$\alpha_s$	altura solar (°)
$\delta$	declinação (°)
$\varphi$	latitude (°)
$\lambda$	longitude (°)
$\theta_z$	ângulo zenital (°)
$\omega$	ângulo horário (°)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>22</b>
1.1.	Objetivo geral	23
1.2.	Objetivos específicos	24
1.3.	Escopo	24
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>26</b>
2.1.	Iluminação Pública	26
2.1.1.	<i>Normalização da iluminação pública</i>	27
2.1.2.	<i>Acionamento de relés para iluminação pública</i>	28
2.2.	Disponibilidade de Luz Natural	29
2.2.1.	<i>O Programa IDMP</i>	30
2.2.2.	<i>CIE (Comission Internationale de L'Eclairaige) 108/ 1994</i>	31
2.3.	Geometria Solar	32
2.3.1.	<i>Sistema de coordenadas</i>	32
2.3.1.1.	Correção da longitude	34
2.3.2.	<i>Trajétórias Aparentes do Sol</i>	35
2.3.3.	<i>Ângulos Solares</i>	36
2.3.3.1.	Hora angular ( $\omega$ )	36
2.3.3.2.	Ângulo zenital Solar ( $\theta_z$ ), altura Solar ( $\alpha_s$ )	36
2.3.4.	<i>Equação da hora, hora aparente local e hora solar verdadeira</i>	38
2.3.5.	<i>Duração astronômica do dia (<math>N_d</math>)</i>	40
2.4.	Análise da Luz Crepuscular	41
2.4.1.	<i>Alvorada e ocaso</i>	41
2.4.2.	<i>Condições de crepúsculo</i>	42
2.5.	Condições de Céu	44
2.5.1.	<i>Parâmetros climáticos e classificação de condições de céu</i>	45
2.5.1.1.	Brilho relativo de sol, $S$	45
2.5.1.2.	Coeficiente de radiação difusa, $K_d$	45
2.5.1.3.	Índice de claridade, $\epsilon'$ , e Índice de brilho, $\Delta$	46
2.5.1.4.	Caracterização dos tipos de céu mais frequentes em um determinado mês a partir de dados das Normais Climatológicas	47
2.5.2.	<i>Tipos de céu padronizados</i>	49

2.5.2.1.	Céu Claro .....	51
2.5.2.2.	Céu encoberto.....	52
2.5.2.3.	Céu Parcialmente Encoberto ou Intermediário .....	52
2.6.	Dispersão e Absorção Atmosférica .....	53
2.6.1.	<i>Absorção pelo vapor de água</i> .....	53
2.7.	Modelos de Iluminância Externa.....	55
2.7.1.	<i>Determinação Teórica da Iluminância Global</i> .....	55
2.7.2.	<i>O Software Helios</i> .....	58
2.7.3.	<i>O Modelo de Perez</i> .....	58
2.8.	Tratamento estatístico de dados .....	59
2.8.1.	<i>Análise descritiva dos dados</i> .....	59
2.8.2.	<i>O boxplot</i> .....	60
2.8.3.	<i>Indicadores de desempenho de modelos</i> .....	61
2.9.	Disposições finais .....	63
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>64</b>
3.1.	Coleta de dados: a Estação de Medição de Iluminação Natural de Belo Horizonte (EMIN-BH) 65	
3.1.1.	<i>Localização</i> .....	66
3.1.2.	<i>Grandezas Medidas</i> .....	68
3.1.3.	<i>Equipamentos</i> .....	70
3.1.4.	<i>Estudo da Obstrução do Entorno da EMIN-BH</i> .....	71
3.2.	Caracterização dos tipos de céu.....	74
3.3.	Organização dos dados medidos .....	75
3.4.	Tratamento estatístico aplicado aos dados medidos .....	75
3.4.1.	<i>Análise descritiva aplicada aos dados medidos</i> .....	75
3.4.2.	<i>Análise de desempenho aplicada aos modelos</i> .....	76
3.5.	Modelos de Iluminância versus Altura Solar para o nascer do Sol e ocaso .....	76
3.6.	Análise da duração da noite em função dos modelos por tipos de céu e cálculo do tempo de iluminação artificial .....	78
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>80</b>
4.1.	Apresentação do tratamento estatístico .....	80
4.2.	Apresentação dos Modelos de Regressão .....	88
4.2.1.	<i>Modelos de regressão de Iluminância Global (<math>E_g</math>) versus Altura Solar (<math>\alpha_s</math>)</i> .....	88
4.2.2.	<i>Ajuste dos Modelos polinomiais de Iluminância Global (<math>E_g</math>) versus Altura Solar (<math>\alpha_s</math>)</i>	101

4.2.3. Modelos polinomiais de Iluminância Global ( $E_g$ ) versus Altura Solar ( $\alpha_s$ ), Conteúdo de Vapor de Água ( $w$ ) e Índice de Brilho ( $\Delta$ ).....	115
4.2.4. Modelos polinomiais de Iluminância Global ( $E_g$ ) versus Altura Solar ( $\alpha_s$ ) e Índice de Brilho ( $\Delta$ ).....	123
4.3. Avaliação do Desempenho dos Modelos de Regressão.....	130
4.4. Análise da Duração da Noite em Função dos Modelos e Tipos de céu .....	133
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>140</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>143</b>
<b>APÊNDICE A – DURAÇÃO DA NOITE .....</b>	<b>148</b>
<b>ANEXO 1 EQUIPAMENTOS DA EMIN-BH.....</b>	<b>163</b>

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com o artigo 60 da Resolução ANEEL 456, de 29/11/2000, que substituiu a Portaria DNAEE 466, de 12/11/1997, e conforme a retificação publicada no Diário Oficial da União de 15/12/2000 seção 1, p. 142, v. 138, nº 241-E, a base de cálculo para encargo com iluminação pública em vigor é de 12 (doze) horas diárias (mais especificamente, 11h50min considerando o ano todo), determinadas com base na média anual de horas entre o pôr e o nascer do sol, ou seja, o período estimado desde o momento quando o sol desaparece no plano do horizonte até o momento em que ele desponta. Porém, mesmo o sol estando abaixo da linha do horizonte, há ainda luz. Esta luz, denominada *luz crepuscular*, em certas ocasiões, é suficiente para não acionar os relés fotoelétricos que acedem (no ocaso) e apagam (na alvorada) as luminárias dos logradouros públicos, interferindo potencialmente no consumo de energia.

Em decorrência da existência da luz crepuscular, o valor do faturamento de energia elétrica destinada à iluminação pública vem sendo questionado por algumas Prefeituras Municipais junto às Concessionárias de Energia, entre elas a Companhia de Energética de Minas Gerais (CEMIG), alegando estar havendo uma quantidade de horas faturadas anualmente superior ao número de horas efetivas de utilização de energia elétrica para a iluminação pública noturna.

No entanto, atualmente, grande parte dos estudos concernentes à disponibilidade de luz natural abordam o fenômeno durante o período em que o sol encontra-se acima da linha do horizonte, ou seja, ao longo do dia quando ocorrem altos níveis de iluminância. Mesmo os esforços no sentido de quantificar de forma adequada a disponibilidade de luz natural ao longo do dia são recentes. O projeto IDMP (*International Daylight Measurement Programme*) para medição de iluminação natural foi lançado apenas em 1991 na Europa. No Brasil, a partir de dezembro de 2001 tiveram início medições sistemáticas de dados de iluminação natural através da Estação de Medição de Iluminação Natural de Florianópolis. Atualmente existem apenas duas estações em todo o Brasil, estando a primeira estação localizada em Florianópolis (SC) e a segunda em Belo Horizonte (MG), estando a última desativada

desde de dezembro de 2008. Entretanto, para baixos níveis de iluminância, os estudos são ainda incipientes em todo o mundo. Tornou-se então imperativo o levantamento do período mensal das iluminâncias de céu no período crepuscular.

Em decorrência do questionamento das Prefeituras Municipais frente às Concessionárias de Energia e buscando suprir esta deficiência, deu-se origem ao Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento CEMIG/ANEEL P&D 128 intitulado de “Estudo da Disponibilidade de Luz Natural em Belo Horizonte como Base para Programação da Iluminação Pública Artificial Noturna”, fruto de um convênio entre a CEMIG; a Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-Minas) através do Grupo de Estudos em Energia (GREEN SOLAR); e a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) através do Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética (Labcon).

O escopo do projeto aborda a determinação da disponibilidade de luz natural na cidade de Belo Horizonte para a definição dos períodos necessários de iluminação pública artificial noturna ao longo do ano, através do levantamento do período mensal das iluminâncias de céu, considerando a situação de céu desobstruído e a situação de céu obstruído por diferentes tipos de recinto urbano quanto ao adensamento e verticalização, uma vez que a obstrução de céu provocada pelo recinto urbano pode afetar a disponibilidade de luz natural no ocaso e na alvorada, que determinam os períodos de funcionamento da iluminação artificial noturna. Este é um projeto pioneiro no país e no mundo ao realizar o registro sistemático de dados de iluminância natural no período crepuscular, simultaneamente por uma estação de iluminação natural e em condições de ocupação urbana.

### **1.1. Objetivo geral**

O objetivo geral a que o presente trabalho se propõe é o de gerar modelos matemáticos capazes de quantificar a disponibilidade de iluminação natural para o período crepuscular para a cidade de Belo Horizonte.

## 1.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos foram:

- desenvolver e avaliar o melhor modelo matemático, seja exponencial ou polinomial, para definição da disponibilidade de luz natural no período crepuscular;
- verificar as diferenças de comportamento sob a influência de diferentes condições de céu;
- avaliar a aplicabilidade de modelos analíticos existentes na literatura;
- definir a duração da noite tendo como parâmetros os limites da NBR 5123 (ABNT, 1997), através do levantamento do período mensal das iluminâncias de céu;
- avaliar a possibilidade de expansão dos modelos para o estado de Minas Gerais.

## 1.3. Escopo

O desenvolvimento do trabalho foi norteado pela premissa de que é possível descrever a iluminação externa a partir de um modelo matemático, baseado em dados medidos.

A organização deste trabalho foi feita em cinco capítulos, além do item introdutório. No capítulo 2 apresenta-se a fundamentação teórica que embasou o desenvolvimento do trabalho relativo à disponibilidade da luz natural, geometria solar e condições da abóbada celeste.

No capítulo 3 apresenta-se a estação de medição, a EMIN-BH e a Estação Meteorológica PUC-Minas/CEMIG, assim como a rotina de coleta dos dados utilizados no presente trabalho. Em seguida é apresentada a metodologia adotada para o tratamento dos dados, desenvolvimento dos modelos matemáticos através de regressões múltiplas e o cálculo da duração da noite. Neste mesmo capítulo, faz-se ainda a apresentação dos modelos gerados, a validação e aplicação destes modelos



para a cidade de Belo Horizonte, além dos resultados derivados em relação ao cálculo da duração da noite.

No capítulo 4 são feitas as conclusões e recomendações para trabalhos futuros, identificando as limitações e a aplicabilidade dos resultados obtidos diante dos objetivos aqui pretendidos.

O capítulo 5 apresenta as referências utilizadas no decorrer do trabalho.

No Apêndice A apresenta-se o quadro com a duração da noite diária durante o período de um ano de medição. No Anexo 1 são apresentados os equipamentos que compõem a EMIN-BH.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Iluminação Pública

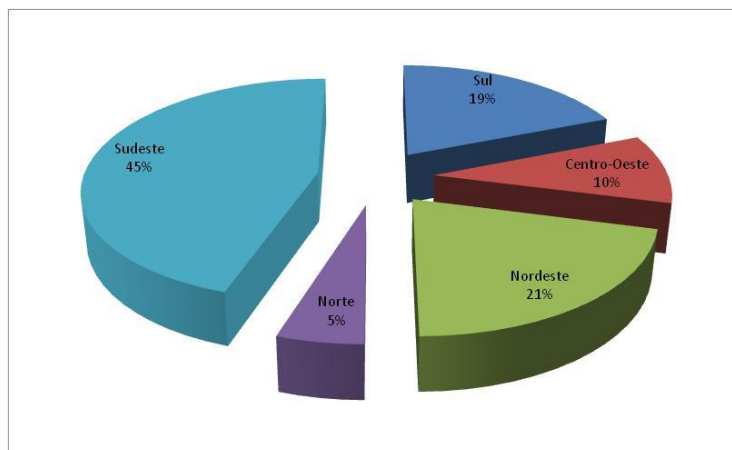
Um dos fenômenos mundiais que vem ganhando destaque é o forte crescimento da população urbana. Pela primeira vez na história, mais da metade da população mundial encontra-se vivendo em centros urbanos e estima-se que esta proporção será de  $\frac{3}{4}$  (três quartos) em um prazo de aproximadamente 30 (trinta) anos (ROGERS e GUMUCIDJIAN, 2001). Levando em consideração esse fato, a iluminação pública urbana passa a figurar como uma importante função na qualidade e sustentabilidade dos centros urbanos de todo o mundo (KIRSCHBAUM, 2006).

De acordo com a Resolução da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) nº 456, de 29 de novembro de 2000, é definido no Artigo 2 a iluminação pública como:

*Iluminação pública é o serviço que tem o objetivo de prover luz ou claridade artificial aos logradouros públicos no período noturno ou nos escurecimentos diurnos ocasionais, incluindo locais que demandem iluminação permanente no período diurno (ANEEL, 2000).*

Mais do que simplesmente prover luz, a iluminação pública está relacionada à qualidade de vida nos centros urbanos, à segurança pública no tráfego, à prevenção da criminalidade, à orientação dos percursos e ao aproveitamento das áreas de lazer (PROCEL, 2009).

Segundo o último levantamento cadastral efetivado pelo PROCEL (2009), realizado no ano de 2008 junto às distribuidoras de energia elétrica, atualmente existem 15 milhões de pontos de iluminação pública instalados no Brasil, distribuídos aproximadamente conforme a FIGURA 1 a seguir.



**FIGURA 1** Distribuição dos pontos de iluminação pública no Brasil por região.

Fonte: PROCEL, 2009

Como mostra a FIGURA 1, a região Sudeste representa quase metade (45%) dos pontos de iluminação pública (PROCEL, 2009). Desse total, Minas Gerais é responsável por cerca de 26,7% dos pontos de iluminação pública, o equivalente à aproximadamente 1,8 milhões de pontos, número que torna o estado representativo no que se refere à iluminação pública (BLASO, 2009).

Sob o aspecto do consumo de energia, a iluminação pública no Brasil corresponde a 3,4% do consumo total de energia elétrica do país (PROCEL, 2009).

### *2.1.1. Normalização da iluminação pública*

A iluminação pública possui a peculiaridade de ser um serviço público regulado de forma descentralizada. Sob o ponto de vista constitucional, a iluminação pública insere-se como prestação de serviço de interesse local, o qual é de competência dos municípios. Respectivamente, trata-se de um serviço vinculado ao fornecimento de energia elétrica, o que o torna também submetido à legislação federal (PROCEL, 2009). A ANEEL é atualmente o órgão regulador e fiscalizador dos serviços referentes à energia elétrica no Brasil, regulando este serviço através da Resolução nº 456, de 29 de novembro de 2000, na qual estabelece as Condições Gerais de Fornecimento de

Energia Elétrica. No artigo 60 desta Resolução, encontra-se definido que o período diário para a operação do sistema de iluminação pública artificial é de aproximadamente 12 horas (especificamente 11 horas e 50 minutos considerando o ano todo), conforme o texto a seguir:

*Art. 60 Para fins de faturamento de energia elétrica destinada à iluminação pública ou iluminação de vias internas de condomínios fechados, será de 360 (trezentos e sessenta) o número de horas a ser considerado como tempo de consumo mensal, ressalvado o caso de logradouros públicos que necessitem de iluminação permanente, em que o tempo será de 24 (vinte e quatro) horas por dia do período de fornecimento.*

*Parágrafo único: A concessionária deverá ajustar com o consumidor o número de horas mensais para fins de faturamento quando, por meio de estudos pelas partes, for constatado um número de horas diferente do estabelecido nesse artigo (ANEEL, 2000).*

Todavia, há luz antes do nascer e após o pôr do Sol. Essa luz, denominada luz crepuscular, em determinadas ocasiões, será suficiente para não acionar a iluminação pública artificial, interferindo potencialmente no consumo de energia.

Diante deste fato, concessionárias de energia vêm sendo questionadas por Prefeituras Municipais de todo o Brasil com respeito ao número de horas utilizadas para fins de faturamento da iluminação pública.

### *2.1.2. Acionamento de relés para iluminação pública*

De acordo com a NBR 5123 (ABNT, 1997) o relé fotoelétrico utilizado na iluminação pública artificial, deve ligar uma lâmpada entre os níveis de 3 lux a 20 lux ao anoitecer, medidos em plano tangente à superfície da tampa do relé, e desligá-la no máximo com 80 lux no mesmo plano ao amanhecer.

Pode-se então inferir os tempos mínimo e máximo de funcionamento de iluminação pública noturna, tomando como referência os níveis de iluminamento estabelecidos pela norma para o acionamento/desligamento da iluminação através dos relés, como mostra a TABELA 1 a seguir:

TABELA 53

Valores de nível de iluminamento para acionamento dos relés fotoelétricos da iluminação pública (NBR 5123/97)

	Amanhecer (lux)	Anoitecer (lux)
Caso 1 (tempo mínimo)	80	20
Caso 2 (tempo máximo)	80	3

## 2.2. Disponibilidade de Luz Natural

De toda a radiação recebida pela Terra, 40% correspondem à radiação visível. São os raios visíveis do espectro solar os responsáveis pela luminosidade natural que irradia sobre a superfície terrestre. A quantidade da energia visível do espectro solar irá variar com a profundidade e condições da atmosfera pela qual a luz atravessa, assim como com a época do ano, dia e hora, condição de céu, latitude e longitude (IESNA, 2000; BITTENCOURT, 2004).

O termo *disponibilidade de luz natural* refere-se à quantidade de luz proveniente do Sol e do céu para um local, hora, dia e condições de céu específicos. À parcela proveniente do Sol denomina-se luz direta e à parcela referente à abóbada celeste, luz difundida na atmosfera, dá-se o nome de luz difusa (IESNA, 2000; ABNT, 2005 B).

Os dados referentes à disponibilidade de luz natural não expressam valores instantâneos de iluminância e luminância, mas sim valores médios, podendo haver diferenças consideráveis entre os dados medidos instantâneos e seus valores médios. Assim sendo, é a partir dos dados médios é que são geradas as equações para determinar a iluminância e a luminância (IESNA, 2000).

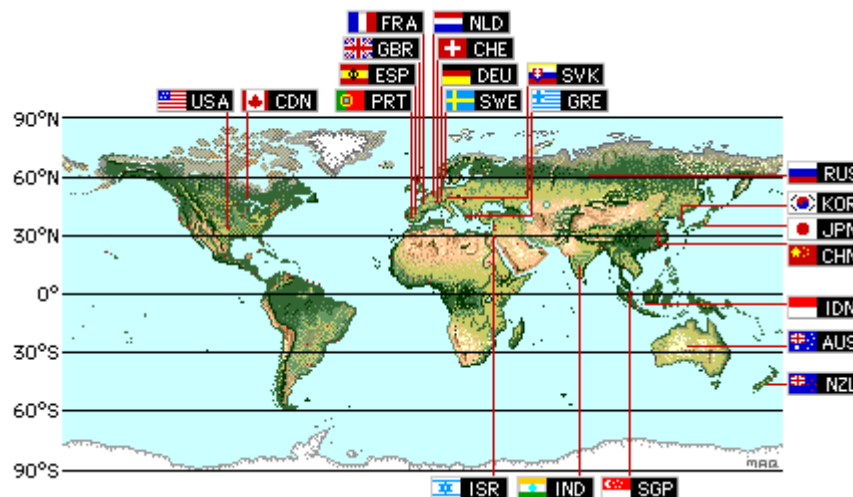
Os cálculos da disponibilidade de luz natural em um dado local têm início com a determinação da posição solar na abóbada celeste, que é função da latitude e da longitude local, do dia do ano e da hora local. Salienta-se que a hora local deve ser convertida em hora solar. A partir da geometria solar é então possível determinar a posição do sol no céu. Os cálculos da geometria solar devem ser realizados em radianos, mas as posições finais do sol devem ser expressas em graus.

### 2.2.1. O Programa IDMP

Até recentemente, eram escassas as informações referentes à disponibilidade de luz natural em todo o mundo. Buscando suprir essa deficiência, dados de irradiância solar eram convertidos em iluminância através de coeficientes pouco precisos (NE'EMAN, 1998). É ainda preciso considerar que os atuais programas de conversão de irradiância em iluminância foram desenvolvidos para alturas solares superiores a 4°, conforme as normas da *International Daylight Measurement Programme* (IDMP). Contudo, o período de luz crepuscular ocorre a faixas de alturas solares inferiores a 0°, ou seja, abaixo da linha do horizonte. Assim, a conversão de dados nesta faixa de altura solar poderá acarretar em erros e elevado grau de imprecisão.

Baseado na necessidade de criar um banco de dados de iluminação natural, lançou-se na Europa, vinculado à *Commission Internationale de L'Eclairage* (CIE), em 1991, o Projeto IDMP (*International Daylight Measurement Programme*). O IDMP teve como proposta a instalação de estações de medição de iluminação natural ao redor do mundo. Esse Programa conta com 48 estações de medição de dados de céu espalhadas por todo mundo. Instaladas em países como Alemanha, Grécia, Japão, China, Canadá, entre outros, estas estações operam coletando informações do céu local e, através da troca de dados existentes, geram uma base de pesquisa e estudos a respeito da disponibilidade de luz para diferentes condições climáticas (IDMP, 2008).

Dando prosseguimento a esse projeto, o ano de 1991 foi declarado como o Ano Internacional de Medição de Iluminação Natural, assinalado com o lançamento do primeiro documento relativo à regulação das práticas de medição de irradiação e iluminância por estações de medição de luz natural. No entanto, o texto final desse documento foi aprovado apenas três anos mais tarde, em 1994, sendo dessa versão a extração dos parâmetros para a montagem das estações de medição (IDMP, 2008).



**FIGURA 2** Mapa da localização das estações de medição de iluminação natural e radiação Solar da IDMP.

Fonte: <http://idmp.entpe.fr/index.html>

A atual responsabilidade de manter as informações relativas à rede IDMP é do Comitê Técnico 3.25 da CIE, que as disponibiliza na página eletrônica <http://idmp.entpe.fr> (IDMP, 2008).

### 2.2.2. CIE (Comission Internationale de L'Eclairaige) 108/ 1994

Para orientar e padronizar o funcionamento das estações da rede IDMP, foi lançado em 1991 o *Guide to Recommended Practice of Daylight Measurement* (Guia de Recomendações para a Prática de Medições de Iluminação Natural), CIE 108/ 1994. Nesse documento constam todas as exigências e recomendações necessárias à montagem, operação, manutenção e tratamento de dados de uma estação de medição (CIE STANDARD, 1994; IDMP, 2008).

O Guia estabelece duas categorias de estações: as de Classe Geral, nas quais medem-se iluminâncias e irradiâncias, e as de Classe de Pesquisa, nas quais mede-se também a distribuição de iluminâncias de céu, além das iluminâncias e irradiâncias (CIE STANDARD, 1994).

As estações IDMP, sejam elas de Classe Geral ou de Classe de Pesquisa, possuem pré-requisitos fundamentais. É necessário que os sensores de medição sejam alocados em um local que permita a estes uma ampla visão do céu, de modo que obstruções contínuas, como edificações e arborização, não obstruam mais do que 4,6 graus acima do horizonte, uma vez que uma obstrução de tal magnitude provoca uma redução de 10% da iluminância em superfícies verticais sob um céu isotrópico. Outra recomendação é a de que deve haver a obstrução da luz refletida pelo solo, assim como da luz proveniente abaixo do nível do horizonte do sensor. Ou seja, a luz proveniente de reflexões do entorno não serão medidas pelo sensor (CIE, 1994).

### **2.3. Geometria Solar**

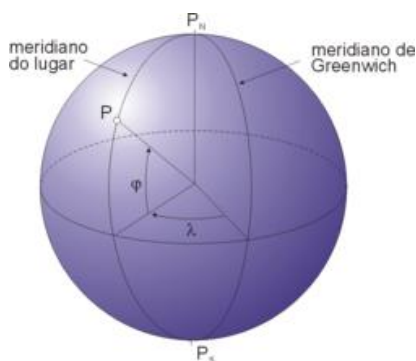
A incidência de irradiação solar depende fortemente da localização do sol na abóbada celeste.

A localização do sol na abóbada celeste de uma dada localidade pode ser determinada pela geometria solar, cujo objetivo é fornecer o sistema de coordenadas para a localização do sol, em uma determinada projeção geométrica.

#### *2.3.1. Sistema de coordenadas*

A posição de qualquer ponto na Terra pode ser referenciada em relação ao Equador e ao meridiano de Greenwich, constituindo o sistema de coordenada geográficas terrestre. As coordenadas geográficas baseiam-se em linhas imaginárias traçadas sobre o globo terrestre: os paralelos e meridianos. Os paralelos são linhas semicirculares, passando do Polo Norte ao Polo Sul e cruzando com os meridianos. Considerando de forma simplificada que a Terra é uma esfera perfeita, pode-se então dizer que todos os meridianos possuem tamanhos equivalentes. Assim, para se localizar um determinado ponto na superfície terrestre recorre-se a um sistema de coordenadas: a latitude ( $\phi$ ) e a longitude ( $\lambda$ ).

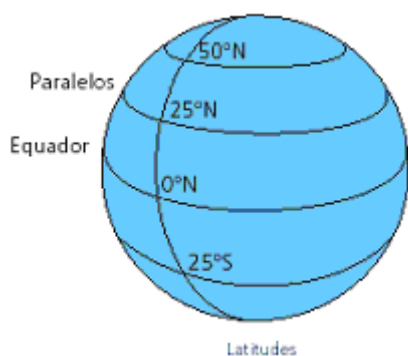




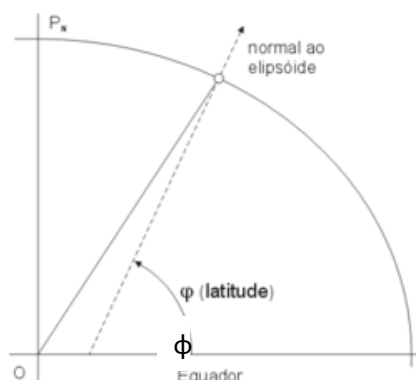
**FIGURA 3** Latitude ( $\phi$ ) e longitude ( $\lambda$ ) de um determinado local.

Fonte: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Latitude>

A *latitude* é a distância ao Equador medida ao longo do meridiano de Greenwich. Mede-se a latitude em graus, variando entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , sendo Norte se estiver acima da linha do Equador, e Sul, se estiver abaixo, conforme convenção.



(A)

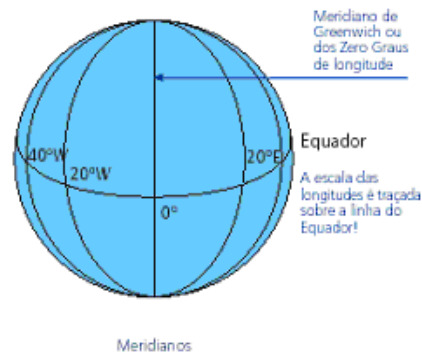


(B)

**FIGURA 4** Latitudes do globo terrestre: (A) Divisão da Terra em paralelos; (B) Latitude de um determinado local.

Fonte: <http://www.cienciaviva.pt/home/>

A *longitude* é a distância ao meridiano de Greenwich medida ao longo do Equador. As longitudes são medidas em graus, variando de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ , a leste ou oeste do Meridiano de Greenwich, também conforme convencionado.



**FIGURA 5** Divisão da Terra em meridianos.

Fonte: <http://www.cienciaviva.pt/home/>

A latitude de um dado local e o dia do ano determinam o ângulo de incidência dos raios solares no plano horizontal de um local e, conseqüentemente, a maior ou menor intensidade da radiação, assim como o período de permanência do sol acima do horizonte local e a dissipação da irradiação solar pela atmosfera.

#### 2.3.1.1. Correção da longitude

Ao adotar o fuso horário do meridiano padrão, há que se considerar a diferença entre este meridiano e o meridiano local, sendo necessária a aplicação de uma correção, de forma a adaptar a hora local à hora solar local. Esta correção é dada pela Equação 1 a seguir (DUFFIE e BECKMAN, 2006):

$X = 4(\lambda_s - \lambda_e)$	(Equação 1)
--------------------------------	-------------

Onde:

$\lambda_s$  é a longitude padrão;

$\lambda_e$  é a longitude local.

Sendo X expresso em minutos.

### 2.3.2. Trajetórias Aparentes do Sol

A inclinação do eixo da Terra em relação à elíptica da trajetória, conhecida como declinação solar, varia diariamente. A declinação solar ( $\delta$ ) é o ângulo entre o raio solar, do ponto de vista do observador e com vértice neste, e está compreendida entre os limites de  $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$ . Os valores da declinação solar serão positivos quando o sol encontra-se ao norte do equador celeste e negativos quando o mesmo apresenta-se ao sul (ABNT, 2005 B).

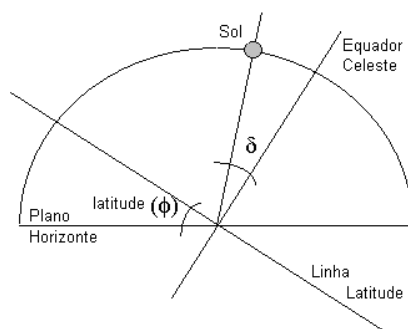


FIGURA 6 Desenho esquemático apresentando o ângulo de declinação Solar ( $\delta$ ).

Fonte: ABNT, 2005 B.

A declinação é dada por (DUFFIE & BECKMAN, 2006):

$$\delta = (0,006918 - 0,399912\cos J + 0,070257\sin J - 0,006758\cos^2 J + 0,000907\sin^2 J - 0,002697\cos^3 J + 0,00148\sin^3 J)(180/\pi) \quad (\text{Equação 2})$$

Onde J é o dia Juliano, definido como o número de dias transcorridos desde o início do ano, como mostra a TABELA 02 a seguir:

TABELA 54

Limite de dias Julianos para cada mês do ano.

Mês	Dias Julianos	Mês	Dias Julianos
Janeiro	1 - 31	Julho	182 - 212
Fevereiro	32 - 59	Agosto	213 - 243
Março	60 - 90	Setembro	244 - 273
Abril	91 - 120	Outubro	274 - 304
Maiο	121 - 151	Novembro	305 - 334
Junho	152 - 181	Dezembro	335 - 366

### 2.3.3. Ângulos Solares

A posição horária do sol é também determinada por uma série de ângulos referentes à geometria da insolação, em função da latitude local (DUFFIE & BECKMAN, 2006). Esses ângulos serão descritos a seguir.

#### 2.3.3.1. Hora angular ( $\omega$ )

A hora angular ( $\omega$ ) é o ângulo de deslocamento de leste a oeste do sol em relação ao meridiano local, consequência da rotação da Terra em torno do seu próprio eixo a 15° por hora. Por definição, o ângulo é nulo ao meio dia solar e um setor angular de 15° corresponde à uma hora solar, sendo, por convenção, considerado negativo pela manhã e positivo pela tarde. A hora angular é definida pela seguinte equação (DUFFIE & BECKMAN, 2006):

$$\omega = h_s * 15^\circ$$

(Equação 3)

onde:

$h_s$  é a hora solar verdadeira, medida em relação ao meio dia solar.

#### 2.3.3.2. Ângulo zenital Solar ( $\theta_z$ ), altura Solar ( $\alpha_s$ )

O ângulo zenital ( $\theta_z$ ) é o ângulo formado entre o raio do sol e o zênite (linha imaginária vertical que passa pelo observador). O ângulo zenital varia de acordo com a latitude, dia do ano e a hora do dia. Quando o sol encontra-se coincidente com o zênite, seu ângulo zenital é de 0°; quando encontra-se no horizonte, o ângulo zenital é próximo de 90° (FROTA e SCHIFFER, 2001; DUFFIE e BECKMAN, 2006).

$$\cos \theta_z = \cos \phi * \cos \delta * \cos \omega + \sin \phi * \sin \delta$$

(Equação 4)

onde:

$\theta_z$  é o ângulo zenital;

$\phi$  é a latitude local;

$\delta$  é a declinação solar;

$\omega$  é a hora angular.

A altura solar ( $\alpha_s$ ) é o ângulo complementar do ângulo zenital ( $\theta_z$ ), como mostra a FIGURA 7, e pode ser definida como o ângulo entre o raio do sol e o horizonte, do ponto de vista do observador. Esse ângulo é obtido em função da hora do dia, da época do ano e da latitude da localidade em questão. A altura solar varia de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , sendo que, quando o sol encontra-se no zênite, sua altura solar é equivalente a  $90^\circ$ , no horizonte a altura é de  $0^\circ$  e abaixo deste negativa (ABNT, 2005 B).

A altura solar é dada por (DUFFIE & BECKMAN, 2006):

$$\alpha_s = \text{arc sen} (\text{sen}\phi\text{sen}\delta - \text{cos}\phi\text{cos}\delta\text{cos}\omega)$$

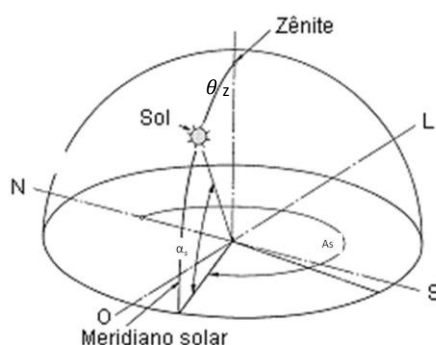
(Equação 5)

onde:

$\phi$  é a latitude local;

$\delta$  é a declinação solar;

$\omega$  é a hora angular.



**FIGURA 7** Ângulo zenital ( $\theta_z$ ) e altura solar ( $\alpha_s$ ).

Fonte: ABNT, 2005 B

### 2.3.4. Equação da hora, hora aparente local e hora solar verdadeira

Um dia solar é definido como o intervalo de tempo a partir do momento em que o sol atravessa o meridiano local até a próxima vez que ele cruzar o mesmo meridiano novamente. Devido ao fato da Terra girar em ciclos diurnos em torno de sua própria órbita, o tempo necessário para uma rotação completa da Terra é inferior a um dia solar (FROTA, 2004; MUNEER, 2004).

O dia solar verdadeiro não possui duração uniforme, variando de comprimento ao longo do ano devido à: (a) a inclinação do eixo da Terra em relação ao plano da elipse contendo os respectivos centros da Terra e do sol; (b) o ângulo varrido pelo vetor Terra-sol para um dado período de tempo, que depende da posição da Terra em sua órbita (FROTA, 2004; MUNEER, 2004).

A hora solar é aquela fundamentada no movimento aparente do sol no céu. O meio dia solar é o momento no qual o sol cruza o meridiano local.

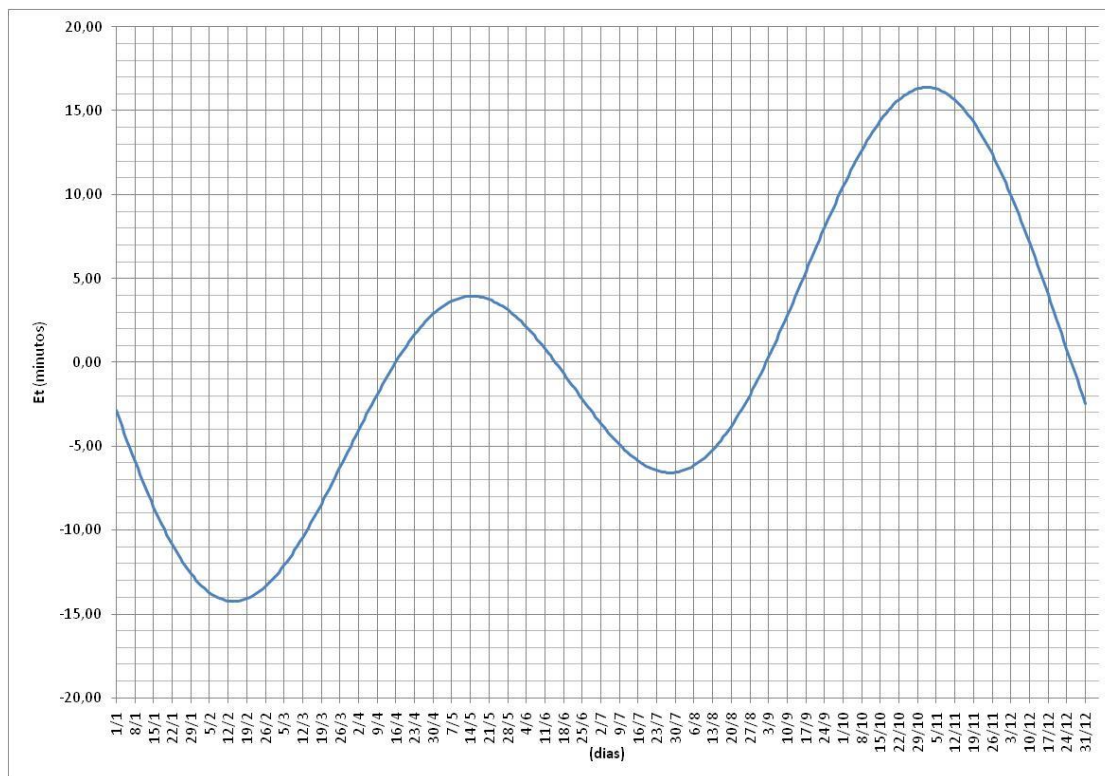
A diferença entre a hora padrão e a hora solar é definida pela Equação da Hora ( $E_t$ ), que pode ser obtida através da Equação 6 (DUFFIE e BECKMAN, 2006):

$E_t = (0,00075 + 0,001868\cos x - 0,032077\sen x - 0,014615\cos^2 x - 0,04089\sen^2 x) * (229,18)$ $x = \frac{60 * (J - 1)}{365}$	(Equação 6)
--	-------------

Onde:

J é o dia Juliano.

Aplicando-se essa equação encontra-se o gráfico representado na FIGURA 08. A Equação da hora varia entre:  $-14 \text{ min } 17 \text{ s} \leq E_t \leq + 16 \text{ min } 25 \text{ s}$ .



**FIGURA 8** Valores da Equação da Hora.

Fonte: Autora

A hora solar verdadeira é a hora determinada pela rotação da Terra relativa ao sol e é esta a hora que deve ser utilizada em qualquer cálculo de geometria solar. Faz-se necessário aplicar a correção devido a diferença entre a longitude de uma dada localidade e a longitude do meridiano padrão e a equação da hora à hora local padrão, conforme a EQUAÇÃO 7 (ABNT, 2005 B; MUNEER, 2004):

$$h_s = \text{hora local padrão} + 4 * (\lambda_s - \lambda_e) + Et \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

$\lambda_s$  é a longitude padrão;

$\lambda_e$  é a longitude local;

$Et$  é a equação da hora.

Obtendo-se a hora solar, pode-se relacionar os dados de iluminância e irradiância com a posição do sol no céu.

### 2.3.5. Duração astronômica do dia ( $N_d$ )

A duração do dia é definida como o intervalo de tempo decorrido entre o momento em que o centro do disco solar atinge a linha do horizonte ( $\alpha_s = 0^\circ$ ) até o instante em que o sol torna a atingir esta mesma posição, sendo função da latitude local e da época do ano, sendo expressa pela EQUAÇÃO 8, definida por DUFFIE & BECKMAN, (2006). Por variar de acordo com a época do ano, é possível notar a existência de um valor médio para cada mês e um acréscimo na duração do dia no verão e um decréscimo no inverno.

$N_d = \left(\frac{2}{15}\right) \cos^{-1} * (\lambda_s - \lambda_e)$	(Equação 8)
---	-------------

onde:

$\phi$  é a latitude local;

$\delta$  é a declinação solar.

Além disso, Muneer (2004) coloca que como há luz mesmo quando o Sol encontra-se abaixo da linha do horizonte em decorrência da refração da luz pela atmosfera, é necessário considerar esse período no cálculo da duração do dia. Em virtude disso, o nascer e o pôr do sol reais não são coincidentes com o nascer e pôr do sol astronômico, ocorrendo ligeiramente antes, no caso do nascer, e depois, no caso do poente. Há ainda que se considerar que para localidades acima do nível do mar, o Sol irá aparecer pela manhã ligeiramente mais cedo do que em localidades ao nível do mar. Portanto, correções referentes à altitude do local devem ser aplicadas, podendo ser expressas via EQUAÇÃO 9, referente ao momento real do nascer ou pôr do Sol (MUNEER, 2004).

$\alpha_{COR} = -0,8333 - 0,0347H^{0,5}$	(Equação 9)
--	-------------

Sendo H na equação acima dado em metros (m) acima do nível do mar.

Assim a duração real do dia corresponde ao valor calculado pela EQUAÇÃO 8, acrescido das correções referentes ao período em que há luz mesmo quando o Sol



encontra-se abaixo da linha do horizonte e referentes à altitude do local. Logo, a duração da noite será a subtração de 24 horas pela duração real do dia.

A EQUAÇÃO 08, proposta por Duffie e Beckmam não é aplicável no cálculo da duração do dia em que a luz crepuscular é considerada, uma vez que ela se baseia no momento de nascer e pôr do sol, ou seja, a duração do dia é computada a partir do momento em que o sol coincide com a linha do horizonte até o momento de uma nova coincidência, desconsiderando quando o sol encontra-se abaixo da linha do horizonte no cálculo da duração do dia, fornecendo assim dias mais curtos e noites mais longas do que quando se considera a luz crepuscular.

## **2.4. Análise da Luz Crepuscular**

De acordo com o Guia Explicativo do Almanaque Astronômico (SEIDELMAN, 2006), os vários movimentos envolvidos no sistema solar, como a rotação da Terra e o movimento orbital dos planetas, provocam significativos fenômenos astronômicos. A periodização e duração de tais fenômenos nem sempre pode ser feita com precisão, sendo que, em alguns casos, o horário do seu acontecimento é determinado de forma arbitrária e, em outros, não é possível definir exatamente o período de sua ocorrência.

### *2.4.1. Alvorada e ocaso*

O nascer e o pôr do sol são definidos pelos astrônomos como o instante em que a parte superior do Sol aparece no horizonte visível. É então possível determinar a posição do Sol no céu a partir do ângulo de altura solar e assim determinar o instante do nascer e do pôr do sol. Usualmente admite-se que o instante do nascer/pôr do sol se dá a altura solar de  $0^\circ$  (MUNEER, 2004).

No entanto, o real nascer e pôr do sol não ocorrem no momento em que a altura solar é igual a  $0^\circ$ , em decorrência da refração da luz pela atmosfera terrestre, mas sim um

pouco antes do nascer do sol astronômico e um pouco depois do pôr do sol astronômico. Além disso, para locais acima do nível do mar é preciso lembrar que o Sol irá aparecer pela manhã ligeiramente mais cedo do que ao nível do mar (MUNEER, 2004).

