

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

CARACTERIZAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE INTENSIDADE  
DA RADIAÇÃO SOLAR DIFUSA

por

Elton Gimenez Rossini

Porto Alegre, setembro de 2002

CARACTERIZAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE INTENSIDADE  
DA RADIAÇÃO SOLAR DIFUSA

por

Elton Gimenez Rossini

Mestre em Engenharia

Tese submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Doutor em Engenharia

Área de Concentração: Energia

Orientador: Prof. Dr. Arno Krenzinger

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Oscar Daniel Corbella

Prof. Dr. Mário Henrique Macagnan

Prof. Dr. Horácio Antônio Vielmo

Prof. Dr. Alberto Tamagna  
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, setembro de 2002

*epígrafe*

*“ As únicas coisas eternas são as nuvens...”*

*Mário Quintana*

A realização desta pesquisa foi viabilizada através do apoio financeiro dado pela CAPES. Durante o desenvolvimento deste trabalho contei com a colaboração de muitas pessoas, as quais desejo prestar meus sinceros agradecimentos.

Primeiramente, agradeço ao meu orientador, Arno Krenzinger, por sua dedicação, pelas suas sugestões, pela compreensão, pelo seu auxílio, enfim, por tudo o que pode ser atribuído a uma pessoa que dignifica o trabalho de docência e de pesquisa.

Também sou grato ao Mário Macagnan, pela atenção dispensada, pelas sugestões e pela grande quantidade de artigos que disponibilizou, ampliando a base bibliográfica desta tese.

É indispensável destacar as contribuições recebidas dos companheiros do Laboratório de Energia Solar. Agradeço ao José Luís Salvadoretti pelas agradáveis discussões, pelas sugestões e pelo auxílio prestado ao longo de todo o trabalho. Da mesma forma agradeço ao César Prieb, destacando a ajuda, prestada durante a realização da atividade experimental. Agradeço ao João Batista pelo seu interesse no trabalho, pelo seu empenho e pelo incansável auxílio prestado na confecção dos suportes para os equipamentos de medida. Estendo estes agradecimentos a todos os bolsistas, integrantes do Grupo de Energia Solar, que prestaram auxílio nas diversas etapas do trabalho experimental.

Finalmente quero agradecer aos meus familiares aos quais dedico este trabalho. Meus pais Antonio Rossini e Theresa Gimenez Rossini; meu irmão, Edison Gimenez Rossini. Também dedico este trabalho a minha esposa, Miriam de Souza Rossini, a quem agradeço, não apenas pelas sugestões e correções do texto, mas sobretudo, pela compreensão, pelo incentivo e pelo amor demonstrado ao longo destes anos.

## RESUMO

A proposta deste trabalho é caracterizar a distribuição de intensidade da radiação solar difusa, sob diferentes condições de nebulosidade, através da análise de imagens monocromáticas do hemisfério celeste e das correspondentes medidas da irradiância solar difusa.

O sistema experimental tem como elementos principais uma câmera CCD monocromática, empregada na aquisição de imagens e um piranômetro, que realiza medidas de irradiância difusa. Tanto a câmera CCD quanto o piranômetro empregam anéis de sombra com as mesmas dimensões. Desta forma, os equipamentos bloqueiam a mesma região correspondente ao caminho do Sol. O piranômetro também emprega um aro horizontal que bloqueia a irradiância difusa da região do hemisfério celeste, cuja altitude é inferior a  $25^\circ$ , tornando o seu ângulo de visão igual ao da câmera CCD.

Um processo de análise permitiu reduzir os níveis de cinza da imagem original, que passaram de 256 para apenas 16 níveis. Determinou-se o ângulo sólido de cada pixel em função de sua distância ao centro da imagem. O ângulo sólido de toda a imagem foi calculado pela soma do ângulo sólido de cada pixel que compõe a imagem.

Determinaram-se mapas de distribuição de intensidade relativa, obtidos pela razão entre os valores de intensidade do cinza, observados para os pixels que compõem uma certa região, e o valor de intensidade do cinza do pixel que pertence à região que compreende o zênite. Estes mapas estão também relacionados à distribuição de luminância no hemisfério celeste.

Também se determinaram as distribuições de intensidade direcional da radiação difusa, usando toda a informação disponível associada a cada imagem. Os valores de intensidade direcional são calculados em função da irradiância difusa medida, do ângulo sólido de cada região e de características da imagem. Estes mapas fornecem informações mais completas sobre a distribuição de intensidade energética.

A partir das características da imagem, estimou-se o índice de nebulosidade para imagens que correspondem à condição de céu parcialmente nublado. O índice de nebulosidade é calculado pela razão entre o ângulo sólido da região que corresponde às nuvens e o ângulo sólido total da imagem.

## ABSTRACT

The proposal of this work is to characterize the intensity distribution of the diffuse solar radiation, under different cloudiness conditions, through the analysis of monochromatic images of the celestial hemisphere and of the correspondent measurements of the diffuse solar irradiance.

The experimental system has as main elements a CCD monochromatic camera, used in image acquisition and a pyranometer, that accomplishes measures of diffuse irradiance. The CCD camera and the pyranometer use shading rings with the same dimensions. This way, both equipments obstruct the same area corresponding to the disk of the Sun. The pyranometer also uses a horizontal hoop that obstructs the diffuse irradiance of the area of the celestial hemisphere, whose altitude is inferior to  $25^\circ$ , turning its vision angle the same to the of the camera's.

An analysis process allowed reducing the gray levels of the original image, which were converted from 256 to only 16 levels. The solid angle of each pixel was determined as function of its distance to the center of the image. The solid angle of the whole image was calculated by the sum of the solid angle of each pixel that composes the image.

Maps of relative intensity distribution were determined, obtained by the ratio between the values of the gray intensity observed for the pixels that compose a certain area and the value of the gray intensity of the pixel that belongs to the zenith area. These maps are also related to the luminance distribution in the celestial hemisphere.

Distributions of directional intensity of the diffuse radiation were also determined, using all the available information associated to each image. The values of directional intensity are calculated as function of measurements of diffuse irradiance, of the solid angle for each area and of image characteristics. These maps supply more complete information about energy intensity distribution.

Finally the cloudiness index was estimated from the characteristics of the image for partially cloudy sky conditions. The cloudiness index is calculated through the ratio between the solid angle of the area that correspond to the clouds and the total solid angle of the image.

# ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos.....	5
1.2 Súmula dos Tópicos.....	6
CAPÍTULO 2: ESTUDOS RELACIONADOS À RADIAÇÃO SOLAR DIFUSA CELESTE....	9
2.1 Condições Atmosféricas e Configurações do Céu.....	10
2.1.1 Céu Limpo.....	11
2.1.2 Céu Parcialmente Nublado.....	11
2.1.3 Céu Encoberto Opaco.....	11
2.1.4 Céu Encoberto Não-Opaco.....	12
2.2 Fluxo de Energia Solar Incidente na Superfície Terrestre.....	12
2.3 Componentes da Radiação Solar.....	14
2.4 Caracterização da Radiação Solar Difusa.....	15
2.4.1 Variabilidade Local.....	17
2.4.2 Variabilidade Temporal.....	17

2.4.3	Distribuição Espectral.....	17
2.4.4	Distribuição Direcional.....	18
2.5	Modelos de Distribuição de Intensidade Direcional da Radiação Difusa Celeste.....	21
2.5.1	Modelo de Distribuição Isotrópica.....	23
2.5.2	Modelo de Temps e Coulson.....	25
2.5.3	Modelo de Perez.....	26
2.5.4	Modelo das Três Componentes Discretas de Radiância ( <i>TDRC</i> ).....	27
2.6	Técnicas para a Determinação da Distribuição de Radiância Solar Difusa no Hemisfério Celeste.....	29
2.7	Modelos de Luminância.....	36
2.7.1	Modelo de Harrison.....	36
2.7.2	Modelo de Perez ( <i>all wheater model</i> ).....	37
CAPÍTULO 3: CÂMERA CCD COMO DISPOSITIVO DE AQUISIÇÃO DE IMAGENS.....		39
3.1	Etapas do Sistema de Processamento Digital de Imagens.....	40
3.1.1	Aquisição.....	41
3.1.2	Digitalização.....	41
3.1.3	Análise de Imagens.....	43
3.1.4	Armazenamento.....	46
3.1.5	Exibição.....	48
3.2	Utilização de Sensores CCD na Determinação de Distribuição de Intensidade Direcional da Radiação Difusa Celeste.....	49

3.2.1	Linearidade.....	49
3.2.2	Comportamento Espectral.....	50
3.2.3	Calibração.....	51
3.3	Vantagens da Utilização de Câmeras CCD para a Determinação da Distribuição de Intensidade Direcional da Radiação Difusa.....	51
CAPÍTULO 4: O SISTEMA EXPERIMENTAL.....		53
4.1	Instalação dos Equipamentos.....	54
4.2	Etapas da Atividade Experimental.....	57
4.3	Sistema de Aquisição de Imagens.....	57
4.3.1	Câmera CCD.....	57
4.3.2	Especificações e Controles da Câmera CCD.....	58
4.3.3	Lente Grande Angular.....	61
4.4	Avaliação do Sistema de Aquisição de Imagens.....	61
4.4.1	Análise do Comportamento Geométrico.....	61
4.4.2	Análise do Comportamento da Câmera CCD sob Diferentes Configurações do Céu.....	64
4.5	Sistema de Aquisição de Dados de Irradiância Solar.....	66
4.5.1	Utilização do Anel de Sombra como Técnica de Medida da Irradiância Solar Difusa....	67
4.5.2	Determinação do Ângulo Sólido da Imagem.....	72
4.6	Sistema de Aquisição de Dados.....	74
4.7	Análise de Incertezas Associadas ao Sistema Experimental.....	74

CAPÍTULO 5: METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE INTENSIDADE DIRECIONAL DA RADIAÇÃO DIFUSA CELESTE.....	77
5.1 Imagens Hemisféricas.....	77
5.1.1 Orientação da Imagem Hemisférica.....	78
5.1.2 Diagrama Solar.....	79
5.1.3 Determinação do Ângulo Sólido de Uma Região da Imagem.....	81
5.1.4 Pré-processamento das Imagens Hemisféricas.....	85
5.2 Redução dos Níveis de Cinza.....	86
5.3 Mapas de Distribuição de Intensidade Relativa.....	88
5.4 Mapas de Distribuição de Intensidade Direcional.....	88
5.5 Incertezas Associadas a Metodologia para Determinação dos Mapas de Distribuição de Intensidade.....	90
5.6 Anel de Sombra.....	91
5.7 Cálculo da Irradiância Solar Difusa.....	91
5.8 Determinação do Índice de Nebulosidade.....	91
5.9 Programa Computacional.....	93
CAPÍTULO 6: ANÁLISE DOS RESULTADOS – REDUÇÃO DE NÍVEIS DE CINZA.....	96
6.1 Imagens do Hemisfério Celeste.....	97
6.1.1 Imagens do Céu Encoberto Opaco.....	97
6.1.2 Imagens do Céu Encoberto Não-Opaco.....	98
6.1.3 Imagens do Céu Limpo.....	98
6.1.4 Imagens do Céu Parcialmente Nublado.....	99

6.2	Análise das Imagens e dos Valores de <i>RGB</i> .....	109
6.2.1	Níveis e <i>RGB</i> na Condição de Céu Encoberto Opaco.....	109
6.2.2	Níveis e <i>RGB</i> na Condição de Céu Encoberto Não-Opaco.....	110
6.2.3	Níveis e <i>RGB</i> na Condição de Céu Limpo.....	112
6.2.4	Níveis e <i>RGB</i> na Condição de Céu Parcialmente Nublado.....	113
6.3	Variação do <i>RGB</i> dos Pixels de Uma Linha de Controle.....	114
6.3.1	Variação do <i>RGB</i> na Condição de Céu Encoberto Opaco.....	116
6.3.2	Variação do <i>RGB</i> na Condição de Céu Encoberto Não-Opaco.....	118
6.3.3	Variação do <i>RGB</i> na Condição de Céu Limpo.....	119
6.3.4	Variação do <i>RGB</i> na Condição de Céu Parcialmente Nublado.....	120
 CAPÍTULO 7: ANÁLISE DOS RESULTADOS – MAPAS DE DISTRIBUIÇÃO DE INTENSIDADE DA RADIAÇÃO DIFUSA CELESTE.....		122
7.1	Mapas de Distribuição de Intensidade Relativa.....	122
7.2	Análise das Imagens e dos Valores de Intensidade Relativa.....	131
7.2.1	Análise dos Valores de Intensidade Relativa e <i>RGB</i> na Condição de Céu Encoberto Opaco.....	131
7.2.2	Análise dos Valores de Intensidade Relativa e <i>RGB</i> na Condição de Céu Encoberto Não- Opaco.....	132
7.2.3	Análise dos Valores de Intensidade Relativa e <i>RGB</i> na Condição de Céu Limpo.....	133
7.2.4	Análise dos Valores de Intensidade Relativa e <i>RGB</i> na Condição de Céu Parcialmente Nublado.....	135

7.3	Mapas de Distribuição de Intensidade Direcional da Radiação Difusa Celeste.....	136
7.4	Determinação do Índice de Nebulosidade.....	147
	CAPÍTULO 8: CONCLUSÃO.....	150
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	153
	APÊNDICE.....	162

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a_i$	parâmetros empíricos para diferentes modelos de distribuição de intensidade	[adimensional]
$A_p$	área do pixel	[m]
$b$	total de <i>bytes</i> necessários para armazenar uma imagem monocromática	[MB]
$C_L$	capacitância associada ao circuito	[F]
$CM$	distância entre o ponto central e um ponto arbitrário	[m]
$CN$	distância entre o ponto central e um ponto arbitrário	[m]
$CP$	distância do eixo da câmera ao ponto central	[m]
$CQ$	distância do eixo da câmera ao ponto central	[m]
$C_r$	valor de <i>RGB</i> do tom de cinza	[adimensional]
$d$	número de pixels existentes a posição de um pixel da imagem e o centro da imagem	[adimensional]
$e_p$	número de elétrons da imagem escura	[adimensional]
$f(x,y)$	função de valores contínuos que descreve uma imagem digital	[lux]
$F$	fator geométrico do modelo de distribuição de radiância de Brunger e Hooper	[adimensional]

$f_c$	fator de correção para o método do anel de sombra	[adimensional]
$f_d$	fator de correção para o método do anel de sombra em condições isotrópicas	[adimensional]
$F_{ij}$	coeficientes do modelo semi-empírico proposto por Perez	[adimensional]
$g(x,y)$	função de valores discretos que descreve uma imagem digital monocromática, cujos valores representam tons de cinza	[adimensional]
$G$	matriz que corresponde a discretização espacial	[adimensional]
$i_d$	intensidade da radiação difusa	[W.m <sup>-2</sup> .sr <sup>-1</sup> ]
$\bar{i}_d$	distribuição média da intensidade da radiação difusa	[W.m <sup>-2</sup> .sr <sup>-1</sup> ]
$\bar{i}_d$	intensidade normalizada da radiação difusa	[W.m <sup>-2</sup> .sr <sup>-1</sup> ]
$i_{di}$	componentes da intensidade da radiação difusa	[W.m <sup>-2</sup> .sr <sup>-1</sup> ]
$i_{d\mathbf{I}}$	intensidade da radiação difusa monocromática	[W.m <sup>-2</sup> .sr <sup>-1</sup> ]
$i_r$	intensidade da radiação de uma região do hemisfério celeste	[W.m <sup>-2</sup> .sr <sup>-1</sup> ]
$i_{\mathbf{I}}$	intensidade monocromática	[W.m <sup>-2</sup> .sr <sup>-1</sup> ]
$I(x,y)$	irradiância incidente sobre o pixel de coordenadas $(x, y)$	[W.m <sup>-2</sup> ]
$I_{Ad}$	irradiância difusa medida pelo método do anel de sombra	[W.m <sup>-2</sup> ]
$I_{As}$	fração da irradiância difusa bloqueada pelo anel de sombra	[W.m <sup>-2</sup> ]
$I_d$	irradiância solar difusa horizontal	[W.m <sup>-2</sup> ]
$I_{d\mathbf{b}}$	irradiância solar difusa que atinge uma superfície com inclinação $\mathbf{b}$	[W.m <sup>-2</sup> ]
$I_{d\mathbf{I}}$	irradiância solar difusa horizontal monocromática	[W.m <sup>-2</sup> ]
$I_{d\mathbf{bI}}$	irradiância solar difusa monocromática que atinge uma superfície com inclinação $\mathbf{b}$	[W.m <sup>-2</sup> ]
$I_D$	irradiância solar direta horizontal	[W.m <sup>-2</sup> ]
$I_{Dn}$	irradiância solar direta normal	[W.m <sup>-2</sup> ]

$I_{dC}$	irradiância difusa calculada	[W.m <sup>-2</sup> ]
$I_G$	irradiância solar global	[W.m <sup>-2</sup> ]
$I_{iso\mathbf{b}}$	irradiância solar difusa calculada pelo modelo isotrópico	[W.m <sup>-2</sup> ]
$I_n$	irradiância solar normal	[W.m <sup>-2</sup> ]
$I_{n\mathbf{I}}$	irradiância solar normal monocromática	[W.m <sup>-2</sup> ]
$I_{on}$	irradiância solar normal extraterrestre	[W.m <sup>-2</sup> ]
$I_{O\mathbf{I}}$	irradiância difusa medida pelo método direto com disco	[W.m <sup>-2</sup> ]
$I_{on\mathbf{I}}$	irradiância solar extraterrestre normal monocromática	[W.m <sup>-2</sup> ]
$K_{i\mathbf{I}}$	coeficiente de extinção monocromática para um processo de extinção	[m <sup>-1</sup> .kg <sup>-2</sup> ]
$K_{\mathbf{I}}$	coeficiente de extinção monocromática	[m <sup>-1</sup> ]
$K_{\mathbf{I}m}$	coeficiente de massa de atenuação monocromática	[m <sup>-1</sup> .kg <sup>-2</sup> ]
$L_A$	largura do anel de sombra	[m]
$\bar{L}_c$	luminância normalizada em condições de céu limpo	[lux]
$\bar{L}_0$	luminância normalizada em condições de céu encoberto opaco	[lux]
$m$	número de linhas da matriz que representa uma imagem digital monocromática	[adimensional]
$m_{ir}$	massa óptica relativa de certo componente atmosférico	[adimensional]
$m_r$	massa óptica relativa de ar	[adimensional]
$M$	constante associada a imagem	[adimensional]
$n$	número de colunas da matriz que representa uma imagem digital monocromática	[adimensional]
$N$	índice de nebulosidade	[adimensional]

$N_i$	níveis de cinza de uma imagem monocromática	[adimensional]
$n_d$	número do dia	[adimensional]
$n_r$	número de <i>pixels</i> da região	[adimensional]
$n_T$	número total de <i>pixels</i> da imagem	[adimensional]
$q$	carga do elétron	[C]
$r$	expoente que define os níveis de cinza de uma imagem monocromática	[adimensional]
$r(x,y)$	propriedades de refletância e transmitância de um objeto	[adimensional]
$R(x,y)$	resposta do pixel de coordenadas $(x,y)$	[adimensional]
$R$	número de pixels existentes entre o último pixel pertencente a imagem e o centro do hemisfério	[adimensional]
$R_A$	raio do anel de sombra	[m]
$S_C$	área pertencente a um plano	[m <sup>2</sup> ]
$S_H$	área de uma certa região pertencente a um hemisfério de raio unitário	[m <sup>2</sup> ]
$t$	tempo de integração	[s]
$V$	tensão de saída	[V]
$x_i$	fatores geométricos do modelo <i>TDRC</i>	[adimensional]
$\mathbf{a}_1$	ângulo para estudo das propriedades da câmera	[grau]
$\mathbf{a}_2$	ângulo para estudo das propriedades da câmera	[grau]
$\mathbf{a}_l$	coeficiente de extinção monocromática devido à absorção	[m <sup>-1</sup> ]

<b><math>b</math></b>	ângulo de inclinação	[rad] ou [grau]
<b><math>b_1</math></b>	ângulo para estudo das propriedades da câmera	[grau]
<b><math>b_2</math></b>	ângulo para estudo das propriedades da câmera	[grau]
<b><math>g</math></b>	ângulo de azimute relativo à superfície inclinada	[rad] ou [grau]
<b><math>g_Q</math></b>	azimute solar	[rad] ou [grau]
<b><math>d</math></b>	declinação	[rad]
<b><math>e</math></b>	claridade do céu no modelo de Perez	[adimensional]
<b><math>D</math></b>	brilho do céu no modelo de Perez	[adimensional]
<b><math>DF_d</math></b>	componente vertical do fluxo de radiação difusa interceptada pelo anel de sombra	[W.m <sup>-2</sup> ]
<b><math>q</math></b>	ângulo zênite	[rad] ou [grau]
<b><math>q_i</math></b>	ângulo de incidência	[rad] ou [grau]
<b><math>q_Q</math></b>	ângulo de zênite solar	[rad] ou [grau]
<b><math>Q</math></b>	ângulo entre a posição observada e a posição solar	[rad]
<b><math>G</math></b>	ângulo do dia	[adimensional]
<b><math>G_i</math></b>	ganho do amplificador do circuito de saída	[adimensional]
<b><math>l</math></b>	comprimento de onda	[μm]
<b><math>r</math></b>	massa específica do meio	[M]
<b><math>\sigma_\lambda</math></b>	coeficiente de extinção monocromática devido ao espalhamento	[m <sup>-1</sup> ]
<b><math>t_{01}</math></b>	transmitância atmosférica monocromática, devido a todos os processos de atenuação da radiação direta	[adimensional]

$t_I$	transmitância monocromática de um certo processo	[adimensional]
$t_n$	transmitância das nuvens	[adimensional]
$t_A$	transmitância atmosférica monocromática	[adimensional]
$f$	latitude	[rad] ou [grau]
$w$	ângulo horário	[rad] ou [grau]
$w_0$	ângulo horário na alvorada	[rad] ou [grau]
$w_p$	ângulo horário no poente	[rad] ou [grau]
$W_A$	ângulo sólido subentendido pelo anel de sombra	[sr]
$W_{A\mathcal{C}}$	ângulo sólido da intersecção entre o anel de sombra e a área não visível pela lente	[sr]
$W_c$	ângulo sólido que não é visível pela imagem	[sr]
$W_H$	ângulo sólido de um hemisfério	[sr]
$W_i$	ângulo sólido de um pixel	[sr]
$W_T$	ângulo sólido total da imagem	[sr]
$x_1$	coeficiente de espalhamento	[adimensional]
$x_2$	coeficiente de espalhamento	[adimensional]
$y$	ângulo de espalhamento	[rad]

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Sistema experimental baseado em instrumentos com múltiplos sensores de ângulo de visão reduzido, para mapear a luminância no hemisfério celeste. Desenvolvido na Universidade de Michigan. Fonte: <i>Ann Arbor, Michigan</i> , 2001.	2
Figura 1.2	Fotografia do VTLC, equipamento que emprega uma câmera <i>CCD</i> para fornecer imagens e gravar vídeos, que permitem estudar as condições de nebulosidade. Fonte: VTLC, 2001.....	3
Figura 1.3	Fotografia do WSI ( <i>Whole Sky Imager</i> ), desenvolvido pela Universidade da Califórnia, San Diego ( <i>UCSD</i> ). Fonte: WSI, 2001.....	4
Figura 1.4	Mapa de isolinhas para um céu limpo, obtido a partir de uma imagem adquirida no dia 9 de junho de 2000. Fonte: WSI, 2001.....	4
Figura 2.1	Distribuição espectral da radiação solar difusa num dia de céu limpo: (a) em função do ângulo de Zênite, (b) em função do ângulo de azimute. Adaptado de Kondratiev, 1969, <i>Radiation in the Atmosphere</i> , Academic Press, New York.....	18

Figura 2.2	Intensidade relativa, no plano principal, ao nível do mar, numa atmosfera Rayleigh para três comprimentos de onda ( $I$ ) e dois valores de albedo ( $A$ ). Adaptado de Coulson, 1975, Solar and Terrestrial Radiation – Methods and Measurements, Academic Press, New York.....	19
Figura 2.3	Intensidade relativa da radiação solar, com $I = 0,365 \text{ m}$ , em função do ângulo de zênite no plano principal, ao nível do mar, para diferentes condições atmosféricas. Adaptado de Coulson, 1975, Solar and Terrestrial Radiation – Methods and Measurements, Academic Press, New York.....	20
Figura 2.4	Geometria de interceptação da radiação difusa celeste para uma superfície com inclinação $b$ e orientação Norte, localizada no Hemisfério Sul.....	22
Figura 2.5	Variação da intensidade da radiação difusa celeste ( $\text{W.cm}^{-2}.\text{sr}^{-1}$ ) em função do ângulo de zênite para diferentes tipos de atmosfera. Adaptado de Dave, J. V., 1977.....	24
Figura 2.6	Variação da intensidade da radiação difusa celeste ( $\text{W.cm}^{-2}.\mu\text{m}.\text{sr}^{-1}$ ) em função do ângulo de zênite para diferentes modelos de atmosfera. Adaptado de Dave, J. V., 1978.....	25
Figura 2.7	Distribuição da intensidade da radiação difusa celeste no modelo <i>TDRC</i> para a posição solar $q_0 = 70^\circ$ em diferentes condições de nebulosidade. Adaptado de Rosen, 1992.....	28
Figura 2.8	Mapa da distribuição de intensidade relativa energética e luminosa: (a) em condições de céu limpo para $q_0 = 51^\circ$ e (b) em condições de céu coberto para $q_0 = 42^\circ$ . Adaptado de Kondratiev, K., 1969.....	29

Figura 2.9	Mapas de distribuição de intensidade normalizada em condições de céu limpo para: (a) $q_0 = 61^\circ$ e (b) $q_0 = 67,6^\circ$ . Adaptado de McArthur, L. B. e Hay, J. E., 1981.....	31
Figura 2.10	Mapas de distribuição de intensidade normalizada num céu parcialmente nublado com $q_0 = 64,5^\circ$ . Adaptado de McArthur, L. B. e Hay, J. E., 1981.....	31
Figura 2.11	Mapas de contorno da distribuição de intensidade normalizada em condições céu limpo para: (a) $q_0 = 32^\circ$ e (b) $q_0 = 80^\circ$ . Adaptado de Harrison, A. W. e Coombes, C. A., 1988.....	32
Figura 2.12	Mapas da distribuição de intensidade normalizada em condições céu encoberto para: (a) $q_0 = 30^\circ$ e (b) $q_0 = 80^\circ$ . Adaptado de Coombes, C. A. e Harrison, A. W., 1988.....	33
Figura 2.13	Fotografia grande angular do sistema experimental. Adaptado de Brunger, A. P. e Hooper, F. C., 1993.....	34
Figura 2.14	Distribuição de intensidade normalizada em diferentes condições de nebulosidade. Adaptado de Brunger, A. P. e Hooper, F. C., 1993.....	35
Figura 2.15	Exemplo de uma de contorno com distribuição de luminâncias, no modelo de Harrison, para $q_0 = 31^\circ$ . Adaptado de Harrison, A. W., 1991.....	37
Figura 2.16	Distribuição de luminância em função do ângulo de zênite solar para diferentes condições atmosféricas. Adaptado de Perez, R. et al., 1993.....	38
Figura 3.1	Etapas do sistema de processamento de imagens.....	41

Figura 3.2	Efeito da redução de níveis de cinza em imagens de mesma resolução espacial para: $N_c = 256$ , (c) $N_c = 16$ , (d) $N_c = 8$ e (e) $N_c = 4$ .....	44
Figura 3.3	Redução dos níveis de cinza: (a) imagem original; (b) imagem com redução de níveis de cinza.....	45
Figura 3.4	Distribuição de intensidade num céu parcialmente nublado para: $r = 3$ e (b) $r = 4$ .....	46
Figura 3.5	Estrutura do diretório e convenção para os nomes dos arquivos de imagem.....	47
Figura 3.6	Padrão convencional para a apresentação de uma imagem digital.....	48
Figura 3.7	Cubo de cores do modelo <i>RGB</i> .....	49
Figura 3.8	Resposta espectral típica de um sensor CCD.....	50
Figura 4.1	Etapas da atividade experimental.....	53
Figura 4.2	Fotografia da instalação dos equipamentos de medida.....	54
Figura 4.3	Suporte com anel de sombra <i>Kipp and Zonen</i> modelo <i>CM121</i> ...	55
Figura 4.4	Fotografia do suporte da câmera.....	55
Figura 4.5	Coberturas horizontais fixadas no suporte do piranômetro.....	56
Figura 4.6	Ângulo de visão da câmera para as diferentes coberturas horizontais.....	56
Figura 4.7	Fotografia do sensor da câmera.....	58
Figura 4.8	Câmera <i>CCD Fujitsu General - TCZ-230E</i> . Adaptado do manual de instruções.....	59

Figura 4.9	Interruptores para controle interno. Adaptado do manual de instruções da Câmera <i>CCD</i> monocromática <i>Fujitsu General – TCZ-230 EA</i> .....	59
Figura 4.10	Imagens, produzidas por diferentes ajustes do interruptor <i>AGC</i> , em condições atmosféricas semelhantes: (a) interruptor ligado: 13/12/2000 às 16 h e 30 min; (b) interruptor desligado: 12/12/2000 às 15 h e 30 min.....	60
Figura 4.11	Esquema do teste empregado para verificação da geometria da imagem.....	62
Figura 4.12	Ângulo de visão do conjunto lente/câmera.....	63
Figura 4.13	Variação do tom de cinza com a tensão (irradiância), sob diferentes condições de nebulosidade, com o interruptor <i>AGC</i> ligado.....	64
Figura 4.14	Variação do tom de cinza com a tensão (irradiância), sob condições de céu limpo e de céu parcialmente nublado, com o interruptor <i>AGC</i> ligado.....	65
Figura 4.15	Piranômetro <i>Kipp and Zonen</i> modelo <i>CM11</i> .....	66
Figura 4.16	Geometria de instalação do anel de sombra.....	68
Figura 4.17	Variação da declinação durante o ano, de acordo com a fórmula de Spencer.....	70
Figura 4.18	Esquema para determinação do ângulo sólido.....	72
Figura 4.19	Variação do ângulo sólido de todo o hemisfério celeste, coberto por um anel de sombra, ao longo de um ano.....	73

Figura 5.1	Representações do caminho do Sol no hemisfério celeste, na cidade de Porto Alegre, numa determinada época do ano: (a) plano do caminho do Sol, em função da hora do dia e da estação; (b) caminho do Sol no hemisfério celeste e sua projeção no plano horizontal.....	78
Figura 5.2	Orientação da imagem hemisférica.....	79
Figura 5.3	Projeções do movimento diurno aparente do Sol ao longo do ano. (a) projeção vertical, <i>PV</i> e (b) projeção horizontal, <i>PH</i> .....	80
Figura 5.4	Mapa solar.....	81
Figura 5.5	Plano secante da imagem hemisférica.....	81
Figura 5.6	Projeção de elementos de área da superfície de um hemisfério num plano horizontal.....	82
Figura 5.7	Relação das áreas de um hemisfério que são projetadas no plano horizontal.....	82
Figura 5.8	Determinação do ângulo de zênite.....	83
Figura 5.9	Testes para uma circunferência padrão. ....	84
Figura 5.10	Efeito de má definição próximo das bordas.....	85
Figura 5.11	Distribuição de intensidade sob diferentes condições de nebulosidade: (a) céu limpo; (c) céu parcialmente nublado; (d) encoberto não-opaco; (d) encoberto opaco.....	87
Figura 5.12	Circunferência padrão com a marcação do posicionamento das imagens originais e localização do pixel central.....	89
Figura 5.13	Determinação do índice de nebulosidade num exemplo de céu nublado.....	92

Figura 5.14	Interface do programa computacional par a determinação da distribuição da intensidade direcional da radiação difusa.....	94
Figura 5.15	Interface do programa computacional par a determinação da distribuição da intensidade direcional da radiação difusa.....	95
Figura 6.1 (a-f)	Imagens adquiridas em condições de céu encoberto opaco e seus resultados.....	101
Figura 6.1 (g-m)	Imagens adquiridas em condições de céu encoberto opaco e seus resultados.....	102
Figura 6.2 (a-f)	Imagens adquiridas em condições de céu encoberto não-opaco e resultados.....	103
Figura 6.2 (g-m)	Imagens adquiridas em condições de céu encoberto não-opaco e resultados.....	104
Figura 6.3 (a-f)	Imagens adquiridas em condições de céu limpo e resultados.....	105
Figura 6.3 (g-m)	Imagens adquiridas em condições de céu limpo e seus resultados.....	106
Figura 6.4 (a-b)	Imagens adquiridas em condições de céu parcialmente nublado e resultados.....	107
Figura 6.4 (g-m)	Imagens adquiridas em condições de céu parcialmente nublado e resultados.....	108
Figura 6.5	Representação do procedimento adotado para a análise dos valores de RGB de uma linha de controle pertencente a matriz numérica da imagem.....	115
Figura 6.6 (a)	Variação dos valores de RGB num dia de céu encoberto opaco.	117
Figura 6.6 (b)	Variação dos valores de RGB num dia de céu encoberto opaco.	117

Figura 6.6 (c)	Variação dos valores de RGB num dia de céu encoberto opaco.	117
Figura 6.7 (a)	Variação dos valores de RGB num dia de céu encoberto não-opaco.....	118
Figura 6.7 (b)	Variação dos valores de RGB num dia de céu encoberto não-opaco.....	118
Figura 6.8 (a)	Variação dos valores de RGB num dia de céu limpo.....	119
Figura 6.8 (b)	Variação dos valores de RGB num dia de céu limpo.....	119
Figura 6.8 (c)	Variação dos valores de RGB num dia de céu limpo.....	120
Figura 6.9 (a)	Variação dos valores de RGB num dia de céu parcialmente nublado.....	120
Figura 6.9 (b)	Variação dos valores de RGB num dia de céu parcialmente nublado.....	121
Figura 7.1 (a-f)	Mapas de distribuição de intensidade relativa sob condição de céu encoberto opaco e região que contém o pixel do zênite.....	123
Figura 7.1 (g-m)	Mapas de distribuição de intensidade relativa sob condição de céu encoberto opaco e região que contém o pixel do zênite.....	124
Figura 7.2 (a-f)	Mapas de distribuição de intensidade relativa sob condição de céu encoberto não-opaco e região que contém o pixel do zênite	125
Figura 7.2 (g-m)	Mapas de distribuição de intensidade relativa sob condição de céu encoberto não-opaco e região que contém o pixel do zênite	126
Figura 7.3 (a-f)	Mapas de distribuição de intensidade relativa sob condição de céu limpo e região que contém o pixel do zênite.....	127

Figura 7.3 (g-m)	Mapas de distribuição de intensidade relativa sob condição de céu limpo e região que contém o pixel do zênite.....	128
Figura 7.4 (a-f)	Mapas de distribuição de intensidade relativa sob condição de céu parcialmente nublado e região que contém o pixel do zênite.....	129
Figura 7.4 (g-m)	Mapas de distribuição de intensidade relativa sob condição de céu parcialmente nublado e região que contém o pixel do zênite.....	130
Figura 7.5	Distribuição de intensidade direcional na condição de céu encoberto opaco.....	138
Figura 7.6	Distribuição de intensidade direcional na condição de céu encoberto não-opaco.....	138
Figura 7.7	Distribuição de intensidade direcional na condição de céu limpo.....	139
Figura 7.8	Distribuição de intensidade direcional na condição de céu parcialmente nublado.....	139
Figura 7.9	Distribuição de nuvens na região da imagem pela redução de níveis de cinza, para os arquivos: (a)2000-11-08-1700; (b) 2001-05-31-1320.....	148
Figura 7.10	Distribuição de nuvens na região da imagem através da marcação de sua posição, para os arquivos: (a)2000-12-18-1300; (b) 2000-12-18-1330.....	148

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1	Registros I/O Vision-EZ.....	43
Tabela 4.1	Especificações da câmera.....	58
Tabela 4.2	Especificações dos instrumentos de medida de irradiância solar.....	67
Tabela 6.1	Imagens em condições de céu encoberto opaco.....	97
Tabela 6.2	Imagens em condições de céu encoberto não-opaco.....	98
Tabela 6.3	Imagens em condições de céu limpo.....	99
Tabela 6.4	Imagens em condições de céu parcialmente nublado.....	100
Tabela 6.5	Valores de <i>RGB</i> das imagens adquiridas sob condição de céu encoberto opaco.....	110
Tabela 6.6	Valores de <i>RGB</i> das imagens adquiridas sob condição de céu encoberto não-opaco.....	111
Tabela 6.7	Valores de <i>RGB</i> das imagens adquiridas sob condição de céu encoberto limpo.....	112

Tabela 6.6	Valores de <i>RGB</i> das imagens adquiridas sob condição de céu parcialmente nublado.....	114
Tabela 7.1	Intensidade relativa das imagens adquiridas sob condição de céu encoberto opaco.....	131
Tabela 7.2	Intensidade relativa das imagens adquiridas com o céu encoberto não-opaco.....	133
Tabela 7.3	Intensidade relativa das imagens adquiridas sob condição de céu limpo.....	134
Tabela 7.4	Intensidade relativa das imagens adquiridas sob condição de céu parcialmente nublado.....	136
Tabela 7.5	Imagens em condições de céu encoberto opaco.....	137
Tabela 7.6	Imagens em condições de céu encoberto não-opaco.....	137
Tabela 7.7	Imagens em condições de céu limpo.....	137
Tabela 7.8	Imagens em condições de céu parcialmente nublado.....	137
Tabelas 7.9	Resultado da análise de imagens adquiridas sob condição de céu encoberto opaco: (a) 2001-05-17-15-45; (b) 2001-05-17-16-10; (c) 2001-05-17-16-25; (d) 2001-05-17-17-00.....	140
Tabelas 7.10	Resultado da análise de imagens adquiridas sob condição de céu encoberto não-opaco: (a) 2000-12-13-13-45; (b) 2000-12-13-15-00; (c) 2001-05-31-14-50; (d) 2001-05-31-15-50.....	141

Tabelas 7.11	Resultado da análise de imagens adquiridas sob condição de céu limpo: 2000-12-18-11-30; (b) 2000-12-18-12-00; (c) 2000-12-18-14-00; (d) 2000-12-18-15-00.....	142
Tabelas 7.12	Resultado da análise de imagens adquiridas sob condição de céu parcialmente nublado:(a) 2000-11-08-17-00; (b) 2001-05-31-13-20; (c) 2000-12-18-13-00; (d) 2000-12-18-13-30.....	144

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

O conhecimento da componente difusa da radiação solar é fundamental para o desenvolvimento de diversas pesquisas de energia solar. Suas aplicações vão desde o aproveitamento de energia em projetos relacionados às ciências agrárias até a otimização de sistemas de conversão de energia. A importância do tema pode ser estimada pelo grande número de pesquisas que têm como mote o estudo da radiação difusa, tanto em abordagens teóricas como experimentais.

Assim, o estudo da intensidade da radiação difusa e de sua distribuição no hemisfério celeste, sob diferentes condições atmosféricas, permite estimar a irradiância solar difusa em coletores solares e janelas de casas. Apesar de sua grande importância, tem sido muito difícil, até hoje, estabelecer uma base de dados disponíveis de distribuição de intensidade da radiação solar difusa.

Certas aplicações, como o estudo da radiação incidente em superfícies inclinadas, exigem apenas uma estimativa que permita estabelecer um valor de intensidade direcional, para servir como parâmetro da máxima energia disponível. Nestes casos, pode-se recorrer à utilização de modelos simplificados como, por exemplo, o modelo de distribuição isotrópica.

Outras aplicações, como a otimização de concentradores, o uso da iluminação natural, a arquitetura bioclimática, a otimização de carga térmica de ambientes, entre outras, podem necessitar o conhecimento de condições mais realísticas que permitam obter valores de intensidade direcional em regiões do hemisfério celeste e sob diferentes condições de nebulosidade. Para isso, foram desenvolvidas diferentes técnicas experimentais capazes de fornecer mapas da distribuição de intensidade direcional.

Uma das técnicas de medida da intensidade direcional da radiação difusa consiste na utilização de radiômetros de varredura. Normalmente, estes equipamentos são construídos para permitir medidas automáticas nas diferentes regiões do hemisfério celeste, em bandas bem definidas de comprimentos de onda. Uma desvantagem desta técnica de medida está associada ao tempo de resposta para uma varredura completa. Além disso, para obtenção de um mapa de radiância ou de luminância são necessários diversos instrumentos de medida, elevando o custo total do sistema de medidas.

A Figura 1.1 mostra um exemplo de sistema experimental composto por 20 sensores Licor. O equipamento foi desenvolvido na Universidade de Michigan para determinar o mapa de luminância do hemisfério celeste.

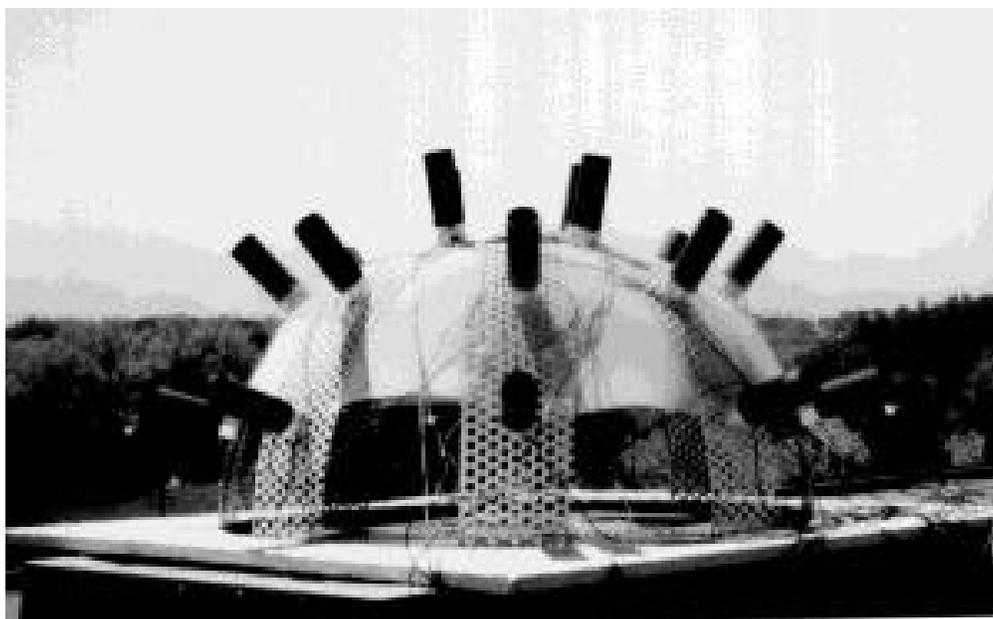


Figura 1.1 – Sistema experimental baseado em instrumentos com múltiplos sensores de ângulo de visão reduzido, para mapear a luminância no hemisfério celeste. Desenvolvido na Universidade de Michigan. Fonte: *Ann Arbor, Michigan, 2001*.

A técnica fotográfica é desenvolvida e empregada como uma alternativa capaz de solucionar estes problemas, proporcionando um mapeamento instantâneo do hemisfério celeste através de um equipamento de baixo custo. Entretanto, a utilização de fotografias requer cuidados relativos às características do filme empregado e ao seu tempo de exposição.

A utilização de sensores CCD<sup>1</sup>, como técnica de mapeamento da intensidade direcional, apresenta, no mínimo, as mesmas vantagens do processo fotográfico. Além da maior linearidade, o processo de aquisição fornece imagens instantâneas das condições de nebulosidade observadas no hemisfério celeste. As qualidades dos sensores CCD são ampliadas através da análise e da manipulação de imagens digitais. O armazenamento de imagens digitais disponibiliza uma grande quantidade de dados para futura recuperação e análise.

Os dispositivos dotados de sensores CCD são amplamente utilizados em diferentes aplicações meteorológicas. Atualmente é possível encontrar em diversos *sites* da *Internet* sistemas experimentais desenvolvidos para determinação e documentação das condições do céu que empregam instrumentos dotados de sensores CCD.

O VTLC (*Video Time-Lapsed Camera*), mostrado na Figura 1.2, é um equipamento que possui uma câmera CCD, com um ângulo de visão entre 100° e 130°, aproximadamente. Este instrumento grava imagens coloridas do céu em períodos ajustáveis, tipicamente de 4 ou 8 s. O sistema de aquisição de imagens é capaz de fornecer filmes que mostram o deslocamento das nuvens e que correspondem a um dia de observação.



Figura 1.2 – Fotografia do VTLC, equipamento que emprega uma câmera *CCD* para fornecer imagens e gravar vídeos, que permitem estudar as condições de nebulosidade.

Fonte: VTLC, 2001.

---

<sup>1</sup> -Charged Coupled Device



Figura 1.3 – Fotografia do WSI (*Whole Sky Imager*), desenvolvido pela Universidade da Califórnia, San Diego (*UCSD*). Fonte: WSI, 2001.

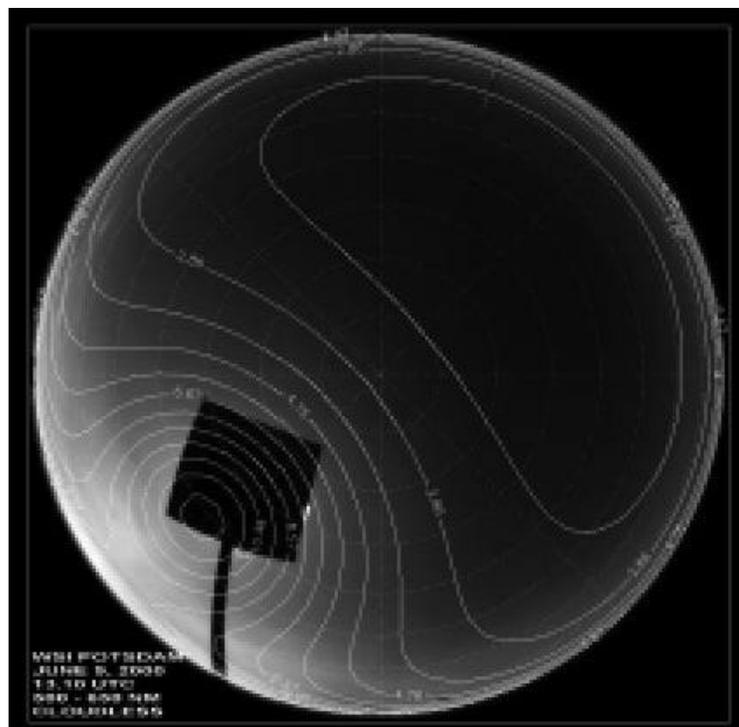


Figura 1.4 – Mapa de isolinhas para um céu limpo, obtido a partir de uma imagem adquirida no dia 9 de junho de 2000. Fonte: WSI, 2001.

A Figura 1.3 mostra outro instrumento desenvolvido com uma finalidade similar. O WSI (*Whole Sky Imager*) consiste num sistema de medidas e aquisição de imagens que permite monitorar todo o hemisfério celeste. O sistema de aquisição é composto de uma câmera CCD, uma lente olho-de-peixe e dois filtros espectrais. O equipamento é empregado para documentação e análise das características de nuvens, além de medir a radiância no hemisfério celeste em duas regiões espectrais centradas em 450nm e 650 nm.

A Figura 1.4 mostra um resultado da distribuição de radiância no hemisfério celeste. A aquisição desta imagem é realizada no canal do infravermelho próximo, no dia 9 de junho de 2000. As radiâncias são em parte calculadas usando-se um modelo, válido na região espectral entre 280 nm e 1100 nm em 15 bandas (canais), para 19 ângulos de zênite solar (0, 5, 10, ..., 90) e para 37 ângulos de azimute (0, 5, 10, ..., 180).

Analisando as vantagens da utilização dos sensores CCD e as recentes técnicas apresentadas, nota-se que é possível empregar estes equipamentos para estimar a intensidade da radiação difusa. O desenvolvimento deste trabalho pretende estabelecer uma maneira simples e econômica de avaliar e determinar a intensidade da radiação difusa, aproveitando todas as vantagens fornecidas pelas câmeras CCD.

A proposta consiste em analisar imagens monocromáticas do hemisfério celeste, juntamente com medidas instantâneas da irradiância solar. O número de níveis de cinza da imagem original é reduzido de 256 para apenas 16 níveis. Desta maneira obtém-se uma imagem de contornos bem definidos, que qualitativamente corresponde a um mapa de distribuição da intensidade direcional da radiação difusa. Neste caso, cada *pixel* formador da imagem corresponde a uma direção do hemisfério celeste. A intensidade direcional da radiação difusa celeste é calculada em função dos valores de *RGB*, da irradiância difusa medida, do ângulo sólido total da imagem e de características da imagem hemisférica.

## 1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo principal caracterizar a distribuição direcional de intensidade da radiação solar difusa, sob diferentes condições de nebulosidade, através de medidas da irradiância solar difusa e da aquisição de imagens monocromáticas do

hemisfério celeste. Uma série de atividades foram desenvolvidas para atingir o objetivo principal. Estas atividades deram origem a alguns resultados, que podem ser considerados como objetivos secundários, dos quais destacam-se: a determinação do índice de nebulosidade e o desenvolvimento de um *software*.

O índice de nebulosidade é determinado pela relação entre o ângulo sólido subtendido pelas nuvens e o ângulo sólido total da imagem. Assim, este índice representa a fração da imagem coberta por nuvens.

O programa computacional, desenvolvido ao longo desta tese, tem por finalidade exibir e gravar em disco os resultados, disponibilizando uma grande quantidade de grande quantidade de dados que podem ser armazenados para futura recuperação. O programa também apresenta na tela os principais resultados da análise das imagens, como: os mapas de tons de cinza, os mapas de contorno os valores de intensidade, os ângulos sólidos de cada região e os índices de nebulosidade. Além destes dados, uma série de informações adicionais podem ser gravadas em disco rígido.

## 1.2 SÚMULA DOS TÓPICOS

Este trabalho está organizado em oito capítulos, cujo conteúdo pode ser resumido da seguinte maneira. O Capítulo 2 apresenta o resultado de uma revisão bibliográfica que tem por objetivo demonstrar a relevância do tema e o contexto no qual este trabalho foi desenvolvido. Inicialmente os tópicos de interesse são relacionados de acordo com o desenvolvimento da pesquisa. Em seguida, são estudados os aspectos gerais relacionados à radiação difusa e as condições de nebulosidade que servirão como parâmetro de classificação de imagens do hemisfério celeste. A distribuição de intensidade direcional é analisada a partir do resultado de diferentes pesquisas em considerações teóricas e experimentais. Também são discutidos alguns modelos que permitem obter a distribuição de luminância no hemisfério celeste.

O Capítulo 3 trata da utilização da câmera CCD como dispositivo de aquisição de imagens. Analisam-se as diferentes etapas do sistema de processamento digital de imagens relacionadas ao desenvolvimento da pesquisa; discute-se o efeito da redução dos níveis de cinza e sua aplicação no estudo de imagens monocromáticas do hemisfério celeste e também estuda-se a utilização de sensores CCD para a determinação de

intensidade direcional da radiação difusa celeste. Finalmente, apresentam-se as vantagens da utilização de câmeras CCD para a determinação da distribuição de intensidade direcional da radiação difusa através da comparação com outras técnicas.

No Capítulo 4 analisa-se o sistema experimental empregado neste trabalho, discutindo-se as etapas da atividade experimental. São analisadas as principais características dos instrumentos de medida utilizados na pesquisa e suas limitações. Também se determina o ângulo sólido total da imagem, a partir das características do sistema experimental, mostrando sua variação ao longo do ano. Finalmente apresenta-se a análise de incertezas associadas ao sistema experimental.

No Capítulo 5 discutem-se os aspectos referentes à metodologia empregada para determinar a distribuição de intensidade direcional da radiação difusa. Inicialmente são apresentadas as características das imagens hemisféricas empregadas neste trabalho. Em seguida demonstra-se o cálculo do ângulo sólido dos pixels formadores da imagem hemisférica. A metodologia empregada permite obter mapas de distribuição de intensidade relativa e mapas de distribuição de intensidade direcional, com valores em  $Wm^{-2}sr^{-1}$ . Este capítulo também apresenta a análise de incertezas associadas à metodologia proposta para estes dois tipos de mapas de distribuição. A partir das considerações geométricas empregadas no cálculo do ângulo sólido de cada pixel, determina-se o índice de nebulosidade, que permite avaliar a fração do hemisfério celeste encoberta por nuvens. Finalmente, apresenta-se o programa computacional que foi desenvolvido com a finalidade de exibir e armazenar os dados desta pesquisa.

O Capítulo 6 apresenta a análise dos resultados relacionados com a técnica de redução de níveis de cinza. Inicialmente são exibidas as imagens, classificadas de acordo com a condição de nebulosidade. Ao todo, foram selecionadas 48 imagens com características distintas. Também são apresentadas tabelas que permitem analisar os valores de RGB, presentes nas imagens do hemisfério celeste adquiridas em diferentes dias e sob diferentes condições de nebulosidade. Finalmente estuda-se a variação dos valores de *RGB* de pixels pertencentes ao centro da imagem com o objetivo de reconhecer a condição de nebulosidade, a partir da mínima informação que pode ser extraída da matriz numérica que corresponde à imagem do hemisfério celeste.

O Capítulo 7 trata da análise de resultados, apresentando os mapas de distribuição de intensidade. Inicialmente são apresentados os mapas de distribuição de intensidade relativa referentes às 48 imagens analisadas no capítulo anterior. Os resultados obtidos são analisados com o auxílio de tabelas que relacionam os valores de

intensidade relativa presentes em cada uma das imagens. Os mapas de distribuição de intensidade direcional da radiação difusa celeste são determinados para 16 imagens do hemisfério celeste. Os dados resultantes do processo de análise são exibidos em tabelas correspondentes a cada arquivo de imagem. Neste capítulo também se analisam exemplos de imagens, adquiridas sob condição de céu parcialmente nublado, que permitem determinar o índice de nebulosidade.

No Capítulo 8 são relacionadas algumas observações, apresentadas as conclusões e as considerações finais. Também são apresentadas as perspectivas para o desenvolvimento de novos trabalhos relacionados com esta pesquisa.

## CAPÍTULO 2

### ESTUDOS RELACIONADOS À RADIAÇÃO DIFUSA CELESTE

Neste capítulo será feita uma revisão bibliográfica que tem por finalidade demonstrar a relevância do tema e apresentar o contexto no qual este trabalho foi desenvolvido. A bibliografia empregada nesta tese está relacionada a diferentes tópicos da área de radiação solar, incluindo abordagens teóricas e experimentais.

A relevância do tema pode ser avaliada pela grande quantidade de assuntos que estão a ele relacionados, direta ou indiretamente. Os tópicos de interesse podem ser agrupados em dez itens, citados abaixo, conforme o desenvolvimento da pesquisa.

Inicialmente foram estudados os aspectos básicos que serviram como fundamento para a análise do comportamento da irradiância solar difusa e para suas medidas: (1) radiação térmica e estudo da transferência de calor por radiação [Siegel, R. e Howell, J. R., 1972; Modest, M. F., 1992]; (2) estudo da geometria da radiação solar [Hand I. F., 1948; Silva, A. C., 1964; Domingues, F. A. 1976]; (3) determinação das componentes da radiação solar e instrumentos de medidas [Frölich, C. et al., 1973; Coulson, K., 1975; Duffie, J. A. e Beckman, W. A., 1980; Iqbal, M., 1983; Hay, J. E. e Hanson, K. J., 1985; Suehrcke, H., 1994]; (4) técnicas para determinação do espectro solar [Rossini, E. G. et al., 1995] e medidas da radiação difusa [Le Baron et al., 1980; Painter, H. E., 1981; Ineichen P. et al., 1984; Kudish, A. I. e Ianetz, A., 1993].

Posteriormente foram analisados diversos trabalhos que tratam da distribuição de intensidade direcional da radiação solar difusa em abordagens teóricas e experimentais, como por exemplo: (5) características da distribuição de intensidade energética e luminosa da radiação difusa celeste [Kondratyev, K., 1969]; (6) modelos de distribuição de intensidade direcional da radiação difusa [Siala, F. M. F. et al., 1990; Rosen, M. A., 1992]; (7) modelos de distribuição de intensidade determinados a partir de diferentes técnicas de medida [McArthur, L. B., e Hay, J. E., 1980; Harrison, A. W. e Coombes, C. A., 1982].

Para consolidar a importância do tema, foram estudadas algumas das possíveis aplicações: (8) aplicações da distribuição de intensidade energética e fotométrica [Miñano, J. C. D., 1985; Suzuki, A., e Kobayashi, S., 1995; Hopkinson, R. et al., 1975; entre outros].

Também foram objeto de interesse os trabalhos que empregam quantidades fotométricas: (9) pesquisas referentes ao desenvolvimento de modelos de distribuição de luminância [Kittler, R., 1994; Perez, R. et al., 1987; R., Harrison, A. W., 1991; Perez, R. et al., 1993]; (10) comparação e validação de modelos [Kittler, R. e Valko, P., 1993; Ineichen, P. et al., 1994; Littlefair, P. J., 1994].

O contexto de desenvolvimento da pesquisa é apresentado nas próximas seções deste capítulo. Inicialmente são estudados os aspectos gerais relacionados à radiação solar difusa em diferentes condições atmosféricas. Considera-se indispensável conhecer algumas das principais características da componente difusa para melhor avaliar o comportamento da intensidade direcional da radiação celeste.

Em seguida, apresentam-se algumas das diferentes metodologias que permitem obter a distribuição de intensidade direcional da radiação difusa. Por fim são estudados modelos de distribuição de luminância. Neste sentido, também são estabelecidas comparações entre as distribuições de luminância e de radiância no hemisfério celeste. Os modelos de luminância e o estudo da luz do dia disponível têm sua importância justificada pela necessidade de se otimizar o uso da energia [Li, D. H. W. e Lam, J. C., 2001; Reinhart, C. F. e Walkenhorst, O., 2001]. O texto, a seguir, não tem a pretensão de esgotar o assunto, nem corresponde a uma visão completa de tais modelos. O principal objetivo é selecionar alguns resultados significativos para servir como parâmetro de análise e avaliação da metodologia proposta nesta tese.

## 2.1 CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS E CONFIGURAÇÃO DO CÉU

Normalmente, no estudo da distribuição da intensidade da radiação difusa celeste, as condições do céu são simplificadas e recaem num conjunto reduzido de tipos básicos. Alguns autores [Siala, F. M. F. et al., 1990] preferem trabalhar com um conjunto de apenas quatro condições: céu limpo, céu parcialmente nublado, céu encoberto opaco e céu encoberto não-opaco<sup>1</sup>. Esta classificação mostrou-se adequada para os objetivos deste trabalho

---

<sup>1</sup> - os termos opaco (*opaque*) e não-opaco (*nonopaque*) são pouco adequados para descrever o fenômeno. Por outro lado, fazem referência direta a uma dependência com a posição. Por essa razão, optou-se por manter a nomenclatura original, sugerida pelos autores.

### 2.1.1 CÉU LIMPO

Num céu limpo, a distribuição de intensidade da radiação difusa celeste depende do grau de turbidez atmosférica. Tal distribuição é caracterizada por exibir a máxima intensidade na região ao redor do disco solar, chamada circunsolar. Nesta região, ocorre uma alongação das funções de fase de espalhamento das partículas atmosféricas [Kondratiev, K., 1969]. Por outro lado, nas proximidades do horizonte, o aumento da espessura óptica aumenta a massa de ar, causando um acréscimo na intensidade da radiação difusa. A mínima intensidade é observada a  $90^\circ$  da posição solar, no plano vertical que contém a direção dos raios solares.