#### 2.4.2. Condições de crepúsculo

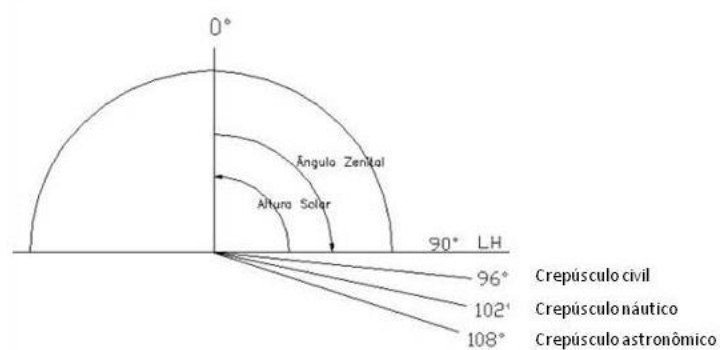
O *crepúsculo* é definido como o período de luz natural parcial antes do nascer do sol ou depois do pôr do sol, isto é, quando o Sol encontra-se abaixo da linha do horizonte (LH). O crepúsculo é consequência da reflexão e espalhamento da luz solar pelas camadas superiores da atmosfera terrestre (MUNEER, 2004).

Um dos primeiros tratados acessíveis sobre o crepúsculo foi escrito por Johann Heinrich Lambert, em 1760, que afirma que os antigos astrônomos já haviam encontrado que o início da completa escuridão da noite, com término pela manhã, ocorria a partir da altura solar de  $-18^\circ$  (KIMBALL, 1916). Assim como Kimball (1916), Muneer (2004) coloca que logo após o pôr do sol, a iluminância decai progressivamente de maneira exponencial até que o Sol alcance a altura Solar de  $-18^\circ$ . Nesse instante tem-se o último estágio de recepção da luz proveniente do Sol, denominado *crepúsculo astronômico*.

Desde então foram padronizados, definidos pelo ângulo zenital (ou pela altura solar), o crepúsculo astronômico, supracitado, o *crepúsculo náutico* e o *crepúsculo civil*. O *crepúsculo astronômico*, como dito anteriormente, ocorre no instante em que não há mais um único raio de Sol espalhado na atmosfera, sendo possível, assim, a observação astrofísica sem interferência do Sol. Esse começa ou termina quando o Sol atinge uma distância zenital de  $108^\circ$  (ou ângulo de altura solar de  $-18^\circ$ ). O *crepúsculo náutico* é o estágio quando é possível distinguir o horizonte no mar, tendo início ou término quando o Sol atinge uma distância de  $102^\circ$  do zênite (ou ângulo de altura Solar de  $-12^\circ$ ). Para o crepúsculo náutico a variação de luminosidade está entre 3 lux até 0,05 lux. O *crepúsculo civil* é o estágio quando existe iluminância suficiente para

habilitar atividades civis externas sem o uso de iluminação pública artificial. O crepúsculo civil termina ao fim da tarde e início da manhã, quando o centro do Sol atinge uma distância zenital de  $96^\circ$  (ou altura solar de  $-6^\circ$ ). Para esse tipo de crepúsculo, a luminosidade varia de 700 lux a 3 lux. À medida em que se aproxima desse horário, o conforto visual sem iluminação artificial se torna bastante degradado (MUNEER, 2004; SEIDELMAN, 2006).

A FIGURA 9 a seguir mostra a diferença de ângulos zenitais entre as citadas definições de crepúsculo. Já a TABELA 3 mostra valores da variação da iluminância de acordo com a altura solar ao longo do dia e durante o crepúsculo de acordo com Muneer (2004), para superfícies horizontais sob condições de céu sem nuvens.



**FIGURA 9** Crepúsculos Solares, de acordo com o ângulo zenital: Civil, Náutico, Astronômico.

Fonte: SEIDELMANN, 2006

**TABELA 55**

Varição da iluminância de acordo com a altura solar.

Posição do Sol	Altura Solar ( $^\circ$ )	Iluminância (lux)
Sol no zênite	90	129000
Sol no horizonte	0	759
Crepúsculo civil	-6	3,41
Crepúsculo náutico	-12	0,008
Crepúsculo astronômico	-18	0,001

Fonte: Munner, 2004

Assim, pode-se notar que o crepúsculo de importância para a iluminação pública é o crepúsculo civil, o qual irá definir o momento em que a luz natural não é mais suficiente, devendo haver o acionamento da iluminação artificial. No entanto, é preciso considerar que a altura solar de  $-6^\circ$ , estabelecida para o crepúsculo civil, não é fixa para todas as localidades da Terra, um vez que esta é influenciada pela altitude, condições climáticas locais e tipo de céu. É de importância, então, a investigação local para o estabelecimento do período crepuscular local.

A iluminação do crepúsculo é marcadamente influenciada pela condição atmosférica e pelas condições meteorológicas através das condições de céu.

## **2.5. Condições de Céu**

Segundo a ABNT (2005 B) a condição de céu é a aparência da abóbada celeste quando vista por um observador situado na superfície terrestre e está relacionada à distribuição espacial da sua emissão de luz na abóbada celeste.

A disponibilidade de luz difusa proveniente da abóbada celeste está diretamente relacionada às condições atmosféricas. A trajetória solar aparente própria de cada latitude e as características locais de nebulosidade, a poluição do ar e o turvamento da atmosfera fazem com que a abóbada celeste pareça mais ou menos luminosa no decorrer do dia e do ano (MASCARÓ, 1983). As condições climáticas regionais exercem ação direta na determinação da conformação básica dos tipos de céu, de forma que em cada zona climática há um padrão geral dos tipos de céu e as mudanças sazonais formam certa faixa de probabilidade de ocorrência de céus com características definidas de insolação (KITTLER *et al.*, 1997).

A classificação do céu não determina apenas os tipos de céu, mas também a faixa e a frequência de ocorrência de iluminâncias em um determinado local, ou seja, tipos de céu que não são esperados naquele determinado local, aqueles que são raros ou muito frequentes, aqueles de frequência mais plausível e os que ocorrem sucessivamente (KITTLER *et al.*, 1997).

### 2.5.1. Parâmetros climáticos e classificação de condições de céu

Diversos autores têm proposto a utilização de índices para caracterização das condições de céu. Porém a maior parte dos índices baseiam-se na parcela direta da radiação solar para a classificação do tipo de céu, parcela esta que é nula durante o período crepuscular, quando o sol encontra-se abaixo da linha do horizonte, havendo apenas luz refletida pela atmosfera local. Em resumo, a irradiância ou iluminância global equivalem à parcela da irradiância ou da iluminância difusa, respectivamente. A seguir serão apresentados os índices aplicáveis a esse período, em que não se utiliza a parcela direta para a quantificação do índice.

#### 2.5.1.1. Brilho relativo de sol, S

O brilho relativo de sol (S) é a razão entre a irradiância global solar diária,  $I_{GD}$ , e a radiação extraterrestre,  $I_e$ , e irá fornecer uma ideia da cobertura de nuvens (CHUNG<sup>1</sup>, 1992 apud SOUZA, 2004).

$S = \frac{I_{GD}}{I_e}$	(Equação 10)
--------------------------	--------------

Onde:

$I_e$  a irradiância extraterrestre ( $I_e = 1367 \text{ W/m}^2$ ).

#### 2.5.1.2. Coeficiente de radiação difusa, Kd

É a razão entre a irradiação horizontal difusa diária e a radiação extraterrestre. Esse coeficiente indica a dispersão da radiação solar incidente (RUIZ *et al.*<sup>2</sup>, 2001, apud SOUZA, 2004).

<sup>1</sup> CHUNG, T. M. *A study of luminous efficacy of daylight in Hong Kong*. Energy and Buildings, Great Britan, 19, pp 45-50, 1992.

<sup>2</sup> RUIZ, E.; SOLER, A.; ROBLEDO L. *Assessment of Muneer's luminous efficacy models on Madrid and a proposal for new models based on his approach*. Journakl of Solar Energy Engineering, 123, pp 220-224, 2001.

$k_d = \frac{I_d}{I_e}$	(Equação 11)
-------------------------	--------------

### 2.5.1.3. Índice de claridade, $\epsilon'$ , e Índice de brilho, $\Delta$

Perez *et al.* (1990) apresentam dois índices na avaliação das condições de céu, o índice de claridade,  $\epsilon'$ , e o índice de brilho,  $\Delta$ , que conjugados com a altura solar, permitem descrever as condições de céu, de claro ao encoberto. O índice  $\epsilon'$  expressa a transição de um céu totalmente encoberto a um céu claro de baixo turvamento. Já as variações do segundo índice,  $\Delta$ , refletem o grau de opacidade/espessura das nuvens. Esses índices são definidos pelas EQUAÇÕES 12 e 13 a seguir:

$\epsilon' = \frac{\frac{(I_d + I_n)}{I_d} + 1,041\theta_z^3}{1 + 1,041\theta_z^3}$	(Equação 12)
---	--------------

sendo:

$I_d$  a irradiância difusa;

$I_n$  a irradiância direta de incidência normal;

$\theta_z$  o ângulo zenital do sol (em radianos).

$\Delta = \frac{I_d * m}{I_e}$	(Equação 13)
--------------------------------	--------------

sendo:

$I_e$  a radiação extraterrestre;

$m$  a massa ótica relativa ( $m = 1/\text{sen}\alpha_s$ ), sendo  $\alpha_s$  a altura solar em graus.

Em vários trabalhos presentes na literatura técnica, cita-se que o índice de claridade tem se apresentado como o melhor parâmetro para definir a condição de céu

atualmente. Contudo, para que esse índice seja utilizado é preciso haver a irradiância direta, inexistente no período crepuscular, não sendo, portanto, esse índice aplicável neste trabalho.

#### 2.5.1.4. Caracterização dos tipos de céu mais frequentes em um determinado mês a partir de dados das Normais Climatológicas

Ferreira e Souza (2006) propõem um método simplificado para a definição do céu típico de cada mês para uma determinada localidade, baseado nos dados de horas de insolação mensal encontrados nas Normais Climatológicas (BRASIL, 1992), e nas equações de Duffie e Beckman (2006).

O valor médio mensal das horas de insolação pode ser obtido através da EQUAÇÃO 14 a seguir (DUFFIE e BECKMAN, 2006):

$n = \frac{\textit{insolação mensal}}{\textit{dias do mês}}$	(Equação 14)
--	--------------

O valor calculado de  $n$  é, então, comparado ao número médio máximo de horas de insolação,  $N$ , que se poderia ter sob condições de céu claro, fornecendo o percentual de cobertura de nuvens da abóbada celeste e, por conseguinte, o tipo de céu. O valor de  $N$  pode ser obtido a partir da EQUAÇÃO 15 (DUFFIE e BECKMAN, 2006):

$N = \left(\frac{2}{15}\right) \cos^{-1}(-\tan\phi * \tan\delta)$	(Equação 15)
---	--------------

Quando o número de horas de insolação,  $n$ , é inferior a 40% do total,  $N$ , o céu é encoberto; entre 40% e 70%, o céu é parcialmente encoberto; e acima de 70% o céu é claro, como mostra o QUADRO 1 resumo a seguir (FERREIRA e SOUZA, 2006).

QUADRO 2

Determinação do tipo de céu a partir do percentual de cobertura das nuvens ( $n/N$ )

<b>n/N (%)</b>	<b>Tipo de céu</b>
Inferior a 40%	Céu encoberto
Entre 40% e 70%	Céu parcialmente encoberto
Superior a 70%	Céu claro

Fonte: Ferreira e Souza, 2006.

As autoras aplicaram esta metodologia para parametrizar os tipos de céus típicos para a cidade de Belo Horizonte a partir das Normais Climatológicas de 1961-1990 (BRASIL, 1992). O resultado é apresentado na TABELA 4, a seguir:

TABELA 56

Classificação simplificada de condições de céus para Belo Horizonte

<b>Mês</b>	<b>Dias Médios<sup>3</sup></b>	<b>Declinação</b>	<b>In. mês</b>	<b>n</b>	<b>N</b>	<b>%</b>	<b>Tipo de céu</b>
Janeiro	13	-21,60	189,8	6,12	13,10	46,74	Encoberto
Fevereiro	46	-13,29	195,5	6,74	12,66	53,27	Parc. Encoberto
Março	75	-2,42	215,1	6,94	12,12	57,26	Parc. Encoberto
Abril	105	9,41	228,9	7,63	11,54	66,12	Parc. Encoberto
Mai	135	18,79	237,1	7,65	11,06	69,18	Parc. Encoberto
Junho	162	23,09	240,1	8,00	10,82	74,01	Claro
Julho	199	21,01	256,5	8,27	10,93	75,68	Claro
Agosto	228	13,45	255,6	8,25	11,34	72,73	Claro
Setembro	259	1,82	210,1	7,00	11,91	58,79	Parc. Encoberto
Outubro	289	-9,97	190,5	6,15	12,49	49,21	Encoberto
Novembro	317	-18,67	181,7	6,06	12,94	46,81	Encoberto
Dezembro	346	-23,18	165,1	5,33	13,19	40,37	Encoberto

Fonte: Ferreira e Souza, 2006.

<sup>3</sup> O *dia médio* aqui adotado refere-se ao dia da altura solar média ao meio-dia ao longo do mês, diferentemente do dia médio do mês adotado por Duffie e Beckman (2006).



Uma das vantagens dessa metodologia é sua aplicação para localidades aonde estações de medição de luz natural são inexistentes.

### 2.5.2. Tipos de céu padronizados

A iluminação produzida pelo céu é dependente da distribuição de sua luminância, que irá variar de acordo com as condições climáticas, parâmetros sazonais e com a localização geográfica, assinalando uma complexa parametrização devido a constantes mudanças ao longo do dia. Em consequência da complexidade e da diversidade de situações climáticas e atmosféricas e de variáveis determinantes das características dos tipos de céu, tem-se definido a distribuição de luminâncias da abóbada celeste a partir de modelos de céus padronizados dentro de uma larga gama de opções (CIE, 2003).

Em 1984, a *Illuminating Engineering Society of North America* (IESNA) publicou um documento em que, para os cálculos aplicáveis à disponibilidade de iluminação natural, parametriza três tipos de céu: o céu claro, o céu encoberto e o céu parcialmente encoberto, sendo esse último incluído pela primeira vez entre os tipos de céu. O parâmetro utilizado pela IESNA para classificar os tipos de céu foi a razão de cobertura de céu (*sky-cover*) (IESNA, 2000).

Já segundo Kittler *et al.* (1997), os tipos de céu podem ser classificados em duas categorias básicas: céus homogêneos e céus não-homogêneos.

Os céus homogêneos são aqueles que variam de claro a turvo, nebuloso e encoberto, com uma densidade atmosférica razoavelmente semelhante em todas as direções. Assim, esses céus irão apresentar uma marcada tendência a uma mudança fluida ou constante que pode ser definida por funções matemáticas.

Dentre os céus homogêneos, podem ser identificados seis categorias de tipos de céu, modelados a partir de duas funções denominadas pelos autores de *gradação* e *indicatrix*, determinantes do nível de brilho do céu e também a gradação das

mudanças de luminâncias do céu. A gradação expressa a queda ou aumento da luminosidade no céu do zênite para o seu horizonte. Já o indicatrix expressa a difusão dos raios solares pela atmosfera, dependendo da direção angular dos raios. A partir destas duas funções, os autores determinaram seis céus: 1) céu encoberto escuro, 2) céu encoberto uniforme, 3) céu encoberto brilhante sem luz do Sol, 4) céu encoberto brilhante, 5) céu turvo claro e 6) céu claro sem turvamento com pequeno conteúdo de poluição.

Já os céus não-homogêneos são caracterizados por uma distribuição de luminância irregular. Esses tipos de céu possuem diferentes classificações conforme o tipo, a altura e a quantidade de nuvens presentes no céu.

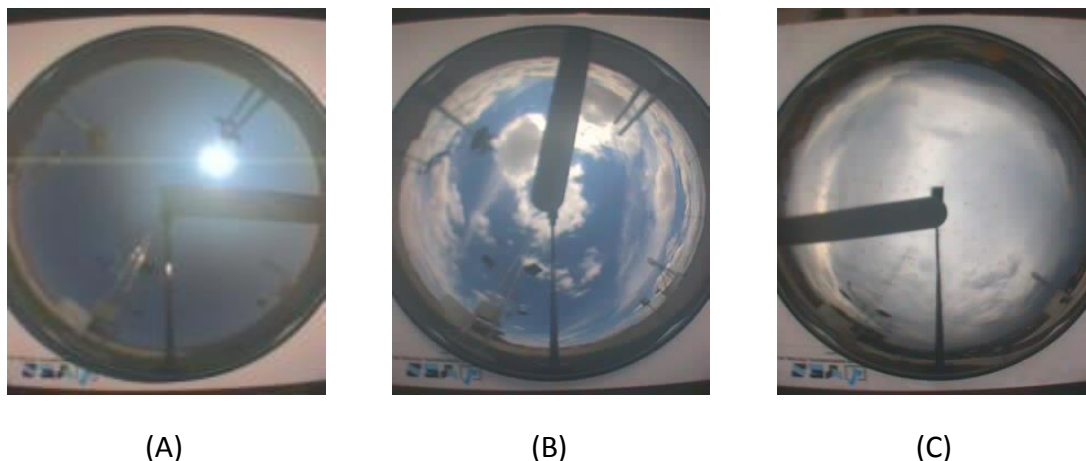
A CIE adota cinco tipos de céus, baseados no valor do índice de razão de nuvens: 1) encoberto, 2) encoberto intermediário, 3) médio intermediário, 4) claro intermediário e 5) claro, conforme mostra a FIGURA 10.



**FIGURA 10** Tipos de céus homogêneos proposto pela CIE: céu encoberto, céu encoberto intermediário, céu médio intermediário, céu claro intermediário e céu claro.

*Fonte: SOUZA, 2004*

Geralmente, os dados medidos referentes à iluminação natural são classificados em três condições básicas de céu de acordo com os céus de referência da CIE: o céu encoberto, o céu claro e o céu parcialmente encoberto, sendo esses três tipos de céu adotados na NBR 15.215-2 (ABNT, 2005 B) para normatizar os tipos de céu. Será essa a classificação a ser adotada no presente trabalho.

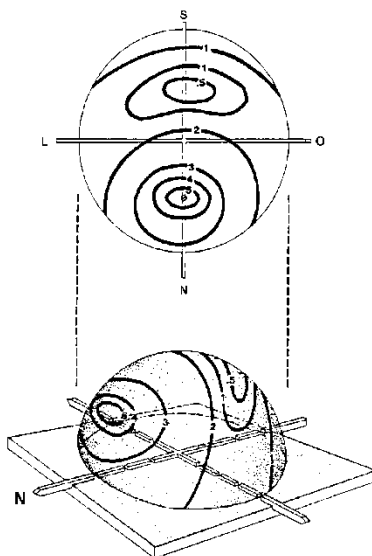


**FIGURA 11** Imagens dos tipos de céu: (A) Imagem de céu claro; (B) Imagem de céu parcialmente encoberto; (C) Imagem de céu encoberto.

*Fonte: EMIN-BH*

### 2.5.2.1. Céu Claro

Céu claro é a condição de céu em que não há presença de nuvens e a nebulosidade é baixa, tendendo a ser mais brilhante nas regiões próximas à linha do horizonte. Nestas condições, o céu apresenta sua porção mais escura a  $90^\circ$  do Sol e sua parte mais brilhante ao redor deste, ou seja, a luminância de qualquer ponto da abóbada celeste está relacionada com a luminância do zênite e ao Sol, conforme mostra a FIGURA 12 a seguir (ABNT, 2005 B). Seu índice de claridade limite é de 5,0.

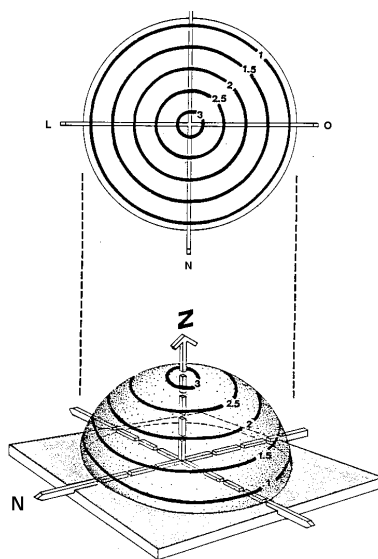


**FIGURA 12** Distribuição de luminâncias para céu claro.

*Fonte: ABNT, 2005 B*

### 2.5.2.2. Céu encoberto

Céu encoberto é definido como a condição de céu na qual as nuvens preenchem toda a superfície da abóbada celeste, resultando em uma abóbada cinza-claro, com a porção zenital apresentando uma luminância três vezes maior que a porção próxima à linha do horizonte, conforme mostrado na FIGURA 13 (ABNT, 2005 B). Possui um índice de claridade inferior a 1,2.



**FIGURA 13** Distribuição de luminâncias para céu encoberto.

*Fonte: ABNT, 2005 B*

### 2.5.2.3. Céu Parcialmente Encoberto ou Intermediário

O céu parcialmente encoberto é a condição de céu intermediária entre o céu encoberto e o céu claro (ABNT, 2005 B). Seu índice de claridade varia entre 1,2 e 5,0.

## 2.6. Dispersão e Absorção Atmosférica

A atmosfera terrestre é uma fina camada de gases que envolve a Terra, sendo composta basicamente por nitrogênio, oxigênio, ozônio, dióxido de carbono, vapor de água, entre outros gases e partículas.

Ao penetrar na atmosfera, a irradiação irá basicamente sofrer dois fenômenos: absorção pelo ozônio, dióxido de carbono e vapor de água; e dispersão pelas moléculas de água e poeira (DUFFIE e BECKMAN, 2006). A dispersão devido às moléculas torna-se de maior relevância a baixas altitudes solares, quando a camada de atmosfera que o raio solar deve percorrer é mais espessa e assim mais afetado por estas moléculas (LITTLEFAIR, 1985), como no caso do crepúsculo.

### 2.6.1. Absorção pelo vapor de água

O vapor de água presente na atmosfera constitui uma suspensão de líquido e gás e encontra-se principalmente nas camadas baixas da atmosfera. O processo de absorção da luz solar pelo vapor de água possui dependência direta do comprimento de onda e do nível de energia dos elétrons no interior das moléculas. A maior parte da absorção irá incidir na faixa infravermelha da irradiação solar, ocasionando um aumento na eficácia luminosa de um raio que percorra uma região com alto conteúdo de vapor de água (LITTLEFAIR, 1985).

A quantidade de vapor varia em função das condições climáticas ocorrentes nas diferentes regiões do planeta e épocas do ano, níveis de evaporação e precipitação.

Uma forma de avaliar o efeito do vapor de água na irradiação é através do *conteúdo de vapor de água* ( $w$ ). O conteúdo de vapor de água pode ser definido como a altura da água se todo o vapor de água presente na atmosfera se condensasse em uma coluna vertical, ou seja, é a quantidade de água na coluna de ar, sendo usualmente utilizado para avaliar o efeito do vapor de água na atenuação da irradiação direta. É usualmente dado em centímetros (cm) (LITTLEFAIR, 1985; WRIGHT *et al.*, 1989).

Uma vez que  $w$  não é rotineiramente medido, ele será estimado a partir da *temperatura de ponto de orvalho* ( $T_d$ ). Pode-se obter uma relação entre a temperatura de ponto de orvalho ( $T_d$ ) e o conteúdo de vapor de água ( $w$ ) em centímetros na forma (WRIGHT *et al.*, 1989):

$w = \exp(0,07 * T_d - 0,075)$	(Equação 16)
--------------------------------	--------------

A seguir serão apresentados na TABELA 5 valores típicos de  $w$ .

**TABELA 57**

Valores médios aproximados de conteúdo de vapor de água por tipos climáticos.

Condição Climática	Conteúdo de vapor de água ( $w$ )
Polar e desértico (ar seco)	0,5 - 1
Temperado	2 -4
Tropical (ar úmido)	>5

Fonte: LITTLEFAIR, 1985

A *temperatura de orvalho*, para o intervalo de temperatura de 0-200°C, pode ser calculada baseada na temperatura do ar em temperatura absoluta (K), de acordo com Muneer (2004) com as EQUAÇÕES 17 e 18:

$T_d = C_{14} + C_{15} * \ln_{pw} + C_{16} * \ln_{pw}^2 + C_{17} * \ln_{pw}^3 + C_{18} * \ln_{pw}^{0,1984}$	(Equação 17)
Onde:	
$\ln_{pw} = \frac{C_8}{T} + C_9 + C_{10} * T + C_{11} * T^2 + C_{12} * T^3 + C_{13} * \ln(T)$	(Equação 18)

Onde:

$$C_8 = -5,8002206 * 10^3;$$

$$C_9 = -5,5162560;$$

$$C_{10} = -4,8640239 \cdot 10^{-2};$$

$$C_{11} = 4,1764768 \cdot 10^{-5};$$

$$C_{12} = -1,4452093 \cdot 10^{-8};$$

$$C_{13} = 6,5459673;$$

$$C_{14} = 6,54;$$

$$C_{15} = 14,526;$$

$$C_{16} = 0,7389;$$

$$C_{17} = 0,09486;$$

$$C_{18} = 0,4569;$$

T é a temperatura absoluta em Kelvin ( $T = t(^{\circ}\text{C}) + 273,15$ ).

## 2.7. Modelos de Iluminância Externa

### 2.7.1. Determinação Teórica da Iluminância Global

A iluminância, quantidade de luz emitida pelas fontes naturais que atinge as superfícies horizontais, varia consideravelmente durante o dia. Buscando estimar essa variação, o Guia Explicativo do Almanaque Astronômico (SEIDELMAN, 2006) propõe um modelo teórico para estimar os valores de iluminância. A iluminância (E), em lux ou lumens por metro quadrado, é dada por:

$$\log_{10}E = I_0 + I_1x + I_2x^2 + I_3x^3$$

(Equação 19)

Onde:

$x = \alpha_s/90$ , sendo  $\alpha_s$  é a altura solar;

$l_0$ ,  $l_1$ ,  $l_2$  e  $l_3$  são coeficientes tabulados para faixas de valores variáveis de altura solar, como mostra a TABELA 6.

TABELA 58

Coeficientes para Cálculo da Iluminância da Luz Solar.

Intervalo de $\alpha_s$		Coeficientes				Erro máximo
		$l_0$	$l_1$	$l_2$	$l_3$	
20°	90°	3,74	3,97	-4,07	1,47	0,02
5°	20°	3,05	13,28	-45,98	64,33	0,02
-0,8°	5°	2,88	22,96	-207,64	1034,30	0,02
-5°	-0,8°	2,88	21,81	-258,11	-858,36	0,02
-12°	-5°	2,70	12,17	-431,69	-1899,83	0,01
-18°	-12°	13,84	262,72	1447,42	2797,93	0,01

Fonte: Adaptado de SEIDELMANN, 2006

Aplicando esses coeficientes tabulados à fórmula apresentada acima, tem-se:

TABELA 59

Equações para cálculo da Iluminância (E) para diferentes valores de Altura Solar

Altura Solar ( $\alpha_s$ )			Equação
-18°	a	-12°	$\log 10E = 13,84 + 262,72x + 1447,42x^2 + 2797,93x^3$
-12°	a	-5°	$\log 10E = 2,70 + 12,17x - 431,692x^2 - 1899,83x^3$
-5°	a	-0,8°	$\log 10E = 2,88 + 21,81x - 258,11x^2 - 858,36x^3$
-0,8°	a	5°	$\log 10E = 2,88 + 22,26x - 207,64x^2 + 1034,30x^3$
5°	a	20°	$\log 10E = 3,05 + 13,28x - 45,98x^2 + 64,33x^3$
20°	a	90°	$\log 10E = 3,74 + 3,97x - 4,07x^2 + 1,47x^3$

Fonte: Adaptado de SEIDELMANN, 2006

Aplicando-se as fórmulas da TABELA 7 às alturas solares correspondentes é possível construir um gráfico de Iluminância pela Altura Solar, estipulando, assim, os valores de iluminância para a condição de céu claro. Esses valores fornecem a iluminância direta e indireta da luz solar para dias de céu claro. Esse gráfico, para latitude de 20° sul, está representado na FIGURA 14:



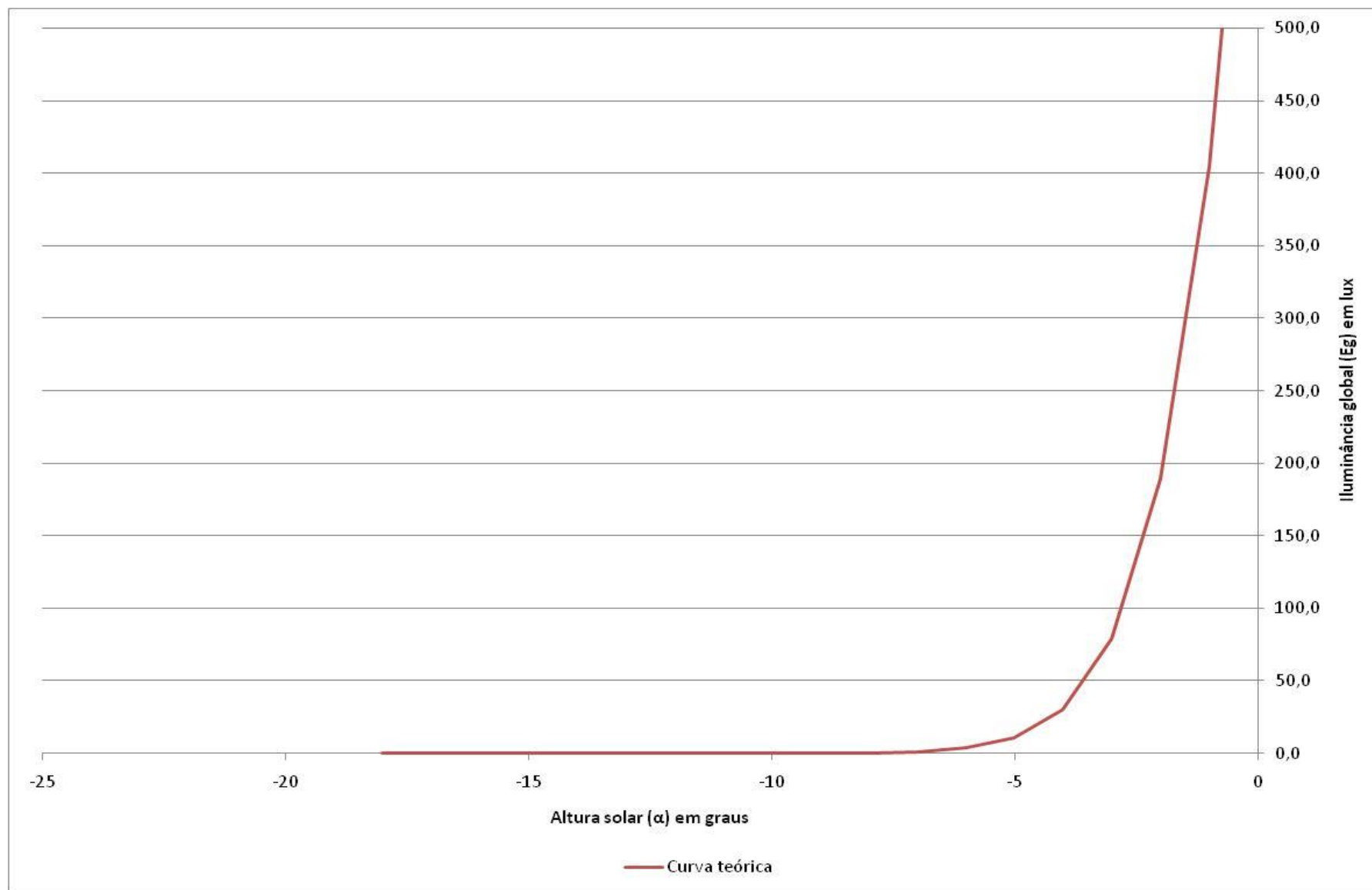


FIGURA 14 Curva Teórica de Iluminância para Belo Horizonte.

### 2.7.2. O Software Helios

O P&D 128 teve como um dos produtos o *software* Hélios, desenvolvido pela equipe da PUC Minas. O Hélios é um modelo computacional para a estimativa dos níveis de iluminância do céu e cálculo da duração do dia, baseado no cálculo geométrico da iluminância solar (valor teórico) ajustado com o valor pluviométrico (valor experimental). A partir das informações de localização geográfica do local (latitude e longitude) e da pluviosidade média mensal, o programa é apto a calcular a duração do dia para este dado local (PEREIRA *et al.*, 2009).

### 2.7.3. O Modelo de Perez

Perez *et al.* (1990) através do estudo de dados medidos de irradiância de dez localidades americanas e três localidades europeias, observaram que as variações da iluminância podem ser explicadas por três variáveis, além da geometria solar. São elas: o índice de claridade ( $\epsilon'$ ), índice de brilho ( $\Delta$ ) e conteúdo de vapor de água ( $w$ ). Assim, os autores propõem o seguinte modelo para o cálculo da eficácia luminosa:

$K_d = I_d (a_i + b_i w + c_i \cos \theta_z + d_i \ln \Delta)$	(Equação 20)
--	--------------

onde:

$I_d$  é a iluminância difusa;

$a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  e  $d_i$  são coeficientes tabelados para cada uma das 8 faixas de  $\epsilon'$  com que os autores trabalham;

$w$  é o conteúdo de vapor de água;

$\theta_z$  é o ângulo zenital.

Apesar de ser um modelo para o dia inteiro, de aplicação fora da faixa de interesse, o modelo proposto por Perez *et al.* (1990) foi o primeiro e único a considerar o conteúdo de vapor de água para o cálculo da disponibilidade de luz natural.

## 2.8. Tratamento estatístico de dados

### 2.8.1. Análise descritiva dos dados

Previamente ao emprego dos dados medidos pela estação para o modelamento, é imperativo que estes sejam avaliados, balizados por um controle em que valores espúrios ou *outliers*, definidos como dados extremos que não correspondem ao comportamento médio do grupo de dados, sejam facilmente identificados e posteriormente eliminados do conjunto de dados.

A etapa inicial do tratamento estatístico consiste na organização, apresentação, representação e síntese dos dados, para, então, realizar o tratamento em si. A esta etapa inicial do tratamento é dado o nome de estatística descritiva, que fornecerá o resumo do comportamento do conjunto de dados.

As *medidas de tendência central* representarão o valor em torno do qual os dados tendem a agrupar-se, com maior ou menor frequência. A média é o quociente da divisão da soma dos valores da variável pelo número de observações. Já a mediana é o valor do meio do conjunto de observações, após a amostra ordenada em ordem crescente. E por último, a moda é o valor que apresenta maior frequência em um conjunto de observações (SOARES *et al.*, 1991).

As *medidas de dispersão* apontam o grau de dispersão dos valores observados em relação ao valor representativo. A amplitude é a medida mais simples entre as demais, sendo a diferença entre o maior e o menor valor do conjunto. A variância é a média dos quadrados dos desvios das observações em relação à média da amostra. E o desvio padrão é a raiz quadrada da variância (SOARES *et al.*, 1991).

As *medidas de posição*, como o próprio nome diz, indicam a posição de uma dada observação dentro do conjunto de observações. Utilizaram-se os valores mínimos e máximos do conjunto de observações, e o percentil. O percentil de ordem  $k$  (onde  $k$  é qualquer valor entre 0 e 100), denotado por  $P_k$ , é o valor tal que  $k\%$  dos valores do conjunto de dados são menores ou iguais a ele. Os percentis de ordem 25, 50 e 75 dividem o conjunto de dados em

quatro partes com o mesmo número de observações. Assim, estes três percentis recebem os nomes de quartis – primeiro quartil ( $Q_1$ ), segundo quartil ( $Q_2$ ) equivalente à mediana e terceiro quartil ( $Q_3$ ), respectivamente (SOARES *et al.*, 1991).

### 2.8.2. O *boxplot*

O *boxplot* é um gráfico indicado para a identificação de valores discrepantes (*outliers*) do conjunto de dados.

Na elaboração do *boxplot*, utilizam-se os percentis mediana, primeiro e terceiro quartis, pouco influenciáveis por valores extremos. É também necessário conhecer os valores mínimo e máximo do conjunto de dados. O *boxplot* é constituído por uma caixa transposta por uma linha, elaborada usando um eixo com uma escala de valores. O fundo da caixa é assinalado na escala de valores representando o primeiro quartil ( $Q_1$ ). O mesmo é feito para o topo da caixa, marcando a altura do terceiro quartil ( $Q_3$ ). Uma linha é traçada dentro da caixa na altura da mediana. A altura da caixa é dada pela diferença do terceiro quartil pelo primeiro quartil ( $Q_3 - Q_1$ ), denominada distância interquartílica (DQ). É então estabelecido um valor máximo e um valor mínimo, máximo de 1,5 vez a altura da caixa (DQ). Os valores existentes fora destes limites serão considerados *outliers*, sejam eles provenientes de erros no processo de coleta de dados ou de processamento de dados, sejam valores corretos que, por alguma razão, são bastante diferentes dos demais valores (FIGURA 15).

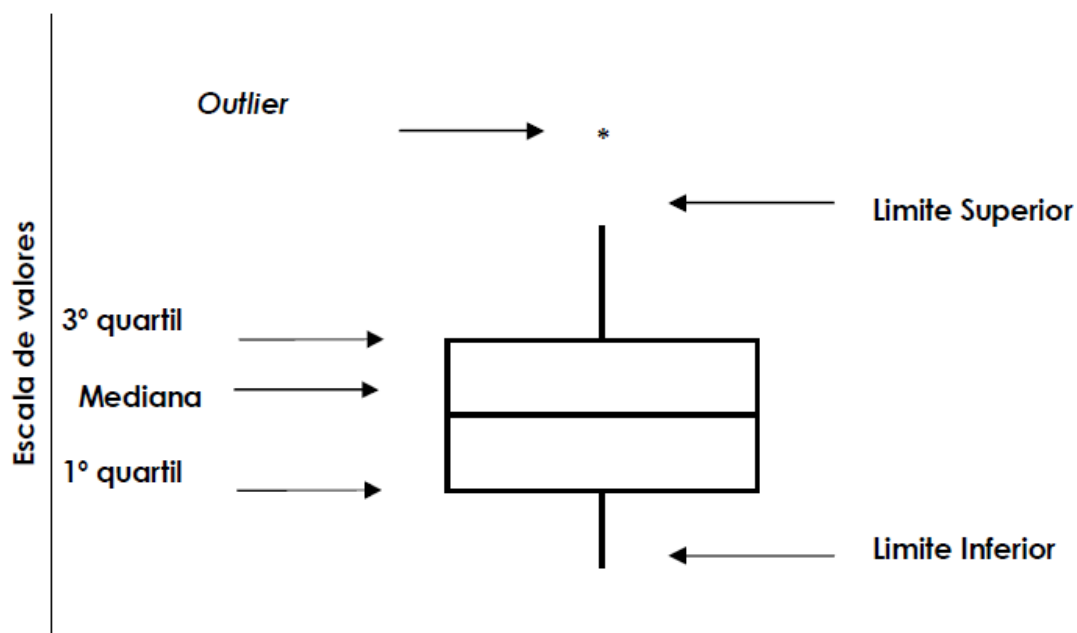


FIGURA 15 Representação esquemática do *boxplot* (vertical).

Fonte: Reis e Reis, 2002

### 2.8.3. Indicadores de desempenho de modelos

Os indicadores de desempenho de modelos são utilizados para avaliar o ajuste do modelo matemático desenvolvido.

O desvio médio MBD indica a tendência do modelo à subestimação (valores de MBD negativos) ou à superestimação (valores de MBD positivos), sendo seu valor ideal zero. Sua unidade é a porcentagem (%). O MBD pode ser calculado através da seguinte equação:

$$MBD = 100 * \frac{\frac{\sum(y_i - y)}{n}}{\frac{\sum(y)}{n}} \quad (\text{Equação 21})$$

Onde:

$y_i$  é o valor predito;

$y$  é o valor medido;

$n$  é o número de medidas consideradas.

Já o desvio quadrático médio (RMSD) é uma medida de desvio dos valores preditos pelos modelos em relação aos valores medidos, dada em %. O RMSD deve conter sempre um valor positivo e quanto mais próximo de zero, maior a precisão do modelo. O RMSD pode ser dado por:

$RMSD = 100 * \frac{\sqrt{\frac{\sum (y_i - y)^2}{n}}}{\sum \frac{y}{n}}$	(Equação 22)
---	--------------

Onde:

$y_i$  é o valor predito;

$y$  é o valor medido;

$n$  é o número de medidas consideradas.

E, por fim, o coeficiente de correlação ( $r$ ) pode ser descrito como uma medida do grau de dependência da variável dependente  $y$  em relação às variáveis independentes  $x$ , situado entre -1 e 1, dado por:

$r = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}}$	(Equação 23)
--	--------------

Onde:

$x$  é a variável independente;

$\bar{x}$  é o valor médio da variável independente;

$y$  é a variável dependente;

$\bar{y}$  é o valor médio da variável dependente.

Uma variação do  $r$ , também usado para a avaliação de desempenho dos modelos, é o coeficiente de determinação ( $r^2$ ), que nada mais é do que o quadrado do coeficiente de correlação. O valor  $r^2$  pode ser entendido como a proporção da variância em  $y$  que pode ser

explicada pela variância em  $x$ . Valores próximos a 1,0 indicam que o modelo explica a quase totalidade dos dados originais, em oposição, valores próximos a zero indicam que o modelo se mostra pouco capaz de explicar os dados originais.

No caso de existir mais de uma variável no modelo, o que ocorre nas regressões múltiplas, o recomendável é a avaliação dos modelos sob o *r-ajustado* (ou *r-adjusted*), uma vez que há sempre um aumento no valor de  $r^2$  ao se adicionar uma variável ao modelo, ocorrendo a necessidade de se ajustar este indicador, levando então em conta quantas variáveis existem no modelo.

## **2.9. Disposições finais**

A maior parte da bibliografia existente sobre iluminação natural faz referência ao período em que o sol encontra-se acima da linha do horizonte, havendo uma certa dificuldade em encontrar parâmetros climáticos para a classificação de condição de céu no período crepuscular. Dentre a literatura de referência estudada acredita-se não haver ainda um índice capaz de descrever de forma adequada a condição de céu para esse período. Mesmo aqueles índices que utilizam apenas da parcela difusa da iluminância, tais como  $K_d$  e  $\Delta$ , apresentam algumas limitações, sendo então necessário o desenvolvimento de maiores informações para o período crepuscular.

Pela revisão bibliográfica pode-se constatar haver atualmente dois modelos capazes de prever a disponibilidade de luz natural no período crepuscular, sendo eles o modelo teórico proposto por Seidelman e o Helios desenvolvido pela equipe da PUC Minas.