### 2.1.2 CÉU PARCIALMENTE NUBLADO

O céu parcialmente nublado torna o estudo da distribuição de intensidade direcional complexo e não homogêneo. Neste caso, a presença de diferentes camadas e tipos de nuvens não permite distinguir condições características de distribuição. Além disso, a posição das nuvens altera significativamente a configuração do céu e, em consequência, toda a distribuição de radiância e luminância. Nos estudos meteorológicos, o reconhecimento das formas típicas de nuvens dá origem a sua classificação. A caracterização das nuvens está baseada na observação de diferentes aspectos como: altura, aparência, constituição física da nuvem, entre outros. Durante o transcorrer do dia, pode ocorrer uma transição gradual entre estes diferentes tipos de nuvens. A determinação e / ou análise da quantidade de nuvens é importante para estimar, por exemplo: a claridade do dia [Reddy, S. J., 1974]; as condições de luminância do céu [Kittler, R. e Darula, S., 1998]; entre outros. As observações do hemisfério celeste permitem obter uma estimativa da fração de céu ocupada pelas nuvens, descrita pelo índice de nebulosidade.

### 2.1.3 CÉU ENCOBERTO OPACO

Para um céu encoberto opaco, o máximo de intensidade ocorre no zênite, observando-se uma diminuição gradual até as proximidades do horizonte. Na região do horizonte, ocorre um escurecimento, uma vez que o aumento da espessura óptica provoca uma maior absorção das nuvens opacas. A distribuição apresenta simetria zenital e independe da posição solar.

### 2.1.4 CÉU ENCOBERTO NÃO-OPACO

O céu encoberto não-opaco compartilha algumas características com o céu encoberto e do céu limpo. O grau de opacidade define o conjunto de características dominantes. Geralmente, observa-se uma fraca dependência com a posição solar. Entretanto, um aumento de opacidade provoca uma diminuição de intensidade na região circunsolar e um escurecimento na região do horizonte.

## 2.2 FLUXO DE ENERGIA SOLAR INCIDENTE NA SUPERFÍCIE TERRESTRE

Os fluxos de radiação obtidos na superfície terrestre são atenuados pelos componentes atmosféricos, sendo objeto de interesse no estudo da transferência de energia por radiação [Kondratiev, K., 1969; Siegel, R. e Howell, J. R., 1972; entre outros]. Um meio como atmosfera terrestre, que absorve e espalha a radiação incidente, permite determinar um parâmetro físico chamado coeficiente de atenuação monocromática,  $K_I$ . De maneira geral, esta quantidade é obtida em função do comprimento de onda da radiação incidente, da temperatura, da pressão, e da composição do meio. A unidade do coeficiente de atenuação é o recíproco do comprimento, portanto de dimensão  $[L^{-1}]$ . Além disso, quando  $K_I$  é constante, pode ser interpretado como o inverso da distância média de penetração da radiação. O coeficiente de atenuação monocromática representa a soma dos coeficientes de atenuação devido à absorção e ao espalhamento, isto é,

$$K_I = \alpha_I + \sigma_I \quad (2.1)$$

onde  $\alpha_\lambda$  é o coeficiente de atenuação devido à absorção e  $\sigma_\lambda$  é o coeficiente de atenuação devido ao espalhamento. Algumas vezes pode ser mais conveniente trabalhar com o coeficiente de massa de atenuação

$$K_{Im} = \frac{K_I}{\mathbf{r}} \quad (2.2)$$

onde  $\mathbf{r}$  é a massa específica do meio, com  $K_{Im}$  dado em unidades de área por massa. O fluxo de energia solar que incide numa superfície normal à direção dos raios solares pode ser obtido pela seguinte equação:

$$I_n = \int_0^{\infty} I_{onl} \left[ \exp \left( - \int_0^{\nu} K_{Im} \mathbf{r} ds \right) \right] d\mathbf{l} \quad (2.3)$$

onde  $I_{onl}$  é a irradiância solar monocromática fora da atmosfera, sendo determinada com orientação normal aos raios solares;  $\mathbf{l}$  é o comprimento de onda;  $ds$  é um elemento do caminho geométrico percorrido pelo raio solar;  $\nu$  é o limite da atmosfera. O fator exponencial é uma grandeza adimensional chamada espessura óptica ou opacidade. Quanto maior a espessura óptica, maior é a atenuação. Da mesma forma, quanto maior for a camada atmosférica, atravessada por um raio solar monocromático, maior a quantidade de energia atenuada.

Determina-se o coeficiente de transmissão ou transmitância atmosférica, empregando-se a Equação (2.3) para um certo comprimento de onda, ou seja,

$$t_{\mathbf{l}} = \exp(-K_{\mathbf{l}} \cdot m_r) = \frac{I_{nl}}{I_{0nl}} \quad (2.4)$$

onde  $m_r$  é a massa óptica relativa de ar, definida como a razão entre o caminho atravessado pela radiação solar monocromática, numa direção oblíqua, e o caminho vertical. Como existem diferentes processos de atenuação que podem ser determinados de maneira independente, calcula-se a espessura da atenuação óptica total pela expressão:

$$K_{\mathbf{l}} \cdot m_r = \sum_{i=1}^{i=j} K_{i\mathbf{l}} m_{ir} \quad (2.5)$$

onde o índice  $i$  representa cada um dos diferentes processos de atenuação, sendo  $j$  o número total de processos. Dessa forma,  $m_{ir}$  representa a massa óptica relativa de um certo componente atmosférico. Os respectivos coeficientes de atenuação monocromática,  $K_{i\mathbf{l}}$ , são aplicados para o caminho percorrido pela radiação através de toda a atmosfera, isto é, do topo à superfície. Combinando-se todos os processos de atenuação, calcula-se a transmitância atmosférica:

$$t_{\mathbf{l}} = \prod_{i=1}^{i=j} t_{i\mathbf{l}} \quad (2.6)$$

onde, a transmitância de um simples processo de atenuação é obtida por:

$$t_{iI} = \exp(-K_{iI} \cdot m_i) \quad (2.7)$$

Existe um grande número de modelos de irradiância que empregam dados teóricos e medidos [Gueymard, C., 1993; Bird, R. E. e Hutstrom, R. L., 1981] em superfícies horizontais. Geralmente, os modelos que permitem calcular o fluxo de energia solar, numa superfície horizontal, são desenvolvidos da seguintes maneira: (a) são identificadas as componentes da radiação solar e os diferentes processos de atenuação; (b) são determinadas as massas ópticas relativas e os coeficientes de atenuação correspondentes a cada um dos diferentes processos de atenuação, considerados conforme a Equação (2.5); (c) calcula-se a transmitância atmosférica, de acordo com a Equação (2.6); (d) a transmitância atmosférica é aplicada na lei de Bouguer, Equação (2.3), para calcular as componentes da irradiância solar global, como será visto adiante; (e) somam-se as componentes da irradiância para obtenção de um fluxo global.

### 2.3 COMPONENTES DA RADIAÇÃO SOLAR

O fluxo de energia solar que incide na superfície terrestre provém tanto do disco solar quanto do hemisfério celeste. De fato, é possível decompor a radiação solar incidente na superfície terrestre, em duas componentes: uma direta e outra difusa. Em termos geométricos, considera-se que a radiação direta provém unicamente do disco solar, chegando ao solo sem ter sofrido mudança de direção, além da refração atmosférica. Já a radiação difusa, que tem sua origem nos processos de espalhamento, provém de toda a abóbada celeste, ou seja, é a radiação solar recebida de um ângulo sólido de  $2\pi$ , com exceção do ângulo sólido subentendido pelo Sol. Em alguns casos, considera-se isoladamente a radiação circunsolar, identificada num céu limpo como uma pequena região anelar em torno do Sol. Entretanto, na maioria das vezes, a radiação circunsolar é medida ou avaliada juntamente com a radiação difusa.

Para uma superfície com orientação horizontal, a irradiância solar direta é dada por:

$$I_D = \int_0^{\infty} I_{0nI} \cdot t_{DI} \cdot \cos q_Q dI \quad (2.8)$$

onde  $I_{0nI}$  é a irradiância solar monocromática incidente numa superfície normal aos raios solares;  $q_Q$  é o ângulo de zênite solar e  $t_{DI}$  é a transmitância atmosférica monocromática, devido a todos os processos de atenuação da radiação direta. A irradiância difusa pode ser obtida pela equação:

$$I_d = \int_0^\infty \int_0^{2p} \int_0^{p/2} i_l \cdot \cos \mathbf{q}_q \cdot \sin \mathbf{q}_q d\mathbf{q}_q d\mathbf{g}_q d\mathbf{l} \quad (2.9)$$

onde  $i_l$  é a intensidade monocromática e  $\mathbf{g}_q$  é o ângulo de azimute solar. Determina-se o fluxo de radiação global num dado comprimento de onda pela soma destas duas componentes, ou seja:

$$I_G = \int_0^\infty I_{onl} \cdot t_{DI} \cdot \cos \mathbf{q}_q d\mathbf{l} + \int_0^\infty \int_0^{2p} \int_0^{p/2} i_l \cdot \cos \mathbf{q}_q \cdot \sin \mathbf{q}_q d\mathbf{q}_q d\mathbf{g}_q d\mathbf{l} \quad (2.10)$$

Em grande parte dos modelos teóricos [Leckner, B., 1978; Brine, D. T. e Iqbal, M., 1983; entre outros], a componente difusa não é obtida em função dos valores de intensidade. Nestes modelos são definidas algumas expressões, para determinar a transmitância dos diversos parâmetros atmosféricos, relacionados à componente difusa. Em tais modelos, os valores da irradiância solar direta são bem precisos, enquanto que os valores obtidos para a irradiância difusa representam uma aproximação. Os valores de irradiância solar global também podem ser considerados precisos, porque em condições de céu limpo a componente direta representa uma fração de energia muito maior, se comparada à componente difusa.

## 2.4 CARACTERIZAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR DIFUSA

A componente difusa da radiação solar tem sua origem nos processos de interação entre a radiação solar e as partículas que compõem a atmosfera terrestre. A absorção e o espalhamento são os dois processos que regem a transferência radiativa na atmosfera terrestre.

O processo de absorção molecular depende do estado de energia da molécula, sendo a radiação absorvida durante a transição de um estado de energia para outro. A absorção ocorre quando certo componente atmosférico remove uma parte da energia incidente e a converte em energia interna. Esse processo ocorre somente para comprimentos de onda discretos, ou seja, cada componente atmosférico absorve radiação em determinados comprimentos de onda, sendo transparente para os demais. Por isso são chamados de absorvedores seletivos.

Os principais componentes do ar seco, que absorvem radiação solar, na região espectral mais significativa são: o oxigênio molecular ( $O_2$ ), o ozônio ( $O_3$ ) e o dióxido de carbono ( $CO_2$ ). O oxigênio molecular absorve radiação solar na região do visível, em bandas estreitas com picos centrados em 0,63  $\mu\text{m}$ , 0,69  $\mu\text{m}$  e 0,76  $\mu\text{m}$ . O ozônio absorve no ultravioleta, em bandas fortes

entre 0,20  $\mu\text{m}$  e 0,30  $\mu\text{m}$ ; e no visível, em bandas fracas de 0,45  $\mu\text{m}$  a 0,77  $\mu\text{m}$ . O dióxido de carbono absorve na região do infravermelho em diversas bandas centradas nos seguintes comprimentos de onda: 1,45  $\mu\text{m}$ , 1,6  $\mu\text{m}$ , 2,0  $\mu\text{m}$  e 2,7  $\mu\text{m}$ . O vapor de água é outro importante componente atmosférico, absorvendo a radiação solar em diversas bandas na região do infravermelho. As principais bandas estão centradas nos seguintes comprimentos de onda: 0,94  $\mu\text{m}$ , 1,1  $\mu\text{m}$ , 1,38  $\mu\text{m}$ ., 1,87  $\mu\text{m}$ .

O processo de espalhamento é um caso particular de difusão da radiação que, geralmente, está associado às posições irregulares das partículas num gás. Neste processo, as partículas comportam-se como fontes secundárias de radiação e não se verifica a seletividade espectral. O processo se repete, ou seja, a radiação espalhada por uma molécula pode ser novamente espalhada por outra, dando origem ao que se chama de múltiplos.

A relação entre o tamanho da partícula e o comprimento de onda da radiação incidente permite estabelecer o tipo de espalhamento. Assim, o espalhamento Rayleigh é observado quando a partícula tem tamanho inferior ao comprimento de onda da radiação incidente. Neste caso, o espalhamento é máximo para frente e para trás, e mínimo a  $90^\circ$  e  $270^\circ$ . Nos modelos teóricos e semi-empíricos emprega-se uma atmosfera composta unicamente de moléculas de ar seco para caracterizar o comportamento do espalhamento Rayleigh. Por outro lado, o espalhamento Mie ocorre quando a partícula é maior que o comprimento de onda da radiação incidente. Geralmente, nesse processo, a maior parte da radiação é espalhada para frente. O espalhamento Mie é produzido pelos aerossóis e pelas moléculas de água.

Muitos fenômenos são observados devido ao espalhamento atmosférico. As mudanças diárias no aspecto de uma mesma paisagem se devem, em grande parte, ao processo de espalhamento. O azul do céu se deve às pequenas partículas que difundem maiores proporções de radiação nesse intervalo de comprimento de onda. Quando o céu está nublado, a atmosfera passa a conter uma grande quantidade de água e, portanto, uma grande quantidade de partículas difusoras maiores. Essas partículas se caracterizam por difundir proporções aproximadamente iguais para todos os comprimentos de onda, causando superposição entre as cores. Como consequência, a abóbada celeste torna-se branca. Pela mesma razão as nuvens são brancas.

A radiação solar é caracterizada por sua variabilidade tanto local quanto temporal e pela maneira com que se distribui espectral e direcionalmente. Estes fatores dificultam a determinação da radiação solar, por meio de modelos simplificados, nas investigações teóricas e nos trabalhos experimentais [Hay, J. E. and Hanson, K. J., 1985]. As próximas seções visam a esclarecer o significado de cada um destes fatores e sua importância para o estudo da componente difusa da radiação solar.

#### 2.4.1 VARIABILIDADE LOCAL

A variabilidade local da radiação solar está relacionada a certas peculiaridades de cada região geográfica, que podem influenciar na determinação da radiação difusa. Esta característica é uma função do período de integração, dado em hora, dia, ano, etc. Os modelos teóricos [como, por exemplo: Bird, R. E. e Hutstrom, R. L., 1981; Brine, D. T. e Iqbal, M., 1983] muitas vezes exigem a entrada de dados geográficos, como latitude, altitude, entre outros. Assim, tanto os modelos teóricos quanto as determinações puramente experimentais devem indicar o local de realização das medidas e as condições atmosféricas.

#### 2.4.2 VARIABILIDADE TEMPORAL

A variabilidade temporal está relacionada aos diferentes ciclos nos quais é possível estabelecer um comportamento que obedece a uma certa regularidade. São exemplos de ciclos regulares da radiação solar difusa o ciclo diurno / noturno e o ciclo sazonal. A variabilidade temporal também pode ser representada pelas variações instantâneas no fluxo de radiação solar. Neste caso, a dependência de um grande número de variáveis torna muito difícil estabelecer uma regularidade de comportamento da radiação solar difusa. Os principais fatores que contribuem para acentuar tais flutuações são: o movimento solar, a turbidez atmosférica, a quantidade e o tipo de nuvens. A variabilidade temporal também afeta os sensores empregados nos instrumentos de medida da radiação solar. Os sensores de silício, por exemplo, são os mais indicados para detectar as variações instantâneas no fluxo de radiação solar, pois seu tempo de resposta é relativamente baixo, sendo estimado em 10  $\mu$ s [Michalsky et al., 1987].

#### 2.4.3 DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL

A distribuição espectral da irradiância solar difusa apresenta a maior parte da energia na região do visível. A distribuição espectral depende do tipo de espalhamento predominante e da concentração de aerossóis na atmosfera. As partículas menores espalham mais radiação do que as partículas grandes e gigantes. Assim, de modo geral, uma maior concentração destas partículas faz com que mais radiação solar seja espalhada, aumentando a contribuição da componente difusa.

Muitos modelos foram concebidos para determinar a distribuição espectral da irradiância solar em superfícies horizontais e em condições de céu limpo [Iqbal, M., 1983]. Esses modelos são empregados em diversas aplicações [Rossini, E. G. e Krenzinger, A., 2002], permitindo simular o comportamento espectral a partir de dados geográficos e de determinados parâmetros atmosféricos.

A distribuição espectral da radiação difusa também varia com a região celeste. Kondratiev, K., 1969, baseando-se nas medidas realizadas num dia de céu limpo, apresentou as curvas de distribuição espectral da radiação difusa para diferentes posições. A Figura 2.1 (a) mostra estes resultados para  $q_0 \cong 49^\circ$ , onde as posições medidas correspondem, respectivamente, ao zênite e à região celeste de menor luminosidade, localizada a uma distância angular de aproximadamente  $90^\circ$  da posição solar. A Figura 2.1 (b), mostra os resultados obtidos para as curvas de distribuição da radiação difusa, com os ângulos de azimute medidos a partir da posição solar. Neste caso, observa-se um significativo decréscimo com o aumento do ângulo de azimute.

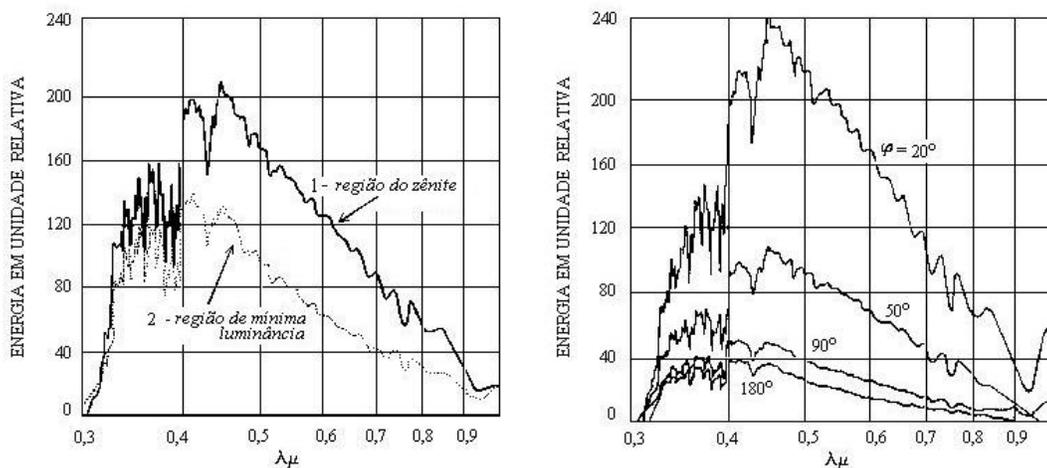


Figura 2.1 – Distribuição espectral da radiação solar difusa num dia de céu limpo: (a) em função do ângulo de Zênite, (b) em função do ângulo de azimute. Adaptado de Kondratiev, 1969, Radiation in the Atmosphere, Academic Press, New York.

#### 2.4.4 DISTRIBUIÇÃO DIRECIONAL

A distribuição de intensidade direcional da radiação difusa no hemisfério celeste depende das condições atmosféricas e da configuração do céu. Os processos que permitem determinar as regularidades na distribuição de intensidade da radiação solar difusa celeste são numerosos e interagem no processo de múltiplo espalhamento da radiação. De qualquer maneira, os aspectos

qualitativos da distribuição de intensidade direcional da radiação difusa são bem conhecidos e estão relacionados à composição atmosférica, à nebulosidade e à posição solar.

Coulson, K., 1975, estudou a intensidade da radiação celeste para diferentes tipos de atmosfera no plano principal, isto é, no plano que inclui o Sol, o zênite e o observador. Na Figura 2.2 observa-se a variação da intensidade relativa com o ângulo de zênite numa atmosfera Rayleigh com céu limpo e com zênite solar,  $\theta_{\odot} = 53,1^{\circ}$ , para diferentes comprimentos de onda e para diferentes albedos de superfície. Comprova-se o aumento da eficiência do espalhamento com o comprimento de onda. Assim, na região próxima do horizonte ocorre um significativo aumento no brilho para os maiores comprimentos de onda. Por outro lado, observa-se um escurecimento na região do horizonte para  $\lambda = 0,312 \mu\text{m}$ . Também se comprova que, numa atmosfera Rayleigh, existe dependência da distribuição angular e da intensidade da radiação difusa com albedo de superfície. A intensidade relativa aumenta com o albedo, porque uma parte da radiação incidente sofre espalhamento na direção da superfície terrestre.

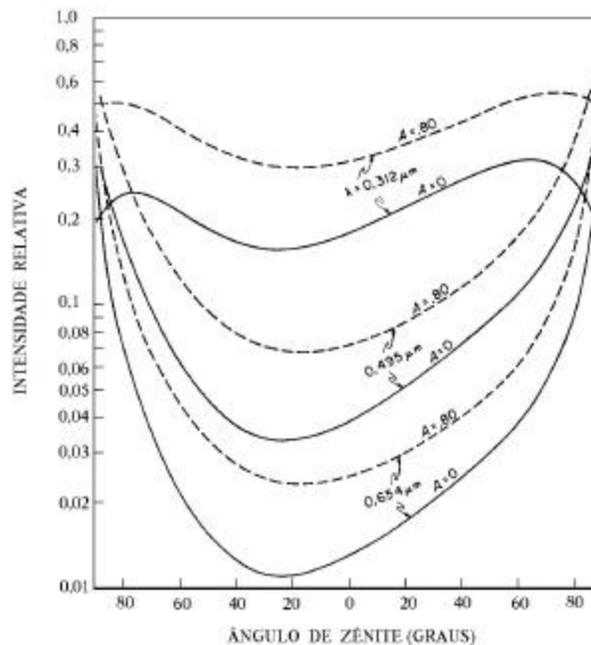


Figura 2.2 – Intensidade relativa, no plano principal, ao nível do mar, numa atmosfera Rayleigh para três comprimentos de onda ( $\lambda$ ) e dois valores de albedo ( $A$ ). Adaptado de Coulson, 1975, Solar and Terrestrial Radiation – Methods and Measurements, Academic Press, New York.

A Figura 2.3 permite comparar os perfis de radiação difusa para um céu limpo e para uma atmosfera turbida, medidos no plano principal, no comprimento de onda  $\lambda = 0,365 \mu\text{m}$ . Observa-se um significativo aumento de intensidade na região circumsolar, sendo este mais pronunciado em condições de céu limpo. Na atmosfera turbida, a região próxima do horizonte apresenta um decréscimo na intensidade da radiação difusa, causado pela poluição.

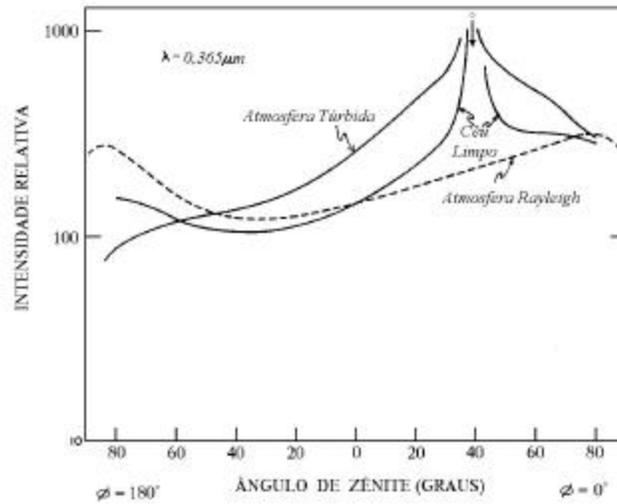


Figura 2.3 – Intensidade relativa da radiação solar, com  $\lambda = 0,365 \mu\text{m}$ , em função do ângulo de zênite no plano principal, ao nível do mar, para diferentes condições atmosféricas. Adaptado de Coulson, 1975, *Solar and Terrestrial Radiation – Methods and Measurements*, Academic Press, New York.

A composição atmosférica é importante especialmente nos modelos puramente teóricos e nas simulações [Dave, J. V., 1978], onde é possível estabelecer o tipo de partícula que define a natureza do espalhamento atmosférico. A anisotropia da distribuição direcional da radiação difusa é causada pelos processos de espalhamento Rayleigh e Mie. Numa atmosfera puramente Rayleigh não existe dependência com a posição solar. Por outro lado, numa atmosfera Mie, a curva de distribuição de intensidade direcional tem um máximo na posição do disco solar e um mínimo localizado a  $90^\circ$  desta região.

A determinação da nebulosidade geralmente é mais importante para o estabelecimento de modelos semi-empíricos [Harrison, A. W., 1991; Perez, R. et al., 1993 (b)]. Entretanto, qualquer que seja a natureza do modelo, deve-se considerar que a máxima anisotropia ocorre em céus parcialmente nublados [Siala et al., 1990]. O céu limpo tem uma curva de distribuição que pode ser aproximada, de forma qualitativa, ao modelo de atmosfera Mie. Por outro lado, o céu encoberto pode ser aproximado ao modelo de distribuição isotrópica.

A distribuição de intensidade direcional da radiação difusa celeste é importante para o desenvolvimento de muitas pesquisas nas diferentes áreas da energia solar. Para os propósitos deste trabalho, é conveniente citar três aplicações com enfoque na área de radiação solar: a otimização de projetos para construção de concentradores não formadores de imagem; o estudo da irradiância solar incidente em superfícies inclinadas e o máximo aproveitamento da luz do dia e da radiação solar em interiores.

A estimativa da distribuição de intensidade direcional é indispensável para certos tipos de concentradores que abrangem uma grande parte [Suzuki, A. e Kobayashi, S., 1995] ou a totalidade do hemisfério celeste [Dominguez, J., 1985]. Nestes casos a componente difusa corresponde a uma fração de energia considerável, tornando-se indispensável o conhecimento de sua distribuição no hemisfério celeste.

A irradiância incidente em superfícies inclinadas pode ser estimada em função da irradiância solar difusa incidente em superfícies horizontais [Olmo, F. J. et al., 1998]. Por outro lado, muitos modelos simplificados de distribuição de intensidade direcional foram desenvolvidos especialmente com este propósito [Siala, F. M. et al., 1990].

O máximo aproveitamento da luz do dia em interiores está relacionado às medidas fotométricas que podem ser traduzidas pela distribuição de luminância no hemisfério celeste. De acordo com a literatura [Kittler, R., 1994; Perez et al., 1987; entre outros], as distribuições de luminância e de radiância são quase idênticas. Kittler, R. and Valko, P., 1993 comparam a distribuição de intensidade com o padrão de luminância (*CIE*) em condições de céu encoberto. Assim, existe um interesse mútuo entre as considerações fotométricas e energéticas.

## 2.5 MODELOS DE DISTRIBUIÇÃO DE INTENSIDADE DIRECIONAL DA RADIAÇÃO DIFUSA CELESTE

A intensidade direcional da radiação difusa,  $i_d$ , e sua distribuição no hemisfério celeste pode ser determinada tanto por modelos teóricos e semi-empíricos, quanto por técnicas experimentais. Normalmente, as análises puramente teóricas apresentam hipóteses simplificadoras que permitem descrever de forma adequada o complicado fenômeno do espalhamento e da distribuição direcional da radiação difusa. Os valores obtidos nos modelos teóricos, muitas vezes, servem como parâmetro de comparação para as análises experimentais. Por outro lado, as técnicas experimentais desenvolvidas neste tipo de trabalho são dificultadas pela grande variabilidade da radiação solar. De qualquer modo, para uma melhor compreensão destes modelos é fundamental ter em mente a geometria de interceptação da radiação difusa na superfície terrestre que envolve o conhecimento da inclinação da superfície, da direção da superfície e de sua localização geográfica. A Figura 2.4 mostra uma situação de especial interesse para o hemisfério Sul, representada pela geometria de interceptação da radiação difusa numa superfície inclinada para o Norte.

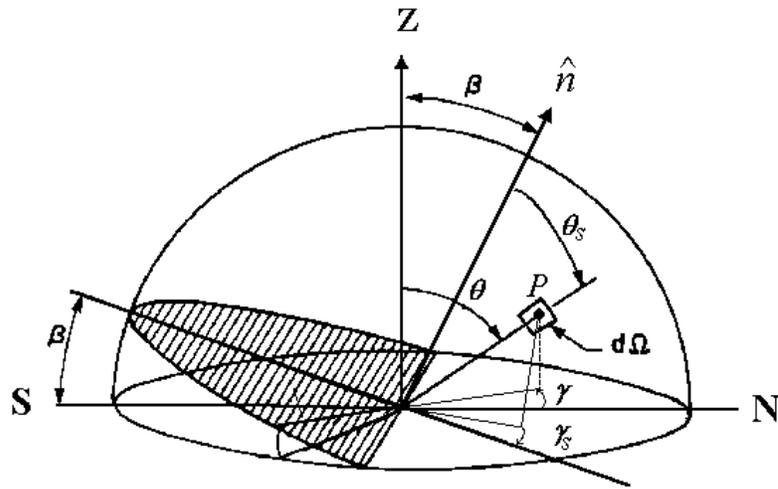


Figura 2.4 – Geometria de interceptação da radiação difusa celeste para uma superfície com inclinação  $\mathbf{b}$  e orientação Norte, localizada no Hemisfério Sul.

Qualquer ponto,  $P$ , pertencente ao hemisfério celeste é localizado pela determinação de apenas dois ângulos: o ângulo de zênite,  $\mathbf{q}$  e o ângulo de azimute em relação à superfície inclinada,  $\mathbf{g}$ . No exemplo da Figura 2.4, determina-se o ângulo de zênite de  $P$ , pela equação:

$$\mathbf{q} = \cos^{-1}(\cos \mathbf{q}_s \cdot \cos \mathbf{b} - \text{sen } \mathbf{q}_s \cdot \text{sen } \mathbf{g}_s \cdot \cos \mathbf{b}) \quad (2.11)$$

onde  $\mathbf{q}_s$  é o ângulo de incidência, sendo o ângulo de azimute dado por:

$$\mathbf{g} = \text{sen}^{-1}\left(\frac{\text{sen } \mathbf{g}_s \cdot \text{sen } \mathbf{q}_s}{\text{sen } \mathbf{q}}\right) \quad (2.12)$$

onde  $\mathbf{q}_s$  é o ângulo de incidência;  $\mathbf{b}$  é o ângulo de inclinação da superfície, e  $\mathbf{g}_s$  é o ângulo de azimute relativo à superfície inclinada.

A irradiância monocromática que parte de um elemento de área da superfície celeste, centrado no ponto  $P$ , e atinge uma superfície, é calculada pela equação:

$$dI_{abl} = i_{aI} \cdot \cos \mathbf{q}_s \cdot \text{sen } \mathbf{q}_s d\mathbf{q}_s d\mathbf{g}_s d\mathbf{l} \quad (2.13)$$

onde  $i_{aI}$  é a intensidade da radiação difusa monocromática e  $\mathbf{l}$  é o comprimento de onda da radiação incidente.

A irradiância difusa incidente na superfície é obtida integrando-se a Equação (2.13) para todo o hemisfério e para todos os comprimentos de onda, isto é,

$$I_{d\mathbf{b}} = \int_0^{\infty} \int_0^{2\mathbf{p}} \int_0^{\frac{\mathbf{p}}{2}} i_{d\mathbf{l}} \cdot \cos \mathbf{q}_s \cdot \sin \mathbf{q}_s d\mathbf{q}_s d\mathbf{g}_s d\mathbf{l} \quad (2.14)$$

A seguir são discutidos alguns exemplos de modelos de distribuição de intensidade da radiação difusa celeste. Ainda nesta seção, discutem-se alguns exemplos de modelos não direcionais. São estudos de natureza teórica e semi-empírica, geralmente aplicados à estimativa da irradiância incidente em superfícies inclinadas. Normalmente estes modelos permitem calcular a intensidade da radiação difusa,  $i_d$ , e a irradiância incidente na superfície inclinada  $I_{d\mathbf{b}}$  em função da irradiância difusa horizontal,  $I_d$ .

### 2.5.1 MODELO DE DISTRIBUIÇÃO ISOTRÓPICA

O modelo isotrópico é determinado, considerando-se que a radiação se distribui de modo uniforme em todo o hemisfério celeste. Neste modelo, a intensidade da radiação difusa, é calculada pela equação:

$$i_d = \frac{I_d}{\mathbf{p}} \quad (2.15)$$

Neste caso, não existe dependência direcional. A irradiância difusa,  $I_{iso\mathbf{b}}$  incidente numa superfície de inclinação  $\mathbf{b}$ , é calculada integrando-se a equação (2.14), onde a intensidade tem seu valor determinado pela Equação (2.15). Assim, obtém-se:

$$I_{iso\mathbf{b}} = I_d \left( \frac{1 + \cos \mathbf{b}}{2} \right) \quad (2.16)$$

A distribuição de intensidade direcional monocromática da radiação difusa pode ser obtida teoricamente pela solução das equações de transferência radiativa em condições isotrópicas, para um modelo simplificado de atmosfera [Chandrasekhar, S., 1960].

Dave, J. V., 1977, empregou um modelo de simulação numérica para determinar as componentes direta e difusa da radiação solar que atravessa uma superfície voltada para o Sol, numa atmosfera homogênea, plano paralela e não absorvedora. O fluxo de radiação difusa que atravessa uma superfície com a face voltada para o Sul (Hemisfério Norte) é calculado em função de parâmetros ópticos e direcionais. Uma série de análises demonstram que o modelo de distribuição isotrópica subestima os valores de irradiância incidentes em superfícies inclinadas para o Sul. A Figura 2.5 mostra a variação da intensidade direcional da radiação difusa celeste com o ângulo de incidência, para atmosferas Rayleigh e Mie de espessura óptica  $t_b = 0,1$  e com ângulo de zênite solar,  $q_0 = 40^\circ$ . No modelo de atmosfera Rayleigh, empregado por Dave, observa-se que ocorre um aumento da intensidade para ângulo de incidência,  $q$  entre  $60^\circ$  e  $90^\circ$ . Este comportamento se deve ao aumento da massa de espalhamento com a inclinação do caminho óptico, percorrido pela radiação solar. Por outro lado, no modelo de atmosfera Mie ocorre um pico na região circumsolar.

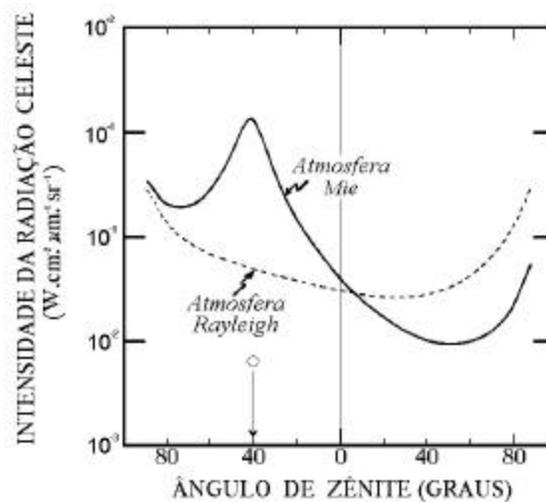


Figura 2.5 – Variação da intensidade da radiação difusa celeste ( $\text{W.cm}^{-2}.\text{sr}^{-1}$ ) em função do ângulo de zênite para diferentes tipos de atmosfera. Adaptado de Dave, J. V., 1977.

Dave, J. V., 1978, estudou o comportamento de cinco modelos atmosféricos, calculados a partir de um amplo conjunto de dados. Os modelos são determinados numa atmosfera plano paralela, por parâmetros como: o tipo de espalhamento atmosférico, a absorção, composição atmosférica, etc. Os modelos 1 e 2 são livres de aerossóis (atmosfera Rayleigh) com distintas composições atmosféricas. Os modelos 3, 4 e 5 apresentam a mesma massa total de aerossóis numa coluna atmosférica, diferindo por conter aerossóis de distintos tamanhos e distribuições. Os resultados demonstram que a intensidade direcional da radiação difusa é também uma função da composição atmosférica.

Dentre as muitas análises apresentadas pelo autor, destaca-se o gráfico  $i_d \times \mathbf{q}$  que apresenta os valores de intensidade da radiação difusa obtidos com a variação do ângulo de zênite, para um ângulo de zênite solar,  $\mathbf{q}_0 = 30^\circ$ , e para um ângulo de azimute solar,  $\mathbf{g}_0 = 5^\circ$ , no comprimento de onda,  $\mathbf{I} = 0,595 \mu\text{m}$ . De acordo com a Figura 2.6, observa-se que os modelos 1 e 2 tem comportamento semelhante, identificados por um aumento gradual do ângulo de zênite entre  $0^\circ$  e  $60^\circ$ , e um aumento acentuado entre  $60^\circ$  e  $90^\circ$ , justificado pelo aumento da massa de espalhamento. A pequena diferença entre esses modelos ocorre devido à absorção pelo ozônio nesse comprimento de onda. Na presença de aerossóis, modelos 3 a 5, observa-se um pico na região da posição solar,  $\mathbf{q}_0 = 30^\circ$ . O pico é mais acentuado no modelo 5, que contém as maiores partículas de aerossóis.

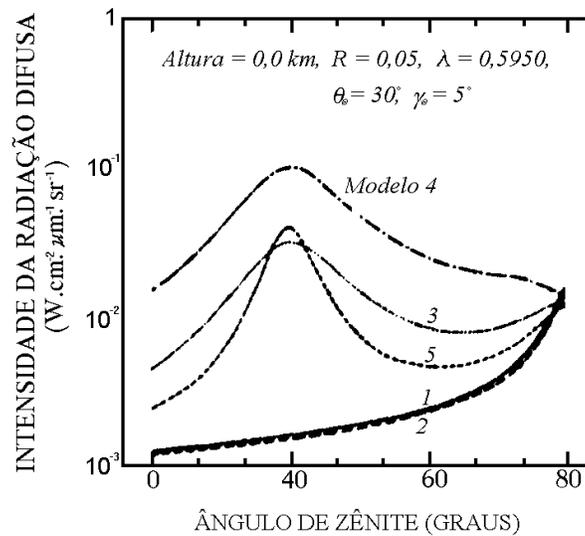


Figura 2.6 – Variação da intensidade da radiação difusa celeste ( $\text{W.cm}^{-2}.\mu\text{m.sr}^{-1}$ ) em função do ângulo de zênite para diferentes modelos de atmosfera. Adaptado de Dave, J. V., 1978.

### 2.5.2 MODELO DE TEMPS E COULSON

Temps, R. C. e Coulson, K. L., 1977, aperfeiçoaram o modelo isotrópico, introduzindo dois termos na Equação (2.16) para representar o aumento da intensidade direcional da radiação difusa celeste nas regiões do horizonte e nas proximidades da posição solar. A equação obtida é dada por:

$$I_{db} = I_{iso} \cdot \left( 1 + \text{sen}^3 \left( \frac{\mathbf{b}}{2} \right) \right) \cdot \left( 1 + \cos^2 \mathbf{q}_s \cdot \text{sen}^3 \mathbf{q} \right) \quad (2.17)$$

onde o aumento de  $i_d$  na região do horizonte é representado pelo primeiro termo entre parêntesis, enquanto que o aumento na região próximo à posição solar é representado pelo segundo termo entre parêntesis.

### 2.5.3 MODELO DE PEREZ

O modelo semi-empírico proposto por Perez, R. et al., 1987 (b)<sup>2</sup> também inclui termos para representar os aumentos da intensidade da radiação difusa na região do horizonte e nas proximidades do disco solar. A irradiância solar difusa incidente numa superfície inclinada é calculada pela equação:

$$I_{db} = I_d \cdot \left[ I_{iso} \cdot (1 - F_1) + F_1 \left( \frac{\cos \mathbf{q}_s}{\cos \mathbf{q}_0} \right) + F_2 \operatorname{sen} \mathbf{b} \right] \quad (2.18)$$

onde os coeficientes  $F_1$  e  $F_2$  são calculados pelas seguintes equações empíricas:

$$F_1 = F_{11}(\mathbf{e}) + F_{12}(\mathbf{e}) \cdot \mathbf{D} + F_{13}(\mathbf{e}) \cdot \mathbf{q}_0 \quad (2.19)$$

$$F_2 = F_{21}(\mathbf{e}) + F_{22}(\mathbf{e}) \cdot \mathbf{D} + F_{23}(\mathbf{e}) \cdot \mathbf{q}_0 \quad (2.20)$$

com valores tabelados de  $F_{ij}$ ,  $i=1... 3$ ;  $j=1... 3$  e  $\epsilon$  e  $\Delta$  dados pelas respectivas equações:

$$\mathbf{D} = m_r \cdot \left( \frac{I_d}{I_{0n}} \right) \quad (2.21)$$

$$\mathbf{e} = \frac{(I_d + I_{Dn})}{I_d} \quad (2.22)$$

onde  $I_{0n}$  é a irradiância solar normal extraterrestre e  $I_{Dn}$  é a irradiância solar direta normal. O modelo de Perez é largamente empregado [Remund, J. et al., 1998], sendo testado em diversos trabalhos [Utrillas, M. P. e Martinez-Lozano, J. A., 1994].

<sup>2</sup> Este autor tem um grande número de contribuições no estabelecimento de modelos de irradiância difusa em superfícies inclinadas. Uma evolução histórica do Modelo de Perez é apresentada em Utrillas, M. P. e Martinez-Lozano, J. A., 1994. Perez, R. também estabeleceu modelos para determinação da distribuição de luminância no hemisfério celeste.

#### 2.5.4 MODELO DAS TRÊS COMPONENTES DISCRETAS DE RADIÂNCIA (TDRC)

Rosen, M. A., 1992, desenvolveu o modelo *TDRC*, que envolve uma expressão para considerar o efeito de termos transientes na distribuição instantânea de radiância difusa. Neste modelo, a intensidade da radiação difusa é dividida em três componentes, sendo aplicável para diferentes condições de nebulosidade. A componente dita *limpa* inclui apenas a radiação proveniente das regiões desprovidas de nuvens e sem interação com qualquer nuvem presente no hemisfério celeste. A componente *espalhada* considera a radiação que tem origem nas regiões formadas por partes visíveis de nuvens que não são atingidas pela componente direta da radiação solar. Finalmente, a componente *refletida* abrange somente a radiação vinda das regiões formadas pelas partes visíveis das nuvens que são atingidas pela componente direta da radiação solar. Num dado instante, a intensidade direcional da radiação difusa é calculada pela seguinte equação:

$$i_d(\mathbf{q}, \mathbf{g}, t) = i_{id}(\mathbf{q}, \mathbf{g}) \quad (2.23)$$

com o subíndice  $i = 1, 2, 3$  representando as componentes *limpa*, *espalhada* e *refletida*, respectivamente. A distribuição média de intensidade no céu é dada por:

$$\bar{i}_d(\mathbf{q}, \mathbf{g}) = \sum_{i=1}^3 i_{di}(\mathbf{q}, \mathbf{g}) \cdot x_i(\mathbf{q}, \mathbf{g}) \quad (2.24)$$

onde  $x_i$  indica um fator geométrico que representa a fração de tempo no qual é considerada a componente de intensidade média na posição  $(\mathbf{q}, \mathbf{g})$ . O *TDRC* é calibrado a partir de um modelo de geometria de céu nublado, para avaliar o fator geométrico  $x_i$ . A intensidade direcional da radiação difusa de cada componente é calculada por:

$$i_{di}(\mathbf{q}, \mathbf{g}) = A_1 + A_2 \left( \frac{2\mathbf{q}}{\mathbf{p}} \right)^{A_4} + A_3 \exp(A_5 \mathbf{Q}) \quad (2.25)$$

onde  $\mathbf{Q}$  é o ângulo entre a posição observada e a posição solar;  $A_1, A_2, A_3, A_4$  e  $A_5$  são parâmetros determinados empiricamente.

Rosen verificou a validade do modelo para diferentes condições de céu, empregando um sistema de aquisição composto por uma câmera fotográfica equipada com uma lente “olho-de-

peixe”, que tem um ângulo de visão de  $180^\circ$ . O modelo é calibrado pela análise de fotografias do hemisfério celeste que, junto com cálculos estatísticos, permitiram determinar os valores médios dos fatores geométricos,  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$ . Cada fotografia é superposta a duas malhas: uma para determinar a quantidade de nuvens, e outra para estimar os valores dos fatores geométricos.

Para validar o modelo *TDRC*, o autor comparou as distribuições de intensidade com dados medidos de luminância média relativa para  $q_0 = 70^\circ$ . Este procedimento foi adotado pela falta de dados disponíveis de intensidade. A Figura 2.7 mostra a distribuição de radiância difusa ( $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ ) em função do ângulo de zênite para diferentes condições de nebulosidade. Os valores calculados pelas equações do modelo *TDRC* fornecem uma distribuição de intensidade da radiação difusa que concorda qualitativamente com a distribuição de luminância média relativa obtida a partir de valores medidos. Observa-se que em condições de céu limpo, o máximo valor de intensidade ocorre próximo ao disco solar, enquanto que os menores valores são obtidos na região localizada a  $90^\circ$  da posição solar no plano vertical que contém a direção dos raios solares. Com o aumento da nebulosidade, observa-se uma menor dependência da posição solar. Finalmente, quando o céu encontra-se encoberto o maior valor de intensidade é obtido próximo à região do zênite.

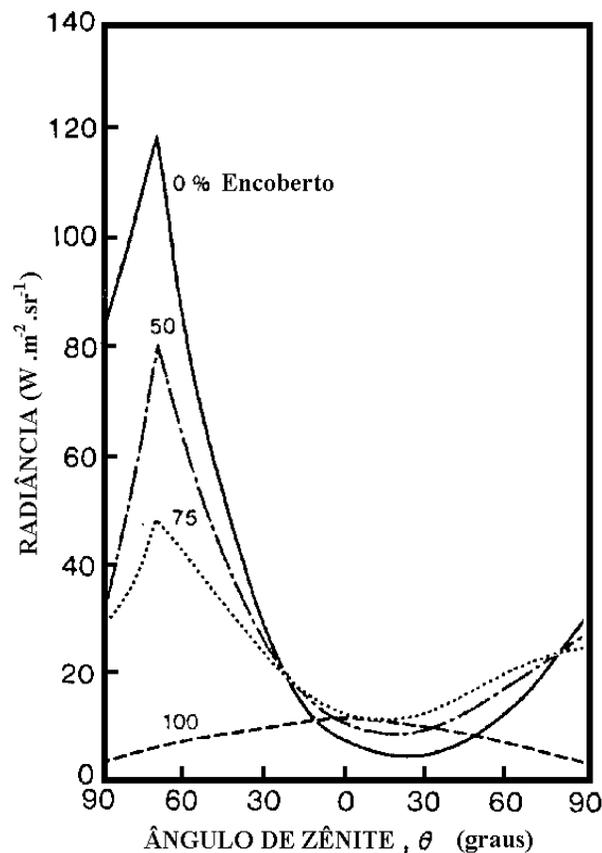


Figura 2.7 – Distribuição da intensidade da radiação difusa celeste no modelo *TDRC* para a posição solar  $q_0 = 70^\circ$  em diferentes condições de nebulosidade. Adaptado de Rosen, 1992.

## 2.6 TÉCNICAS PARA A DETERMINAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE RADIÂNCIA SOLAR DIFUSA NO HEMISFÉRIO CELESTE

Além dos modelos teóricos e semi-empíricos, um grande número de pesquisas tratam do desenvolvimento de experimentos capazes de fornecer um mapeamento da distribuição de radiância solar difusa em todo o hemisfério celeste [McArthur, L. B. e Hay, J. E., 1980; Combes, C. A. e Harrison, A. W., 1982; entre outros]. Estas técnicas são estabelecidas por meio de instrumentos com ângulo de visão reduzido que realizam medidas em diferentes regiões do céu. Por esta razão, os modelos desenvolvidos a partir desta técnica são chamados de modelos direcionais.

Kondratiev, K., 1969, apresentou mapas que permitem comparar as distribuições de intensidade relativa energética e luminosa da radiação difusa. O trabalho demonstra a boa concordância existente entre estas duas distribuições. Os dados foram obtidos a partir de medidas realizadas com um piranômetro Yanishevsky e com uma célula de selênio. Os instrumentos empregados contavam com um tubo de entrada, cujo diâmetro angular limitava as medidas a um ângulo sólido de  $10^\circ$ . Nestes mapas, a intensidade da radiação no Zênite corresponde à unidade.

A Figura 2.8 (a) mostra a distribuição obtida na condição de céu limpo, para  $q_0 = 51^\circ$  no dia 27 de junho de 1953 na cidade de Karadag.

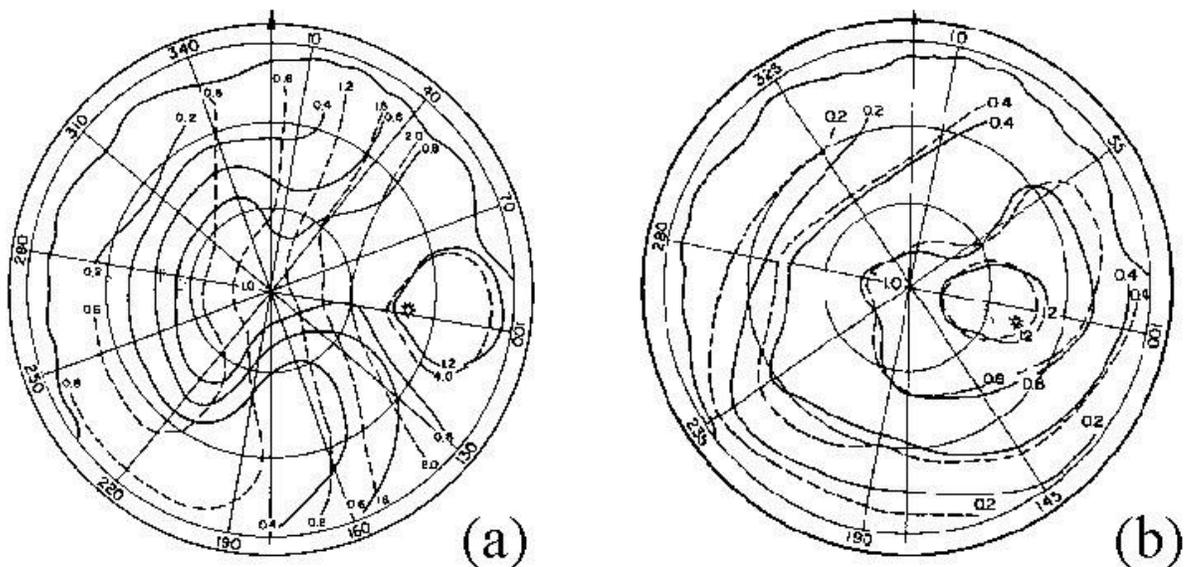


Figura 2.8 – Mapa da distribuição de intensidade relativa energética e luminosa: (a) em condições de céu limpo para  $q_0 = 51^\circ$  e (b) em condições de céu coberto para  $q_0 = 42^\circ$ . Adaptado de Kondratiev, K., 1969.

Observa-se o significativo aumento na intensidade de radiação na região circunsolar. Na região próxima ao horizonte também se observa um aumento na intensidade de radiação. A mínima intensidade, na vertical solar, é obtida a uma distância angular de  $90^\circ$  do Sol. Por outro lado, não se observa uma boa coincidência entre as distribuições de intensidade energética e luminosa. De acordo com o autor, as diferenças diminuem para menores ângulos de Zênite solar, tornando-se insignificantes para  $q_0 = 26^\circ$ . A Figura 2.8 (b) mostra o mapa obtido com o céu quase completamente coberto por estratos cúmulos, ou seja, um céu encoberto não opaco com o ângulo de zênite solar,  $q_0 = 42^\circ$ . Neste caso observa-se uma melhor coincidência entre as distribuições de intensidade de radiação energética e luminosa.

De acordo com a literatura [McArthur, L. B. e Hay, J. E., 1980 entre outros], uma das limitações dos trabalhos que empregam a varredura do hemisfério celeste através de medidas actinométricas é o tempo de resposta destes equipamentos. Para solucionar este problema McArthur, L. B. e Hay, J. E., 1981, desenvolveram uma técnica que permitiu o mapeamento instantâneo da distribuição da radiação difusa, empregando fotografias juntamente com medidas de intensidade. A utilização de fotografias é justificada pela boa concordância existente entre as distribuições energética e fotométrica. Sua utilização tem por objetivo superar o problema do tempo de resposta, associado à variabilidade temporal da radiação difusa. No entanto, esta técnica exige um processo de calibração fotográfica para diferentes condições de nebulosidade.

As observações foram realizadas durante 3 h, cobrindo diversas condições atmosféricas, amostradas por um conjunto de 21 dados. Cada conjunto de dados consiste de 21 medidas de intensidade, realizadas com um actinômetro (pireliômetro) Linke Feussner e três fotografias do hemisfério celeste. O conjunto de dados analisado foi medido no dia 3 de Fevereiro de 1978 na cidade de Vancouver ( $49^\circ 15' N$ ,  $123^\circ 15' W$ ), Canadá. A aquisição de cada conjunto de dados é completada em, aproximadamente, 14 min.

Os autores verificaram a validade do trabalho, analisando mapas de distribuição da intensidade celeste na condição de céu limpo. A Figura 2.9 mostra dois destes mapas. Observa-se que para  $q_0 = 61^\circ$  existe uma isolinha circunsolar contínua; por outro lado, para  $q_0 = 67^\circ$  o aumento do espalhamento da radiação causado pela elevada massa óptica domina o espalhamento dentro da região circunsolar. Além disso, com o aumento do ângulo de Zênite, a intensidade da radiação difusa vinda da região próxima do horizonte corresponde a uma fração significativa da irradiância solar difusa.

A Figura 2.10 mostra um exemplo de distribuição de intensidade ( $W.m^2.sr^{-1}$ ) produzida a partir de um negativo fotográfico, para a condição de céu parcialmente nublado. Pode-se ter uma idéia da complexidade envolvida neste tipo de configuração do céu.

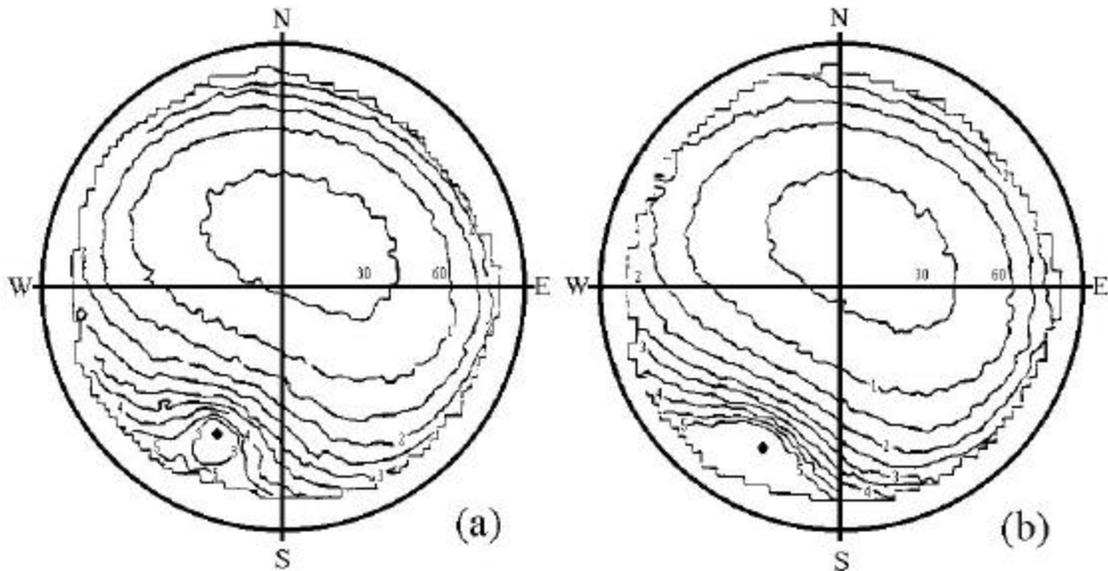


Figura 2.9 – Mapas de distribuição de intensidade normalizada em condições de céu limpo para: (a)  $q_0 = 61^\circ$  e (b)  $q_0 = 67,6^\circ$ . Adaptado de McArthur, L. B. e Hay, J. E., 1981.

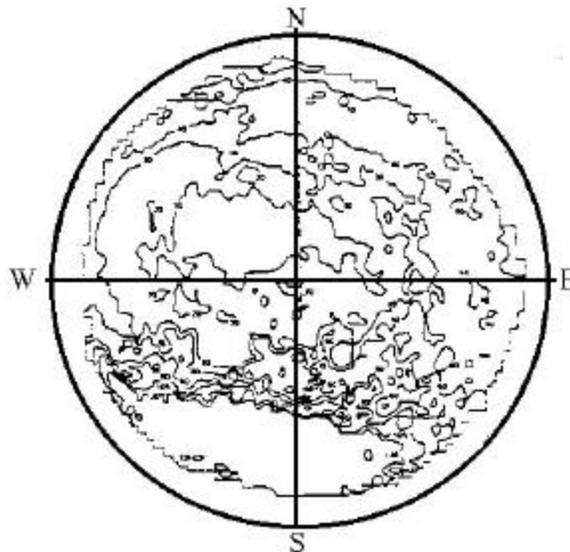


Figura 2.10 – Mapas de distribuição de intensidade normalizada num céu parcialmente nublado com  $q_0 = 64,5^\circ$ . Adaptado de McArthur, L. B. e Hay, J. E., 1981.

Coombes, C. A. e Harrison, A. W., 1982, desenvolveram um radiômetro de varredura, baseado num detector pireliométrico, construído para permitir medidas automáticas de radiância celeste e terrestre. O equipamento é capaz de realizar uma varredura completa em 8 min, para comprimentos de ondas curtas, de  $0,3 \mu\text{m}$  a  $3 \mu\text{m}$ , e longas, de  $3 \mu\text{m}$  a  $80 \mu\text{m}$ . O sistema experimental emprega um microcomputador programado para controlar a duração das medidas e a posição solar.

Harrison, A. W. e Coombes, C. A., 1988, empregaram o radiômetro de varredura para produzir mapas de contorno da intensidade da radiação difusa em condições de céu limpo. Todas as medidas pertencem à banda de comprimentos de onda entre 0,3  $\mu\text{m}$  a 3  $\mu\text{m}$ . A cada nova medida, o radiômetro, que tem um campo de visão de 0,0025 sr, aponta para o disco solar e realiza a medida da componente direta; seguem-se as medidas de radiância difusa celeste. Em cada varredura completa, as posições do hemisfério celeste são medidas em deslocamentos de 15° do ângulo de azimute solar,  $g_q$  nos ângulos de zênite,  $q_q = 0^\circ, 16^\circ, 32^\circ, 49^\circ, 66^\circ$  e  $83^\circ$ . Ao todo são analisadas 3000 varreduras, cada uma contendo dados de 121 direções do hemisfério celeste. A leitura do conjunto de dados é controlada por um microcomputador, sendo completada em 12 min. As medidas são tomadas, ao longo do dia, a cada 20 min. O trabalho experimental é realizado numa localidade rural a 25 km da cidade de Calgary (51° N, 114° W), Canadá. Os mapas de contorno mostram que a mínima intensidade ocorre, aproximadamente, entre 90° e 110° do Sol. As isolinhas circulares são observadas para os menores ângulos de Zênite. A Figura 2.11 mostra mapas de contorno para  $q_q = 80^\circ$  e para  $q_q = 32^\circ$ , que correspondem aos extremos das medidas realizadas pelos autores. Como esperado, no primeiro caso, a região circunsolar é bem definida, apresentando uma série de contornos circunsolares; por outro lado, próximo ao poente, a região circunsolar é menos marcante.

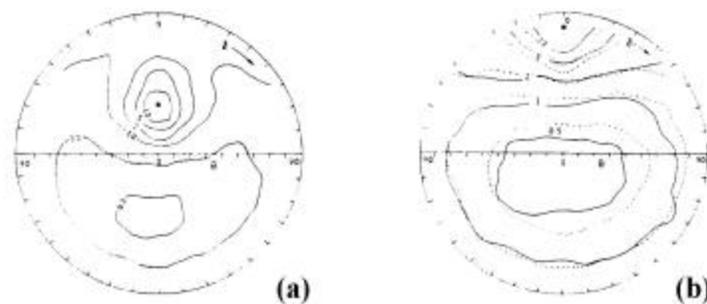


Figura 2.11 – Mapas de contorno da distribuição de intensidade normalizada em condições céu limpo para: (a)  $q_q = 32^\circ$  e (b)  $q_q = 80^\circ$ . Adaptado de Harrison, A. W. e Coombes, C. A., 1988.

Os autores sugerem uma expressão que permite determinar a intensidade direcional normalizada,  $\bar{i}_d$ , em função do ângulo de espalhamento,  $\mathbf{y}$ .

$$\bar{i}_d = (a_{0ic} + a_{1ic} e^{-m_1 \mathbf{y}} + a_{2ic} \cos^2 \mathbf{y} \cos q_q) \cdot (1 - e^{-x_1 \sec q}) \cdot (1 - e^{-x_2 \sec q_q}) \quad (2.26)$$

onde  $\mathbf{x}_1$  e  $\mathbf{x}_2$  são coeficientes de espalhamento. As constantes empíricas têm os seguintes valores propostos:  $a_{0ic} = 1,63$ ;  $a_{1ic} = 53,7$ ;  $a_{2ic} = 2,04$ .

O ângulo de espalhamento,  $\mathbf{y}$ , é dado pela equação:

$$\mathbf{y} = \cos^{-1}(\sin \mathbf{q} \sin \mathbf{q}_0 \cos \mathbf{g} + \cos \mathbf{q} \cos \mathbf{q}_0) \quad (2.27)$$

Coombes, C. A. e Harrison, A. W., 1988, empregaram o mesmo instrumento para estudar a distribuição de radiância difusa em condições de céu encoberto. O trabalho tem por base 1438 varreduras, cada uma contendo amostras de 95 direções do hemisfério celeste. As medidas de onda curta foram realizadas da seguinte maneira: (a) no zênite do hemisfério celeste; (b) em intervalos de 15° do ângulo de azimute solar,  $\mathbf{g}$  para  $\mathbf{q}_0 = 83^\circ, 66^\circ$  e  $49^\circ$ ; (c) em intervalos de 30° de  $\mathbf{g}$  para  $\mathbf{q}_0 = 32^\circ$ ; (d) em intervalos de 45° para e  $\mathbf{q}_0 = 16^\circ$ .

Nestas condições, para calcular intensidade direcional normalizada da radiação difusa celeste, em função do ângulo de espalhamento, os autores propõem a seguinte expressão.

$$\bar{i}_d = a_{0io} + a_{1io} \mathbf{q}_0 + a_{2io} \cos \mathbf{q} + a_{3io} \exp[-a_{4io} \mathbf{y}] \quad (2.28)$$

onde as constantes empíricas são:  $a_{0io} = 0,45$ ;  $a_{1io} = 0,12$ ;  $a_{2io} = 0,43$ ;  $a_{3io} = 0,72$  e  $a_{4io} = 1,88$ .

Os autores observaram uma dependência sistemática entre a distribuição de intensidade e a posição solar. Qualitativamente conclui-se que, nestas condições, a intensidade é formada por três componentes: (a) uma componente isotrópica que aumenta linearmente com o ângulo de zênite solar; (b) um termo de escurecimento do horizonte que depende do co-seno do ângulo de zênite da posição celeste; (c) uma componente circumsolar que decresce exponencialmente com o aumento da distância angular do Sol. A Figura 2.12 mostra os mapas de contorno para  $\mathbf{q}_0 = 30^\circ$  e para  $\mathbf{q}_0 = 80^\circ$ , apresentando a comparação entre os valores de intensidade relativa média e os valores calculados.

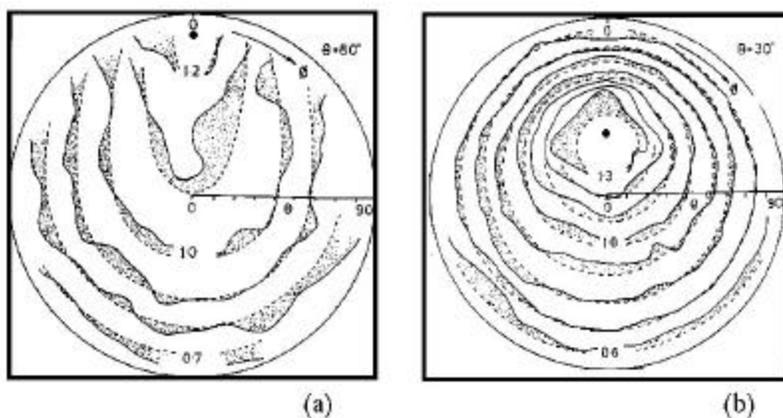


Figura 2.12 – Mapas da distribuição de intensidade normalizada para céus encobertos não-opacos: (a)  $\mathbf{q}_0 = 30^\circ$  e (b)  $\mathbf{q}_0 = 80^\circ$ . Adaptado de Coombes, C. A. e Harrison, A. W., 1988.

Brunger, A. P. e Hooper, F. C., 1993, desenvolveram um modelo que permite determinar a intensidade direcional da radiação difusa celeste em função da posição solar ( $\theta_M, \gamma_M$ ) da fração difusa,  $k$ , e do índice de limpeza,  $k_t$ . Os autores utilizaram um conjunto de aproximadamente 90000 medidas, realizadas por meio de um instrumento com campo de visão reduzido. A incerteza associada a cada medida de intensidade direcional é de  $\pm 5 \text{ W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1} + 5 \%$  da leitura. Todas as medidas foram realizadas na Universidade de Toronto (43°40') sob a responsabilidade do *Atmospheric Environment Service* - Canadá.

A Figura 2.13 mostra a fotografia do sistema experimental que permite medir a intensidade direcional da radiação difusa, além de outros dados, como a irradiância difusa horizontal e a irradiância difusa normal.

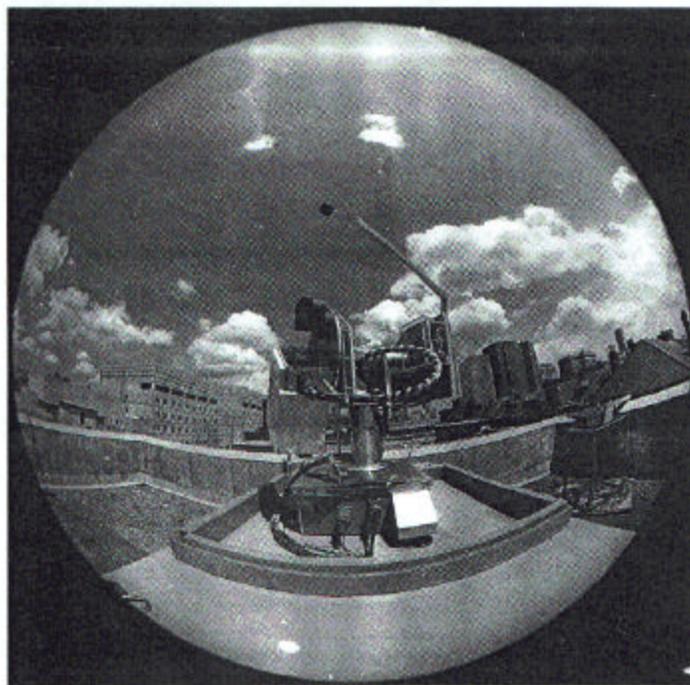


Figura 2.13 – Fotografia grande angular do sistema experimental. Adaptado de Brunger, A. P. e Hooper, F. C., 1993.

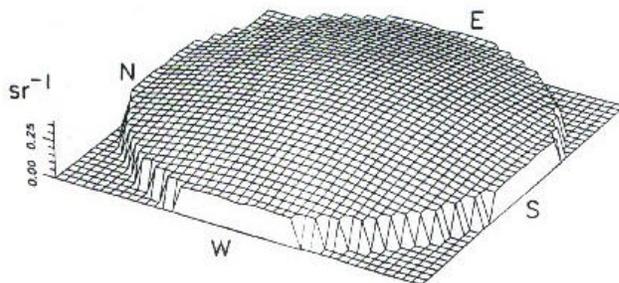
A expressão proposta pelos autores é estabelecida a partir de considerações geométricas simples, sendo fundamentada nas características qualitativas da distribuição de radiância difusa celeste.

$$i_d = I_d \cdot \left[ \frac{a_0 + a_1 \cos \mathbf{q} + a_2 \exp(-a_3 \mathbf{y})}{\mathbf{P} \left( a_0 + \frac{2}{3} \cdot a_1 \right) + 2a_2 F} \right] \quad (2.29)$$

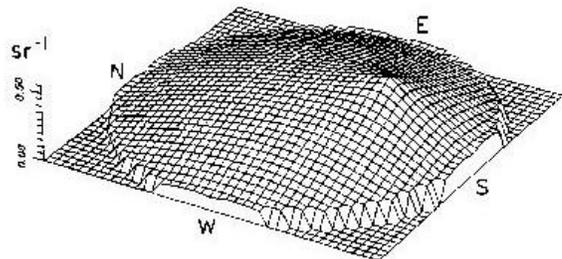
Nesta equação, a intensidade direcional na região circunsolar é representada por um decaimento exponencial, para representar a forte dependência com a distância angular; o efeito de brilho ou escurecimento na região do horizonte é representado pela função co-seno; uma constante é utilizada para representar o nível de brilho de todo o hemisfério celeste. Todos os ângulos são expressos em radianos. Os parâmetros empíricos  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  e  $a_4$  são tabelados enquanto que  $F$  é calculado pela expressão<sup>3</sup>:

$$F = \frac{\left[ 1 + \exp\left(-\frac{\mathbf{p}}{2} a_3\right) \right]}{(a_3^2 + 4)} \times \mathbf{p} - \left[ 1 - \frac{2[1 - \exp(-a_3 \mathbf{p})]}{\mathbf{p}_3 \left[ 1 + \exp\left(-\frac{\mathbf{p}}{2} a_3\right) \right]} \right] \times [2\mathbf{q}_0 \text{sen}\mathbf{q}_0 - 0,002\mathbf{p} \text{sen}(2\mathbf{q}_0)] \quad (2.29)$$

Os autores apresentam gráficos polares em 3D, com exemplos de distribuição de intensidade normalizadas em diferentes condições de céu. A Figura 2.14 mostra os resultados obtidos em condições de céu encoberto, onde a distribuição de intensidade direcional é obtida para diferentes valores do índice de claridade,  $k_t$ , e da fração da radiação difusa,  $k$ . Assim, em 2.13 (a)  $k_t = 0,75$  e  $k = 0,25$ , e em 2.13 (b)  $k_t = 0,55$  e  $k = 0,55$ . Observa-se que no céu encoberto opaco não existe dependência com a posição solar. Por outro lado, na condição de céu encoberto não-opaco a região próxima ao disco solar apresenta um aumento na distribuição de intensidade direcional relativa, evidenciando que existe uma fraca dependência com a posição solar.



**CÉU ENCOBERTO OPACO**



**CÉU ENCOBERTO NÃO-OPACO**

Figura 2.14 – Distribuição de intensidade normalizada em diferentes condições de nebulosidade. Adaptado de Brunger, A. P. e Hooper, F. C., 1993.

<sup>3</sup> A equação (2.29) é escrita conforme errata publicada pelos autores: Brunger, A. P. e Hooper, F. C., 1993 (b).

## 2.7 MODELOS DE LUMINÂNCIA

Existem diferentes técnicas que permitem determinar a distribuição de luminância no hemisfério celeste, como por exemplo: (a) a partir de medidas da luminância direcional em diferentes regiões do hemisfério celeste [Karayel, M. et al., 1984]; (b) considerando os valores de intensidade direcional, através do uso de fatores de eficácia luminosa [Perez, R. et al., 1987], (c) por meio de características espectrais [Chain, C. et al., 1999] entre outras técnicas. A validade de diferentes modelos é testada em diversos trabalhos [Littlefair, P. J., 1994; Ineichen, P. et al., 1994; entre outros].

Kittler, R., 1994, destaca a importância desempenhada pelas funções de espalhamento nos modelos de intensidade e luminância. Neste trabalho, o autor analisa as funções de fase<sup>4</sup> empregadas em diferentes modelos. De acordo com o autor, existem três influências interdependentes que devem ser levadas em conta no estabelecimento destes modelos de distribuição: (1) uma função dependente da massa de ar para reproduzir a gradação existente entre o zênite e o horizonte; (2) uma função indicatriz para representar o grau de espalhamento produzido pelos aerossóis, vapor de água e poluição; (3) a radiação extraterrestre horizontal para representar o nível de brilho do céu. De acordo com o autor, em muitos modelos [Harrison e Coombes, 1988, por exemplo] estas influências não são expressas separadamente.

Harrison, A. W., 1991, empregou o equipamento desenvolvido na universidade de Calgary [Coombes, C. A. e Harrison, A. W., 1982] juntamente com um filtro, para determinar a distribuição de luminância. O trabalho experimental é muito semelhante ao descrito anteriormente [Harrison, A. W. e Coombes, C. A., 1988].

### 2.7.1 MODELO DE HARRISON

Para determinar a distribuição de luminância normalizada em diferentes condições de nebulosidade, Harrison, A. W., 1991 propõe as seguintes expressões:

$$\bar{L}_c = (1,28 + 147e^{-my} + 4,28 \cos^2 \mathbf{y} \cos \mathbf{q}_0) \cdot (1 - e^{-0,42 \sec \mathbf{q}}) \cdot (1 - e^{-0,67 \sec \mathbf{q}_0}) \quad (2.30)$$

$$\bar{L}_o = 0,40 + 0,21 \mathbf{q}_0 + 0,27 \cos \mathbf{q} + 1,45_{L_o} e^{-2,41y} \quad (2.31)$$

---

<sup>4</sup> - indicatriz

onde  $\bar{L}$  representa a luminância normalizada e os subíndices  $c$  e  $o$  indicam as condições de céu limpo e encoberto opaco. Estas expressões são correspondentes às Equações (2.26) e (2.28), respectivamente, com diferentes constantes empíricas. A Figura 2.15 mostra um exemplo de distribuição de luminância obtido a partir deste modelo.

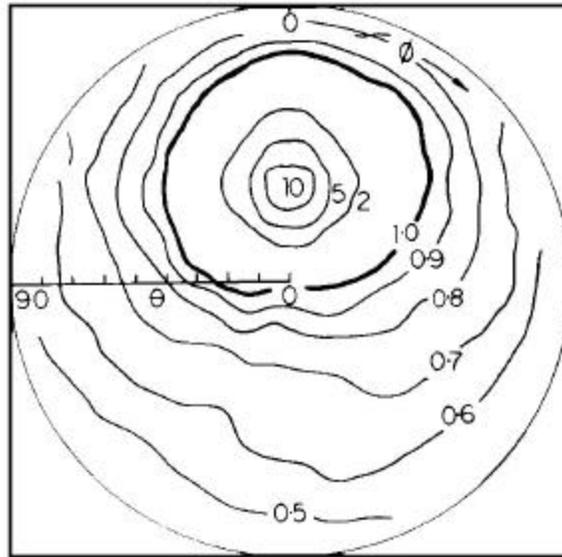


Figura 2.15 – Exemplo de uma de contorno com distribuição de luminância, no modelo de Harrison, para  $q_0 = 31^\circ$ . Adaptado de Harrison, A. W., 1991.

### 2.7.2 MODELO DE PEREZ (ALL WEATHER MODEL)

Perez, R. et al., 1993, desenvolveu um modelo para determinar a distribuição de luminância, válido sob qualquer condição meteorológica (*all weather model*). A expressão analítica deste modelo é uma generalização da fórmula do padrão de céu limpo *CIE*, sendo escrita como:

$$\bar{L} = \left[ 1 + a_0 e^{a_1 / \cos q} \right] \cdot \left[ 1 + a_2 e^{a_3 y} + a_4 \cos^2 y \right] \quad (2.32)$$

onde os  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  e  $a_4$  são coeficientes empíricos, ajustáveis em função das condições de insolação. O coeficiente  $a_0$  representa as características da região do horizonte. Por exemplo, o

brilho na região do horizonte, observado em condições de céu limpo, é representado por  $a_0 > 0$ . O coeficiente  $a_1$  reproduz o gradiente de luminância próximo ao horizonte. Os casos extremos são representados por  $a_1 = 0,7$  que representa uma variação de luminância gradual do horizonte ao zênite e por  $a_1 = -0,2$  que corresponde a uma pequena região próxima ao horizonte. O coeficiente  $a_2$  tem sua magnitude proporcional à intensidade relativa da região circunsolar. O modelo de padrão de céu limpo CIE emprega  $a_2 = 10$ . O coeficiente  $a_3$  indica a extensão da região circunsolar. Finalmente, o coeficiente  $a_4$  representa a intensidade relativa da luz espalhada que é recebida na superfície terrestre. A Figura 2.16 apresenta o gráfico  $\bar{L} \times q_0$  para diferentes condições atmosféricas. O modelo de Perez é amplamente empregado [Reinhart, C. F. e Walkenhorst, O., 2001] e testado [Ineichen, P. et al., 1994]. Devido a sua importância, este modelo serve como parâmetro de comparação de algumas pesquisas [Chain, C. et al., 1999].

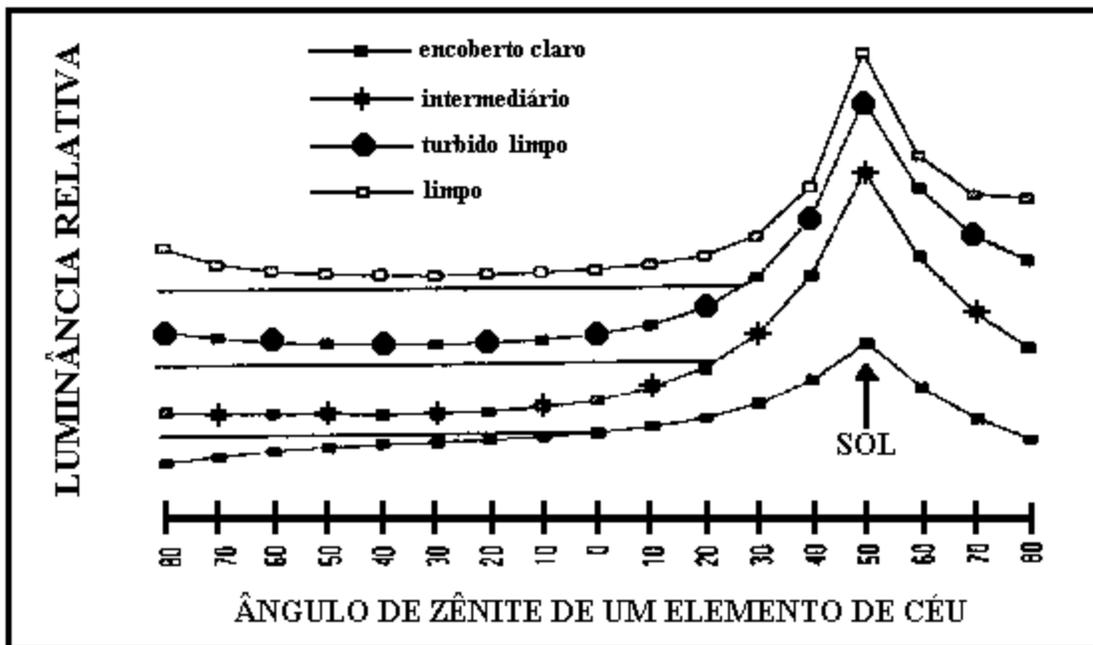


Figura 2.16 – Distribuição de luminância em função do ângulo de zênite solar para diferentes condições atmosféricas. Adaptado de Perez, R. et al., 1993.

## CAPÍTULO 3

### CÂMERA CCD COMO DISPOSITIVO DE AQUISIÇÃO DE IMAGENS

Muitas pesquisas na área de energia solar são desenvolvidas a partir da análise de imagens via computador. Inicialmente, para adquirir uma imagem é necessário dispor de um equipamento capaz de produzir, à saída, um sinal elétrico proporcional à radiação eletromagnética incidente. Os equipamentos empregados vão desde máquinas fotográficas [Beyer, H. G. et al., 1994] até equipamentos dotados de sensores CCD (*Charge Coupled Device*) [Rossini, E. G. e Krenzinger, A., 2000].

No estudo da radiação solar, o uso de imagens de satélite representam uma alternativa aos dados de irradiância solar, medidos na superfície. A análise destas imagens permite estimar os fluxos de irradiância na superfície terrestre [Noia, M. et al., 1993 (a); Noia, M. et al., 1993 (b); Beyer, H. G. et al., 1996]. A grande base de dados disponibilizada pela metodologia torna possível estabelecer mapas numa vasta área geográfica, onde são estimados valores de irradiância média diária e irradiância média mensal [Islam, M. R. e Exell, R. H. B., 1996; Pereira, E. B. et al., 1996]. Na literatura, encontram-se programas computacionais, especialmente desenvolvidos para a análise de imagens aéreas e de satélite [Costa, R. D. e Starkey, J., 2001].

A análise de imagens a partir da utilização de dispositivos acoplados de carga (ou CCD) é objeto de crescente interesse em diferentes áreas de conhecimento. São pesquisas relacionadas à astronomia [Horch, E. et al., 2000]; à meteorologia [Seiz e Baltzavias, 2001], à fotometria [Fuentes, L. M., 1999], entre outras. As aplicações que envolvem câmeras CCD normalmente exigem calibrações adequadas e equipamentos com características específicas, como é o caso das pesquisas em astronomia [Morgan, D. H., 1998].

Por outro lado, as câmeras CCD mais simples têm farta disponibilidade comercial e baixo custo, além de uma série de outras vantagens que a destacam como dispositivo de aquisição de imagens.

Basicamente, o CCD é um sensor de silício composto por uma matriz de células semicondutoras fotossensíveis. Cada célula, chamada de pixel, atua como um capacitor, armazenando carga elétrica proporcional à energia luminosa incidente durante um certo tempo de integração. Assim, quando o sensor é exposto à luz, a energia dos fótons incidentes em cada pixel, durante o tempo de integração, é armazenada e transferida para um amplificador, que converte a carga de cada pixel em tensão elétrica. Uma grande quantidade de circuitos digitais servem para controlar os elementos formadores do mosaico sensor.

Desta forma, é obtido à saída um sinal composto de vídeo (SCV) analógico e monocromático. O sinal analógico é convertido no formato digital em código binário. Neste caso, o maior número de bits corresponde a uma maior precisão. Finalmente, os dados em formato digital são passados ao computador, produzindo como resultado uma imagem que pode ser visualizada e processada.

Neste trabalho, justifica-se a utilização de uma câmera CCD como dispositivo de aquisição de imagens pelas seguintes características: (1) permitir a aquisição de imagens do hemisfério celeste em condições quase instantâneas, uma vez que o tempo de integração do equipamento é muito pequeno frente a duração do fenômeno observado; (2) possibilitar o arquivamento e acesso a um grande número de imagens, correspondentes a diferentes condições de nebulosidade; (3) permitir a transformação da imagem numa matriz numérica que pode ser manipulada matematicamente; (4) proporcionar uma informação que permite caracterizar a distribuição de intensidade direcional da radiação difusa celeste; (5) através da manipulação de imagens, permitir uma estimativa do índice de nebulosidade, sob diferentes condições, em céus parcialmente nublados.

### 3.1 ETAPAS DO SISTEMA DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Genericamente, qualquer trabalho que envolve um sistema de processamento de imagens conta com as seguintes etapas: aquisição, digitalização, análise, armazenamento e exibição. Problemas associados a cada uma destas etapas são tema de diversas pesquisas, como por exemplo: a avaliação do comportamento de determinados sensores CCD para um sistema de aquisição de imagens [Vora, P. L. et al., 2001]; desenvolvimento de métodos para o processamento das imagens em diferentes aplicações na etapa de análise [Miller, E. L., 1999; Belkacem-Boussaid, K. e Beghdadi, A., 2000], entre outros. A Figura 3.1 mostra o esquema das etapas de processamento de imagens deste trabalho e suas características.

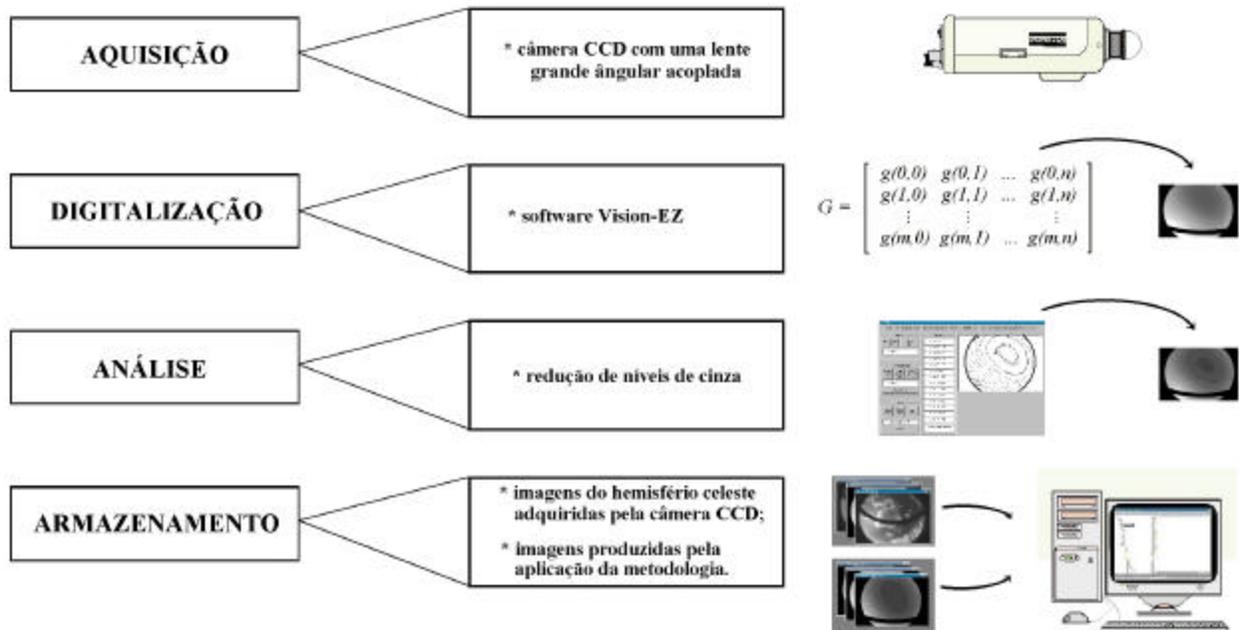


Figura 3.1 – Etapas do sistema de processamento de imagens.

### 3.1.1 AQUISIÇÃO

Os elementos principais desta etapa compreendem o equipamento, caracterizado pelo tipo de sensor empregado para a captura da imagem, seus elementos ópticos e a digitalização. Neste caso, emprega-se uma câmera CCD com uma lente grande angular acoplada. A aquisição é concluída por meio de uma placa multiplexadora que recebe o sinal de vídeo da câmera, convertendo-o em informação digital que é armazenada na memória de acesso aleatório, RAM (*Random Access Memory*).

### 3.1.2 DIGITALIZAÇÃO

Durante a digitalização, o sinal analógico é submetido a uma discretização espacial e a uma discretização em amplitude, assumindo um formato compatível com a etapa de processamento. Matematicamente, uma imagem digital monocromática é descrita como uma função da intensidade luminosa nas coordenadas  $(x, y)$ , isto é:

$$f(x, y) = i(x, y) \cdot r(x, y) \quad (3.1)$$

com  $i(x,y) \in (0, \infty)$  e  $r(x,y) \in (0,1)$ , onde  $i(x,y)$  é a luminância e  $r(x,y)$  representa as propriedades de refletância e transmitância do objeto. Na literatura referente ao processamento de imagens [Facon, J., 1993; Marques Filho, O. e Vieira Neto, H., 1999], é comum encontrar tabelas com exemplos típicos para estas funções. Normalmente, considera-se que para um dia ensolarado, a função de iluminância,  $i(x,y)$ , é superior a 900 lux; por outro lado, a função de refletância  $r(x,y)$ , têm os maiores valores na neve, onde pode ser considerada igual a 0,93.

Uma imagem digital monocromática é definida pela transformação da função  $f(x,y)$  de valores contínuos numa função  $g(x,y)$  de valores discretos. Os valores de  $g(x,y)$  representam os tons ou níveis de cinza da imagem com  $g(x,y) \in [C_{i\min}, C_{i\max}]$ .

A discretização espacial, também chamada de amostragem, consiste em converter a imagem numa matriz  $G_{m \times n}$ , isto é,

$$G = \begin{bmatrix} g(0,0) & g(0,1) & \dots & g(0,n-1) & g(0,n) \\ g(1,0) & g(1,1) & \dots & g(1,n-1) & g(1,n) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g(m-1,0) & g(m-1,1) & \dots & g(m-1,n-1) & g(m-1,n) \\ g(m,0) & g(m,1) & \dots & g(m,n-1) & g(m,n) \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

A discretização em amplitude, também chamada quantização, consiste na representação da imagem, onde os elementos da matriz  $G_{m \times n}$  da Equação (3.2) correspondem à posição do pixel, e os respectivos valores de  $g(x,y)$  representam o tom de cinza do pixel. Geralmente, os níveis de cinza da imagem são calculados por:

$$N_i = 2^r \quad (3.3)$$

onde  $r$  é um inteiro positivo. Para cada expoente  $r$ , os níveis de cinza,  $N_i$ , têm como valores correspondentes, os índices  $C_i$ , que variam entre  $C_{i\min} = 0$  e  $C_{i\max} = 2^r - 1$ . A qualidade de uma imagem digitalizada, com  $N_i$  níveis de cinza, é definida pelos valores de  $m$  e  $n$  da matriz  $G_{m \times n}$ , conforme a Equação (3.2).

A digitalização das imagens analisadas nesta pesquisa envolve funções implementadas através do *software Vision-EZ*. A placa para o *Vision-EZ* emprega quatorze registros I/O de 16 bits. Estes registros são acessados usando operações padrão I/O, conforme mostra a *Tabela 3.1*. As imagens digitalizadas resultantes são monocromáticas e contam com os seguintes parâmetros:  $m = 768$ ,  $n = 512$  e  $N_i = 256$ .

Tabela 3.1 – Registros I/O Vision-EZ

Registro	Endereço
<i>video control/status</i>	<i>I/O base address</i>
<i>input look-up Table Index</i>	<i>I/O base + 2</i>
<i>input look-up Table Data</i>	<i>I/O base + 4</i>
<i>reserved</i>	<i>I/O base + 6</i>
<i>pixel address</i>	<i>I/O base + 8</i>
<i>line address</i>	<i>I/O base + A</i>
<i>pixel data</i>	<i>I/O base + C</i>
<i>pixel data with increment</i>	<i>I/O base + E</i>
<i>output look-up table index (write mode)</i>	<i>I/O base + 10</i>
<i>output look-up table data</i>	<i>I/O base + 12</i>
<i>output look-up table pixel mask</i>	<i>I/O base + 14</i>
<i>output look-up table index(read mode)</i>	<i>I/O base + 16</i>
<i>overlay index (write mode)</i>	<i>I/O base + 18</i>
<i>overlay look-up table</i>	<i>I/O base + 1<sup>A</sup></i>
<i>reserved</i>	<i>I/O base + 1C</i>
<i>overlay index (read mode)</i>	<i>I/O base + 1E</i>

### 3.1.3 ANÁLISE DE IMAGENS

A análise de imagens é constituída por uma fase de pré-processamento e por uma fase de processamento. Na fase de pré-processamento são corrigidas as possíveis imperfeições da imagem, fornecendo um resultado de melhor qualidade. O pré-processamento e o processamento de imagens podem ser implementados através de um *software* gráfico ou por meio de códigos computacionais, desenvolvidos em alguma linguagem de programação de alto nível. Atualmente, existe uma grande quantidade de *softwares*, comercialmente disponíveis, que dão conta das principais tarefas gráficas como: transformações geométricas, translações, equalizações de histograma, filtragem, detecção de bordas, entre muitas outras. Por outro lado, certas aplicações exigem tarefas que só podem ser realizadas através de algoritmos desenvolvidos para a aplicação específica. No decorrer desta pesquisa, as tarefas de análise das imagens foram realizadas através de diferentes *softwares* gráficos e de códigos computacionais, escritos em *MATLAB 5.3* e em *Visual Basic 5.0*.

Um dos procedimentos empregados para análise das imagens do hemisfério celeste consistiu na redução do número de tons de cinza da imagem, convertendo os 256 níveis da imagem original, para apenas 16 níveis de cinza.

Na maioria das aplicações, a redução dos níveis de cinza, para  $N_i < 32$ , introduz uma imperfeição na imagem conhecida como falso contorno. A Figura 3.1 mostra o efeito da redução dos níveis de cinza na qualidade de uma imagem, onde a resolução espacial é mantida constante, permitindo visualizar a formação de falsos contornos.

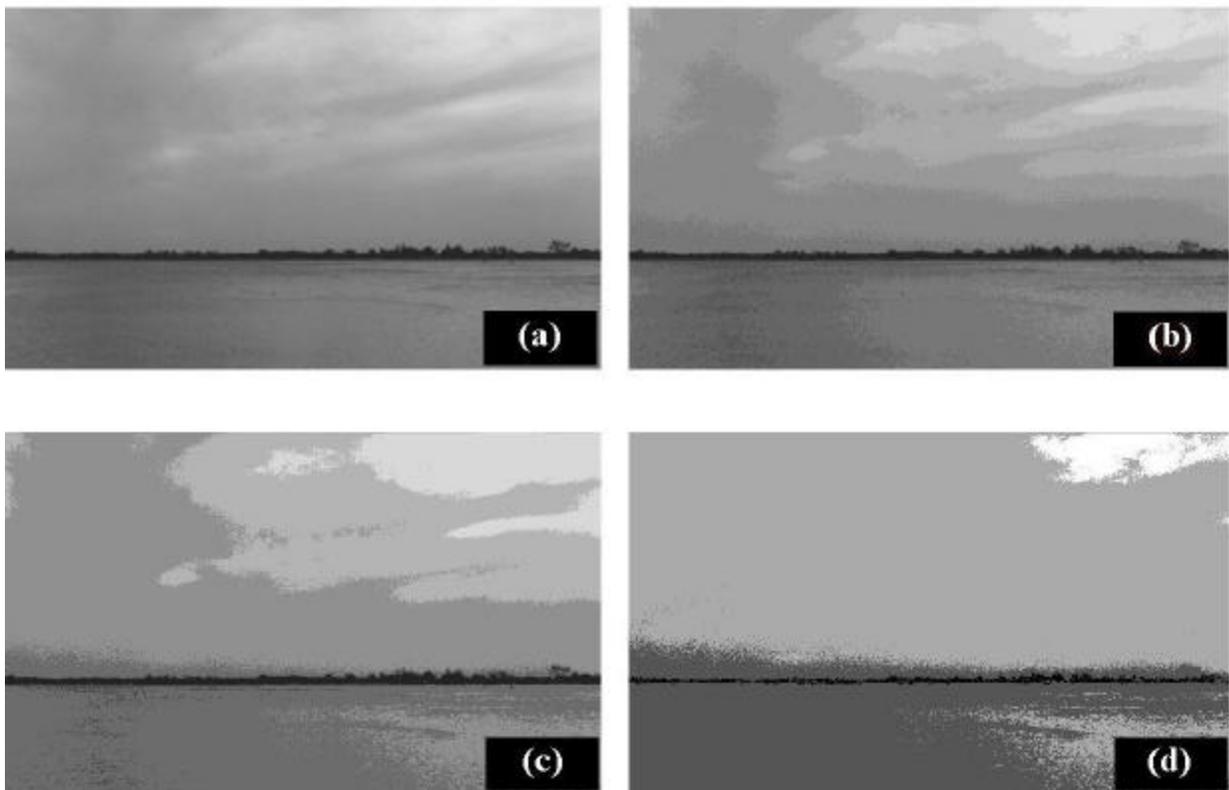


Figura 3.2 – Efeito da redução de níveis de cinza em imagens de mesma resolução espacial para: (a)  $N_i = 256$ , (b)  $N_i = 16$ , (c)  $N_i = 8$  e (d)  $N_i = 4$ .

Por outro lado, a redução dos níveis de cinza aplicada às imagens do hemisfério celeste, conforme a metodologia proposta neste trabalho, permite caracterizar a sua distribuição de intensidade. Assim, cada contorno delimita uma região do hemisfério celeste, onde a intensidade tem diferença significativa. A Figura 3.3 mostra um esquema gráfico da técnica de redução de níveis de cinza, numa imagem unidimensional, ou seja, composta por uma fila horizontal de *pixels*.

É importante destacar que o tratamento para detecção de bordas (*edge detection*) em imagens digitais é um tema bem mais amplo do que neste caso, pois normalmente o que se deseja é destacar o contorno de um objeto em relação ao plano de fundo. Nestes casos, empregam-se algoritmos baseados na construção de filtros espaciais lineares [Parker, J.R., 1997].

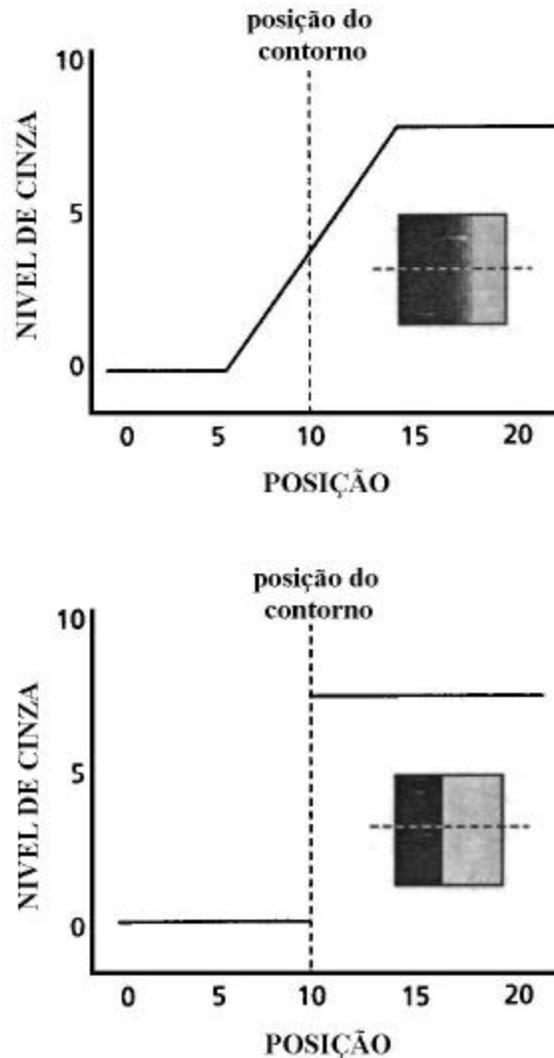


Figura 3.3 – Redução dos níveis de cinza: (a) imagem original; (b) imagem com redução de níveis de cinza.

Os níveis de cinza são calculados pela determinação do expoente  $r$ , na Equação (3.3). Os melhores valores que o expoente deve assumir são  $r = 3$  e  $r = 4$ , que correspondem a 8 e 16 níveis de cinza, respectivamente. Em muitos casos  $r = 3$  é suficiente para caracterizar a distribuição de intensidade. Entretanto, em condições de céu parcialmente nublado são exigidos maiores detalhes, devido aos diferentes tipos de nuvens. Nestas condições, as melhores imagens são obtidas fazendo-se  $r = 4$ , conforme mostra a Figura 3.4.

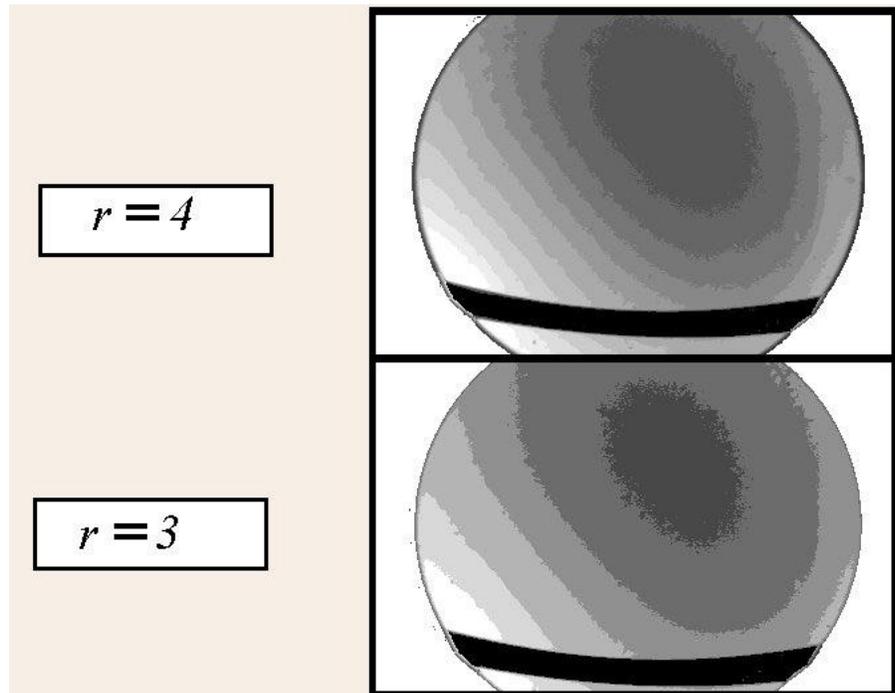


Figura 3.4 – Distribuição de intensidade num céu parcialmente nublado para:  $r = 3$  e (b)  $r = 4$ .

### 3.1.4 ARMAZENAMENTO

Esta etapa compreende desde o armazenamento de curta duração para utilização imediata até a gravação de uma grande quantidade de imagens para recuperação esporádica. De qualquer modo, o armazenamento de imagens digitais envolve a otimização entre a informação necessária para sua apresentação, ou manipulação, e o espaço disponível.

O número de *bytes* necessários para armazenar uma imagem monocromática pode ser estimado de forma simplificada, considerando-se a Equação (3.2). Assume-se que toda a informação referente à imagem é dada por uma matriz  $G_{m \times n}$ , onde cada elemento representa um pixel, cujo valor é o seu tom de cinza. Assim, para armazenar a matriz determina-se

$$b = m \times n \times \left( \frac{r}{8} \right) \quad (3.4)$$

De acordo com esta expressão, para armazenar uma imagem de 768 x 512 pixels, com 256 níveis de cinza, seriam necessários 393216 bytes. Na prática, são exigidas informações adicionais como o tamanho da imagem, o número de níveis de cinza, etc.

Diversas técnicas de compressão têm sido desenvolvidas com o propósito de minimizar o espaço ocupado por imagens digitais [Taubman, D., 2000; Hartenstein, H.; Ruhl, M e Saupe, D., 2000]. Os algoritmos concebidos com esta finalidade baseiam-se na remoção de informação redundante. Além disso, para facilitar o armazenamento, certos algoritmos foram concebidos como padrões de apresentação e / ou compressão de imagens, dando origem a diferentes formatos, identificados pela extensão do arquivo.

No contexto deste trabalho, o armazenamento se refere ao arquivamento das imagens digitais, em disco, para sua posterior recuperação. O *software* utilizado para o armazenamento de imagens originadas na fase de aquisição / digitalização permite gravar as imagens no formato *TIFF (Target File Format) Uncompressed*. Este formato é empregado para manipular arquivos do tipo *bitmap* (mapas de bits), e devido a sua versatilidade é adequado para diversas aplicações como artes gráficas, editoração eletrônica, etc. A primeira estrutura de dados encontrada neste formato é o cabeçalho, *IFH (Image File Header)* que contém informações para interpretação do restante do arquivo. O *IFH* é a única parte do arquivo *TIFF* que tem posição fixa.

Inicialmente, para extrair a informação referente ao valor do tom de cinza de cada pixel é importante conhecer o espaço ocupado pelo cabeçalho dentro do arquivo *TIFF*. Em seguida, uma função como *Asc(string)* do *Visual Basic 5.0* pode ser usada para converter o valor registrado no arquivo de imagem em um número inteiro, entre 0 e 255. Assim, obtém-se uma matriz  $G_{m \times n}$ , onde o valor de cada elemento é o tom de cinza da imagem digital. Uma tarefa semelhante é desempenhada pela função *imread(file)* do *MATLAB 5.3*. Neste caso, é preciso converter o arquivo da imagem no formato *TIFF* para o formato *JPEG (Joint Photographic Experts Group)*.

Os arquivos de imagens armazenados têm um tamanho constante de, aproximadamente, 384 kb (393.480 bytes). Para identificar as imagens, estabeleceu-se um código de oito dígitos que informa o dia, o mês e o horário da medida. A Figura 3.5 mostra a estrutura do diretório com um nome de arquivo.

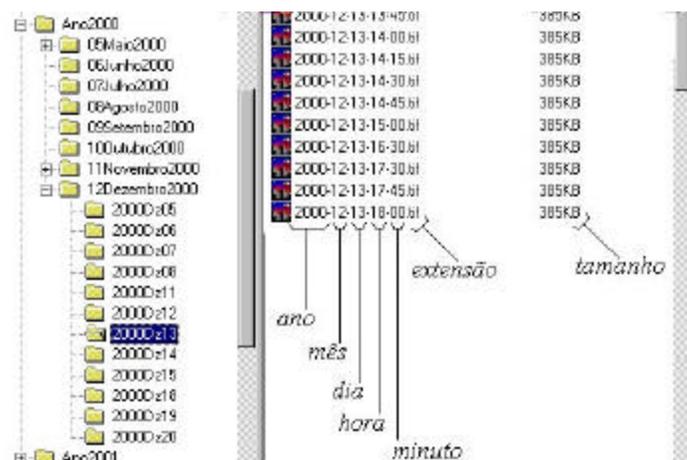


Figura 3.5 – Estrutura do diretório e convenção para os nomes dos arquivos de imagem.

### 3.1.5 EXIBIÇÃO

O monitor é um dispositivo periférico de saída da informação que permite a visualização imediata das imagens digitais, tendo importância fundamental para qualquer sistema de processamento de imagens.

Neste trabalho, a exibição de uma imagem segue um padrão convencional de linhas e colunas. Portanto, a notação para as coordenadas  $(x, y)$  empregada nas Equações (3.1) e (3.2) pode ser entendida como a representação da posição do pixel em termos desta convenção, conforme mostra a Figura 3.6.

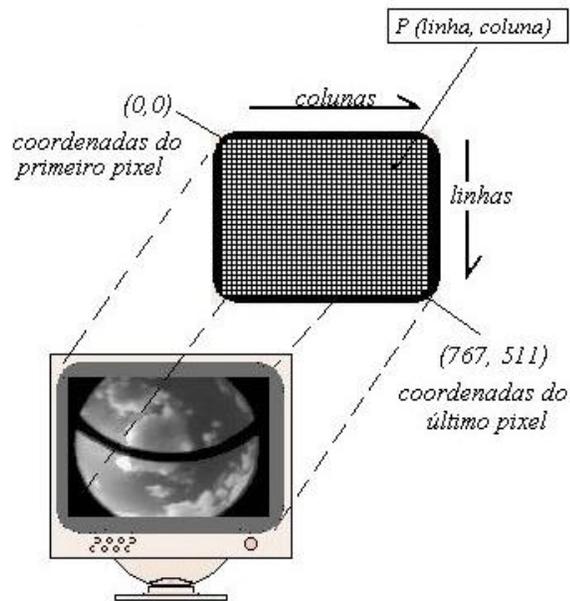


Figura 3.6 – Padrão convencional para a apresentação de uma imagem digital.

O modelo de cores empregado também é uma característica importante para a exibição de uma imagem digital. Neste trabalho, emprega-se o modelo de cores *RGB* (*red, green, blue*), baseado num sistema de coordenadas cartesianas que permite representar diferentes cores através de valores dados pelos índices  $(R, G, B)$ . O modelo pode ser representado por um cubo unitário, conforme a Figura 3.7, onde os tons de cinza pertencem à diagonal do cubo. Numa imagem monocromática, os índices  $R, G$  e  $B$  são iguais, e por brevidade escreve-se um único valor para representar o tom de cinza, de forma que os valores são dados pelo índice  $(RGB)$ .

Um sistema monitor de alta definição do tipo TRC (tubo de raios catódicos) usa três sinais de entrada separados que controlam os feixes de imagens nas cores vermelha, verde e azul. Numa imagem de 256 cores, cada um dos índices varia entre 0 e 255. Assim, para estabelecer uma relação entre a irradiância difusa medida,  $I_d$ , e a imagem capturada, considera-se a soma dos valores das cores primárias ou o *RGB* de cada elemento da imagem.

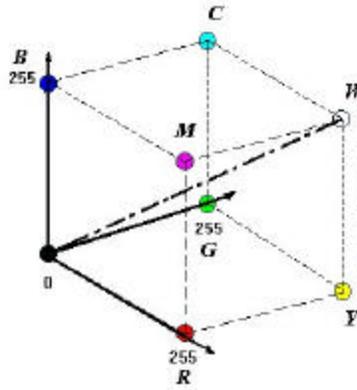


Figura 3.7 – Cubo de cores do modelo *RGB*.

### 3.2 UTILIZAÇÃO DE SENSORES CCD NA DETERMINAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE INTENSIDADE DIRECIONAL DA RADIAÇÃO DIFUSA CELESTE

Para que se possa aproveitar ao máximo as vantagens da utilização de instrumentos dotados de sensores CCD é importante relacionar as principais características destes equipamentos com o tipo de aplicação. A metodologia proposta para a determinação da distribuição direcional de intensidade da radiação difusa celeste requer o conhecimento das seguintes características: a relação entre a irradiância incidente e o sinal obtido à saída; o comportamento espectral do sensor. Neste caso, o tratamento é tão geral quanto possível, uma vez que a câmera empregada nesta pesquisa é de uso comercial.

#### 3.2.1 LINEARIDADE

Muitos equipamentos que empregam dispositivos de carga acoplada são projetados para produzir uma resposta linear com a irradiância acima do limite de operação. Resulta que o sensor CCD é altamente linear dentro do limite de operação do equipamento. Materiais fotossensíveis permitem que a carga armazenada em cada recipiente do sensor CCD seja proporcional à intensidade luminosa incidente em cada um destes elementos.

Os modelos de resposta linear assumem que este tipo de relação é observada entre o sinal de tensão, obtido à saída, e a irradiância incidente entre determinado elemento do sensor. A relação linear entre a irradiância incidente em cada elemento do sensor e a tensão de saída pode ser descrita pela equação:

$$V(x, y) = \frac{G_a}{C_L} [I(x, y)R(x, y)A_p t + qe_p] \quad (3.5)$$

onde  $G_a$  é o ganho do amplificador do circuito de saída,  $C_L$  é a capacitância associada a este circuito,  $I(x, y)$  é a irradiância incidente sobre o pixel de coordenadas  $(x, y)$ ;  $R(x, y)$  é a resposta deste pixel;  $A_p$  é a área do pixel;  $t$  representa o tempo de integração;  $q$  é a carga do elétron e  $e_p$  representa o número de elétrons da imagem escura. Os sensores CCD também estão sujeitos a ruídos de diferentes origens. A fonte de ruído mais significativa é o ruído produzido à saída que ocorre devido à geração térmica de elétrons. Na ausência de luz, a geração térmica de cargas provoca um padrão espacial na imagem escura exigindo, em muitos casos, uma calibração adequada.

### 3.2.2 COMPORTAMENTO ESPECTRAL

Os sensores CCD têm uma resposta espectral semelhante à de qualquer outro sensor de silício. Este comportamento é comprovado por pesquisas que apresentam os resultados destas medidas espectrais [Fuentes, 1999]. A Figura 3.8 apresenta uma típica curva de resposta espectral de um sensor CCD e sua relação com a distribuição espectral de radiação difusa, em condições de céu limpo. Observa-se que a sensibilidade do CCD cobre uma restrita banda espectral. Felizmente, observa-se uma boa concordância entre a distribuição de luminância e a distribuição de intensidade direcional da radiação difusa [Kondratiev, 1969; entre outros]. Portanto, é possível estabelecer uma relação entre a energia medida na banda de sensibilidade do CCD e a energia de todo espectro da radiação solar difusa.

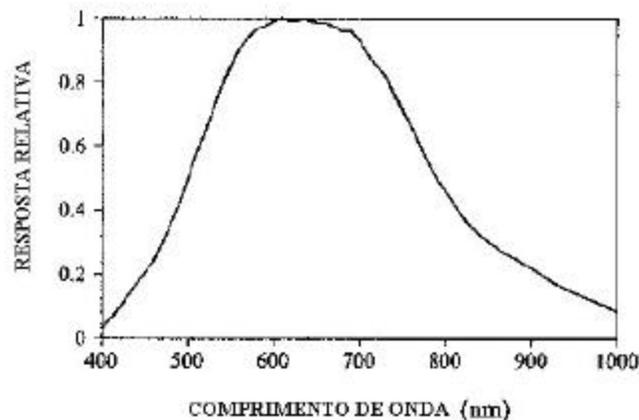


Figura 3.8 – Resposta espectral típica de um sensor CCD.

A câmera CCD, utilizada no desenvolvimento experimental desta pesquisa, teve sua sensibilidade espectral ao infravermelho próximo, comprovada experimentalmente, ao se registrar, na tela do computador, o brilho de um LED infravermelho ( $\lambda = 0,9 \mu\text{m}$ ), invisível ao olho humano. A resposta espectral dos sensores CCD habilitam os mesmos a bons resultados na determinação da radiação solar da mesma forma que piranômetros fotovoltaicos, cujos efeitos espectrais estão muito bem determinados em Zanesco, I., 1991.

### 3.2.3 CALIBRAÇÃO

A calibração de um sensor CCD permite estabelecer a correta relação entre a magnitude obtida diretamente do sensor e a magnitude que se deseja medir. A partir do sensor CCD obtém-se um valor de tensão ou um nível de cinza que, neste contexto, deve estar relacionado com a irradiância incidente em cada elemento do mosaico sensor. Nas aplicações que tratam de medidas radiométricas, o sensor é sujeito a uma série de diferentes calibrações [Feister et al., 1998; Fuentes, L. M., 1999; entre outros].

Uma outra alternativa é a calibração de níveis de cinza, que é realizada diretamente sobre as imagens digitais. Wagner, S., 1996, emprega um método para calibração de níveis de cinza em fotografias hemisféricas, válido para análise de imagens aplicadas a problemas de agricultura.

### 3.3 VANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DE CÂMERAS CCD PARA A DETERMINAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE INTENSIDADE DIRECIONAL DA RADIAÇÃO DIFUSA

A distribuição de intensidade direcional da radiação difusa celeste pode ser determinada a partir de medidas actinométricas e / ou através de imagens hemisféricas. A técnica fotográfica surge com o propósito de solucionar o problema do tempo de resposta dos radiômetros de varredura [McArthur, L. B. e Hay, J. E., 1980], uma vez que estes equipamentos necessitam de alguns minutos para efetuar uma varredura completa [Kondratiev, K., 1969; McArthur, L. B. e Hay, J. E., 1981]. Neste sentido, a utilização de sensores CCD apresenta as mesmas vantagens do

processo fotográfico, fornecendo mapas de intensidade direcional a partir da aquisição de imagens num tempo significativamente menor.

O processo fotográfico produz amostras numa banda espectral que corresponde a menos de 10% do espectro solar. Em resumo, a técnica fotográfica baseia-se na possibilidade de relacionar a energia amostrada nesta porção restrita do espectro com a energia de todo o espectro solar. Isso é possível porque existe uma boa concordância entre as distribuições energética e fotométrica [Kondratiev, K., 1969; McArthur, L. B. e Hay, J. E., 1981; Kittler, R., 1994; entre outros]. Este comportamento também justifica a utilização de sensores CCD, cuja sensibilidade é restrita a uma banda, dentro do espectro solar que, mesmo não sendo total, é muito maior que a do processo fotográfico.

Por outro lado, a utilização de fotografias do hemisfério celeste requer cuidados relativos às características do filme empregado; ao tempo de exposição; além de exigir um processo de calibração que permita relacionar os valores de densidade relativa da imagem digitalizada com as medidas de radiância [McArthur, L. B. e Hay, J. E., 1981].

A utilização de imagens hemisféricas a partir de câmeras CCD apresenta uma série de vantagens em relação ao processo fotográfico. Estas vantagens estão associadas à natureza dos sensores CCD e ao processamento de imagens digitais que é possibilitado pela utilização deste tipo de equipamento. Os sensores CCD têm uma linearidade muito maior do que a produzida por qualquer processo fotográfico.

A sensibilidade dos sensores CCD mantém-se constante durante toda a fase de aquisição. Esse comportamento linear é válido mesmo sob diferentes condições de luminosidade, sendo caracterizado pela tensão à saída ou pelo tom de cinza de uma imagem digital monocromática. As câmeras CCD também apresentam uma sensibilidade maior, sendo capazes de detectar mais de 50% dos fótons incidentes sobre o sensor. Outra característica importante é a sua versatilidade, pois permite que estes sensores sejam utilizados sob um conjunto mais amplo de condições atmosféricas.

A utilização de câmeras CCD como dispositivo de aquisição de imagens torna possível obter imagens do hemisfério celeste, num período de tempo relativamente curto. Além disso, este equipamento é capaz de disponibilizar uma maior quantidade de informação devido a sua maior sensibilidade. A digitalização de imagens permite transformar a imagem numa matriz numérica que pode ser manipulada matematicamente. A análise e a manipulação de imagens digitais pode ampliar as qualidades do sensor CCD. Finalmente, o armazenamento disponibiliza uma grande quantidade de dados para futura recuperação e análise.

## CAPÍTULO 4

### O SISTEMA EXPERIMENTAL

A atividade experimental tem por objetivo caracterizar a distribuição de intensidade direcional da radiação solar difusa, fornecendo mapas de uma ampla região do hemisfério celeste. Com tal propósito, desenvolveu-se um sistema experimental capaz de fornecer, simultaneamente, a imagem do hemisfério celeste e dados instantâneos de radiação solar. A Figura 4.1 mostra um esquema da atividade experimental destacando as principais etapas.

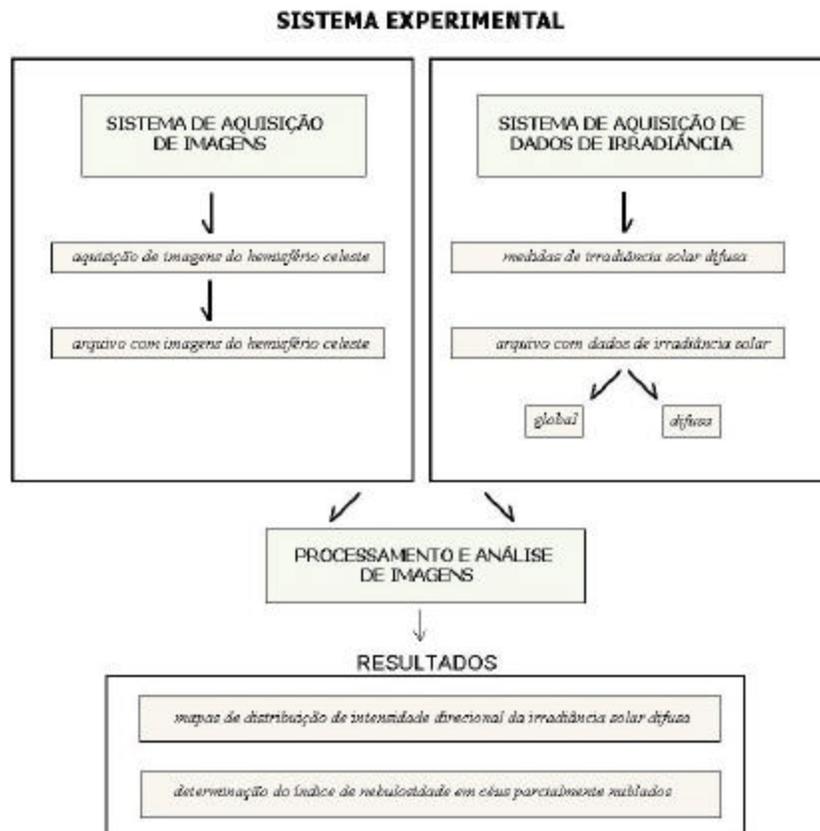


Figura 4.1 – Etapas da atividade experimental.