### 3 METODOLOGIA

No presente capítulo será explicitada a metodologia adotada para a descrição das características luminosas do céu para a cidade de Belo Horizonte no período crepuscular e para a estimativa da duração da noite, elaborados a partir dos dados medidos pela Estação de Medição de Iluminação Natural, EMIN-BH.

Para tal, o método empregado foi o indutivo, método esse que propõe ser factível a compreensão da realidade a partir da análise de fatos, ou seja, neste trabalho admitiu-se a inferência do comportamento da luz natural durante o crepúsculo, baseado nos dados coletados pela EMIN-BH pelo período de um ano.

Como técnica, utilizou-se a medição de dados físico-ambientais através da EMIN-BH e da estação meteorológica PUC-Minas/CEMIG; tratamento estatístico dos dados medidos para o conhecimento do seu comportamento; e modelagem matemática para predição da quantidade de luz disponível no período de interesse.

A metodologia adotada baliza o tipo de dados a serem incorporados para o desenvolvimento dos modelos matemáticos para a caracterização das grandezas relativas à iluminação natural e a classificação usada para a separação de céus segundo seus tipos (claro, encoberto e parcialmente encoberto). A metodologia pode ser dividida em etapas, como sumariza a FIGURA 16, através de um fluxograma.



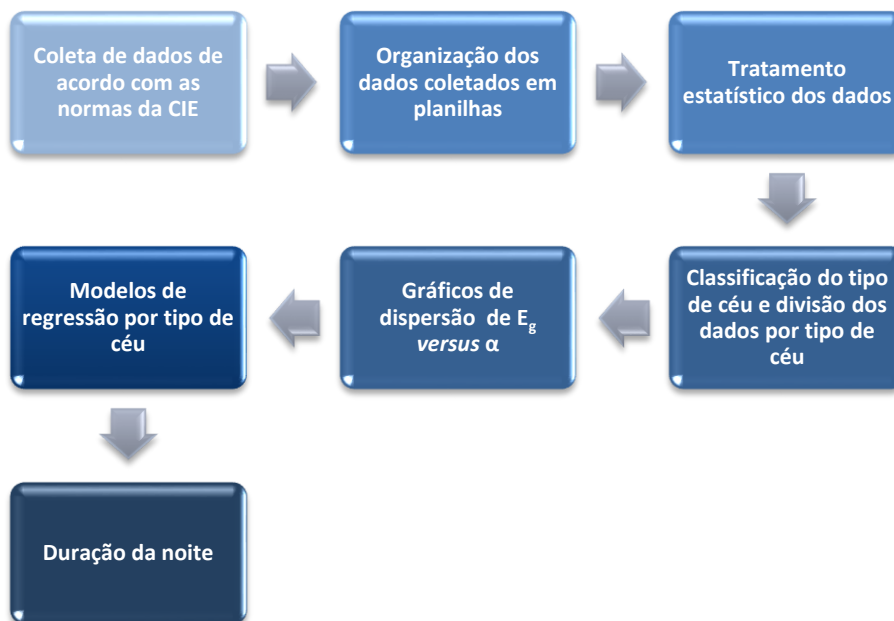


FIGURA 16 Fluxograma esquemático da metodologia adotada

Nos próximos itens será detalhada cada uma das etapas de trabalho.

### 3.1. Coleta de dados: a Estação de Medição de Iluminação Natural de Belo Horizonte (EMIN-BH)

Os dados utilizados no presente trabalho são provenientes da Estação de Medição de Iluminação Natural de Belo Horizonte (EMIN-BH). A EMIN-BH está fixada na cidade de Belo Horizonte no prédio do GREEN SOLAR (Centro Brasileiro para o Desenvolvimento em Energia Solar Térmica), no Campus da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, PUC-MG. A EMIN-BH, de acordo com o padrão IDMP, é classificada como uma estação de Classe Geral, medindo dados de iluminância global horizontal, iluminância difusa horizontal, irradiância difusa horizontal e iluminâncias verticais nas direções Norte, Sul, Leste e Oeste.

A estação foi montada em 2003, com recursos obtidos através do P&D 128, Convênio PUC-MG, UFMG e CEMIG, recursos esses obtidos através do convênio ECV 939/2003 realizado entre a Eletrobrás e o LABCON/UFMG e complementada através do convênio P&D 128 –

Estudo da Disponibilidade de Luz Natural em Belo Horizonte como Base para Programação da Iluminação Pública Artificial Noturna, entre a CEMIG, PUC-MG e UFMG (gerenciado na UFMG pela FUNDEP, Projeto n° 7006). Também foram empregados recursos do Projeto FAPEMIG TEC 1312 para a compra de equipamentos que compõem a estação.

A EMIN-BH é a segunda estação de medição de luz natural em operação do país, sendo a primeira a EMIN-Floripa. A EMIN-BH realizou as primeiras medições de forma sistemática no ano de 2006 com a finalidade de realizar testes preliminares para ajustes e consolidação da metodologia proposta, havendo entrado em funcionamento definitivo mediante dados confiáveis a partir de julho de 2007.

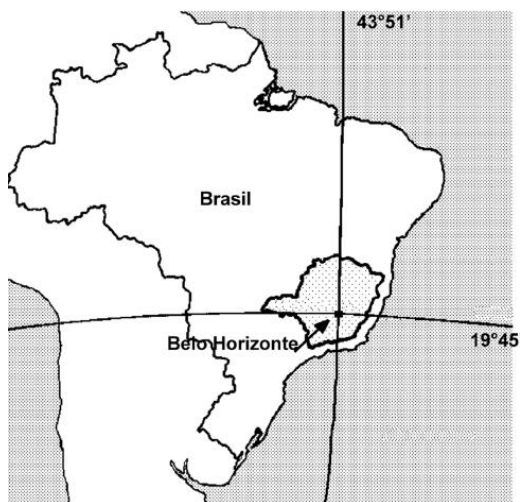
Outras variáveis utilizadas, como a temperatura e a umidade relativa para o cálculo do conteúdo de vapor de água, foram obtidas através da estação meteorológica PUC-MINAS/CEMIG, localizada também no prédio do GREEN SOLAR, junto à EMIN-BH. Já os dados de horas de insolação mensal foram obtidos a partir das Normais Climatológicas (BRASIL, 1992), uma vez que não são medidos na estação meteorológica PUC-MINAS/CEMIG.

### 3.1.1. Localização

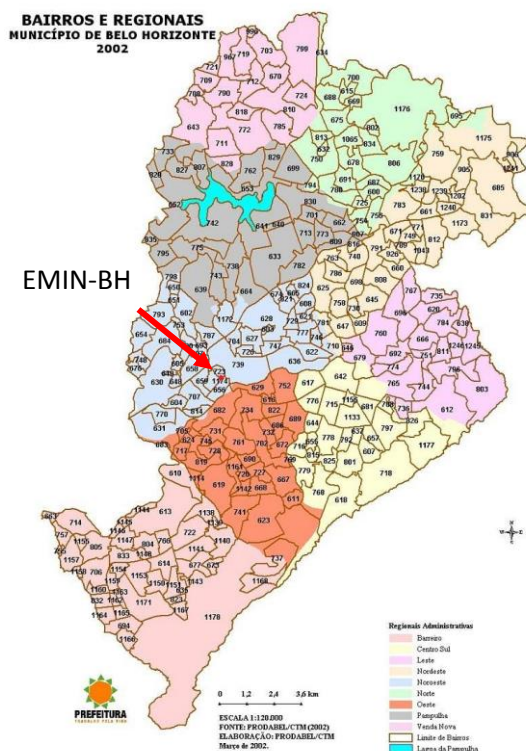
A EMIN-BH está instalada no prédio do GREEN SOLAR (Centro Brasileiro para o Desenvolvimento em energia Solar Térmica), no Campus da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, PUC-MG, região noroeste de Belo Horizonte, em um bairro predominantemente residencial e de adensamento médio.

A cidade de Belo Horizonte está delimitada pelas latitudes 19°46' e 20°03' Sul e pelas longitudes 43°51' e 44°03' Oeste. O clima da cidade, segundo a classificação climática de Köppen, caracteriza-se como *subtropical úmido*, Cwa, contudo apresenta características de clima tropical de altitude, com estações secas prolongadas durante o período de inverno (entre abril e setembro) e com períodos úmidos no verão (outubro e março). A temperatura média ocorre em torno de 21,1°C e no que se refere à umidade relativa, a média anual é de 77,3% e a normal anual de precipitação representa um total de 1491,3 mm, sendo mais

frequentes chuvas durante os meses de outubro a março. O mês mais chuvoso é dezembro (350,4 mm) e o mais seco é junho (13,0 mm) (BRASIL, 1992).



**FIGURA 17** Localização de Belo Horizonte no Brasil.  
 Fonte: ASSIS, 1991



**FIGURA 18** Mapa das cidades de Belo Horizonte por regionais.

Fonte: Prefeitura Municipal de Belo Horizonte.  
 Disponível em: <<http://www.pbh.gov.br>>. Acesso em: 14 março 2010



**FIGURA 19** Entorno da EMIN-BH em um raio de 800m.  
 Fonte: Google Maps



**FIGURA 20** Entorno imediato da EMIN-BH.  
 Fonte: Google Maps

Situada a 19,6° de latitude Sul e a 43,56° Oeste de longitude, a uma altitude de 918 m, a estação EMIN-BH atende às exigências da CIE-108/1994 (*Guide to Recommended Practice of Daylight Measurement*), conforme será descrito no item 3.1.4.

### 3.1.2. Grandezas Medidas

As medições de iluminâncias e irradiâncias da EMIN-BH encontram-se no padrão das estações de Classe Geral da CIE, quais sejam:

- Iluminância global ( $E_g$ ) e iluminância difusa ( $E_d$ ) em plano horizontal desobstruído;
- Iluminâncias verticais nas direções Norte ( $E_n$ ), Sul ( $E_s$ ), Leste ( $E_e$ ) e Oeste ( $E_w$ );
- Irradiância global ( $I_g$ );
- Irradiância difusa medida com anel de sombreamento ( $I_{dr}$ ) e medida com disco ( $I_{dd}$ );
- Irradiância vertical nas direções Norte ( $I_n$ ), Sul ( $I_s$ ), Leste ( $I_e$ ) e Oeste ( $I_w$ ).

Os dados de iluminância e irradiância foram coletados diariamente pela estação de agosto de 2007 a novembro de 2008, em intervalos de 1 minuto. Esses dados são armazenados em arquivos de texto e enviados pela equipe GREEN SOLAR para o LABCON/UFMG, onde os dados foram devidamente tratados.

Os dados medidos pela EMIN-BH podem ser divididos em dois grupos: dados de dia inteiro e dados do crepúsculo. A diferença não consiste no modo como as medições foram realizadas, mas nas faixas de medição, uma vez que no período crepuscular a intensidade luminosa é bastante inferior aos outros períodos ao longo do dia, não podendo assim ser utilizados os mesmos sensores para ambos os períodos. Os dados de iluminância global foram medidos por um sensor específico para faixas mais baixas (de 0 lux a aproximadamente 400 lux, não ultrapassando os 1000 lux). Já os dados de irradiância difusa ( $I_d$ ) foram medidos pelos piranômetros em faixas mais altas que englobam todo o período de recebimento de radiação solar pela superfície terrestre. Apesar da diferença na faixa de medição, ambas

variáveis foram coletadas pelo período de agosto de 2007 a novembro de 2008, em intervalos de 1 minuto.

A avaliação da qualidade metrológica dos dados de iluminância medidos durante o crepúsculo local pela EMIN-BH foram realizadas por Arreguy (2008). Segundo a autora, o valor da incerteza estimado foi da ordem de 10% do valor medido, significando um impacto máximo em relação aos horários de ocorrência dos valores de iluminância de interesse (20 lux e 80 lux) de 2 (dois) minutos, ocasionando assim uma variação máxima provável de 4 (quatro) minutos.

Os dados coletados de  $E_g$  no período de agosto de 2007 a julho de 2008 foram utilizados para o desenvolvimento dos modelos de regressão. De agosto de 2008 a novembro de 2008, os dados coletados foram empregados para a análise estatística do comportamento dos modelos desenvolvidos. Souza (2004) recomenda a utilização de 1 ano de dados medidos para o desenvolvimento dos modelos e mais um ano para a análise estatística dos modelos. Todavia, em dezembro de 2008, com o término do Projeto P&D 128, a estação foi desativada por falta de pessoal técnico e capacitado para sua operação e manutenção.

Os dados de irradiância difusa foram utilizados para o cálculo do índice de brilho ( $\Delta$ ), conforme a EQUAÇÃO 13, apresentada na página 45 desta dissertação.

As variáveis coletadas pela estação PUC-Minas/CEMIG referem-se à temperatura média ( $^{\circ}\text{C}$ ) e à umidade relativa (%), para o período de agosto de 2007 a julho de 2008, em intervalos de 10 em 10 minutos, durante todo o dia. Os dados de temperatura e umidade foram aplicados no cálculo do conteúdo de vapor de água ( $w$ ), conforme especificado na EQUAÇÃO 15, na página 52.

A altura solar ( $\alpha_s$ ) utilizada foi o valor calculado minuto a minuto, a partir da EQUAÇÃO 5 apresentada na página 36.

### 3.1.3. Equipamentos

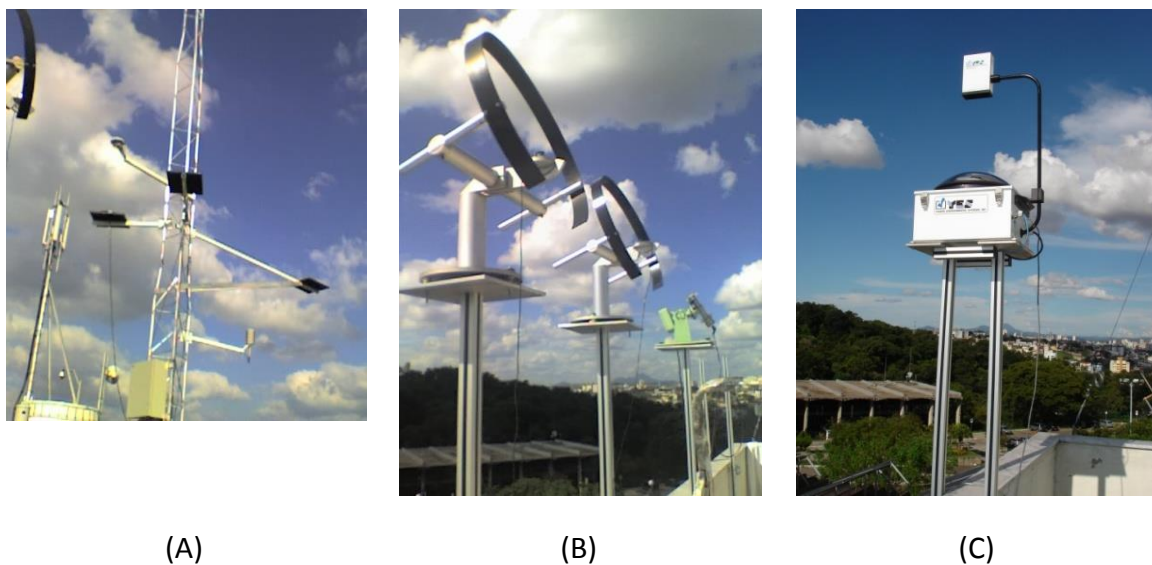
A EMIN-BH é composta por um conjunto básico de sensores fotométricos LI-210SZ para medição de iluminância global e difusa horizontal, e sobre plano vertical nas orientações norte, sul, leste e oeste. Piranômetros LI-200SZ fazem as medições de irradiâncias sobre os planos verticais norte, sul, leste e oeste. As leituras de radiação horizontal difusa e global são feitas por piranômetros Eppley. A irradiância solar direta é medida por um pireliômetro Eppley com rastreador Solar Eppley proveniente do Projeto Fapemig TEC 1312.

Os sinais emitidos pelos sensores são lidos e armazenados por um aparelho para aquisição de dados, um datalogger Campbell CR23 4M.

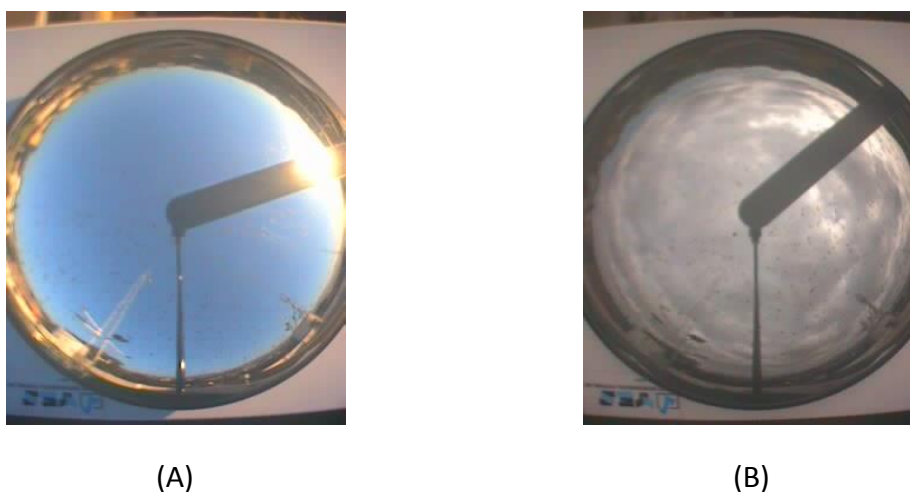
No caso da EMIN-BH foi adicionado um conjunto de seis fotocélulas, instalado para realizar a medição de baixos níveis de iluminâncias para o período crepuscular (uma horizontal para iluminância global, outra para difusa e mais 4 verticais), uma vez que não se pode medir níveis de iluminância de ordem tão distintas, como ao meio do dia e durante o nascer e o pôr do sol, com uma mesma resolução, já que o fundo de escala do aparelho de aquisição de dados não o permite.

Para o registro automatizado das condições de céu utilizou-se um imageador de céu da marca Yankee.

O ANEXO 01 descreve em detalhe os aparelhos que compõem a EMIN-BH, assim como seus suportes e conexões.



**FIGURA 21** Estação fixa EMIN-BH. Em (A) torre com os sensores de temperatura, umidade relativa, velocidade e direção do vento, radiação solar global e três plataformas com os sensores de iluminância norte, sul, leste e oeste; em (B) os sensores de radiação solar e iluminância difusas e ao fundo o pireliômetro com rastreador Eppley; em (C) o imageador de céu.



**FIGURA 22** Imageamento de céu de diferentes coberturas de céu: (A) fotografia de céu sob condição de céu claro e (B) fotografia de céu sob condição de céu encoberto.

### 3.1.4. Estudo da Obstrução do Entorno da EMIN-BH

A localização da estação é fator determinante na qualidade dos dados que serão obtidos, sendo assim a norma CIE-108/1994 estabelece algumas condições quanto à escolha do local para instalação da estação. De acordo com esse documento estabelece-se que deve haver obstrução da luz refletida do solo e abaixo do nível do horizonte do sensor.

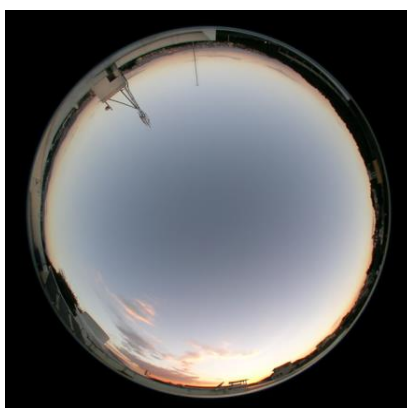
*“(...) os sensores para medição de iluminância e irradiância vertical nas direções norte, sul, leste e oeste devem ser protegidos da refletância da luz do Solo por uma tela preta fosca que forme um horizonte artificial no nível do centro da cabeça de medição do sensor. A distância perpendicular entre o sensor e a tela deve ser de no mínimo 10 vezes o diâmetro da cabeça de medição do sensor. A luz refletida para cima dentro do horizonte artificial, deve ser minimizada usando-se persianas ou colméias preto-foscas ou algo similar” (CIE, 1994).*

Há também que se verificar a presença de obstruções do entorno da estação. Segundo CIE (1994), os ângulos máximos de obstruções que não interferem na medição da iluminação em um determinado ponto se caracterizam por:

*“As obstruções contínuas como prédios adjacentes e árvores não devem obstruir mais que 4,6° acima do horizonte. Uma obstrução contínua de 4,6° reduz em 10% a iluminância em superfícies verticais sob céu isotrópico. Em qualquer setor de  $\frac{1}{4}$  de céu (por exemplo, entre norte e leste) o ângulo total de obstruções não deve exceder 0,13 estereorradianos e preferencialmente ser bastante menor que isso.” (CIE, 1994)*

Observa-se que no caso da estação de Belo Horizonte, as obstruções contínuas são inferiores a 4,6° em relação ao horizonte. No entanto, os ângulos de obstrução em setores de  $\frac{1}{4}$  céu ultrapassam o valor indicado pela norma de 0,13 estereorradianos, o que corresponde a aproximadamente 7,45°.

Com relação à estação EMIN-BH, na porção leste da hemisfera (metade da esfera celeste dividida pelo horizonte), representada na FIGURA 28, há uma obstrução correspondente a 11° e na porção sul uma obstrução de 17° e outra de 13°, que somadas representam 30°, como mostram as FIGURA 23 e 28.



**FIGURA 23** Foto do pôr-do-Sol tirada com câmera digital acoplada à lente olho-de-peixe.  
**Fonte: Acervo Green-Puc, 25/04/2006**





FIGURA 24 Vista do entorno da estação a leste.



FIGURA 25 Vista do entorno da estação a oeste.



FIGURA 26 Vista do entorno da estação a norte.



FIGURA 27 Vista do entorno da estação a sul.

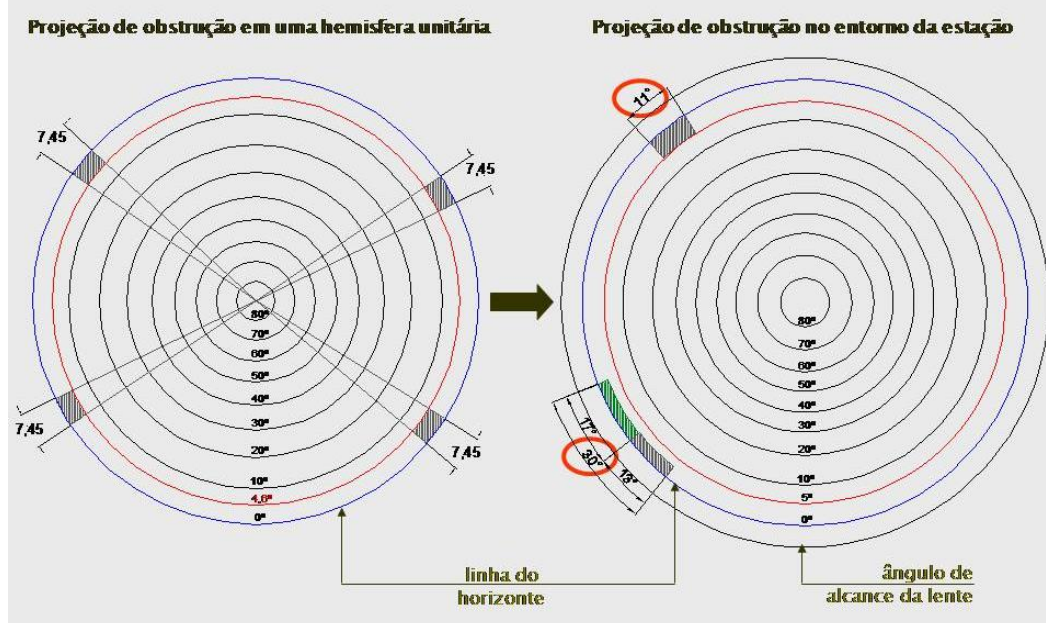


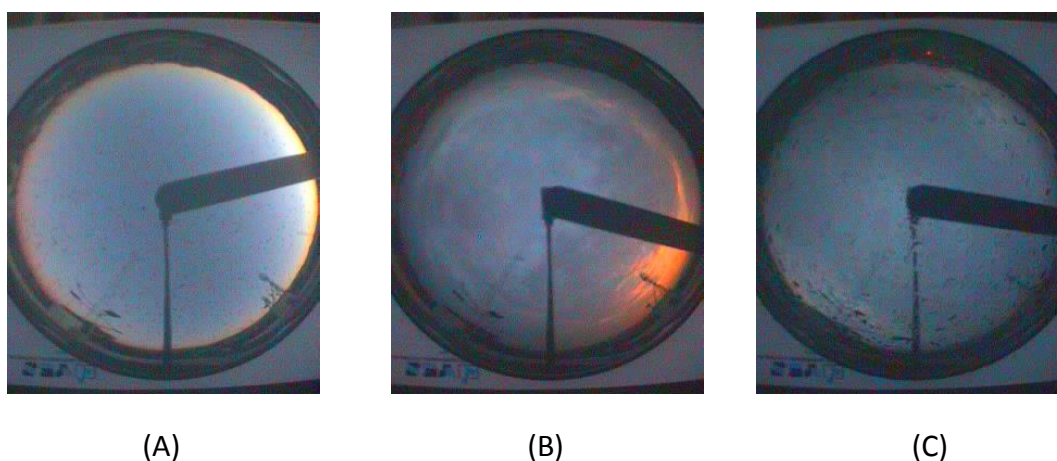
FIGURA 28 Projeção de obstrução em uma hemisfera unitária e projeção de obstrução no entorno da estação.

No entanto, apesar do ângulo de obstrução por setores ser um pouco superior ao permitido, observa-se que a área de entorno da EMIN-BH caracteriza-se por uma baixa obstrução da abóbada celeste (FIGURA 23), procurando reduzir ao máximo a interferência de

componentes de reflexão externa, uma vez que a iluminação recebida em um dado ponto depende fundamentalmente de parâmetros relativos ao entorno e das propriedades luminosas deste entorno.

### 3.2. Caracterização dos tipos de céu

A caracterização dos tipos de céu para separação dos dados medidos seguiu a classificação explicitada na NBR 15.215-2 (ABNT, 2005 B). Para a avaliação do tipo de céu, foram utilizados fotos do céu obtidas pelo imageador instalado na EMIN-BH, coletadas a cada 5 minutos durante a alvorada e ocaso. Através do registro das fotos, foi analisada a proporção de recobrimento da abóbada celeste por nuvens, conforme a classificação da ABNT (2005 B) e o tipo de céu designado.



**FIGURA 29** Classificação dos tipos de céu conforme a ABNT: (A) céu claro; (B) céu parcialmente encoberto; (C) céu encoberto, no crepúsculo.

*Fonte:EMIN-BH*

Em decorrência da inexistência de luz direta no período considerado, a maioria dos parâmetros climáticos para parametrização do tipo de céu não puderam ser adotados, sendo, por isso, adotada a classificação dos tipos de céu através de processo visual.

### 3.3. Organização dos dados medidos

Os dados originais foram enviados pela equipe do GREEN SOLAR, da PUC-Minas, em arquivos em formato de texto (\*.txt). Como o processo de tratamento de dados se deu no *software* Excel® 2007, os arquivos em formato “\*.txt” foram importados para este, para sua posterior organização.

Em planilha Excel®, os dados foram organizados e rearranjados de forma a corresponderem aos respectivos dia Juliano e a hora no formato “hora: minuto” convertida em minutos. Por exemplo, o dia 29/04 corresponde ao dia Juliano 119 e o minuto referente ao horário de 15:30 hs é o 930. Entretanto, para efeito de cálculo, o tratamento de dados deve ser realizado usando a hora solar verdadeira, com as devidas correções referentes à longitude aplicadas e a equação do tempo, em virtude da existência de uma divergência entre a hora local e a hora solar. Com os dados devidamente organizados e correspondentes a hora solar verdadeira e ao dia Juliano da medição, a altura solar correlata a cada medição foi calculada, conforme a **EQUAÇÃO 5**.

A partir da organização dos dados, estes foram agrupados de acordo com o tipo de céu: céu claro, céu parcialmente encoberto (ou intermediário) e céu encoberto.

### 3.4. Tratamento estatístico aplicado aos dados medidos

#### 3.4.1. *Análise descritiva aplicada aos dados medidos*

Após a organização dos dados, o reconhecimento do comportamento médio dos dados é facilmente promovido através da análise descritiva dos dados, conforme descrito no **item 2.8.3**, **página 57**.

Para realizar a análise descritiva dos dados, utilizou-se medidas de tendência central: média, mediana e modo; medidas de posição: percentis, valores máximos e mínimos da amostra; e medidas de dispersão: desvio padrão, variância da amostra e amplitude.

A análise descritiva foi realizada no Excel para o conjunto de dados, assim como para os dados agrupados por tipo de céu, sendo seus resultados apresentados no capítulo seguinte.

Os dados extremos, os *outliers*, foram identificados através do *boxplot*, método estatístico de representação gráfica com tal finalidade. Esta é uma etapa fundamental, visto que os *outliers*, tanto em x quanto em y, podem ter grande influência na estimação de modelos polinomiais. Estes *outliers* foram utilizados para identificar dias de comportamento atípico, como dias de tempestade, por exemplo, sendo excluídos não apenas o ponto extremo, mas todo o dia correspondente ao dado extremo. Para efeito do desenvolvimento dos modelos estabeleceu-se o limite máximo de dados até 160 lux, o dobro do valor máximo da faixa de interesse (entre 20 lux e 80 lux).

Esta análise foi realizada por tipo de céu, para o posterior desenvolvimento dos modelos.

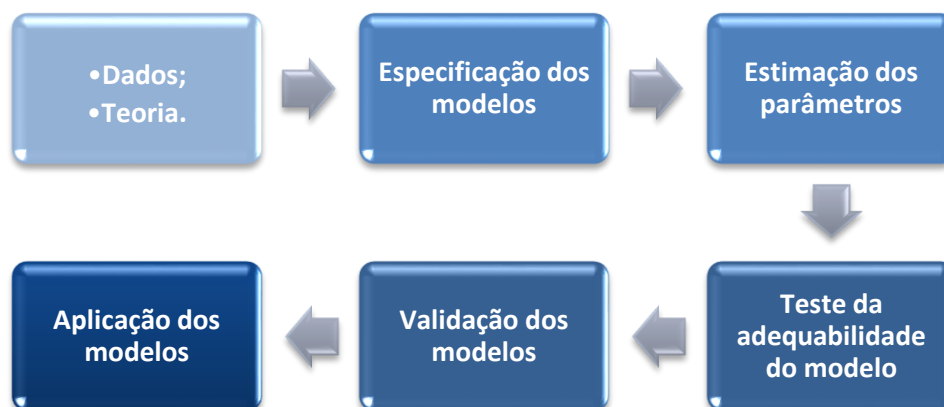
#### 3.4.2. *Análise de desempenho aplicada aos modelos*

Para a análise da precisão dos modelos obtidos a partir da regressão múltipla, utilizaram-se indicadores estatísticos de desempenho, quais sejam: o desvio médio MBD (*Mean Bias Deviation*), o desvio quadrático médio RMSD (*Root Mean Square Deviation*) e o coeficiente de correlação ( $r^2$ ).

### **3.5. Modelos de Iluminância versus Altura Solar para o nascer do Sol e o caso**

Os modelos de disponibilidade de luz natural durante o crepúsculo foram desenvolvidos no presente trabalho para a predição de iluminâncias de céu. Estes foram obtidos a partir de regressões múltiplas no programa Excel® 2007. O objetivo da análise de regressão é avaliar as relações de dependência, as quais são capazes de explicar o comportamento de uma variável dependente a partir do comportamento de uma (ou mais) variável (is)

independente(s). O nível de confiança adotado para todos os modelos é de 95%. A FIGURA 30 a seguir mostra de forma esquemática a metodologia para o desenvolvimento dos modelos de regressão.



**FIGURA 30** Fluxograma da metodologia adotada para desenvolvimento dos modelos de regressão.

Os modelos foram elaborados considerando cada condição de céu e as variáveis altura solar ( $\alpha$ ), índice de brilho ( $\Delta$ ) e o conteúdo de vapor de água ( $w$ ), assim como as variáveis ajustadas  $\alpha^2$ ,  $\alpha^3$ ,  $\alpha^4$ ,  $\alpha^5$ , investigando aquela que melhor descrevesse o comportamento da luz natural no período crepuscular, frente às variações das condições externas de luminosidade.

De acordo com Kimball (1916) e Muneer (2004), a iluminância decai progressivamente de maneira exponencial até a completa escuridão. Já Seidelman (2006) propõe um modelo logaritmo teórico para estimar os valores de iluminância. Deste modo, baseado na literatura, foram desenvolvidos neste trabalho modelos de regressão exponencial e, buscando um melhor ajuste, modelos polinomial.

O desempenho dos modelos foi testado perante a totalidade de dados, englobando todos os tipos de céu em um único modelo, e especificamente para cada um dos tipos de céu já abordados e descritos previamente: céu claro, céu intermediário e céu encoberto. É significativo ressaltar que, segundo Souza (2004), os modelos elaborados para um padrão

específico de céu tendem a resultar em um melhor desempenho que os modelos elaborados para todos as condições de céu, condição esta mais geral.

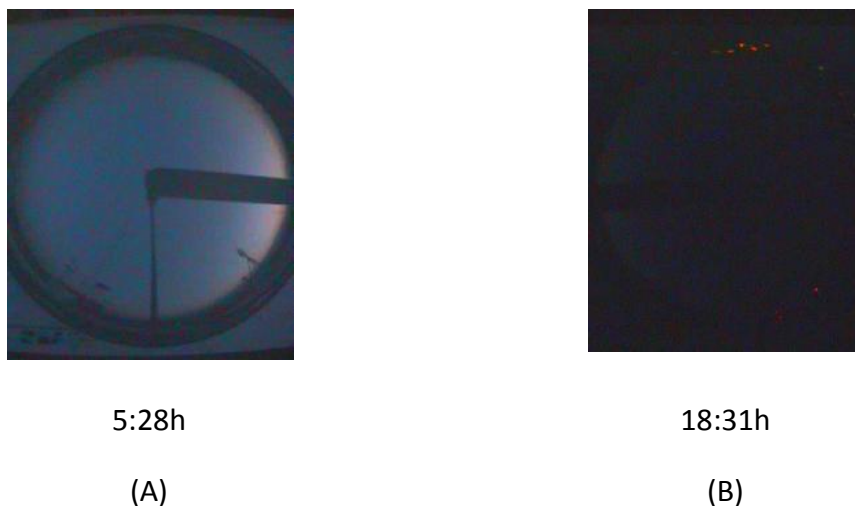
A adequabilidade do modelo foi testada através da qualidade do ajustamento utilizando-se os índices de desempenho; o teste  $F$  de significância conjunta dos parâmetros; o teste  $t$  de significância de parâmetros individuais; e, por último, o comportamento da forma da curva de tendência em relação ao conjunto de dados.

### **3.6. Análise da duração da noite em função dos modelos por tipos de céu e cálculo do tempo de iluminação artificial**

Para o estabelecimento dos períodos em que a iluminação pública deve permanecer acesa, foram realizadas as medições de dados de iluminância no período crepuscular pela estação no padrão IDMP; a partir da organização e tratamento dos dados foram desenvolvidos modelos de regressão para predição dos níveis de iluminância para o nascer e pôr do sol. Os referidos modelos foram desenvolvidos para cada tipo de céu e para a totalidade de dados, como previamente descrito.

Para avaliar a duração da noite, adotou-se como critério os níveis de iluminação descritos na norma NBR 5123 (ABNT, 1997) conforme a TABELA 01 apresenta no item 2.1.2 deste trabalho.

Entretanto, analisando visualmente as fotos captadas pelo imageador instalado na EMIN-BH, observou-se que o nível de iluminância de 3 lux é ainda muito baixo, sendo praticamente noite (FIG. 41).



**FIGURA 31** Fotos do imageador de céu claro nos horários de ocorrência dos níveis de iluminância de 3 lux no dia 01/10/2007: (A) pela parte da manhã às 05:28 hs; (B) pela parte da tarde às 18:31 hs.

Portanto, foi avaliado apenas a duração da noite para o intervalo entre 20 e 80 lux. Estabeleceu-se o limite de 160 lux (o dobro do valor limite de 80 lux) para os dados a serem utilizados nas regressões, uma vez que o objetivo é avaliar apenas o período crepuscular e, dentro deste, os limites de 20 lux e 80 lux.

A classificação dos tipos de céu médios predominantes para a cidade de Belo Horizonte baseou-se no método simplificado desenvolvido por Ferreira e Souza (2006), conforme explicitado no [item 2.5.1.5](#) deste trabalho. De acordo com o tipo de céu predominante em cada mês, aplicaram-se os modelos desenvolvidos para os respectivos tipos de céu.

Determinado o modelo a ser adotado, identificou-se a altura solar correspondente aos níveis de iluminância de 20 lux e de 80 lux em cada um dos modelos desenvolvidos e a coincidência destes valores de altura solar nos períodos do alvorecer e ocaso. Dos valores encontrados, extraíram-se médias mensais, que foram aproveitadas para identificar os horários limites médios e conseqüentemente, a duração da noite média mensal e a duração da noite média anual.

Os valores encontrados foram então comparados às estimativas de duração da noite decorrentes da medição e do modelo teórico, também já apresentado nas [páginas 54 e 55](#).

A seguir os resultados encontrados serão apresentados e discutidos.

## 4 RESULTADOS

No presente capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir das regressões para os modelos de iluminância global horizontal ( $E_g$ ) para a determinação de luz natural no crepúsculo, assim como os testes de desempenho dos modelos gerados. O modelo de melhor performance, seja para qualquer tipo de céu, como para condições específicas de tipo de céu, é adotado para o cálculo da duração da noite e, então, os valores encontrados comparados a valores medidos pela EMIN-BH para a validação do(s) modelo(s).

### 4.1. Apresentação do tratamento estatístico

A seguir serão apresentadas tabelas resumo da análise descritiva do conjunto de dados e por condição de céu.

TABELA 60

Análise descritiva dos dados para todo o conjunto de dados

$\alpha_s (^\circ)$		$E_g (lux)$	
Média	-3,74	Média	97,95
Mediana	-3,73	Mediana	37,89
Modo	-4,35	Modo	0,43
Desvio padrão	1,84	Desvio padrão	121,29
Variância da amostra	3,37	Variância da amostra	14711,52
Amplitude	8,86	Amplitude	499,57
Mínimo	-7,99	Mínimo	0,00
Máximo	0,87	Máximo	499,57
Percentil Q1	-5,21	Percentil Q1	5,82
Percentil Q3	-2,24	Percentil Q3	159,71
Contagem	7970,00	Contagem	7970,00



TABELA 61

Análise descritiva dos dados para céu claro

$\alpha_s$ (°)		$E_g$ (lux)	
Média	-3,83	Média	99,18
Mediana	-3,84	Mediana	44,72
Modo	-5,87	Modo	3,17
Desvio padrão	1,54	Desvio padrão	115,76
Variância da amostra	2,39	Variância da amostra	13400,08
Amplitude	6,00	Amplitude	498,15
Mínimo	-6,50	Mínimo	0,03
Máximo	-0,50	Máximo	498,18
Percentil Q <sub>1</sub>	-5,15	Percentil Q <sub>1</sub>	8,86
Percentil Q <sub>3</sub>	-2,52	Percentil Q <sub>3</sub>	161,03
Contagem	2641,00	Contagem	2641,00

TABELA 62

Análise descritiva dos dados de céu parcialmente encoberto.

$\alpha_s$ (°)		$E_g$ (lux)	
Média	-3,68	Média	98,01
Mediana	-3,67	Mediana	35,55
Modo	-4,35	Modo	0,43
Desvio padrão	1,94	Desvio padrão	123,95
Variância da amostra	3,77	Variância da amostra	15364,38
Amplitude	8,86	Amplitude	499,57
Mínimo	-7,99	Mínimo	0,00
Máximo	0,87	Máximo	499,57
Percentil Q <sub>1</sub>	-5,22	Percentil Q <sub>1</sub>	4,50
Percentil Q <sub>3</sub>	-2,10	Percentil Q <sub>3</sub>	159,94
Contagem	4719,00	Contagem	4719,00

TABELA 63

Análise descritiva dos dados de céu encoberto.

$\alpha_s$ (°)		$E_g$ (lux)	
Média	-3,02	Média	102,22
Mediana	-3,00	Mediana	28,54
Modo	-5,32	Modo	0,59
Desvio padrão	2,71	Desvio padrão	138,77
Variância da amostra	7,36	Variância da amostra	19257,39
Amplitude	10,75	Amplitude	499,13
Mínimo	-7,98	Mínimo	0,03
Máximo	2,76	Máximo	499,16
Percentil Q <sub>1</sub>	-5,26	Percentil Q <sub>1</sub>	2,40
Percentil Q <sub>3</sub>	-0,81	Percentil Q <sub>3</sub>	158,30
Contagem	589	Contagem	589

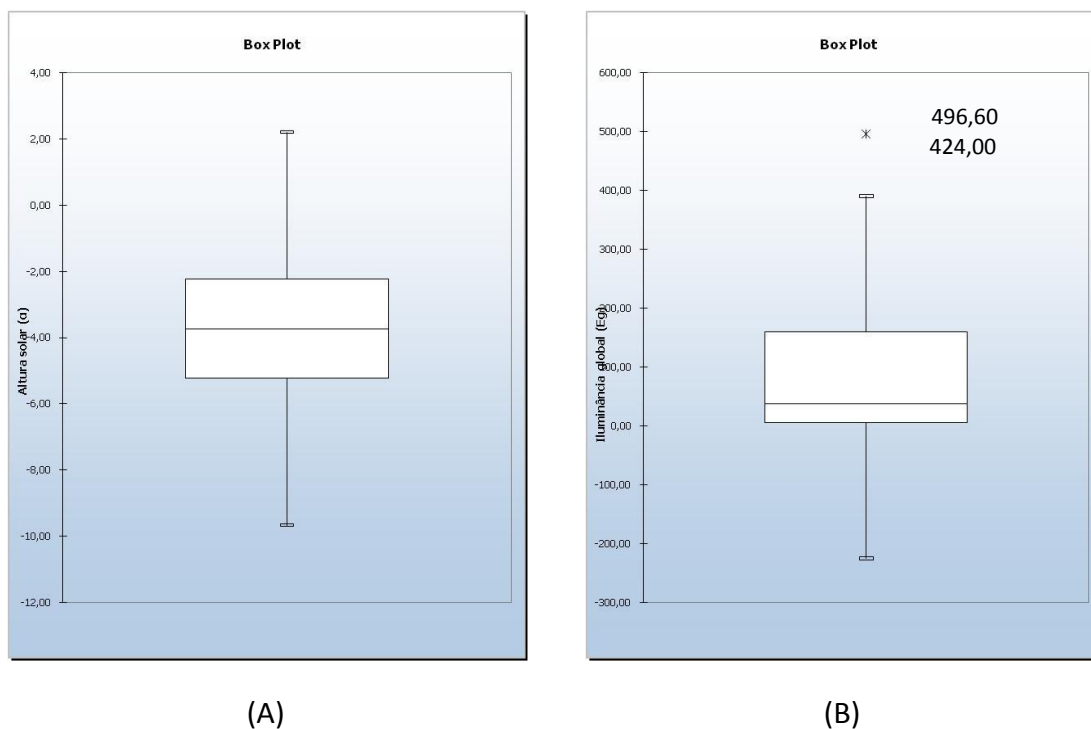
Na TABELA 12 a seguir é apresentado um resumo dos valores avaliados para gerar os gráficos por variável para cada tipo de céu e todos os tipos de céu.