#### 4.1 INSTALAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

Os equipamentos de medida estão instalados próximo ao limite leste da cidade de Porto Alegre, no terraço do Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, na latitude  $30^{\circ}3'$  Sul, longitude  $51^{\circ}2'$  Oeste e altitude de 10 m. A Figura 4.2 mostra a fotografia do arranjo experimental. Observam-se dois suportes com anel de sombra, que sustentam, respectivamente, um piranômetro *Kipp and Zonen* e uma câmera *CCD* monocromática, orientados na direção do Zênite. Estes suportes estão instalados a uma distância de, aproximadamente 3 m, suficiente para garantir que não ocorra interferência nas medidas pelo encobrimento de parte do céu. Para proteger a câmera de intempéries, confeccionou-se uma caixa que permanece fixa ao suporte. Um eixo permite a regulagem na altura da câmera, que deve ser igual à do sensor do piranômetro.

Os dois anéis de sombreamento têm as seguintes medidas:  $0,043\text{ m}$  de largura e  $0,25\text{ m}$  de raio. Desta forma, com o devido ajuste, tanto o piranômetro quanto a câmera bloqueiam a mesma região que corresponde ao caminho do Sol.



Figura 4.2 – Fotografia da instalação dos equipamentos de medida.

Mais adiante, analisa-se a utilização do anel de sombra, uma vez que estes dispositivos são largamente empregados e avaliados como técnica de medida da irradiância solar difusa [Batlles, F.J., et al., 1995; Ricieri, R. P., 1995]. Neste caso, emprega-se o suporte modelo *CM121*, especialmente concebido para os piranômetros *Kipp and Zonen*. Este modelo, apresentado na Figura 4.3, é muito versátil, podendo ser utilizado em qualquer latitude e para qualquer inclinação de superfície.



Figura 4.3 – Suporte com anel de sombra *Kipp and Zonen* modelo *CM121*.

O suporte para sustentação da câmera têm características semelhantes ao modelo *CM121*, apresentando a mesma versatilidade. Este suporte foi produzido na *UFRGS*, como parte do desenvolvimento deste trabalho. A Figura 4.4 apresenta a fotografia do suporte da câmera.



Figura 4.4 – Fotografia do suporte da câmera.

Na fotografia da instalação dos equipamentos, Figura 4.2, observa-se que além do anel de sombreamento existe um pequeno aro, colocado num plano horizontal, acima do sensor do piranômetro. Durante o trabalho, foram confeccionados dois tipos de coberturas: o primeiro tipo é um pequeno aro, pintado de preto fosco; enquanto o segundo tipo de cobertura consiste numa região de um hemisfério acrílico, pintado de preto fosco, com duas abas nas extremidades correspondentes ao Norte e ao Sul. A Figura 4.5 mostra estas coberturas fixadas no suporte *CM121*.

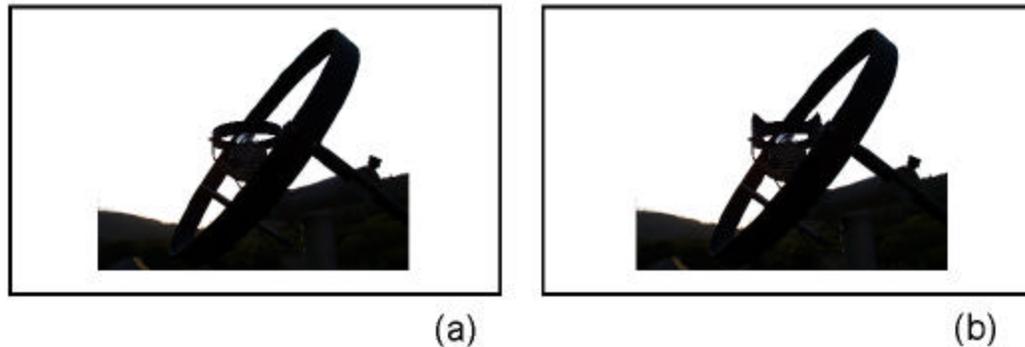


Figura 4.5 – Coberturas horizontais fixadas no suporte do piranômetro.

O aro é empregado para bloquear a radiação difusa, incidente abaixo de um ângulo de  $25^\circ$ . O segundo tipo de cobertura foi concebido para cobrir também, a região celeste que não aparece na imagem, devido à distância entre a lente e o sensor da câmera. Desta forma, garante-se que tanto a câmera quanto o piranômetro realizam as medidas numa mesma região do hemisfério celeste. A figura 4.6 representa a utilização destas coberturas e os correspondentes ângulos de visão.

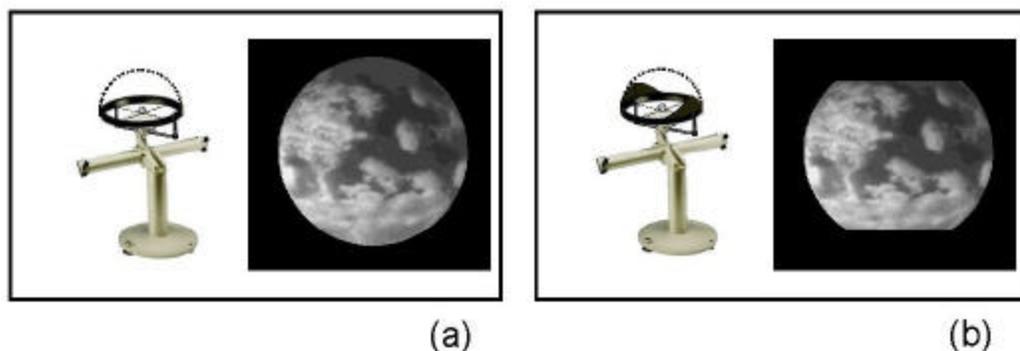


Figura 4.6 – Ângulo de visão do piranômetro para as diferentes coberturas horizontais.

A opção adotada foi a utilização do primeiro tipo de cobertura. Esta escolha se justifica, em parte, pela maior facilidade de ajuste do aro ao suporte. Além disso, uma grande quantidade de medidas foi realizada desta maneira, tornando desejável o desenvolvimento de uma

metodologia capaz de aproveitar estes dados. Para recuperar a informação perdida nas bordas norte e sul das imagens adquiridas pela câmera procede-se da seguinte maneira: (a) determina-se uma circunferência que serve como padrão e que representa a fronteira entre a borda da lente e o céu; (b) as imagens adquiridas pela câmera são projetadas sobre esta circunferência padrão; (c) a informação perdida é reconstituída, proporcionando uma imagem do hemisfério celeste com o ângulo de zênite variando entre 0° e 60.

## 4.2 ETAPAS DA ATIVIDADE EXPERIMENTAL

Em todo trabalho experimental, é indispensável conhecer os principais equipamentos de medida empregados e suas características. Estas informações são relevantes porque permitem avaliar a consistência dos resultados e/ou estabelecer os limites de validade do trabalho. Com a finalidade de avaliar os equipamentos que compõem o sistema experimental, subdivide-se esta atividade nas seguintes partes: (a) sistema de aquisição de imagens; (b) avaliação do sistema de aquisição de imagens; (c) medidas de irradiância solar; (d) sistema de aquisição de dados. Nas próximas seções, cada uma destas partes é analisada, destacando-se certas características relevantes que justificam a metodologia proposta nesta tese.

## 4.3 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE IMAGENS

As etapas do processamento digital de imagens, descritas no Capítulo 3, mostraram as vantagens da utilização das câmeras CCD em relação a outras metodologias. Nesta seção descrevem-se os equipamentos disponíveis para a realização deste trabalho, dando uma idéia de suas características e de algumas limitações impostas por tais equipamentos.

### 4.3.1 CÂMERA CCD

Para a aquisição de imagens emprega-se a câmera monocromática *Fujitsu General* modelo *TCZ-230EA* com uma lente grande angular *Pentax Cosmicar - CCTV*, modelo *TS213*. Este equipamento foi doado à UFRGS através de um convênio de pesquisa com a *Universidad Politécnica de Madrid*. A Figura 4.7 mostra a fotografia do sensor da câmera.



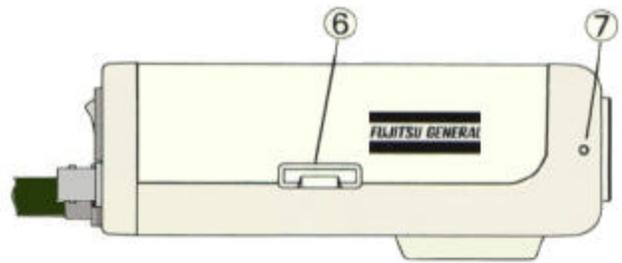
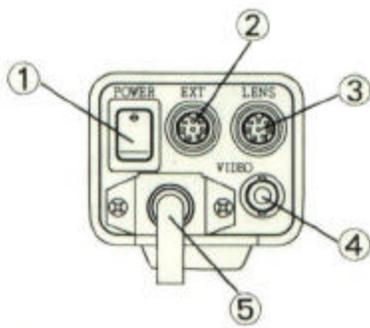
Figura 4.7 – Fotografia do sensor da câmera.

#### 4.3.2 ESPECIFICAÇÕES E CONTROLES DA CÂMERA CCD

A Tabela 4.1 apresenta algumas especificações da câmera, enquanto a Figura 4.8 representa a câmera com alguns controles e conexões.

Tabela 4.1 – Especificações da câmera

<i>Câmera Fujitsu General</i>	
Modelo	TCZ 230 EA
Utilização	imagens do hemisfério celeste
Dimensões (mm)	50 x 60 x 143
Peso (kg)	0,9
Tensão de entrada	230 V ( $\pm 10\%$ )
Potência (a 230 V)	5,8 W
Sinal de ruído (AGC = OFF)	52 dB
Sensibilidade – tela cheia (lx)	0,8
Resolução horizontal	570 TV lines
Temperatura operacional ( $^{\circ}\text{C}$ )	$-10^{\circ}$ a $50^{\circ}$
- desempenho garantido -	$0^{\circ}$ a $40^{\circ}$



- |   |                                  |   |                                  |
|---|----------------------------------|---|----------------------------------|
| ① | liga / desliga                   | ⑥ | tampa do painel de interruptores |
| ② | conector externo (DIN 8 pin)     | ⑦ | parafuso para fixação da lente   |
| ③ | conector da lente (DIN 4 pin)    |   |                                  |
| ④ | conector da saída de video (BNC) |   |                                  |
| ⑤ | cabo                             |   |                                  |

Figura 4.8 – Câmera *CCD Fujitsu General - TCZ-230E*. Adaptado do manual de instruções.

A câmera possui uma série de oito pequenos interruptores de controle interno, que possibilitam ajustar o equipamento para produzir as melhores imagens em diferentes condições atmosféricas e de luminosidade. A Figura 4.9 representa estes interruptores, conforme o manual de instruções da câmera. Esta figura mostra os interruptores nas suas respectivas posições originais de fábrica.

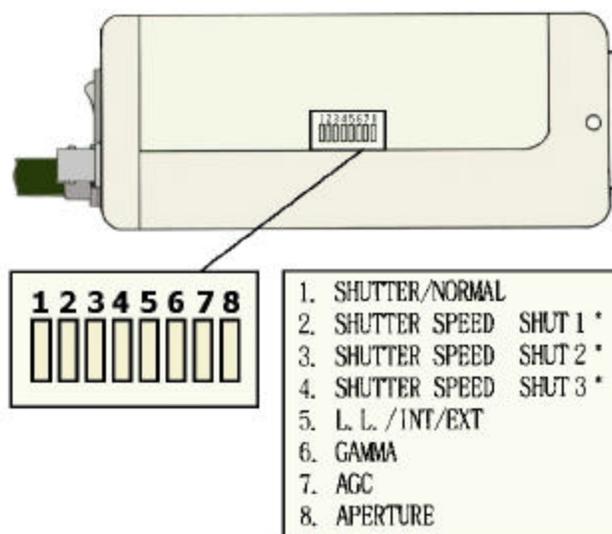


Figura 4.9 – Interruptores para controle interno. Adaptado do manual de instruções da Câmera *CCD monocromática Fujitsu General – TCZ-230 EA*.

A câmera pode ser usada no modo normal, *NRML*, ou no modo obturador, *SHUT*. Neste caso, outros três interruptores permitem regular a velocidade do obturador que pode variar entre 1/60 s e 1/10000 s.

O quinto interruptor é usado para selecionar o modo de sincronização. Na posição *L.L.* obtém-se um pulso sincronizado com a frequência AC da fonte. A posição *INT/EXT* ajusta automaticamente o equipamento para uma sincronização interna ou externa.

Um interruptor serve para o modo de compensação *Gama*. A posição correspondente a *Gama 0,45* é selecionada para operações usuais. Por outro lado, a posição *Gama 1,00* permite que o sinal de vídeo seja linearmente proporcional à intensidade da luz incidente.

O mais significativo ajuste para os propósitos deste trabalho é o controle automático de ganho, identificado como *AGC*. Quando ligado o ganho do amplificador de vídeo é aumentado automaticamente, desta forma obtém-se imagens mais claras. A posição *OFF* proporciona uma imagem natural, sem produzir correções automáticas.

Outro ajuste importante é o interruptor para função de correção de abertura que pode ser usado nas posições *ON* ou *OFF*. Na posição *ON* a imagem produzida apresenta contornos enfatizados enquanto que na posição *OFF* são obtidas imagens de contornos mais suaves.

A título de comparação, as Figuras 4.10 (a) e (b), apresentam os resultados produzidos por diferentes ajustes. As imagens correspondem a dias diferentes, mas em semelhante condição de céu. Nestas imagens observa-se uma região clara próxima da posição solar, que identifica a presença de nuvens, e uma região escura, o céu livre de nuvens. Na imagem (a), com a chave na posição *AGC* ligada, não é possível identificar a região circunsolar; já na imagem (b), com o interruptor *AGC* desligado e com o sinal de vídeo linearmente proporcional à intensidade de luz incidente, a região circunsolar é bem definida.

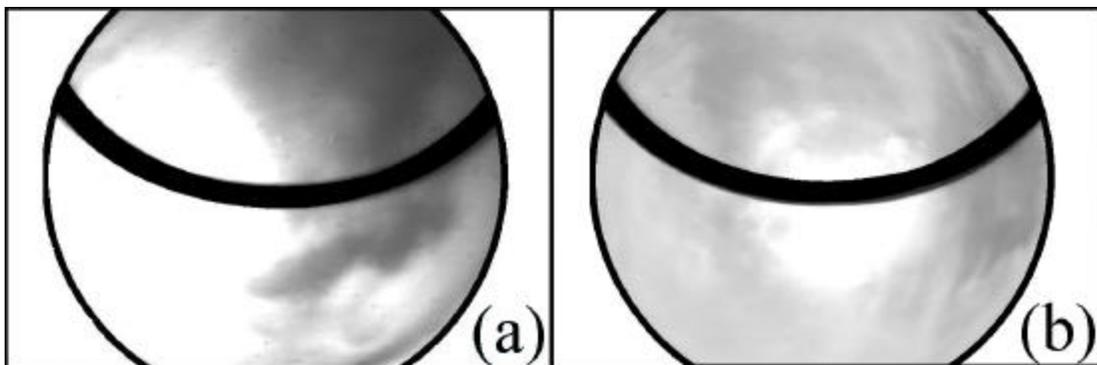


Figura 4.10 – Imagens, produzidas por diferentes ajustes do interruptor *AGC*, em condições atmosféricas semelhantes: (a) interruptor ligado: 13 / 12 / 2000 às 16 h e 30 min;  
(b) interruptor desligado: 12 / 12 / 2000 às 15 h e 30 min;

### 4.3.3 LENTE GRANDE ANGULAR

Acoplada à câmera, emprega-se uma lente grande angular *Pentax Cosmicar - CCTV*, modelo *TS213*. Este conjunto produz uma imagem circular com abertura avaliada por geometria. O ajuste da lente ao corpo da câmera apresentou dificuldades. Como resultado, a distância da lente ao sensor não foi adequada para projetar toda a imagem. Além disso, o eixo central da lente não coincide com o centro do sensor. Por exemplo, numa imagem do hemisfério celeste, o centro da imagem não corresponde ao zênite. Para determinar corretamente o centro da imagem estabeleceu-se um círculo padrão, cujo raio é de 318 pixels. Este círculo corresponde às dimensões da figura que seria observada, caso a lente projetasse toda a imagem no sensor da câmera CCD. Esta análise é significativa, principalmente quando se deseja estabelecer a posição exata do zênite em condições de céu parcialmente nublado.

## 4.4 AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE IMAGENS

A equipe do Laboratório de Energia Solar realizou uma série de testes prévios para avaliar o comportamento do sistema de aquisição de imagens. Dentre estes testes destacam-se: (1) análise do comportamento geométrico do conjunto lente/câmera; (2) análise do comportamento do sistema de aquisição de imagens frente às diferentes condições atmosféricas e de luminosidade.

### 4.4.1 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO GEOMÉTRICO

Inicialmente estudou-se o comportamento geométrico do conjunto lente/câmera, com os seguintes objetivos: (1) verificar experimentalmente a deformação da imagem; (2) determinar o ângulo de visão para o conjunto lente/câmera; (3) estabelecer a geometria de interceptação da radiação difusa deste equipamento.

A Figura 4.11 representa o procedimento experimental empregado para determinar a deformação da imagem com o afastamento do ponto central e o ângulo de visão do conjunto lente/câmera. A deformação de uma imagem com o afastamento do ponto central é obtida analisando-se a imagem produzida para objetos simples, dispostos num plano normal ao eixo central da lente grande angular.

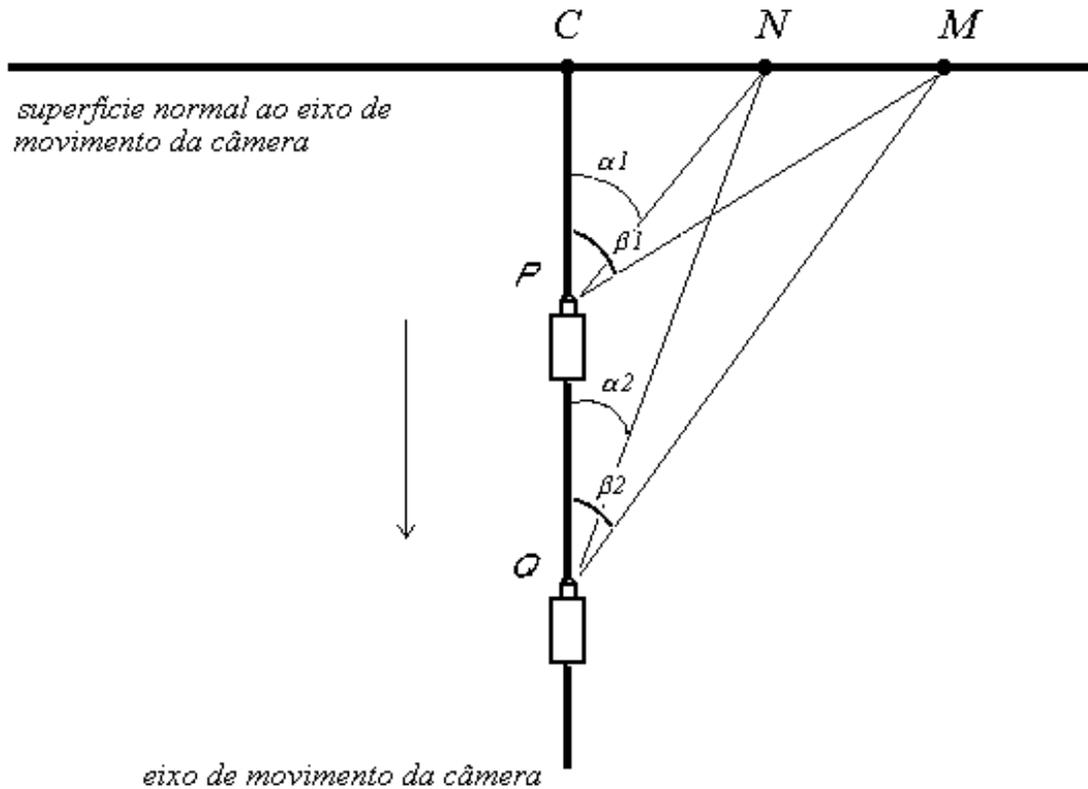


Figura 4.11 - Esquema do teste empregado para verificação da geometria da imagem.

A câmera é colocada num ponto  $P$ , situado num eixo que permita os movimentos de avanço e recuo. Em frente à câmera, observa-se uma superfície, normal ao seu eixo de deslocamento. A partir de uma primeira imagem, define-se o ponto central  $C$ , igual para todas imagens, independente da posição da câmera no eixo central. A distância entre a câmera e o ponto central,  $CP$  é, então, medida. Também se mede a distância entre o ponto central e um ponto arbitrário  $N$ , pertencente à superfície normal ao eixo da câmera. Os ângulos  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  são medidos para diferentes posições da câmera, isto é,

$$\alpha_1 = \tan^{-1} \left( \frac{CN}{CP} \right) \quad (4.1)$$

Novos pontos de referência são definidos, movendo-se a câmera para trás, de modo que

$$\alpha_2 = \tan^{-1} \left( \frac{CN}{CQ} \right) \quad (4.2)$$

De maneira análoga, determina-se o ângulo de visão produzido pelo conjunto lente/câmera. Para isso, mede-se a distância correspondente ao máximo afastamento do ponto central que representa o limite de visão da câmera. Assim,

$$\mathbf{b}_1 = \tan^{-1}\left(\frac{CM}{CP}\right) \quad (4.3)$$

Os valores obtidos são testados, definindo-se novos pontos de referência, ou seja,

$$\mathbf{b}_2 = \tan^{-1}\left(\frac{CM}{CQ}\right) \quad (4.4)$$

Após diversas medidas, constatou-se que para um mesmo ângulo,  $\mathbf{a}_2$  ou  $\mathbf{b}_2$ , corresponde um mesmo número de *pixels* na imagem capturada. Os objetos apresentam uma diminuição de tamanho em função do afastamento da câmera, mas mantendo a proporcionalidade. Por outro lado, os resultados obtidos com o afastamento do ponto central, medido na superfície normal ao eixo de movimento da câmera, permitem concluir que até um ângulo, de  $55^\circ$  as formas dos objetos não oferecem distorções significativas. A partir deste ângulo, poderá ser introduzido um fator de correção.

Os resultados obtidos nestas análises também demonstram que o ângulo de visão do conjunto lente/câmera é de  $130^\circ$ . Isso significa que a região situada abaixo do ângulo de  $25^\circ$  não aparece na imagem. A Figura 4.12 representa a geometria de interceptação da radiação difusa, de acordo com as características do equipamento.

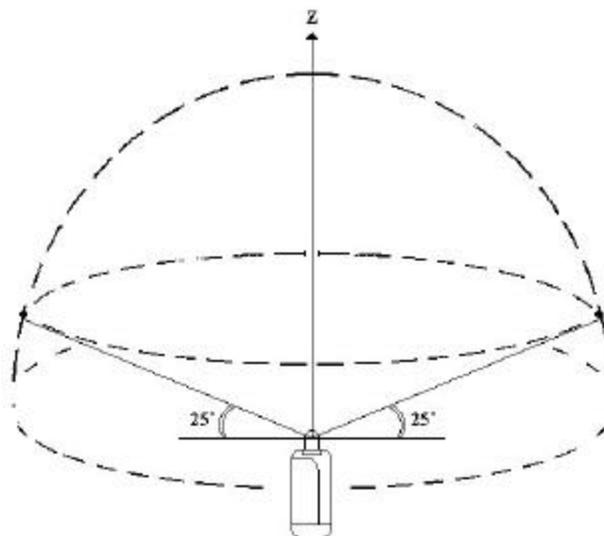


Figura 4.12 – Ângulo de visão do conjunto lente/câmera.

#### 4.4.2 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA CÂMERA CCD SOB AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DO CÉU

Uma outra classe de testes está relacionada às imagens produzidas pela câmera e seu comportamento sob diferentes condições atmosféricas e de luminosidade. Tais estudos visavam a calibrar a câmera, relacionando uma magnitude obtida diretamente do CCD, como tensão ou nível de cinza, a uma magnitude radiométrica, como a irradiância solar difusa. Desta forma, os diferentes níveis de cinza deveriam representar diferentes valores de irradiância, válidos para qualquer dia com qualquer condição de nebulosidade.

Nestes testes, os interruptores da câmera permaneceram ajustados nas condições originais de fábrica. Assim, o interruptor *AGC* realizava ajustes automáticos de acordo com as condições de luminosidade do dia.

Primeiramente estudou-se a relação entre o tom de cinza na região do zênite e a radiação incidente. Para medir a intensidade da radiação, na região do zênite, foi empregado um pireliômetro com sensor fotovoltaico, que produz uma tensão elétrica proporcional à irradiância [Rocha, F. J. M., 1992]. A Figura 4.13 mostra o gráfico *Tom de cinza x Tensão*, resultante de 500 imagens em diferentes condições atmosféricas. A cada *pixel* da imagem é atribuído um valor de *RGB*, entre 0 e 255, que identifica o tom de cinza. Neste caso, o valor refere-se apenas ao pixel que corresponde ao zênite. Observa-se que em condições de céu limpo, o tom de cinza varia linearmente com a tensão resultante no pireliômetro. Em dias encobertos existe uma dependência com a posição solar, velocidade das nuvens, entre outros fatores. Um procedimento análogo foi empregado para estudar o comportamento em outras regiões do hemisfério celeste.

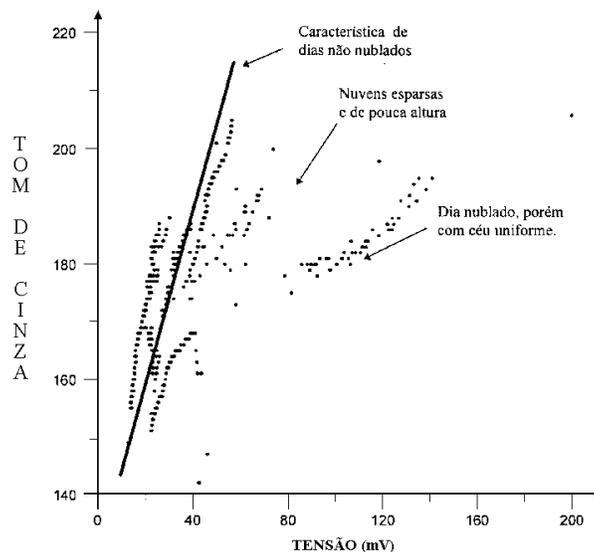


Figura 4.13 – Variação do tom de cinza com a tensão (irradiância), sob diferentes condições de nebulosidade, com o interruptor *AGC* ligado.

A Figura 4.14 mostra o gráfico *Tom de cinza x Tensão*, resultante de 50 imagens nas condições de céu limpo e céu nublado, medido com o pireliômetro com sensor fotovoltaico. O conjunto de medidas foi realizado durante o dia 20 de Novembro de 1995. A câmera e o pireliômetro apontaram para regiões do almucantar<sup>1</sup>, centradas num ângulo de zênite de 45°. Observa-se que, em condições de céu limpo, os níveis de cinza variam menos do que em condições de céu nublado.

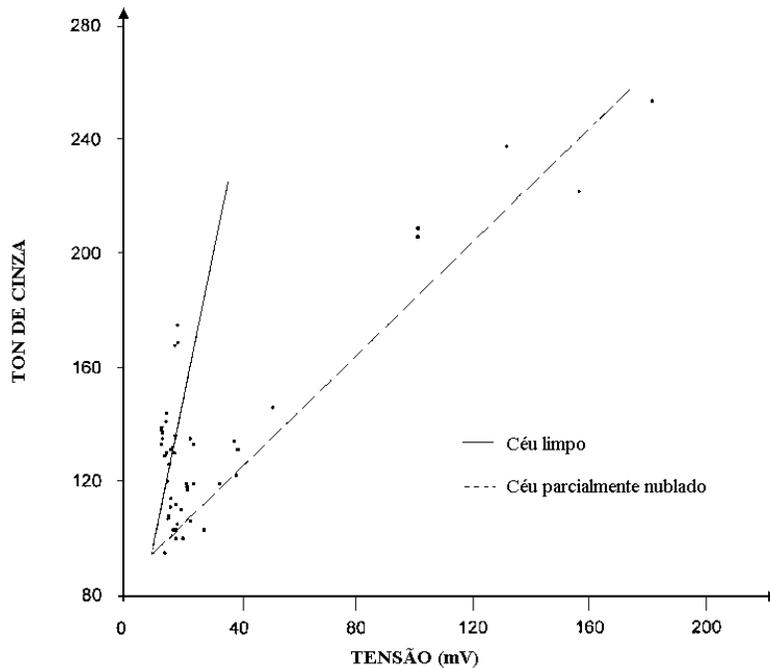


Figura 4.14 – Variação do tom de cinza com a tensão (irradiância), sob condições de céu limpo e de céu parcialmente nublado, com o interruptor *AGC* ligado.

Os resultados obtidos e apresentados nos gráficos das Figuras 4.13 e 4.14 indicam que a utilização do controle automático de ganho representa uma desvantagem, pois exige tratamento diferenciado de acordo com a condição atmosférica. Verificou-se uma grande complexidade para estabelecer uma relação entre um nível de cinza e um valor de irradiância, válido para qualquer condição de nebulosidade.

Parte desta complexidade pode ser avaliada pela necessidade de introduzir-se diferentes fatores de correção, dependendo das condições de luminosidade do dia. O maior problema está relacionado aos dias parcialmente nublados.

<sup>1</sup> - almucantar de um astro é o pequeno círculo da esfera celeste, paralelo ao horizonte, que contém o astro; o plano do almucantar é paralelo ao plano do horizonte do observador.

Para solucionar estes problemas optou-se por: (1) manter o interruptor *AGC* na posição *OFF* e ajustar os demais interruptores de controle interno para obter uma imagem de contornos bem definidos; (2) empregar um piranômetro fixo a um suporte com anel de sombra e submetido ao mesmo ângulo de visão da câmera para realizar medidas da irradiância solar difusa, correspondente à mesma região do hemisfério celeste que aparece na imagem.

#### 4.5 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DE IRRADIÂNCIA SOLAR

O sistema de aquisição de dados de irradiância é composto por dois piranômetros e têm por objetivo fornecer medidas de radiação solar em superfícies com orientação horizontal. A irradiância global é medida em todo o hemisfério celeste. Os valores de irradiância global, correspondente a cada arquivo de imagem, servem como um parâmetro para analisar a fração de irradiância difusa presente em determinada condição de medida.

Por outro lado, a irradiância solar difusa é medida na região correspondente ao ângulo de visão da câmera. Para isso emprega-se, junto ao suporte de sustentação do instrumento, um anel de sombra e um aro horizontal que limita o ângulo de visão do piranômetro. Nas medidas realizadas sob condição de céu encoberto opaco, tanto o anel de sombra da câmera CCD quanto o do piranômetro, são retirados. Os valores de irradiância difusa, associados a cada arquivo de imagem, são empregados no cálculo da intensidade direcional.

O piranômetro *Eppley* modelo *PSP*, com fator de calibração de  $9,93 \mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ , é empregado na medida da radiação global. O piranômetro *Kipp and Zonen* modelo *CM11*, com um fator de calibração de  $4,75 \mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ , realiza as medidas da radiação difusa. O modelo *CM11* é apropriado para medidas da radiação solar na faixa de comprimentos de onda entre  $0,3 \mu\text{m}$  a  $2,8 \mu\text{m}$ . Nas aplicações atmosféricas, o sinal de saída varia de 0 a 10 mV. A Figura 4.15 mostra um esquema com as dimensões do instrumento e sua fotografia.

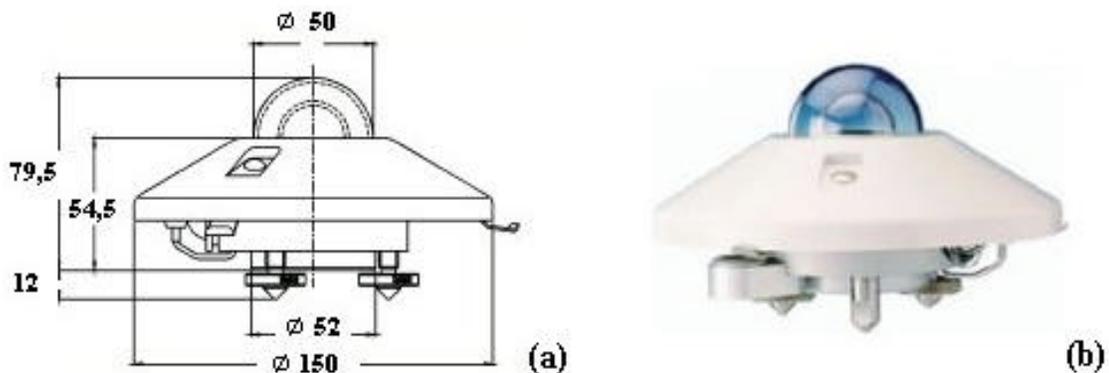


Figura 4.15 – Piranômetro *Kipp and Zonen* modelo *CM11*.

Tabela 4.2 – Especificações dos instrumentos de medida de irradiância solar

<b>(a) Piranômetro Kipp and Zonen CM11</b>	
<b>Utilização:</b> medida da radiação difusa com anel de sombra <i>CM121</i>	
Sensibilidade ( $\mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	4 - 6
Estabilidade (%)	$\pm 0,8$
Erro máx. p/ variações na temperatura ambiente (%)	$\pm 2,0$
Linearidade (%)	$\pm 0,5$
Resposta co-seno ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	$\pm 10$
Tempo de resposta (s)	< 5
<b>(b) Piranômetro Eppley PSP</b>	
<b>Utilização:</b> medida da radiação global	
Sensibilidade ( $\mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	9
Impedância (Ohms)	650
Erro máx. p/ variações na temperatura ambiente (%)	$\pm 1$
Linearidade (%)	0,5
Resposta co-seno a 20 °C (%)	$\pm 1$
Tempo de resposta (s)	1 s

#### 4.5.1 UTILIZAÇÃO DO ANEL DE SOMBRA COMO TÉCNICA DE MEDIDA DA IRRADIÂNCIA SOLAR DIFUSA

O método direto com uso de anel de sombra, como o próprio nome indica, emprega um aro que encobre todo o caminho do Sol, no hemisfério celeste. São dados importantes, o raio e a largura do anel de sombra. A Figura 4.3 mostra um tipo de suporte com anel de sombra.

A Figura 4.16 representa a geometria para a instalação do anel de sombra. Observa-se que para a instalação de um anel de sombra deve-se, inicialmente, regular o suporte de modo que o plano do anel fique paralelo ao plano equatorial. A inclinação do anel deve ter um ângulo  $f$  entre o plano Norte/Sul e o Zênite. O ângulo  $f$  é igual à latitude local.

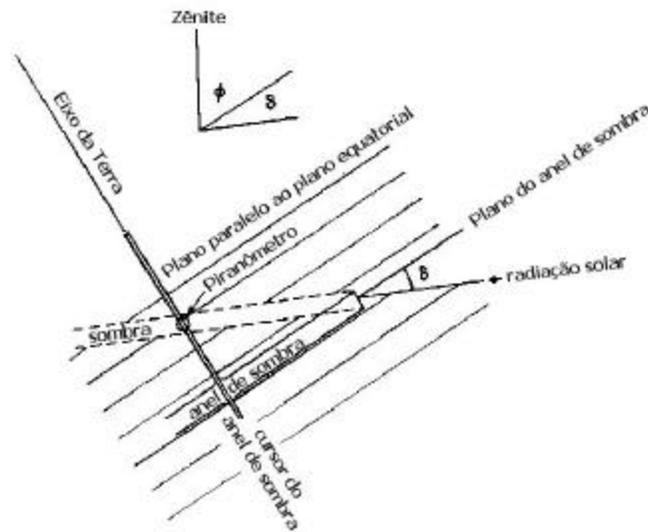


Figura 4.16 – Geometria de instalação do anel de sombra.

Quando se utiliza o método de sombreamento por anel, deve-se cuidar para que os raios solares não atinjam nem o sensor nem a cúpula de vidro. Para o bom desempenho desta técnica, é preciso observar a cúpula externa do piranômetro, que não deve refletir a radiação direta do disco solar. O método também exige ajustes regulares na orientação do anel de sombra, para evitar que parte da radiação circunsolar atinja o sensor, devido à variação da declinação solar. Tais ajustes dependem das dimensões do anel, do tamanho do piranômetro e do período do ano. Por exemplo, nos dias próximos ao solstício, a declinação solar varia mais lentamente, propiciando as menores correções na orientação do anel. Ambos os suportes, empregados neste trabalho necessitam dos mesmos ajustes, pois têm as mesmas dimensões.

O método de sombreamento por anel é muito empregado por sua simplicidade, praticidade e baixo custo. Entretanto, essa técnica normalmente subestima os valores medidos, pois o anel também cobre parte do céu, fonte extensa de radiação difusa. Pelo mesmo motivo observa-se uma dependência com a anisotropia da radiação difusa.

Na literatura encontram-se muitos trabalhos que tratam de fatores de correção para anéis de sombra [Lebaron, B. A. et al., 1980; Batlles, F.J., et al., 1995]. Geralmente, os trabalhos que apresentam fatores de correção baseiam-se em medidas da radiação global e em medidas da radiação difusa nas duas técnicas diretas, isso é, com disco e com anel de sombra. Quando se utiliza um anel de sombra ou um disco, a irradiância difusa “verdadeira” é determinada pela soma entre a irradiância difusa medida e a irradiância difusa bloqueada pelo anel de sombra. Assim, para um anel de sombra, escreve-se:

$$I_d = I_{Ad} + I_{As} \quad (4.5)$$

onde  $I_{Ad}$  é o valor de irradiância difusa medida por meio da técnica que emprega um anel de sombra, conforme representa o subíndice  $A$  e  $I_{As}$  é a fração de irradiância difusa bloqueada pelo anel de sombra.

A Equação (4.5) pode ser reescrita para determinar um fator de correção,  $f_c$ , referente ao método do anel, ou seja,

$$I_d = I_{Ad} \left( 1 + \frac{I_{As}}{I_{Ad}} \right) = I_{Ad} \cdot f_c \quad (4.6)$$

Mas a irradiância difusa,  $I_d$ , provém de todo o hemisfério celeste, com exceção do ângulo sólido subentendido pelo disco solar. Considera-se que o método direto com uso de disco fornece uma medida, cujo valor é:  $I_{\mathbf{O}} \cong I_d$ . Logo, o fator de correção pode ser determinado experimentalmente, pela relação,

$$f_c = \frac{I_{\mathbf{O}}}{I_{Ad}} \quad (4.7)$$

Por outro lado, a fração da radiação difusa interceptada pelo anel de sombra pode ser obtida teoricamente, determinando-se a componente vertical do fluxo de radiação difusa interceptada pelo anel de sombra, ou seja,

$$dF_d = \int_{\mathbf{W}} i_d \cdot \cos \mathbf{q} \cdot d\mathbf{W}_A \quad (4.8)$$

onde  $i_d \cdot \cos \mathbf{q}$  é a componente vertical da intensidade da radiação difusa e  $d\mathbf{W}_A$  é o ângulo sólido devido a um elemento de área do anel de sombra.

A geometria de interceptação da radiação solar fornece a equação:

$$d\mathbf{W}_A = \frac{L_A}{R_A} \cdot \cos^3(\mathbf{d}) \cdot d\mathbf{w} \quad (4.9)$$

onde  $L_A$  é a largura do anel de sombra e  $R_A$  é o seu raio. O anel utilizado nas medidas de irradiância difusa têm  $L_A = 0.043$  m e  $R_A = 0,25$  m. A declinação,  $\mathbf{d}$ , pode ser calculada pela fórmula empírica de Spencer:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{d} = & (0,006918 - 0,399912 \cdot \cos \mathbf{G} + 0,070257 \cdot \sin \mathbf{G} \\
 & - 0,006758 \cos 2 \mathbf{G} + 0,000907 \sin 2 \mathbf{G} \\
 & - 0,002697 \cos 3 \mathbf{G} + 0,00148 \sin 3 \mathbf{G}) \cdot (180 / \mathbf{p})
 \end{aligned}
 \tag{4.10}$$

onde  $\mathbf{G}$  é chamado ângulo do dia, sendo obtido por

$$\mathbf{G} = \frac{2\mathbf{p}(n_d - 1)}{365}
 \tag{4.11}$$

A Figura 4.17 mostra a variação de declinação durante o ano. Os valores de  $\mathbf{d}$  apresentados neste gráfico foram determinados pela Equação (4.10). A expressão de Spencer, escrita na forma da Equação (4.10), fornece valores em graus, devido ao último termo, com uma incerteza máxima de avaliada em 0,0006 rad, isto é,  $< 3'$ .

Substituindo-se a Equação (4.9) em (4.8), resulta numa expressão para a correção geométrica, escrita como

$$\mathbf{DF}_d = \frac{L_A}{R_A} \cdot \cos^3(\mathbf{d}) \int_{-w_o}^{w_p} i_d \cdot \cos \mathbf{q}_Q \cdot d\mathbf{w}
 \tag{4.12}$$

onde os limites de integração correspondem aos ângulos horários da alvorada,  $w_o$ , e do poente,  $w_p$ . Para determinar  $w_p$ , emprega-se a equação que permite calcular o ângulo de zênite solar, fazendo-se  $\mathbf{q}_M = 90^\circ$ , ou seja,

$$w_p = \cos^{-1}(\tan \mathbf{F} \cdot \tan \mathbf{d})
 \tag{4.13}$$

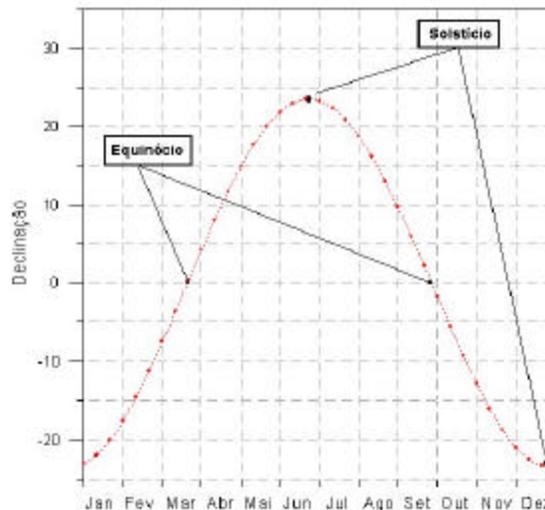


Figura 4.17 - Variação da declinação durante o ano, de acordo com a fórmula de Spencer.

Drummond, A. J., 1956, considerou uma distribuição de intensidade isotrópica e resolveu a correção geométrica para estimar a fração de radiação difusa bloqueada pelo anel. Assim,

$$DF_d = \frac{2L_A}{pR_A} \cdot \cos^3 d \cdot \left[ \frac{p}{180} w_p \cdot \sin f \cdot \sin d + \cos f \cdot \cos d \cdot \sin w_p \right] \quad (4.14)$$

$w_p$  é o ângulo horário no poente, com todos os ângulos dados em graus. Para condições isotrópicas, o fator de correção é calculado por:

$$f'_d = \frac{1}{1 - DF_d} \quad (4.15)$$

Painter, H. E., 1981 mediu a radiação global e a radiação difusa pelo dois métodos diretos, empregando três piranômetros *Kipp and Zonen CM2*. Comparando uma série de medidas e considerando as suas condições particulares, Painter foi capaz de estabelecer uma correção adicional na expressão de Drummond.

Ineichen, P. et al., 1984, empregaram três piranômetros *Kipp and Zonen, tipo CM5*, e compararam a radiação difusa estimada por diversos trabalhos [Drummond, A. J., 1956, entre outros] com valores medidos entre 1º de julho de 1980 a 30 de junho de 1981 em Genebra - Suíça. Considerando as condições particulares de medida, os autores concluíram que os modelos podem ser empregados para corrigir a irradiância difusa medida pela técnica do anel de sombra. Entretanto, os parâmetros meteorológicos levam a flutuações médias diárias da ordem de 5 %, afetando a estimativa diária do fator de correção.

Kudish, A. I. e Ianetz, A., 1993, empregaram piranômetros *Kipp and Zonen, tipo CM11* para estudar a importância da anisotropia da radiação difusa na determinação dos fatores de correção. Os resultados foram apresentados como fatores de correção de média mensal horária, determinados por diversos autores. Os resultados mostraram que a correção geométrica obtida por Drummond nem sempre é suficiente. Os fatores de correção para a anisotropia dependem da estação do ano e do lugar onde são realizadas as medidas.

O efeito de fatores adicionais, tais como: a resposta co-seno, a anisotropia, entre outros, são difíceis de serem determinados por uma equação empírica, uma vez que dependem de diversos fatores. Por essa razão, muitos trabalhos que empregam a técnica do anel de sombra, utilizam apenas o fator de correção geométrica, desenvolvido por Drummond. Tal procedimento também é adotado neste trabalho.

Portanto, determinam-se os valores de irradiância solar difusa empregando-se unicamente o fator de correção geométrica, proposto por Drummond. Assim, substituindo-se as Equações (4.14) e (4.15) na Equação (4.7), obtém-se

$$I_{od} = \frac{I_{Ad}}{1 - \left( \frac{2L_A}{\rho R_A} \cdot \cos^3 d \cdot \left[ \frac{\rho}{180} \cdot \mathbf{w}_p \cdot \text{sen } \mathbf{f} \cdot \text{sen } \mathbf{d} + \cos \mathbf{f} \cdot \cos \mathbf{d} \cdot \text{sen } \mathbf{w}_p \right] \right)} \quad (4.16)$$

onde  $I_{od}$  é o valor de irradiância que seria obtido numa medida onde o disco solar é coberto.

#### 4.5.2 DETERMINAÇÃO DO ÂNGULO SÓLIDO DA IMAGEM

O ângulo sólido total da imagem,  $\mathbf{W}_r$ , pode ser calculado pelas características do sistema experimental, isto é, a partir dos dados do anel de sombra e do ângulo de visão da lente. A Figura 4.18 representa o esquema para a determinação de  $\mathbf{W}_r$ , num certo dia do ano.

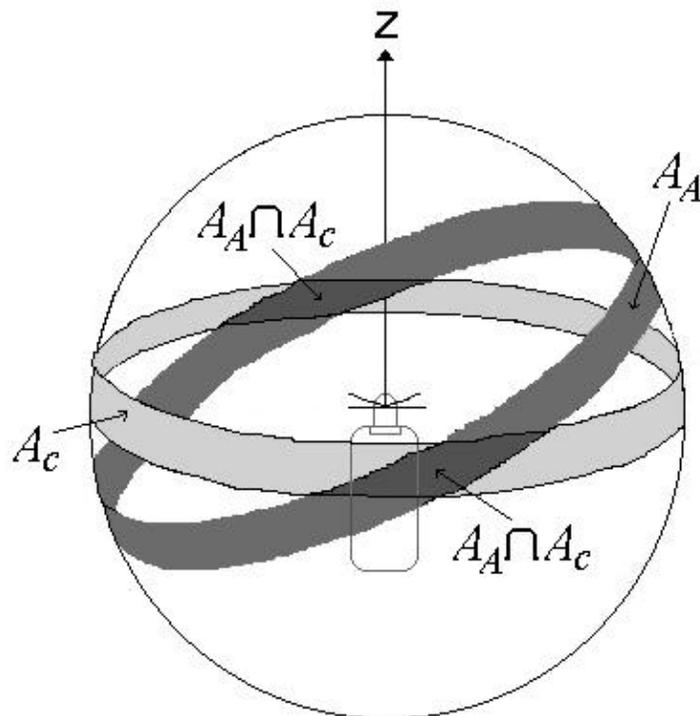


Figura 4.18 – Esquema para determinação do ângulo sólido.

O ângulo sólido total da imagem é dado por:

$$\mathbf{W}_T = \mathbf{W}_H - \mathbf{W}_c - \mathbf{W}_A + 2\mathbf{W}_{A \cap c} \quad (4.17)$$

onde  $\mathbf{W}_H$  é o ângulo sólido de um hemisfério, ou seja,  $2p$ ;  $\mathbf{W}_A$  é o ângulo sólido subentendido pelo anel de sombra;  $\mathbf{W}_c$  é o ângulo sólido que não é visível pela imagem, devido às propriedades do conjunto lente/sensor;  $\mathbf{W}_{A \cap c}$  é o ângulo sólido da intersecção entre o anel de sombra e a área não-visível pela lente, que é duplamente descontado, como mostra a Figura (4.18).

O ângulo de visão da câmera, que corresponde a  $(\mathbf{W}_H - \mathbf{W}_c)$ , é calculado por:

$$\mathbf{W}_H - \mathbf{W}_c = \int_{g=0}^{2p} \int_{q=\frac{5p}{36}}^{\frac{p}{2}} \text{sen } \mathbf{q} \, d\mathbf{q} \, d\mathbf{g} \quad (4.18)$$

onde o limite inferior da integral interna corresponde ao limite de visão da câmera, em  $\mathbf{q}$  que corresponde ao ângulo de  $5\pi / 36$  radianos, ou seja,  $25^\circ$ .

O ângulo sólido subentendido pelo anel é dado resolvendo-se a Equação (4.9). Separando-se o dia em dois turnos e considerando-se a dupla intersecção entre o anel de sombra e a parte não-visível da imagem ou a existência da cobertura horizontal, escreve-se:

$$\mathbf{W}_A - 2 \cdot \mathbf{W}_{A \cap c} = \frac{L_A}{R_A} \cdot \cos^3(\mathbf{d}) \cdot \left[ \int_{w_s}^{\frac{p}{2}} d\mathbf{w} + \int_0^{w_p} d\mathbf{w} \right] \quad (4.19)$$

onde  $w_s$  é o ângulo horário, na alvorada, imediatamente acima do aro horizontal e  $w_p$  ângulo horário, no poente, imediatamente acima do aro horizontal. Substituindo-se as Equações (4.18) e (4.19) na Equação (4.17), resulta

$$\mathbf{W}_T = \int_{g=0}^{2p} \int_{q=\frac{5p}{36}}^{\frac{p}{2}} \text{sen } d\mathbf{q} \, d\mathbf{g} - \frac{L_A}{R_A} \cdot \cos^3(\mathbf{d}) \cdot \left[ \int_{w_s}^{\frac{p}{2}} d\mathbf{w} + \int_0^{w_p} d\mathbf{w} \right] \quad (4.20)$$

A Figura 4.19 mostra a variação do ângulo sólido da imagem produzida pelo sistema experimental com o dia do ano. Observa-se que o ângulo sólido resultante é máximo no solstício de inverno e mínimo durante os equinócios.

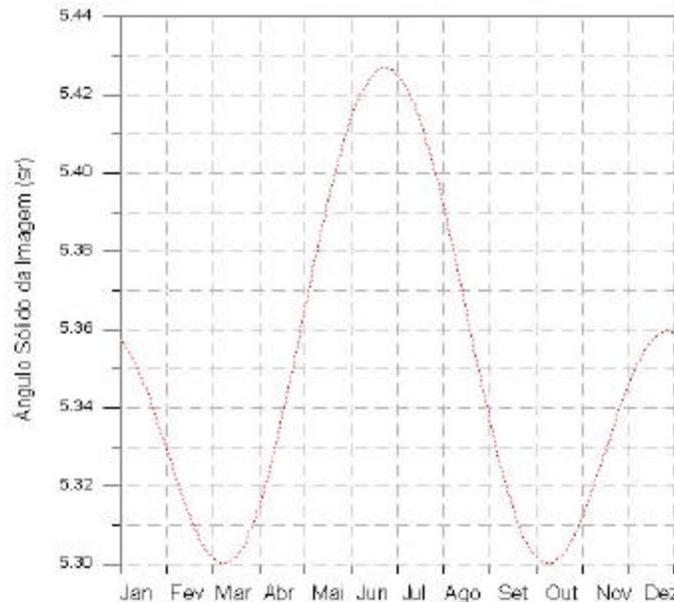


Figura 4.19 – Variação do ângulo sólido de todo o hemisfério celeste, coberto por um anel de sombra, ao longo de um ano.

#### 4.6 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Como sistema de aquisição dos dados de radiação difusa emprega-se o equipamento *HP34970A*, uma unidade de aquisição com uma placa multiplexadora de 20 canais. As imagens captadas pelo sensor da câmara são passadas para um computador via placa digitalizadora de imagens. O *software* de aquisição produz imagens que podem ser representadas por matrizes de 768 x 512. Originalmente, estas imagens são de 8 bits por pixel e 256 tons de cinza.

A aquisição é formada pelos seguintes dados: medida da radiação global, medida da radiação difusa e imagem do hemisfério celeste. As medidas de cada conjunto de dados são realizadas a cada 15 minutos, o que representa um deslocamento solar inferior a 4° e um tempo suficiente para capturar as diferenças na configuração do céu, durante o dia.

#### 4.7 ANÁLISE DE INCERTEZAS ASSOCIADAS AO SISTEMA EXPERIMENTAL

Todo valor numérico que representa o resultado final de uma medição tem uma incerteza associada. Esta incerteza é inerente ao trabalho experimental e sua determinação deve levar em conta todos os fatores que influíram, direta ou indiretamente, na medição.

A incerteza de uma medição é o resultado de uma série de erros que podem ocorrer durante o processo de medição. De acordo com sua origem, os erros são classificados como sistemáticos ou aleatórios. Brevemente pode se dizer que os erros sistemáticos ocorrem devido às imperfeições dos instrumentos e do processo de medição. Os erros sistemáticos, quando não podem ser corrigidos, podem ser determinados. Já os erros aleatórios são mais difíceis de perceber, pois como o nome indica, têm variações aleatórias. O tratamento de erros desta natureza tem como base os cálculos estatísticos. Assim, em qualquer processo de medição, é fundamental identificar as possíveis fontes de erros sistemáticos e aleatórios.

Neste trabalho são identificadas algumas das possíveis fontes de erros sistemáticos:

- (1) erros nas medidas de irradiância difusa, devido aos instrumentos de medida;
- (2) erros nas medidas de irradiância difusa provocados pelo método de medida;
- (3) regulagem inadequada da câmera;
- (4) posicionamento de cada um dos anéis de sombra;
- (5) relação entre as posições dos anéis de sombra;
- (6) posicionamento da cobertura horizontal do piranômetro;
- (7) posicionamento da câmera CCD;
- (8) discrepância entre as regiões espectrais medidas pelo piranômetro e pela câmera;
- (9) transmitância da lente grande angular;

Também existem diferentes fontes de erros aleatórios, como por exemplo:

- (10) influência das condições ambientais;
- (11) as incertezas na medida dos instrumentos, devido à existência de ruídos eletromagnéticos;
- (12) erros causados pela incerteza do comportamento espectral;
- (13) possíveis diferenças entre o tempo de medida da irradiância solar difusa e ao tempo de captura da imagem do céu.

Após a identificação das principais fontes de erros, é importante avaliar as possíveis correções. Assim, das fontes de erros anteriormente citadas: (1), (2) podem ser determinadas respectivamente, pelas especificações dos instrumentos e por correções das técnicas de medida adotada; (3) a (7) são erros passíveis de correção mediante ajustes dos equipamentos de medida; (8) pode ser estimado mediante o conhecimento do comportamento espectral dos sensores CCD, sendo pouco significativo, uma vez que na metodologia proposta são empregados apenas valores globais; (9) representa um erro pouco significativo, uma vez que o seu valor é pequeno frente aos erros anteriormente citados; (10) pode ser eliminado observando-se a temperatura na qual a câmera tem seu funcionamento garantido e a umidade relativa; finalmente, os erros aleatórios são de difícil determinação, entretanto seus valores são pequenos frente a outros possíveis erros.

Pode se concluir que o erro que têm maior influência no trabalho está relacionado à técnica de medida da irradiância solar difusa, que normalmente subestima os valores medidos. Entretanto, sua influência é diminuída, uma vez que a câmera utiliza um anel de sombra com as mesmas características. As correções, referenciadas na Equação (4.12), são dispensadas no caso da determinação das distribuições relativas, onde interessam apenas as relações entre os valores de tons de cinza.

No Apêndice encontra-se uma sucinta análise quantitativa dos erros aqui comentados e daqueles decorrentes da análise das imagens na metodologia descrita no Capítulo 5.

## CAPÍTULO 5

### METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE INTENSIDADE DIRECIONAL DA RADIAÇÃO DIFUSA CELESTE

A metodologia proposta neste trabalho baseia-se no processamento de imagens digitais monocromáticas do hemisfério celeste. Cada imagem analisada tem, no máximo, 16 níveis de cinza, correspondentes a um certo valor de radiância. A redução de níveis de cinza em imagens do hemisfério celeste permite caracterizar qualitativamente uma distribuição de intensidade, na forma de mapas de contorno, conforme as discussões do Capítulo 4.

Para validar a metodologia proposta, demonstra-se neste capítulo, como obter valores numéricos de tal distribuição. Empregando-se um ambiente de programação (como por exemplo, o *Matlab 5.3* ou o *Visual Basic 5.0*) é possível desenvolver uma rotina para estabelecer matrizes que representem numericamente a configuração instantânea do céu. Assim, é possível associar a cada imagem de 16 níveis de cinza: (1) a irradiância global medida; (2) a irradiância difusa medida; (3) uma matriz numérica com os valores de *RGB* de cada elemento *pixel* formador da imagem; (4) a distribuição de intensidade direcional da radiação difusa celeste.

#### 5.1 IMAGENS HEMISFÉRICAS

As imagens hemisféricas têm como principal vantagem propiciar o estudo de uma vasta área do hemisfério celeste. Por este motivo, são largamente empregadas, para diversos estudos meteorológicos [Syrjäso, M., 1996]. Nas pesquisas relacionadas à radiação solar estas imagens são úteis para obtenção de mapas de distribuições de nuvens [Seiz, G. e Baltsavias, M., 2001]; para analisar sua influência nos estudos de radiação [Beyer, H., et al., 1994] ou ainda para estudar as partes visíveis do céu [Wagner, S., 1998] em aplicações voltadas à agricultura.

### 5.1.1 ORIENTAÇÃO DA IMAGEM HEMISFÉRICA

Para compreender o diagrama obtido neste tipo de imagem é preciso conhecer os aspectos geométricos envolvidos no problema e suas implicações. A Figura 5.1 (a) representa o plano do caminho do Sol, em função da hora do dia e da estação, na cidade de Porto Alegre, onde a latitude,  $\mathbf{f}$ , é igual a  $30^\circ S$ . A posição solar varia em função da latitude,  $\mathbf{f}$ , de modo que, nos equinócios a altura de culminação do Sol é igual à co-latitude do lugar,  $90^\circ - \mathbf{f}$ , enquanto que nos solstícios a altura de culminação é igual à co-latitude do lugar somada ao ângulo de declinação, com  $\delta = \pm 23,5^\circ$ . Na Figura 5.1 (b), observa-se o caminho do Sol no hemisfério celeste, numa determinada época do ano, e sua projeção no plano horizontal. Também se observam os ângulos de azimute e de zênite solar, além do almucantar, isto é, o círculo paralelo ao plano do horizonte do observador que intercepta o astro.