TABELA 64

Valores utilizados para gerar os gráficos de *boxplot*.

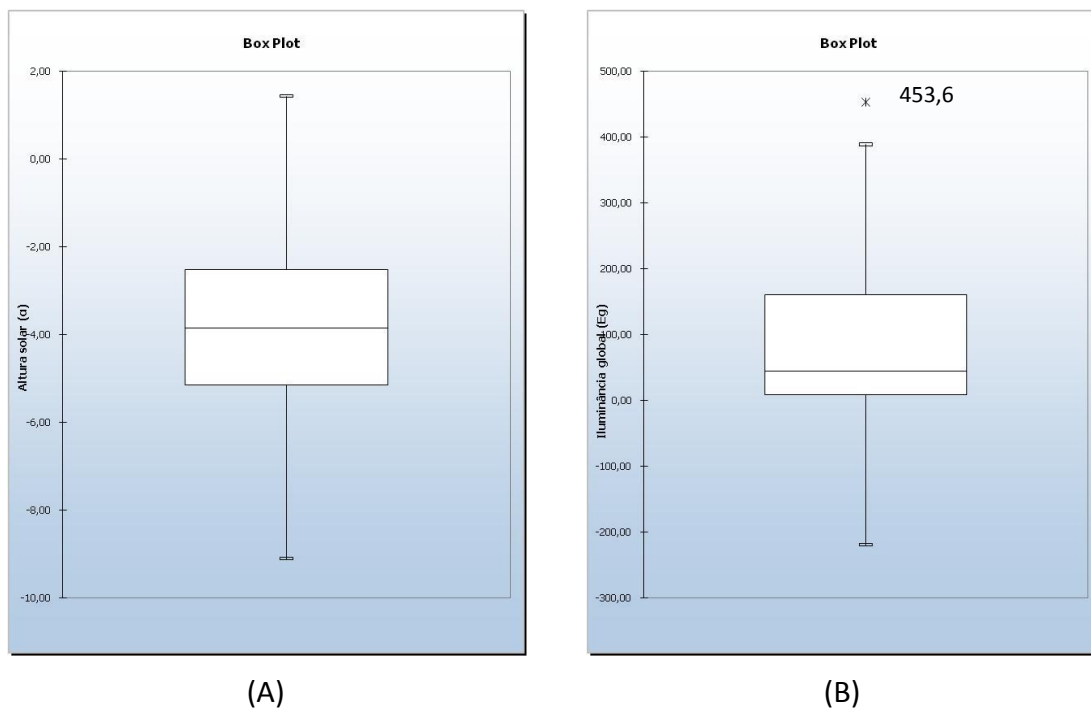
$\alpha_s$ (°)							
Todos tipos de céu		Céu Claro		Céu Parc. Encoberto		Céu encoberto	
Q3	-2,24	Q3	-2,52	Q3	-2,10	Q3	-0,82
Mediana	-3,73	Mediana	-3,84	Mediana	-3,67	Mediana	-3,00
Q1	-5,22	Q1	-5,15	Q1	-5,22	Q1	-5,26
DQ	2,97	DQ	2,64	DQ	3,13	DQ	4,44
Limite inf.	-9,67	Limite inf.	-9,11	Limite inf.	-9,91	Limite inf.	-11,91
Limite sup.	2,21	Limite sup.	1,44	Limite sup.	2,59	Limite sup.	5,83
$E_g$ (lux)							
Todos tipos de céu		Céu Claro		Céu Parc. Encoberto		Céu encoberto	
Q3	159,71	Q3	161,03	Q3	159,94	Q3	146,68
Mediana	37,89	Mediana	44,72	Mediana	35,55	Mediana	26,36
Q1	5,82	Q1	8,86	Q1	4,50	Q1	2,32
DQ	153,89	DQ	152,17	DQ	155,44	DQ	144,35
Limite inf.	-225,01	Limite inf.	-219,40	Limite inf.	-228,67	Limite inf.	-214,21
Limite sup.	390,54	Limite sup.	389,29	Limite sup.	393,10	Limite sup.	363,21

Para todo o conjunto de dados verificou-se que não há *outliers* para a variável altura solar e para a variável iluminância global valores acima de 390,54 são *outliers*, como mostra a FIGURA 32 a seguir.



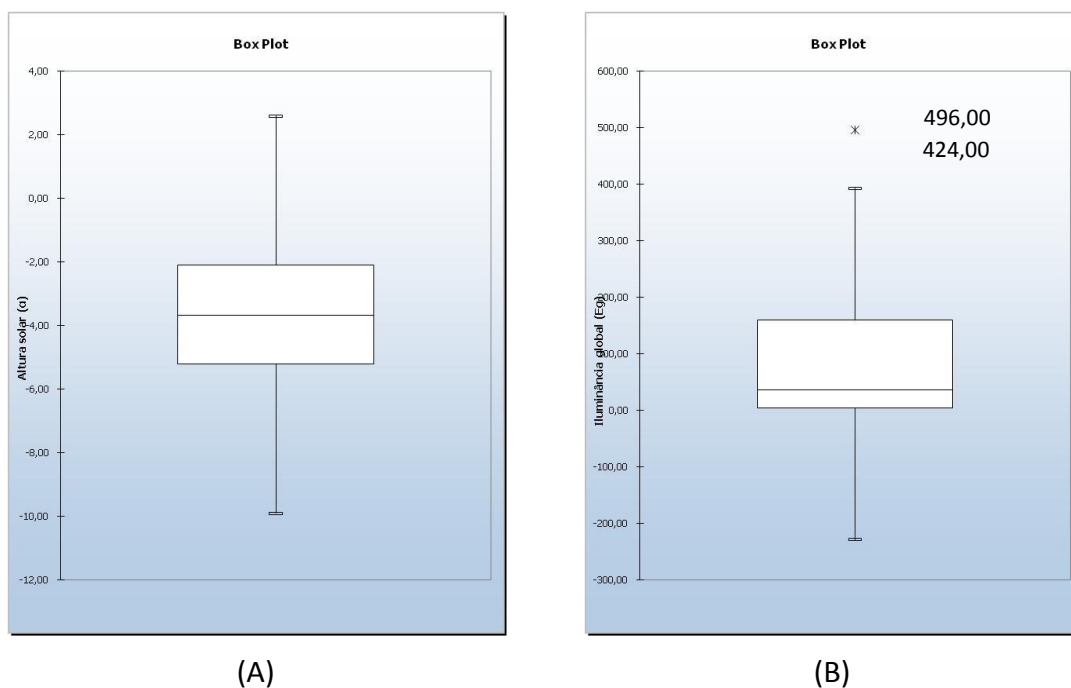
**FIGURA 32** Box-plot para os dados para todos os tipos de céu. Em (A) para a variável de altura solar e em (B) para a variável de iluminância global

Para os dados para a condição de céu claro verificou-se que não há *outliers* para a variável altura solar e para a variável iluminância global valores acima de 389,29 são *outliers*, como mostra a FIGURA 33 a seguir.



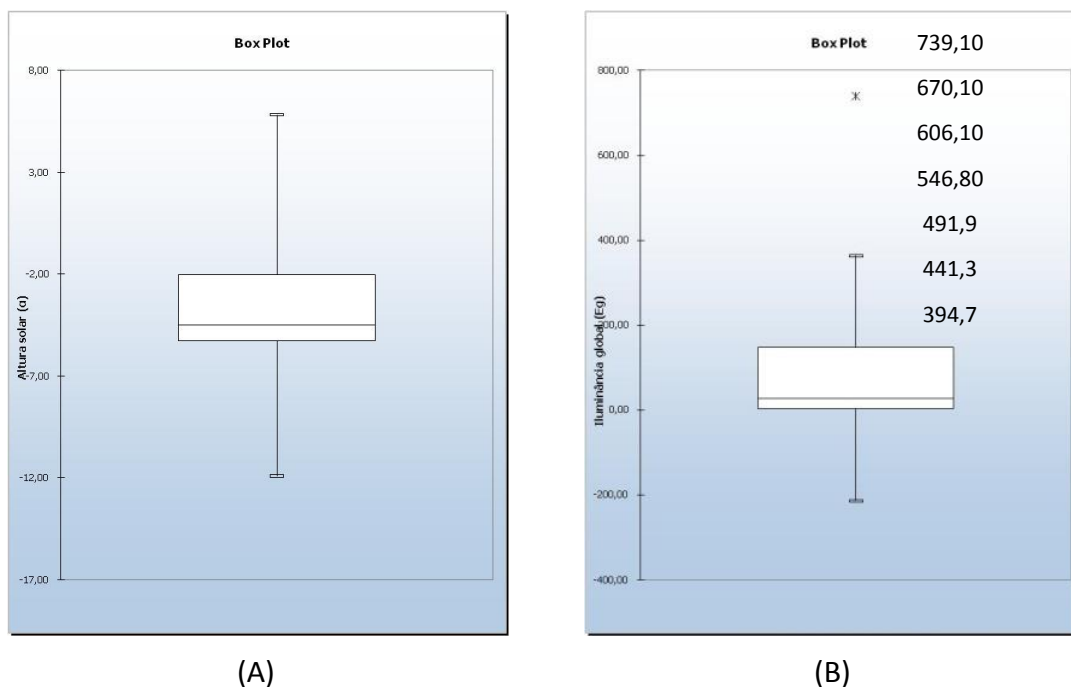
**FIGURA 33** Box-plot para os dados em condições de céu claro. Em (A) para a variável de altura solar e em (B) para a variável de iluminância global

Já para os dados para a condição de céu parcialmente encoberto verificou-se que não há *outliers* para a variável altura solar e para a variável iluminância global valores acima de 393,10 são *outliers*, como mostra a FIGURA 34 a seguir.



**FIGURA 34** Box-plot para os dados em condições de céu parcialmente encoberto. Em (A) para a variável de altura solar e em (B) para a variável de iluminância global.

E, por fim, para os dados para a condição de céu encoberto verificou-se que não há *outliers* para a variável altura solar e para a variável iluminância global valores acima de 363,21 são *outliers*, como mostra a FIGURA 35 a seguir.



**FIGURA 35** Box-plot para os dados em condições de céu encoberto. Em (A) para a variável de altura solar e em (B) para a variável de iluminância global.

Identificados os dados espúrios, estes serão excluídos do conjunto de dados para que possam ser aplicados para o desenvolvimento dos modelos de regressão.

A representação gráfica deu-se através de gráficos de dispersão para a totalidade de dados e para cada tipo de céu. O gráfico de dispersão é usado principalmente para a visualização da relação entre as variáveis.

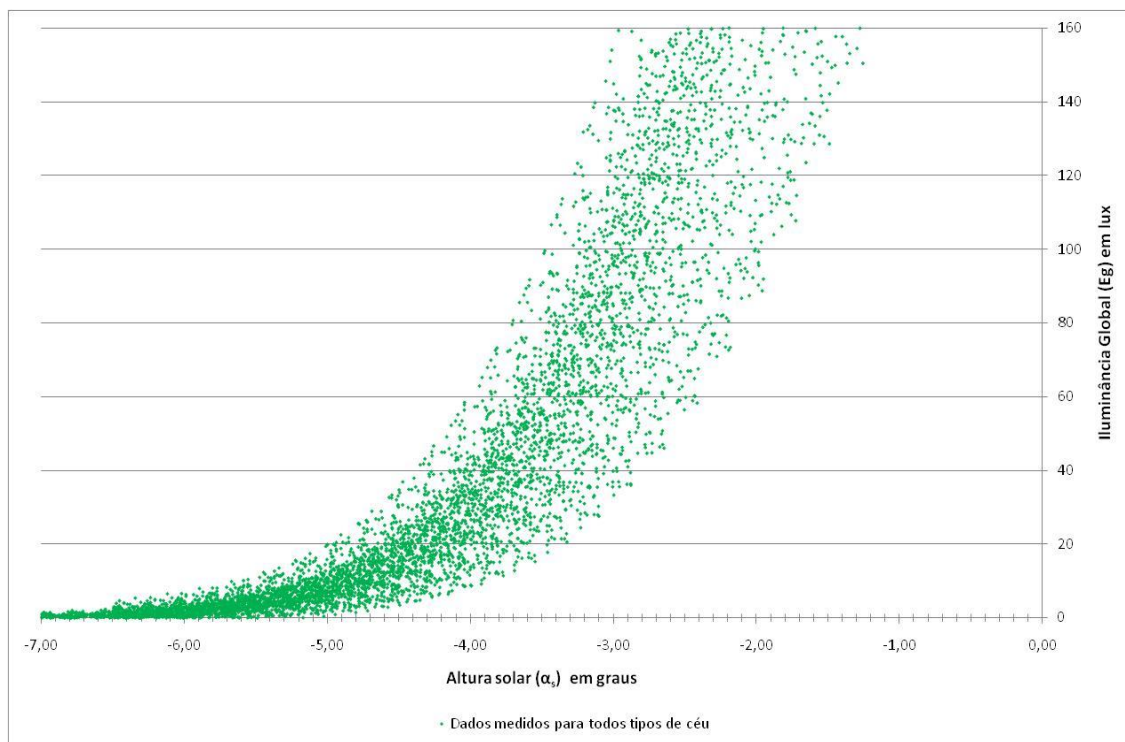


FIGURA 36 Gráficos de dispersão para todas as condições de céu.

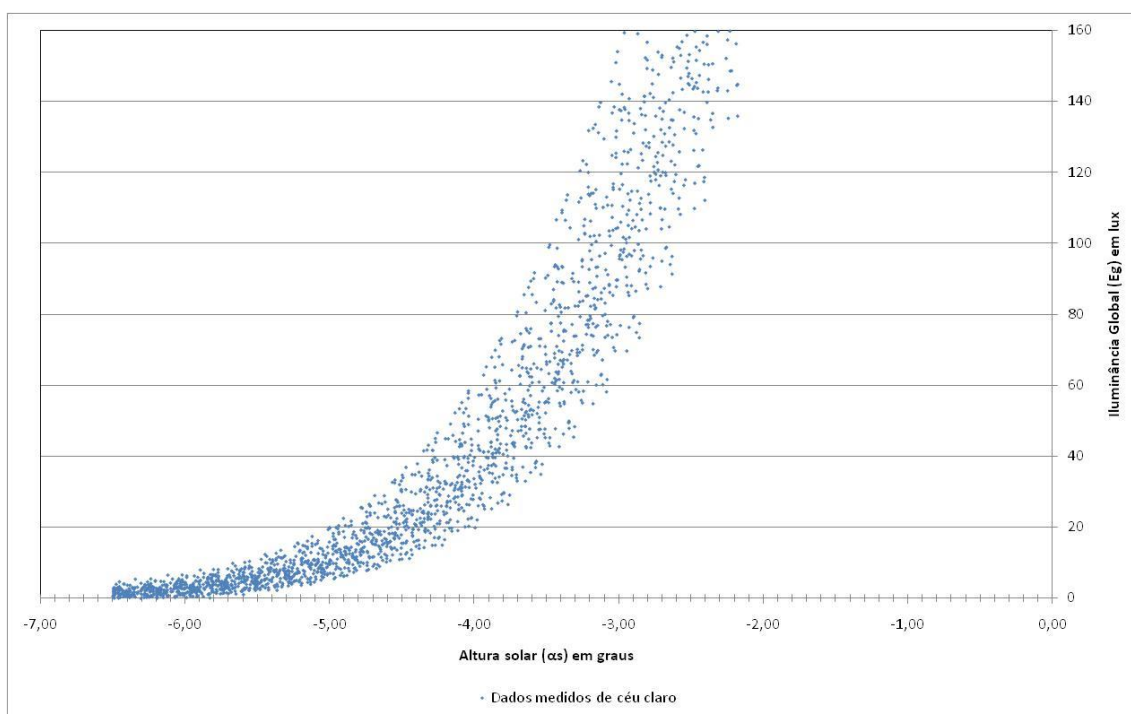
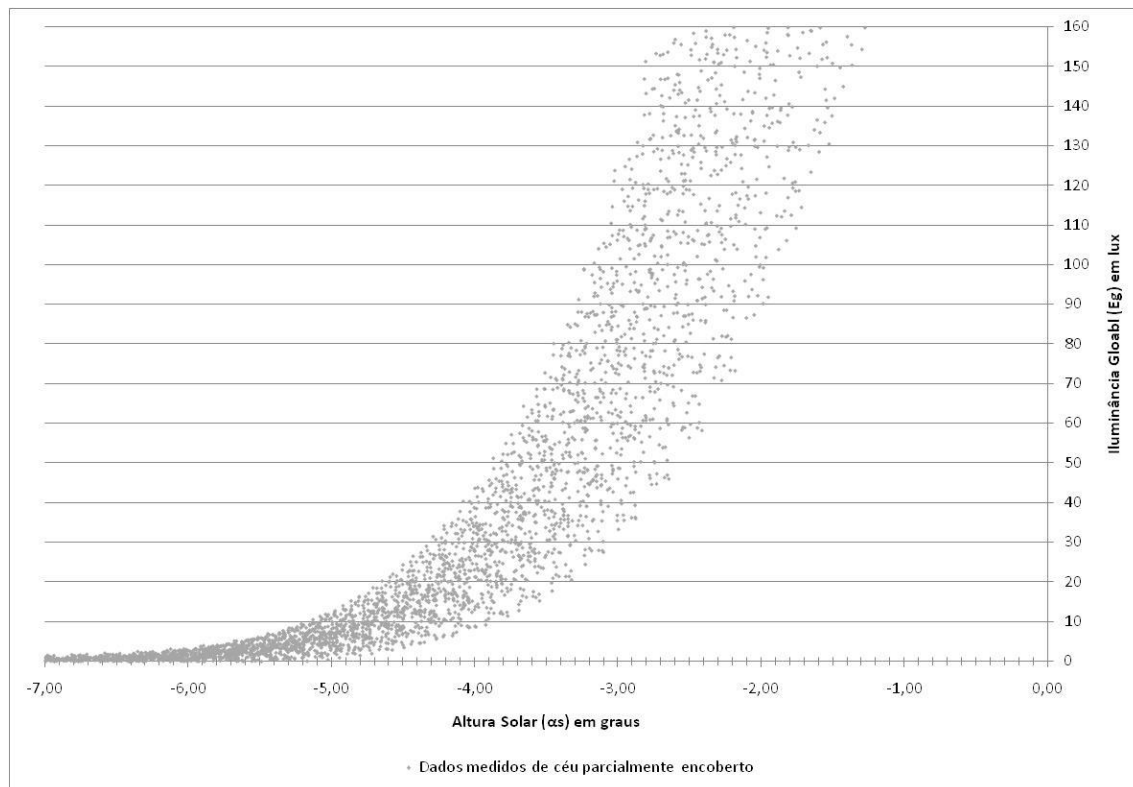
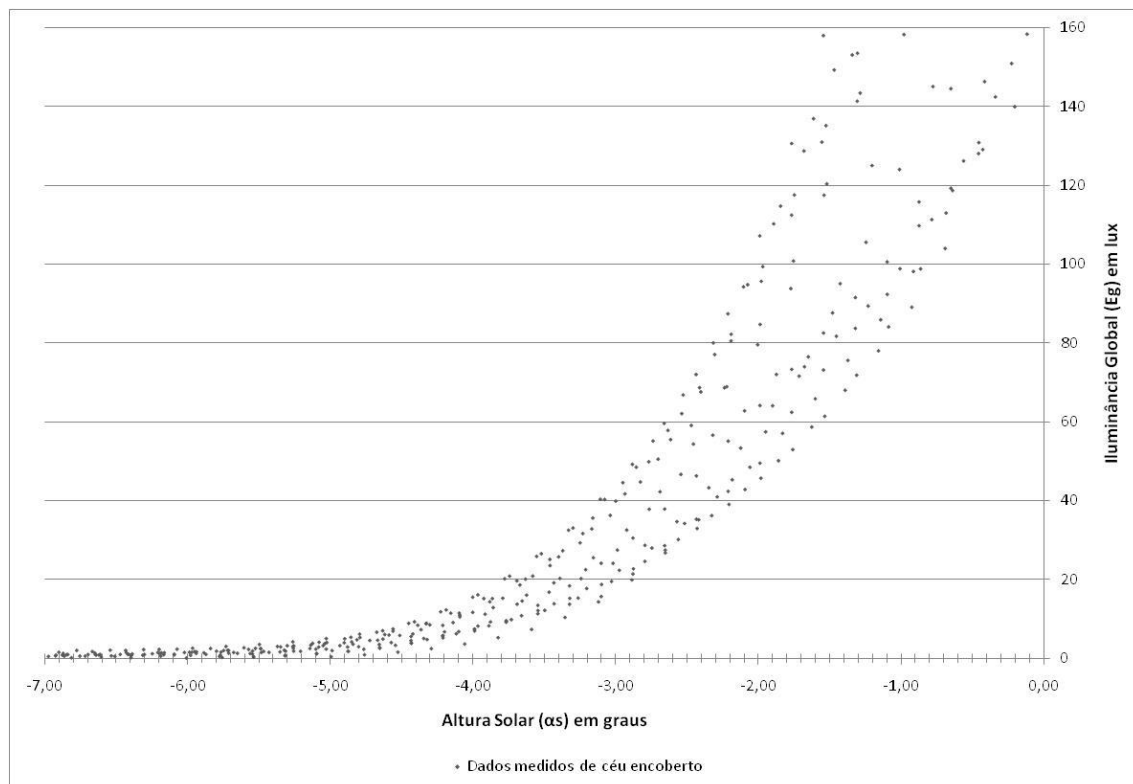


FIGURA 37 Gráfico de dispersão para dados na condição de céu claro.



**FIGURA 38** Gráfico de dispersão para dados na condição de céu parcialmente encoberto.



**FIGURA 39** Gráfico de dispersão para dados na condição de céu encoberto.

## 4.2. Apresentação dos Modelos de Regressão

Na literatura revisada, foi sugerido o uso de modelos exponenciais e polinomiais para a predição da iluminância global ( $E_g$ ) no período crepuscular. Foram gerados modelos exponenciais e polinomiais a partir dos dados previamente coletados pela EMIN-BH e devidamente tratados. Os modelos encontrados terão seus gráficos apresentados a seguir, assim como suas respectivas equações e valores de  $r^2$ , e ANOVA.

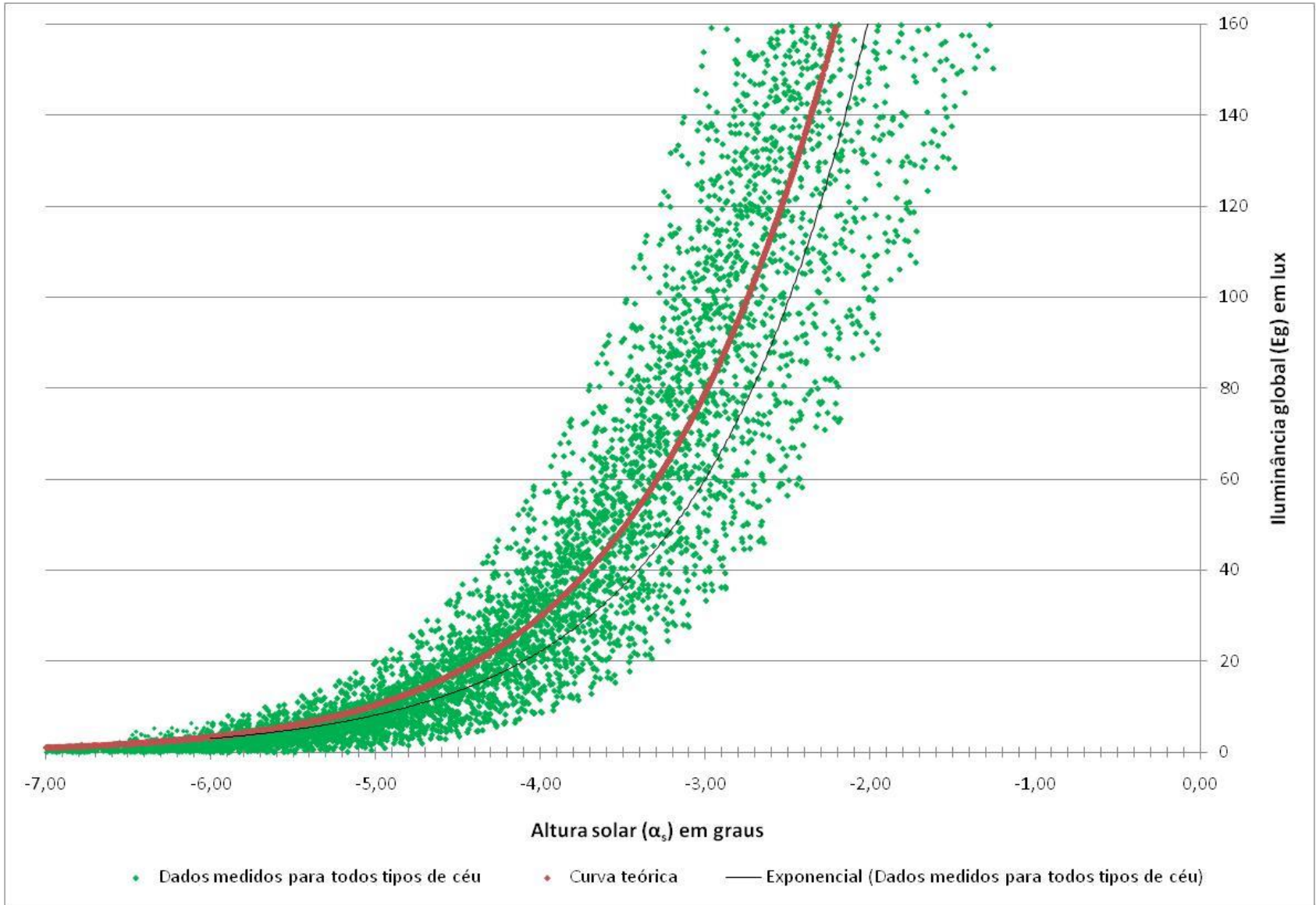
### 4.2.1. Modelos de regressão de Iluminância Global ( $E_g$ ) versus Altura Solar ( $\alpha_s$ )

Primeiramente investigou-se qual o modelo que melhor expressa a relação entre as variáveis Iluminância Global ( $E_g$ ) e Altura Solar ( $\alpha_s$ ): o modelo exponencial ou o modelo polinomial. A altura solar utilizada foi calculada considerando os ângulos envolvidos no cálculo da geometria solar, conforme apresentado no Capítulo 02.

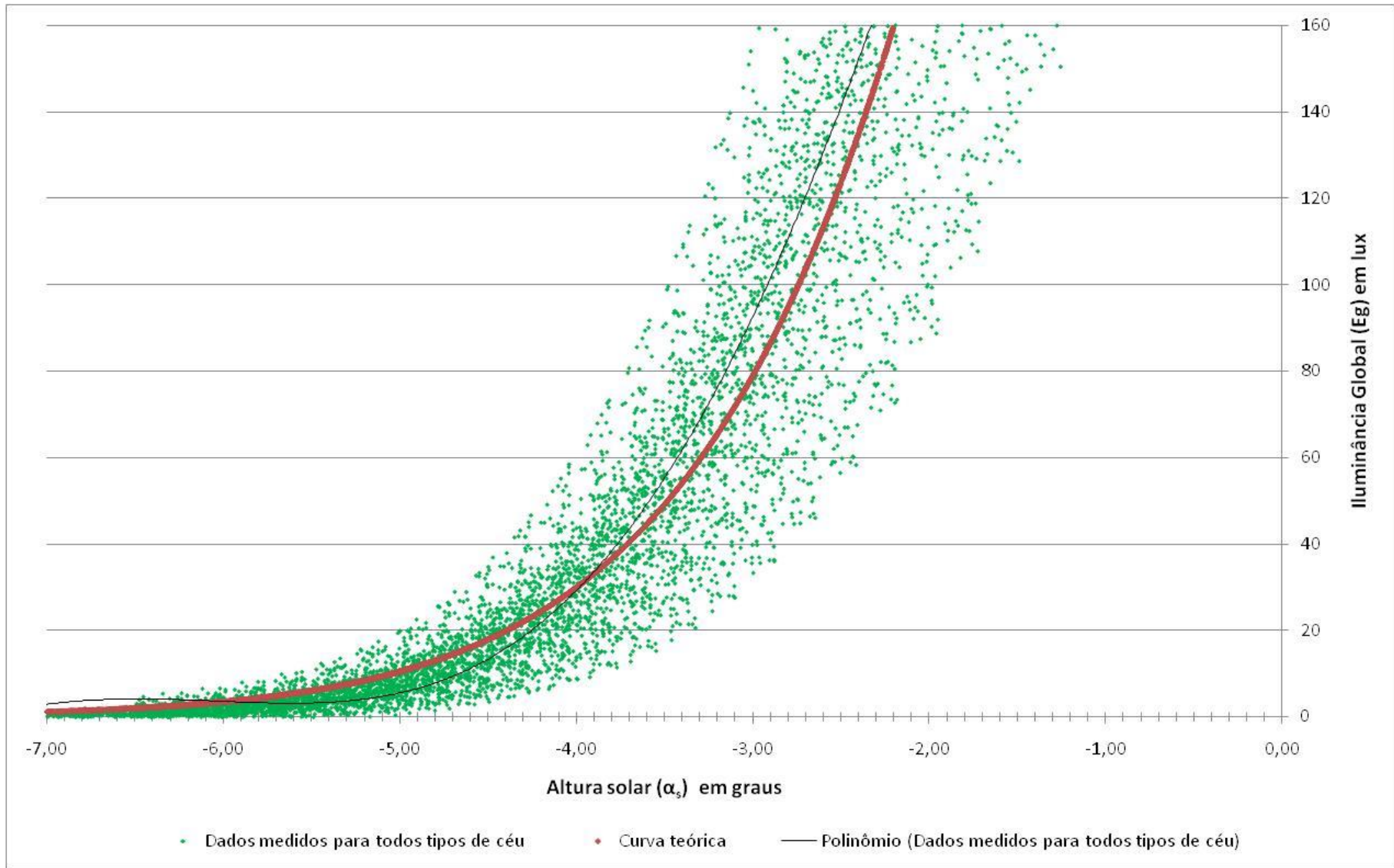
Ambos os modelos consideraram as variáveis Iluminância Global e Altura Solar ou alguma de suas variações ( $\alpha^5, \alpha^4, \alpha^3, \alpha^2, \alpha$ ).

Tal avaliação iniciou-se com a ponderação da relação entre as variáveis expressas visualmente pelo diagrama de dispersão e a curva de tendência do modelo.



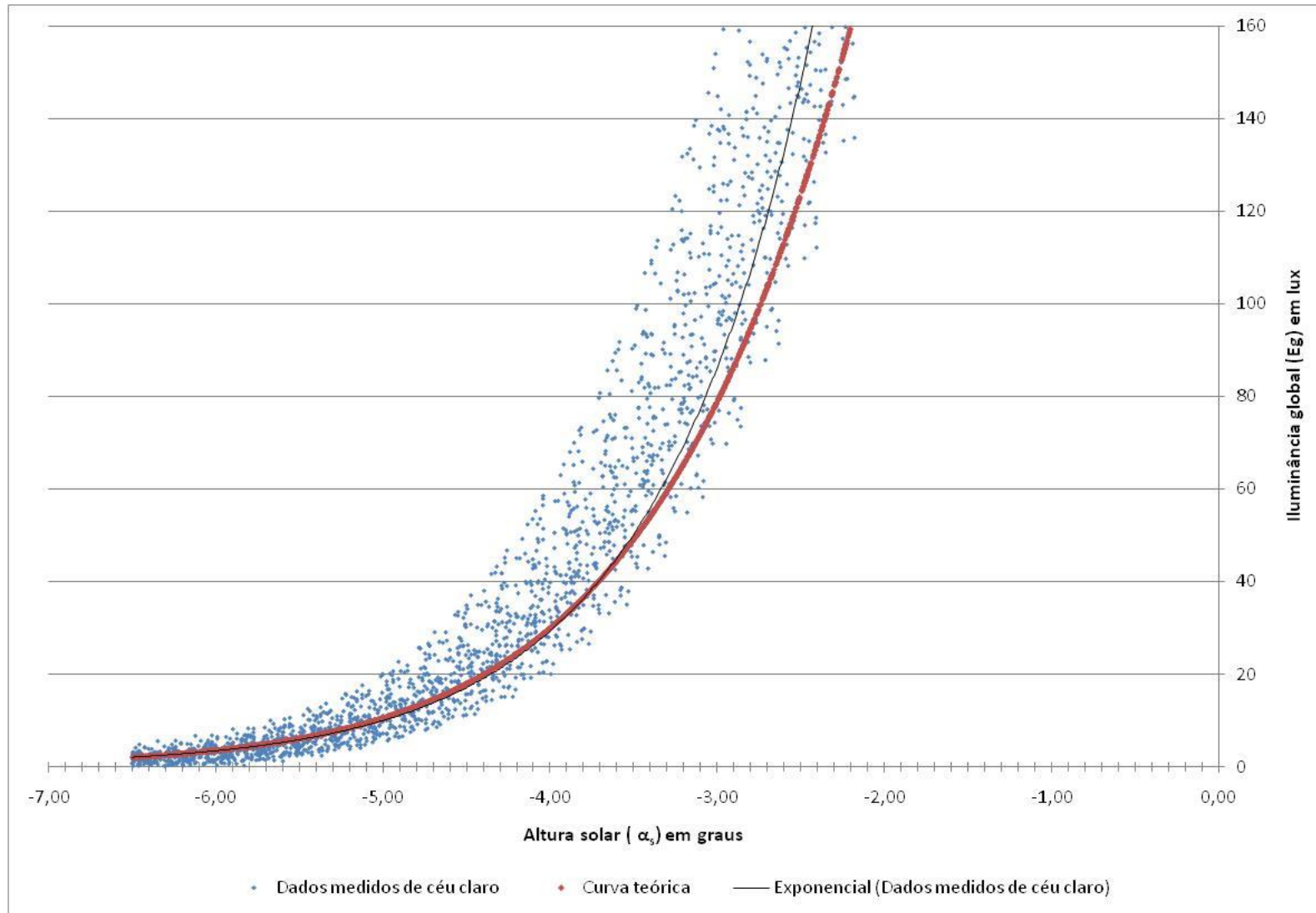


(A)

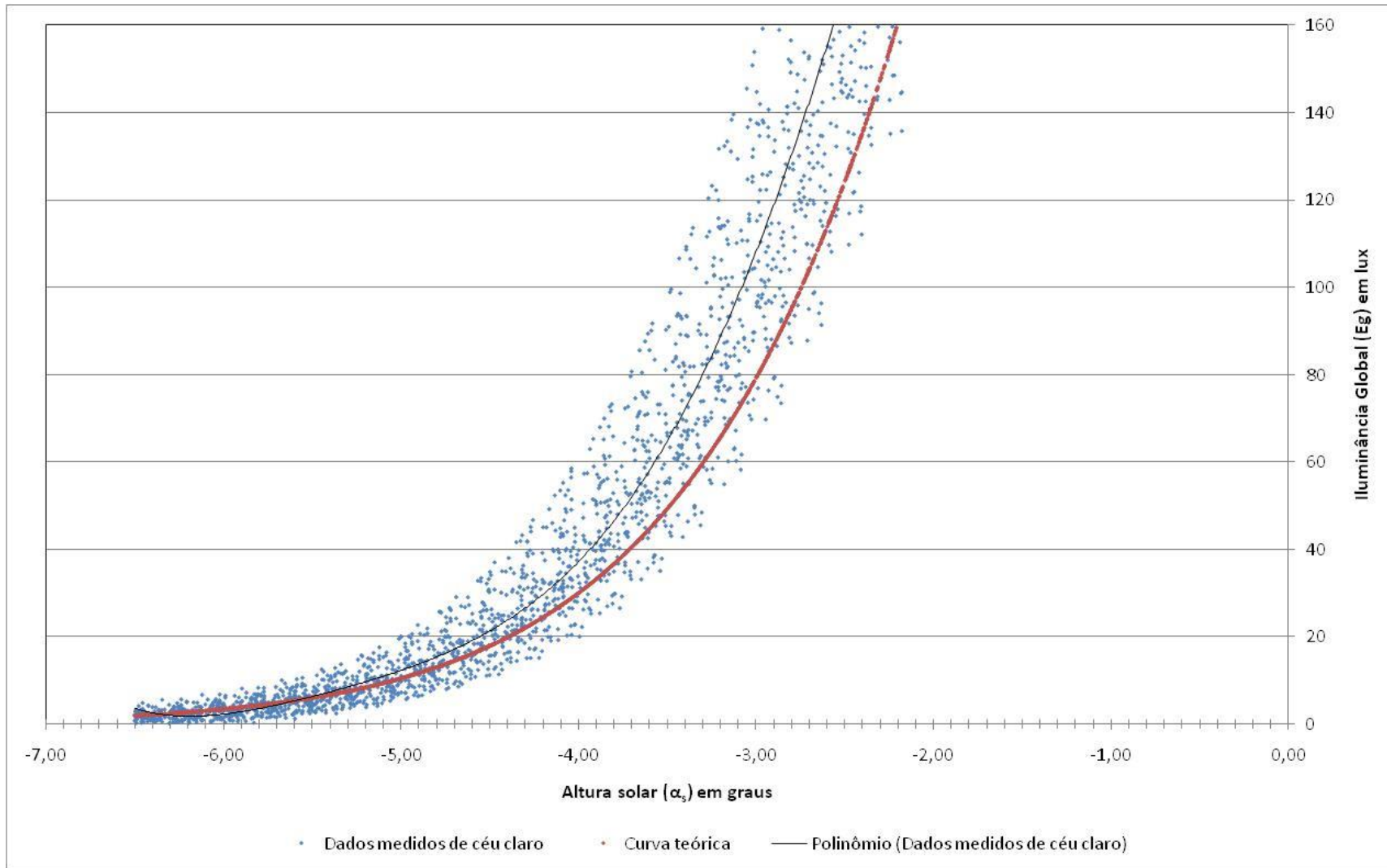


(B)

FIGURA 40 Gráfico de dispersão para todas as condições de céu: (A) modelo exponencial; (B) modelo polinomial de 5º grau.

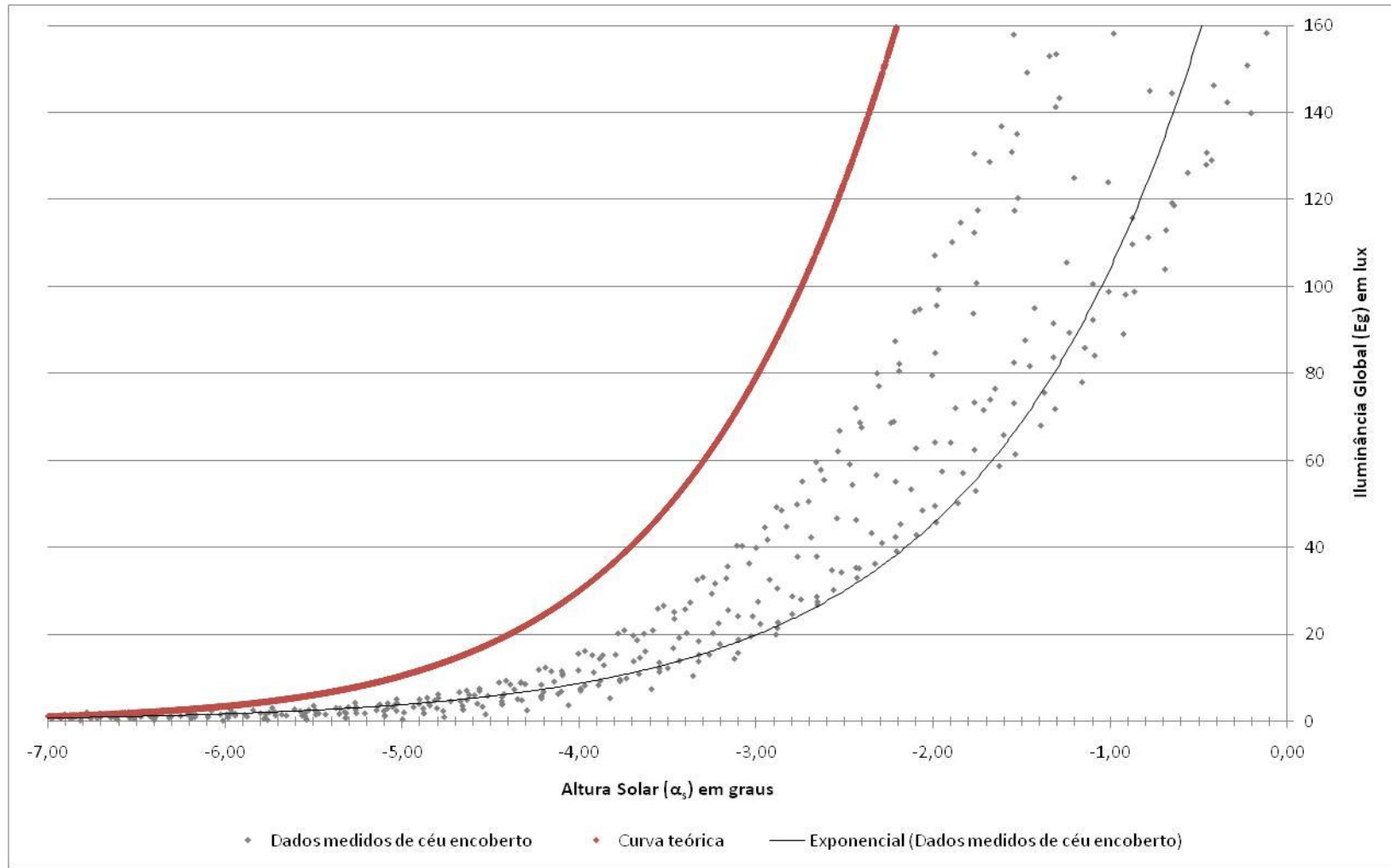


(A)

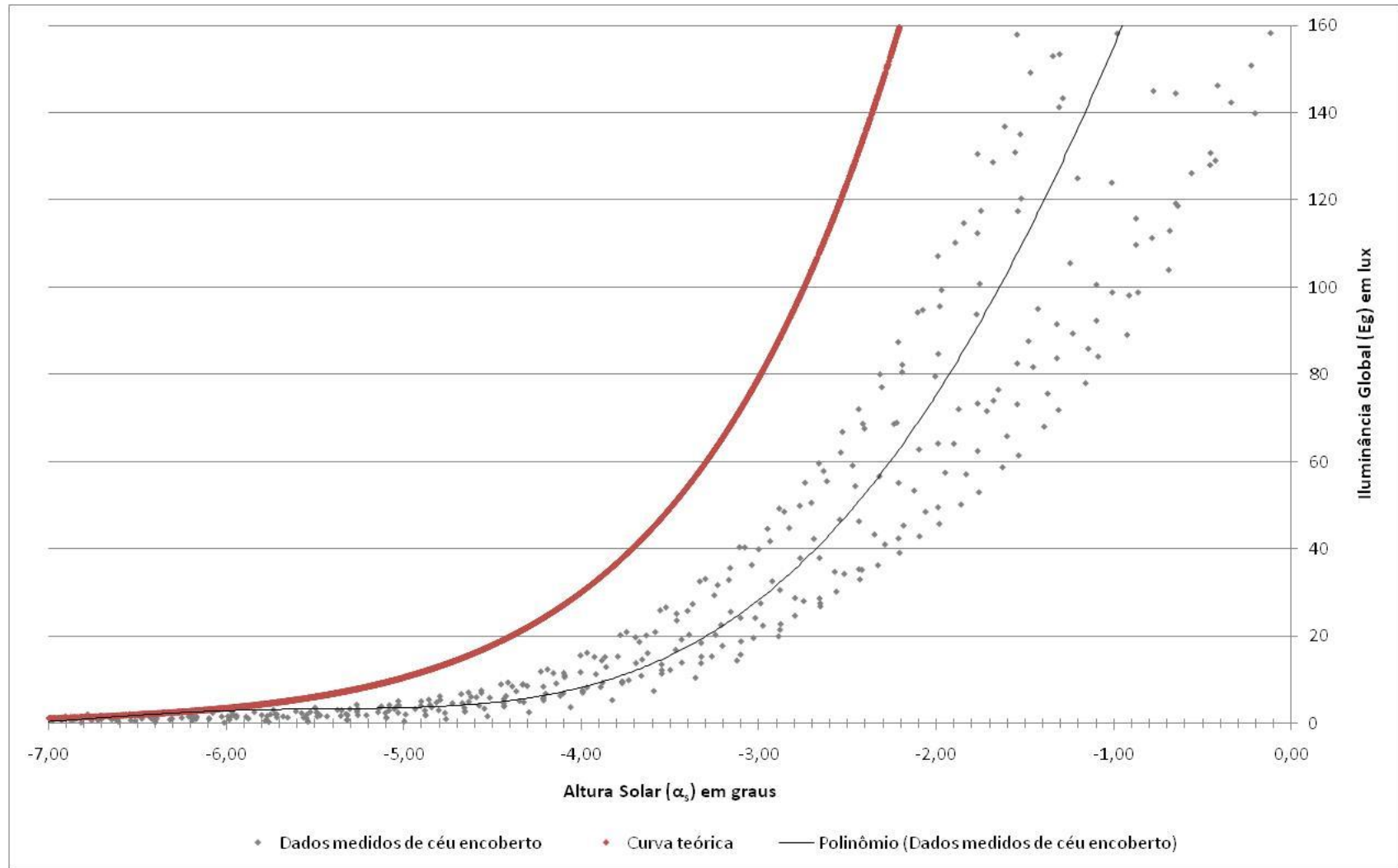


(B)

**FIGURA 41** Gráfico de dispersão para a condição de céu claro: (A) modelo exponencial; (B) modelo polinomial de 5º grau.

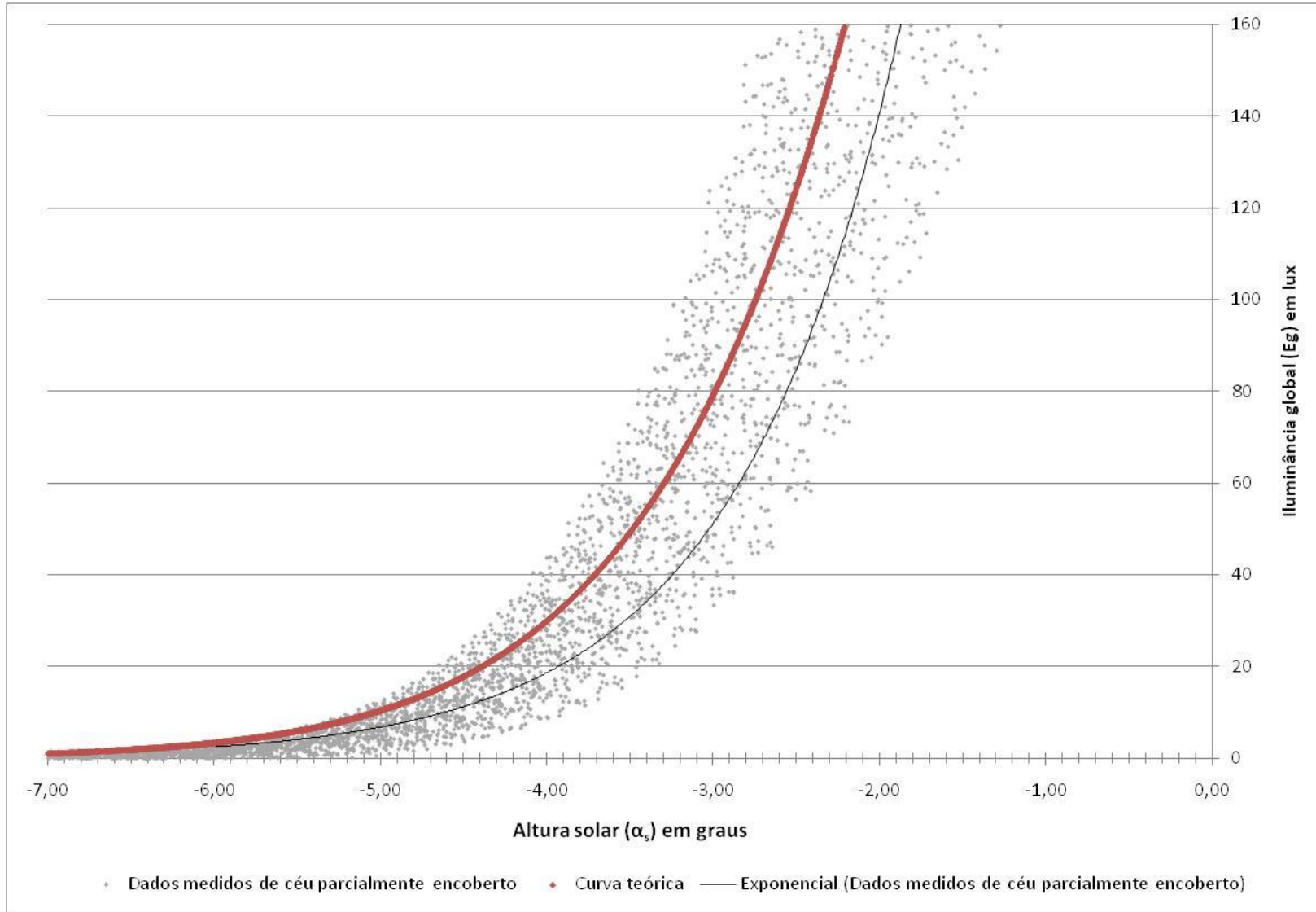


(A)

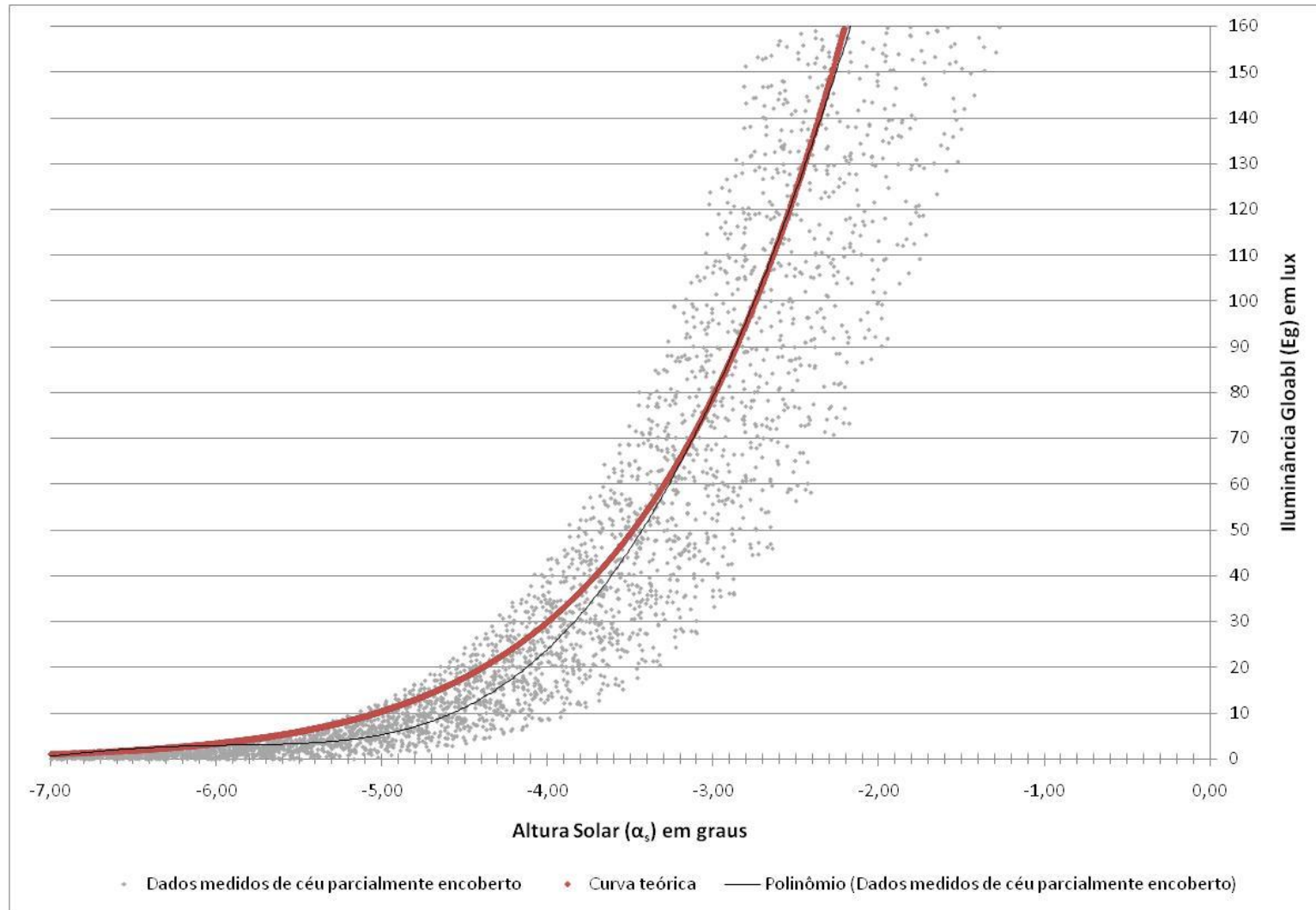


(B)

**FIGURA 42** Gráfico de dispersão para a condição de céu encoberto: (A) modelo exponencial; (B) modelo polinomial de 5º grau.



(A)



(B)

**FIGURA 43** Gráfico de dispersão para a condição de céu parcialmente encoberto: (A) modelo exponencial; (B) modelo polinomial de 5º grau.



A nuvem de pontos para a condição de céu claro apresenta-se menos dispersa, conforme esperado, por ser esta uma condição de céu mais estável em relação a todas as outras. É identificável ainda para esta condição de céu, alguma dispersão decorrente das condições atmosféricas, que irão variar em função da quantidade de partículas e de vapor d'água na atmosfera. Em oposição, a nuvem de pontos para a condição de céu encoberto se mostra mais dispersa, ocorrendo a concentração de dados em dois extremos da curva da nuvem, provavelmente consequência da diferença de conteúdo de vapor de água existente na atmosfera nas duas situações.

Pelas FIGURAS 40, 41, 42 e 43 pode-se observar que as curvas de tendência dos modelos exponenciais não delinearão um comportamento análogo à curva da nuvem de pontos, demonstrando ser esta curva pouco descritiva no que se refere ao fenômeno da luz natural crepuscular. Já os modelos polinomiais de 5º grau mostraram-se mais representativos da nuvem de pontos referente ao conjunto de dados quando comparados aos mesmos modelos de tipo de céu, mas com curvas de tendência exponencial. No entanto, ambos os modelos apontaram haver um limite para sua aplicação, sendo esse o de  $-6,0^\circ$  de altura solar, faixa esta que inclui o crepúsculo civil. Abaixo de tal valor, as curvas polinomiais tendem a se flexionar de forma pouco representativa da realidade, sendo, portanto, a aplicabilidade desses modelos restrita a altura solar igual ou superior a  $-6,0^\circ$ . De forma equivalente, os modelos exponenciais mostraram-se impraticáveis ao se considerar no conjunto de dados valores inferiores a  $-6,0^\circ$  de altura solar.

Os gráficos para a condição de céu claro (FIGURA 41) explicitam a existência de uma semelhança de comportamento entre a curva de tendência dos modelos exponencial e polinomial e a curva teórica. Esta semelhança é maior no caso do modelo exponencial, quando as curvas são praticamente coincidentes até a  $\alpha_s$  de  $-4,5^\circ$ , quando divergem. No entanto essa divergência ocasiona uma diferença máxima inferior a um minuto entre as duas curvas. No caso do modelo polinomial, esta diferença extrema é um pouco maior, mas ainda sim pouco significativa, equivalendo a aproximadamente um minuto e meio. Mas há ainda que se considerar a incerteza da mediação (em torno de 2 minutos) e a incerteza inerente ao próprio modelo, ou seja, para a condição de céu claro não há uma diferença significativa.

As equações geradas pelos modelos serão apresentadas na TABELA 13 a seguir:

**TABELA 65**

Resumo das equações e  $r^2$  para os modelos exponencial e polinomial de acordo com o tipo de céu.

Condição de céu	Modelo exponencial		Modelo polinomial	
	Equação	R <sup>2</sup>	Equação	R <sup>2</sup>
Todos os tipos de céu	$E_g = 1193,7e^{0,9962\alpha_s}$	0,63	$E_g = -0,0992\alpha_s^5 - 2,5858\alpha_s^4 - 23,214\alpha_s^3 - 73,367\alpha_s^2 + 33,712\alpha_s + 412,59$	0,90
Céu Claro	$E_g = 2213,6e^{1,082\alpha_s}$	0,86	$E_g = -0,4689\alpha_s^5 - 9,8851\alpha_s^4 - 76,622\alpha_s^3 - 247,08\alpha_s^2 - 187,28\alpha_s + 387,84$	0,95
Céu Encoberto	$E_g = 238,53e^{0,8288\alpha_s}$	0,54	$E_g = -0,0473\alpha_s^5 - 0,9432\alpha_s^4 - 5,3759\alpha_s^3 + 3,496\alpha_s^2 + 115,32\alpha_s + 262,52$	0,92
Céu Parc. Encoberto	$E_g = 1061,0e^{1,0101\alpha_s}$	0,69	$E_g = -0,0945\alpha_s^5 - 2,4603\alpha_s^4 - 21,319\alpha_s^3 - 60,593\alpha_s^2 + 63,603\alpha_s + 415,88$	0,92

O valor do  $r^2$  representa a porcentagem da variação total de  $E_g$  que pode ser explicada pela equação de regressão, sendo avaliados neste trabalho o  $r^2$  ajustado. Através dos modelos exponenciais obteve-se  $r^2$  de valores muito baixos, com exceção do céu claro ( $r^2=0,86$ ), condição essa de menor dispersão. O modelo exponencial de menor  $r^2$  foi o modelo de céu encoberto ( $r^2=0,54$ ). Já os modelos polinomiais demonstraram grande capacidade explicativa da variação de  $E_g$  através de  $r^2$  superiores a 90%. O modelo polinomial com maior capacidade explicativa foi o para a condição de céu claro ( $r^2=0,95$ ), como era de se esperar, e o com menor capacidade explicativa foi o para todas as condições de céu ( $r^2=0,90$ ). No entanto, todos os modelos polinomiais apresentaram valores de  $r^2$  superiores ao admissível de 0,85, apresentado-se explicativos. Comparando o  $r^2$  dos modelos exponenciais com seus respectivos modelos polinomiais, notou-se que estes são bastante inferiores.

Na TABELA 14 e 15 serão apresentadas as Tabela ANOVA para os modelos exponencial e polinomial, respectivamente, para todas as condições de céu.

TABELA 66

Tabela ANOVA para modelo exponencial único para todos tipos de céu.

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	73850893,32	73850893,32	13563,2257	0
Resíduo	7968	43385248,52	5444,935809		
Total	7969	117236141,8			

TABELA 67

Tabela ANOVA para modelo polinomial único para todos tipos de céu.

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	5	105709280,9	21141856,18	14607,07679	0
Resíduo	7964	11526860,93	1447,370784		
Total	7969	117236141,8			

Tanto o modelo exponencial como polinomial para todos os tipos de céu apresentaram valores de *F de significação* iguais a zero, demonstrando serem os modelos significativos.

A mesma avaliação foi feita para os modelos desenvolvidos para cada um dos tipos de céu.

TABELA 68

Tabela ANOVA para modelo exponencial para céu claro.

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	30523330,88	30523330,88	16598,64867	0
Resíduo	2639	4852869,158	1838,904569		
Total	2640	35376200,03			

TABELA 69

Tabela ANOVA para modelo polinomial para céu claro.

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	5	33691404,01	6738280,802	10538,58726	0,00000
Resíduo	2635	1684796,024	639,3912805		
Total	2640	35376200,03			

TABELA 70

Tabela ANOVA para modelo exponencial para céu encoberto.

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	6096541,787	6096541,787	684,6763712	1,2942E-100
Resíduo	587	5226805,217	8904,267832		
Total	588	11323347			

TABELA 71

Tabela ANOVA para modelo polinomial para céu encoberto.

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	5	10365184,47	2073036,893	1261,352286	0
Resíduo	583	958162,5385	1643,503497		
Total	588	11323347			

TABELA 72

Tabela ANOVA para modelo exponencial para céu parcialmente encoberto.

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	49868047,51	49868047,51	10398,59121	0
Resíduo	4717	22621100,81	4795,654189		
Total	4718	72489148,32			

TABELA 73

Tabela ANOVA para modelo polinomial para céu parcialmente encoberto.

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	5	66462662,71	13292532,54	10395,39624	0
Resíduo	4713	6026485,611	1278,694167		
Total	4718	72489148,32			

Todos os modelos mostraram-se significativos sob a análise ANOVA, apresentando valores de *F de significação* iguais a zero.

Apesar de todos os modelos apontarem serem significativos, através da análise visual da curva de tendência dos modelos em relação à nuvem de pontos dos gráficos de dispersão e do parâmetro estatístico  $r^2$  ajustado, pode-se apreender que os modelos exponenciais para todos os tipos de céu e para cada tipo de céu mostraram-se pouco explicativos, com

desempenho inferior aos modelos equivalentes polinomiais, sendo aqueles preteridos em favor dos respectivos modelos polinomiais, com maior adequabilidade.

#### 4.2.2. *Ajuste dos Modelos polinomiais de Iluminância Global (Eg) versus Altura Solar ( $\alpha_s$ )*

Apesar dos bons resultados encontrados, alguns dos modelos polinomiais apresentam uma flexão em sua curva de tendência à baixas alturas solares ( $\alpha_s \leq -6^\circ$ ), não correspondente ao real comportamento da curva formada pela nuvem de pontos.

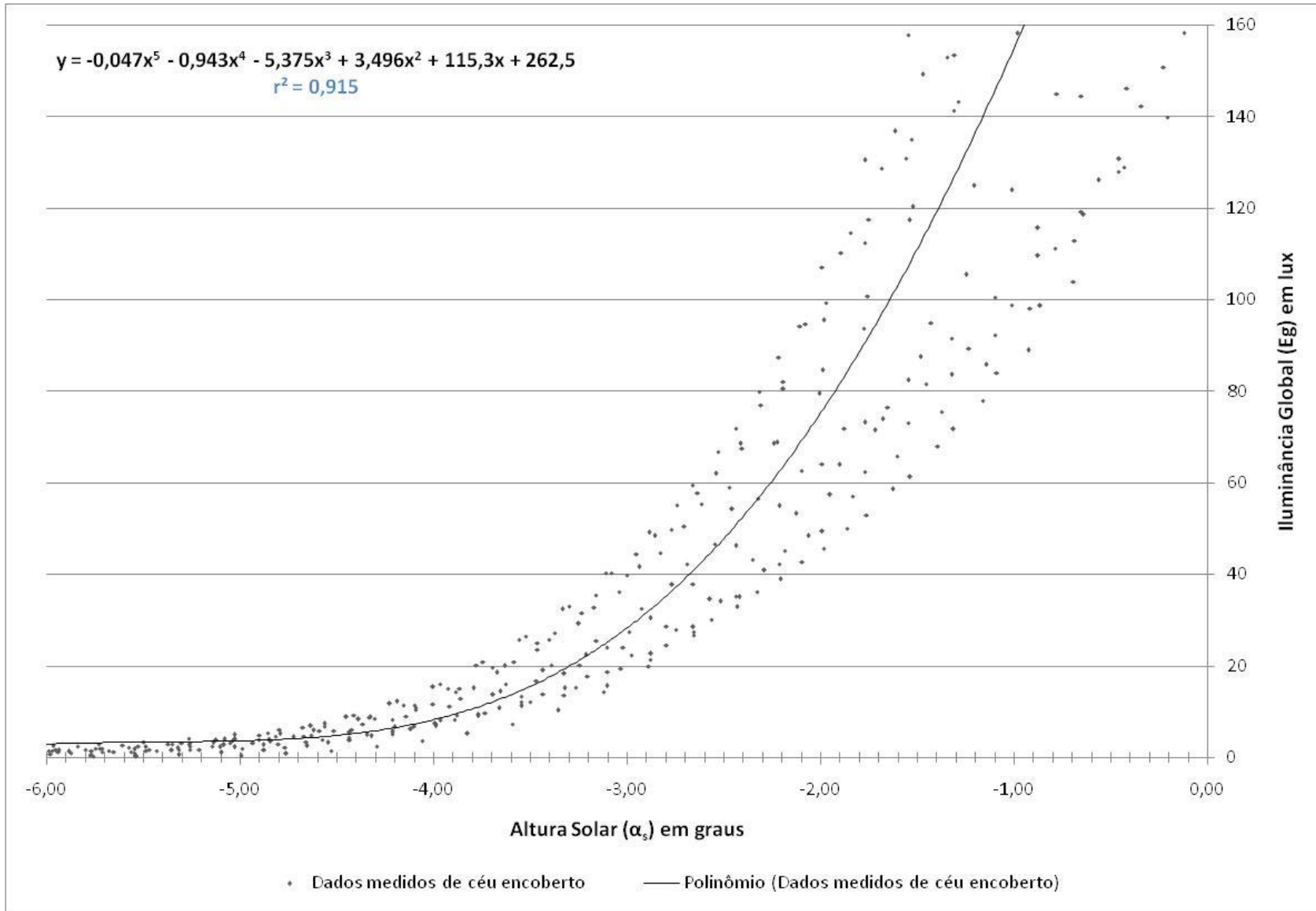
O modelo de base logarítmica proposto por Seidelman (2006) é dividido em faixas de altura solar e diferentes equações, todas de mesmo grau de polinômio, para estas faixas. Objetivando um melhor ajuste do modelo polinomial, procurou-se também dividir os modelos de céu encoberto e parcialmente encoberto, aqui propostos, em faixas. No caso dos modelos para todos os tipos de céu e para céu claro, como esta flexão ocorre abaixo do limite estabelecido de  $-6^\circ$  para a aplicabilidade do modelo, estes modelos não foram divididos em faixas, mantendo-se os modelos ulteriormente apresentados.

Os limites das faixas serão estabelecidos a partir do ponto de interseção entre as duas equações ou aquele que mais se aproxima deste ponto, ou seja,  $y_1 - y_2 = 0$ . No ponto de interseção, as inclinações das curvas de tendência de  $y_1$  e  $y_2$  devem ser equivalentes. Matematicamente esta condição é satisfeita se as derivadas das funções forem iguais no ponto de interseção. O ponto com a mesma derivada é encontrado por tentativas. A partir da diferença na posição das duas curvas originais ( $y_1 - y_2$ ), pode-se então modificar o último termo do polinômio de cada curva na metade desta diferença ou apenas uma das curvas no valor total da diferença, uma vez que as derivadas não se alteram já que o último termos delas não é função de  $x$ . Ao final, o valor de  $r^2$  é re-calculado com o objetivo de verificar se este não foi sensivelmente alterado.

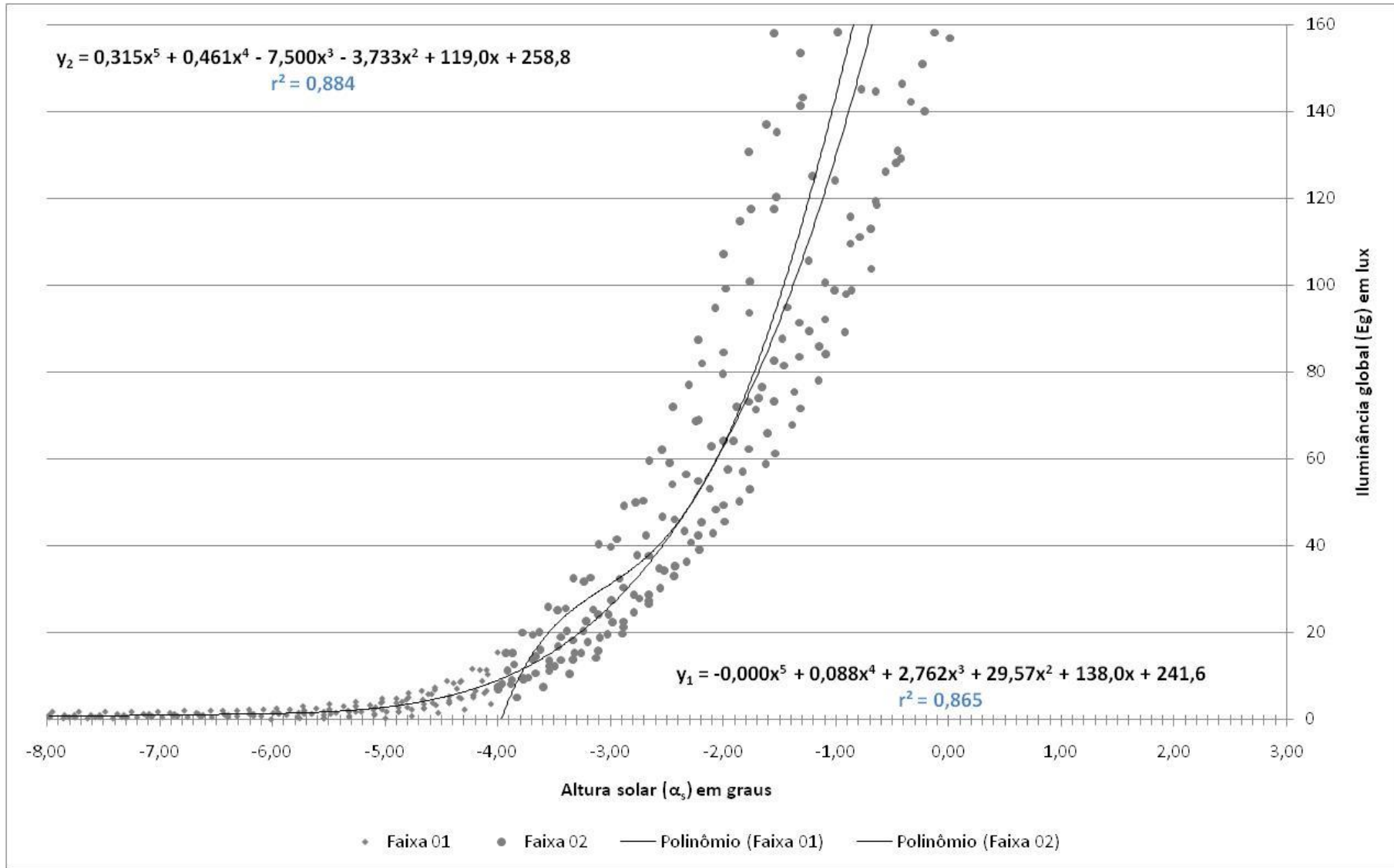
Como a aplicação dos modelos por faixas pode tornar-se dificultosa e mais suscetível a erros por ter mais de uma equação, optou-se por dividir o modelo por faixas, em seguida gerar

uma nuvem de pontos com as novas equações por faixas e, a partir desta nuvem de pontos elaborada, gerar uma nova curva de tendência e uma nova equação, de forma a retornar à uma equação única para cada modelo ao final. As faixas foram divididas de forma que suas curvas de tendência se cruzem em determinado ponto, possibilitando a criação de uma curva única.

A seguir serão apresentados as etapas de desenvolvimento para os modelos de céu encoberto e céu parcialmente encoberto.



(A)



(B)

**FIGURA 44** Gráficos de dispersão para condição de céu encoberto: (A) modelo polinomial único; (B) modelo polinomial em faixas de altura solar.



Para o modelo de céu encoberto os dados foram divididos em duas faixas, de acordo com o ponto de interseção das curvas de tendências dos modelos, sendo  $y_1 - y_2 = -0,0$  para este ponto:

- 1) Dados com  $\alpha_s$  menor que  $-2,181^\circ$ ;
- 2) Dados com  $\alpha_s$  maior ou igual a  $-2,181^\circ$ .

Encontrou-se para estas duas faixas as seguintes equações:

**TABELA 74**

Equações das faixas de dados de céu encoberto.

	<b>Equação</b>	<b>r<sup>2</sup></b>
Faixa 1	$E_g = -0,0007x^5 + 0,0886x^4 + 2,7625x^3 + 29,577x^2 + 138,07x + 241,63$	0,87
Faixa 2	$E_g = 0,3155x^5 + 0,4616x^4 - 7,5005x^3 - 3,733x^2 + 119,09x + 258,8$	0,88

Gerando a derivada para as equações de cada uma das faixas (TABELA 23) obteve-se:

**TABELA 75**

Derivadas das equações do modelo por faixas para céu encoberto

<b>Faixa</b>	<b>Derivada no ponto de interseção</b>	<b>Diferença entre o ângulo</b>
Faixa 1	$5*0,3155 \alpha_s^4 + 4*0,4616 \alpha_s^3 - 3*7,5005 \alpha_s^2 - 2*3,733 \alpha + 119,09$	-0,002
Faixa 2	$5*0,0007 \alpha_s^4 + 4*0,0886 \alpha_s^3 + 3*2,7625 \alpha_s^2 + 2*29,577 \alpha + 138,07$	

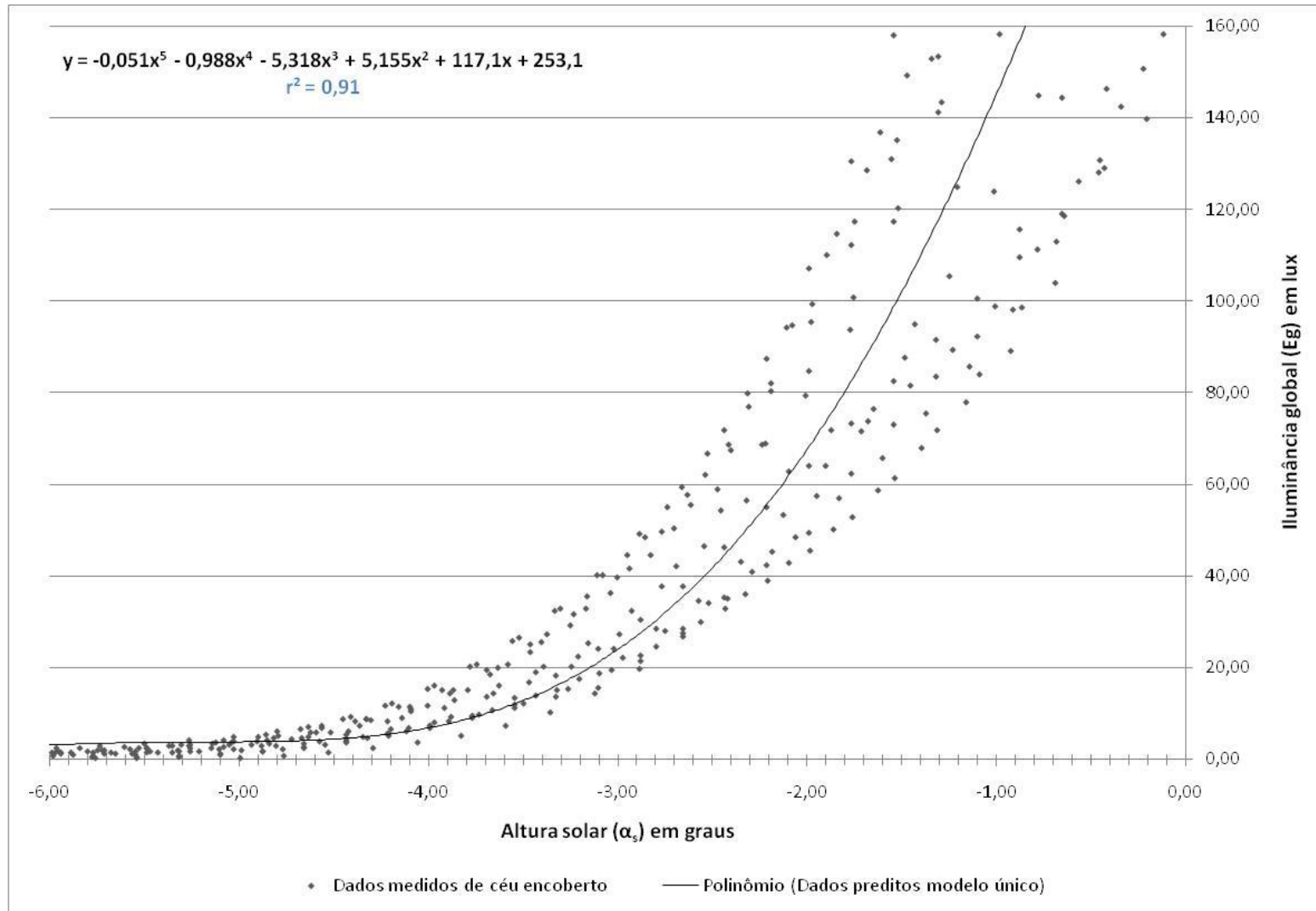
Foi então modificado apenas o último termo do polinômio da equação da segunda faixa ( $y_2$ ) pela diferença total encontrada. Optou-se por modificar apenas a segunda faixa pelo fato da curva da primeira faixa apresentar um bom comportamento. Assim, as equações finais para as faixas foram:

TABELA 76

Equações das faixas de dados de céu encoberto após derivada.

	Equação	r <sup>2</sup>
Faixa 1	$E_g = -0,0007x^5 + 0,0886x^4 + 2,7625x^3 + 29,577x^2 + 138,07x + 241,63$	0,87
Faixa 2	$E_g = 0,3155x^5 + 0,4616x^4 - 7,5005x^3 - 3,733x^2 + 119,09x + 258,31$	0,88

A partir destas duas equações, calculou-se os valores de  $E_g$ , gerando uma nova nuvem de pontos denominada *Modelo por faixas de céu encoberto*, encontrando-se o gráfico representado na FIGURA 45:



**FIGURA 45** Gráfico de dispersão com o modelo reunificado a partir das faixas para a condição de céu encoberto.

A partir desta nuvem de pontos, um novo modelo foi gerado, conforme a TABELA 25.

**TABELA 77**

Equação final para o modelo para a condição de céu encoberto e seu respectivo  $r^2$ .

Equação	$r^2$
$E_g = -0,0007x^5 + 0,0886x^4 + 2,7625x^3 + 29,577x^2 + 138,07x + 241,63$	0,91

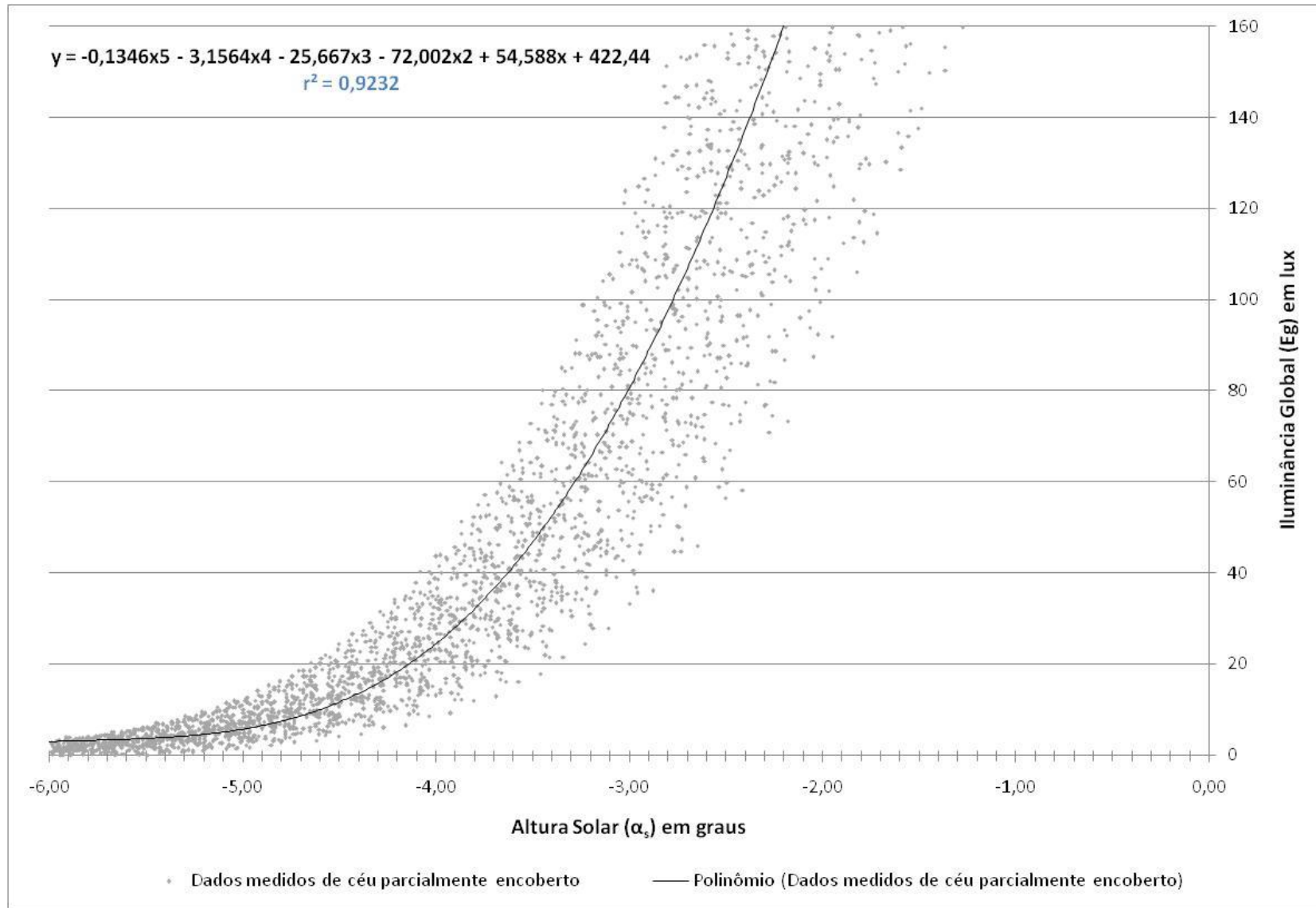
**TABELA 78**

Tabela ANOVA para modelo polinomial unificado para céu encoberto.

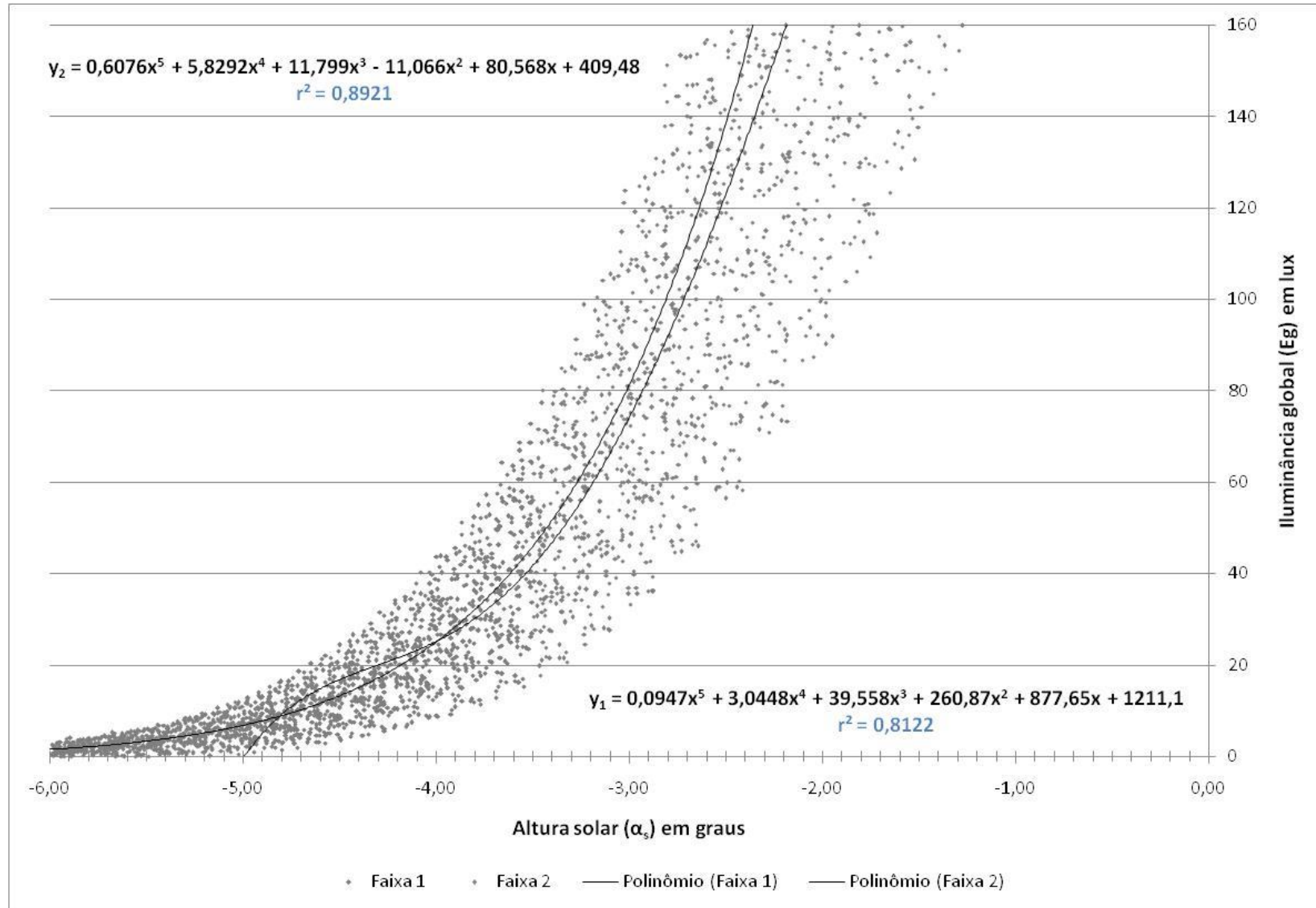
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	5	10365184,47	2073036,893	1261,352286	0
Resíduo	583	958162,5385	1643,503497		
Total	588	11323347			

O modelo unificado, gerado a partir das equações por faixas, para a condição de céu encoberto apresentou um  $r^2$  alto (0,91) mostrando-se explicativo. Além de explicativo, o modelo unificado mostrou-se também significativo, como mostra a TABELA 23, com o *F de significação* igual a zero.