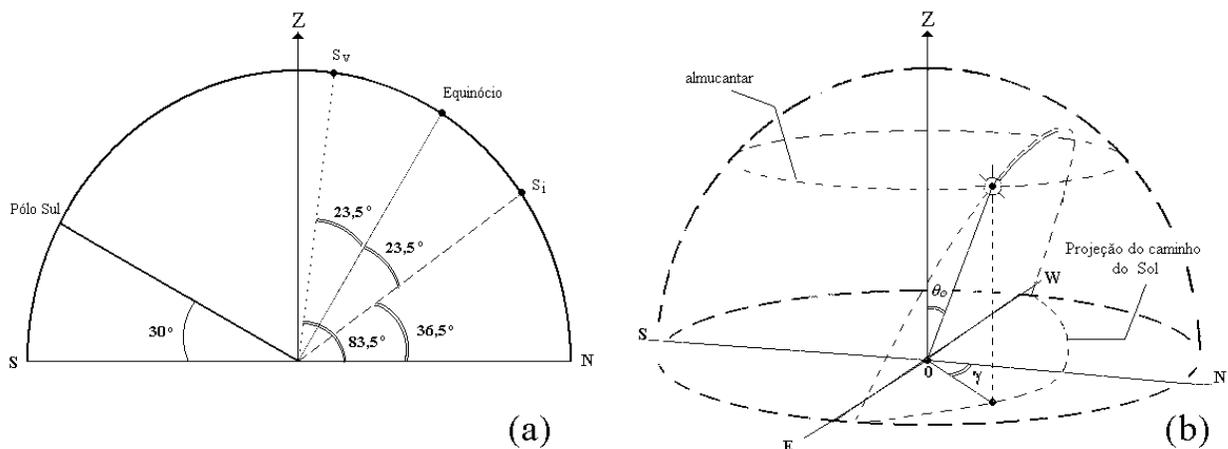


Figura 5.1 – Representações do caminho do Sol no hemisfério celeste, na cidade de Porto Alegre, numa determinada época do ano: (a) plano do caminho do Sol, em função da hora do dia e da estação; (b) caminho do Sol no hemisfério celeste e sua projeção no plano horizontal.

A Figura 5.2 mostra a orientação dentro do hemisfério celeste com a identificação das direções. A imagem hemisférica fornece uma visão da abóbada celeste dirigida no sentido de baixo para cima. Em consequência, observa-se que o diagrama obtido neste tipo de imagem apresenta uma inversão entre as direções Norte e Sul, ou entre as direções Leste e Oeste. Neste trabalho, optou-se por posicionar a câmera CCD de modo a manter a coerência com o deslocamento solar horário. Obviamente que um adequado tratamento de imagens através de rotações permite alterar o diagrama.

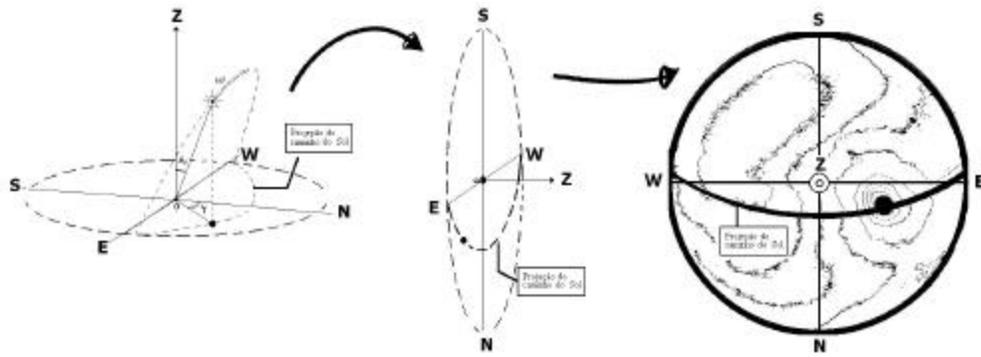


Figura 5.2 – Orientação da imagem hemisférica.

### 5.1.2 DIAGRAMA SOLAR

A Figura 5.3 mostra a projeção vertical, *PV*, e a projeção horizontal, *PH*, do movimento diurno aparente do Sol no equinócio e no solstício com sua divisão em horas. Em relação ao plano horizonte do observador, plano horizontal, segue que: na *PV* é representado por um segmento de reta paralela à linha da Terra, cujo comprimento é igual ao diâmetro da esfera celeste; enquanto que na *PH* é representado por um círculo de raio igual ao raio da esfera celeste. Para o plano do meridiano do observador, plano frontal, verifica-se que: na *PV* é representado um círculo de raio igual ao da esfera celeste; na *PH* é representado por um segmento de reta paralelo à linha da Terra, de comprimento igual ao raio da esfera celeste.

Na *PV* o Equador celeste forma um ângulo  $f$ , igual à latitude do lugar, com a vertical do lugar, sendo representado por uma reta. A  $-23,5^\circ$  e a  $+23,5^\circ$  do Equador estão duas retas paralelas que contém os pontos solsticiais.

Na *PH* a projeção do equador é uma elipse, cujo eixo maior é igual ao diâmetro da esfera celeste e cujo eixo menor é dado pela projeção dos pontos onde o círculo do equador intercepta o meridiano do observador.

Tanto à projeção vertical quanto à projeção horizontal podem apresentar os pontos correspondentes a respectiva hora do dia, considerando-se o tempo solar verdadeiro. O meio dia solar é representado pela interseção da trajetória aparente com o meridiano do observador. Para obter os valores restantes, basta considerar o arco que representa a quarta parte da trajetória solar aparente na esfera celeste e efetuar a sua subdivisão em 6 partes iguais, com  $15^\circ$  cada parte. Deve-se observar que na *PV* a reta que representa este arco não aparecerá igualmente dividida. Existem outras maneiras de obter pontos para representar a hora do dia, considerando, por exemplo, os almucantares na *PH*.

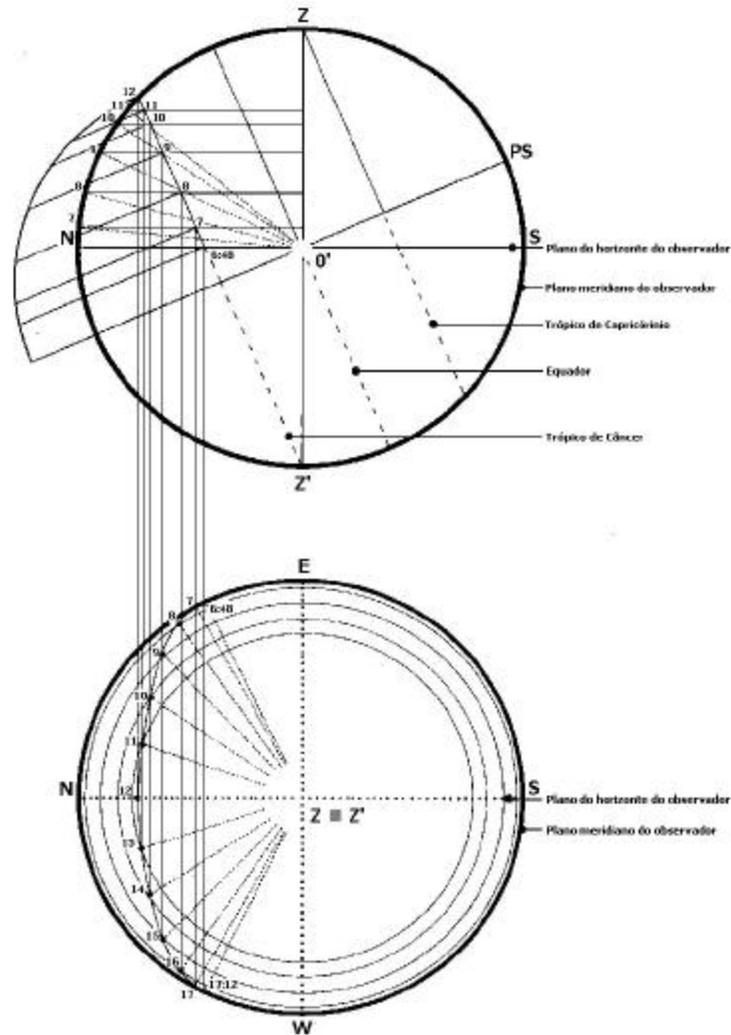


Figura 5.3 – Projeções do movimento diurno aparente do Sol ao longo do ano.  
(a) projeção vertical, *PV* e (b) projeção horizontal, *PH*.

O gráfico de alturas do Sol determina, em cada ponto da trajetória solar aparente, a altura em relação ao plano do horizonte do observador. A altura solar, em determinado instante, pode ser representada por qualquer ponto do almucantar. Na *PV* os almucantares são representados por retas paralelas ao eixo do pólo; enquanto que na *PH* são representados por círculos concêntricos. Na projeção horizontal, pode-se construir o gráfico de azimutes do Sol, através de retas que passam pelo centro da circunferência e interceptam os pontos que representam as horas.

As projeções vertical e horizontal são empregadas para a construção de cartas solares [Hand, 1948]. Este tipo de gráfico é largamente empregado, devido à praticidade, facilidade de construção e quantidade de informações relevantes. A Figura 5.4 mostra o mapa solar sobreposto a uma imagem hemisférica. Na construção deste diagrama deve-se levar em conta que as orientações Norte e Sul da imagem hemisférica está invertida.

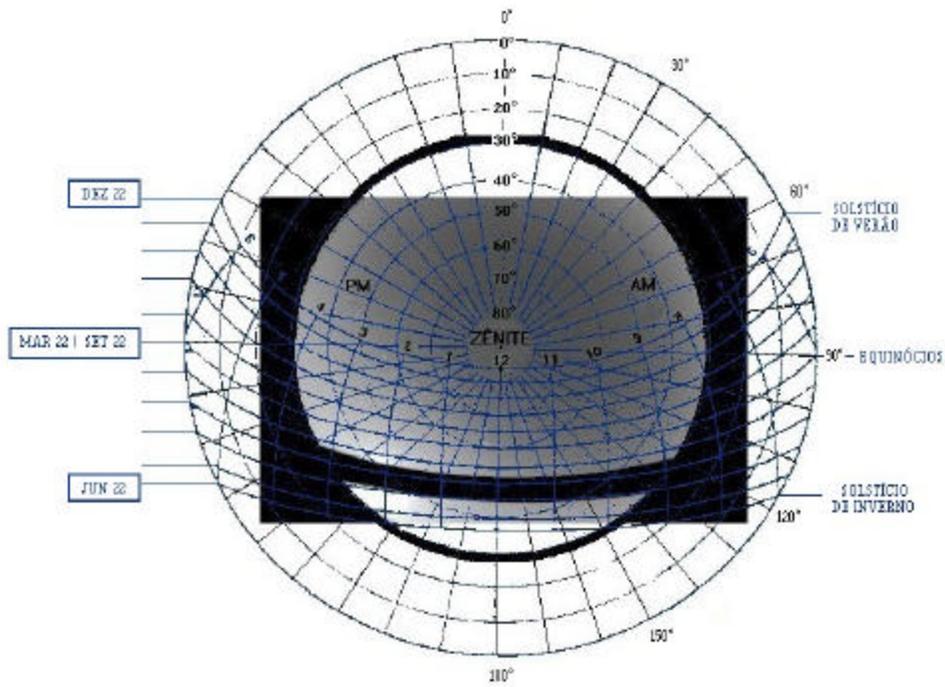


Figura 5.4 – Mapa solar.

### 5.1.3 DETERMINAÇÃO DO ÂNGULO SÓLIDO DE UMA REGIÃO DA IMAGEM

De acordo com o Capítulo 4, o ângulo sólido total da imagem,  $W_f$ , pode ser calculado a partir das características do anel de sombra e do ângulo de visão da lente. Por outro lado, para determinar o ângulo sólido de uma parte qualquer do hemisfério celeste é necessário subdividir a imagem em seções. Uma das maneiras é empregar um sistema de coordenadas polares para localizar qualquer posição dentro da imagem, e assim, estabelecer uma malha com regiões de mesmo ângulo sólido. Também é possível determinar o ângulo sólido de cada pixel, de acordo com a sua posição dentro da imagem. Neste caso deve-se estabelecer o plano secante, como mostra a Figura 5.5.

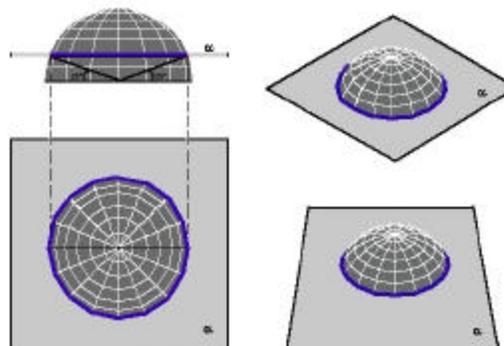


Figura 5.5 – Plano secante da imagem hemisférica.

Cada pixel é um elemento de área da imagem, cuja região retangular corresponde à projeção sobre o plano de uma certa região do hemisfério. De acordo com Figura 5.6 uma coluna ou uma linha de pixels é a projeção de um arco da superfície hemisférica e, portanto, cada pixel representa a área projetada sobre o plano pela intersecção de dois arcos. Observa-se que existe uma dependência entre a área projetada e a posição do pixel em relação ao centro da imagem.

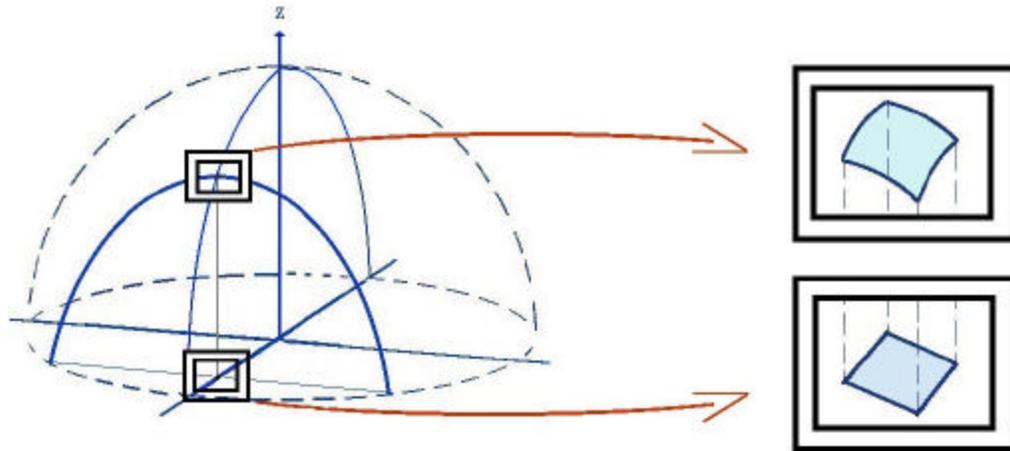


Figura 5.6 – Projeção de elementos de área da superfície de um hemisfério num plano.

A Figura 5.7 mostra como elementos de área da superfície de um hemisfério de raio unitário, projetam áreas iguais num plano, onde o ângulo sólido de cada região é escrito como

$$d\mathbf{W} = dS_H \tag{5.1}$$

A projeção de  $dS_H$  no plano é representada por

$$dS_C = dS_H \cdot \cos \mathbf{q} \tag{5.2}$$

isto significa que para  $\mathbf{q} = 0$  as áreas são iguais e para  $\mathbf{q} = \mathbf{p}/3$  a área do projetada sobre o plano corresponde à metade da área do hemisfério.

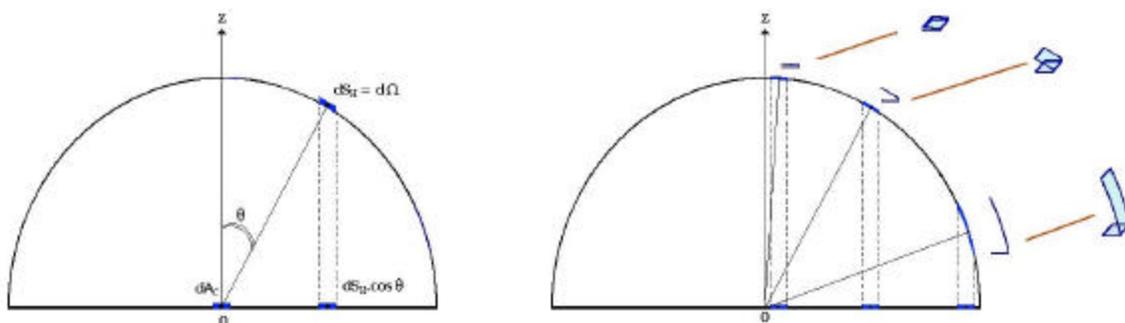


Figura 5.7 – Relação das áreas de um hemisfério que são projetadas no plano horizontal.

O ângulo sólido é obtido substituindo-se a equação (5.1) em (5.2).

$$d\mathbf{W} = \frac{dS_c}{\cos \mathbf{q}} \quad (5.3)$$

O ângulo de zênite pode ser determinado pela relação entre o número de pixels existentes entre sua posição e o centro da imagem, como representa a Figura 5.8. Escreve-se:

$$\mathbf{q} = \text{sen}^{-1} \left( \frac{d}{R} \right) \quad (5.4)$$

onde  $d$  é o número de pixels existentes entre a posição do pixel e o centro da imagem;  $R$  é o número de pixels no raio do hemisfério.

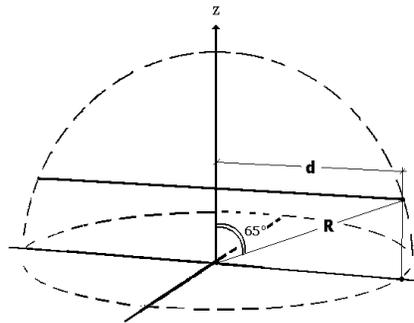


Figura 5.8 – Determinação do ângulo de zênite.

Substituindo-se a Equação (5.4) na Equação (5.3) e considerando que o pixel representa um elemento de área da imagem, escreve-se:

$$\mathbf{W}_i = S_c \cdot \frac{I}{\cos \left[ \text{sen}^{-1} \left( \frac{d}{R} \right) \right]} \quad (5.5)$$

Portanto quanto maior é a distância do pixel em relação ao centro da imagem maior é o ângulo sólido correspondente. O pixel da extremidade corresponde ao dobro do ângulo sólido de um pixel da região central. Finalmente determina-se o ângulo sólido de toda a imagem pelo somatório de cada pixel que compõe a imagem, isto é

$$\mathbf{W}_T = \sum_{i=1}^n \mathbf{W}_i \quad (5.6)$$

Desenvolveu-se um programa computacional para determinar o ângulo sólido de uma série de figuras, com o propósito de testar a validade da Equação (5.5). O objetivo é comparar as expressões obtidas analiticamente com os valores calculados pela soma dos ângulos sólidos de cada pixel da imagem. As Figuras 5.9 representam os padrões estabelecidos para as imagens hemisféricas e que podem ser facilmente calculados de forma analítica. A Figura 5.9 (a) apresenta a circunferência empregada como padrão.

A Figura 5.9 (b) mostra o círculo que corresponde às imagens, e que corresponde a uma região do hemisfério celeste, com o ângulo de zênite,  $q$  variando entre  $0$  e  $p/3$  e com o ângulo de azimute,  $g$  variando de  $0$  a  $2p$ . Neste caso, a determinação analítica do ângulo sólido total fornece  $W_T = p$ , enquanto que a Equação (5.5) permite obter  $W_T = 3.14367325144924$ , que representa uma diferença de 0,07 %.

A Figura 5.9 (c) mostra uma região onde  $q$  varia de  $0$  a  $p/3$  e  $g$  varia de  $0$  a  $p$ . De acordo com a expressão analítica  $W_T = p/2$ ; enquanto que a Equação (5.5)  $W_T = 1.56583713725414$ , o que representa uma diferença de 0,32 %.

A Figura 5.9 (d) corresponde a um aro com  $q$  variando entre  $0$  e  $7p/36$  e com o ângulo de azimute,  $g$  variando de  $0$  a  $2p$ . A expressão analítica fornece  $W_T = 2p(\cos(7p/36) - \cos(p/3))$ ; enquanto que com a Equação (5.5), obtém-se o valor 2.07926185786553, a diferença entre os valores é de, aproximadamente, 3,69 %. A maior diferença obtida neste último caso, se deve à dificuldade de se determinar a posição que corresponde a  $q = 7p/36$ , uma vez que esta posição não foi determinada pelo programa computacional, empregado para determinar os valores de  $W_T$ .

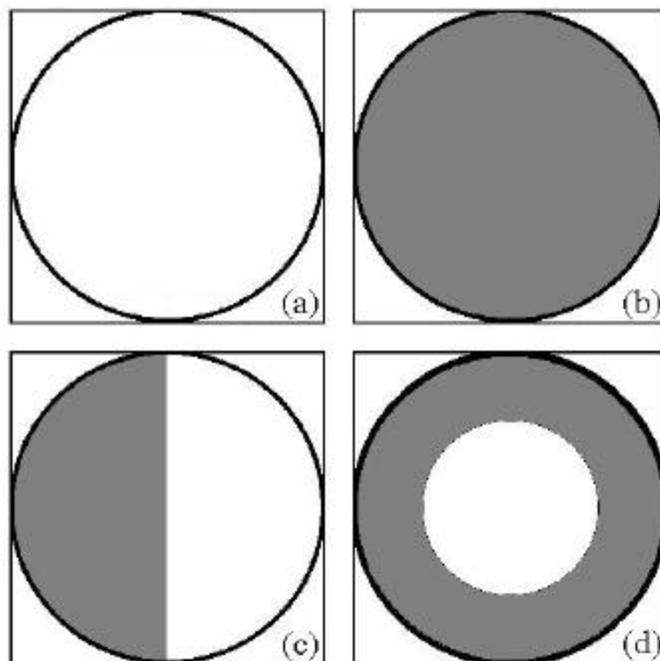


Figura 5.9 – Testes para uma circunferência padrão.

#### 5.1.4 PRÉ-PROCESSAMENTO DAS IMAGENS HEMISFÉRICAS

O procedimento estabelecido na etapa de pré-processamento consiste em atribuir o valor de  $RGB = 0$  para todo *pixel* que tenha  $RGB < C_0$ , onde  $C_0$  é o nível de cinza, cujo valor representa uma região escura da imagem. Este procedimento é realizado através de uma sub-rotina de um programa computacional. Desta forma, melhora-se a qualidade das imagens e diminui-se o tempo computacional, uma vez que nestas regiões não são aplicados os cálculos que permitem determinar o ângulo sólido, a distribuição de intensidade direcional, etc.

Este pré-processamento também melhora, podendo corrigir em alguns casos, a má definição da imagem que pode ocorrer na região próxima às bordas do anel de sombra e da câmera. A Figura 5.10 ilustra um exemplo deste efeito, observado próximo à borda do anel de sombra.

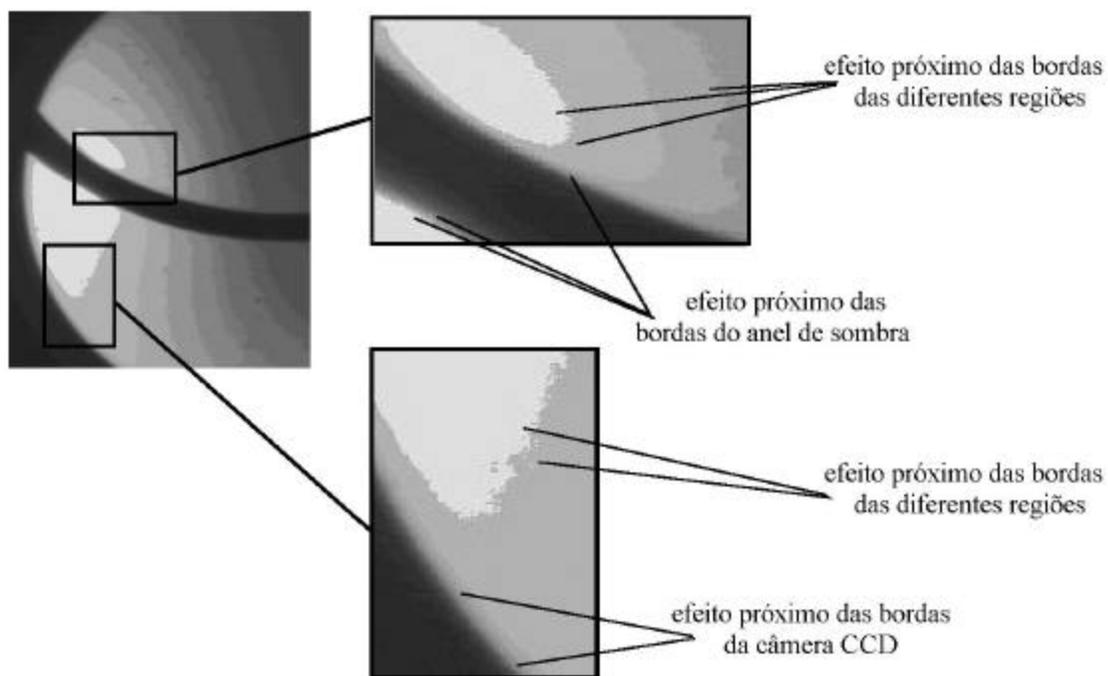


Figura 5.10 – Efeito de má definição próximo das bordas.

O maior problema de bordas é observado em dias parcialmente nublados, que apresentam uma grande quantidade de nuvens. Nestes casos, observam-se pequenas regiões de diferentes intensidades especialmente nas bordas das nuvens. Felizmente, na maioria dos casos, correspondentes às condições de céu limpo ou encoberto, os tons de cinza de cada região têm valores bem diferentes, o que permite estabelecer intervalos de  $RGB$  para cada região.

## 5.2 REDUÇÃO DOS NÍVEIS DE CINZA

De acordo com o Capítulo 3, a redução dos níveis de cinza permite caracterizar qualitativamente a distribuição de intensidade direcional do hemisfério celeste. Assim, os 256 níveis de cinza de cada imagem original são reduzidos para 16, proporcionando imagens com regiões características.

As Figuras 5.11 mostram imagens do céu, com a redução para os 16 níveis de cinza, sob diferentes condições de nebulosidade. Observa-se que as distribuições de intensidade são compatíveis com os aspectos qualitativos, teóricos e experimentais, das pesquisas apresentadas no Capítulo 2.

A Figura 5.11 (a) mostra um típico dia de céu limpo. Neste caso, a região em torno do Sol é bem definida, apresentando uma série de contornos circunsolares. Por outro lado, esta região é menos definida para ângulos de zênite solar extremos. Nos dias limpos, a região celeste, onde se observa a menor intensidade da radiação difusa, localiza-se numa distância angular de aproximadamente  $90^\circ$  da posição solar.

Conforme os estudos referenciados no Capítulo 2, os dias de céu nublado podem apresentar diferentes configurações, variando desde nuvens esparsas até céus completamente encobertos. A Figuras 5.11 (b) mostra a complexidade presente num dia de céu parcialmente nublado. Devido ao caráter aleatório da posição e do tipo de nuvens, não existe uma distribuição de intensidade característica. Neste caso particular, o céu encontra-se parcialmente encoberto por nuvens do tipo cúmulos; a posição solar pode ser identificada, mesmo com o Sol encoberto por uma nuvem. Por outro lado, a presença deste tipo de nuvens não permite distinguir a região circunsolar. A principal característica desta condição de nebulosidade é a anisotropia da distribuição direcional da radiação difusa.

A Figura 5.11 (c) apresenta um céu totalmente encoberto por uma camada nebulosa baixa, e acinzentada, designada por estratos. Geralmente este tipo de nuvem localiza-se a uma altura de 400 m. De acordo com a classificação, apresentada no Capítulo 2, trata-se de uma atmosfera dita não-opaca. Nesta condição, a região próxima ao disco solar é marcada por um aumento na distribuição de intensidade direcional relativa, evidenciando que existe uma dependência com a posição solar. Normalmente é possível a identificação de uma primeira região circunsolar, que é relativamente grande.

A Figura 5.11 (d) mostra um céu encoberto opaco, onde não existe dependência com a posição solar. Neste caso, a utilização do anel de sombra é dispensável. A isotropia deste tipo de céu depende apenas do tipo de nuvem.

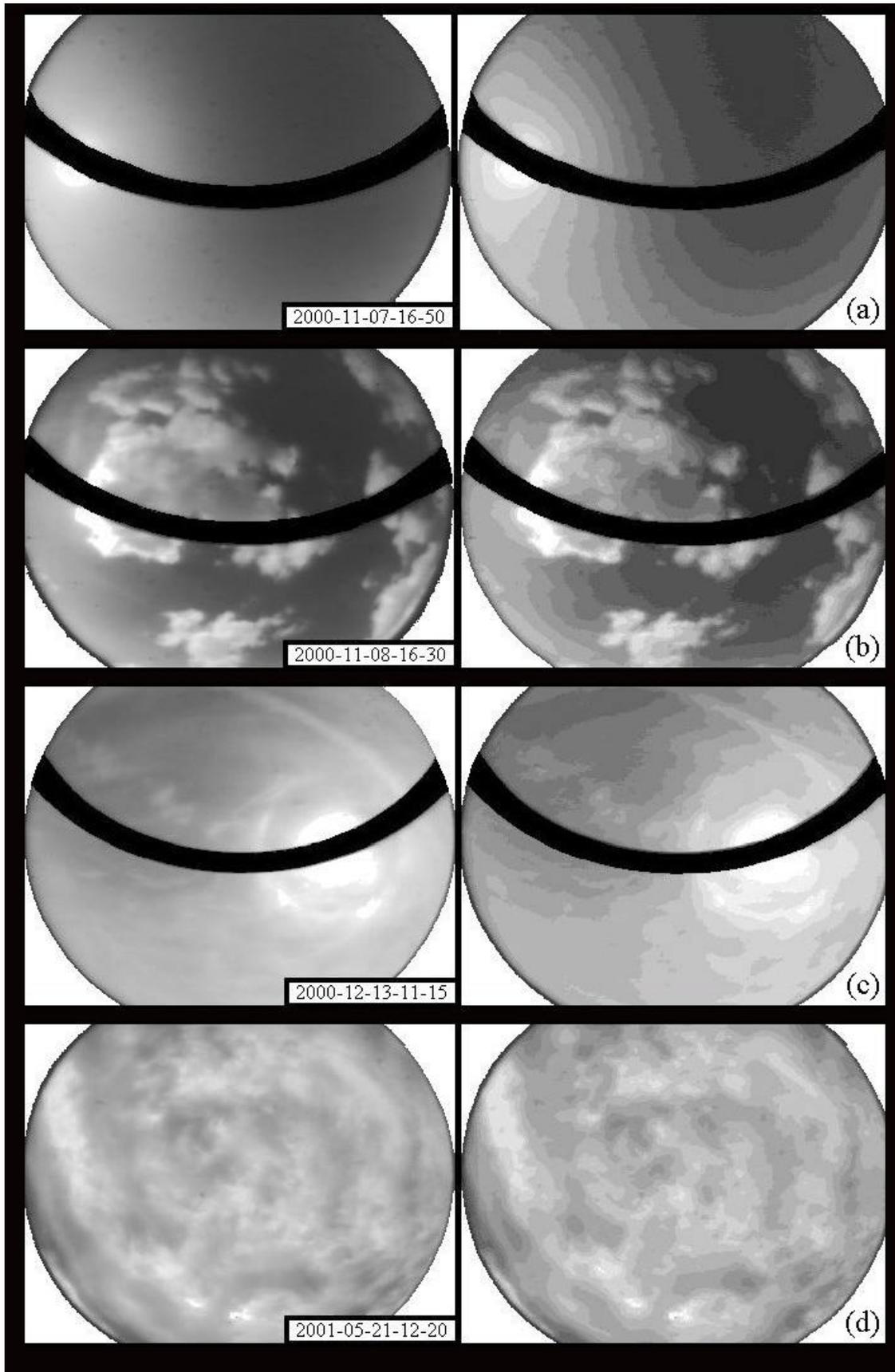


Figura 5.11 – Distribuição de intensidade sob diferentes condições de nebulosidade: (a) céu limpo; (c) céu parcialmente nublado; (d) encoberto não-opaco; (d) encoberto opaco.

### 5.3 MAPAS DE DISTRIBUIÇÃO DE INTENSIDADE RELATIVA

Numa primeira aproximação, é possível obter resultados de intensidade relativa, tal como foi apresentado em alguns exemplos do Capítulo 2 [Kondratyev, 1969, entre outros]. Neste caso, trabalha-se com os valores de *RGB*, que define cada cor por meio de índices relacionados, respectivamente, às cores vermelha (*R*), verde (*G*) e azul (*B*). Os tons de cinza têm índices iguais. Desse modo, basta conhecer o valor de *RGB* associado ao tom de cinza de cada região da imagem e dividir pelo valor de *RGB* do *pixel* que corresponde ao zênite. Assim, a região que compreende o zênite assume valor 1.

A distribuição de intensidade relativa corresponde a uma distribuição de intensidade na região de sensibilidade espectral do sensor da câmera CCD. Pode-se assumir que esta medida representa uma distribuição de luminância do hemisfério celeste, uma vez que não leva em conta nenhuma medida energética, como a irradiância solar difusa.

### 5.4 MAPAS DE DISTRIBUIÇÃO DE INTENSIDADE DIRECIONAL

O mapa de distribuição de intensidade direcional da radiação difusa é obtido usando-se toda a informação disponível associada a cada imagem. Estes mapas permitem que seja estabelecido o valor de intensidade para cada região do hemisfério celeste, fornecendo informações mais completas sobre a distribuição de intensidade.

Neste caso, a imagem é reconstruída manualmente com o auxílio de um *software* gráfico, devido à discrepância observada entre a região do hemisfério celeste onde é realizada a medida da irradiância solar difusa e a região da imagem que é formada no sensor CCD. A Figura 5.12 mostra o círculo padrão, empregado para reconstruir as regiões não observadas na imagem original. O diâmetro deste círculo tem o mesmo número de pixels que seria observado caso a lente projetasse toda a imagem no sensor da câmera CCD. No Capítulo 4, este procedimento foi mencionado como um procedimento que serve para determinar corretamente o centro da imagem.

Este método é necessário porque a determinação da distribuição de intensidade direcional envolve a medida do ângulo sólido de cada pixel e, além disso, relaciona o valor de irradiância solar difusa medido na região da imagem. A reconstrução da imagem introduz uma incerteza que pode ser significativa, dependendo das condições do dia. Esta incerteza é menor nos dias de céu limpo e nos dias de céu encoberto, quando são formadas grandes regiões de mesmo *RGB*.

Para determinação do número total de pixels estabeleceu-se uma imagem com um único nível de cinza, onde a distância do pixel analisado ao pixel pertencente ao centro da imagem, é inferior ao raio da circunferência padrão. Desta forma toda a imagem fica contida num círculo formado por 193205 pixels.

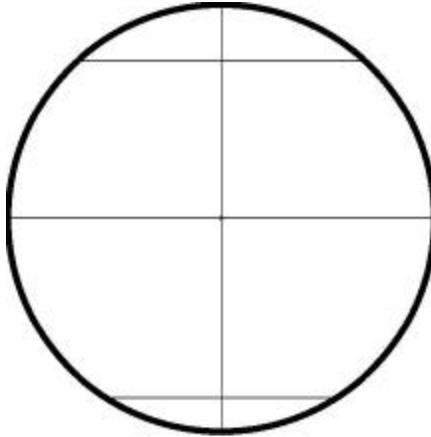


Figura 5.12 – Circunferência padrão com a marcação do posicionamento das imagens originais e localização do pixel central.

Para estabelecer uma relação entre a irradiância difusa medida,  $I_d$ , e a imagem capturada usou-se a soma dos elementos da matriz correspondente. Isto é possível porque, de acordo com o Capítulo 4, foi comprovado experimentalmente que há uma correspondência linear entre o brilho de cada pixel da imagem com a irradiância proveniente da mesma direção do céu. A cada valor de intensidade da radiação difusa corresponde um tom de cinza, isto é, a um valor de *RGB*, do *pixel*. Portanto, a intensidade de cada região do hemisfério celeste é diretamente proporcional ao tom de cinza da região,  $C_r$

$$i_r \propto C_r \quad (5.7)$$

Essa proporcionalidade torna-se uma igualdade, considerando-se que para cada imagem existe uma constante  $M$  associada, ou seja,

$$i_r = C_r \cdot M \quad (5.8)$$

A constante  $M$  é obtida pelo produto de dois fatores que caracterizam a imagem. Inicialmente, a imagem é produzida de acordo com certas condições, determinadas pelo sistema experimental. Cada imagem tem associado um valor que depende das condições do experimento e que resulta na medida da irradiância difusa, conforme o capítulo 5.

Por outro lado, deve-se levar em conta as características do arquivo de imagem, como o seu tamanho, valores de *RGB*, regiões de diferentes tons de cinza, etc. Assim, o valor de  $M$  é composto pelos valores de irradiância difusa, medidos dentro do ângulo sólido total da imagem, e pela razão entre o número total de pixels da imagem e o número de *pixels* correspondente a cada tom de cinza, ou seja,

$$M = \frac{I_d}{\mathbf{W}_T} \cdot \frac{n_T}{\sum_{r=1} n_r \cdot C_r} \quad (5.9)$$

onde  $I_d$  é a irradiância difusa medida numa região correspondente ao ângulo sólido da imagem;  $\mathbf{W}_T$  é o ângulo sólido da imagem, determinado pela Equação (5.5);  $n_r$  é o número de *pixels* da região e  $n_T$  é o número total de *pixels* da imagem. Substituindo-se a Equação (5.9) em (5.8) obtém-se a intensidade de cada região, isto é,

$$i_r = C_r \cdot \frac{I_d}{\mathbf{W}_T} \cdot \frac{n_T}{\sum_{r=1} n_r \cdot C_r} \quad (5.10)$$

## 5.5 INCERTEZAS ASSOCIADAS À METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DOS MAPAS DE DISTRIBUIÇÃO DE INTENSIDADE

É importante destacar que, neste trabalho, os mapas de distribuição de intensidade relativa, representam muito bem as condições de medida, relacionadas com a etapa de aquisição de imagens. Por outro lado, os mapas de distribuição de intensidade direcional representam uma estimativa, uma vez que regiões das imagens, foram reconstruídas. Em boa parte dos casos, tal reconstrução implica num aumento da incerteza. As maiores dificuldades estão associadas às imagens adquiridas sob condição de céu parcialmente nublado, onde se observam nuvens do tipo cúmulos cobrindo grandes regiões do hemisfério celeste.

Entretanto, a técnica de redução de níveis de cinza, permite uma boa definição do comportamento das regiões de uma imagem para as demais condições de nebulosidade, tanto nas regiões a serem reconstruídas quanto nas regiões cobertas pelo anel de sombra. No Apêndice apresenta-se uma análise quantitativa que permite avaliar a incerteza associada à metodologia, considerando-se o efeito da reconstrução das imagens.

## 5.6 ANEL DE SOMBRA

A imagem do anel de sombra é substituída por regiões que têm a mesma cor das bordas ou das regiões que são observadas atrás do anel. Nos dias de céu limpo, a região correspondente à posição solar é encoberta por um círculo negro. Nestes casos, o valor da irradiância solar difusa é corrigido pela expressão proposta por Drummond, conforme o Capítulo 4.

As imagens de céu encoberto opaco dispensam anel de sombra e por esta razão os valores de irradiância difusa não precisam ser corrigidos.

## 5.7 CÁLCULO DA IRRADIÂNCIA SOLAR DIFUSA

A irradiância difusa de uma determinada imagem monocromática do hemisfério celeste pode ser calculada através dos valores de intensidade e do ângulo sólido de cada região da imagem

$$I_{dC} = \sum_{r=1} \mathbf{W}_{i,r} \cdot i_r \quad (5.11)$$

onde  $\mathbf{W}_{i,r}$  é o ângulo sólido correspondente ao número total de pixels da região. Assim é possível comparar a irradiância solar difusa,  $I_{dC}$ , calculada a partir da Equação (5.11), com a irradiância solar difusa medida. A comparação entre os valores medidos e determinados pela Equação (5.11) permite avaliar quão boa foi a reconstrução da imagem do hemisfério celeste. De um modo geral, espera-se que as menores diferenças sejam observadas em condições de céu limpo, pois neste caso a distribuição de intensidade é previsível, o que torna mais fácil reconstruir as regiões que não aparecem na imagem. Pelas mesmas razões, o mesmo resultado é esperado nas condições de céu encoberto opaco e não-opaco. Por outro lado, as maiores discrepâncias entre os valores são esperadas em condições de céu parcialmente nublado, onde é muito difícil estimar o comportamento da distribuição de intensidade, nas regiões a serem reconstruídas.

## 5.8 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE NEBULOSIDADE

A determinação do ângulo sólido para cada pixel permite calcular o ângulo sólido de cada região de diferentes níveis de cinza. Uma das possíveis aplicações desta metodologia de cálculo

do ângulo sólido é determinação do índice de nebulosidade. Neste caso, basta identificar o nível ou os níveis de cinza correspondentes às regiões com nuvens. A determinação do índice de nebulosidade é então calculada por:

$$N = 100 \cdot \frac{W_r}{W_T} \quad (5.12)$$

onde  $W_r$  é obtido pelo somatório dos ângulos sólidos de todos os *pixels* que compõem a região dos níveis de cinza que identificam as nuvens;  $W_T$ , representa o somatório dos ângulos sólidos de todos os *pixels* da imagem, conforme a Equação (5.6). Portanto

$$N = 100 \cdot \left( \frac{\sum_{i=1}^k W_{ri}}{\sum_{i=1}^n W_i} \right) \quad (5.13)$$

nestas equações o índice de nebulosidade é dado em %.

A Figura 5.13 mostra a representação de um céu parcialmente nublado, onde são empregados apenas dois níveis de cinza: a região sem nuvens tem  $C_r = 64$  enquanto que as nuvens assumem o valor de  $C_r = 240$ .

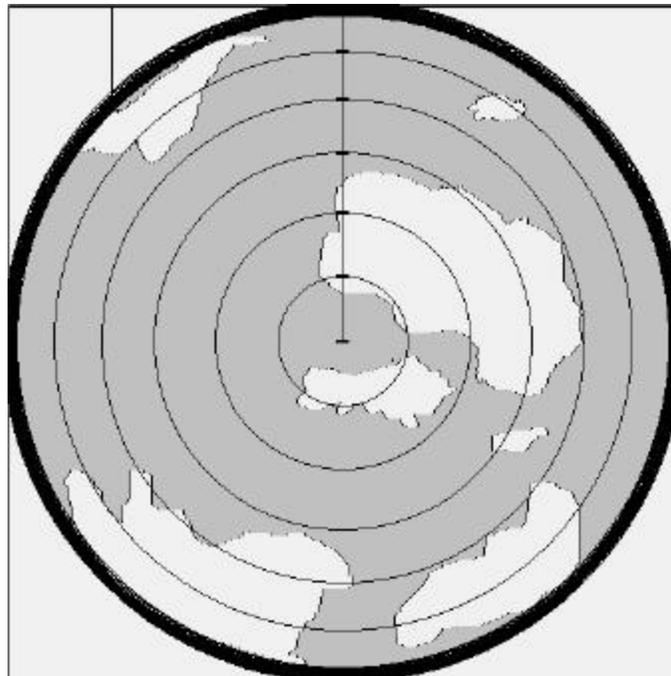


Figura 5.13 – Determinação do índice de nebulosidade num exemplo de céu nublado.

## 5.9 PROGRAMA COMPUTACIONAL

Para facilitar o trabalho de cálculo e a visualização de resultados, desenvolveu-se uma ferramenta que permite, entre outras realizações: (a) o cálculo da intensidade relativa, (b) o cálculo da intensidade direcional da radiação difusa celeste; (c) a determinação do índice de nebulosidade; (d) a visualização dos mapas de contorno.

O programa foi desenvolvido em *Visual Basic 5.0* e sua aplicação é especificamente orientada para o trabalho com as imagens hemisféricas desta pesquisa. Suas funções têm por objetivo a gravação e a observação de imagens e dos dados associados a estas imagens.

O programa suporta imagens no formato *TIFF (uncompressed)* e grava imagens no formato *BMP*. A tarefa de exibição permite a observação da imagem original, do mapa de distribuição de intensidade com os respectivos tons de cinza, do mapa de contorno. A definição de setores do hemisfério celeste, dado pelo plano secante, permite a localização das regiões da imagem pela determinação do ângulo de zênite.

Para obtenção dos valores de intensidade relativa, o único dado de entrada é o próprio arquivo de imagem, que é convertido numa matriz numérica, cujos elementos representam os valores de RGB de cada pixel. Por outro lado, para a determinação da intensidade direcional da radiação difusa, além do arquivo de imagem são necessários outros dados de entrada. Alguns destes dados estão relacionados com os valores medidos, como a irradiância solar difusa; outros dados de entrada, como a latitude, o número do dia e as dimensões do anel de sombra, servem para a determinação do fator de correção, devido à utilização da técnica do anel de sombra.

Outra tarefa importante, realizada pelo programa, refere-se à gravação de arquivos contendo dados das imagens. Inicialmente, realiza-se a leitura do arquivo de imagem, com extensão *TIFF*, onde são extraídos os dados numéricos. Deste processo resulta a gravação de um arquivo contendo os dados da matriz numérica da imagem. Após o trabalho de análise, é possível gravar um arquivo com os diferentes resultados dos cálculos.

Alguns dados de interesse são exibidos na tela, permitindo uma rápida avaliação dos resultados. Antes do programa executar os cálculos, são exibidos os níveis de cinza associados às imagens hemisféricas. Após a realização dos cálculos são exibidos os resultados associados a cada um destes níveis de cinza presentes na imagem, ou seja: os valores de *RGB*; os valores de intensidade direcional (d) os ângulos sólidos associados a cada *RGB* da imagem. O programa também exibe o ângulo sólido total, a irradiância difusa, resultante dos cálculos para comparação com os valores medidos e a determinação do índice de nebulosidade.

A Figura 5.14 mostra as funções que compõem a interface do programa computacional. Observa-se que a tela de apresentação é dividida em três áreas: a primeira contém os comandos que permitem realizar a análise das imagens; a segunda exibe dados numéricos referentes aos resultados obtidos para cada arquivo de imagens; a terceira área mostra o resultados gráficos.

Na área que contém os comandos estão disponíveis as principais funções do programa. Inicialmente, apresentam-se as funções de entrada, contendo os comandos *Gerar Arquivo* e *Iniciar*, funções de gerar uma matriz numérica que pode ser gravada no disco rígido e fornecer uma análise prévia das imagem, respectivamente.

As funções de exibição das imagens permitem apresentar tanto a imagem original quanto os mapas de tons de cinza e mapas de contorno. Os mapas de tons de cinza apresentam todos os tons de cinza da imagem, onde às regiões de fronteira podem ser reforçadas, fazendo-se *RGB* igual a zero. Os mapas de contorno exibem as isolinhas, isto é, mostram apenas as regiões de contorno da imagem hemisférica. Neste caso, os pixels pertencentes às regiões de fronteira e a circunferência correspondente ao ângulo de visão da câmera, têm  $RGB = 0$ , enquanto que os demais pixels têm  $RGB = 255$ . Todas as imagens exibidas podem ser gravadas no disco rígido no formato *BMP*.

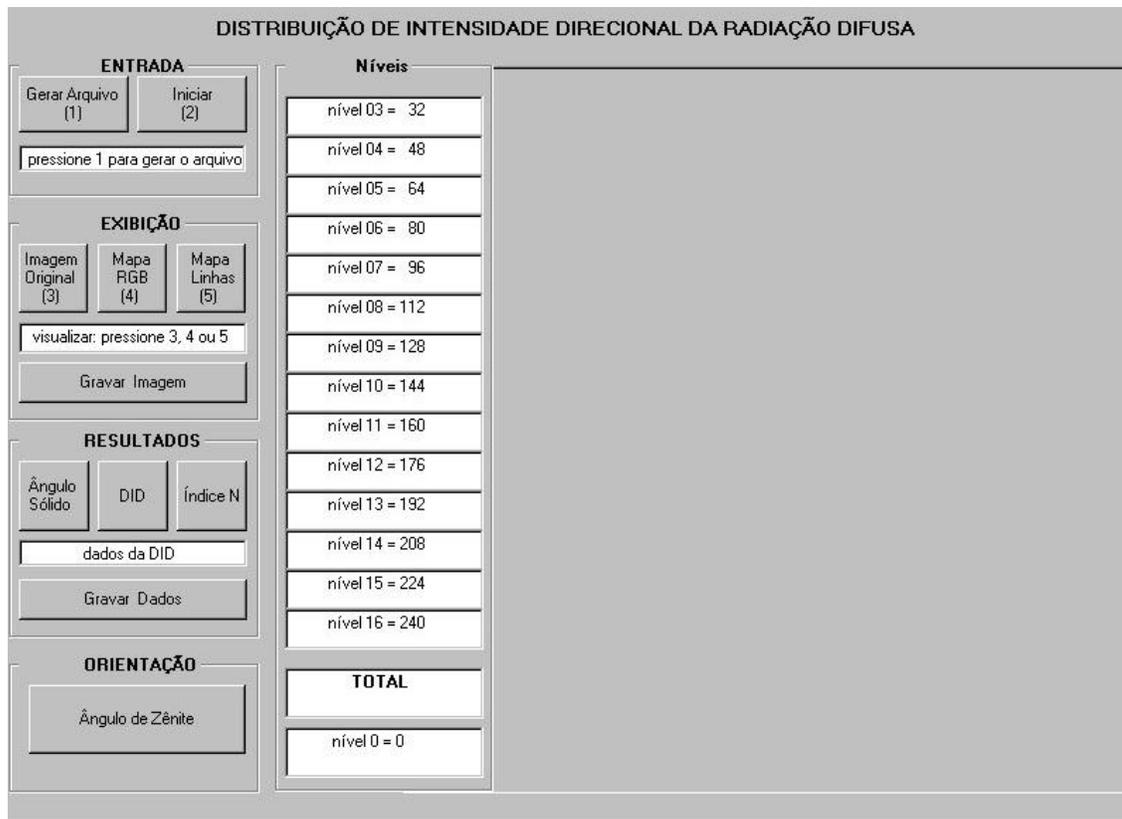


Figura 5.14 – Interface do programa computacional par a determinação da distribuição da intensidade direcional da radiação difusa.

Os resultados da análise de imagens referem-se aos valores de ângulo sólido, intensidade relativa correspondentes a cada valor de *RGB*. Além disso, também é possível identificar a relação entre o ângulo sólido de determinado nível de cinza e o ângulo sólido total da imagem, conforme a Equação 5.12. Em condição de céu parcialmente nublado, a soma dos valores obtidos para os níveis de cinza correspondentes às regiões com nuvens, fornecem o valor do índice de nebulosidade. O programa também permite gravar no disco rígido, informações adicionais, como por exemplo, o número de pixels de cada região, irradiância difusa corrigida, irradiância difusa calculada a partir da análise de imagens, entre outros.

Finalmente, a função de orientação traça as coordenadas correspondentes aos pixels que têm o mesmo ângulo de zênite. Estas coordenadas são sobrepostas a imagem

Á área que exibe os dados numéricos apresenta inicialmente os níveis de cinza e os seus correspondes valores de *RGB*. Na apresentação dos resultados, cada uma destas caixas, exibe os dados referentes a estes níveis de cinza. O valor correspondente ao ângulo sólido total e ao somatório do índice *N*, também é apresentado.

A Figura 5.15 mostra o exemplo de um resultado, obtido pela utilização desta ferramenta. Os dados referem-se aos valores de intensidade direcional para cada região. A imagem exibida mostra um mapa de tons de cinza com as coordenadas que identificam o ângulo de zênite.

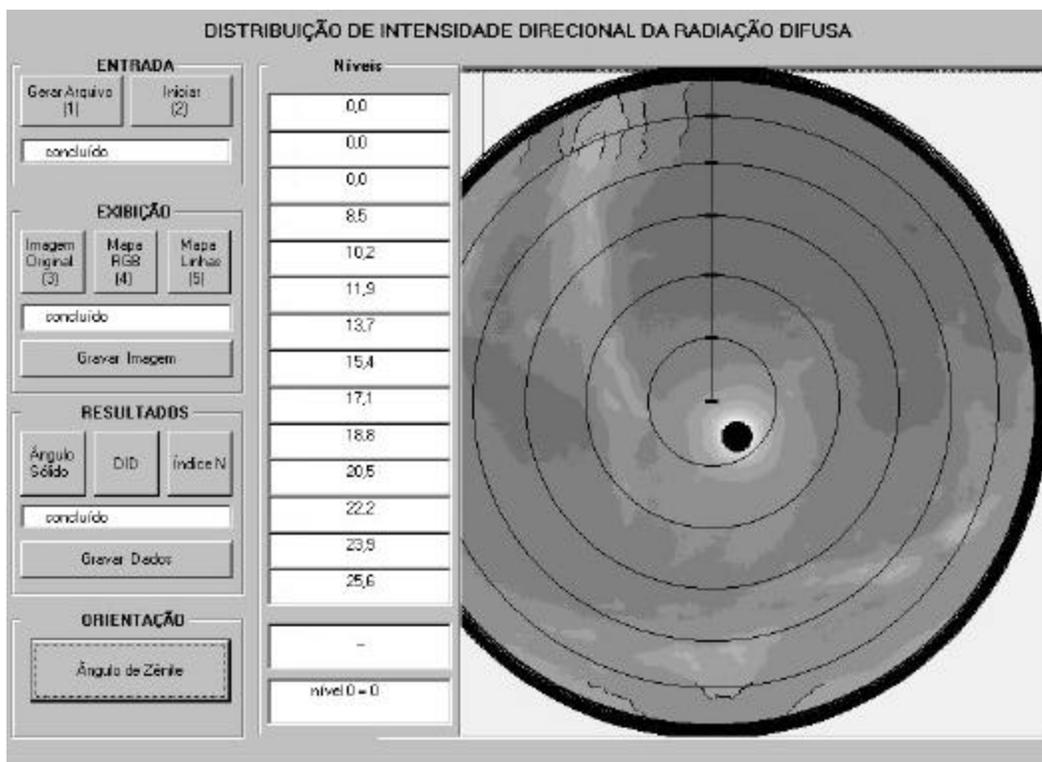


Figura 5.15 – Interface do programa computacional par a determinação da distribuição da intensidade direcional da radiação difusa.

## CAPÍTULO 6

### ANÁLISE DOS RESULTADOS – REDUÇÃO DE NÍVEIS DE CINZA

Neste capítulo apresenta-se o conjunto de imagens que servirá como parâmetro de análise e validação da metodologia proposta na tese. Também analisam-se os valores de *RGB*<sup>1</sup> das imagens sob diferentes condições de nebulosidade. Assim, avaliam-se os resultados produzidos pela metodologia, especialmente no que se refere à técnica de redução de níveis de cinza.

Inicialmente, são exibidas as imagens adquiridas durante o trabalho experimental e os respectivos resultados, obtidos pela redução dos níveis de cinza. Ao todo, foram selecionadas 48 imagens com características distintas. As imagens escolhidas não são apresentadas em intervalos regulares, correspondentes às medidas do trabalho experimental. Ao invés disso, essas imagens são classificadas, de acordo com a condição do céu [conforme Siala, F. M. F. et al., 1990]. Desta maneira, testa-se a coerência entre os resultados deste trabalho e os resultados da literatura, conforme o Capítulo 2.

Em seguida, estudam-se as características das imagens com o auxílio de tabelas que relacionam os respectivos valores de *RGB*. Analisam-se os conjuntos de imagens selecionadas, adquiridas em um único dia de medida e sob uma mesma condição de nebulosidade. Este procedimento é necessário, pois, de acordo com o Capítulo 5, a metodologia empregada não permite estabelecer estas comparações para imagens adquiridas em dias distintos. Este estudo permitem avaliar a anisotropia, presente em diferentes condições de nebulosidade.

Também mostram-se gráficos de *RGB* x Pixel, com o propósito de avaliar a variação dos valores de *RGB* dos pixels pertencentes à linha da matriz que passa pelo centro da imagem. Este procedimento corresponde a análise, no hemisfério celeste, do círculo máximo que passa pelo zênite, num deslocamento de oeste para leste.

---

<sup>1</sup> - Neste capítulo, emprega-se o termo “valor de *RGB*”, ou simplesmente “*RGB*”, como sinônimo de “tom de cinza”, para evitar confusão com o termo “nível de cinza” ou simplesmente “nível”, usado para representar o número associado ao *RGB* e que varia entre 1 e 16.

## 6.1 IMAGENS DO HEMISFÉRIO CELESTE

Para testar a metodologia foram escolhidas 48 imagens do hemisfério celeste, sendo que a cada condição de nebulosidade correspondem 12 imagens. As características das imagens são apresentadas na Tabela 6.1 (a) – 6.1 (d). De acordo com o Capítulo 3, o código de nomenclatura estabelecido para as imagens informa o dia, o mês e o horário da medida. As medidas de irradiância, realizadas na região da imagem, são apresentada em  $W.m^{-2}$ . Todas as Tabelas 6.1 apresentam os valores medidos, ordenados de acordo com data e com a hora civil.

### 6.1.1 IMAGENS DO CÉU ENCOBERTO OPACO

Geralmente o céu encoberto opaco representa a condição de menor anisotropia, dependendo apenas do tipo de nuvem. De acordo com o Capítulo 2, esta condição pode ser aproximada por um modelo de distribuição isotrópica. Além disso, não é necessário utilizar o anel de sombra para medir a irradiância solar difusa. As medidas, correspondentes as imagens escolhidas, foram realizadas nos dias 17 e 21 de maio de 2001, conforme as Figuras 6.1 (a - m).

Tabela 6.1 – Imagens em condições de céu encoberto opaco

Nome do Arquivo para análise <sup>2</sup>	Data	Hora	Irradiância difusa medida ( $W.m^{-2}$ )	Irradiância global medida ( $W.m^{-2}$ )
17Ma1445	17/5/2001	14 h 45 min	30	idem
17Ma1555	17/5/2001	15 h 55 min	40	“
17Ma1605	17/5/2001	16 h 05 min	20	“
17Ma1610	17/5/2001	16 h 10 min	20	“
17Ma1615	17/5/2001	16 h 15 min	20	“
17Ma1620	17/5/2001	16 h 20 min	20	“
17Ma1625	17/5/2001	16 h 25 min	20	“
17Ma1630	17/5/2001	16 h 30 min	20	“
17Ma1635	17/5/2001	16 h 35 min	20	“
17Ma1700	17/5/2001	17 h 00 min	10	“
21Ma1210	21/5/2001	12 h 10 min	130	“
21Ma1230	21/5/2001	12 h 30 min	60	“

<sup>2</sup> - Para evitar confusão entre as nomenclaturas, os arquivos analisados tiveram seus nomes modificados.

### 6.1.2 IMAGENS DO CÉU ENCOBERTO NÃO-OPACO

O céu encoberto não opaco também representa uma condição de anisotropia relativamente baixa. Neste caso, a medida da irradiância solar difusa é sempre realizada mediante a utilização do anel de sombra. Este procedimento é observado para evitar que, em algum momento, a radiação direta incida no sensor da câmera, danificando o equipamento.