O mesmo procedimento foi repetido para os dados de céu parcialmente encoberto. Os gráficos gerados estão apresentados na FIGURA 46.



(A)



(B)

**FIGURA 46** Gráficos de dispersão para condição de céu parcialmente encoberto: (A) modelo polinomial único; (B) modelo polinomial em faixas de altura solar.

Para o modelo de céu parcialmente encoberto os dados foram divididos em duas faixas, de acordo com o ponto de interseção das curvas de tendências dos modelos, sendo  $y_1 - y_2 = -0,0$  para este ponto:

- 1) Dados com  $\alpha_s$  menor que  $-3,866^\circ$ ;
- 2) Dados com  $\alpha_s$  maior ou igual a  $-3,866^\circ$ .

Encontrou-se para estas duas faixas as seguintes equações:

**TABELA 79**

Equações das faixas de dados de céu parcialmente encoberto.

	Equação	$r^2$
Faixa 1	$E_g = 0,0947x^5 + 3,0448x^4 + 39,558x^3 + 260,87x^2 + 877,65x + 1211,1$	0,81
Faixa 2	$E_g = 0,6076x^5 + 5,8292x^4 + 11,799x^3 - 11,066x^2 + 80,568x + 409,48$	0,89

Gerando a derivada para as equações de cada uma das faixas (TABELA 28) obteve-se:

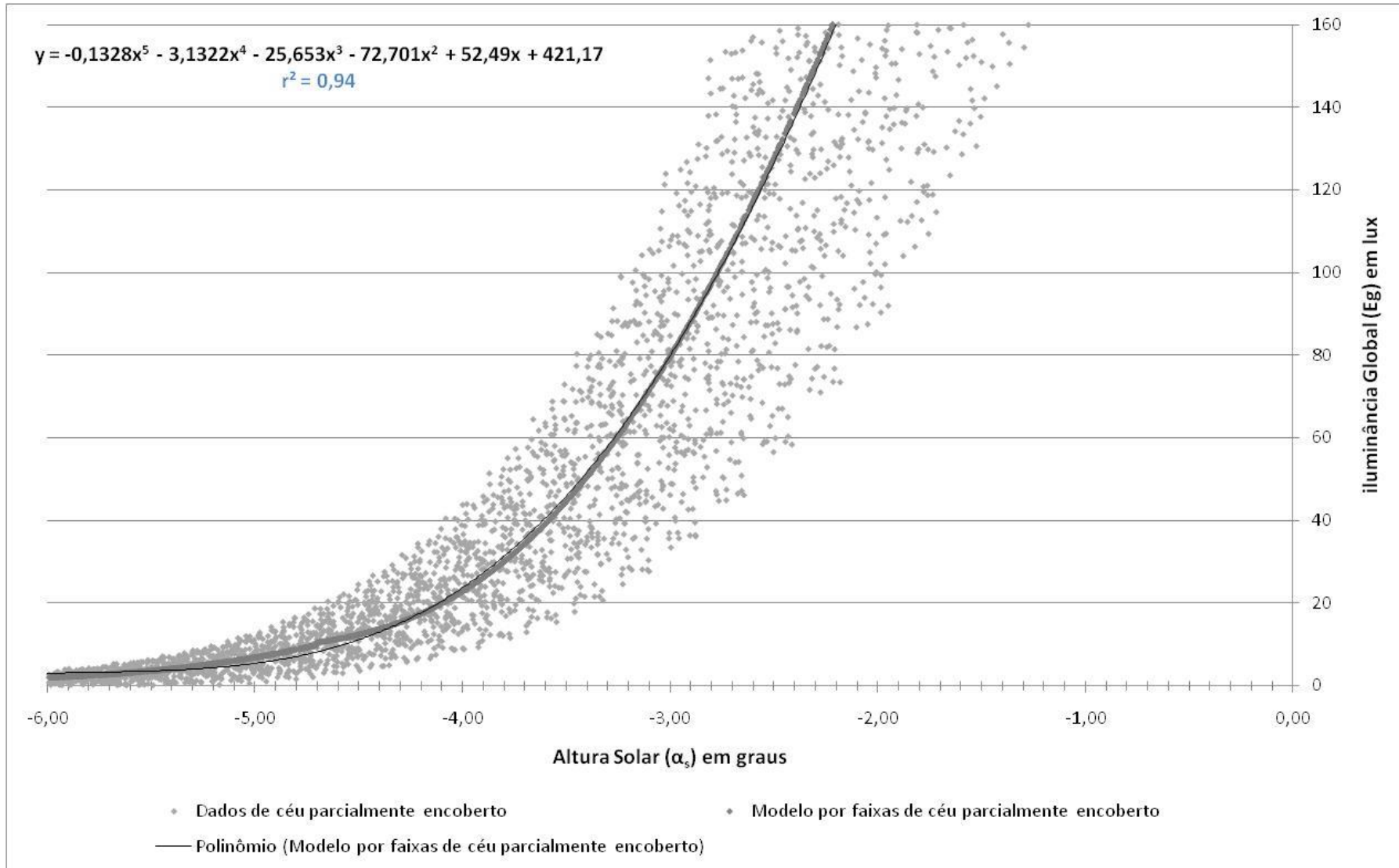
**TABELA 80**

Derivadas das equações do modelo por faixas para céu parcialmente encoberto

Faixa	Derivada no ponto de interseção	Diferença entre o ângulo
Faixa 1	$5*0,0947 \alpha_s^4 + 4*3,0448 \alpha_s^3 + 3*39,558 \alpha_s^2 + 2*260,87 \alpha + 877,65$	-0,011
Faixa 2	$5*0,6076 \alpha_s^4 + 4*5,8292 \alpha_s^3 + 3*11,799 \alpha_s^2 - 2*11,066 \alpha + 80,568$	

O último termo de cada polinômio foi mantido uma vez que a diferença entre as curvas foi muito pequena, praticamente zero, sendo a derivada utilizada apenas para detectar o ponto de interseção entre as curvas.

A partir destas duas equações, assim como no caso do céu encoberto, calcularam-se os valores de  $E_g$  para gerar a curva denominada *Modelo por faixas de céu parcialmente encoberto*, encontrando-se o gráfico representado na FIGURA 47:



**FIGURA 47** Gráfico de dispersão com a nuvem de pontos gerada pelas equações das faixas para a condição de céu parcialmente encoberto.



A partir desta nuvem de pontos, um novo modelo foi gerado, conforme a TABELA 29.

**TABELA 81**

Equação final para o modelo para a condição de céu parcialmente encoberto e seu respectivo  $r^2$ .

Equação	$r^2$
$E_g = -0,1328x^5 - 3,1322x^4 - 25,653x^3 - 72,701x^2 + 52,49x + 421,17$	0,94

**TABELA 82**

Tabela ANOVA para modelo polinomial unificado para céu parcialmente encoberto

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	5	58189670,87	11637934,17	12769,87917	0
Resíduo	4078	3716518,764	911,3582059		
Total	4083	61906189,64			

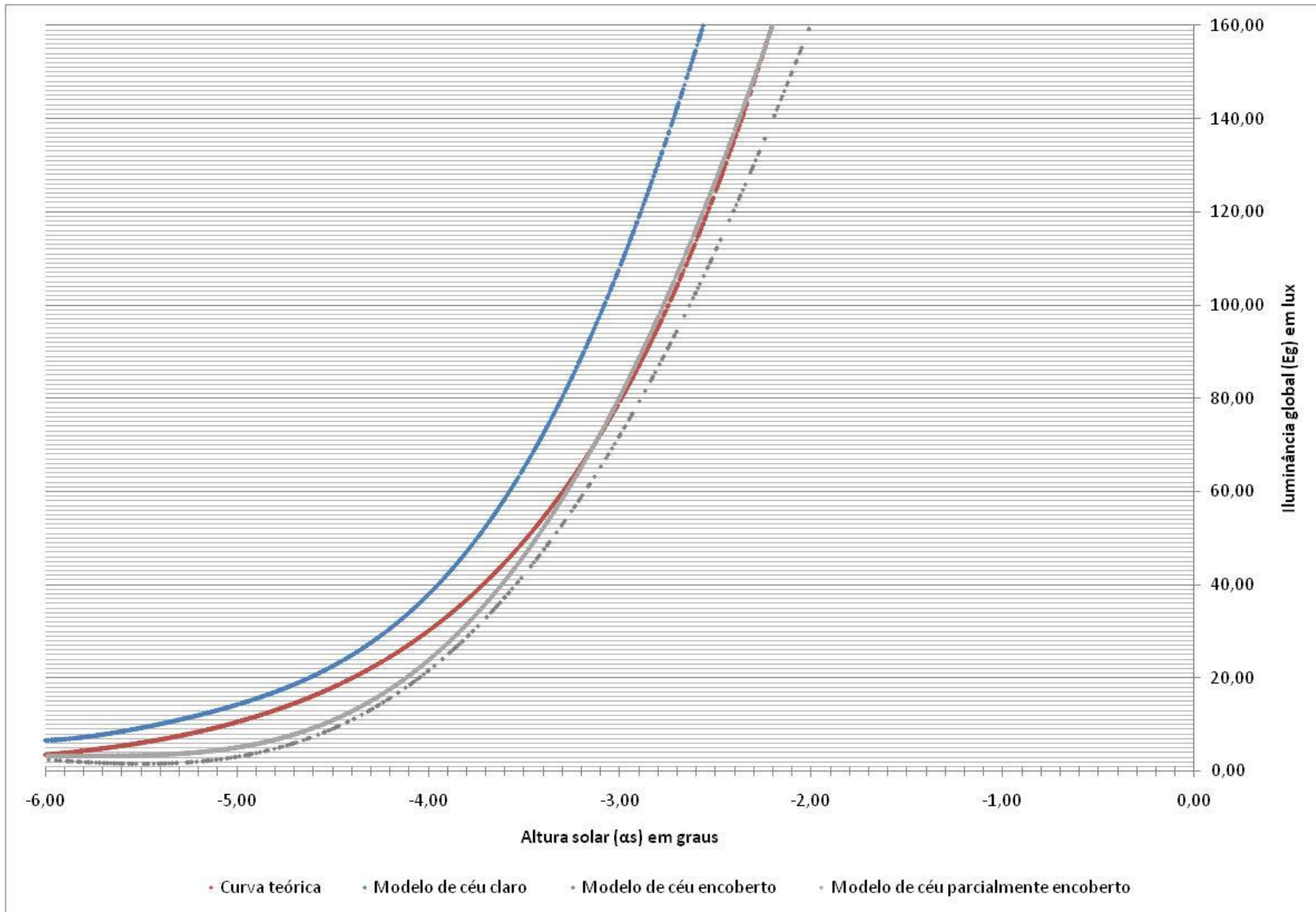
O modelo unificado para a condição de céu parcialmente encoberto apresentou um  $r^2$  bastante alto (0,94) mostrando-se explicativo, valor este pouco superior ao  $r^2$  de 0,92 encontrado para o modelo único e inicial. Assim, como os demais modelos, este modelo unificado também possui um *F de significação* igual a 0, demonstrando que a equação de regressão obtida é significativa.

Em resumo, os modelos gerados para as curvas polinomiais ao final de todo o processo estão apresentados na TABELA 31 e na FIGURA 48.

**TABELA 83**

Resumo dos modelos polinomiais gerados para cada uma das condições de céu.

Tipo de céu	Equação	$r^2$
Céu Claro	$E_g = -0,4689\alpha^5 - 9,8851\alpha^4 - 76,622\alpha^3 - 247,08\alpha^2 - 187,28\alpha + 387,84$	0,95
Céu Encoberto	$E_g = -0,0007x^5 + 0,0886x^4 + 2,7625x^3 + 29,577x^2 + 138,07x + 241,63$	0,91
Céu Parcialmente Encoberto	$E_g = -0,1328x^5 - 3,1322x^4 - 25,653x^3 - 72,701x^2 + 52,49x + 421,17$	0,94



**FIGURA 48** Gráfico representando as curvas de tendência dos modelos polinômiais para cada condição de céu e a curva teórica.

*4.2.3. Modelos polinomiais de Iluminância Global ( $E_g$ ) versus Altura Solar ( $\alpha_s$ ), Conteúdo de Vapor de Água ( $w$ ) e Índice de Brilho ( $\Delta$ ).*

Como a nuvem de pontos apresenta uma dispersão considerável à medida que a altura solar aumenta, procurou-se avaliar a influência de outras variáveis nos modelos, de forma a aprimorar o desempenho destes. Com isso, inseriu-se nos modelos as variáveis conteúdo de vapor de água ( $w$ ) e o índice de brilho de céu ( $\Delta$ ), descritas anteriormente. Essas variáveis são capazes de avaliar a quantidade de vapor de água presente na atmosfera e a espessura das nuvens presentes na abóbada celeste.

As FIGURAS 49, 50, 51 e 52 representam os gráficos de dispersão para todo o conjunto de dados, para a condição de céu claro, encoberto e parcialmente encoberto, respectivamente.

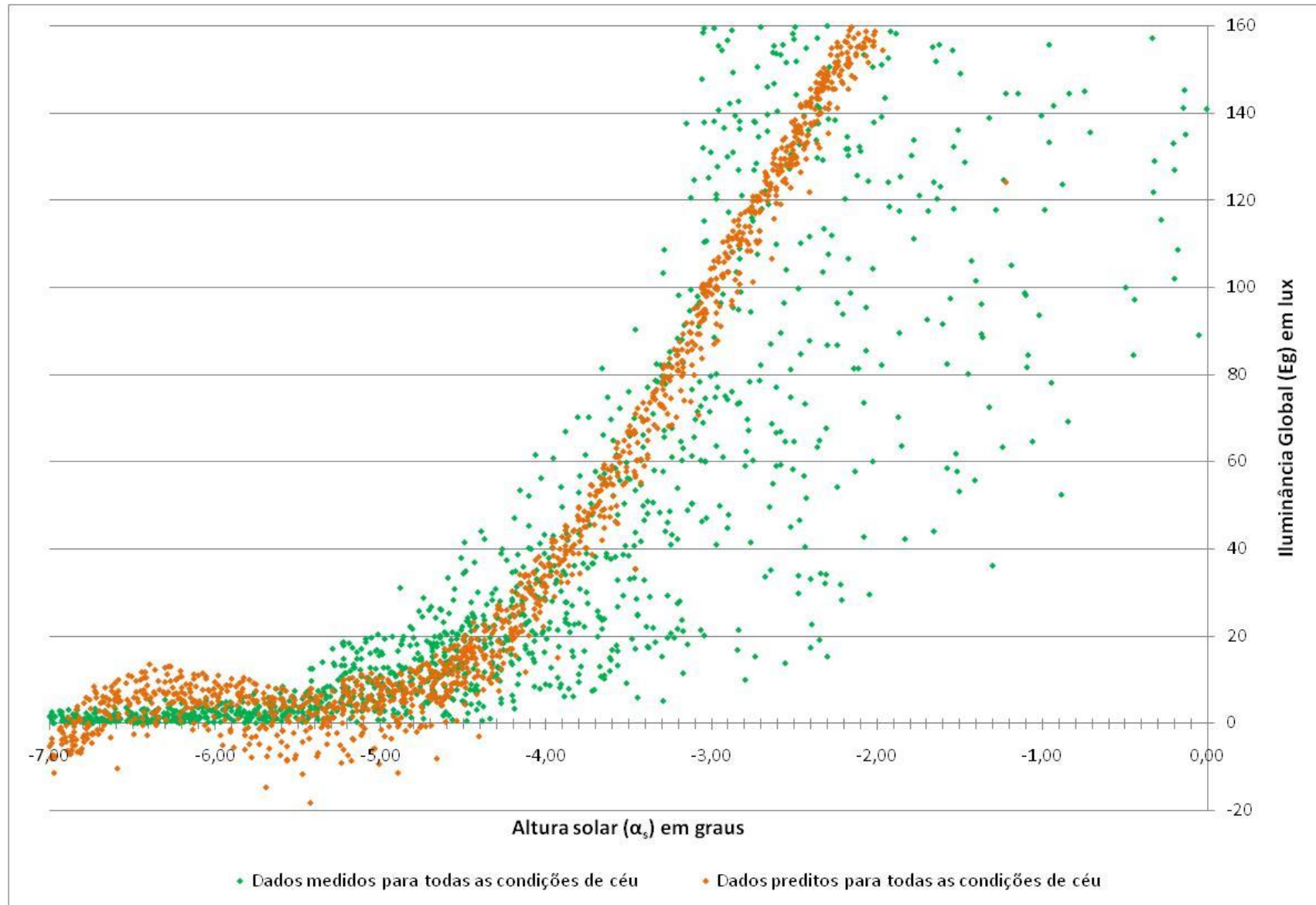


FIGURA 49 Gráfico de dispersão para modelo polinomial de  $\alpha_s$ ,  $w$  e  $\Delta$  para todas as condições de céu.

No gráfico de dispersão para todas as condições de céu os pontos verdes representam os dados medidos enquanto que os pontos em laranja representam os dados preditos, gerados pelo modelo de regressão. Pelo gráfico pode-se observar que a nuvem de pontos preditos não se assemelha à curva original dos pontos medidos, havendo nesse modelo grande dispersão às baixas alturas solares e também a flexão da nuvem de pontos, quando praticamente não há luz.

A equação encontrada para este modelo está apresentada na TABELA 32, a seguir.

**TABELA 84**

Equação para o modelo com  $\alpha_s$ ,  $w$  e  $\Delta$  para todas as condições de céu e seu respectivo  $r^2$ .

Equação	$r^2$
$E_g = 0,177796\alpha^5 + 2,43917\alpha^4 + 7,597744\alpha^3 - 11,721\alpha^2 - 12,2632\alpha - 0,4809w - 4,33643\Delta + 233,8879$	0,75

**TABELA 85**

Tabela ANOVA para o modelo com  $\alpha_s$ ,  $w$  e  $\Delta$  para todas as condições de céu.

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	7	8849075	1264154	673,1677786	0
Resíduo	1562	2933307	1877,917		
Total	1569	11782382			

Apesar do modelo de regressão ser significativo, seu  $r^2$  está abaixo do valor adotado como satisfatório de 0,85, mostrando ser este modelo inadequado para a predição da iluminância no período crepuscular.

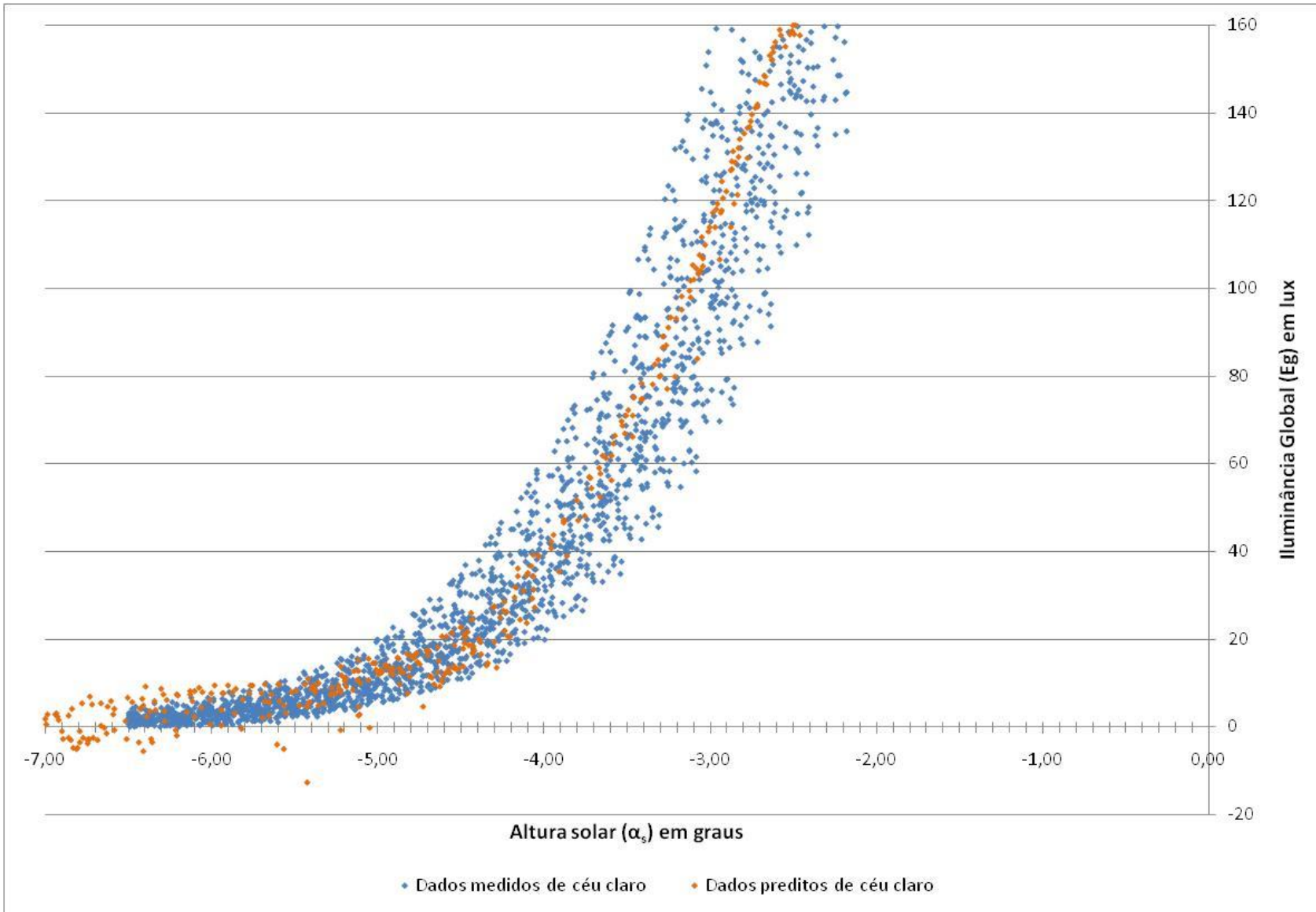


FIGURA 50 Gráfico de dispersão para modelo polinomial de  $\alpha_s$ ,  $w$  e  $\Delta$  para a condição de céu claro.

No gráfico de dispersão para dados de céu claro os pontos em azul claro representam os dados medidos para esta condição de céu e os pontos em laranja representam os dados preditos pelo modelo. O mesmo comportamento dos valores preditos observado no modelo para todas as condições de céu se repete no caso do céu claro, ocorrendo maior dispersão na nuvem de pontos a baixa altura solar, além da curva da nuvem de pontos se mostrar pouco representativa da nuvem de pontos medidos.

A equação encontrada para este modelo está apresentada na TABELA 34, a seguir.

**TABELA 86**

Equação para o modelo com  $\alpha_s$ ,  $w$  e  $\Delta$  para a condição de céu claro e seu respectivo  $r^2$ .

Equação	$r^2$
$E_g = -0,27663\alpha^5 - 7,01799\alpha^4 - 65,8574\alpha^3 - 269,261\alpha^2 - 386,7628\alpha - 2,96864w - 3,91928\Delta + 111,8603$	0,90

**TABELA 87**

Tabela ANOVA para o modelo com  $\alpha_s$ ,  $w$  e  $\Delta$  para a condição de céu claro.

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	7	2876056	410865,1	584,6186	2,1274E-217
Resíduo	437	307119,9	702,7916		
Total	444	3183175			

No caso do céu claro, o modelo além de se mostrar significativo, mostrou-se também representativo com um  $r^2$  equivalente a 0,90, mas é ainda preciso considerar a grande dispersão gerada pelo modelo para baixa altura solar.

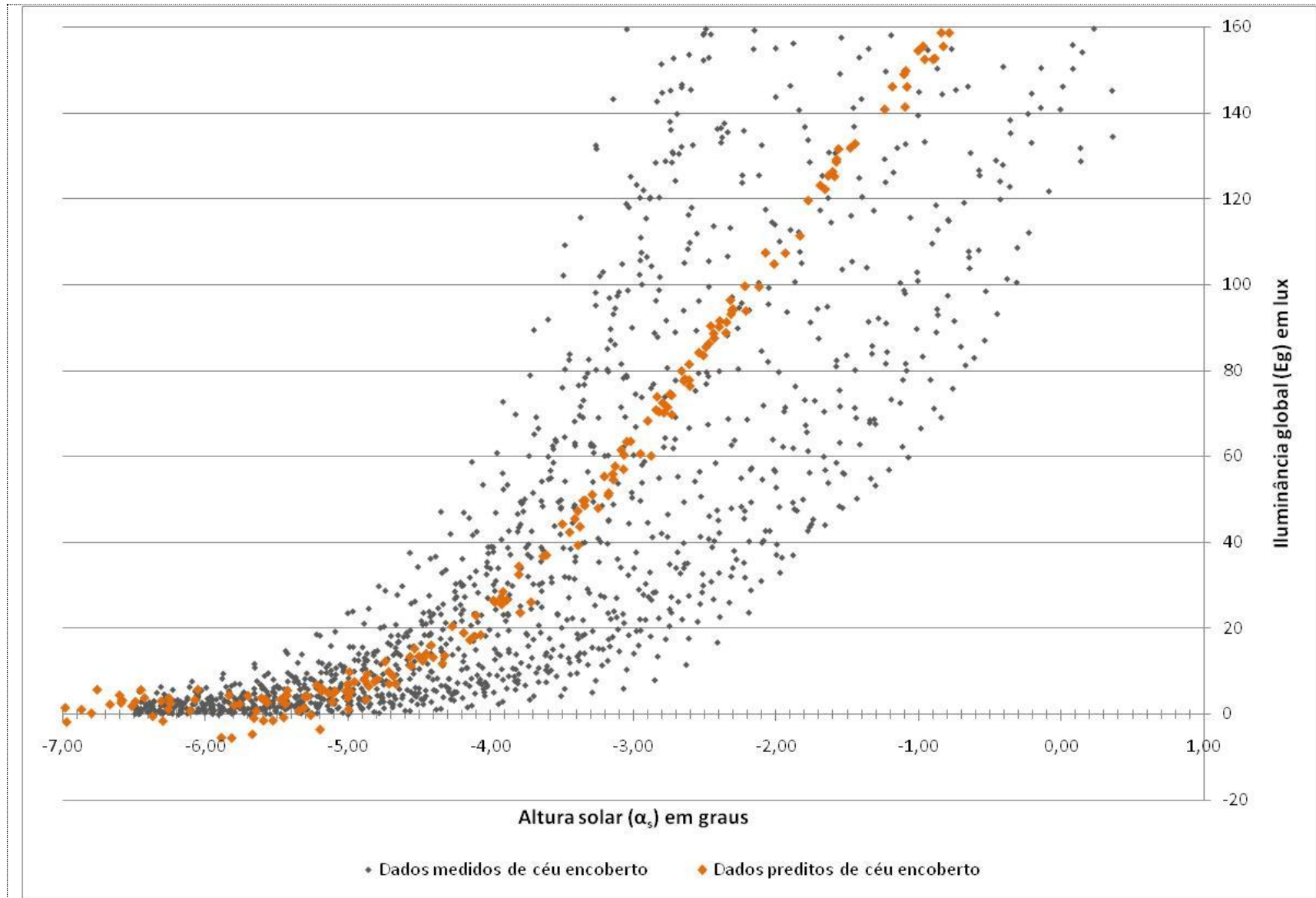


FIGURA 51 Gráfico de dispersão para modelo polinomial de  $\alpha_s$ ,  $w$  e  $\Delta$  para a condição de céu encoberto.



O gráfico de dispersão na FIGURA 51 tem representado em cinza escuro dados medidos para céu encoberto e em laranja dados preditos pelo modelo. A figura acima evidencia que a dispersão de pontos preditos a baixos valores de  $\alpha_s$  foi menor para a condição de céu encoberto, condição esta em que o conteúdo de vapor d'água presente na atmosfera é maior. Ao contrário do ocorrido anteriormente, a nuvem de pontos preditos se assemelha à curva de dados medidos.

TABELA 88

Equação para o modelo com  $\alpha_s$ ,  $w$  e  $\Delta$  para a condição de céu encoberto e seu respectivo  $r^2$ .

Equação	$r^2$
$E_g = 0,052675\alpha^5 + 0,682072\alpha^4 + 1,571267\alpha^3 - 3,856\alpha^2 + 30,22943\alpha - 0,03449w - 3,12291\Delta + 199,8857$	0,69

TABELA 89

Tabela ANOVA para o modelo com  $\alpha_s$ ,  $w$  e  $\Delta$  para a condição de céu encoberto.

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	7	1126728	160961,1	71,58438606	3,97656E-53
Resíduo	219	492432,6	2248,551		
Total	226	1619160			

Como já era esperado, o  $r^2$  encontrado para tal modelo foi baixo, como mostra a TABELA 36, deixando evidente ser o modelo pouco explicativo para o fenômeno em questão, apesar do modelo de regressão ter se mostrado significativo.

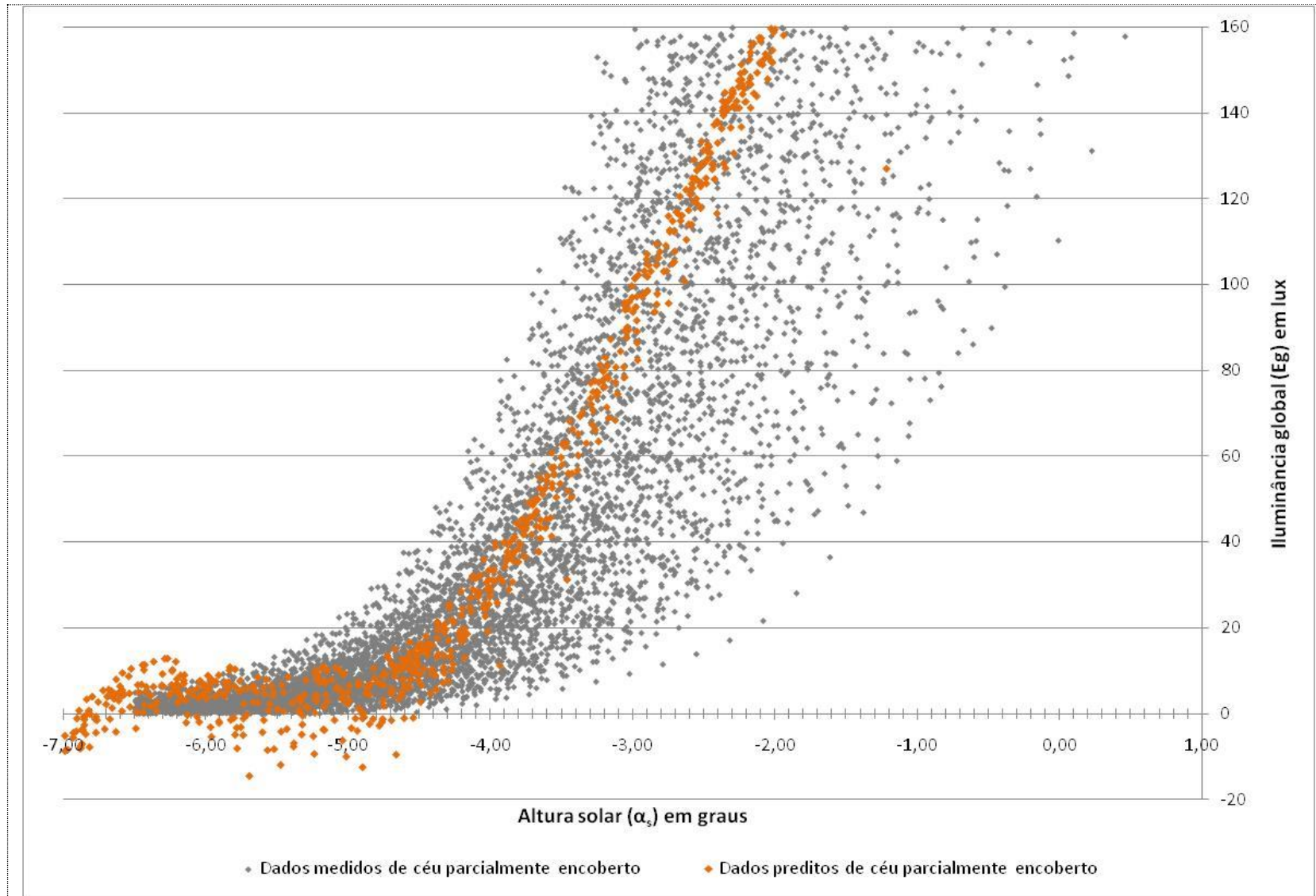


FIGURA 52 Gráfico de dispersão para modelo polinomial de  $\alpha_s$ ,  $w$  e  $\Delta$  para a condição de céu parcialmente encoberto.

Para a condição de céu parcialmente encoberto, os dados medidos estão representados em cinza claro e os dados preditos pelo modelo em laranja. É novamente observado um aumento na dispersão de dados para este tipo de céu em alturas solares menores. Novamente a curva encontrada não se assemelha à curva da nuvem de dados medidos.

TABELA 90

Equação para o modelo com  $\alpha_s$ ,  $w$  e  $\Delta$  para a condição de céu encoberto e seu respectivo  $r^2$ .

Equação	$r^2$
$E_g = 0,15194\alpha_s^5 + 1,97629\alpha_s^4 + 5,01590\alpha_s^3 - 14,7565\alpha_s^2 - 1,15114\alpha_s - 0,48125w - 4,51991\Delta + 251,8025$	0,76

TABELA 91

Tabela ANOVA para o modelo com  $\alpha_s$ ,  $w$  e  $\Delta$  para a condição de céu encoberto.

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	7	5078962	725566,1	395,1330103	2,3764E-262
Resíduo	851	1562655	1836,258		
Total	858	6641618			

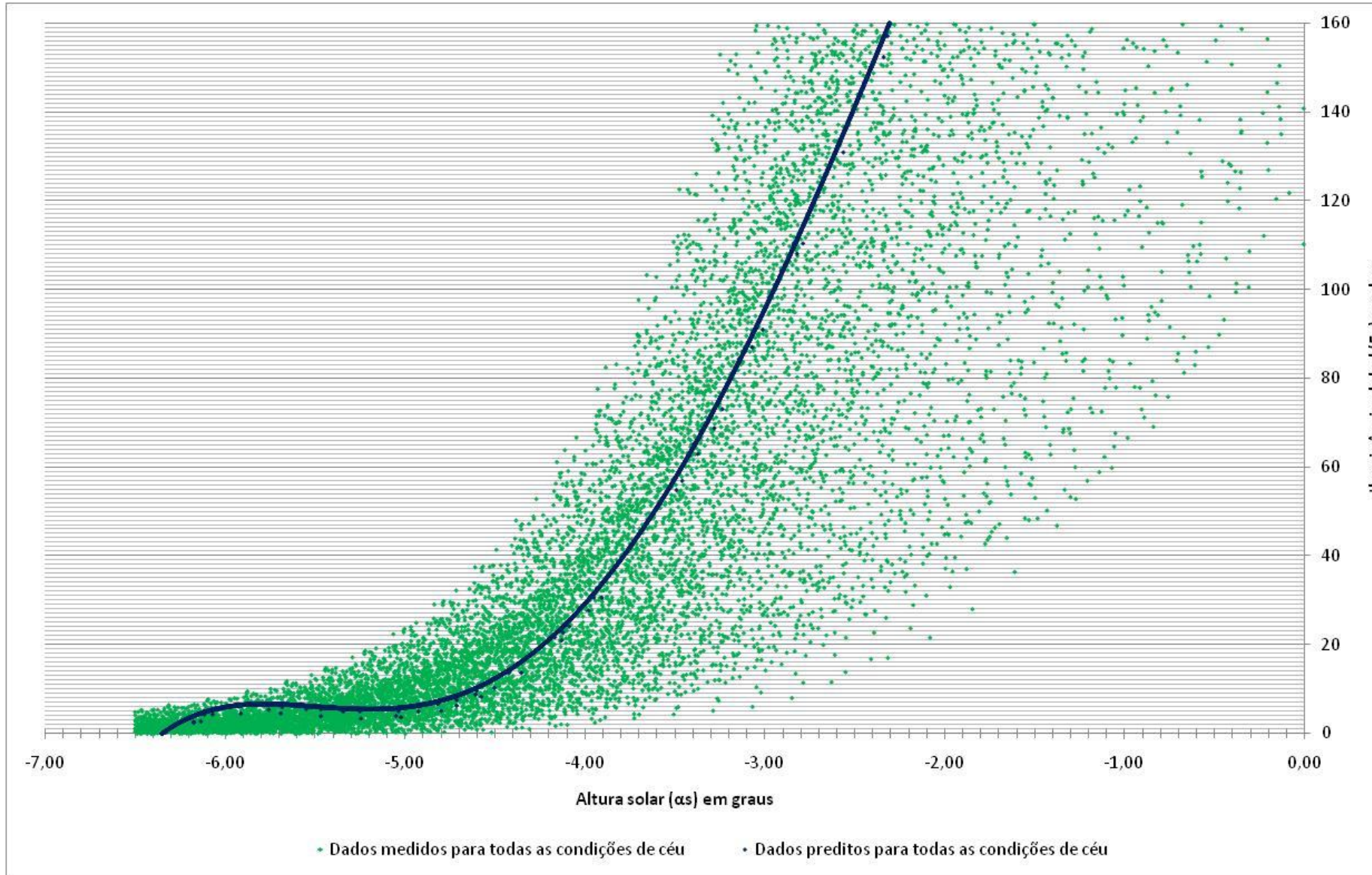
Novamente, o modelo de regressão se mostrou significativo, porém pouco explicativo ( $r^2=0,76$ ), o que leva a crer que este modelo não se aplica para os objetivos inicialmente propostos.

#### 4.2.4. Modelos polinomiais de Iluminância Global ( $E_g$ ) versus Altura Solar ( $\alpha_s$ ) e Índice de Brilho ( $\Delta$ ).

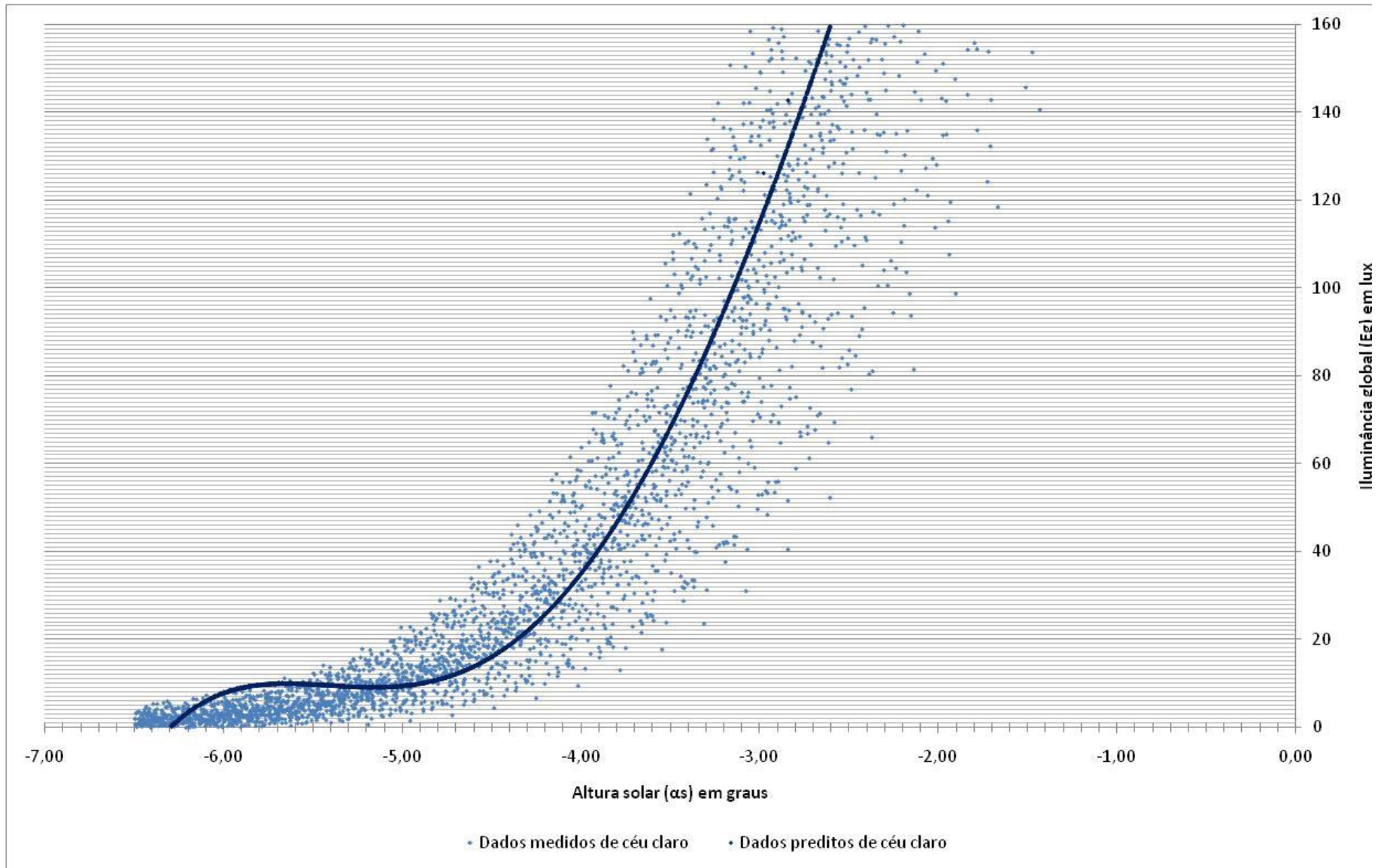
Ao avaliar o gráfico de dispersão dos modelos de Iluminância Global que consideravam as variáveis altura solar, conteúdo de vapor d'água e índice de brilho, pode-se constatar que ocorria sempre dispersão dos pontos preditos a baixas alturas solares, principalmente nos modelos de condição de céu encoberto e parcialmente encoberto, condições que possuem maior conteúdo de vapor d'água na atmosfera. Em decorrência dos resultados encontrados para estes modelos, parece que a dispersão dos dados medidos devido à diferença de

umidade existente na atmosfera deve ser melhor explicada por uma outra variável, que não o conteúdo de vapor d'água ( $w$ ), uma vez que os modelos que consideraram essa variável mostraram-se pouco explicativos.