De acordo com as Figuras 6.2 (a - f) e 6.2 (g - m), as imagens que melhor representam esta condição foram realizadas nos dias 13 de dezembro de 2000 e 31 de maio de 2001. Os dados associados a estas imagens são apresentados na Tabela 6.2<sup>3</sup>

Tabela 6.2 – Imagens em condições de céu encoberto não-opaco

Nome do Arquivo	Data	Hora	Irradiância difusa medida ( $W.m^{-2}$ )	Irradiância global medida ( $W.m^{-2}$ )
13Dz1245	13/12/2000	12 h 45 min	280	1090
13Dz 1330	13/12/2000	13 h 30 min	430	800
13Dz 1345	13/12/2000	14 h 00 min	430	610
13Dz 1415	13/12/2000	14 h 15 min	450	750
13Dz 1430	13/12/2000	14 h 30 min	410	700
13Dz 1445	13/12/2000	14 h 45 min	410	690
13Dz 1500	13/12/2000	15 h 00 min	360	690
31Ma1450	31/5/2001	14 h 50 min	180	-
31Ma1500	31/5/2001	15 h 00 min	170	-
31Ma1550	31/5/2001	15 h 50 min	100	-
31Ma1600	31/5/2001	16 h 00 min	90	-
31Ma1610	31/5/2001	16 h 10 min	70	-

### 6.1.3 IMAGENS DO CÉU LIMPO

Num dia de céu limpo existe uma grande dependência direcional, representando uma condição de alta anisotropia. Por outro lado, esta condição é bem conhecida, servindo como parâmetro para os estudos de irradiância solar e de distribuição de intensidade direcional.

<sup>3</sup> - O traço horizontal (-) serve para representar os dados que não foram medidos.

As imagens escolhidas para representar a condição de céu limpo foram realizadas nos seguintes dias: 13 de dezembro de 2000, 7 de novembro de 2000 e 24 de maio de 2001. Estas imagens são mostradas nas Figuras 6.3 (a – f) e 6.3 (g - m).

Nestas imagens, observa-se a diferença entre as posições do anel de sombra, devido a diferença existente entre as datas escolhidas. Próximo ao solstício de inverno (21/22 de junho), o anel de sombra aparece na posição inferior da imagem, que de acordo com o Capítulo 5, corresponde ao Norte geográfico. Por outro lado, próximo ao solstício de verão (21/22 de dezembro) o anel de sombra localiza-se na região próxima do zênite.

Tabela 6.3 – Imagens em condições de céu limpo

Nome do Arquivo	Data	Hora	Irradiância difusa medida ( $W.m^{-2}$ )	Irradiância global medida ( $W.m^{-2}$ )
18Dz1130	18/12/2000	11 h 30 min	50	940
18Dz1200	18/12/2000	12 h 00 min	50	1010
18Dz1400	18/12/2000	14 h 00 min	40	1040
18Dz1500	18/12/2000	15 h 00 min	40	960
18Dz1600	18/12/2000	16 h 00 min	40	830
18Dz1700	18/12/2000	17 h 00 min	40	640
07Nv1710	7/11/2000	17 h 10 min	70	-
24Ma1430	24/5/2001	14 h 30 min	20	460
24Ma1500	24/5/2001	15 h 00 min	20	390
24Ma1530	24/5/2001	15 h 30 min	30	310
24Ma1600	24/5/2001	16 h 00 min	20	280
24Ma1615	24/5/2001	16 h 15 min	20	240

#### 6.1.4 IMAGENS DO CÉU PARCIALMENTE NUBLADO

A máxima anisotropia ocorre em céus parcialmente nublados. Esta condição abrange muitos tipos de céu com características diferentes, ao contrário das condições anteriores que são razoavelmente bem definidas. Quando o céu encontra-se parcialmente nublado, significa que existem áreas do hemisfério celeste sem nuvens e áreas cobertas por algum tipo de nuvem.

Muitas vezes, durante um dia em que predomina a condição de céu encoberto, ocorre em certos períodos, a condição de céu parcialmente nublado. Também é comum observar-se algumas nuvens no decorrer de um dia em que predomina a condição de céu limpo.

Os diferentes tipos de nuvens definem as principais características de um céu parcialmente nublado. Os cirros, por exemplo, são nuvens em forma de filamentos que se formam entre 5 e 11 km de altitude, sendo inteiramente compostas por cristais de gelo.

Em dias de sol, é comum a observação de agrupamentos de cúmulos. Estas nuvens têm contornos bem definidos e em geral cobrem menos do que a metade do céu. O topo deste tipo de nuvem se eleva a uma altura suficiente para o ar ascendente arrefecer, atingindo a temperatura do ar circundante. Os cúmulos dissipam-se à medida que se afastam da fonte de ar quente que mantém sua formação. Normalmente, os cúmulos pequenos duram entre 15 min e 20 min.

Um outro tipo de céu parcialmente nublado ocorre quando os altostratos cobrem parte do hemisfério celeste. Normalmente estas nuvens cobrem todo o céu, formando uma camada uniforme e acinzentada com base entre 2 km e 6 km de altura.

De acordo com as Figuras 6.4 (a – f) e 6.4 (g – m), foram escolhidas imagens com diferentes tipos de nuvens. Estas medidas foram realizadas nos seguintes dias: 24 de maio de 2001, 8 de novembro de 2000, 13 de dezembro de 2000 e 18 de dezembro de 2000.

Tabela 6.4 – Imagens em condições de céu parcialmente nublado

Nome do Arquivo	Data	Hora	Irradiância difusa medida ( $W.m^{-2}$ )	Irradiância global medida ( $W.m^{-2}$ )
08Nv1645	08/11/2000	16 h 45 min	170	-
08Nv1700	08/11/2000	17 h 00 min	150	-
13Dz1630	13/12/2000	16 h 30 min	260	360
13Dz1730	13/12/2000	17 h 30 min	200	370
13Dz1745	13/12/2000	17 h 45 min	200	250
18Dz1250	18/12/2000	12 h 50 min	40	1070
18Dz1300	18/12/2000	13 h 00 min	50	1070
18Dz1315	18/12/2000	13 h 15 min	50	1030
18Dz1330	18/12/2000	13 h 30 min	40	1050
31Ma1320	31/5/2001	13 h 20 min	200	-
31Ma1330	31/5/2001	13 h 30 min	210	-
31Ma1630	31/5/2001	16 h 30 min	60	70

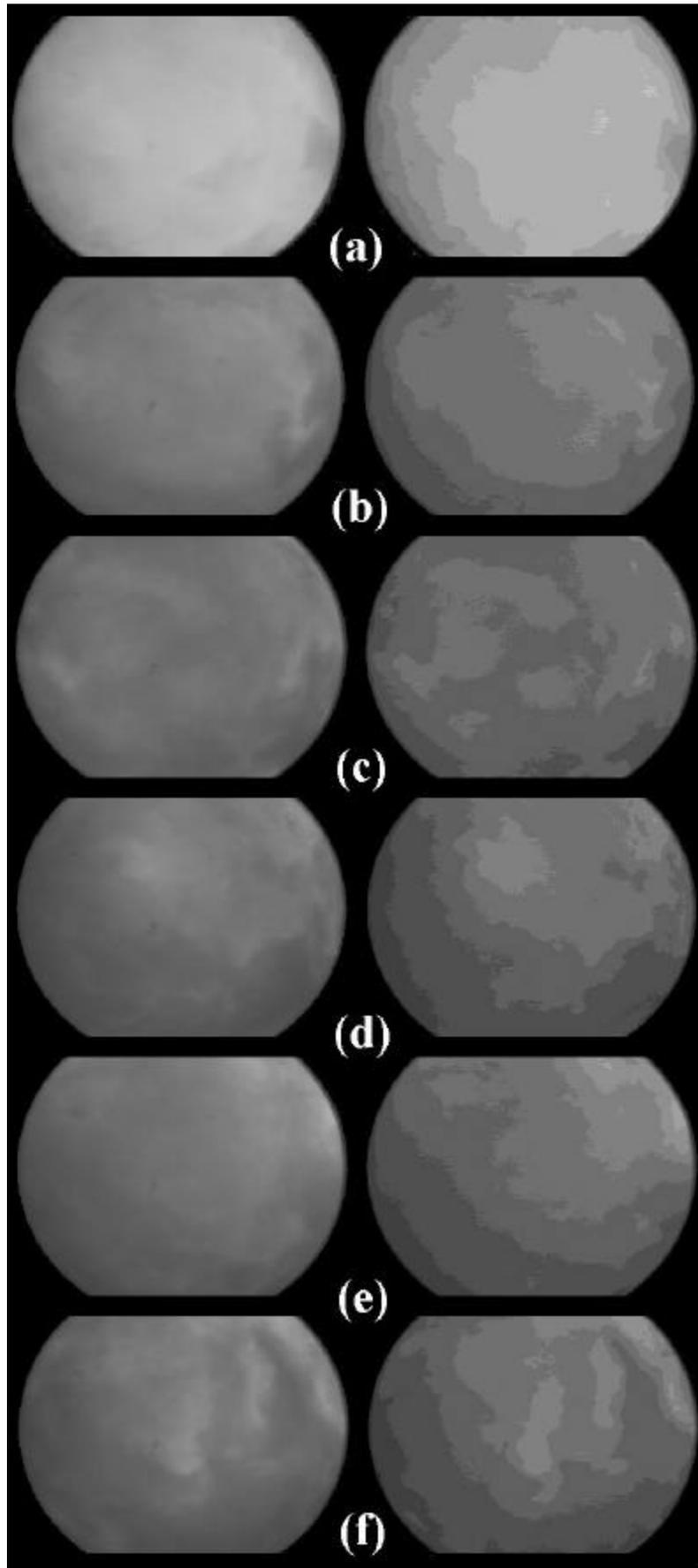


Figura 6.1 (a-f) - Imagens adquiridas em condições de céu encoberto opaco e seus resultados.

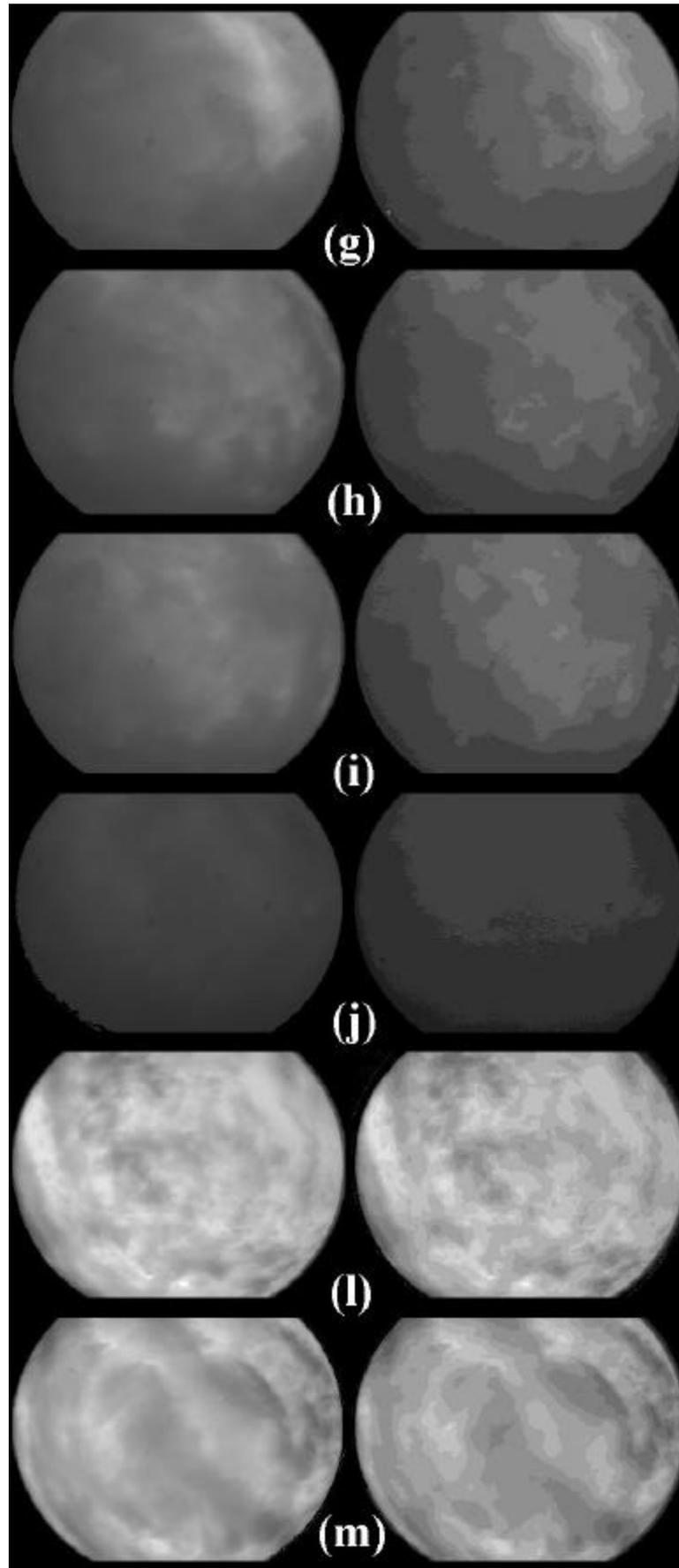


Figura 6.1 (g-m) - Imagens adquiridas em condições de céu encoberto opaco e seus resultados.

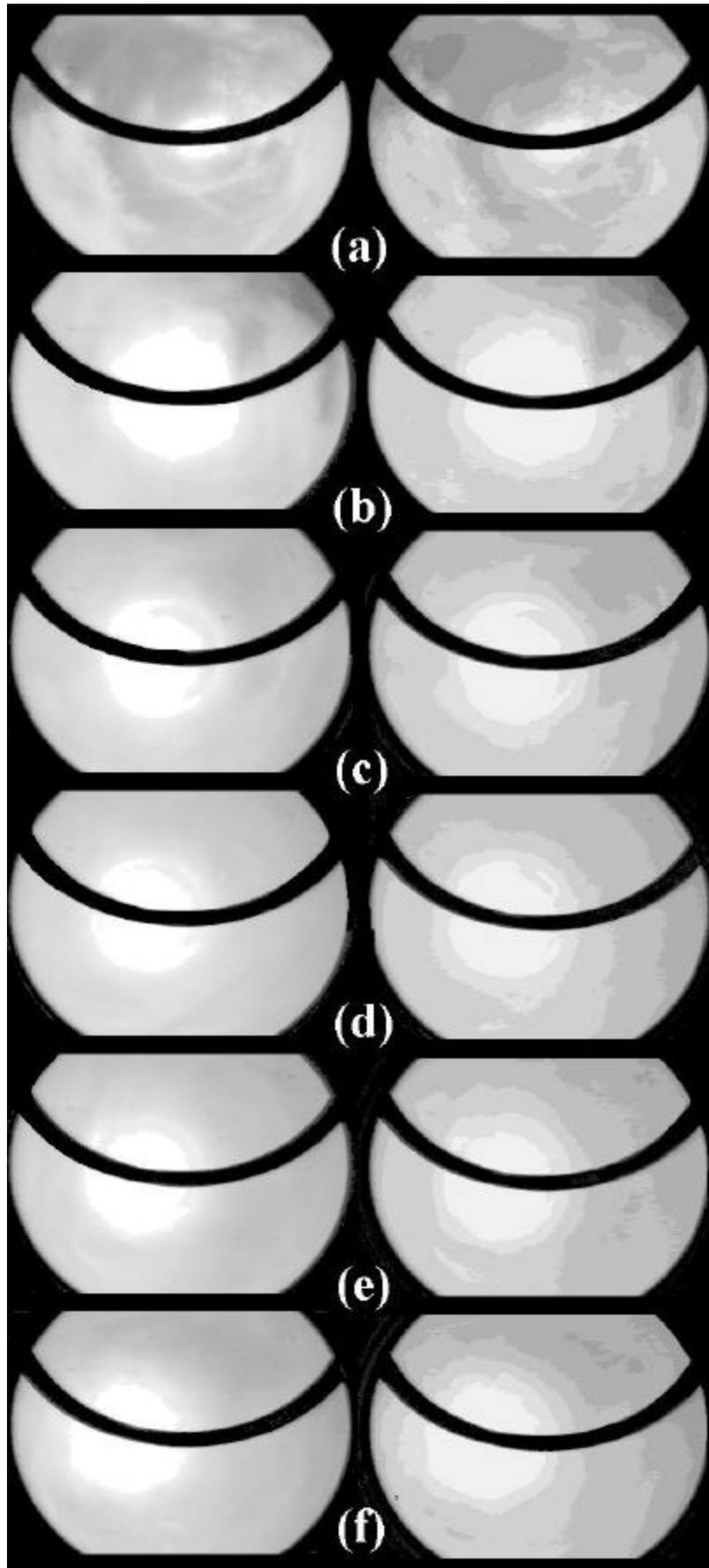


Figura 6.2 (a-f) - Imagens adquiridas em condições de céu encoberto não-opaco e resultados.

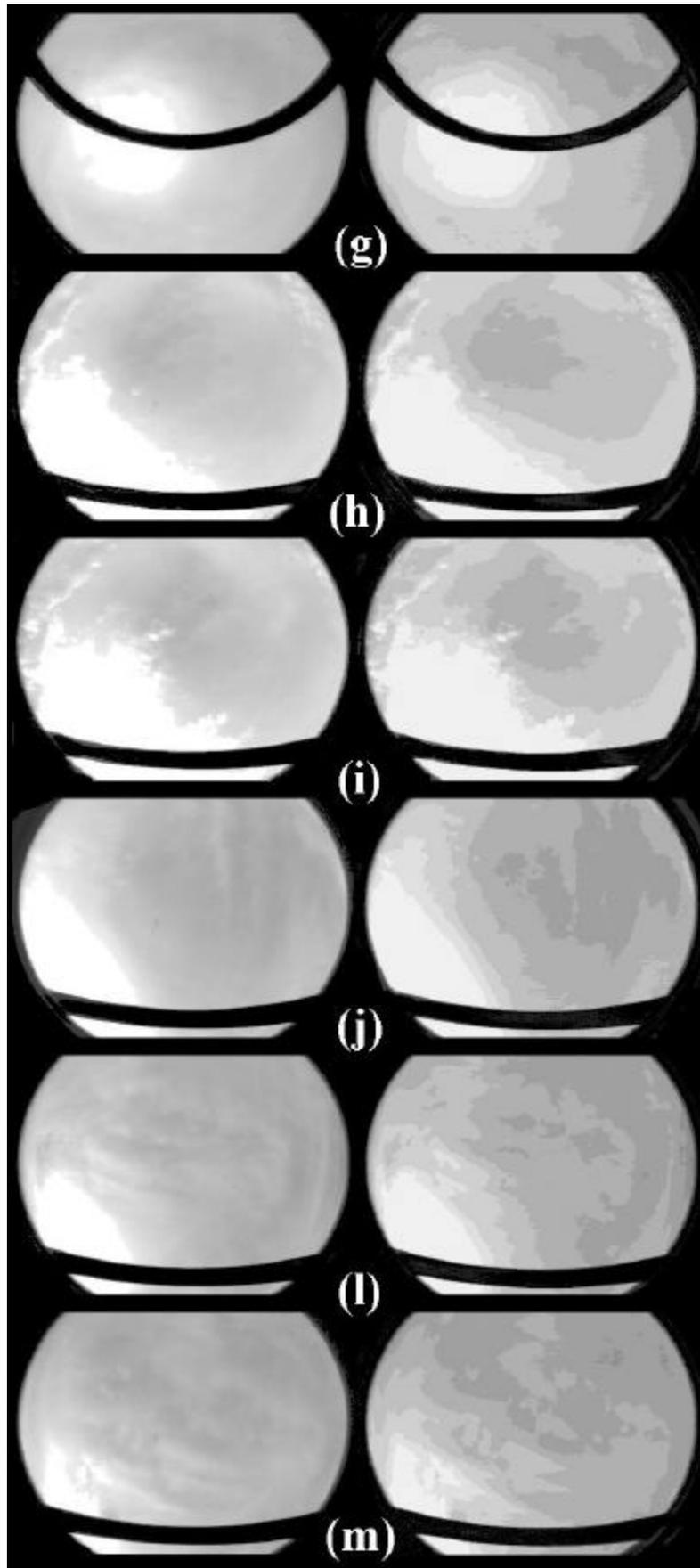


Figura 6.2 (g–m) - Imagens adquiridas em condições de céu encoberto não-opaco e resultados.

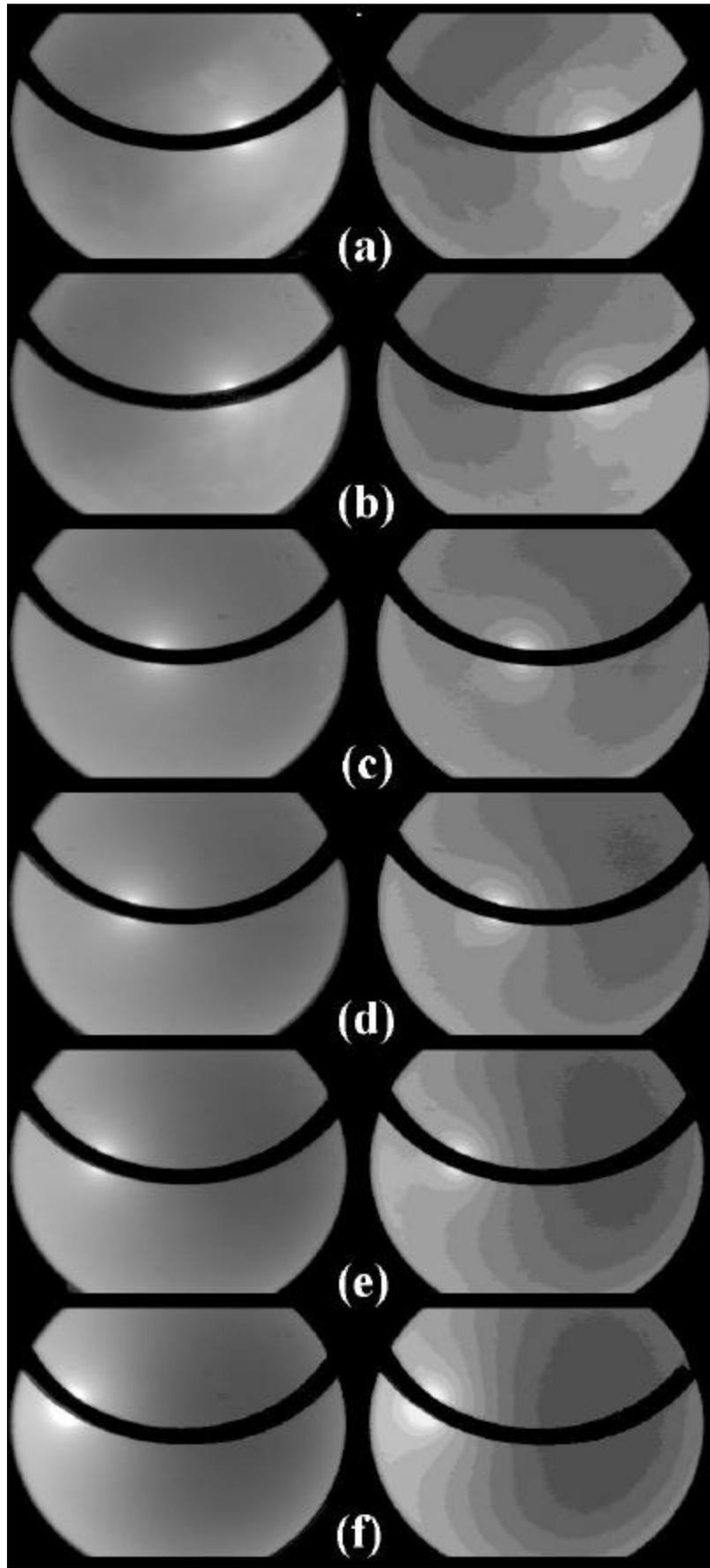


Figura 6.3 (a-f) - Imagens adquiridas em condições de céu limpo e resultados.

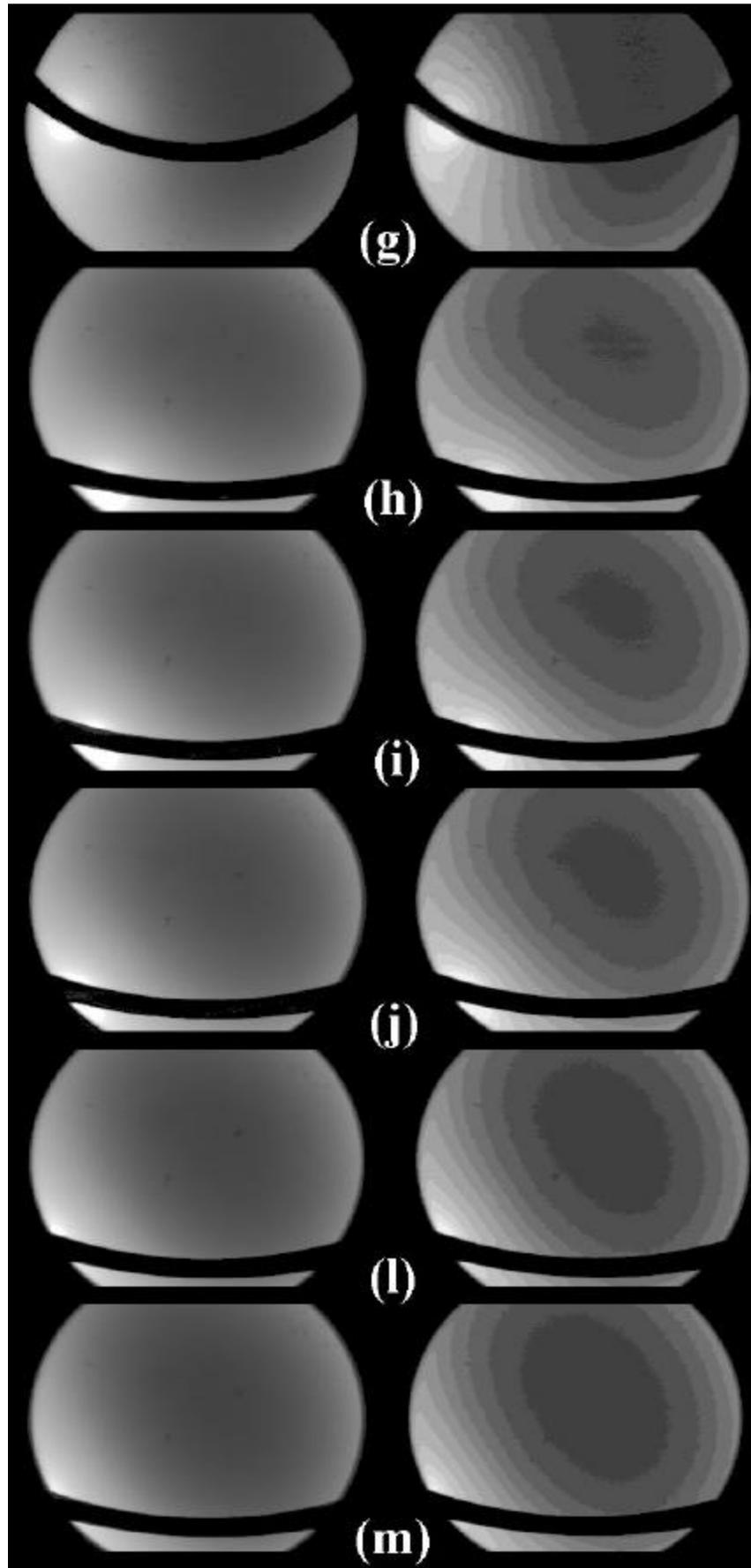


Figura 6.3 (g–m) - Imagens adquiridas em condições de céu limpo e seus resultados.

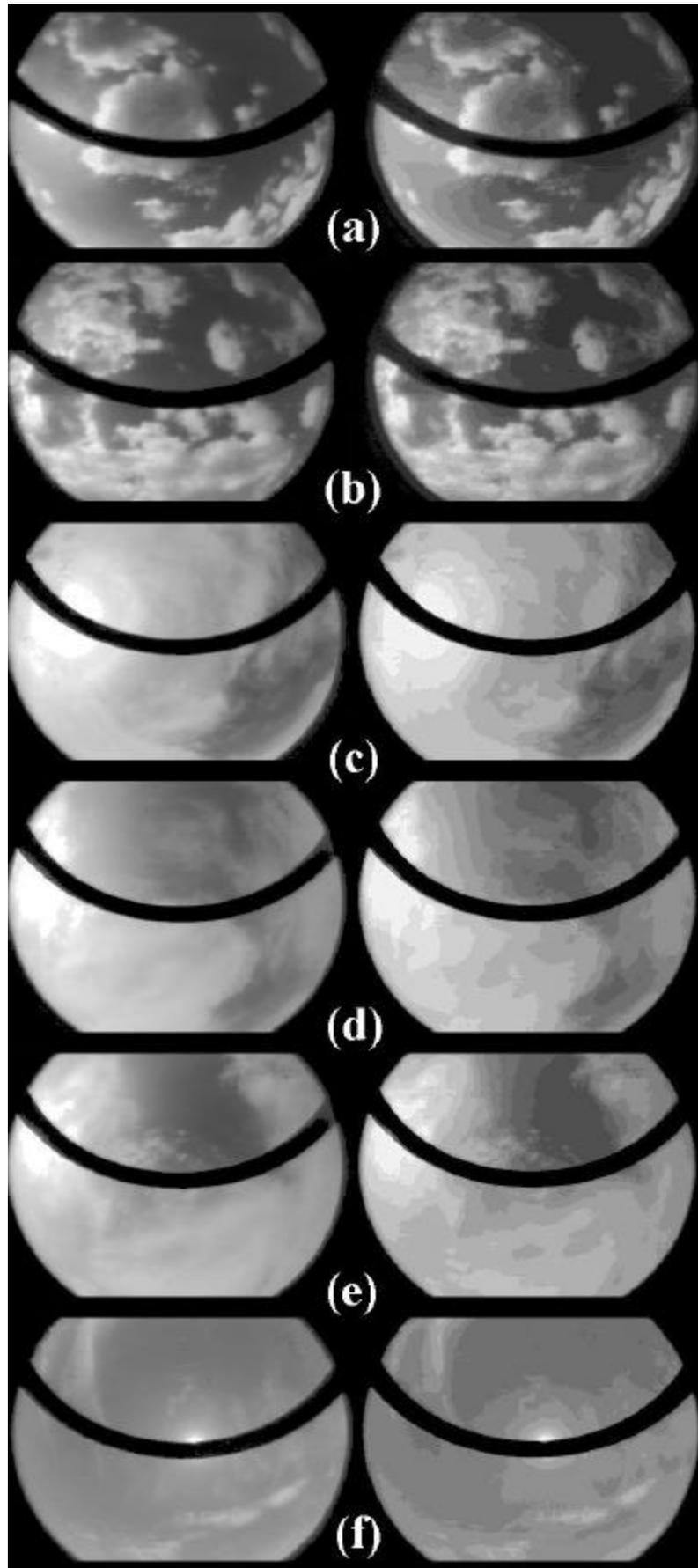


Figura 6.4 (a-f) - Imagens adquiridas em condições de céu parcialmente nublado e resultados.

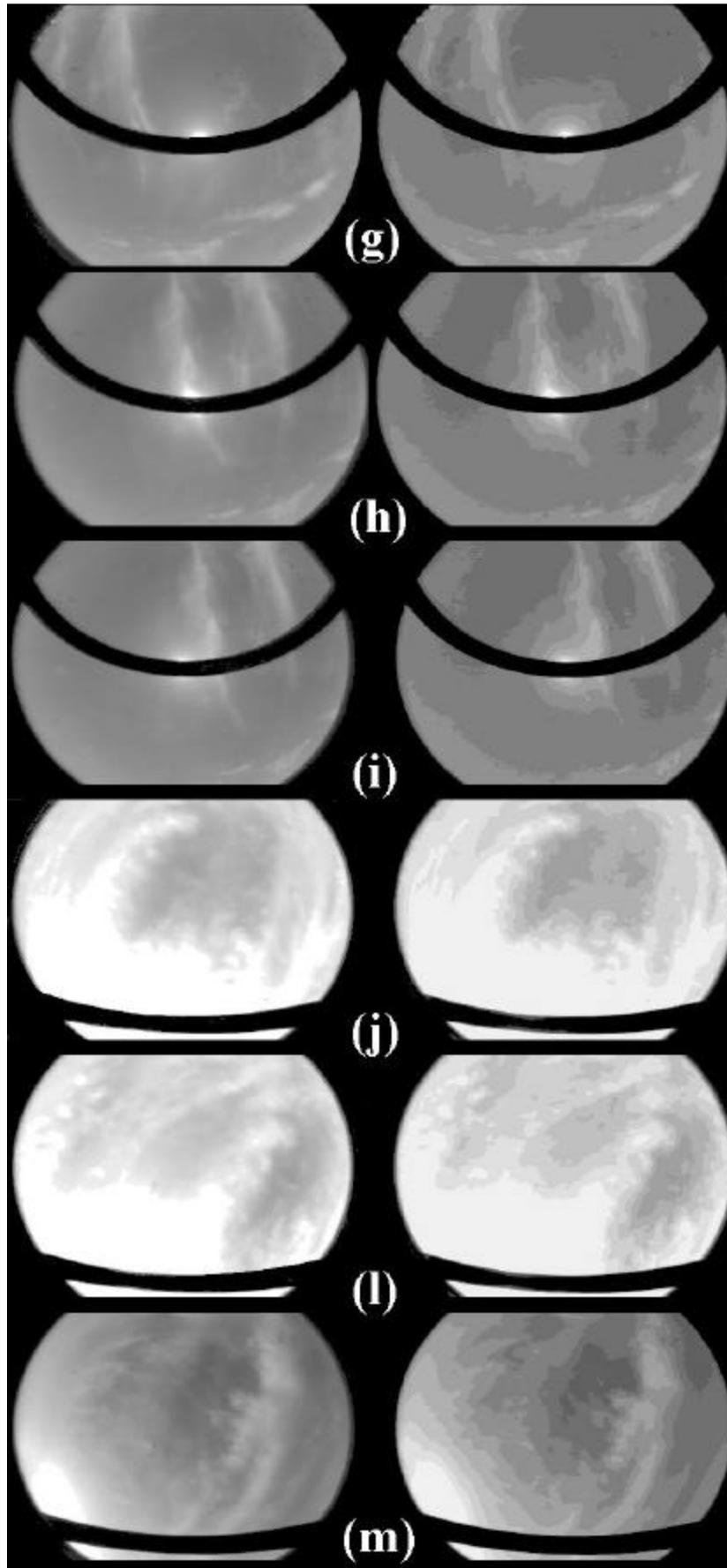


Figura 6.4 (g-m) - Imagens adquiridas em condições de céu parcialmente nublado e resultados.

## 6.2 ANÁLISE DAS IMAGENS E DOS VALORES DE *RGB*

O número de níveis de cinza das imagens do hemisfério celeste revelam a anisotropia na distribuição de intensidade. As Tabelas 6.5 a 6.8 mostram a variação dos tons de cinza, presentes em cada imagem, sob diferentes condições de nebulosidade. Neste caso, o nível assume valores entre 1 e 16, onde o primeiro nível corresponde ao mais baixo valor de *RGB* da imagem.

É importante salientar que, além do número de níveis de cinza, deve-se observar como estes se distribuem no hemisfério celeste. Para ilustrar, pode-se conceber um caso limite, com máxima anisotropia, numa situação artificial, em que a imagem é constituída por apenas dois níveis extremos, de tal modo que cada um dos sucessivos pixels tem valores de *RGB* diferentes. Por outro lado, as condições observadas no hemisfério celeste permitem determinar os padrões discutidos no Capítulo 2, justificando a relação entre o número de níveis de cinza com a anisotropia da distribuição de intensidade da radiação difusa. De fato, a condição mais isotrópica é observada em algumas das imagens, cuja aquisição é realizada mediante um céu encoberto opaco. Em seguida, estão as imagens de céus encobertos não-opacos e de céus limpos. Finalmente, a condição menos isotrópica ocorre nas imagens correspondentes à condição de céu parcialmente nublado.

### 6.2.1 NÍVEIS E *RGB* NA CONDIÇÃO DE CÉU ENCOBERTO OPACO

Os dados referentes ao céu encoberto opaco, conforme as Figuras 6.1 (a-m), são mostrados na Tabela 6.5. Para melhor representar esta condição de nebulosidade, foram selecionadas imagens com dois diferentes tipos de nuvens, com todas as medidas realizadas sem a utilização do anel de sombra.

Os gráficos das Figuras 6.1 (a - j) mostram os resultados obtidos no dia 17 de maio de 2001. As imagens deste dia mostram uma camada nebulosa cinzenta, baixa e espessa, que não permite a visualização e nem mesmo a identificação da posição solar. Estas nuvens são conhecidas como estratos, sendo formadas em condições de atmosfera estável. Normalmente os estratos não são suficientemente espessos para produzir chuva, mas podem provocar chuveiro. A relação entre os níveis de cinza e seus respectivos valores de *RGB*, das imagens adquiridas sob condição de encoberto opaco, são apresentadas na Tabela 6.5. Observa-se que os maiores valores de *RGB* são observados na primeira imagem, que teve sua aquisição às 14 h 45 min. O número máximo de níveis é observado na imagem realizada às 16 h 25 min, que apresenta 8 níveis, com

valores de *RGB* entre 64 e 176. A última imagem deste conjunto teve sua aquisição às 17 h, apresentando o menor número de níveis e os menores valores de *RGB*.

Os resultados das duas imagens escolhidas no dia 21 de maio de 2001 mostram o céu encoberto por amontoados de nuvens baixas, esbranquiçadas, mas com grandes porções escuras. Estas nuvens são chamadas de estratocúmulos. A primeira imagem apresenta dez níveis de cinza, com valores entre 96 e 240. Já a segunda imagem apresenta nove níveis de cinza, variando entre 80 e 216. Este tipo de nuvem representa uma das condições mais anisotrópicas observada em céus do tipo encoberto opaco.

Tabela 6.5 – Valores de *RGB* das imagens adquiridas sob condição de céu encoberto opaco

ARQUIVO	VALORES DE <i>RGB</i> DAS IMAGENS									
17Ma1445	112	128	144	160	176	192				
17Ma1555	80	96	112	128	144					
17Ma1605	80	96	112	128						
17Ma1610	64	80	96	112	128					
17Ma1615	64	80	96	112	128	144	160			
17Ma1620	64	80	96	112	128	144				
17Ma1625	64	80	96	112	128	144	160	176		
17Ma1630	48	64	80	96	112					
17Ma1635	64	80	96	112	128					
17Ma1700	32	48	64							
21Ma1210	96	112	128	144	160	176	192	208	224	240
21Ma1230	80	96	112	128	144	160	176	192	208	

## 6.2.2 NÍVEIS E *RGB* NA CONDIÇÃO DE CÉU ENCOBERTO NÃO-OPACO

As Figuras 6.2 (a-m) mostram os gráficos obtidos para as imagens adquiridas sob condição de céu encoberto não-opaco, correspondentes aos dias 13 de dezembro de 2000 e 31 de maio de 2001. A Tabela 6.6 apresenta os níveis de cinza e seus respectivos valores de *RGB* correspondentes a estas imagens. Observa-se que os níveis variam entre 5 e 9, o que não é muito diferente da condição anterior. Apenas neste caso, as regiões circunsolares são relativamente grandes e, por essa razão, incapazes de promover um expressivo aumento no número de níveis.

Por outro lado, a diferença mais significativa observada entre os dois tipos de céu encoberto, opaco e não-opaco, está nos valores de *RGB*. Embora a metodologia empregada não autorize a comparação direta entre os diferentes conjuntos de medidas, isto é, entre as medidas realizadas em dias distintos, observou-se que as imagens do céu encoberto não-opaco, sempre apresentam maiores valores de *RGB*. Nas imagens escolhidas, o *RGB* varia entre 112 e 240. O máximo *RGB*, que corresponde ao máximo da escala de 16 tons de cinza, sempre está localizado na primeira das grandes regiões circulares. Já os menores valores de *RGB* são observados nas imagens que apresentam uma pequena região do céu, onde a camada de nuvens é menos espessa. Um exemplo deste caso é observado na imagem adquirida no dia 13 de dezembro, realizada às 13 h 30 min.

Para as medidas realizadas no dia 13 de dezembro de 2000, observa-se que ocorreu uma diminuição de níveis nos dois últimos grupos de medida, isto se deve a uma maior uniformidade da camada de nuvens. A mesma razão promoveu um aumento do valor mínimo de *RGB*.

Por outro lado, nas imagens do dia 31 de maio de 2001 ocorre um aumento dos níveis de cinza com o aumento do ângulo horário do Sol assim como uma diminuição do valor mínimo de *RGB*, que varia de 144 a 176. Observa-se que este comportamento é típico dos dias em que as mudanças na posição solar são as alterações mais significativas.

Tabela 6.6 – Valores de *RGB* das imagens adquiridas sob condição de céu encoberto não-opaco

ARQUIVO	VALORES DE <i>RGB</i> DAS IMAGENS								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
13Dz1245	144	160	176	192	208	224	240		
13Dz 1330	112	128	144	160	176	192	208	224	240
13Dz 1345	176	192	208	224	240				
13Dz 1415	176	192	208	224	240				
13Dz 1430	160	176	192	208	224	240			
13Dz 1445	160	176	192	208	224	240			
13Dz 1500	160	176	192	208	224	240			
31Ma1450	176	192	208	224	240				
31Ma1500	176	192	208	224	240				
31Ma1550	160	176	192	208	224	240			
31Ma1600	160	176	192	208	224	240			
31Ma1610	144	160	176	192	208	224	240		

### 6.2.3 NÍVEIS E *RGB* NA CONDIÇÃO DE CÉU LIMPO

As Figuras 6.3 (a - m) apresentam as imagens de céu limpo, cujas medidas foram realizadas nos dias 18 de dezembro de 2000, 7 de novembro de 2000, e 24 de maio de 2001, respectivamente. A Tabela 6.7 os respectivos valores de *RGB* destas imagens. Observa-se que o menor número de níveis é observado quando o Sol está mais próximo do zênite, como por exemplo nas imagens realizadas no dia 18 de dezembro de 2000 entre 11 h 30 min e 14 h. Por outro lado, mais níveis de cinza são observados quando o Sol está próximo do limite que corresponde ao ângulo de visão da câmera, como pode ser observado nas últimas medidas dos dias 7 de novembro e 18 de dezembro; e nas imagens do dia 24 de maio de 2001.

Uma análise semelhante pode ser estabelecida para os valores de *RGB*, uma vez que a região mais escura se forma a  $90^\circ$  da posição solar. Este comportamento também é ilustrado pela Tabela 6.7, onde se observa uma pequena diminuição do valor de *RGB*, correspondente ao primeiro nível, com a hora do dia, ou seja, com a posição solar. À medida que o Sol se desloca no hemisfério celeste, a  $90^\circ$  de sua posição, formam-se regiões cada vez mais escuras. Em relação ao máximo *RGB*, pode-se dizer que este ocorrerá sempre que a imagem permitir a observação da primeira região circumsolar.

Tabela 6.7 – Valores de *RGB* das imagens adquiridas sob condição de céu encoberto limpo

ARQUIVO	VALORES DE <i>RGB</i> DAS IMAGENS											
18Dz1130	96	112	128	144	160	176	192	208	224	240		
18Dz1200	96	112	128	144	160	176	192	208	224	240		
18Dz1400	96	112	128	144	160	176	192	208	224	240		
18Dz1500	80	96	112	128	144	160	176	192	208	224	240	
18Dz1600	80	96	112	128	144	160	176	192	208	224	240	
18Dz1700	80	96	112	128	144	160	176	192	208	224	240	
07Nv1710	64	80	96	112	128	144	160	176	192	208	224	240
24Ma1430	64	80	96	112	128	144	160	176	192	208	224	240
24Ma1500	64	80	96	112	128	144	160	176	192	208	224	240
24Ma1530	64	80	96	112	128	144	160	176	192	208	224	240
24Ma1600	64	80	96	112	128	144	160	176	192	208	224	240
24Ma1615	64	80	96	112	128	144	160	176	192	208	224	240

Todas as imagens realizadas no dia 24 de maio têm os mesmos níveis e o mesmos valores de *RGB*. Entretanto a observação das imagens, Figura 6.3 (h - m), mostra o aumento da área mais escura, que às 14 h 30 min é representada por uma pequena região, formada por um conjunto de pontos agrupados, enquanto que às 16 h 10 min ocupa uma área significativa da imagem.

#### 6.2.4 NÍVEIS E *RGB* NA CONDIÇÃO DE CÉU PARCIALMENTE NUBLADO

As imagens adquiridas sob diferentes condições de céu parcialmente nublado são mostradas nas Figuras 6.4 (a-m), enquanto que a Tabela 6.8 apresenta o comportamento dos níveis e dos valores de *RGB* observados nas respectivas imagens.

As Figuras 6.4 (a) e (b) mostram duas imagens adquiridas no dia 8 de novembro, que caracterizam um céu parcialmente nublado composto por cúmulos. O processo de aquisição correu às 16 h 45 min e às 17 h deste dia. A técnica de redução de tons de cinza, aplicada a este tipo de nuvem, dá origem à formação de um série de regiões, localizadas em volta de suas bordas. A partir da Tabela 6.8 observa-se que existem 14 níveis, com o *RGB* variando entre 48 e 240. Neste caso, a anisotropia é máxima, o que também é evidenciado pela análise da distribuição dos sucessivos pixels formadores da imagem.

A Figura 6.4 (c - e) apresenta as medidas realizadas no dia 13 de dezembro de 2000, às 16 h 30 min, 17 h 30 min e 17 h 45 min. A grande maioria das imagens adquiridas nesta data representam a condição de céu encoberto não-opaco. Entretanto, no caso destas três imagens, observa-se uma grande região desprovida de nuvens, caracterizando um céu parcialmente nublado. Além disso, a posição solar está próxima dos limites do ângulo de visão da câmera. Por estas razões, ocorrem imagens com mais níveis. Todos os valores de *RGB* encontram-se entre 80, na região sem nuvens e 240 na região circunsolar, conforme a Tabela 6.8.

A Figura 6.4 (f - i) mostra as imagens adquiridas no dia 18 de dezembro de 2000 nos seguintes horários: 12 h 50 min, 13 h, 13 h e 15 min e 13 h e 30 min. Neste dia, a maior parte das medidas foi realizada com o céu limpo. Entretanto estas quatro imagens mostram o céu nublado por cirros e por cirrocúmulos, em pequenas regiões da imagem. Estas nuvens modificam o padrão de distribuição de intensidades, que é observado em dias de céu limpo. As alterações dependem da posição das nuvens dentro do hemisfério celeste. Assim, quando esta nuvem filamentosa aparece cobrindo o disco solar, observa-se o alargamento de algumas das regiões circunsolares. Por outro lado, quando a nuvem aparece na região correspondente à parte mais escura da imagem, observa-se um aclaramento correspondente à forma da nuvem. Entretanto, o

número de níveis e os respectivos valores de *RGB* está mais relacionado com a posição solar. Todas estas imagens têm 11 níveis, variando entre 80 e 240.

A Figura 6.4 (j - m) mostra um conjunto de três imagens adquiridas durante o dia 31 de maio de 2001, nos seguintes horários: 13 h 20 min, 13 h 30 min e 16 h 30 min. Grande parte das medidas desta data foram realizadas sob a condição de céu encoberto não-opaco. Entretanto, no caso destas três imagens, além da região desprovida de nuvens ser um pouco menor, observa-se que uma camada branca e mais espessa cobre a posição solar. A Tabela 6.6 mostra que nas duas primeiras imagens os níveis aumentam de 6 para 7 e que os valores mínimo de *RGB* passam de 160 para 144, respectivamente. A última imagem tem 10 níveis, cujo valor mínimo de *RGB* é 96 e o máximo é 240.

Tabela 6.6 – Valores de *RGB* das imagens adquiridas sob condição de céu parcialmente nublado

ARQUIVO	VALORES DE <i>RGB</i> DAS IMAGENS												
08Nv1645	48	64	80	96	112	128	144	160	176	192	208	224	240
08Nv1700	48	64	80	96	112	128	144	160	176	192	208	224	240
13Dz1630	80	96	112	128	144	160	176	192	208	224	240		
13Dz1730	80	96	112	128	144	160	176	192	208	224	240		
13Dz1745	80	96	112	128	144	160	176	192	208	224	240		
18Dz1250	112	128	144	160	176	192	208	224	240				
18Dz1300	112	128	144	160	176	192	208	224	240				
18Dz1315	112	128	144	160	176	192	208	224	240				
18Dz1330	112	128	144	160	176	192	208	224	240				
31Ma1320	160	176	192	208	224	240							
31Ma1330	144	160	176	192	208	224	240						
31Ma1630	96	112	128	144	160	176	192	208	224	240			

### 6.3 VARIAÇÃO DO *RGB* DOS PIXELS DE UMA LINHA DE CONTROLE

O estudo da variação dos valores de *RGB* pertencentes a uma linha da matriz numérica que representa a imagem com 16 tons de cinza, tem por objetivo extrair informações, como o reconhecimento da condição de nebulosidade, a partir da mínima informação que pode ser extraída desta matriz.

O caso mais significativo refere-se a observação dos pixels, pertencentes à linha que passa pelo centro do círculo da imagem. No hemisfério celeste esta linha corresponde ao círculo máximo que passa pelo zênite, e que será aqui referido como linha de controle ou círculo máximo de controle. Este procedimento permite estudar os valores de  $RGB$  com o acompanhamento da direção do deslocamento solar.

A região que compreende o pixel do zênite representa o mais importante parâmetro para caracterizar a distribuição de intensidade relativa. De acordo com o Capítulo 2, muitas distribuições são estabelecidas tomando como referência o valor de intensidade do zênite. Neste estudo, o sentido de análise escolhido, vai de Oeste a Leste, para permitir a comparação direta com a imagem<sup>4</sup>. Assim, o pixel 0 representa o ponto localizado à esquerda da imagem; enquanto que o ponto mais à direita é representado pelo pixel 768. Estes dois extremos têm  $RGB = 0$ , valor idêntico é observado quando a linha de controle atravessa o anel de sombra. A Figura 6.5 representa este procedimento de análise.

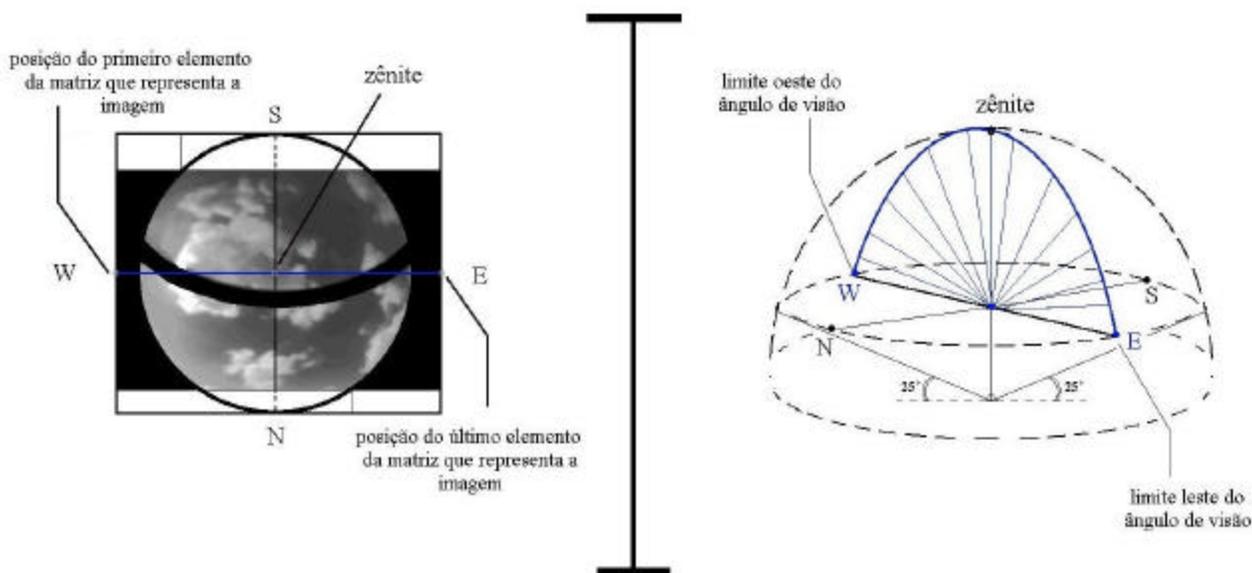


Figura 6.5 – Representação do procedimento adotado para a análise dos valores de  $RGB$  de uma linha de controle pertencente a matriz numérica da imagem.

O comportamento é avaliado considerando-se o mesmo critério de análise já empregado, isto é, classificando-se as imagens de acordo com a condição de nebulosidade. Assim, foram

<sup>4</sup> - O sentido Leste – Oeste representa a imagem espelhada, ou seja, uma rotação de  $90^\circ$ , no sentido anti-horário, da matriz transposta, que representa a imagem. (“*flip*” horizontal).

escolhidos nove exemplos para representar alguns comportamentos característicos: três para céu encoberto opaco, dois para céu encoberto não opaco, três para céu limpo e dois para céu parcialmente nublado.

A seguir estes exemplos são analisados, demonstrando que grande parte da informação necessária para caracterizar uma determinada condição de nebulosidade pode ser obtida pela análise de uma única linha da matriz que representa a imagem. Os exemplos têm por objetivo comentar os casos mais significativos para a representação e classificação das quatro condições de nebulosidade. Cada um dos gráficos tem referência nas imagens, apresentadas nas Figuras 6.1 a 6.4, sendo identificados pelo código do arquivo.

Obviamente, existem alguns casos nos quais a informação contida na linha de controle não é suficiente, podendo causar dúvidas ou mesmo impossibilitar o reconhecimento da condição de nebulosidade. São exemplos, os gráficos obtidos para representar a condição de céu parcialmente nublado em que a imagem apresenta condições mistas, tais como: o aparecimento de pequenas nuvens durante um dia, predominantemente, de céu limpo, o surgimento de regiões desprovidas de nuvens durante um dia de céu encoberto não opaco, etc.

Entretanto, na maioria dos casos, é possível identificar um conjunto de características que representam a condição de nebulosidade, a posição solar, etc. Demonstra-se que os gráficos pertencentes à diferentes condições de nebulosidade têm um conjunto de características específicas.

### 6.3.1 VARIAÇÃO DO *RGB* NA CONDIÇÃO DE CÉU ENCOBERTO OPACO

Os gráficos das Figuras 6.6 (a), (b) e (c) mostram exemplos da distribuição dos valores de *RGB* dos pixels pertencentes à linha central sob condição de céu encoberto opaco. Os dois primeiros gráficos ilustram o padrão observado nestes tipos de céu e que caracteriza uma distribuição de baixa anisotropia, sendo que a Figura 6.6 (b) representa um caso extremo, numa imagem escura com poucos níveis.

A Figura 6.6 (c) representa um caso de céu encoberto por estratos cúmulos. Observa-se que o padrão de maior isotropia é quebrado pela presença de pequenas regiões, espaçadas com alguma regularidade, e que provoca pequenas alterações no valor de *RGB*. Não se observa nenhum salto no valor de *RGB*, o que evidenciaria a existência de uma porção de céu desprovido de nuvens passando pelo círculo máximo de controle.

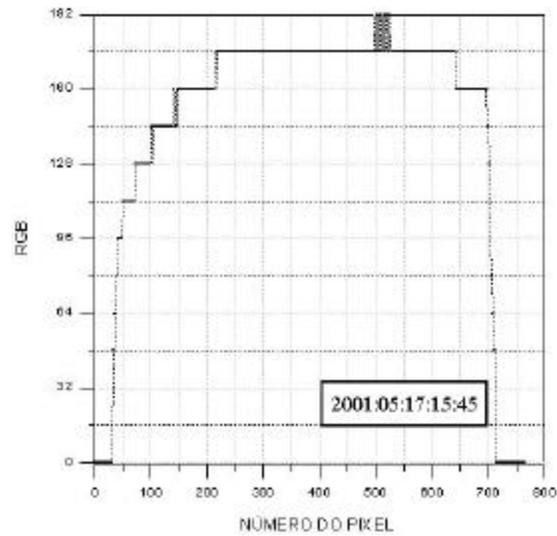


Figura 6.6 (a) – Variação dos valores de *RGB* num dia de céu encoberto opaco.

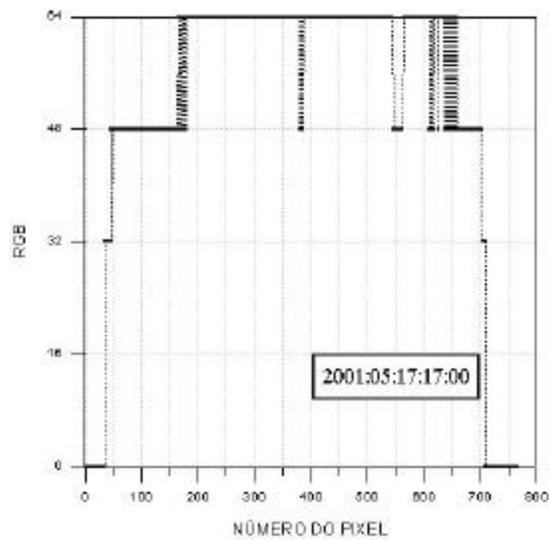


Figura 6.6 (b) – Variação dos valores de *RGB* num dia de céu encoberto opaco.

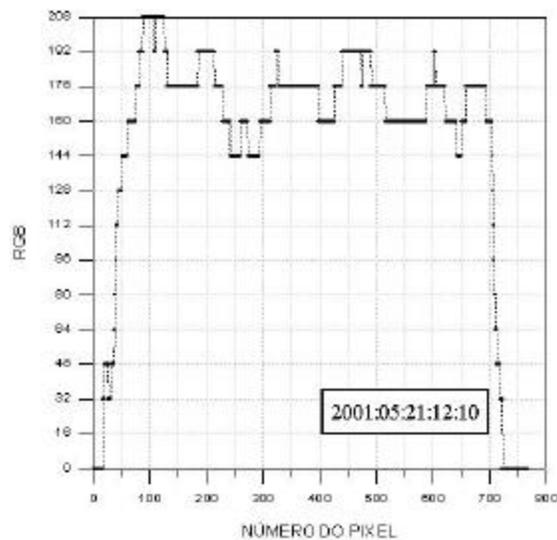


Figura 6.6 (c) – Variação dos valores de *RGB* num dia de céu encoberto opaco.

### 6.3.2 VARIAÇÃO DO *RGB* NA CONDIÇÃO DE CÉU ENCOBERTO NÃO-OPACO

Os gráficos das Figuras 6.7 (a) e (b) representam as imagens adquiridas sob condição de céu encoberto não-opaco. O gráfico da Figura 6.7 (a) caracteriza um comportamento observado quando a primeira grande região circunsolar atravessa a parte central da linha de controle. Neste caso, são grandes regiões com um mesmo *RGB*, apresentando saltos entre regiões claras e escuras. Estes saltos tem  $RGB = 0$  e representam a passagem pelo anel de sombra.

A Figura 6.7 (b) mostra um exemplo onde a grande região circunsolar,  $RGB = 240$ , está posicionada à esquerda da imagem, isto é, à oeste. Embora sejam observadas grandes regiões de mesmo *RGB*, o salto entre elas é bem menor do que no caso anterior. O que caracteriza este gráfico como o de uma imagem de céu encoberto não opaco é a ocorrência do limite máximo,  $RGB = 240$ . Este limite máximo não é observado, em grandes regiões, nas imagens adquiridas sob condição de céu encoberto opaco, porque nesse caso, não existe nem a dependência com a posição solar nem a conseqüente formação de regiões circunsolares.

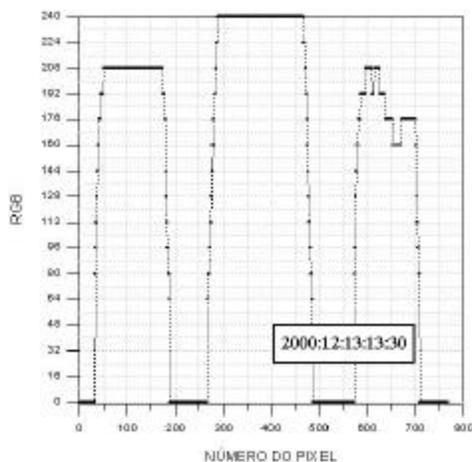


Figura 6.7 (a) – Variação dos valores de *RGB* num dia de céu encoberto não-opaco.