Dando sequência a tal investigação, desenvolveu-se também modelos que consideraram como variável independente, além da altura solar, o índice de brilho ( $\Delta$ ). Os resultados encontrados serão apresentados a seguir.



**FIGURA 53** Gráfico de dispersão para modelo polinomial de  $\alpha_s$  e  $\Delta$  para todas as condições de céu.



**FIGURA 54** Gráfico de dispersão para modelo polinomial de  $\alpha_s$  e  $\Delta$  para a condição de céu claro.

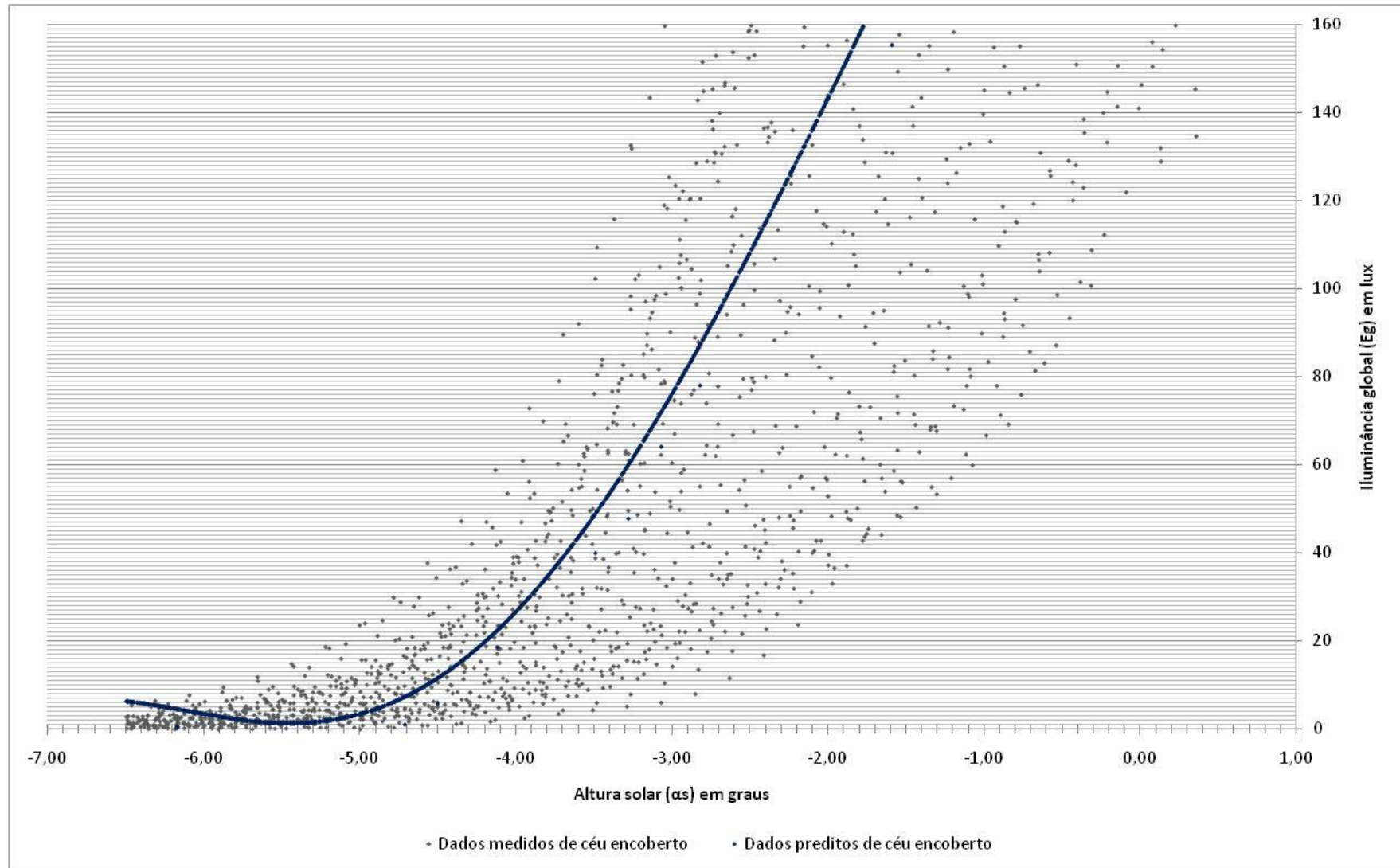


FIGURA 55 Gráfico de dispersão para modelo polinomial de  $\alpha_s$  e  $\Delta$  para a condição de céu encoberto.

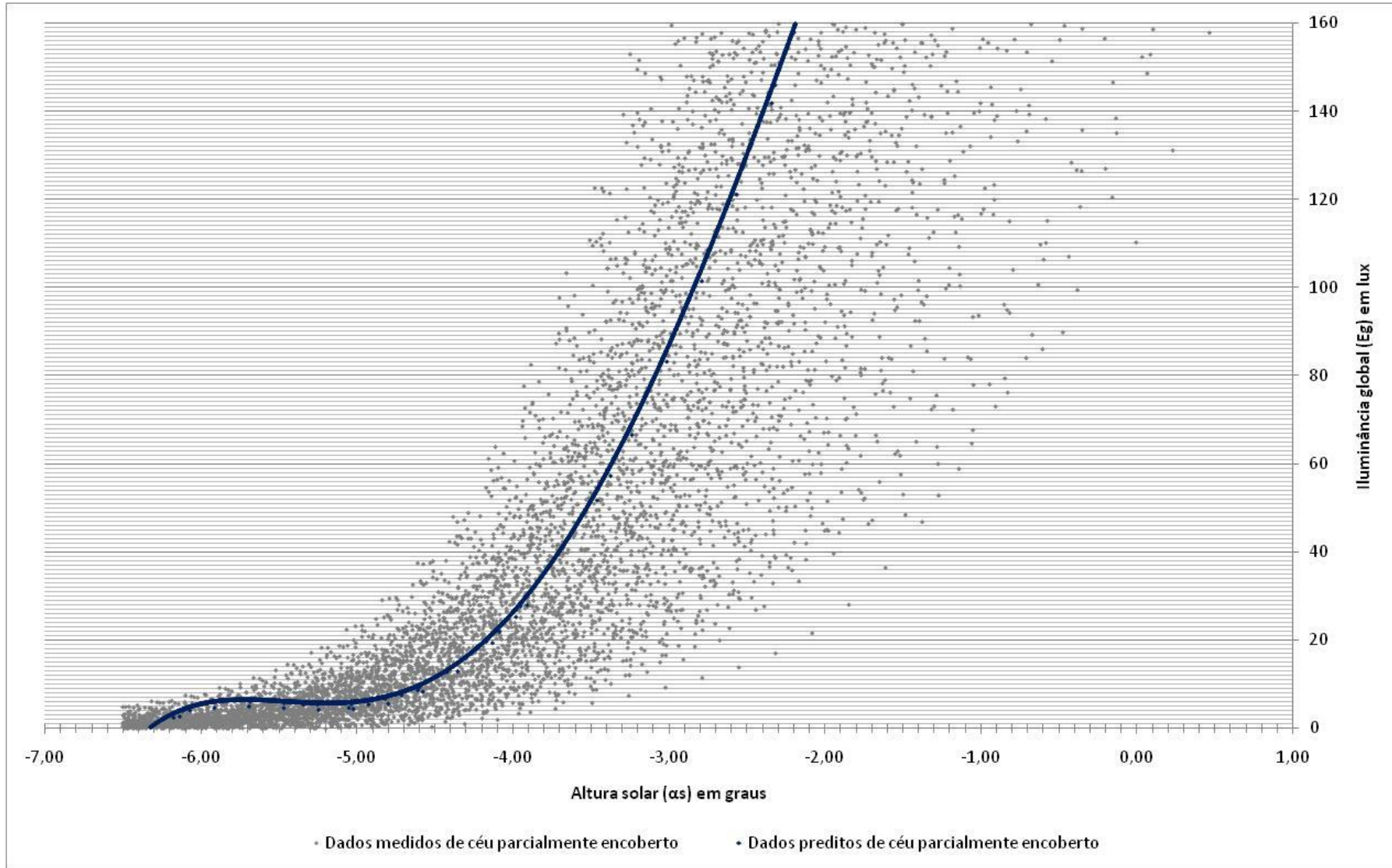


FIGURA 56 Gráfico de dispersão para modelo polinomial de  $\alpha_s$  e  $\Delta$  para a condição de céu parcialmente encoberto.



O que se pode observar nas FIGURAS 53, 54, 55 e 56 é que a nuvem de pontos gerada pelos dados do modelo pouco se assemelham e representam a nuvem de pontos medidos seja para o conjunto de dados ou para cada uma das condições de céu. A curva da nuvem de pontos preditos apresenta uma flexão a baixos valores de  $\alpha_s$ , pouco representativa da realidade dos dados medidos. Tal flexão pode ser resultado da variável envolvida ser pouco explicativa para representar o fenômeno que ocorre quando há pouca luz dispersa na atmosfera.

Além da análise visual, é imprescindível a análise de modelos do ponto de vista da representatividade e significância dos modelos de regressão.

TABELA 92

Equações para o modelo com  $\alpha_s$  e  $\Delta$  para todas as condições de céu e seus respectivos  $r^2$ .

Condição de céu	Modelos polinomial	
	Equação	$r^2$
Todos os tipos de céu	$E_g = 0,15795\alpha^5 + 1,738566\alpha^4 + 2,178479\alpha^3 - 16,7673\alpha^2 + 49,20766\alpha - 0,04839\Delta + 350,4596$	0,80
Céu Claro	$E_g = 0,161927\alpha^5 + 1,390349\alpha^4 - 3,09532\alpha^3 - 37,9148\alpha^2 + 46,04011\alpha - 0,59453\Delta + 437,4897$	0,91
Céu Encoberto	$E_g = 0,060201\alpha^5 + 0,726606\alpha^4 + 1,230332\alpha^3 - 2,87576\alpha^2 + 63,97658\alpha - 0,13875\Delta + 282,9202$	0,76
Céu Parcialmente Encoberto	$E_g = 0,127304\alpha^5 + 1,29385\alpha^4 + 0,634999\alpha^3 - 13,6711\alpha^2 + 68,44839\alpha - 0,03646\Delta + 358,4689$	0,81

Os valores de  $r^2$  encontrados para este tipo de modelo apresentaram valores abaixo do esperado para todas as condições de céu, com exceção do céu claro ( $r^2=0,91$ ), apresentando-se, portanto, pouco explicativos.

TABELA 93

Tabela ANOVA para o modelo com  $\alpha_s$  e  $\Delta$  para todas as condições de céu.

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	6	191925250,7	31987541,78	9286,249398	0
Resíduo	14170	48810175,95	3444,613687		
Total	14176	240735426,6			

TABELA 94

Tabela ANOVA para o modelo com  $\alpha_s$  e  $\Delta$  para a condição de céu claro.

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	6	48751404,11	8125234,018	6122,238883	0
Resíduo	3802	5045889,311	1327,167099		
Total	3808	53797293,42			

TABELA 95

Tabela ANOVA para o modelo com  $\alpha_s$  e  $\Delta$  para a condição de céu encoberto.

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	6	29918907,49	4986484,582	1021,741059	0
Resíduo	1896	9253200,389	4880,379952		
Total	1902	39172107,88			

TABELA 96

Tabela ANOVA para o modelo com  $\alpha_s$  e  $\Delta$  para a condição de céu parcialmente encoberto.

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	6	115328151	19221358,5	5759,493108	0
Resíduo	8143	27175919,71	3337,335098		
Total	8149	142504070,7			

Todos os modelos, apesar de pouco explicativos, demonstraram ser, mais uma vez, significantes.

### 4.3. Avaliação do Desempenho dos Modelos de Regressão

Para cada um dos modelos desenvolvidos foram geradas estatísticas de regressão para avaliação dos modelos, sendo assim razoável identificar aquele(s) modelo(s) com melhor desempenho e mais aptos a explicarem o comportamento da iluminação natural no período crepuscular. O(s) modelo(s) selecionados serão aproveitados para o cálculo da duração da noite para a cidade de Belo Horizonte e, então, os resultados encontrados comparados com resultados observados de duração da noite através dos dados medidos, para validação do(s) modelo(s).

As estatísticas de desempenho utilizadas para avaliação dos modelos serão o *r ajustado* representado por  $r^2$ , o desvio médio (MBD) indicando a tendência a subestimação ou a superestimação, e o desvio quadrático médio (RMSD) representando a medida de desvio dos valores preditos pelos modelos em relação aos valores medidos.

As equações de todos os modelos já apresentados estão resumidas na TABELA 45, assim como os seus respectivos valores de  $r^2$ , MBD e RMSD, possibilitando assim uma comparação e avaliação mais fácil dos modelos. Primeiramente, os modelos considerando as mesmas variáveis independentes serão comparados entre si em relação ao desempenho do modelo para todas as condições de céu e para cada condição de céu. Por fim, serão comparados entre si os modelos considerando diferentes variáveis independentes, de forma a estabelecer aquele(s) que melhor explicam o fenômeno da iluminação durante o nascer e pôr do sol.

TABELA 97

Resumo dos modelos de regressão desenvolvidos com suas respectivas estatísticas de desempenho.

Modelo	Tipo de céu	Equação	$r^2$	MBD (%)	RMSD (%)
Modelo de $E_g$ versus $\alpha_s$	Todas condições de céu	$E_g = -0,0992\alpha^5 - 2,5858\alpha^4 - 23,214\alpha^3 - 73,367\alpha^2 + 33,712\alpha + 412,59$	0,90	-9,41	22,95
	Céu Claro	$E_g = -0,4689\alpha^5 - 9,8851\alpha^4 - 76,622\alpha^3 - 247,08\alpha^2 - 187,28\alpha + 387,84$	0,95	1,04	16,10
	Céu Encoberto	$E_g = -0,0007x^5 + 0,0886x^4 + 2,7625x^3 + 29,577x^2 + 138,07x + 241,63$	0,91	-1,39	25,44
	Céu Parcialmente Encoberto	$E_g = -0,1328x^5 - 3,1322x^4 - 25,653x^3 - 72,701x^2 + 52,49x + 421,17$	0,94	-1,91	19,04
Modelo de $E_g$ versus $\alpha_s, w$ e $\Delta$	Todas condições de céu	$E_g = 0,177796\alpha^5 + 2,43917\alpha^4 + 7,597744\alpha^3 - 11,721\alpha^2 - 12,2632\alpha - 0,4809w - 4,33643\Delta + 233,8879$	0,75	0,07	28,97
	Céu Claro	$E_g = -0,27663\alpha^5 - 7,01799\alpha^4 - 65,8574\alpha^3 - 269,261\alpha^2 - 386,7628\alpha - 2,96864w - 3,91928\Delta + 111,8603$	0,90	-0,49	19,75
	Céu Encoberto	$E_g = 0,06214668\alpha^5 + 0,71486363\alpha^4 + 0,99274469\alpha^3 - 2,98615942\alpha^2 + 68,4208883\alpha - 41,9125732w - 0,16526582\Delta + 407,667262$	0,78	-0,33	27,12
	Céu Parcialmente Encoberto	$E_g = 0,124903\alpha^5 + 1,62584524076\alpha^4 + 0,405039\alpha^3 - 13,0734\alpha^2 + 73,53275\alpha - 30,9871w - 0,03265\Delta + 441,604$	0,82	-0,04	29,36
Modelo de $E_g$ versus $\alpha_s$ e $\Delta$	Todas condições de céu	$E_g = 0,15795\alpha^5 + 1,738566\alpha^4 + 2,178479\alpha^3 - 16,7673\alpha^2 + 49,20766\alpha - 0,04839\Delta + 350,4596$	0,80	-1,11	23,13
	Céu Claro	$E_g = 0,161927\alpha^5 + 1,390349\alpha^4 - 3,09532\alpha^3 - 37,9148\alpha^2 + 46,04011\alpha - 0,59453\Delta + 437,4897$	0,91	-0,52	18,73
	Céu Encoberto	$E_g = 0,060201\alpha^5 + 0,726606\alpha^4 + 1,230332\alpha^3 - 2,87576\alpha^2 + 63,97658\alpha - 0,13875\Delta + 282,9202$	0,76	0,36	23,25
	Céu Parcialmente Encoberto	$E_g = 0,127304\alpha^5 + 1,29385\alpha^4 + 0,634999\alpha^3 - 13,6711\alpha^2 + 68,44839\alpha - 0,03646\Delta + 358,4689$	0,81	0,15	23,83

Ao se comparar o desempenho do modelo para todas as condições de céu em relação aos modelos específicos para cada condição de céu, em todos os casos o desempenho do modelo único foi inferior aos do modelo específico para o tipo de céu. Tal fato é decorrência de ser tratar da comparação entre um modelo mais geral e modelos específicos, sendo os últimos com melhor capacidade explicativa para a condição para a qual foram gerados.

Avaliando os modelos sob o aspecto do indicador MBD todos os modelos obtiveram valores próximos de zero, tornando-os equivalentes em desempenho sob a análise estatística, à exceção do modelo de  $E_g$  versus  $\alpha_s$  para todos os tipos de céu em que o valor encontrado foi de -9,41, indicando a tendência do modelo de subestimar os valores preditos em quase 10%. Já em relação aos valores de RMSD, os modelos apresentaram valores um pouco mais altos, variando entre 16% e 29%. Para o RMSD já era esperada a ocorrência de valores mais altos, uma vez que há uma dispersão maior de pontos à medida em que há o acréscimo de luz na atmosfera, em decorrência da necessidade de haver uma terceira variável explicativa do fenômeno da quantidade de umidade na atmosfera. Os modelos de  $E_g$  versus  $\alpha_s$  apresentaram os valores de RMSD mais baixos, demonstrando um melhor desempenho. Ao mesmo tempo, quando analisados em relação ao  $r^2$ , foram justamente os modelos que consideraram apenas a variável  $\alpha_s$  por tipo de céu que apresentaram melhor desempenho. Foram estes também cujas curvas de tendência melhor se adequaram à nuvem de pontos de dados medidos. Assim, optou-se por trabalhar com os mesmos para o cálculo da duração da noite.

A aplicação dos modelos para o cálculo da duração da noite será apresentado no item a seguir.

#### 4.4. Análise da Duração da Noite em Função dos Modelos e Tipos de céu

Para o cálculo da duração da noite, empregaram-se como critérios balizadores os níveis de iluminação propostos pela norma NBR 5123 (ABNT, 2007), tendo seu início definido como 20 lux e seu término ao nível de 80 lux.

**TABELA 98**

Níveis de iluminância para acionamento dos relés fotoelétricos de acordo com a NBR 5123/97.

Nível de Iluminância (lux)	
Amanhecer	80
Anoitecer	20

Baseado na classificação dos tipos de céus típicos para cada mês para a cidade de Belo Horizonte, através do método simplificado desenvolvido por Ferreira e Souza (2006), aplicaram-se os modelos desenvolvidos para cada tipo de céu aos respectivos tipos de céu típicos para cada mês do ano (TABELA 47), estimando-se os horários de ocorrência dos valores fixados de iluminância e calculou-se a duração da noite (em horas) média mensal e anual para esta cidade.

**TABELA 99**

Tipos de céu típicos para cada mês para a cidade de Belo horizonte e as respectivas equações.

Mês	Tipo de céu	Equação modelo
Janeiro	Encoberto	$E_g = -0,0007x^5 + 0,0886x^4 + 2,7625x^3 + 29,577x^2 + 138,07x + 241,63$
Fevereiro	Parcialmente Encoberto	$E_g = -0,1328x^5 - 3,1322x^4 - 25,653x^3 - 72,701x^2 + 52,49x + 421,17$
Março	Parcialmente Encoberto	$E_g = -0,1328x^5 - 3,1322x^4 - 25,653x^3 - 72,701x^2 + 52,49x + 421,17$
Abril	Parcialmente Encoberto	$E_g = -0,1328x^5 - 3,1322x^4 - 25,653x^3 - 72,701x^2 + 52,49x + 421,17$
Maio	Parcialmente Encoberto	$E_g = -0,1328x^5 - 3,1322x^4 - 25,653x^3 - 72,701x^2 + 52,49x + 421,17$

TABELA 47

Tipos de céu típicos para cada mês para a cidade de Belo horizonte e as respectivas equações (cont.).

Mês	Tipo de céu	Equação modelo
Junho	Claro	$E_g = -0,4689\alpha^5 - 9,8851\alpha^4 - 76,622\alpha^3 - 247,08\alpha^2 - 187,28\alpha + 387,84$
Julho	Claro	$E_g = -0,4689\alpha^5 - 9,8851\alpha^4 - 76,622\alpha^3 - 247,08\alpha^2 - 187,28\alpha + 387,84$
Agosto	Claro	$E_g = -0,4689\alpha^5 - 9,8851\alpha^4 - 76,622\alpha^3 - 247,08\alpha^2 - 187,28\alpha + 387,84$
Setembro	Parcialmente Encoberto	$E_g = -0,1328x^5 - 3,1322x^4 - 25,653x^3 - 72,701x^2 + 52,49x + 421,17$
Outubro	Encoberto	$E_g = -0,0007x^5 + 0,0886x^4 + 2,7625x^3 + 29,577x^2 + 138,07x + 241,63$
Novembro	Encoberto	$E_g = -0,0007x^5 + 0,0886x^4 + 2,7625x^3 + 29,577x^2 + 138,07x + 241,63$
Dezembro	Encoberto	$E_g = -0,0007x^5 + 0,0886x^4 + 2,7625x^3 + 29,577x^2 + 138,07x + 241,63$

As equações foram aplicadas em cada um dos meses e identificados os momentos em que eram atingidos os níveis de 80 e 20 lux para cada dia do ano e valores médios mensais determinados. De forma análoga, médias dos valores médios medidos foram obtidas. Assim, os valores médios encontrados pelos modelos foram confrontados com os valores médios medidos, bem como com os valores extraídos da curva teórica apresentada por Seidelman (2006), aqui denominado modelo teórico. Os valores referentes à curva teórica fazem menção a dias de céu claro, podendo seus valores serem comparados apenas aos meses em que a condição típica é a de céu claro. Quando comparados aos demais meses apresentam uma certa discordância que varia de valor de mês para mês.

Os valores encontrados serão apresentados na TABELA 48 e pela FIGURA 57. Pereira *et al.* (2009), a partir dos dados medidos, encontrou uma duração da noite média para a cidade de Belo Horizonte equivalente à 11 horas e 32 minutos, considerando o intervalo de 80 e 20 lux.

TABELA 100

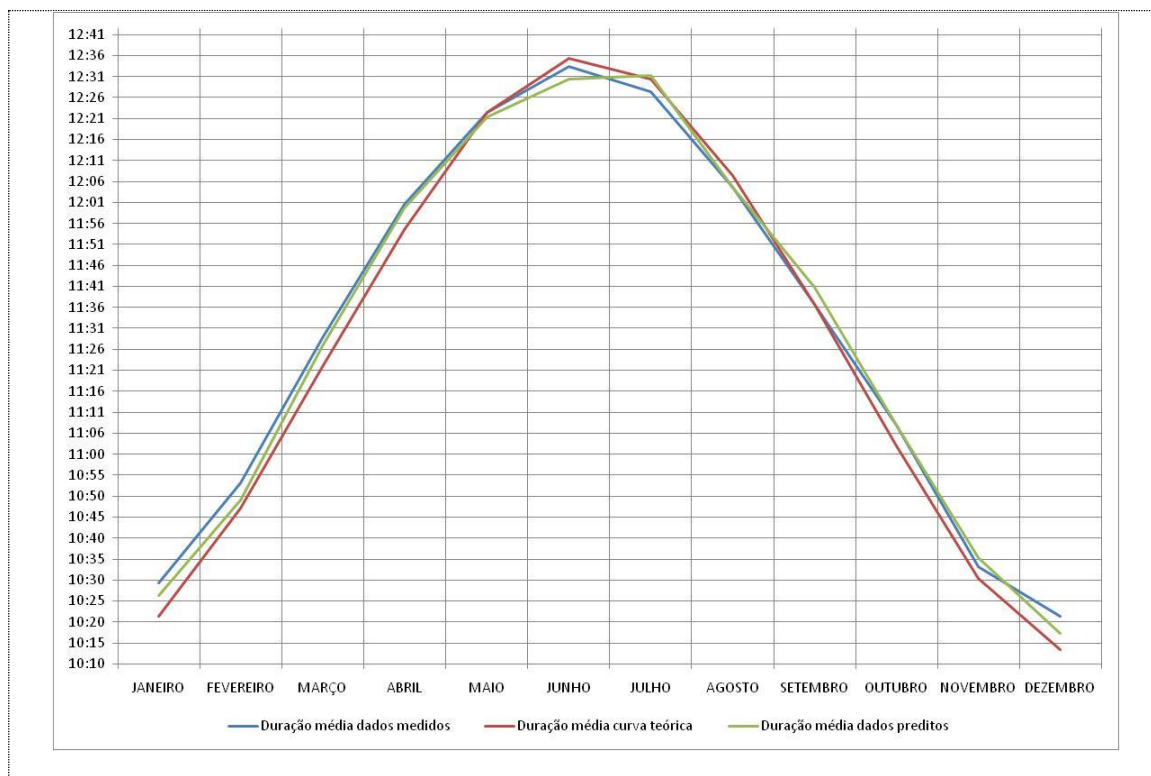
Duração da noite média mensal medida (horas), teórica e dos modelos para a cidade de Belo Horizonte no período de medições.

Mês	Medido	Teórico	Modelo para todos os tipos de céu	Modelo para cada condição de céu
Janeiro	10:30	10:22	10:21	10:27
Fevereiro	10:54	10:48	10:49	10:50
Março	11:29	11:22	11:22	11:27
Abril	12:01	11:55	11:56	12:00
Mai	12:23	12:23	12:23	12:22
Junho	12:34	12:36	12:35	12:31
Julho	12:28	12:31	12:30	12:32
Agosto	12:05	12:08	12:10	12:05
Setembro	11:37	11:37	11:39	11:41
Outubro	11:08	11:03	11:02	11:08
Novembro	10:37	10:31	10:32	10:36
Dezembro	10:22	10:14	10:15	10:18
Média anual	11:31	11:27	11:27	11:30

Observa-se que há um bom assentimento entre os valores medidos e modelados para cada condição de céu na maior parte dos meses e na média anual. Já em relação aos valores teóricos, há uma discordância um pouco maior. Os valores modelados pelo modelo para todas as condições de céu se aproximam bastante dos valores teóricos.

Calculando a duração da noite para a cidade de Belo Horizonte a partir dos modelos gerados encontrou-se a duração da noite média anual de 11 horas e 30 minutos, para o intervalo de 20 a 80 lux. Comparando este resultado com a duração média da noite para um ano de medição encontrada foi de 11 horas e 32 minutos para a mesma cidade. Essa diferença encontrada pode ser decorrente até mesmo de arredondamentos.

Pelo gráfico representado na FIGURA 57 pode-se notar que as curvas de duração da noite medida (curva em azul) e predita (curva em verde) se assemelham bastante, quase se sobrepondo. Em vermelho está representada a curva teórica.



**FIGURA 57** Gráfico representativo da duração da noite média medida (horas), teórica e do modelo para a cidade de Belo Horizonte.

Ao analisar a diferença mensal entre os valores medidos e preditos, encontrou-se que esta diferença variou entre 0 (zero) e 4 (quatro) minutos (a mais ou a menos), sendo ainda importante se considerar a incerteza inerente ao modelo. A tendência observada foi a de que o modelo forneceu valores inferiores de duração da noite em relação aos dados medidos. Os meses de agosto e de outubro apresentaram os melhores resultados, obtendo-se valores equivalentes aos medidos. A maior diferença encontrada, a de 4 minutos, foram obtidas nos meses de fevereiro, julho, setembro e dezembro, sendo que nos meses de julho e setembro os valores obtidos a partir dos modelos foram de noites maiores. Os valores de diferença encontrados estão na TABELA 49.



TABELA 101

Diferença entre os valores de duração da noite (horas) medida, teórica e do modelo para a cidade de Belo Horizonte.

	Medido e Modelo	Teórico e Modelo
Janeiro	-00:03	+00:05
Fevereiro	-00:04	+00:02
Março	-00:02	+00:05
Abril	-00:01	+00:05
Maio	-00:01	-00:01
Junho	-00:03	-00:05
Julho	+00:04	+00:01
Agosto	-00:00	-00:03
Setembro	+00:04	+00:04
Outubro	-00:00	+00:05
Novembro	-00:02	+00:05
Dezembro	-00:04	+00:04
Média Anual	-00:01	+01:30

Considerando a possibilidade de expandir a aplicação dos modelos desenvolvidos a outras cidades de Minas Gerais, testou-se os modelos por tipo de céu para algumas cidades do estado que continham dados nas Normais Climatológicas (BRASIL, 1992), quais sejam: Lavras, Machado, Montes Claros, Paracatu e Viçosa.

Aplicou-se, assim como para Belo Horizonte, o método simplificado desenvolvido por Ferreira e Souza (2006), para identificar do céu típico de cada mês para as cidades supracitadas. A TABELA 50 apresenta os céus típicos para cada uma das cidades.

TABELA 102

Céus típicos para as cidades de Minas Gerais avaliadas.

	Lavras	Machado	Montes Claros	Paracatu	Viçosa
Janeiro	Encoberto	Encoberto	Parc. encoberto	Encoberto	Encoberto
Fevereiro	Parc. encoberto	Encoberto	Parc. encoberto	Encoberto	Parc. encoberto

TABELA 50

Céus típicos para as cidades de Minas Gerais avaliadas (cont.).

	Lavras	Machado	Montes Claros	Paracatu	Viçosa
Março	Parc. encoberto	Encoberto	Parc. encoberto	Encoberto	Parc. encoberto
Abril	Parc. encoberto	Parc. encoberto	Parc. encoberto	Parc. encoberto	Parc. encoberto
Maio	Parc. encoberto	Parc. Encoberto	Claro	Parc. encoberto	Parc. encoberto
Junho	Parc. encoberto	Parc. encoberto	Claro	Parc. encoberto	Parc. encoberto
Julho	Claro	Parc. encoberto	Claro	Parc. encoberto	Parc. encoberto
Agosto	Claro	Parc. encoberto	Claro	Parc. encoberto	Parc. encoberto
Setembro	Parc. encoberto	Encoberto	Parc. encoberto	Encoberto	Encoberto
Outubro	Parc. encoberto	Encoberto	Parc. encoberto	Encoberto	Encoberto
Novembro	Encoberto	Encoberto	Encoberto	Encoberto	Encoberto
Dezembro	Encoberto	Encoberto	Encoberto	Encoberto	Encoberto

A seguir, utilizou-se os modelos para os respectivos tipos de céu para se encontrar os momentos em que os níveis de 80 e 20 lux são atingidos, para então a duração da noite ser calculada. A duração da noite encontrada para estas cidades foi comparada com a duração da noite fornecida pelo *software* Helios, resultado do projeto P&D128 CEMIG/GREEN - Solar GREEN-Solar (Grupo de Estudos em Energia Solar) com colaboração do LICAP (Laboratório de Inteligência Computacional Aplicada), ambos da PUC Minas. Este programa se baseia na curva teórica e no índice de pluviosidade das cidades para a estimativa da duração da noite. Os resultados encontrados pelos modelos e pelo Helios serão confrontados na TABELA 52.

TABELA 103

Duração da noite pelos modelos desenvolvidos e pelo programa Helios para cidades de Minas Gerais.

Cidade	Latitude	Helios	Modelo
Lavras	-21,23°	11 hs 29 min	11 hs 30 min
Machado	-21,70°	11 hs 29 min	11 hs 30 min
Montes Claros	-16,75°	11 hs 29 min	11 hs 29 min
Paracatu	-17,25°	11 hs 29 min	11 hs 34 min
Viçosa	-20,74°	11 hs 29 min	11 hs 32min

Pela TABELA 52 pode-se constatar que há uma semelhança nos resultados encontrados pelos modelos e pelo Helios para as cidades em que há meses com a condição de céu claro predominante. Já para cidades com um regime de chuvas diferenciado, os valores divergem sendo os valores preditos superiores aos do Helios. Uma vez que o *software* Helios apresenta-se como um modelo mais genérico por basear-se na latitude e pluviosidade local do que os modelos desenvolvidos baseados em condições de céu, este último aparenta proporcionar maior sensibilidade para a variação de disponibilidade de luz natural no período de interesse.

## 5 CONCLUSÕES

A base de cálculo atual para encargo com iluminação pública é de 12 horas diárias, definidas a partir da média anual de horas entre o pôr e o nascer do sol, considerando a duração média do dia quando o sol se encontra na linha do horizonte. Entretanto, este cálculo não considera o período crepuscular, quando há luz no céu, apesar do Sol encontrar-se abaixo da linha do horizonte. Diante de tal constatação, algumas Prefeituras Municipais levantaram um questionamento perante algumas concessionárias de energia com relação ao número de horas faturadas de iluminação pública.

De fato, a consideração da luz crepuscular pode contribuir para a redução do tempo determinado para a utilização da iluminação pública. Todavia, para tanto, é preciso o conhecimento deste fenômeno e sua quantificação, de forma a possibilitar a correta previsão dos tempos de acionamento de iluminação pública.

Este trabalho se propôs a determinar os níveis de iluminância da alvorada e do ocaso através de modelos matemáticos de regressão a partir de dados medidos, que fossem capazes de quantificar a luz presente no crepúsculo, para então definir os períodos necessários de iluminação pública artificial noturna para a cidade de Belo Horizonte.

Para tal houve um período de monitoramento das condições de céu e de iluminância horizontal através da Estação de Medição de Belo Horizonte (EMIN-BH) por tempo suficiente para admitir a modelização dos tipos de céu e, assim, a previsão das condições da luz crepuscular em sua frequência de ocorrência relativa aos tipos de céu.

Examinou-se tanto modelos exponenciais como polinomiais, verificando-se serem os modelos polinomiais capazes de melhor caracterizar o fenômeno da luz crepuscular. Assim como os modelos específicos para cada condição de céu apresentaram melhor desempenho que os modelos para todas as condições de céu. Os modelos polinomiais por condição de céu encontrados apresentaram ser tanto explicativos, quanto significativos. Analisando as curvas de tendência dos modelos por tipo de céu, aquela que mais se aproxima da curva

teórica é a curva da condição de céu claro. Os dias de céu claro apresentaram dias de maior duração, sendo seguidos pelo céu parcialmente encoberto e encoberto.

Baseado nos modelos desenvolvidos identificou-se os horários de ocorrência dos valores de iluminância de 20 e 80 lux, valores estes referentes ao momento em que o relé fotoelétrico deve ser acionado ao anoitecer e amanhecer, respectivamente, segundo a NBR 5123/97, para, por fim, calcular a duração da noite (em horas).

A duração da noite modelada foi comparada com a duração da noite medida encontrada por Arreguy (2008) a partir de dados medidos, de forma a verificar a exatidão dos modelos. Ao comparar a duração da noite média mensal medida e predita, observou-se uma diferença que variou entre 0 e 4 minutos. Os resultados encontrados para a duração média anual da noite a partir dos modelos foram satisfatórios, uma vez que a diferença máxima encontrada entre medido e predito foi de 4 minutos, havendo ainda que se considerar as incertezas das medições e dos próprios modelos, valor pouco significativo e provavelmente decorrente da variação de umidade presente na atmosfera entre os dias medidos, evidenciando a necessidade de incorporar ao modelo uma terceira variável capaz de caracterizar a umidade presente na atmosfera terrestre. Recomenda-se para trabalhos futuros a investigação de uma variável capaz de caracterizar a umidade contida na atmosfera de forma adequada e que possa ser inserida no modelo, uma vez que a inserção do conteúdo de vapor de água como tal variável, não se mostrou satisfatória.

A duração média anual da noite para a cidade de Belo Horizonte para um ano de medição foi de 11 horas e 32 minutos, segundo Pereira *et al.* (2009), para o intervalo de 20 a 80 lux. Enquanto que a duração média anual da noite para a mesma cidade a partir dos modelos gerados foi de 11 horas e 30 minutos, valores bastante próximos, verificando a capacidade de predição dos modelos. No que se refere à curva teórica, a duração da noite encontrada a partir desta curva, de 11 horas e 27 minutos, valor inferior à duração da noite medida e predita, evidenciou não ser o modelo teórico proposto por Seidelman (2006) o mais adequado para a estimativa da duração da noite.

É ainda de relevância a expansão da aplicabilidade desses modelos para outras cidades de Minas Gerais, de forma a auxiliar na investigação para o número mais adequado de horas de tarifação para a iluminação pública artificial. Os modelos desenvolvidos para a cidade de Belo Horizonte, quando aplicados em outras cidades do estado, apontaram bom desempenho para cidades que com a condição de céu claro, sendo encontrados valores próximos ao *software* Helios, para a duração da noite. No entanto, para cidades com o um regime de chuvas diferenciado, os modelos desenvolvidos apresentaram maior sensibilidade para as variações da disponibilidade de luz natural do que o *software*.

Faz-se de importância ainda ressaltar que o resultado encontrado refere-se ao céu desobstruído, condição esta da estação medidora EMIN-BH. Contudo, a linha do horizonte local pode ser afetada pelo relevo (ocorrência de elevações ou montanhas) assim como pela paisagem urbana, em seu processo de verticalização, resultando assim em menor disponibilidade de luz natural na abóbada celeste local, uma vez que o nascer do sol se dará mais tarde e o pôr do sol mais cedo, havendo a necessidade de se considerar essas variações no cálculo da duração da noite.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 5123 – Relé Fotoelétrico para Iluminação*: especificação e método de ensaio. Rio de Janeiro, 1997, 19p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 15.215-1 – Iluminação Natural – Parte 1*: Conceitos básicos e definições. Rio de Janeiro, 2005 A, 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 15.215-2 – Iluminação Natural – Parte 2*: Procedimentos de cálculo para a estimativa da disponibilidade de luz natural. Rio de Janeiro, 2005 B, 17p.

AMORIM, C. N. *Iluminação Natural e Eficiência Energética – Parte I*: estratégias de projeto para uma arquitetura sustentável. Paranoá, vol.4, 2002. Disponível em: < <http://e-groups.unb.br/fau/>>. Acesso em: 23 mar. 2008.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). *Resolução ANEEL nº 456*. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/bres200456.pdf>>. Acesso em: 23 mar. 2008.

ARREGUY, E. G. *Garantia da Qualidade Metrológica das Medições de Iluminância das Estações CEMIG/PUC Minas*. 2008. 112 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

BAKER, N.; FANCHIOTTI, A.; STEEMERS, K. *Daylighting in Architecture*: a European reference book. Londres: James & James, 1993. p 380.

BITTENCOURT, L. *Uso das Cartas Solares*: diretrizes para arquitetos. 4ª ed. Macéio: EDUFAL, 2004. p 109.

BLASO, S. *Comunicação pessoal*. 2009.

BRASIL, Eletrobrás. Programa Procel- Edifica. Brasília: Eletrobrás, 2008. Disponível em: <[http://www.eletrobras.gov.br/procel/site/areadeatuacao/residencias\\_apresentacao.asp](http://www.eletrobras.gov.br/procel/site/areadeatuacao/residencias_apresentacao.asp)>. Acesso em: 30 set. 2008.

BRASIL, Ministério da Agricultura. Normais Climatológicas (1961 – 1990). Brasília: Instituto Nacional de Meteorologia, 1992, 84 p.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia. Balanço Energético Nacional 2008: ano base 2007. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2005. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 30 set. 2008.

Commission Internationale d’Eclairage (CIE). *CIE 108 - Guide to Recommended Practice of Daylight Measurement*. Vienna: Commission Internationale d’Eclairage, 1994. 54 p. Technical Report.

Commission Internationale d’Eclairage (CIE). *CIE Standard S 011- Spatial Distribution of Daylight: general sky*. Vienna, 2003. 10 p.

CORNACCHIA, G. M. M.; SOUZA, R. V. G. *Estimativa de Disponibilidade de Luz Natural da Abóbada Celeste Típica das Zonas Bioclimáticas do Estado de Minas Gerais*. In: Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído (ENCAC), 8, 2005, Maceió. *Anais...* Maceió: Associação Nacional da Tecnologia no Ambiente Construído (ANTAC), 2005. pp 502-510.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 3<sup>rd</sup> ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006. 928 p.

FERREIRA, F. D.; SOUZA, R. V. G. *Determinação de Céus Típicos para Minas Gerais: metodologia de obtenção a partir de dados simplificados*. In: Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído (ENTAC), 11, 2006, Florianópolis. *Anais...* Florianópolis: Associação Nacional da Tecnologia no Ambiente Construído (ANTAC), 2006. pp 364-371.

FROTA, A. B. *Geometria da Insolação*. São Paulo: Geros, 2004. 289 p.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. *Manual de Conforto Térmico*. 5. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001. 244p.

International Daylight Measurement Programme (IDMP). Disponível em: <<http://idmp.entpe.fr/index.html>>. Acessado em: 17 jun. 2008



ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA (IESNA). *The IESNA Lighting Handbook*. 9<sup>th</sup> ed. New York: IESNA, 2000. p. 1037.

JANUZZI, G. D. Power Sector Reforms in Brazil and it's Impactes on Energy Efficiency and Research and Development Activies. *Energy Policy*, vol. 33, n. 13, pp 1753-1762, 2005.

KIMBALL, H. H. The Duration and Intensity of Twilight. *Monthly Weather Review*, vol. 44, pp 614-620, 1916.

KIRSCHBAUM, C. *A Iluminação Eficiente de Cidades: um enfoque globalizador*. In: MASCARÓ, L. R. (org). *A Iluminação do Espaço Urbano*. Porto Alegre: +4, 2006. **Capítulo, pp XX**.

KITTLER, R.; PEREZ, R.; DARULA, S. *Sky classification respecting energy efficient lighting, glare and control*. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, vol. 26, pp 57-68, 1997.

LITTLEFAIR, P. J. The Luminous Efficacy of Daylight: a review. *Lighting Research and Technology*, Great Britain, vol. 17, n. 4, pp 162-182, 1985.

MASCARÓ, L. R. *Luz, Clima e Arquitetura*. 3<sup>a</sup> ed. São Paulo: Nobel, 1983. 189 p.

MASCARÓ, J. L.; MASCARÓ, J. J. *Iluminação Pública e Arborização Urbana*. In: MASCARÓ, J. L. *A iluminação do Espaço Urbano*. Porto Alegre: +4, 2006. **Capítulo, pp XX**.

MUNNER, T. *Solar Radiation and Daylight Models*. 2<sup>nd</sup> ed. Great Britan: Elsevier, 2004.

NE'EMAN, E. Daylight Availability Database for Energy Efficient Integration with Eletric Light. *Journal of the Illuminaing Engineering Society*, summer, pp 59-66, 1998.

PEREIRA, E. M. D.; ASSIS, E. S.; SOUZA, R. V. G.; ARREGUY, E. G.; ZARATE, L. E.; GONÇALVES, W. B.; MACHADO NETO, L. V.; FERREIRA, D. G; FERREIRA, C. C. *Estudo da Disponibilidade de Luz Natural em Belo Horizonte como Base para Programação da Iluminação Pública Artificial Noturna*. Belo Horizonte: GREEN Solar PUC Minas, Labcon EA/UFMG, CEMIG, 2009. 26 p. Relatório.

RAIM, B.; BAHARUDDIN; MULYADI, R. Classification of Daylight and Radiation Data into Three Sky Conditions by Cloud Ratio and Sunshine Duration. *Energy and Buildings*, vol.36, n. 7, pp. 660-666, 2004.

REIS, E. A.; REIS, I. A. *Apostila da Disciplina Introdução Básica à Estatística*. Belo Horizonte: Departamento de Estatística do ICEX da UFMG, 2002. 64 p.

PEREZ, R.; INEICHEN, P.; SEALS, R. Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance. *Solar Energy*, vol. 44, n.5, pp 271-289, 1990.

ROBBINS, C. L. *Daylight Design and Analysis*.. New York: Van Nostrand Reinhold, 1986.

ROGERS, R.; GUMUCHDJIAN, P. *Cidades para um Pequeno Planeta*. Barcelona: Gustavo Gili, 2001. 180 p.

SANTOS, A. C. Montagem da Estação de Iluminação para Medição de Dados de Céu de Belo Horizonte. 2003. 39 p. Monografia (Bolsa de Iniciação Científica apresentada ao Dep. Tecnologia da Arquitetura e do Urbanismo) – Escola de Arquitetura E Urbanismo, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

SCARAZZATO, P. S. *Dia Luminoso Típico: conceituação e aplicação*. In: Encontro Nacional De Conforto no Ambiente Construído (ENTAC), 3, 1995, Gramado. *Anais...* Florianópolis: Associação Nacional da Tecnologia no Ambiente Construído (ANTAC), 1995. pp 517-522.

SEIDELMAN, P. K. *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac*. 2<sup>nd</sup> ed. Sausalito: University Science Books, 2006. 752 p.

FARIAS, A. A.; SOARES, J. F.; CESAR, C. C. *Introdução à Estatística*. 2<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 340 p.

SOUZA, R. V. G. *Desenvolvimento de Modelos Matemáticos Empíricos para a Descrição de Fenômenos de iluminação Natural Externa e Interna*. 2004. 308 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

WRIGHT, J.; PEREZ, R.; MICHALSKY, J. J. Luminous Efficacy of Direct Irradiance: variations with insolation and moisture conditions. *Solar Energy*, vol. 42, n. 05, pp 387-394, 1989.

### Sites

<http://www.cienciaviva.pt/latlong/anterior/gps.asp>. Acessado em 13 ago 2009

## APÊNDICE A – DURAÇÃO DA NOITE

TABELA 104

Horários em que os valores limites de iluminância de 80 e 20 lux foram atingidos de acordo com o calculado pelos modelos e a respectiva duração da noite.

Ano	Data	Horários dos limites		Duração noite
		80 lux	20 lux	20-80 lux
2007	01/jan	5:15	18:53	10:22
	02/jan	5:18	18:50	10:28
	03/jan	5:15	18:51	10:24
	04/jan	5:18	18:52	10:26
	05/jan	5:18	18:53	10:30
	06/jan	5:28	18:51	10:37
	07/jan	5:19	18:53	10:26
	08/jan	5:14	18:53	10:21
	09/jan	5:15	18:47	10:28
	10/jan	5:18	18:48	10:30
	11/jan	5:15	18:56	10:19
	12/jan	5:21	18:56	10:25
	13/jan	5:31	18:49	10:42
	14/jan	5:30	18:54	10:36
	15/jan	5:24	18:51	10:33
	16/jan	5:23	18:46	10:37
	17/jan	5:22	18:56	10:26
	18/jan	5:21	18:55	10:26
	19/jan	5:22	18:57	10:25
	20/jan	5:24	18:50	10:34
	21/jan	5:22	18:51	10:31
	22/jan	5:32	18:49	10:43
	23/jan	5:30	18:37	10:53
	24/jan	5:28	18:51	10:37
	25/jan	5:26	18:40	10:46
	26/jan	5:30	18:46	10:44
	27/jan	5:53	18:49	11:04
	28/jan	5:35	18:55	10:40
	29/jan	5:34	18:50	10:44
	30/jan	5:42	18:51	10:51
	31/jan	5:37	18:54	10:43
2007	01/fev	5:30	18:53	10:37
	02/fev	5:32	18:47	10:45
	03/fev	5:34	18:53	10:41
	04/fev	5:34	18:53	10:41
	05/fev	5:33	18:45	10:48

	06/fev	5:42	18:49	10:53
	07/fev	5:39	18:47	10:52
	08/fev	5:35	18:50	10:45
	09/fev	5:33	18:50	10:43
	10/fev	5:34	18:50	10:44
	11/fev	5:36	18:47	10:49
	12/fev	5:49	18:50	10:59
	13/fev	5:35	18:49	10:46
	14/fev	5:39	18:50	10:49
	15/fev	5:39	18:46	10:53
	16/fev	5:39	18:47	10:52
	17/fev	5:39	18:46	10:53
	18/fev	5:40	18:40	11:00
	19/fev	5:45	18:43	11:02
	20/fev	5:41	18:43	10:58
	21/fev	5:40	18:44	10:56
	22/fev	5:40	18:45	10:55
	23/fev	5:43	18:43	11:00
	24/fev	5:47	18:41	11:06
	25/fev	5:47	18:40	11:07
	26/fev	5:44	18:29	11:15
	27/fev	5:43	18:38	11:05
	28/fev	5:42	18:38	11:04
<b>2007</b>	01/mar	5:42	18:37	11:05
	02/mar	5:43	18:38	11:05
	03/mar	5:43	18:40	11:03
	04/mar	5:49	18:37	11:12
	05/mar	5:45	18:37	11:08
	06/mar	5:45	18:35	11:10
	07/mar	5:46	18:33	11:13
	08/mar	5:45	18:33	11:12
	09/mar	5:45	18:30	11:15
	10/mar	5:46	18:31	11:15
	11/mar	5:46	18:30	11:16
	12/mar	5:46	18:30	11:16
	13/mar	5:47	18:28	11:19
	14/mar	5:48	18:27	11:21
	15/mar	5:49	18:25	11:24
	16/mar	5:48	18:23	11:25
	17/mar	5:51	18:21	11:30
	18/mar	5:53	18:21	11:32
	19/mar	5:53	18:22	11:31
	20/mar	5:55	18:19	11:36

	21/mar	6:03	18:20	11:43
	22/mar	5:50	18:19	11:31
	23/mar	5:49	18:19	11:30
	24/mar	5:50	18:18	11:32
	25/mar	5:52	18:17	11:35
	26/mar	5:52	18:18	11:34
	27/mar	5:51	18:18	11:33
	28/mar	5:51	18:15	11:36
	29/mar	5:51	18:16	11:35
	30/mar	5:58	18:14	11:44
	31/mar	5:52	18:12	11:40
<b>2007</b>	01/abr	5:53	18:12	11:41
	02/abr	5:53	18:12	11:41
	03/abr	5:53	18:10	11:43
	04/abr	5:54	18:08	11:46
	05/abr	5:55	17:59	11:56
	06/abr	5:59	18:06	11:53
	07/abr	5:56	18:02	11:54
	08/abr	5:54	18:00	11:54
	09/abr	6:03	18:05	11:58
	10/abr	5:56	19:06	11:50
	11/abr	5:55	18:05	11:50
	12/abr	5:55	18:02	11:53
	13/abr	5:55	17:57	11:58
	14/abr	5:56	18:03	11:53
	15/abr	6:00	18:00	12:00
	16/abr	5:57	17:59	11:58
	17/abr	5:57	17:58	11:59
	18/abr	5:58	17:59	11:59
	19/abr	6:00	17:58	12:02
	20/abr	6:03	17:57	12:06
	21/abr	6:03	17:53	12:10
	22/abr	6:06	17:44	12:22
	23/abr	5:59	17:56	12:03
	24/abr	5:58	17:55	12:03
	25/abr	5:59	17:54	12:05
	26/abr	5:59	17:52	12:07
	27/abr	6:00	17:51	12:09
	28/abr			
	29/abr	6:01	17:50	12:11
	30/abr	6:00	17:52	12:08
<b>2007</b>	01/mai	6:01	17:52	12:09
	02/mai	6:01	17:51	12:10

	03/mai	6:01	17:51	12:10
	04/mai	6:02	17:50	12:12
	05/mai	6:04	17:50	12:14
	06/mai	6:02	17:49	12:13
	07/mai	6:02	17:49	12:13
	08/mai	6:03	17:46	12:17
	09/mai	6:04	17:45	12:19
	10/mai	6:07	17:46	12:21
	11/mai	6:03	17:46	12:17
	12/mai	6:02	17:44	12:18
	13/mai	6:03	17:44	12:19
	14/mai	6:03	17:43	12:20
	15/mai	6:05	17:43	12:22
	16/mai	6:04	17:42	12:22
	17/mai	6:05	17:37	12:28
	18/mai	6:05	17:39	12:26
	19/mai	6:08	17:40	12:28
	20/mai	6:07	17:42	12:25
	21/mai	6:07	17:42	12:25
	22/mai	6:10	17:38	12:32
	23/mai	6:10	17:35	12:35
	24/mai	6:12	17:41	12:31
	25/mai	6:07	17:41	12:26
	26/mai	6:08	17:41	12:27
	27/mai			
	28/mai			
	29/mai			
	30/mai			
	31/mai	6:10	17:41	12:29
<b>2007</b>	01/jun			
	02/jun	6:10	17:39	12:31
	03/jun	6:12	17:33	12:39
	04/jun	6:13	17:40	12:33
	05/jun	6:11	17:40	12:31
	06/jun	6:12	17:40	12:32
	07/jun	6:13	17:40	12:33
	08/jun	6:13	17:39	12:34
	09/jun	6:13	17:40	12:33
	10/jun	6:13	17:40	12:33
	11/jun	6:14	17:40	12:33
	12/jun	6:13	17:39	12:34
	13/jun	6:13	17:40	12:33
	14/jun	6:14	17:39	12:35

	15/jun	6:14	17:40	12:34
	16/jun	6:18	17:40	12:38
	17/jun	6:15	17:40	12:35
	18/jun	6:15	17:40	12:35
	19/jun	6:15	17:41	12:34
	20/jun	6:16	17:40	12:36
	21/jun	6:16	17:41	12:35
	22/jun	6:16	17:42	12:34
	23/jun	6:16	17:41	12:35
	24/jun	6:16	17:40	12:36
	25/jun			
	26/jun			
	27/jun			
	28/jun			
	29/jun	6:17	17:41	12:36
	30/jun			
<b>2007</b>	01/jul			
	02/jul		17:44	
	03/jul	6:18	17:44	12:34
	04/jul	6:19	17:44	12:35
	05/jul	6:20	17:45	12:35
	06/jul	6:19	17:45	12:34
	07/jul	6:17	17:46	12:31
	08/jul	6:18	17:46	12:32
	09/jul		17:47	
	10/jul	6:17	17:47	12:30
	11/jul	6:18	17:45	12:32
	12/jul	6:18	17:45	12:33
	13/jul	6:18	17:47	12:31
	14/jul	6:19	17:48	12:31
	15/jul	6:19	17:48	12:31
	16/jul	6:17	17:48	12:29
	17/jul	6:16	17:46	12:30
	18/jul	6:18	17:44	12:34
	19/jul	6:17	17:48	12:29
	20/jul	6:16	17:49	12:27
	21/jul	6:16	17:48	12:28
	22/jul	6:15	17:50	12:25
	23/jul	6:15	17:48	12:26
	24/jul	6:17	17:46	12:31
	25/jul	6:15	17:49	12:26
	26/jul	6:15	17:44	12:31
	27/jul	6:17	17:44	12:33



	28/jul	6:26	17:52	12:34
	29/jul	6:13	17:53	12:20
	30/jul	6:13	17:52	12:21
	31/jul	6:13	17:53	12:19
<b>2007</b>	01/ago	6:12	17:53	12:19
	02/ago	6:12	17:53	12:18
	03/ago	6:10	17:53	12:17
	04/ago	6:10	17:54	12:16
	05/ago	6:09	17:54	12:15
	06/ago	6:09	17:55	12:14
	07/ago	6:08	17:55	12:13
	08/ago	6:08	17:55	12:13
	09/ago	6:07	17:53	12:14
	10/ago	6:08	17:56	12:12
	11/ago	6:07	17:53	12:14
	12/ago	6:07	17:55	12:12
	13/ago	6:05	17:56	12:09
	14/ago	6:04	17:56	12:07
	15/ago	6:05	17:56	12:09
	16/ago	6:02	18:00	12:02
	17/ago	6:05	18:01	12:04
	18/ago	6:05	18:01	12:04
	19/ago	6:04	18:01	12:03
	20/ago	6:03	18:00	12:02
	21/ago	6:02	17:55	12:07
	22/ago	5:58	17:56	12:02
	23/ago	5:58	17:56	12:02
	24/ago	5:56	17:57	11:59
	25/ago	5:56	17:57	11:59
	26/ago	5:55	17:56	11:59
	27/ago	5:57	17:56	12:01
	28/ago	5:57	17:56	12:01
	29/ago	5:59	17:57	12:02
	30/ago	5:57	18:01	11:55
	31/ago	6:00	18:02	11:58
<b>2007</b>	01/set	5:53	18:02	11:51
	02/set	5:52	18:02	11:50
	03/set	5:52	18:03	11:49
	04/set	5:51	18:00	11:50
	05/set	5:49	18:02	11:47
	06/set	5:51	18:01	11:50
	07/set	5:47	18:02	11:45
	08/set	5:47	18:02	11:45

	09/set	5:46	18:03	11:43
	10/set	5:45	18:04	11:41
	11/set	5:49	18:03	11:46
	12/set	5:45	18:05	11:40
	13/set	5:44	18:04	11:39
	14/set	5:43	18:05	11:38
	15/set	5:42	18:04	11:38
	16/set	5:41	18:04	11:37
	17/set	5:40	18:04	11:36
	18/set	5:39	18:04	11:34
	19/set	5:37	18:06	11:31
	20/set	5:39	18:06	11:33
	21/set	5:38	18:06	11:32
	22/set	5:38	18:06	11:32
	23/set	5:37	18:07	11:30
	24/set	5:34	18:06	11:28
	25/set	5:36	18:07	11:29
	26/set	5:35	18:06	11:28
	27/set	5:38	18:08	11:30
	28/set	5:31	18:07	11:24
	29/set	5:40	18:07	11:33
	30/set	5:30	18:03	11:22
<b>2007</b>	01/out	5:28	18:09	11:19
	02/out	5:27	18:08	11:19
	03/out	5:27	18:06	11:21
	04/out	5:27	18:08	11:19
	05/out	5:25	18:09	11:16
	06/out	5:25	18:09	11:16
	07/out	5:24	18:09	11:15
	08/out	5:23	18:10	11:13
	09/out	5:22	18:12	11:10
	10/out	5:19	18:12	11:07
	11/out	5:19	18:12	11:07
	12/out	5:18	18:10	11:08
	13/out	5:18	18:10	11:08
	14/out	5:17	18:12	11:05
	15/out	5:16	18:13	11:03
	16/out	5:15	18:11	11:03
	17/out	5:15	18:11	11:04
	18/out	5:20	18:01	11:19
	19/out	5:39	17:53	11:46
	20/out	5:15	18:15	11:00
	21/out	5:12	18:17	10:55

	22/out	5:17		
	23/out		18:10	
	24/out	5:19	18:13	11:06
	25/out	5:12	18:08	11:04
	26/out	5:12	18:16	10:56
	27/out	5:10	18:19	10:51
	28/out	5:09	18:01	11:08
	29/out	5:08	18:14	10:54
	30/out	5:06	18:15	10:51
	31/out	5:09	18:16	10:53
<b>2007</b>	01/nov	5:08	18:17	10:51
	02/nov	5:07	18:17	10:50
	03/nov	5:08	18:17	10:51
	04/nov	5:07	18:18	10:49
	05/nov	5:07		
	06/nov			
	07/nov			
	08/nov			
	09/nov			
	10/nov			
	11/nov			
	12/nov			
	13/nov		18:25	
	14/nov	4:58	18:25	10:33
	15/nov	4:58	18:25	10:33
	16/nov	4:57	18:28	10:28
	17/nov		18:29	
	18/nov	4:56	18:29	10:27
	19/nov		18:13	
	20/nov	5:03	18:31	10:32
	21/nov	5:06	18:32	10:33
	22/nov	4:56	18:33	10:23
	23/nov	4:57	18:32	10:25
	24/nov	4:56	18:33	10:23
	25/nov	5:05	18:29	10:36
	26/nov	5:01	18:18	10:43
	27/nov	5:05	18:35	10:30
	28/nov	5:54	18:35	10:19
	29/nov	4:55	18:28	10:27
	30/nov	4:55	18:37	10:18
<b>2007</b>	01/dez	4:55	18:39	10:16
	02/dez	4:56	18:39	10:17
	03/dez	4:57	18:39	10:18

	04/dez	4:57	18:30	10:27
	05/dez	5:04	18:32	10:32
	06/dez	4:57	18:36	10:20
	07/dez	5:02	18:20	10:42
	08/dez	5:01	18:15	10:46
	09/dez	5:04	18:41	10:23
	10/dez	4:58	18:42	10:16
	11/dez	4:57	18:43	10:13
	12/dez	4:57	18:44	10:13
	13/dez	5:07	18:26	10:41
	14/dez	5:03	18:43	10:20
	15/dez	5:01	18:46	10:15
	16/dez	4:58	18:47	10:11
	17/dez	4:59	18:48	10:10
	18/dez	5:00	18:47	10:13
	19/dez	5:02	18:45	10:17
	20/dez	5:18	18:31	10:47
	21/dez	5:15	18:43	10:32
	22/dez	5:05	18:38	10:27
	23/dez	5:09	18:29	10:39
	24/dez	5:06	18:49	10:17
	25/dez	5:05	18:50	10:15
	26/dez	5:03	18:52	10:11
	27/dez	5:03	18:52	10:11
	28/dez	5:04	18:53	10:11
	29/dez	5:04	18:53	10:11
	30/dez	5:05	18:52	10:13
	31/dez	5:06	18:47	10:19
<b>2008</b>	01/jan	5:06	18:52	10:14
	02/jan	5:07	18:53	10:14
	03/jan	5:08	18:54	10:14
	04/jan	5:08	18:53	10:15
	05/jan			
	06/jan			
	07/jan			
	08/jan			
	09/jan			
	10/jan			
	11/jan			
	12/jan			
	13/jan			
	14/jan			
	15/jan			

	16/jan			
	17/jan			
	18/jan			
	19/jan			
	20/jan			
	21/jan			
	22/jan			
	23/jan	5:26	18:51	10:35
	24/jan	5:27	18:52	10:35
	25/jan	5:26	18:46	10:40
	26/jan	5:27	18:46	10:41
	27/jan	5:35	18:48	10:47
	28/jan	5:37	18:51	10:46
	29/jan	5:32	18:45	10:47
	30/jan	5:49	18:46	11:03
	31/jan	5:33	18:50	10:42
<b>2008</b>	01/fev	5:32	18:51	10:41
	02/fev	5:32	18:46	10:46
	03/fev	5:37	18:48	10:49
	04/fev	5:37	18:45	10:52
	05/fev	5:39	18:48	10:51
	06/fev	5:38	18:46	10:52
	07/fev	5:39	18:48	10:51
	08/fev	5:34	18:46	10:48
	09/fev	5:33	18:46	10:47
	10/fev	5:33	18:47	10:46
	11/fev	5:34	18:45	10:49
	12/fev	5:33	18:46	10:46
	13/fev	5:33	18:45	10:48
	14/fev	5:34	18:45	10:49
	15/fev	5:35	18:46	10:49
	16/fev	5:36	18:46	10:50
	17/fev	5:36	18:45	10:51
	18/fev	5:37	18:40	10:57
	19/fev	5:40	18:40	10:59
	20/fev	5:40	18:42	10:58
	21/fev	5:42	18:40	11:02
	22/fev	5:51	18:40	11:11
	23/fev	5:43	18:38	11:05
	24/fev	5:42	18:38	11:04
	25/fev	5:58	18:39	11:19
	26/fev	5:41	18:38	11:03
	27/fev	5:42	18:39	11:03

	28/fev	5:41	18:34	11:07
<b>2008</b>	01/mar	5:53	18:26	11:27
	02/mar	5:50	18:35	11:15
	03/mar	5:48	18:33	11:14
	04/mar	5:48	18:33	11:15
	05/mar	5:42	18:33	11:09
	06/mar	5:43	18:28	11:15
	07/mar	5:45	18:29	11:16
	08/mar	5:48	18:30	11:18
	09/mar	5:48	18:25	11:23
	10/mar	5:44	18:22	11:22
	11/mar	5:45	18:24	11:21
	12/mar	5:00	18:00	12:00
	13/mar	5:50	18:22	11:28
	14/mar	5:48	18:20	11:28
	15/mar	5:47	17:58	11:49
	16/mar	5:58	18:23	11:35
	17/mar	5:47	18:22	11:25
	18/mar	5:47	18:21	11:26
	19/mar	5:49	18:21	11:28
	20/mar	5:47	18:19	11:28
	21/mar	5:47	18:18	11:29
	22/mar	5:47	18:16	11:31
	23/mar	5:52	18:09	11:43
	24/mar	5:50	18:09	11:41
	25/mar	5:51	18:14	11:37
	26/mar	6:01	18:13	11:48
	27/mar	5:57	18:15	11:42
	28/mar	5:51	18:16	11:35
	29/mar	5:53	18:14	11:39
	30/mar	5:52	18:14	11:38
	31/mar	5:52	18:12	11:40
<b>2008</b>	01/abr	5:52	18:09	11:43
	02/abr	5:52	18:07	11:45
	03/abr	5:55	18:08	11:47
	04/abr	5:55	18:02	11:52
	05/abr	6:02	17:58	12:04
	06/abr	6:03	17:49	12:14
	07/abr	5:58	17:57	11:01
	08/abr	5:54		
	09/abr	5:56	18:00	11:56
	10/abr	5:55	17:58	11:57
	11/abr	6:01	17:59	12:02

	12/abr	5:56	18:00	11:56
	13/abr	5:55	17:59	11:56
	14/abr	5:56	17:48	12:08
	15/abr	6:00	17:58	12:02
	16/abr	5:58	17:56	12:02
	17/abr	5:57	17:54	12:03
	18/abr	5:57	17:55	12:02
	19/abr	5:59	17:54	12:05
	20/abr	6:01	17:54	12:07
	21/abr	5:57	17:55	12:02
	22/abr	6:00	17:46	12:14
	23/abr	6:06	17:51	12:15
	24/abr	5:56	17:50	12:06
	25/abr	5:58	17:49	12:08
	26/abr	5:55	17:48	12:07
	27/abr	5:55	17:47	12:08
	28/abr	5:56	17:47	12:09
	29/abr	5:57	17:43	12:14
	30/abr	6:01	17:39	12:22
<b>2008</b>	01/mai	6:08	17:39	12:29
	02/mai	6:09	17:44	12:25
	03/mai	5:58	17:44	12:14
	04/mai	5:59	17:44	12:15
	05/mai	6:06	17:44	12:22
	06/mai	6:02	17:43	12:19
	07/mai	5:59	17:43	12:16
	08/mai	6:00	17:42	12:18
	09/mai	6:01	17:39	12:22
	10/mai	6:03	17:39	12:24
	11/mai	6:02	17:34	12:28
	12/mai	6:07	17:38	12:29
	13/mai	6:06	17:38	12:28
	14/mai	6:03	17:36	12:27
	15/mai	6:03	17:38	12:25
	16/mai	6:13	17:35	12:38
	17/mai	6:13	17:34	12:39
	18/mai	6:09	17:38	12:31
	19/mai	6:03	17:37	12:26
	20/mai	6:05	17:35	12:30
	21/mai	6:04	17:36	12:28
	22/mai	6:06	17:37	12:29
	23/mai	6:06	17:37	12:29
	24/mai	6:07	17:37	12:30

	25/mai	6:09	17:37	12:32
	26/mai	6:08	17:36	12:32
	27/mai	6:09	17:35	12:34
	28/mai	6:08	17:36	12:34
	29/mai	6:08	17:34	12:36
	30/mai	6:09	17:33	12:42
	31/mai	6:15	17:33	12:25
<b>2008</b>	01/jun	6:12	17:35	12:37
	02/jun	6:11	17:39	12:32
	03/jun	6:09	17:36	12:33
	04/jun	6:14	17:38	12:36
	05/jun	6:08	17:38	12:30
	06/jun	6:07	17:39	12:28
	07/jun	6:08	17:40	12:28
	08/jun	6:09	17:40	12:29
	09/jun	6:09	17:40	12:29
	10/jun	6:11	17:40	12:31
	11/jun	6:12	17:34	12:38
	12/jun	6:11	17:34	12:37
	13/jun	6:10	17:40	12:30
	14/jun	6:11	17:39	12:32
	15/jun	6:11	17:40	12:31
	16/jun	6:12	17:38	12:34
	17/jun	6:19	17:41	12:38
	18/jun	6:15	17:40	12:35
	19/jun	6:14	17:40	12:34
	20/jun	6:15	17:40	12:35
	21/jun	6:13	17:41	12:32
	22/jun	6:14	17:40	12:34
	23/jun	6:20	17:42	12:38
	24/jun	6:26	17:41	12:45
	25/jun	6:16	17:40	12:36
	26/jun	6:15	17:43	12:32
	27/jun	6:15	17:43	12:32
	28/jun	6:14	17:43	12:31
	29/jun	6:15	17:42	12:33
	30/jun	6:14	17:39	12:35
<b>2008</b>	01/jul	6:18	17:43	12:35
	02/jul	6:18	17:43	12:34
	03/jul	6:21	17:38	12:42
	04/jul	6:18	17:44	12:33
	05/jul	6:19	17:45	12:33
	06/jul	6:18	17:45	12:32



	07/jul	6:17	17:46	12:31
	08/jul	6:17	17:46	12:31
	09/jul	6:16	17:47	12:29
	10/jul	6:22	17:45	12:37
	11/jul	6:17	17:47	12:30
	12/jul	6:16	17:48	12:28
	13/jul	6:17	17:48	12:29
	14/jul	6:17	17:48	12:29
	15/jul	6:17	17:48	12:29
	16/jul	6:16	17:49	12:27
	17/jul	6:16	17:49	12:27
	18/jul	6:16	17:49	12:27
	19/jul	6:16	17:49	12:27
	20/jul	6:16	17:50	12:26
	21/jul	6:16	17:51	12:25
	22/jul	6:15	17:51	12:24
	23/jul	6:15	17:51	12:24
	24/jul	6:15	17:51	12:24
	25/jul	6:15	17:51	12:24
	26/jul	6:15	17:50	12:24
	27/jul	6:14	17:51	12:22
	28/jul			
	29/jul			
	30/jul			
	31/jul			
<b>2008</b>	01/ago			
	02/ago			
	03/ago			
	04/ago		17:54	
	05/ago	6:14	17:38	12:36
	06/ago	6:13	17:57	12:16
	07/ago	6:11	17:57	12:14
	08/ago	6:10	17:50	12:20
	09/ago	6:10	17:57	12:12
	10/ago	6:09	17:58	12:10
	11/ago	6:09	17:58	12:10
	12/ago	6:08	17:59	12:08
	13/ago	6:07	17:59	12:08
	14/ago	6:07	18:00	12:07
	15/ago	6:06	18:00	12:06
	16/ago	6:04	18:00	12:04
	17/ago	6:04	18:00	12:04
	18/ago	6:03	18:00	12:03

	19/ago	6:03	18:01	12:02
	20/ago	6:02	18:01	12:01
	21/ago	6:01	18:01	12:00
	22/ago	6:00	18:01	11:59
	23/ago	6:00	18:00	12:00
	24/ago	6:03	18:02	12:01
	25/ago	5:59	18:00	11:59
	26/ago	5:57	18:02	11:54
	27/ago	5:57	18:02	11:55
	28/ago			
	29/ago			
	30/ago			
	31/ago			
<b>2008</b>	01/set	5:53	18:02	11:51
	02/set	5:51	18:01	11:50
	03/set	5:50	18:01	11:49
	04/set	5:49	16:59	12:50
	05/set	5:49	18:05	11:43
	06/set	5:47	18:02	11:44
	07/set	5:47	18:02	11:44
	08/set	5:47	18:03	11:43
	09/set	5:45	18:02	11:42
	10/set	5:44	18:04	11:39
	11/set	5:43	18:05	11:37
	12/set	5:42	18:04	11:37
	13/set	5:42	18:03	11:38
	14/set	5:43	18:04	11:38
	15/set	5:49	18:04	11:44
	16/set	5:48	18:01	11:46
	17/set	5:41	16:57	12:43
	18/set	5:48	18:00	11:47
	19/set	5:36	18:05	11:31
	20/set	5:36	18:04	11:32
	21/set	5:44	16:59	12:45
	22/set	5:52	18:04	11:47
	23/set	5:36	18:06	11:30
	24/set	5:31	18:06	11:25
	25/set	5:30	18:05	11:25
	26/set	5:35	16:40	12:55
	27/set	5:36	18:07	11:29
	28/set	5:31	18:07	11:24
	29/set	5:27	18:07	11:20
	30/set	5:27	18:05	11:22

## ANEXO 1 EQUIPAMENTOS DA EMIN-BH

A estação foi montada através do Convênio PUC-MG, UFMG e CEMIG, recursos esses obtidos através do convênio ECV 939/2003 realizado entre a Eletrobrás e o LABCON/UFMG, o Projeto FAPEMIG TEC1312 e complementada através do convênio P&D 128 – Estudo da Disponibilidade de Luz Natural em Belo Horizonte como Base para Programação da Iluminação Pública Artificial Noturna, entre a CEMIG, PUC-MG e UFMG (gerenciado na UFMG pela FUNDEP, Projeto nº 7006).

A EMIN-BH possui um conjunto de equipamentos como fotocélulas, datalogger e cabos conectores, além de peças necessárias para montagem das bases de apoio. Todos estes equipamentos serão relacionados e descritos a seguir.

### A.1 Fotocélulas

São os sensores que medem o fluxo luminoso, convertendo a energia luminosa captada em energia elétrica, fornecendo valores em pulsos elétricos, com leitura dada em  $\mu\text{A}$ . O modelo de sensor utilizado foi o LI210-SZ, capazes de permanecer em exposição ao tempo, uma vez que possuem seu revestimento em alumínio anodizado e seu leitor em acrílico, à prova de água e corrosão.



**FIGURA 58** Fotocélula Li-Cor LI-210SZ

*Fonte: Santos, 2003.*

De acordo com o catálogo fornecido pelo fabricante com dados da fotocélula, esta possui como sensor um elemento em silício com filtros, o que permite que sua resposta espectral seja muito próxima à curva CIE de visão fotópica (FIGURA 59), com desvio de 5% aproximadamente para a maior parte das fontes de luz com rastreabilidade ao *National Institute of Standards and Technology* (NIST) (LICOR, XXXX).

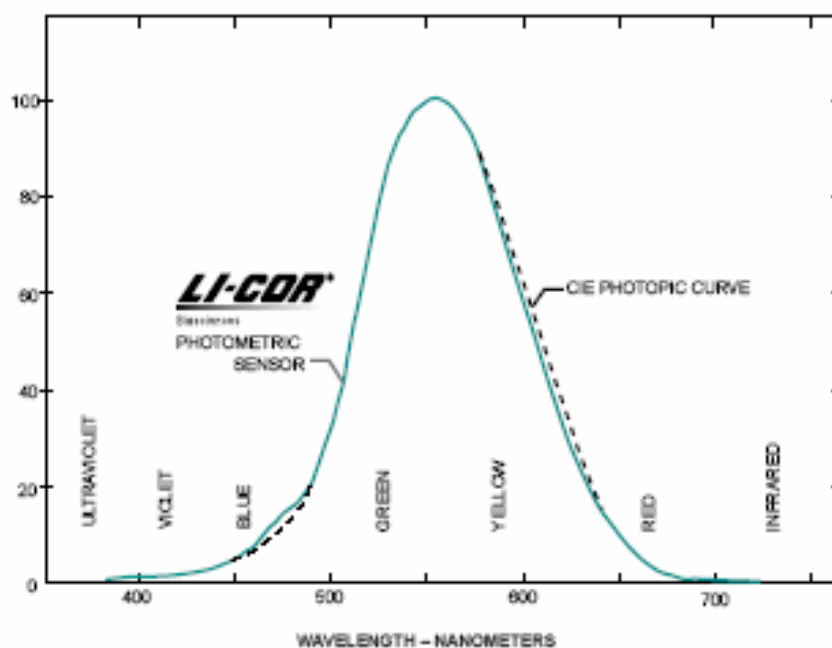


FIGURA 59 Curva de resposta do sensor comparada à curva.

Fonte: LICOR, 2009

Estes sensores possuem calibração de fábrica e calibrações periódicas são pedidas a cada dois anos. Contudo, como o sensor fica exposto às condições externas, com grande variabilidade das condições, o recomendável é que a calibração seja realizada a cada seis meses.

Cada fotocélula vem acompanhada de valores individuais de constante de calibração (cc) e de um multiplicador de calibração (cm) (TABELA 52), a serem posteriormente considerados na programação do datalogger. Assim, cada um dos sensores está diretamente relacionado com a medição de uma única variável, de forma que para essa montagem foram preciso seis fotocélulas para medir níveis mais altos e outras 6 para medir níveis mais baixos de iluminância.

TABELA 105

Dados dos sensores utilizados na montagem da EMIN-BH (Informações extraídas dos certificados de garantia).

Número de série do sensor	Constante de Calibração ( $\mu\text{A} / 100 \text{ Klux}$ )	Multiplicador de Calibração ( $\text{Klux}/\mu\text{A}$ )	Variável de Medição
PH 6695	29,92	-3,34	Iluminância Vertical Orientação Sul
PH 6698	32,07	-3,12	Iluminância Vertical Orientação Norte
PH 6699	31,98	-3,13	Iluminância Vertical Orientação Leste
PH 9700	32,43	-3,08	Iluminância Vertical Orientação Oeste
PH 9701	31,61	-3,16	Iluminância Difusa
PH 9702	30,11	-3,32	Iluminância Global

Fonte: Santos, 2003.

Para instalar as seis fotocélulas de forma adequada, bases e peças de apoio foram desenvolvidas para compor o conjunto, de acordo com as particularidades de cada variável (SANTOS, 2003).

Para as medições de iluminância difusa, é necessário que a fotocélula seja resguardada da incidência da irradiação solar direta, para tanto utiliza-se um anel de sombreamento a ser ajustado conforme a latitude local. O anel é adaptado às outras peças que compõem a base, todas usinadas em aço a fim de resistir às intempéries. O sensor é apoiado sobre uma base com nivelamento por bolha de forma a garantir que o sensor permaneça na horizontal e uma vez nivelada, a base é parafusada a uma peça horizontal da estrutura. A fotocélula permanece na horizontal e o anel de sombreamento acompanha a inclinação se adaptando ao valor da latitude com o auxílio de uma peça graduada que permite o ajuste do valor da latitude.

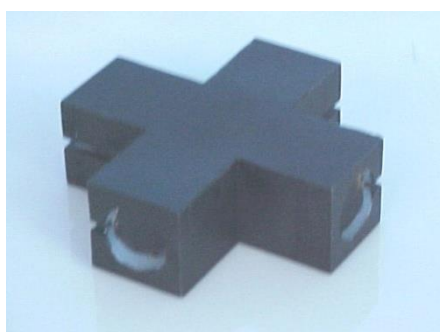


**FIGURA 60** Base para sensor de iluminação difusa: sensor com o anel de sombreamento.

*Fonte: SANTOS, 2003.*

Para a medição das iluminâncias verticais, fixou-se quatro dos sensores em uma cruzeta em acrílico envolvida em um aro, conforme FIGURA 60. Faz-se necessário que a cruzeta utilizada esteja envolvida por um aro com raio mínimo de 10 (dez) vezes o valor do raio do leitor da fotocélula e que esta obstrua a fotocélula em 50%, simulando a linha do horizonte. Este conjunto foi fixado sobre uma base, de modo que a cruzeta possa acompanhar o norte verdadeiro. Na EMIN-BH empregou-se como base um radiador de automóvel, uma vez que este é capaz de evitar a retenção de água e a reflexão da luz incidente.

Tanto a cruzeta, aro e radiador, como o anel de sombreamento responsável pela leitura da Iluminância Difusa foram pintados com tinta spray preta fosca de forma a impedir a interferência por reflexão nas leituras dos sensores.



**FIGURA 61** Cruzeta em acrílico para fixação dos sensores de iluminâncias verticais (norte, sul, leste e oeste)

*Fonte: SANTOS, 2003.*

Para a medição dos sensores de iluminância global, desenvolveu-se uma base parafusada a ser fixada acima da cruzeta descrita acima, nivelada pelo nível de bolha, uma vez que seu sensor deve ter uma ampla visão do céu.



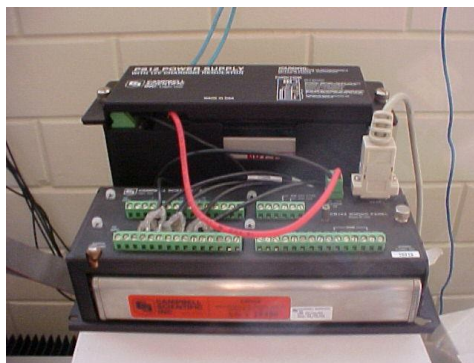
**FIGURA 62** Base para o sensor de medição da iluminância global e a cruzeta.

*Fonte: SANTOS, 2003.*

A estação então configura-se com duas montagens distintas (iluminância global e difusa) que necessitam que haja entre elas distância suficiente para que uma não sombreie a outra.

## **A.2) Datalogger**

O datalogger irá realizar a leitura dos sensores a ele conectados e armazenar estes dados, convertendo-os para as devidas unidades. O datalogger utilizado foi o da marca Campbell modelo CR 10X (FIGURA 63). É nele que encontra-se conectados diretamente o computador e o painel fotovoltaico (ele será o responsável por fornecer ao datalogger energia constantemente, evitando assim a necessidade do mesmo ser recarregado uma vez que o aparelho funciona por meio de bateria) e indiretamente (por meio de cabos extensores) a seis fotocélulas.



**FIGURA 63** Datalogger utilizado para leitura e armazenamento dos dados.

Fonte: SANTOS, 2003.

Para que o aparelho realize a aquisição de dados, ele deve ser programado de acordo com os dados referentes a cada um dos sensores utilizados, assim como a frequência de leitura, faixa de rejeição e de tensão com a qual se irá trabalhar. É também necessário que o *datalogger* esteja permanentemente ligado a um computador, do qual se dará todo o acompanhamento das leituras assim como o armazenamento dos dados. No que se refere ao armazenamento de dados, como o *datalogger* possui memória cíclica, é preciso que uma rotina de descarregamento seja estabelecida para evitar perda de dados por sobrescrição.

De acordo com SANTOS (2003):

*“Para programar o aparelho é necessário um programa que o configure para leitura dos sensores. Foi utilizado o programa PC 200W, considerado de fácil manuseio e desenvolvido para plataforma Windows. Ele possibilita o monitoramento real time, o levantamento de dados e a manipulação básica do arquivo de dados. Para criar e editar programas usando o PC 200W, utiliza-se um programa interno chamado Short Cut.*

*Após instalação, a partir da tela inicial do programa, um breve roteiro pode ser seguido para orientar a programação do logger.*

1. *Tela principal - Opção ADD LOGGER*
  - *Escolha de modelo do logger*
  - *Escolha da porta de conexão com PC*
2. *Program – New Edit*
  - *Para desenvolver o programa de leitura dos sensores*



- *Programa interno – Short Cut*

- *Seguir os passos de programação, adicionando as informações relacionadas com os sensores e frequência de medição.*

### 3. *Data Collection*

- *Informar local no PC onde os dados serão salvos.*

### 4. *Logger Clock*

- *Fazer acerto do horário para compatibilizar com horários de gravação dos dados.*

### 5. *Monitor Location*

- *Acompanhamento real-time das leituras.*

### 6. *Split Array*

- *Permite que os dados sejam salvos em dois arquivos diferentes.*

### 7. *Session Status*

- *Para acompanhar o status da conexão”*

## **A.3) Cabos Extensores**

Para fazer as conexões entre as fotocélulas e o *datalogger*, utilizou-se cabos de extensão modelo 2222SB da marca LICOR.

## **A.4) Resistência de Precisão**

Os resistores de precisão são dispositivos eletrônicos responsáveis por converter a unidade de leitura do sensor ( $\mu\text{A}$ ) na unidade de trabalho do *datalogger* ( $\mu\text{V}$ ). As resistências de precisão utilizadas foram as de  $1,2\text{k}\Omega$  (kilo ohms) com 1% de precisão, ligadas em paralelo aos sensores.

### A.5) Ligações e Testes Iniciais

De acordo com Santos (2003), as ligações e testes iniciais na EMIN-BH foram realizadas da seguinte forma:

*“Após a fixação das bases e locação dos sensores, iniciou-se a ligação dos equipamentos e os ajustes finos. (...)”*

*Com todos os sensores conectados e com a programação do datalogger já acertada, foi analisado o desvio de leitura das fotocélulas. Bastando para isso alinhar todas lado a lado sob mesma condição de luminosidade e observar o valor lido para cada uma fornecido pelo datalogger e comparar com a leitura padrão de um luxímetro. Só após essa verificação é que os sensores foram colocados em seus devidos lugares e tiveram seus níveis ajustados.*

*O norte verdadeiro, para correta orientação dos sensores, foi encontrado em função da sombra do meio dia solar, segundo equação citada por DUFFIE (XX) e a inclinação do anel de sombreamento se deu de acordo com o valor da latitude local com auxílio da peça graduada existente na montagem da própria base.*

*As primeiras leituras obtidas foram acompanhadas para levantar possíveis erros ou desvios de leitura devido a falhas na programação, nas ligações ou outros. Os ajustes necessários foram feitos e só a partir de então os dados podem ser considerados para tratamento futuro.”*