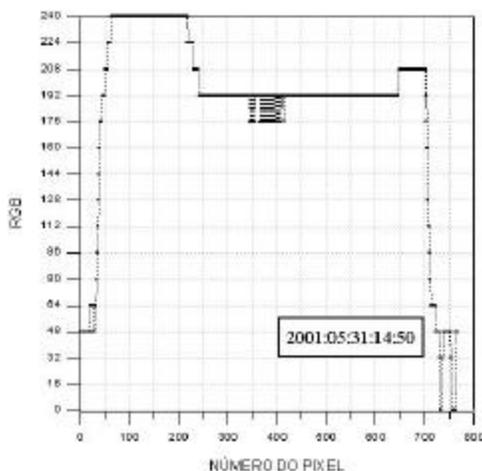


Figura 6.7 (b) – Variação dos valores de *RGB* num dia de céu encoberto não-opaco.

### 6.3.3 VARIAÇÃO DO *RGB* NA CONDIÇÃO DE CÉU LIMPO

Para representar a condição de céu limpo foram escolhidas três imagens, mostradas nos gráficos das Figuras 6.8 (a), (b) e (c). O gráfico da Figura 6.8 (a) caracteriza um comportamento que é observado para ângulos horários negativos, quando o Sol está mais a leste, ou seja, mais à direita da imagem. Neste caso, observa-se uma formação em degraus, cujo valor máximo encontra-se à direita do gráfico. Como o valor máximo corresponde a  $RGB = 240$ , pode-se concluir que a linha de controle atravessa a região circumsolar.

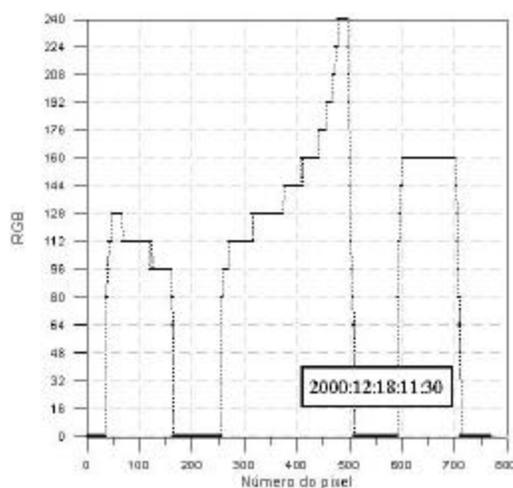


Figura 6.8 (a) – Variação dos valores de *RGB* num dia de céu limpo.

A Figura 6.8 (b) mostra o comportamento típico observado quando o ângulo horário do Sol é positivo. Observa-se uma formação em degraus, cujo valor máximo encontra-se à esquerda do gráfico. Novamente, o valor máximo corresponde a  $RGB = 240$ , e portanto, a linha de controle atravessa a região circumsolar.

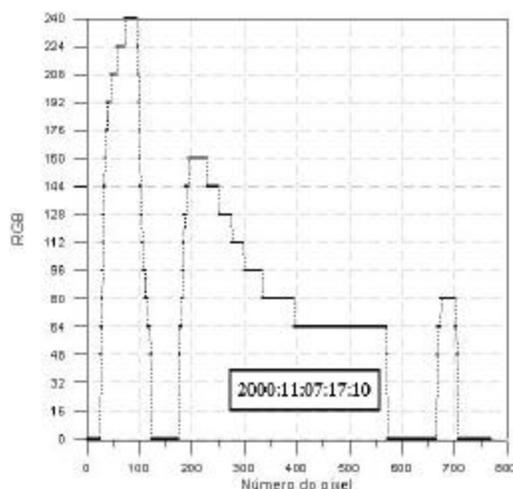


Figura 6.8 (b) – Variação dos valores de *RGB* num dia de céu limpo.

A Figura 6.8 (c) apresenta o gráfico que é observado quando a posição solar encontra-se fora do ângulo de visão da câmera. O ângulo horário é positivo, uma vez que a imagem apresenta o máximo valor de *RGB* situado à esquerda do gráfico, o que corresponde à posição oeste da imagem. Um outro indicativo da baixa altura solar está representado pela extensão da região de menor *RGB*. Por outro lado, o valor máximo,  $RGB = 176$ , mostra que a região circumsolar não é atravessada pela linha de controle.

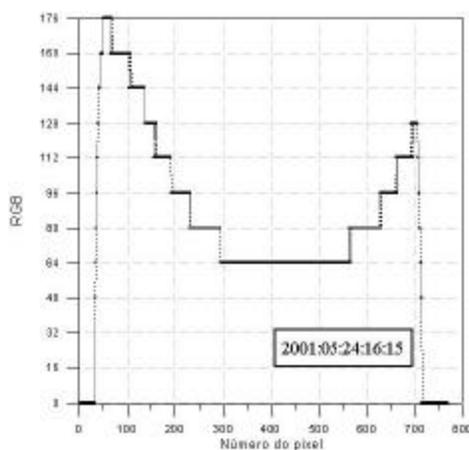


Figura 6.8 (c) – Variação dos valores de *RGB* num dia de céu limpo.

#### 6.3.4 VARIAÇÃO DO *RGB* NA CONDIÇÃO DE CÉU PARCIALMENTE NUBLADO

Normalmente é difícil identificar a condição de céu parcialmente nublado, a partir de uma linha de controle, pois muitas vezes tratam-se de casos mistos, como já foi exemplificado. A melhor caracterização é observada quando o céu é composto por cúmulos, ocupando áreas relativamente grandes e, de preferência, atravessando a linha de controle. As Figuras 6.9 (a) e (b) apresentam dois exemplos que atendem às condições descritas acima.

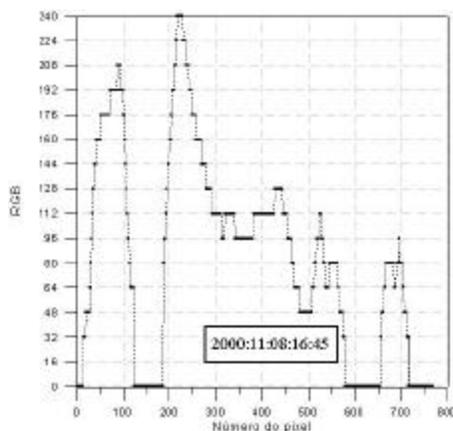


Figura 6.9 (a) – Variação dos valores de *RGB* num dia de céu parcialmente nublado.

A Figura 6.9 (a) é caracterizada por uma série de pequenos degraus, parecido com a condição de céu limpo, mas neste caso, as regiões atravessadas pela linha de controle são muito menores. Além disso, não se observa a mesma regularidade.

Na Figura 6.9 (b) observa-se o mesmo padrão do gráfico anterior. Entretanto, neste caso, a região central do gráfico tem um baixo valor de *RGB*, que se estende, formando um largo degrau. Isto indica que a linha de controle atravessa uma região sem nuvens, situada na parte central da imagem.

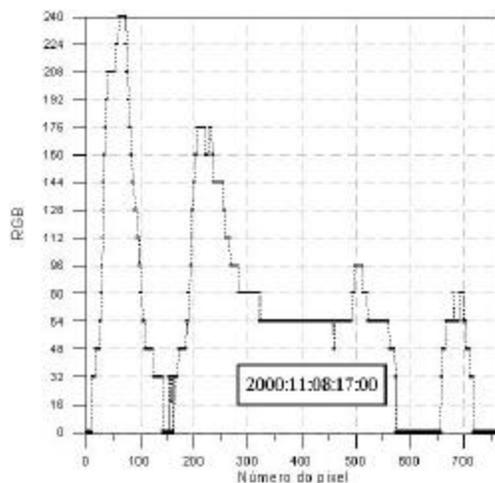


Figura 6.9 (b) – Variação dos valores de *RGB* num dia de céu parcialmente nublado.

## CAPÍTULO 7

### ANÁLISE DOS RESULTADOS – MAPAS DE DISTRIBUIÇÃO DE INTENSIDADE DA RADIAÇÃO DIFUSA CELESTE

Neste capítulo são apresentados os mapas de distribuição de intensidade relativa e de distribuição de intensidade direcional da radiação difusa celeste. A análise dos resultados correspondentes à distribuição de intensidade relativa refere-se ao conjunto de 48 imagens selecionadas, cujas características estão descritas nas Tabelas 6.1 e 6.2. Os mapas de distribuição de intensidade relativa são analisados com o auxílio de tabelas, que relacionam cada conjunto de arquivos com os valores de intensidade relativa presente nas respectivas imagens.

Para avaliar o comportamento da distribuição de intensidade direcional da radiação difusa celeste, foram selecionadas 16 imagens: quatro para cada uma das diferentes condições de nebulosidade. Neste caso, necessita-se de uma reconstrução da imagem, de acordo com o procedimento descrito no Capítulo 5. Também são apresentados tabelas contendo dados resultantes do processo de análise das imagens.

Finalmente, determina-se o índice de nebulosidade para algumas das imagens que correspondem à condição de céu parcialmente nublado.

#### 7.1 MAPAS DE DISTRIBUIÇÃO DE INTENSIDADE RELATIVA

As Figuras 7.1 a 7.4 exibem os mapas de níveis de cinza da distribuição de intensidade relativa, obtidos para as 48 imagens do hemisfério celeste. As características destas imagens são apresentadas na Tabela 6.1 (a) – 6.1 (d) do capítulo anterior. As Figuras também mostram as correspondentes regiões que apresentam as mesmas intensidades detectadas na direção do zênite e que serviram como parâmetro de estudo.

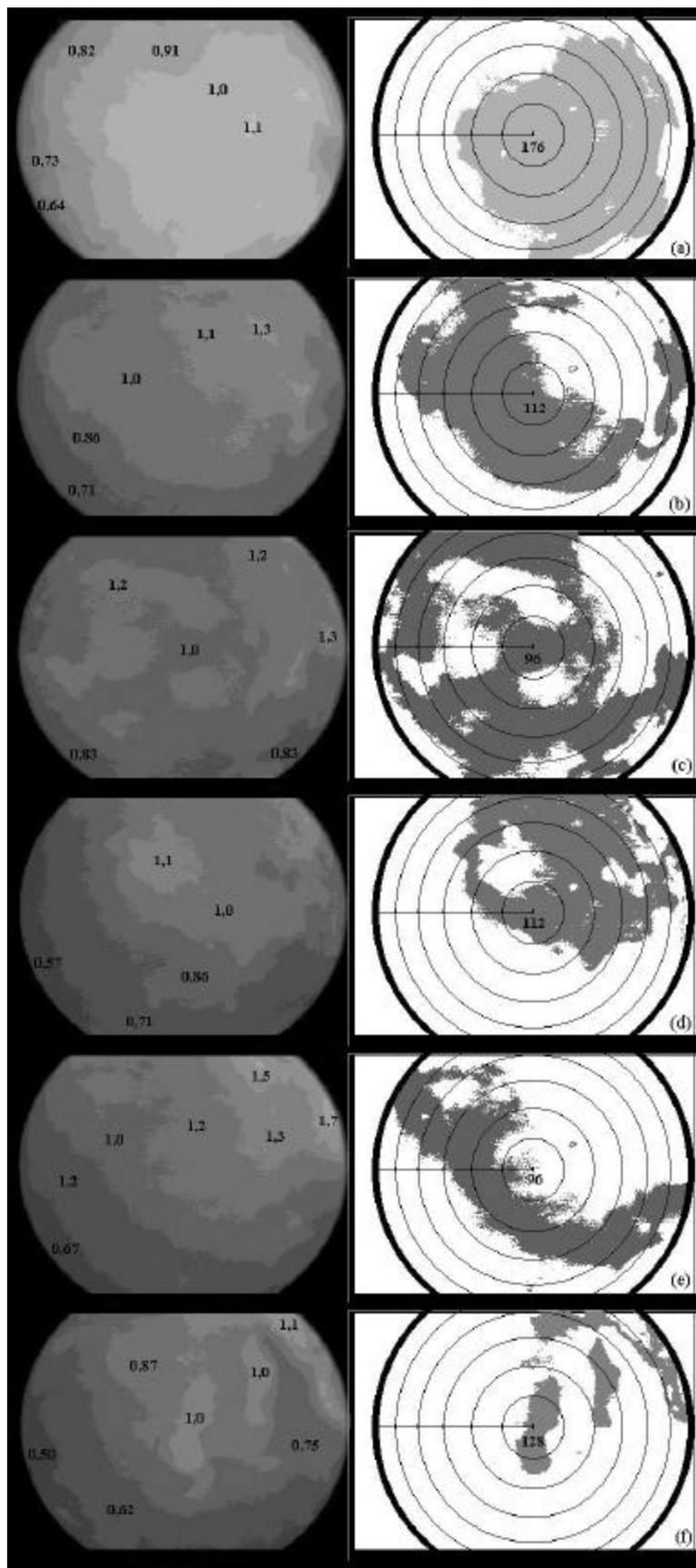


Figura 7.1 (a-f) – Mapas de distribuição de intensidade relativa sob condição de céu encoberto opaco e região que contém o pixel do zênite.

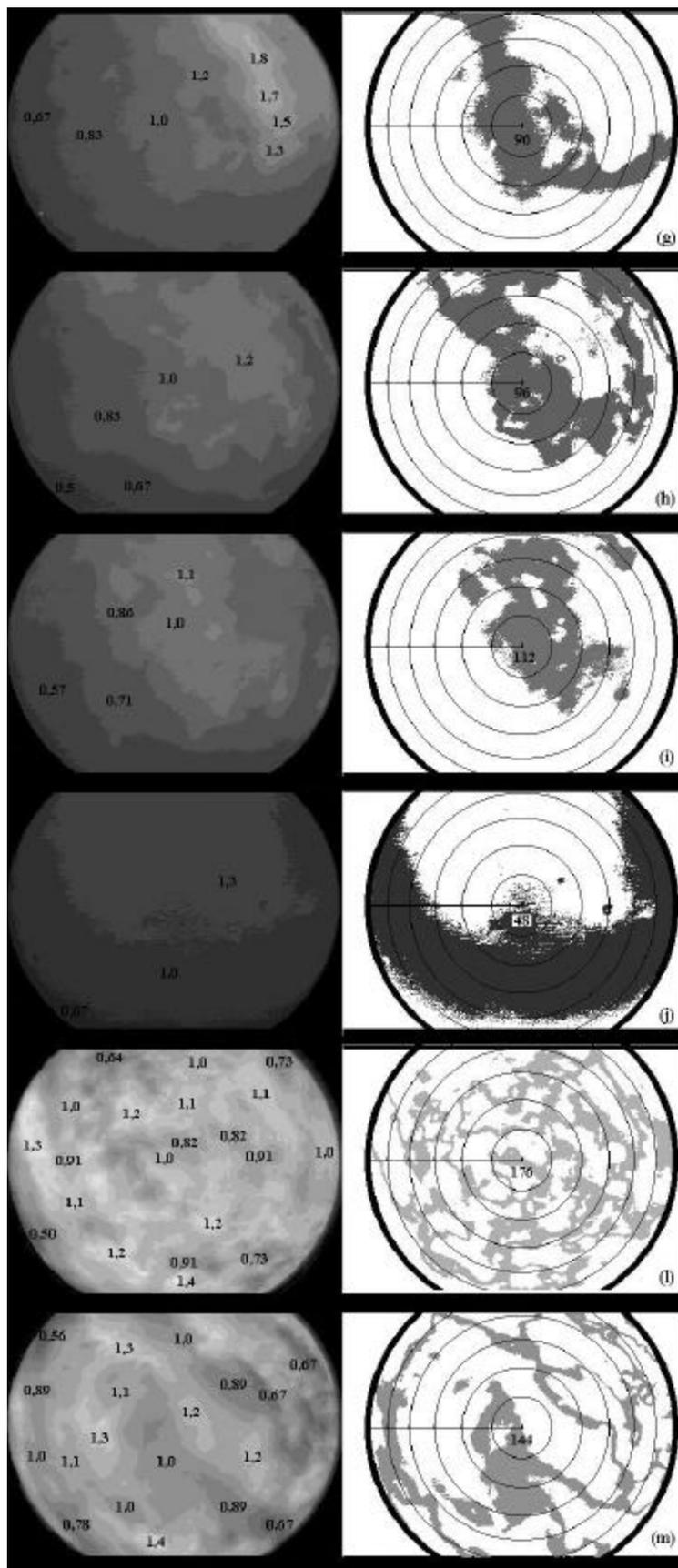


Figura 7.1 (g-m) - Mapas de distribuição de intensidade relativa sob condição de céu encoberto opaco e região que contém o pixel do zênite.

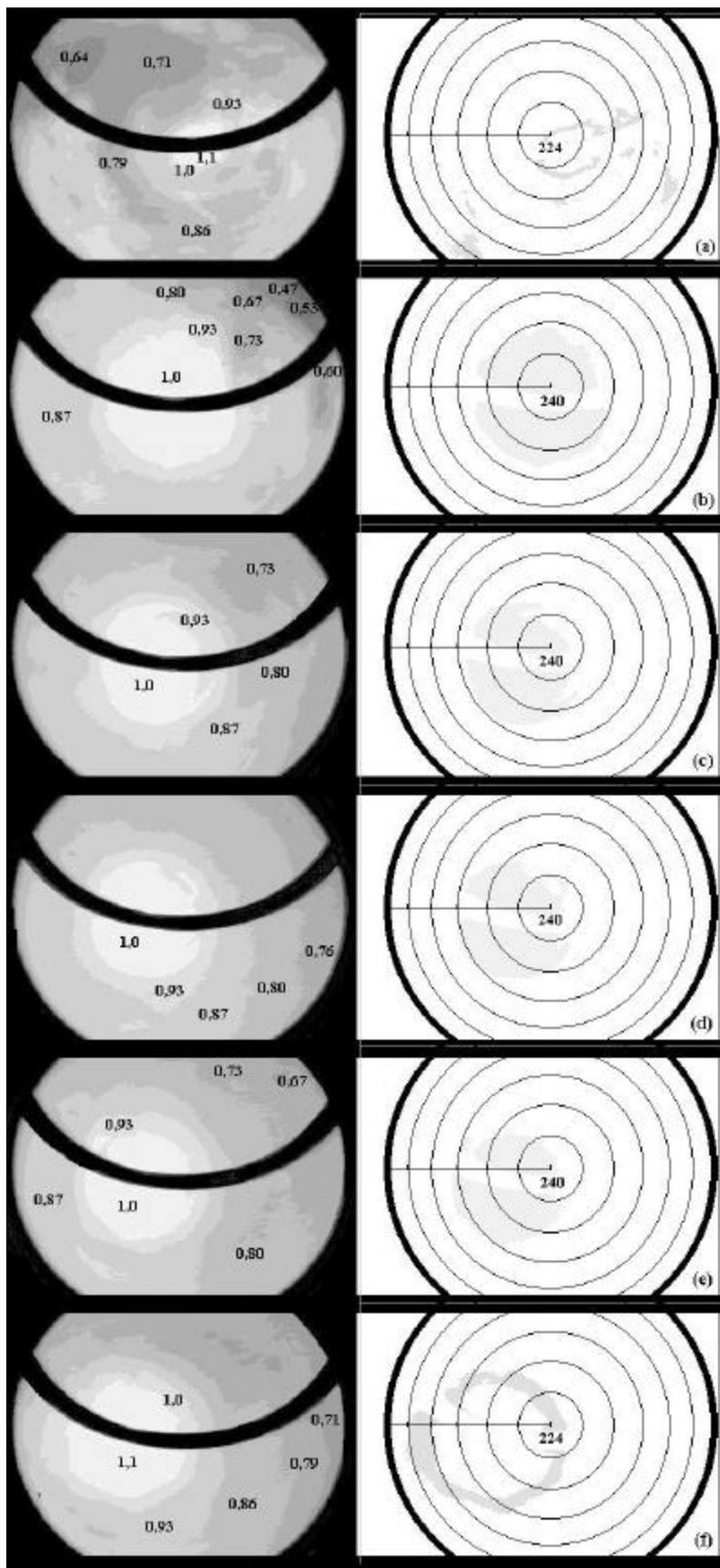


Figura 7.2 (a-f) - Mapas de distribuição de intensidade relativa sob condição de céu encoberto não-opaco e região que contém o pixel do zênite.

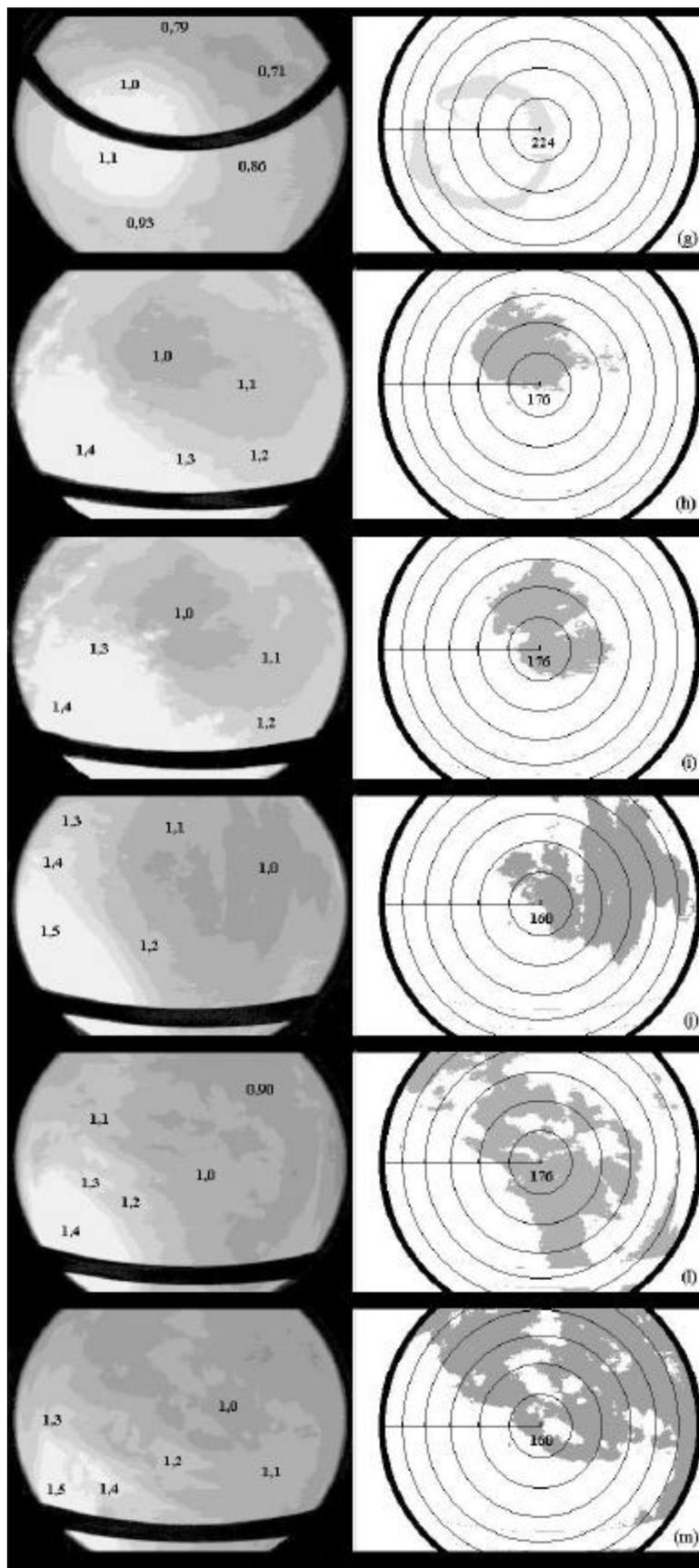


Figura 7.2 (g–m) - Mapas de distribuição de intensidade relativa sob condição de céu encoberto não-opaco e região que contém o pixel do zênite.

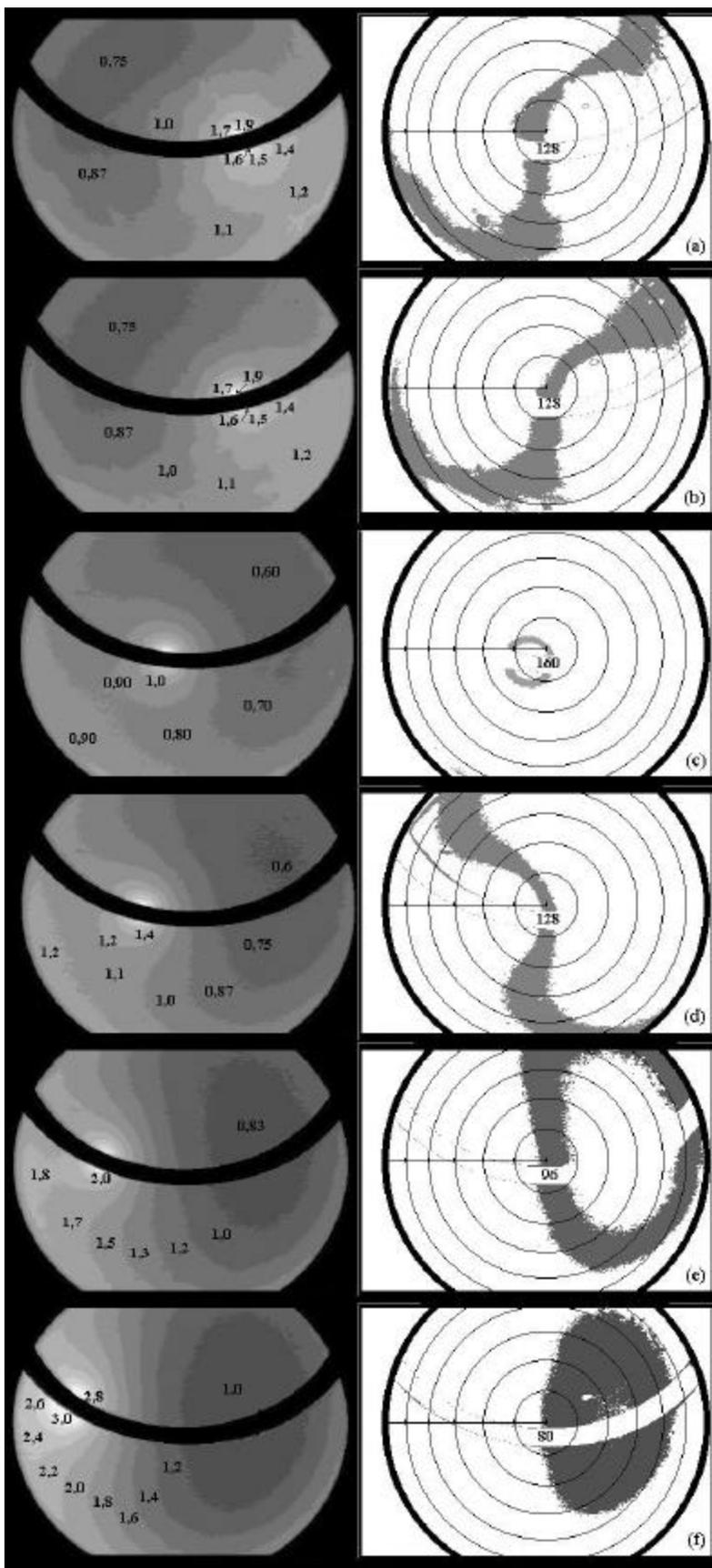


Figura 7.3 (a-f) - Mapas de distribuição de intensidade relativa sob condição de céu limpo e região que contém o pixel do zênite.

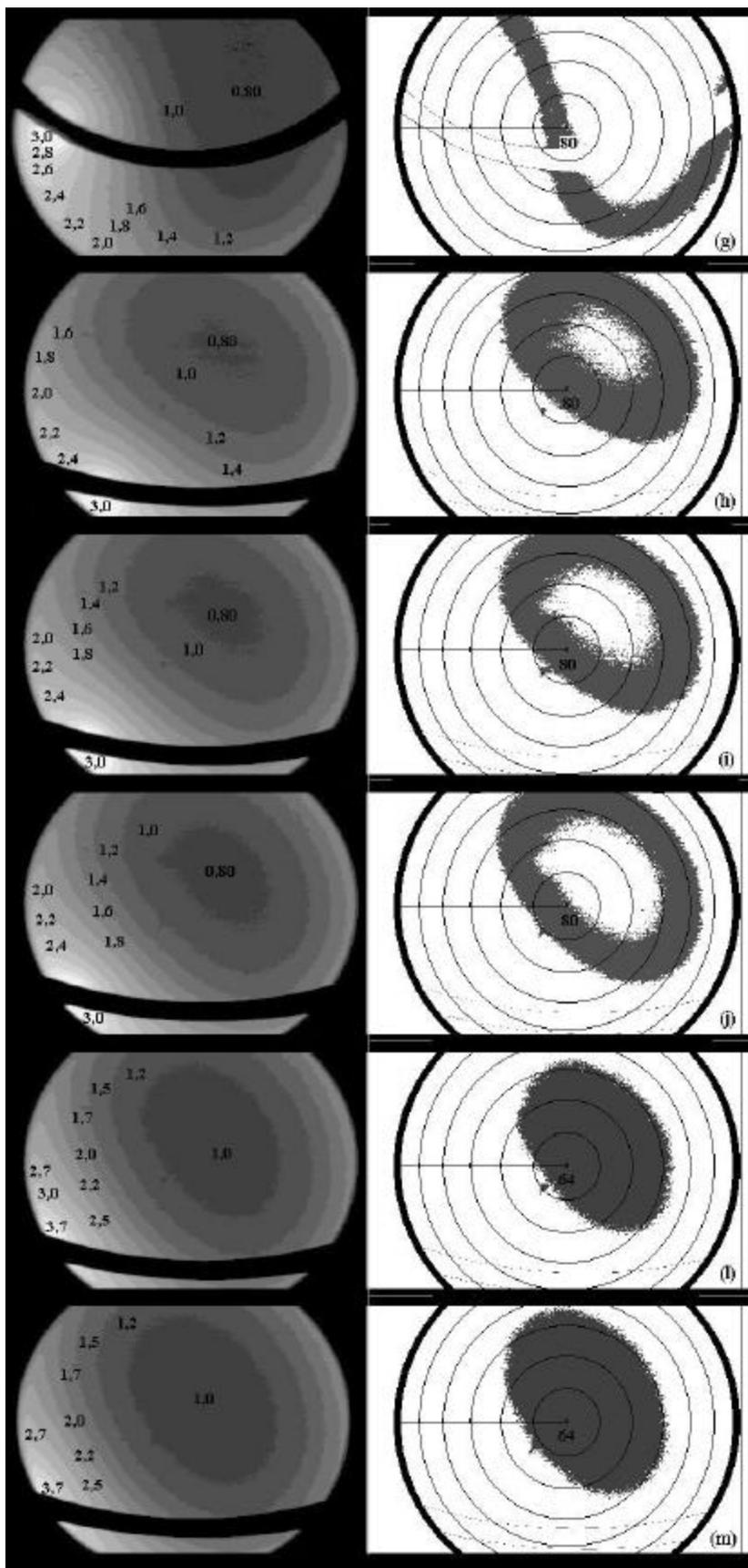


Figura 7.3 (g–m) - Mapas de distribuição de intensidade relativa sob condição de céu limpo e região que contém o pixel do zênite.

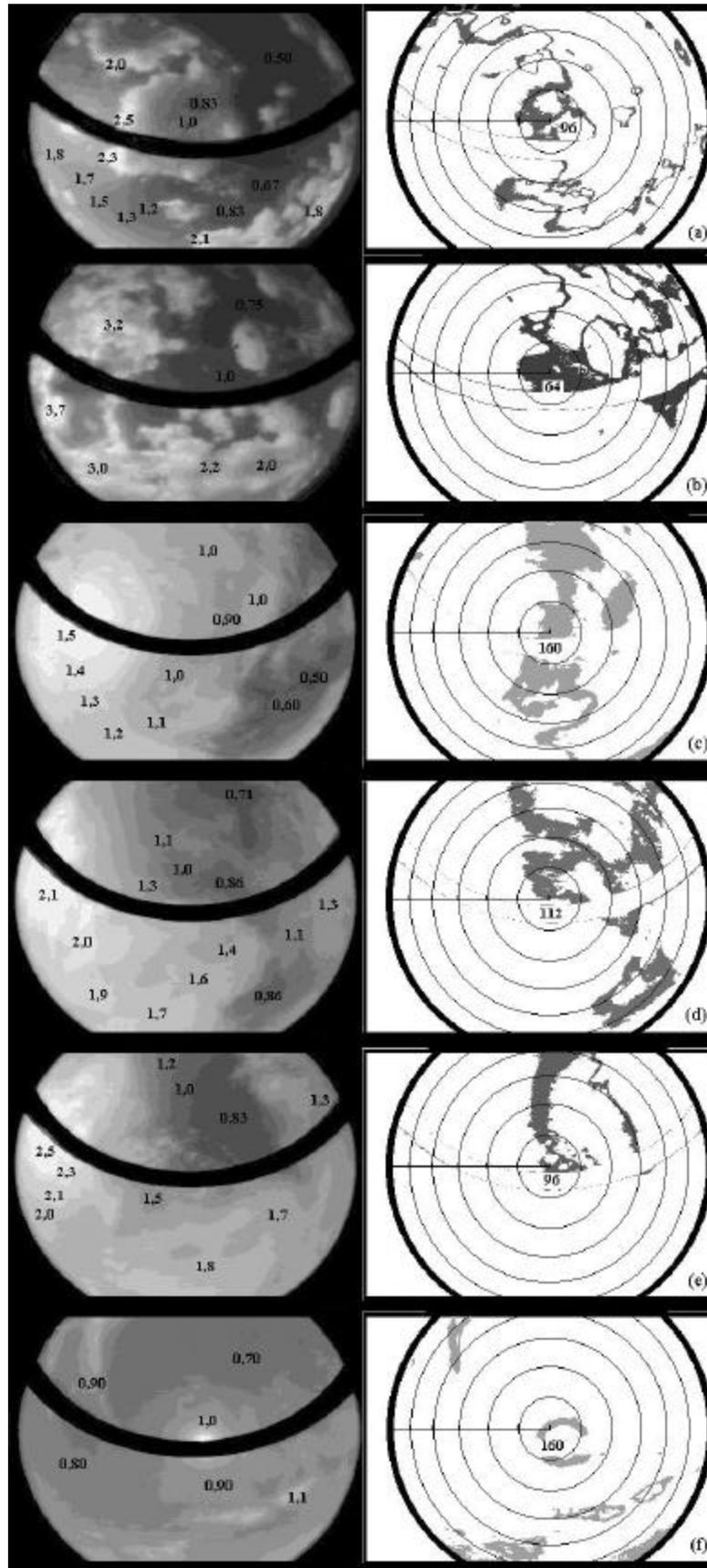


Figura 7.4 (a-f) - Mapas de distribuição de intensidade relativa sob condição de céu parcialmente nublado e região que contém o pixel do zênite.

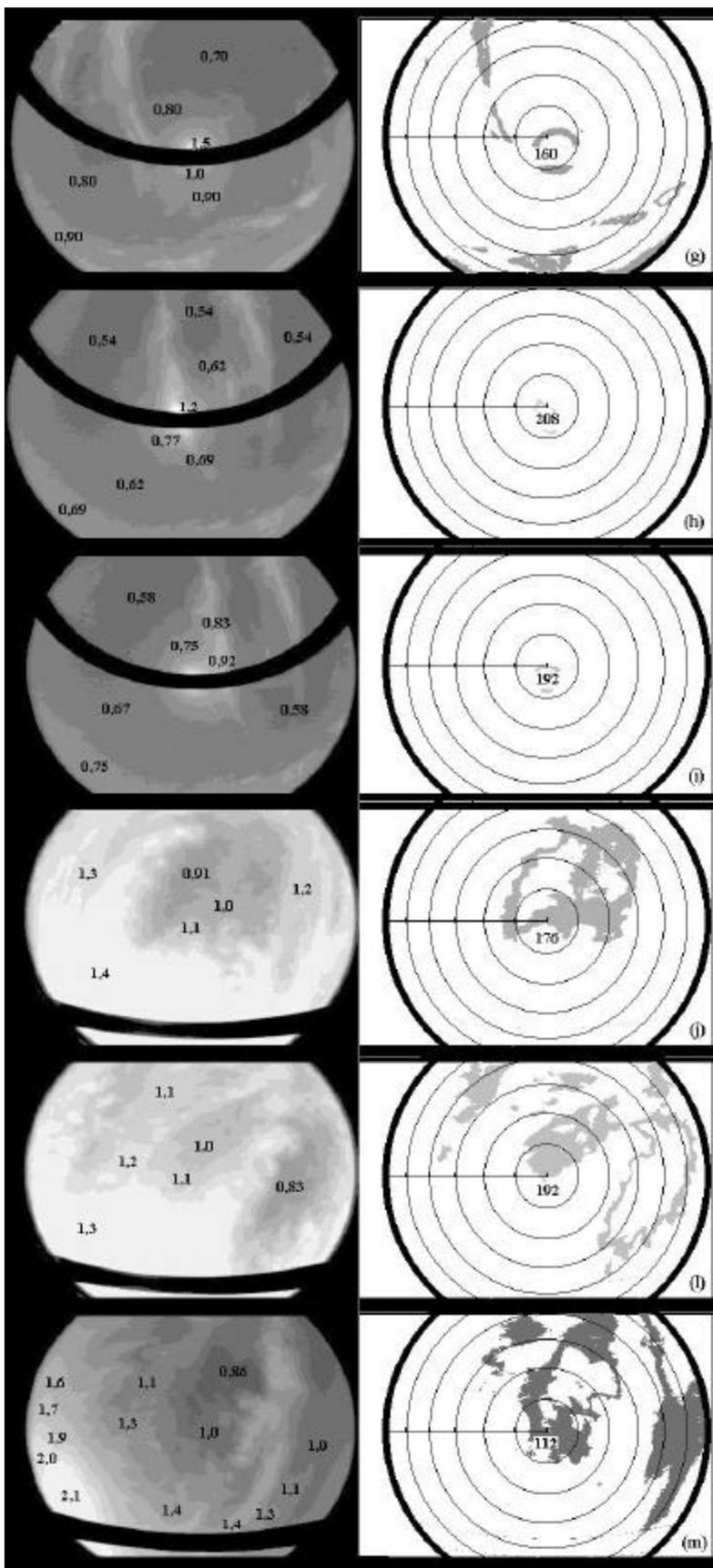


Figura 7.4 (g-m) - Mapas de distribuição de intensidade relativa sob condição de céu parcialmente nublado e região que contém o pixel do zênite.

## 7.2 ANÁLISE DAS IMAGENS E DOS VALORES DE INTENSIDADE RELATIVA

As Tabelas 7.1 a 7.4 mostram todos os valores de intensidade relativa, correspondentes aos mapas de distribuição de intensidade relativa, apresentadas nas Figuras 6.1 a 6.4. Os valores de *RGB* destas imagens variam entre 32 e 240, sendo o mínimo valor deste intervalo observado em apenas uma imagem. Assim, os valores de *RGB* inferiores a 112 são considerados baixos; os médios valores variam entre 128 e 176; valores de *RGB* acima de 192 são considerados altos. O pixel que corresponde ao zênite tem valor de intensidade relativa igual a 1.

As tabelas também permitem identificar o número de níveis de cinza, representados pelo número de valores de intensidade relativa, presentes em cada imagem. A variação do número de níveis de cinza depende das condições de medida.

### 7.2.1 ANÁLISE DOS VALORES DE INTENSIDADE RELATIVA E *RGB* NA CONDIÇÃO DE CÉU ENCOBERTO OPACO

A Tabela 7.1 mostra os valores de intensidade relativa obtidos sob condição de céu encoberto opaco, correspondentes as Figuras 7.1 (a – m).

Tabela 7.1 – Intensidade relativa das imagens adquiridas sob condição de céu encoberto opaco

ARQUIVO	INTENSIDADE RELATIVA									
17Ma1445	0,64	0,73	0,82	0,91	1,0	1,1				
17Ma1555	0,72	0,86	1,0	1,1	1,3					
17Ma1605	0,83	1,0	1,2	1,3						
17Ma1610	0,57	0,72	0,86	1,0	1,1	1,3				
17Ma1615	0,66	0,83	1,0	1,2	1,3	1,5	1,7			
17Ma1620	0,50	0,62	0,75	0,87	1,0	1,1				
17Ma1625	0,66	0,83	1,0	1,2	1,3	1,5	1,7	1,8		
17Ma1630	0,50	0,66	0,83	1,0	1,2					
17Ma1635	0,57	0,72	0,86	1,0	1,1					
17Ma1700	0,67	1,0	1,3							
21Ma1210	0,55	0,64	0,73	0,82	0,91	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
21Ma1230	0,56	0,67	0,78	0,89	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	

Os resultados obtidos no dia 17 de maio de 2001 são apresentados na Tabela 7.5 e se referem as imagens das Figuras 7.1 (a – j). Nesta condição de nebulosidade, a intensidade relativa na região do zênite corresponde a valores de *RGB* que variam de médios a baixos. Esta situação é alterada, somente quando uma camada de nuvem mais clara se desloca para esta região, como no caso da Figura 7.1 (a). Estas imagens apresentam um número relativamente baixo de níveis de cinza.

Mesmo sem uma dependência com a posição solar, os mapas das Figuras 7.1 (a - m) mostram que a diferença entre os horários das medidas produz um escurecimento na região do zênite. Entretanto, este comportamento, que pode ser considerado óbvio para qualquer condição de céu, não é observado com regularidade, pois em alguns casos, camadas de nuvem mais claras atingem a região do zênite.

As Figuras 7.1 (l) e 7.1 (m) mostram os resultados das duas imagens escolhidas no dia 21 de maio de 2001. A região do zênite da segunda imagem tem um baixo valor de *RGB*, porque está coberta por uma camada de nuvens menos densa. Os valores de *RGB* na região do zênite podem apresentar grande variação. Além disso, observa-se que o intervalo de variação da intensidade relativa é amplo, ou seja, existem muitos níveis de cinza nestas imagens. Estes comportamentos são observados devido à presença estratocúmulos.

## 7.2.2 ANÁLISE DOS VALORES DE INTENSIDADE RELATIVA E *RGB* NA CONDIÇÃO DE CÉU ENCOBERTO NÃO-OPACO

As Figuras 7.2 (a - m) mostram os mapas de distribuição de intensidade relativa obtidos para as imagens adquiridas sob condição de céu encoberto não-opaco, correspondentes aos dias 13 de dezembro de 2000 e 31 de maio de 2001.

A Figuras 7.2 (a - g) mostram os valores de intensidade relativa para as medidas realizadas no dia 13 de dezembro de 2000 e as correspondentes regiões que apresentam as mesmas intensidades detectadas na direção do zênite. A proximidade do solstício de verão faz com que o Sol se movimente próximo do centro da imagem. Assim, a presença de grandes regiões circunsolares é evidenciada nestes gráficos, uma vez que a intensidade relativa na região do zênite corresponde aos máximos valores de *RGB*, durante todo o intervalo de medidas. Nesta condição de nebulosidade, a existência de poucos valores de intensidade relativa, indica que existe uma camada de nuvens mais uniforme. Por outro lado, um grande número de valores de intensidade relativa indica a presença de camadas de nuvens menos espessas.

As Figuras 7.2 (h - m), mostra os mapas referentes às imagens do dia 31 de maio de 2001. Neste caso, o Sol se desloca abaixo da posição central da imagem, devido a proximidade do solstício de inverno. Em consequência, a intensidade relativa na região do zênite corresponde a valores *RGB* inferiores aos do caso anterior.

A Tabela 7.2 mostra os valores de intensidade relativa e o número de níveis de cinza obtidos em cada um destes mapas. Observa-se que em quase todas as imagens existem poucos níveis de cinza. A única exceção é observada na imagem adquirida no dia 13 de dezembro às 13 h e 30 min, que apresenta nove níveis de cinza.

Tabela 7.2 – Intensidade relativa das imagens adquiridas com o céu encoberto não-opaco

ARQUIVO	INTENSIDADE RELATIVA								
13Dz1245	0,65	0,71	0,79	0,86	0,93	1,0	1,1		
13Dz 1330	0,47	0,53	0,60	0,67	0,73	0,80	0,87	0,93	1,0
13Dz 1345	0,73	0,80	0,87	0,93	1,0				
13Dz 1415	0,73	0,80	0,87	0,93	1,0				
13Dz 1430	0,67	0,73	0,80	0,87	0,93	1,0			
13Dz 1445	0,71	0,79	0,86	0,93	1,0	1,1			
13Dz 1500	0,71	0,79	0,86	0,93	1,0	1,1			
31Ma1450	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4				
31Ma1500	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4				
31Ma1550	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5			
31Ma1600	0,91	1,00	1,1	1,2	1,3	1,4			
31Ma1610	0,90	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5		

### 7.2.3 ANÁLISE DOS VALORES DE INTENSIDADE RELATIVA E *RGB* NA CONDIÇÃO DE CÉU LIMPO

As Figuras 7.3 (a - c) mostram os mapas de intensidade relativa, obtidos a partir das imagens de céu limpo, cujas medidas foram realizadas nos dias 18 de dezembro de 2000, 7 de novembro de 2000 e 24 de maio de 2001, respectivamente.

De acordo com o Capítulo 2, uma das características das condições de céu limpo é a existência de uma série regiões circulares. Neste caso, ao contrário da condição de céu

encoberto não-opaco, estas regiões são pequenas e mais numerosas. Por esta razão, a intensidade na região do zênite, normalmente corresponde a valores de *RGB* que variam de médios a baixos.

De acordo com as Figuras 7.3 (a – f), o máximo valor de *RGB*, observado na região do zênite para as medidas realizadas no dia 18 de dezembro de 2000, é de 160; a Figura 7.3 (g) mostra uma medida realizada no dia 7 de novembro de 2000, cujo valor de *RGB* na região do zênite é de 80; para as medidas realizadas no dia 24 de maio de 2001, os valores de *RGB* no zênite variam entre 64 e 80, conforme as Figuras 7.3 (h-m).

Tabela 7.3 – Intensidade relativa das imagens adquiridas sob condição de céu limpo

ARQUIVO	INTENSIDADE RELATIVA												
18Dz1130	0,75	0,87	1,0	1,1	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,9			
18Dz1200	0,75	0,87	1,0	1,1	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,9			
18Dz1400	0,60	0,70	0,80	0,90	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5			
18Dz1500	0,62	0,75	0,87	1,0	1,1	1,2	1,4	1,5	1,6	1,7	1,9		
18Dz1600	0,83	1,0	1,2	1,3	1,5	1,7	1,8	2,0	2,2	2,3	2,5		
18Dz1700	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0		
07Nv1710	1,0	1,2	1,5	1,7	2,0	2,2	2,5	2,7	3,0	3,2	3,5	3,7	
24Ma1430	0,80	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	
24Ma1500	0,80	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	
24Ma1530	0,80	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	
24Ma1600	1,0	1,2	1,5	1,7	2,0	2,2	2,5	2,7	3,0	3,2	3,5	3,7	
24Ma1615	1,0	1,2	1,5	1,7	2,0	2,2	2,5	2,7	3,0	3,2	3,5	3,7	

A Tabela 7.3 mostram que, sob esta condição, os valores de intensidade relativa variam em um amplo intervalo. Observa-se que a mínima intensidade relativa tem valor 0,60 e corresponde a imagem adquirida no dia 18 de dezembro às 14 h. Por outro lado, a imagem adquirida no dia 7 de novembro às 17 h e 10 min, apresenta a máxima intensidade relativa, cujo valor é 3,7. Estes resultados mostram que, sob condições de céu limpo, existe uma forte dependência da intensidade com a posição solar.

A Tabela 7.3 também mostra que as imagens adquiridas sob condição de céu limpo apresentam muitos níveis de cinza. Este comportamento está de acordo com os aspectos teóricos já discutidos, demonstrando que, em relação aos casos anteriores, espera-se um comportamento

mais anisotrópico. O número de níveis de cinza varia entre 9 e 12. Observa-se que grande parte das imagens apresentam o número máximo de níveis.

#### 7.2.4 ANÁLISE DOS VALORES DE INTENSIDADE RELATIVA E *RGB* NA CONDIÇÃO DE CÉU PARCIALMENTE NUBLADO

Os mapas de intensidade relativa e seus correspondentes valores de *RGB* na direção do zênite são mostrados nas Figuras 7.4 (a - m), que correspondem aos conjuntos de imagens adquiridas sob diferentes tipos de céu parcialmente nublado. Nestas condições de nebulosidade é difícil estabelecer um comportamento característico. Entretanto, os resultados são coerentes com os estudos apresentados no Capítulo 2.

As Figuras 7.4 (a) e (b) apresentam os dados de duas imagens que caracterizam uma condição de acentuada anisotropia. Observa-se que os valores de intensidade relativa apresentam uma grande variação, especialmente quando a região do zênite não está encoberta por nuvens. A posição solar não é identificada e não são observadas regiões circunsolares. As altas intensidades relativas que, neste caso, correspondem aos máximos valores de *RGB*, são observadas em regiões cobertas por camadas de nuvens que refletem a radiação solar.

As Figuras 7.4 (c - e) apresentam os mapas correspondentes às imagens no dia 13 de dezembro. Da mesma forma que no caso anterior, observa-se que o intervalo de variação da intensidade relativa é bem amplo. Este comportamento se deve ao contraste existente entre as regiões circunsolares, mais claras e as regiões de céu limpo. Entretanto a máxima intensidade relativa é um pouco menor do que no caso anterior, pois as imagens mostram que a região do zênite encontra-se encoberta por camadas de nuvens.

As Figuras 7.4 (f - i) mostram os mapas referentes às imagens adquiridas no dia 18 de dezembro de 2000, com o céu parcialmente nublado por cirros e por cirrocúmulos. O horário em que as medidas foram realizadas permitiu obter altos valores de *RGB* na região do zênite, correspondentes aos pequenos anéis circunsolares. Por esta razão, a intensidade relativa, na região do zênite, corresponde a altos valores de *RGB*.

A Figura 7.4 (j - m) mostra os mapas correspondentes a um conjunto de três imagens adquiridas durante o dia 31 de maio de 2001. Neste caso, o predomínio de camadas de nuvens relativamente uniformes, brancas e espessas faz com que os valores das intensidades relativas, na região do zênite, correspondam a valores de *RGB* de altos a médios.

Tabela 7.4 – Intensidade relativa das imagens adquiridas sob condição de céu parcialmente nublado

ARQUIVO	INTENSIDADE RELATIVA													
	0,50	0,67	0,83	1,0	1,2	1,3	1,5	1,7	1,8	2,0	2,1	2,3	2,5	
08Nv1645	0,50	0,67	0,83	1,0	1,2	1,3	1,5	1,7	1,8	2,0	2,1	2,3	2,5	
08Nv1700	0,75	1,0	1,2	1,5	1,7	2,0	2,2	2,5	2,7	3,0	3,2	3,3	3,7	
13Dz1630	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5			
13Dz1730	0,71	0,86	1,0	1,1	1,3	1,4	1,6	1,7	1,8	2,0	2,1			
13Dz1745	0,83	1,0	1,2	1,3	1,5	1,7	1,8	2,0	2,2	2,3	2,5			
18Dz1250	0,70	0,80	0,90	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5					
18Dz1300	0,70	0,80	0,90	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5					
18Dz1315	0,54	0,62	0,69	0,77	0,85	0,92	1,0	1,1	1,2					
18Dz1330	0,58	0,67	0,75	0,83	0,92	1,0	1,1	1,2	1,3					
31Ma1320	0,91	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4								
31Ma1330	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3							
31Ma1630	0,86	1,0	1,1	1,3	1,4	1,5	1,7	1,9	2,0	2,1				

### 7.3 MAPAS DE DISTRIBUIÇÃO DE INTENSIDADE DIRECIONAL DA RADIAÇÃO DIFUSA CELESTE

Para validar esta metodologia, que permite obter os mapas de distribuição de intensidade direcional da radiação difusa celeste, foram selecionadas 16 imagens, adquiridas sob diferentes condições de nebulosidade. As Tabelas 7.1 a 7.4 apresentam as características relacionadas às imagens, da mesma forma que nas Tabelas 6.1.

As Figuras 7.5 a 7.8 mostram as imagens com os respectivos valores de intensidade direcional associados aos diferentes níveis de cinza. Estes resultados foram obtidos a partir das considerações do Capítulo 5, com os valores de irradiância difusa corrigidos a partir de considerações geométricas [conforme Drummond, A. J., 1956].

As Tabelas 7.5 a 7.8 mostram os seguintes resultados associados ao processo de análise das imagens: valor de  $RGB$  ( $C_r$ ), número de pixels associados ao valor de  $RGB$  ( $n_r$ ), somatório do ângulo sólido de todos os pixels de mesmo  $RGB$  ( $\mathbf{W}_r$ ), distribuição de intensidade direcional da radiação difusa ( $i_r$ ) e o somatório dos ângulos sólidos multiplicados pela intensidade direcional da radiação difusa ( $\mathbf{W}_r \cdot i_r$ ).

Tabela 7.5 – Imagens em condições de céu encoberto opaco

Nome do Arquivo	Data	Hora	Irradiância difusa medida ( $\text{W.m}^{-2}$ )	Irradiância global medida ( $\text{W.m}^{-2}$ )
17Ma1545	17/5/2001	15 h 45 min	30	idem
17Ma1610	“	16 h 10 min	20	“
17Ma1625	“	16 h 25 min	20	“
17Ma1700	“	17 h 00 min	10	“

Tabela 7.6 – Imagens em condições de céu encoberto não-opaco

Nome do Arquivo	Data	Hora	Irradiância difusa medida ( $\text{W.m}^{-2}$ )	Irradiância global medida ( $\text{W.m}^{-2}$ )
13Dz 1345	31/5/2000	13 h 45 min	430	800
13Dz 1500	31/5/2000	15 h 00 min	360	690
31Ma1450	31/5/2001	14 h 50 min	180	-
31Ma1550	31/5/2001	15 h 50 min	100	-

Tabela 7.7 – Imagens em condições de céu limpo

Nome do Arquivo	Data	Hora	Irradiância difusa medida ( $\text{W.m}^{-2}$ )	Irradiância global medida ( $\text{W.m}^{-2}$ )
18Dz1130	18/12/2000	11 h 30 min	50	940
18Dz1200	18/12/2000	12 h 00 min	50	1010
18Dz1400	18/12/2000	14 h 00 min	40	1040
18Dz1500	18/12/2000	15 h 00 min	40	960

Tabela 7.8 – Imagens em condições de céu parcialmente nublado

Nome do Arquivo	Data	Hora	Irradiância difusa medida ( $\text{W.m}^{-2}$ )	Irradiância global medida ( $\text{W.m}^{-2}$ )
08Nv1700	08/11/2000	17 h 00 min	150	-
31Ma1320	31/5/2001	13 h 20 min	200	-
18Dz1300	18/12/2000	13 h 00 min	50	1070
18Dz1330	18/12/2000	13 h 30 min	40	1050

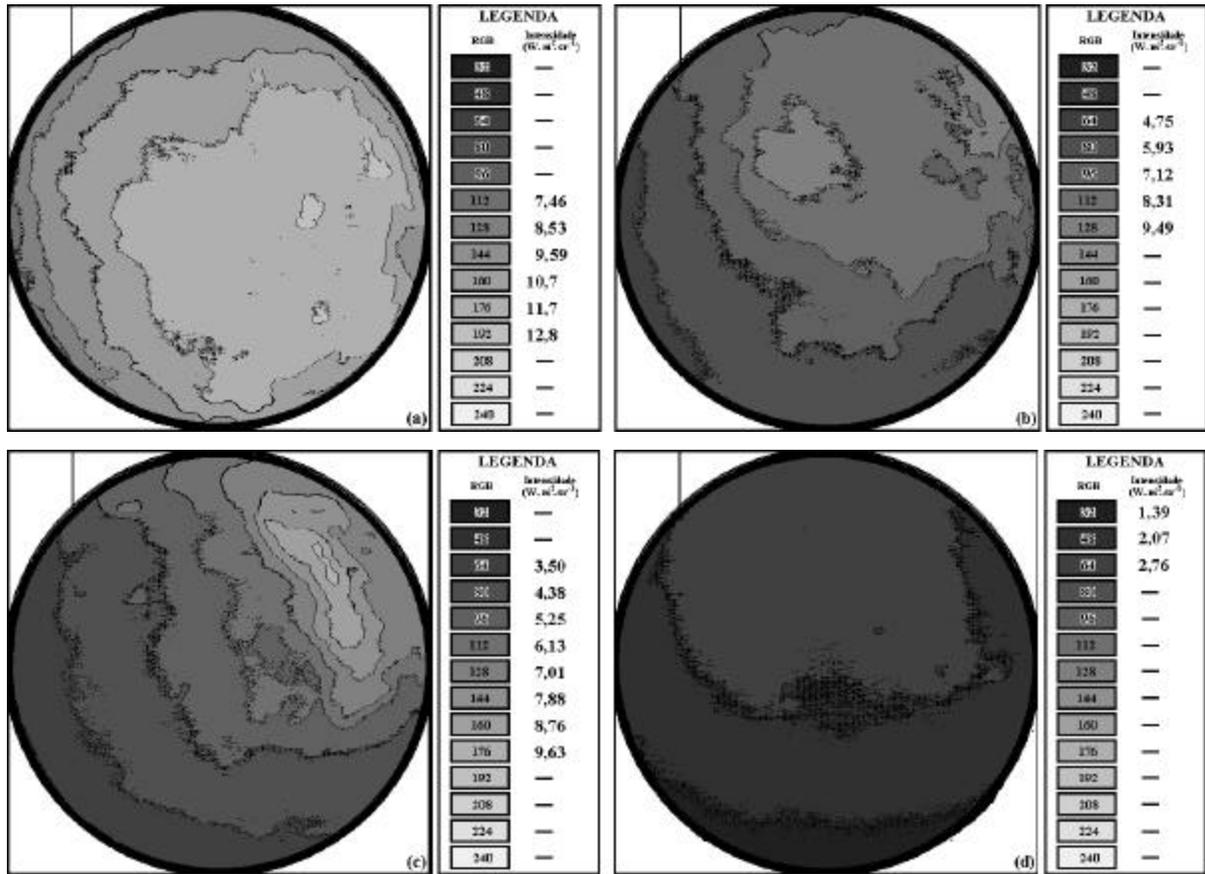


Figura 7.5 – Distribuição de intensidade direcional na condição de céu encoberto opaco.

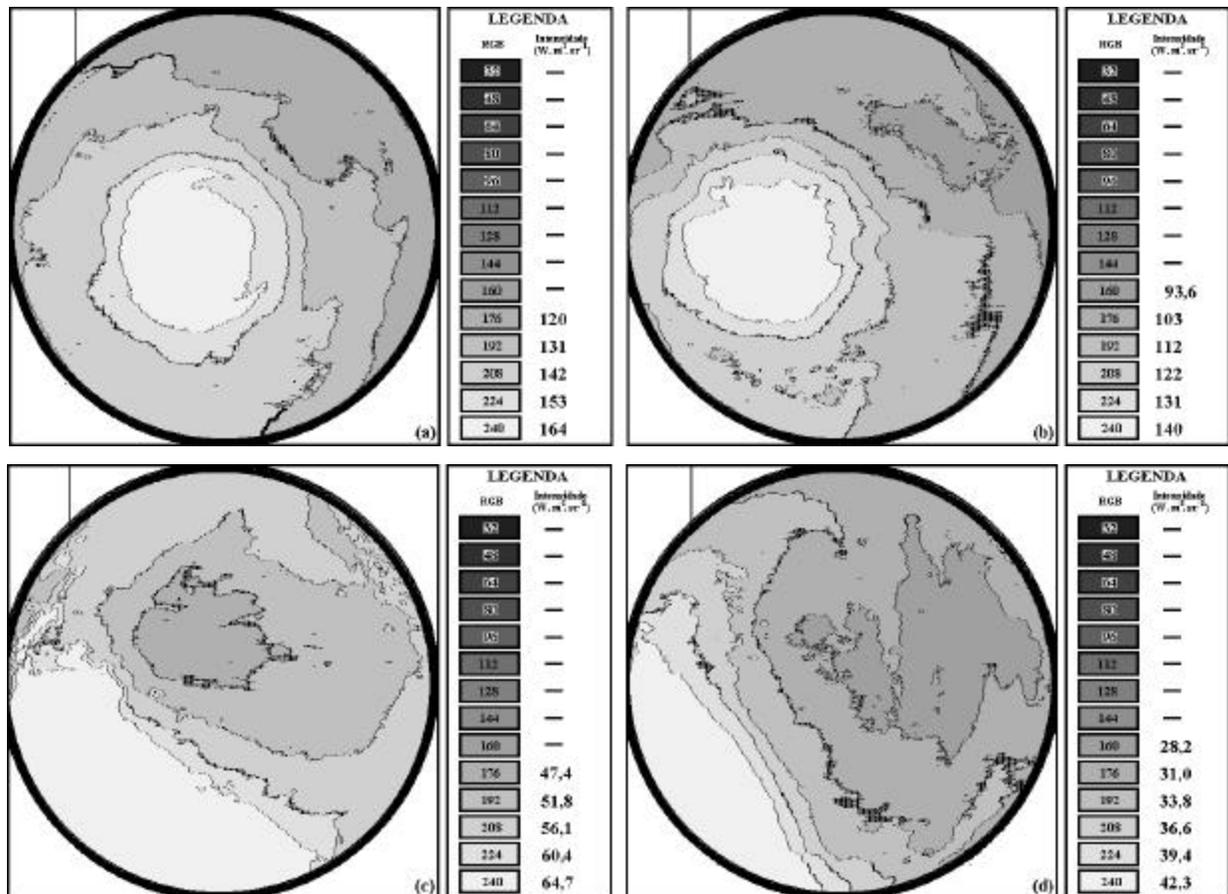


Figura 7.6 – Distribuição de intensidade direcional na condição de céu encoberto não-opaco.

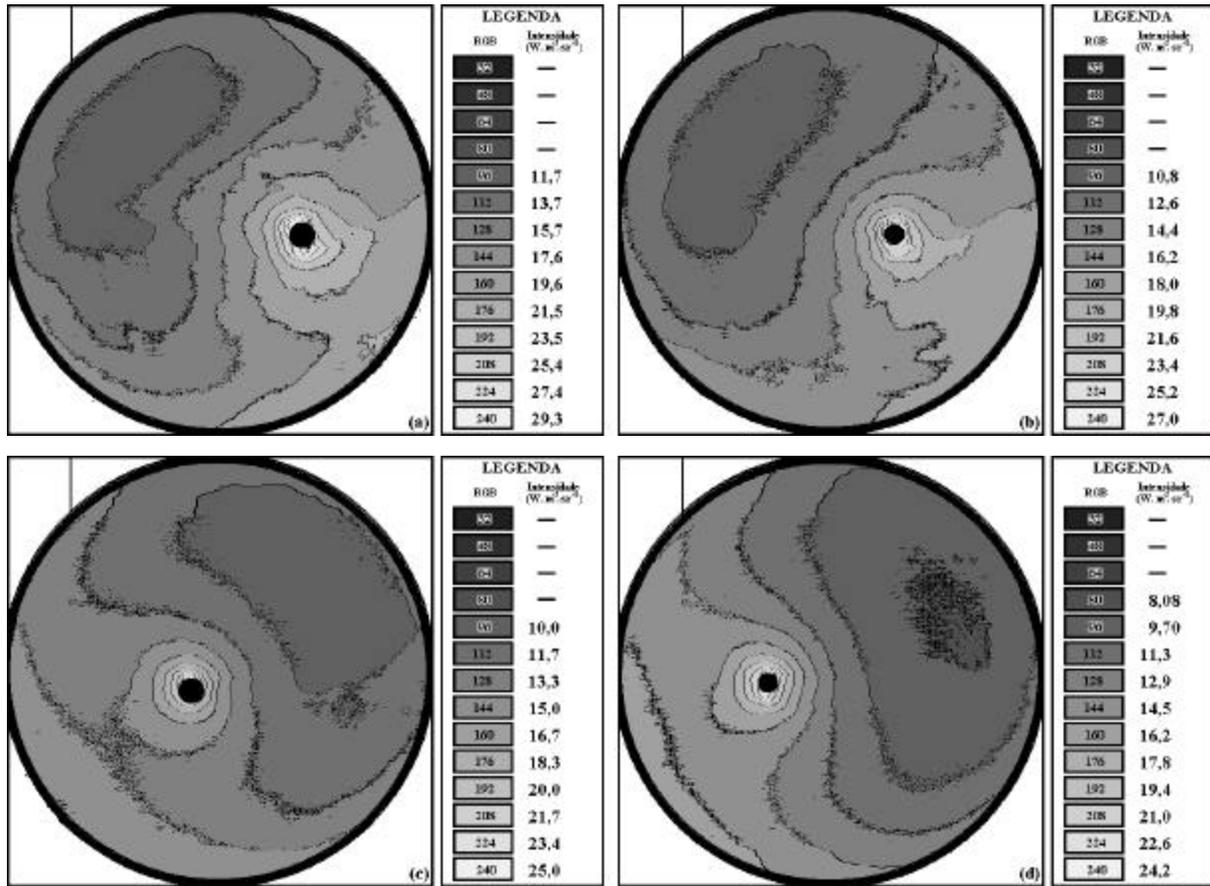


Figura 7.7 – Distribuição de intensidade direcional na condição de céu limpo.

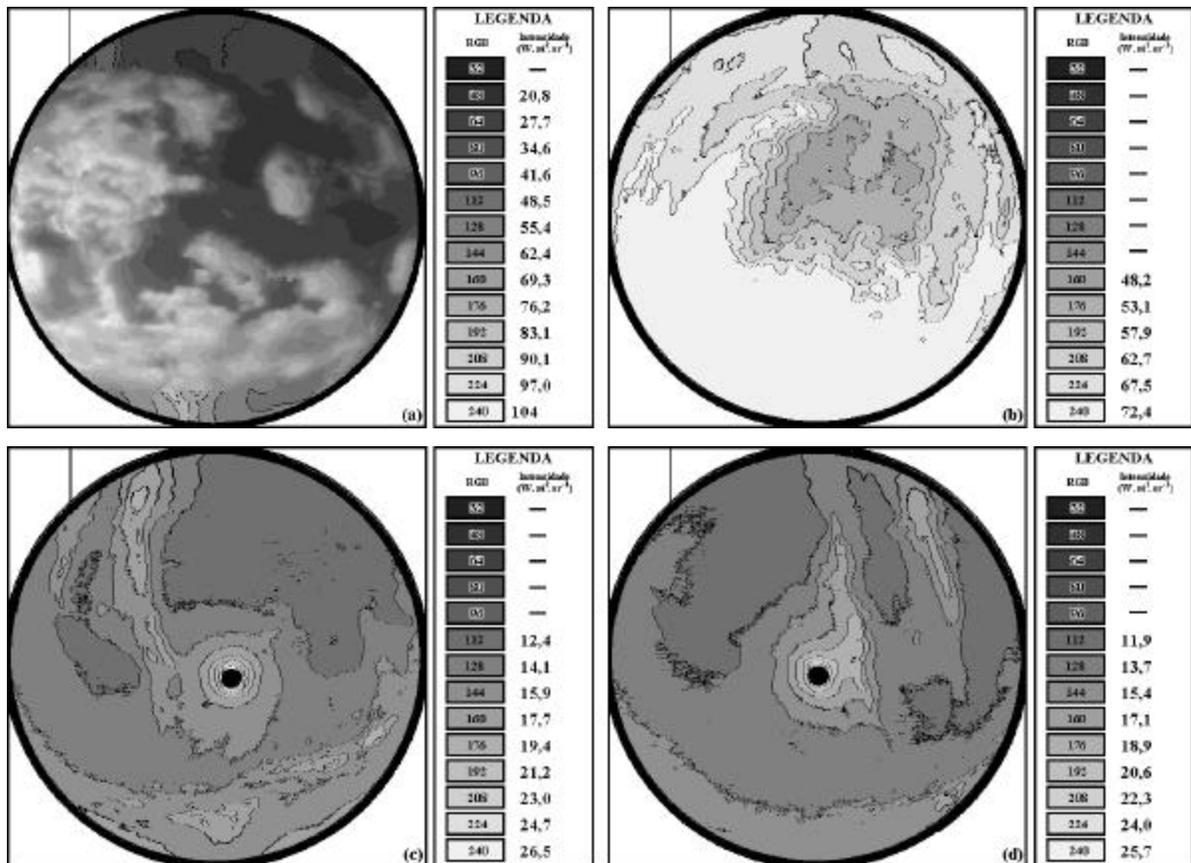


Figura 7.8 – Distribuição de intensidade direcional na condição de céu parcialmente nublado.

Tabelas 7.9 – Resultado da análise de imagens adquiridas sob condição de céu encoberto opaco:

(a) 2001-05-17-15-45; (b) 2001-05-17-16-10; (c) 2001-05-17-16-25; (d) 2001-05-17-17-00

<b>(a) RESULTADOS DA IMAGEM – 2001-05-17-15-45</b>				
$C_r$	$n_r$	$W_r$ (sr)	$i_r$ ( $W.m^{-2}.sr^{-1}$ )	$W_r.i_r$ ( $W.m^{-2}$ )
112	1440	0,023	7,46	0,177
128	9800	0,159	8,53	1,36
144	36600	0,595	9,59	5,71
160	51260	0,834	10,7	8,92
176	90400	1,47	11,7	17,2
192	2020	0,033	12,8	0,419
<b>TOTAL</b>	191520	3,11	-	33,8

<b>(b) RESULTADOS DA IMAGEM – 2001-05-17-16-10</b>				
$C_r$	$n_r$	$W_r$ (sr)	$i_r$ ( $W.m^{-2}.sr^{-1}$ )	$W_r.i_r$ ( $W.m^{-2}$ )
64	7920	0,129	4,75	0,611
80	59070	0,961	5,93	5,70
96	44440	0,722	7,12	5,14
112	66800	1,09	8,31	9,02
128	13600	0,221	9,49	2,10
<b>TOTAL</b>	191830	3,12	-	22,6

<b>(c) RESULTADOS DA IMAGEM – 2001-05-17-16-25</b>				
$C_r$	$n_r$	$W_r$ (sr)	$i_r$ ( $W.m^{-2}.sr^{-1}$ )	$W_r.i_r$ ( $W.m^{-2}$ )
64	33270	0,541	3,50	1,89
80	58850	0,957	4,38	4,19
96	39990	0,650	5,25	3,42
112	22940	0,373	6,13	2,29
128	19740	0,321	7,01	2,25
144	10780	0,175	7,88	1,38
160	5600	0,092	8,76	0,799
176	460	0,007	9,63	0,072
<b>TOTAL</b>	191630	3,12	-	16,3

**(d) RESULTADOS DA IMAGEM – 2001-05-17-17-00**

$C_r$	$n_r$	$W_r$ (sr)	$i_r$ ( $W.m^{-2}.sr^{-1}$ )	$W_r.i_r$ ( $W.m^{-2}$ )
64	14490	0,236	1,39	0,325
80	82140	1,34	2,07	2,76
96	95360	1,55	2,76	4,28
<b>TOTAL</b>	191990	3,13	-	7,36

Tabelas 7.10 – Resultado da análise de imagens adquiridas sob condição de céu encoberto não-opaco: (a) 2000-12-13-13-45; (b) 2000-12-13-15-00;  
(c) 2001-05-31-14-50; (d) 2001-05-31-15-50

**(a) RESULTADOS DA IMAGEM – 2000-12-13-13-45**

$C_r$	$n_r$	$W_r$ (sr)	$i_r$ ( $W.m^{-2}.sr^{-1}$ )	$W_r.i_r$ ( $W.m^{-2}$ )
176	44320	0,721	120	86,4
192	46600	0,758	131	99,2
208	56760	0,923	142	130
224	19600	0,319	153	48,7
240	23760	0,386	164	63,2
<b>TOTAL</b>	191040	3,11	-	428

**(b) RESULTADOS DA IMAGEM – 2000-12-13-15-00**

$C_r$	$n_r$	$W_r$ (sr)	$i_r$ ( $W.m^{-2}.sr^{-1}$ )	$W_r.i_r$ ( $W.m^{-2}$ )
160	15980	0,260	93,6	24,3
176	55650	0,905	103	93,2
192	43330	0,705	112	79,1
208	38250	0,622	123	75,7
224	15100	0,247	131	32,4
240	23500	0,382	140	53,6
<b>TOTAL</b>	191910	3,12	-	358

**(c) RESULTADOS DA IMAGEM – 2001-05-31-14-50**

$C_r$	$n_r$	$W_r$ (sr)	$i_r$ ( $W.m^{-2}.sr^{-1}$ )	$W_r.i_r$ ( $W.m^{-2}$ )
176	15240	0,248	47,4	11,8
192	55930	0,909	51,8	47,1
208	58390	0,949	56,1	53,2
224	11910	0,194	60,4	11,7
240	50480	0,821	64,7	53,1
<b>TOTAL</b>	191950	3,12	-	177

**(d) RESULTADOS DA IMAGEM – 2001-05-31-15-50**

$C_r$	$n_r$	$W_r$ (sr)	$i_r$ ( $W.m^{-2}.sr^{-1}$ )	$W_r.i_r$ ( $W.m^{-2}$ )
160	35430	0,576	28,2	16,2
176	70380	1,14	31,0	35,5
192	34080	0,554	33,8	18,7
208	14870	0,242	36,6	8,86
224	10430	0,170	39,4	6,69
240	26520	0,431	42,3	18,2
<b>TOTAL</b>	191710	3,11	-	104

Tabelas 7.11 – Resultado da análise de imagens adquiridas sob condição de céu limpo:

(a) 2000-12-18-11-30; (b) 2000-12-18-12-00; (c) 2000-12-18-14-00; (d) 2000-12-18-15-00

**(a) RESULTADOS DA IMAGEM – 2000-12-18-11-30**

$C_r$	$n_r$	$W_r$ (sr)	$i_r$ ( $W.m^{-2}.sr^{-1}$ )	$W_r.i_r$ ( $W.m^{-2}$ )
96	30520	0,496	11,7	5,83
112	51730	0,841	13,7	11,5
128	34040	0,554	15,7	8,66
144	35390	0,576	17,6	10,1
160	28460	0,463	19,6	9,06
176	7300	0,119	21,5	2,55

192	2070	0,033	23,5	0,791
208	890	0,015	25,4	0,369
224	420	0,007	27,4	0,188
240	150	0,003	29,3	0,0735
<b>TOTAL</b>	190970	3,11	-	49,2

**(b) RESULTADOS DA IMAGEM – 2000-12-18-12-00**

$C_r$	$n_r$	$W_r$ (sr)	$i_r$ ( $W.m^{-2}.sr^{-1}$ )	$W_r.i_r$ ( $W.m^{-2}$ )
96	30110	0,490	10,8	5,29
112	57400	0,933	12,6	11,8
128	33520	0,545	14,4	7,85
144	37560	0,611	16,2	9,89
160	26660	0,433	18,0	7,80
176	3880	0,0631	19,8	1,25
192	1240	0,0202	21,6	0,436
208	670	0,0110	23,4	0,256
224	290	0,00472	25,2	0,119
240	60	0,00100	27,0	0,0246
<b>TOTAL</b>	191390	3,11	-	44,7

**(c) RESULTADOS DA IMAGEM – 2000-12-18-14-00**

$C_r$	$n_r$	$W_r$ (sr)	$i_r$ ( $W.m^{-2}.sr^{-1}$ )	$W_r.i_r$ ( $W.m^{-2}$ )
96	42010	0,683	10,0	6,84
112	56670	0,922	11,7	10,8
128	52840	0,859	13,3	11,5
144	34940	0,568	15,0	8,53
160	2590	0,0422	16,7	0,704
176	1230	0,0200	18,3	0,366
192	560	0,00910	20,0	0,182
208	140	0,00224	21,7	0,0487
224	50	0,000781	23,4	0,0182
240	20	0,000260	25,0	0,00651
<b>TOTAL</b>	191050	3,11	-	38,9

**(d) RESULTADOS DA IMAGEM – 2000-12-18-15-00**

$C_r$	$n_r$	$W_r$ (sr)	$i_r$ ( $W.m^{-2}.sr^{-1}$ )	$W_r.i_r$ ( $W.m^{-2}$ )
80	5720	0,0931	8,08	0,752
96	61410	0,999	9,70	9,68
112	36320	0,591	11,3	6,68
128	30190	0,491	12,9	6,35
144	39970	0,650	14,5	9,45
160	13990	0,228	16,2	3,68
176	1920	0,0313	17,8	0,556
192	1020	0,0166	19,4	0,322
208	540	0,00883	21,6	0,186
224	160	0,00260	22,6	0,0589
240	20	0,000276	24,2	0,00670
<b>TOTAL</b>	191260	3,11	-	37,7

Tabelas 7.12 – Resultado da análise de imagens adquiridas sob condição de céu parcialmente nublado: (a) 2000-11-08-17-00; (b) 2001-05-31-13-20; (c) 2000-12-18-13-00; (d) 2000-12-18-13-30

**(a) RESULTADOS DA IMAGEM – 2000-11-08-17-00**

$C_r$	$n_r$	$W_r$ (sr)	$i_r$ ( $W.m^{-2}.sr^{-1}$ )	$W_r.i_r$ ( $W.m^{-2}$ )
48	17760	0,289	20,8	6,00
64	46940	0,763	27,7	21,2
80	13450	0,219	34,6	7,58
96	9680	0,158	41,6	6,54
112	17500	0,285	48,5	13,8
128	8610	0,140	55,4	7,76
144	20910	0,340	62,4	21,2
160	26610	0,433	69,3	30,0
176	15610	0,254	76,2	19,3
192	9260	0,151	83,1	12,5
208	2970	0,0483	90,1	4,35
224	1670	0,0271	97,0	2,63

240	330	0,00533	104	0,554
<b>TOTAL</b>	191300	3,11	-	153

**(b) RESULTADOS DA IMAGEM – 2001-05-31-13-20**

$C_r$	$n_r$	$W_r (sr)$	$i_r (W.m^{-2}.sr^{-1})$	$W_r.i_r (W.m^{-2})$
160	8370	0,136	48,2	6,57
176	19710	0,321	53,1	17,0
192	11230	0,183	57,9	10,6
208	34130	0,560	62,7	34,8
224	39480	0,642	67,5	43,4
240	78700	1,28	72,4	92,6
<b>TOTAL</b>	191620	3,12	-	205

**(c) RESULTADOS DA IMAGEM – 2000-12-18-13-00**

$C_r$	$n_r$	$W_r (sr)$	$i_r (W.m^{-2}.sr^{-1})$	$W_r.i_r (W.m^{-2})$
112	52710	0,857	12,4	10,6
128	68310	1,11	14,1	15,7
144	53140	0,864	15,9	13,7
160	13910	0,226	17,7	3,99
176	2050	0,0333	19,4	0,646
192	430	0,00699	21,2	0,149
208	300	0,00486	23,0	0,112
224	150	0,00247	24,7	0,0611
240	50	0,000780	26,5	0,0207
<b>TOTAL</b>	191050	3,11	-	45,0

**(d) RESULTADOS DA IMAGEM – 2000-12-18-13-30**

$C_r$	$n_r$	$W_r (sr)$	$i_r (W.m^{-2}.sr^{-1})$	$W_r.i_r (W.m^{-2})$
112	56000	0,911	11,9	10,9
128	86290	1,40	13,7	19,2

144	36400	0,592	15,4	9,13
160	8350	0,136	17,1	2,33
176	3220	0,0523	18,9	0,986
192	690	0,0112	20,6	0,229
208	250	0,00400	22,3	0,0891
224	70	0,00111	24,0	0,0265
240	20	0,000325	25,7	0,00836
<b>TOTAL</b>	191290	3,11	-	43,0

As Tabelas 7.9 a 7.12 permitem avaliar alguns dos resultados do processo de análise de imagens. Inicialmente observa-se que, mesmo com a determinação de uma circunferência padrão, existe uma dificuldade na determinação exata da região da imagem. Esta dificuldade representada pela diferença entre o número total de pixels das imagens, cujo valor mínimo, de 190983, foi observado para a imagem do arquivo 2000-12-18-11-30; o maior número de pixels válidos, foi de 191992, correspondendo à imagem do arquivo 2001-05-17-17-00; em relação ao valor esperado, estes dados representam um erro de 1,15 % e 0,63 %, respectivamente.

A diferença entre o número de pixels do círculo padrão e o da imagem se deve aos pixels que não são contados como válidos, por fatores como: (a) à existência de pixels com  $RGB = 0$  dentro da região pertencente ao círculo da imagem; (b) às pequenas dispersões no valor de  $RGB$  de pixels isolados; (c) às diferenças na região do círculo padrão devido ao processo de reconstrução da imagem; entre outros.

Devido a estas mesmas razões, observa-se uma variação no ângulo sólido total das imagens,  $W_T$ , que varia entre 3,11 e 3,13. O somatório dos ângulos sólidos é proporcional ao número total de pixels, entretanto é relevante destacar que, de acordo com o Capítulo 5, o ângulo sólido de cada região,  $W_{ir}$ , varia com o número de pixels e com a posição de cada um deles em relação ao centro da imagem.

Os valores de intensidade direcional variam de acordo com a condição de nebulosidade. As menores intensidades direcionais são observadas na condição de céu encoberto opaco. Nesta condição de nebulosidade, o menor conjunto de valores ocorreu na imagem correspondente ao arquivo 2001-05-17-17-00, que representa uma imagem realizada em condições extremas. Considerando-se todas as imagens adquiridas sob esta condição, observa-se que as intensidades direcionais variaram entre  $1,39 W.m^{-2}.sr^{-1}$  e  $12,8 W.m^{-2}.sr^{-1}$ , correspondentes às imagens 2001-05-17-17-00 e 2001-05-17-15-45, respectivamente.

Os maiores valores de intensidade direcional são observados sob condições de céu encoberto não-opaco. Neste caso, o intervalo de variação observado está entre  $28,2 \text{ W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$  e  $164 \text{ W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$ , correspondentes aos arquivos 2001-05-31-15-50 e 2000-12-13-13-45, respectivamente.

Para a condição de céu limpo, os valores de intensidade são relativamente baixos. Observa-se uma regularidade tanto nas regiões quanto nos valores de intensidade direcional, o que torna esta condição favorável para o estabelecimento de padrões. Os valores das imagens variam entre  $8,08 \text{ W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$  e  $29,3 \text{ W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$  para os arquivos 2000-12-18-11-30 e 2000-12-18-15-00, respectivamente.

Por outro lado, na condição de céu parcialmente nublado, observam-se as maiores irregularidades. Os valores de intensidade das regiões podem depender da época do ano, da posição solar e do tipo de nuvens, entre outros. Os valores de intensidade direcional observados variaram entre  $11,9 \text{ W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$  e  $104 \text{ W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$  para os arquivos 2000-12-18-13-30 e 2000-11-08-17-00, o que corresponde ao maior intervalo de variação de intensidades direcionais.

O somatório do ângulo sólido de cada região multiplicado pelo respectivo valor de intensidade direcional ( $\mathbf{W}_r.i_r$ ), representa a irradiância difusa associada à imagem. A comparação destes valores, calculados na análise das imagens, com os dados medidos variou entre 0,087 % e 0,82 %, o que mostra a boa concordância e a validade do procedimento adotado.

#### 7.4 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE NEBULOSIDADE

A estimativa do índice de nebulosidade, descrita no Capítulo 5, pode ser implementada para as imagens originais e para as imagens reconstruídas. De qualquer maneira, devido às características do sistema experimental, determina-se o índice de nebulosidade para região da imagem e não para todo o hemisfério.

A técnica de redução de níveis de cinza também pode ser empregada neste caso, embora em algumas situações, os valores sejam ligeiramente superestimados, pelo aumento da região de bordas da nuvem. Os melhores resultados são obtidos quando a posição solar é encoberta por uma camada de nuvens. São exemplos as imagens das Figuras 7.9 (a) e (b).

Em outros casos, como, por exemplo, nas imagens das Figuras 7.10 (a) e (b), onde se observa a presença de cirros, esta técnica não fornece bons resultados. Como alternativa basta empregar um software gráfico para marcar a posição das nuvens.

As Figuras 7.9 e 7.10 mostram os respectivos resultados obtidos pela utilização destas duas técnicas, onde as regiões cobertas por nuvens apresentam  $RGB = 255$ . Os índices de nebulosidade são determinados pelo somatório dos ângulos sólidos de todos os *pixels* que compõem as regiões encobertas, conforme o Capítulo 5.

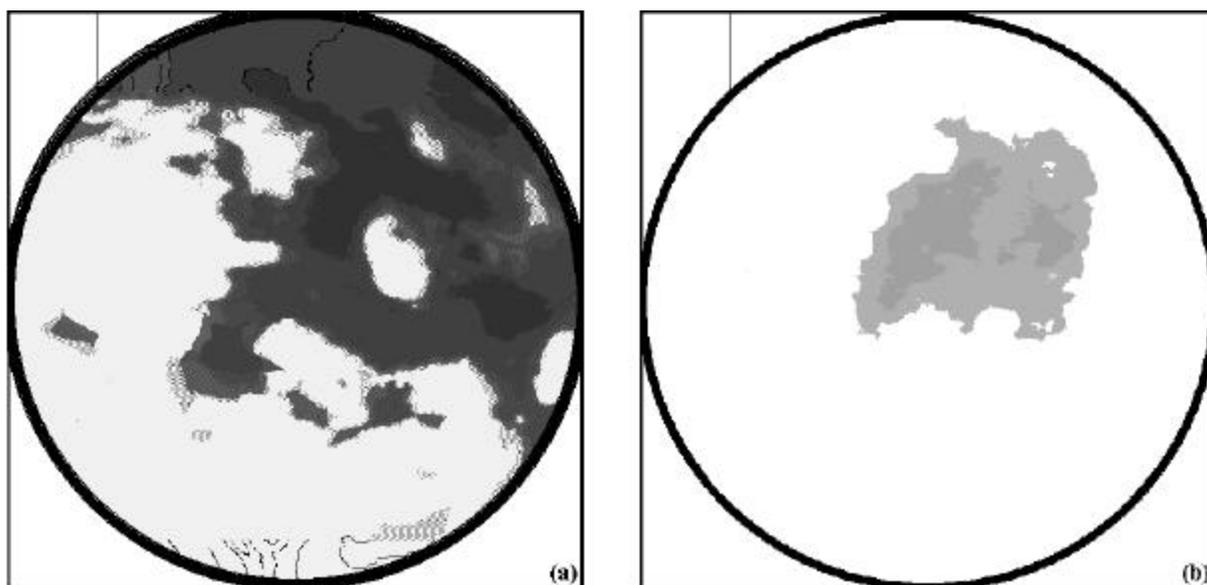


Figura 7.9 – Distribuição de nuvens na região da imagem pela redução de níveis de cinza, para os arquivos: (a)2000-11-08-1700; (b) 2001-05-31-1320.

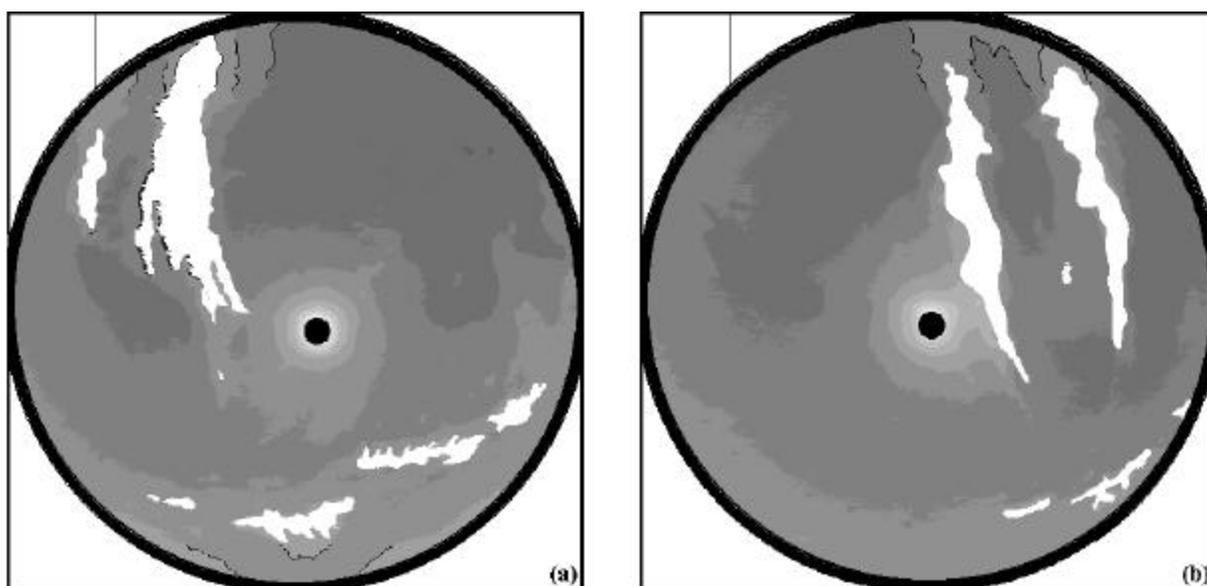


Figura 7.10 – Distribuição de nuvens na região da imagem através da marcação de sua posição, para os arquivos: (a)2000-12-18-1300; (b) 2000-12-18-1330.

A Figura 7.9 (a) que corresponde ao arquivo 2000-11-08-1700 mostra uma imagem com uma grande região coberta por nuvens. De acordo com a técnica de redução de níveis de cinza, as regiões encobertas têm  $C_r > 96$ . O índice de nebulosidade obtido é de 46%. A Figura 7.9 (b), correspondente ao arquivo 2001-05-17-1320, também apresenta uma grande parte encoberta. Neste caso, as regiões desprovidas de nuvens podem ter  $C_r = 160$  ou  $C_r = 176$ . As demais regiões, com  $C_r > 176$ , são encobertas. O índice de nebulosidade é de 85%.

A Figura 7.10 (a) e (b), dos arquivos 2000-12-18-1300 e 2000-12-18-1300, respectivamente, apresentam imagens contendo pequenas regiões encobertas. As características destas imagens dificultam a determinação do índice de nebulosidade, a partir da redução do nível de cinza. Neste caso, as bordas das nuvens são marcadas e cobertas com um determinado nível de cinza. Para estes dois exemplos, todas as regiões cobertas por nuvens têm  $C_r = 48$ . Esse valor pode ser escolhido por não se repetir dentro da imagem. Apenas na exibição, este valor é substituído, tornando as nuvens brancas, para maior destaque. Assim, na imagem da Figura 7.10 (a) o índice de nebulosidade é de 8%, enquanto que na imagem da Figura 7.10 (b) é de, aproximadamente, 7%.

## CAPÍTULO 8

### CONCLUSÃO

Esta tese apresenta uma metodologia para caracterização da distribuição de intensidade da radiação solar difusa no hemisfério celeste, a partir da aquisição de imagens, obtidas por uma câmera CCD, e a partir de medidas do fluxo de radiação difusa, incidente numa superfície horizontal, realizadas por um piranômetro térmico. Com este propósito, desenvolveu-se um sistema experimental, capaz de fornecer, simultaneamente, a imagem do céu e dados instantâneos de irradiância solar. Uma câmera CCD e um piranômetro realizam medidas numa mesma região do hemisfério celeste.

Demonstrou-se que a técnica de redução de níveis de cinza pode ser empregada no processamento e análise de imagens digitais monocromáticas do hemisfério celeste para caracterizar qualitativamente a distribuição de intensidade. As características geométricas da imagem hemisférica foram determinadas pelo cálculo do ângulo sólido de cada pixel formador da imagem. Estes valores foram obtidos em função da distância de cada pixel ao centro da imagem, uma vez que a região retangular de cada pixel corresponde à projeção sobre o plano de uma certa região do hemisfério. O ângulo sólido de toda a imagem é calculado a partir das características do sistema experimental ou pelo somatório de cada pixel que compõe a imagem.

Foi desenvolvido um *software* capaz de fornecer resultados numéricos e gráficos, onde as distribuições de intensidade são exibidas na forma de mapas de tons de cinza, ou na forma de mapas de contorno. Os resultados numéricos e gráficos podem ser exibidos na tela e gravados em disco rígido.

Para validar a metodologia proposta na tese foi selecionado um conjunto de 48 imagens, adquiridas sob quatro diferentes condições de nebulosidade. Inicialmente caracterizou-se a distribuição de intensidade relativa. Analisaram-se os valores de *RGB* resultantes da técnica de redução de níveis de cinza. Demonstrou-se, através da análise das imagens e dos valores de

*RGB*, que esta técnica produz resultados que concordam com as distribuições de intensidade apresentadas na literatura.

Também foi estudada a variação dos valores de *RGB* dos pixels pertencentes à linha da matriz numérica, que passa pelo centro da imagem com 16 tons de cinza. Este procedimento corresponde à análise, no hemisfério celeste, do círculo máximo que passa pelo zênite, num deslocamento de oeste para leste. Com esta finalidade, apresentaram-se gráficos de *RGB* x Pixel. Como resultado, observou-se que grande parte da informação necessária para caracterizar uma determinada condição de nebulosidade pode ser obtida pela análise de uma única linha da matriz que representa a imagem.

Para caracterizar a distribuição de intensidade direcional da radiação difusa celeste, analisou-se um conjunto de 16 imagens, que representam diferentes condições de nebulosidade. A irradiância difusa de uma determinada imagem foi calculada pela razão entre o somatório dos valores de intensidade de cada região da imagem e o somatório dos respectivos ângulos sólidos. Os valores de intensidade direcional foram calculados em função da irradiância difusa, do ângulo sólido total, do valor de *RGB* e de outros dados característicos de cada imagem. Os resultados obtidos demonstraram a validade da metodologia desenvolvida nesta tese.

Aproveitando o conjunto de imagens adquiridas e a metodologia de cálculo do ângulo sólido de uma região da imagem, demonstrou-se que é possível determinar o índice de nebulosidade, relacionado-o com a fração da imagem que se encontra encoberta por nuvens. O índice de nebulosidade foi calculado para quatro imagens, que correspondem à condição de céu parcialmente nublado. Verificou-se que a técnica de redução de níveis de cinza também pode ser empregada com esta finalidade. Demonstrou-se que, em alguns casos, é mais conveniente empregar um *software* gráfico para marcar a posição das nuvens. Qualquer uma destas técnicas fornece estimativas melhores do que a simples inspeção visual.

Para continuidade deste trabalho sugere-se que o procedimento de caracterização da distribuição seja empregado na construção de modelos teóricos e numa estimativa dos valores de luminância. Os resultados experimentais obtidos podem ser empregados para estimar valores de intensidade da irradiância difusa em superfícies inclinadas, otimizar a construção de concentradores, etc. O *software* desenvolvido pode ser ampliado com o objetivo de reproduzir as condições de medida, fornecendo dados de radiância ou luminância e exibindo gráficos 3D do hemisfério celeste.

## APÊNDICE

### A1 ANÁLISE DE INCERTEZAS COMPOSTAS

As incertezas dos resultados desta tese podem ser determinadas através do método de Kline e McClaiton, 1953, sendo calculadas, de forma geral, pela seguinte relação:

$$\mathbf{DE} = \left[ \left( \frac{\partial E}{\partial x_1} \cdot \mathbf{D}x_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial E}{\partial x_2} \cdot \mathbf{D}x_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial E}{\partial x_n} \cdot \mathbf{D}x_n \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A1})$$

onde  $\mathbf{DE}$  representa a incerteza do resultado e  $\mathbf{D}x_1, \mathbf{D}x_2, \dots, \mathbf{D}x_n$  representam as incertezas das variáveis independentes. Em alguns casos, os cálculos podem ser simplificados considerando-se que a incerteza do resultado pode ser escrita como:

$$\ln E = \ln K + \frac{1}{2} \ln x_1 + \frac{1}{2} \ln x_2 + \dots + \frac{1}{2} \ln x_n$$

e assim,

$$\frac{1}{E} \cdot \frac{\partial E}{\partial x_1} = \frac{1}{2x_1}; \quad \frac{1}{E} \cdot \frac{\partial E}{\partial x_2} = \frac{1}{2x_2}; \quad \dots; \quad \frac{1}{E} \cdot \frac{\partial E}{\partial x_n} = \frac{1}{2x_n}.$$

resultando na expressão:

$$\frac{\mathbf{DE}}{E} = \frac{1}{2} \cdot \left[ \left( \frac{\mathbf{D}x_1}{x_1} \right)^2 + \left( \frac{\mathbf{D}x_2}{x_2} \right)^2 + \dots + \left( \frac{\mathbf{D}x_n}{x_n} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A2})$$

É importante observar que nas Equações (A1) e (A2) a incerteza,  $\mathbf{DE}$ , depende dos quadrados das incertezas de cada variável independente. Por essa razão, as variáveis cuja incerteza tenha um valor muito menor, podem ser desprezadas.

De acordo com o Capítulo 5, os valores da intensidade de cada região do hemisfério celestes são determinados pela seguinte expressão:

$$i_r = C_r \cdot \frac{I_d}{\mathbf{W}_T} \cdot \frac{n_T}{\sum_{r=1} n_r \cdot C_r}$$

Portanto, para uma determinada imagem do hemisfério celeste, a incerteza associada ao valor de intensidade,  $\mathbf{D}$ , é calculada, considerando-se as seguintes variáveis independentes: o tom de cinza,  $C_r$ ; a irradiância difusa medida,  $I_d$ ; o ângulo sólido da imagem,  $\mathbf{W}_T$ ; o número total de pixels da imagem,  $n_T$ ; o número de pixels da região  $n_r$ .

A determinação das incertezas de cada uma das variáveis independentes será estabelecida, de maneira simplificada, considerando-se os valores globais, válidos para toda a região da imagem.

### A1.1 DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA ASSOCIADA AO TOM DE CINZA

Originalmente a escala de tons de cinza está dividida em 256 partes, representadas por valores de  $RGB$  que variam de 0 a 255. Como a escala é reduzida para 16 tons de cinza, a incerteza na determinação de qualquer valor de  $C_r$  é dada por :

$$\frac{16}{256} = \frac{1}{16} \cong 0,06$$

Esta é a máxima incerteza associada ao tom de cinza, que seria obtida para uma imagem do hemisfério celeste, dividida em, pelo menos, 16 regiões e com 16 níveis de cinza.

Por outro lado, o mínimo valor de incerteza associado ao tom de cinza é representado pela condição isotrópica, uma vez que, nestas condições, a imagem do hemisfério celeste, apresentaria uma única região com um único nível de cinza. Neste caso, a incerteza na determinação de qualquer valor de  $C_r$  é:

$$\frac{I}{256} = 0,004$$

Portanto, a incerteza associada ao tom de cinza depende do total de níveis de cinza da imagem, isto é

$$\left( \frac{DC_r}{C_r} \right) = \frac{\text{níveis de cinza}}{256}$$

A incerteza é mínima para uma distribuição monocromática e máxima para uma imagem com o número máxima de regiões, ou seja,  $0,004 \leq \frac{DC_r}{C_r} \leq 0,06$ .

### A1.2 INCERTEZA DA IRRADIÂNCIA DIFUSA

De acordo com o Capítulo 4, a irradiância difusa na região da imagem é medida com um piranômetro *Kipp and Zonen* modelo *CM11*, estima-se uma incerteza  $D_d = 10 \text{ W.m}^{-2}$ , aproximadamente.

### A1.3 INCERTEZA DO ÂNGULO SÓLIDO DA IMAGEM

De acordo com o Capítulo 5, o ângulo sólido da imagem do círculo padrão é  $W_f = p$ , que corresponde ao ângulo sólido de uma região hemisférica, cujo ângulo de zênite varia de 0 a  $p/3$ . Considerando-se Tabelas 7.9 a 7.12, observa-se que os valores do ângulo sólido total são obtidos com uma precisão de dois algarismos significativos. Portanto, a incerteza na determinação do ângulo sólido total é  $\Delta W_f = 0,01 \text{ sr}$ . Substituindo-se os valores de ângulo sólido, obtidos a partir das imagens, obtém-se:

$$\frac{DW_f}{W_f} = \frac{0,01}{3,1} \cong 0,003$$

#### A1.4 INCERTEZA NA DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE PIXELS

No Capítulo 5, determinou-se um círculo padrão composto por 193205 pixels que representa a região da imagem. Entretanto, quando a imagem do hemisfério celeste é sobreposta ao círculo padrão, a área da imagem é reduzida para evitar o efeito de má definição próximo do limite do ângulo de visão da câmera, conforme o Capítulo 5. Além disso, na condição de céu limpo, alguns pixels são rejeitados ( $C_r = 0$ ) para cobrir o disco solar. Na prática corresponde a diminuir o ângulo sólido da imagem. O número de pixels das imagens é reduzido para, aproximadamente, 191000. De acordo com as Tabelas 7.9 a 7.12, o número total de pixels é obtido com uma precisão de 3 algarismos significativos. Assim, a incerteza na determinação do número total de pixels é inferior a  $\mathbf{D}_{IT}$  é de 0,001, podendo ser desprezada. A incerteza do número de pixels das regiões também é desconsiderada pela mesma razão.

#### A1.5 INCERTEZA ASSOCIADA AOS VALORES DE INTENSIDADE

A incerteza da intensidade é determinada, considerando-se apenas três variáveis independentes e de acordo com a Equação (A2), escreve-se:

$$\frac{\mathbf{D}}{i} = \frac{1}{2} \cdot \left[ \left( \frac{\mathbf{DC}_r}{C_r} \right)^2 + \left( \frac{\mathbf{D}_d}{I_d} \right)^2 + \left( \frac{\mathbf{DW}_T}{\mathbf{W}_T} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A3})$$

Nesta expressão, o termo  $\mathbf{DC}_r / C_r$  depende do número de tons de cinza da imagem. As incertezas das demais variáveis independentes são:  $\mathbf{D}_d = 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  e  $\Delta \mathbf{W}_T = 0,01 \text{ sr}$ .

#### A1.6 DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA NA DETERMINAÇÃO DA INTENSIDADE

As Tabelas A.1 - A.4 apresentam os valores de incerteza da intensidade (%), calculados de acordo com a Equação (A3). Para todas as imagens, a incerteza associada ao ângulo sólido é  $(\mathbf{DW} / \mathbf{W}) = 0,003$ . As demais incertezas dependem das condições das imagens.

Os dados e as imagens, adquiridas sob diferentes condições de nebulosidade, referentes a estes arquivos são exibidos no Capítulo 7.

Tabela A1 – Imagens em condições de céu encoberto opaco

Nome do Arquivo	Código	$\frac{DC_r}{C_r}$	$I_d$	$\frac{D_d}{I_d}$	$\frac{D}{i}$ (%)
17Ma1545	2001-05-17-15-45	0,02	34	0,3	15
17Ma1610	2001-05-17-16-10	0,02	23	0,4	20
17Ma1625	2001-05-17-16-25	0,03	16	0,6	30
17Ma1700	2001-05-17-17-00	0,01	7	1	50

Tabela A2 – Imagens em condições de céu encoberto não-opaco

Nome do Arquivo	Código	$\frac{DC_r}{C_r}$	$I_d$	$\frac{D_d}{I_d}$	$\frac{D}{i}$ (%)
13Dz 1345	2000-12-13-13-45	0,02	430	0,02	1
13Dz 1500	2000-12-13-15-00	0,02	359	0,03	2
31Ma1450	2001-05-31-14-50	0,02	177	0,06	3
31Ma1550	2001-05-31-15-50	0,02	104	0,1	5

Tabela A3 – Imagens em condições de céu limpo

Nome do Arquivo	Código	$\frac{DC_r}{C_r}$	$I_d$	$\frac{D_d}{I_d}$	$\frac{D}{i}$ (%)
18Dz1130	2000-12-18-13-45	0,04	49	0,2	10
18Dz1200	2000-12-18-15-00	0,04	45	0,2	10
18Dz1400	2000-12-18-14-50	0,04	39	0,3	15
18Dz1500	2000-12-18-15-50	0,04	38	0,3	15

Tabela A4 – Imagens em condições de céu parcialmente nublado

Nome do Arquivo	Código	$\frac{DC_r}{C_r}$	$I_d$	$\frac{D_d}{I_d}$	$\frac{D}{i}$ (%)
08Nv1700	2000-11-08-17-00	0,05	154	0,06	4
31Ma1320	2001-05-31-13-20	0,02	205	0,05	3
18Dz1300	2000-12-18-13-00	0,04	45	0,2	10
18Dz1330	2000-12-18-13-30	0,04	43	0,2	10

A análise das incertezas compostas mostra que as menores incertezas dos resultados são obtidas quando a irradiância difusa é medida com o céu encoberto não-opaco, pois nesta condição de nebulosidade são obtidos os maiores valores de irradiância difusa. A incerteza dos valores de intensidade variou entre 1 % e 5 %.

Por outro lado, a pior condição de nebulosidade é observada quando as medidas são realizadas com o céu encoberto opaco. Neste caso, a incerteza relativa do tom de cinza e a incerteza relativa do ângulo sólido podem ser desconsideradas. A incerteza nos resultados da irradiância difusa medida para os arquivos 17Ma1625 e 17Ma1700<sup>1</sup> desqualificam os valores de intensidade, obtidos nestas condições. Entretanto, estes arquivos foram selecionados, porque suas imagens e os seus dados ilustram dois casos extremos, interessantes para os demais objetivos da tese e para o desenvolvimento da pesquisa.

Os resultados desta análise demonstram que a maior fonte de erro está relacionada à incerteza nas medidas da irradiância difusa. Os piranômetros *Kipp and Zonen*, modelo *CM11* são equipamentos de boa qualidade, largamente empregados como medidores de radiação solar. Entretanto, para cobrir um maior número de condições de nebulosidade, este trabalho exigiu a realização de medidas, muitas vezes, sob baixos níveis de irradiância solar. Além disso, a técnica do anel de sombra, que permite determinar a irradiância solar difusa, normalmente subestima os valores medidos, além de diminuir, ainda mais, a irradiância difusa, devido ao encobrimento de uma parte do céu que corresponde ao caminho do Sol. Por estas razões a análise das incertezas compostas demonstra que a maior incerteza está associada às medidas de irradiância difusa.

## A2 ANÁLISE DA INCERTEZA DEVIDO A RECONSTRUÇÃO DA IMAGEM

A limitação no ângulo de abertura da lente faz com que a intensidade seja relacionada a um hemisfério reduzido, sem a banda correspondente ao horizonte. A utilização do anel de sombra horizontal, junto ao suporte do piranômetro, permite que ambos os instrumentos realizem as medidas numa mesma região do céu.

Entretanto, a distância inadequada entre o sensor CCD e a lente grande angular limita o ângulo de visão da câmera ainda mais. No trabalho experimental, a câmera foi posicionada de tal modo que estas regiões correspondem às bordas Norte e Sul. Na imagem completa, estabelecida a partir de um círculo padrão, conforme o Capítulo 5, as áreas que estão fora do alcance da

---

<sup>1</sup> - imagens adquiridas nos dias 17 de maio de 2001 às 16h e 25min e 17h 00min, respectivamente.

câmera representam um ângulo sólido de, aproximadamente, 0,35 sr, ou seja, 11 % do ângulo sólido total da imagem hemisférica. O número total de pixels da região desconsiderada corresponde a 20000 pixels, aproximadamente, de um total de 193000 pixels da imagem completa. Inicialmente, espera-se que o erro máximo, devido à aplicação de uma metodologia não seja superior a 11 %.

Quando a medida da irradiância difusa é realizada, o resultado obtido através do piranômetro inclui as bordas Norte e Sul. Na prática, o ângulo de visão do piranômetro é maior que o ângulo de visão da câmera. Por essa razão, se estas bordas Norte e Sul são desconsideradas, ou seja,  $C_r = 0$ , o valor de irradiância difusa medida,  $I_d$ , é superestimado e deve ser corrigido.

Para uma primeira aproximação, considera-se a imagem sem as bordas, com um modelo de distribuição isotrópica, ou seja, a região hemisférica reduzida, é preenchida por um único nível de cinza. Nestas condições: (1) a incerteza do tom de cinza é mínima, pois independe da região da imagem; (2) o ângulo sólido total,  $\mathbf{W}_T$ , diminui, mas a incerteza ( $\Delta\Omega_T / \Omega_T$ ) não se altera; (3) o número total de pixels da imagem,  $n_T$ , diminui, mas a incerteza ( $\Delta n_T / n_T$ ) não se altera, podendo ser desconsiderada; finalmente, (4) o valor medido da irradiância difusa,  $I_d$ , deve ser ajustado através de uma correção geométrica, uma vez que, as medidas de irradiância são medida numa região que inclui as bordas Norte e Sul, desta forma sua incerteza aumenta.

A Figura A1 mostra uma comparação entre dois resultados representados pela simulação de uma distribuição isotrópica, arbitrando  $I_d = 1000 \text{ W.m}^{-2}$ . Na Figura A1(a) a região limitada ao ângulo de visão da câmera é preenchida com o tom de cinza correspondente ao maior nível de intensidade,  $C_r = 240$  e a irradiância difusa não é corrigida. Na Figura A1(b) toda a região do hemisfério é preenchida com este mesmo tom de cinza, representando a condição ideal. A Tabela A5 apresenta os dados e os valores de intensidade obtidos.

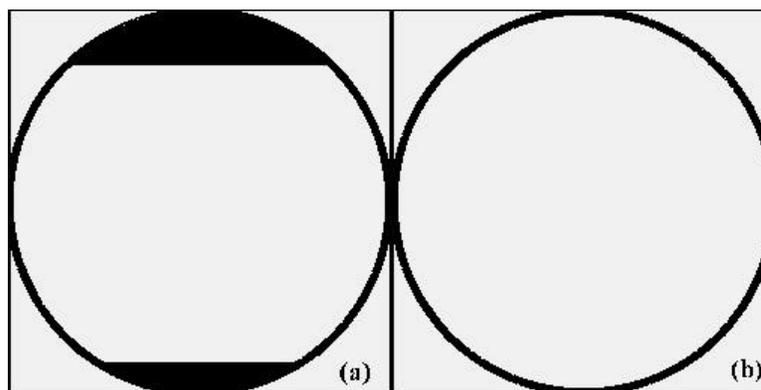


Figura A1 – Comparação entre as imagens simuladas que representam uma distribuição isotrópica observada: (a) no ângulo de visão da câmera; (b) no ângulo de visão do piranômetro.

Tabela A5 – Comparação entre os dados que representam uma distribuição isotrópica observada:  
(a) no ângulo de visão da câmera; (b) no ângulo de visão do piranômetro

	(a) dados da imagem simulada no ângulo de visão da câmera	b) dados da imagem simulada no ângulo de visão do piranômetro
Irradiância, $I_d$ ( $\text{W.m}^{-2}$ )	1000	1000
tom de cinza, $C_r$	240	240
Número total de pixels, $n_T$	171000	193000
Ângulo sólido total, $\mathbf{W}_T$ (sr)	2.79	3.14
Intensidade, $i$ ( $\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$ )	358	318

No caso da distribuição isotrópica, os valores de intensidade podem ser obtidos diretamente da razão entre a irradiância e o ângulo sólido da imagem, isto é

$$i = \frac{I_d}{\mathbf{W}_T} \quad (\text{A4})$$

De acordo com a Tabela A5, observa-se que a diferença entre os valores de intensidade é de 11 %. Este valor representa o erro na determinação da intensidade devido à diferença entre o ângulo de visão da câmera e o ângulo de visão do piranômetro.

Portanto, a incerteza pode ser atenuada pelo procedimento utilizado de preencher estas áreas, fora do alcance da câmera, considerando  $C_r \neq 0$  para todos os pixels pertencentes a estas regiões. No caso de uma distribuição isotrópica, esta técnica de reconstrução da imagem, não acarreta num aumento significativo da incerteza do resultado, pois toda a borda estaria preenchida com valores conhecidos de  $C_r$ .

Obviamente, a reconstrução da imagem, aplicada sem critério, pode levar a erros grosseiros e a resultados absurdos. Como exemplo, a Figura A2 compara duas imagens que originalmente representa uma condição de céu limpo. A imagem original teve sua aquisição no dia 18 de dezembro de 2000 às 12 h. A Figura A2 (a) mostra uma distribuição de intensidades (tons de cinza) aceitável, já exibido no Capítulo 7. A Figura A2 (b) mostra um resultado absurdo onde as bordas foram preenchidas com o tom de cinza da região circunsolar. A Tabela A6 compara os resultados obtidos nestes dois casos. Nesta tabela, os tons de cinza, pertencentes às bordas são destacados em negrito e itálico.

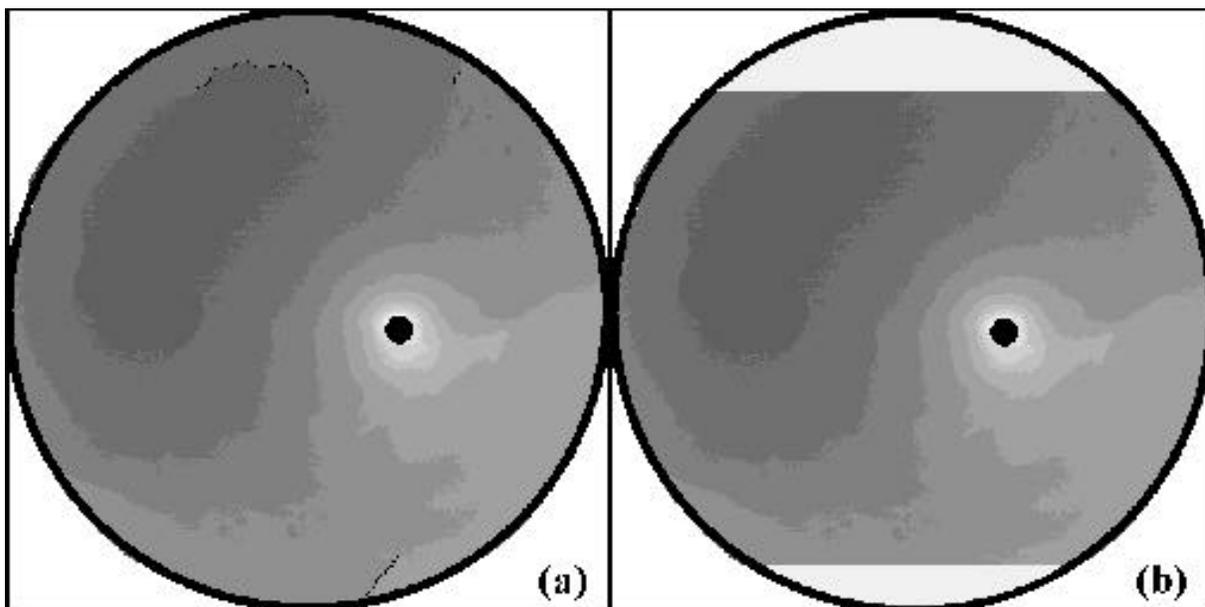


Figura A2 – Comparação entre duas reconstruções de uma imagem, sendo a imagem original adquirida sob condição de céu limpo: (a) imagem reconstruída seguindo a forma das regiões; (b) imagem reconstruída de maneira arbitrária.

Tabela A6 – Comparação entre os resultados de uma imagem reconstruída: (a) seguindo a forma das regiões; (b) de maneira arbitrária.

$C_r$	ângulo sólido (sr)		intensidade ( $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ )	
	(a)	(b)	(a)	(b)
<b>96</b>	<i>0,489</i>	<i>0,467</i>	<i>10,8</i>	<i>4,58</i>
<b>112</b>	<i>0,933</i>	<i>0,744</i>	<i>12,6</i>	<i>8,53</i>
<b>128</b>	<i>0,545</i>	<i>0,537</i>	<i>14,4</i>	<i>7,03</i>
<b>144</b>	<i>0,611</i>	<i>0,538</i>	<i>16,2</i>	<i>7,92</i>
<b>160</b>	<i>0,433</i>	<i>0,420</i>	<i>18,0</i>	<i>6,87</i>
176	0,0631	0,0631	19,8	19,8
192	0,0201	0,0201	21,6	21,6
208	0,0109	0,0109	23,4	23,4
224	0,00471	0,00471	25,2	25,2
<b>240</b>	<i>0,000911</i>	<i>0,306</i>	<i>27,0</i>	<i>7,52</i>

Quando a forma e os tons de cinza das regiões não são conhecidos a imagem deve ser reconstruída, seguindo a tendência da forma das regiões de diferentes níveis de cinza. Como foi demonstrado, na maior parte dos casos, as formas das regiões seguem um padrão que pode ser extrapolado, quando não se conhece uma pequena área da imagem.

De forma genérica, é possível afirmar que os bons resultados da reconstrução da imagem dependem da condição de nebulosidade, dos níveis de cinza presentes na borda e de algum conhecimento prévio, sobre comportamento da região na respectiva condição de nebulosidade. A Tabela A7 relaciona as características favoráveis para a reconstrução da imagem com a respectiva condição de nebulosidade.

Tabela A7 – Características favoráveis para a reconstrução da imagem, nas bordas Norte e Sul, de acordo com a condição de nebulosidade.

<b>Céu</b>	<b>Cobertura de nuvens</b>	<b>Distribuição de tons de cinza ou distribuição de intensidade</b>
Encoberto opaco	camada acinzentada uniforme	poucos níveis de cinza
Encoberto não-opaco	camada acinzentada uniforme	poucos níveis de cinza
limpo	inexistente	características determinadas e estabelecidas pela posição solar
Parcialmente nublado	não serão estabelecidas características favoráveis	

Normalmente, o céu encoberto opaco fornece os melhores resultados, dependendo do tipo de nuvem. Quanto mais uniforme é a camada de nuvens, mais fácil é a reconstrução da imagem. O céu encoberto não-opaco também permite boas reconstruções, dependendo da uniformidade da camada de nuvens. A condição de céu limpo tem uma forte dependência com a posição solar. Felizmente as bordas estão afastadas das regiões circunsolares. Além disso, o céu limpo tem uma distribuição intensidade que é bem conhecida, cuja determinação é facilitada pela ausência de nuvens. Por esta razão o céu limpo é usado como parâmetro para muitos estudos. A condição mais desfavorável, para uma reconstrução de imagem é representada por um céu parcialmente nublado, onde normalmente são observados muitos níveis de cinza, distribuídos sem um padrão definido.

Admitindo-se um conhecimento aproximado do comportamento da distribuição de tons de cinza nas regiões a serem preenchidas, pode-se considerar, de maneira simplificada, que a incerteza na reconstrução da imagem depende: (1) do número de níveis de cinza presentes na região a ser reconstruída; (2) do respectivo número de pixels de cada uma destas regiões.

A incerteza da metodologia pode ser avaliada considerando-se a relação entre os tons de cinza da região e os respectivos totais de pixels de cada tom de cinza, isto é

$$R = n_1 C_1 + n_2 C_2 + n_3 C_3 + \dots + n_r C_r \quad (A5)$$

onde  $n_i$  é o número total de pixels de cor  $C_i$ , presente em toda a imagem; o subíndice  $r$  indica o número total de regiões presentes nas bordas Norte e Sul, das imagens. Assim, a incerteza da metodologia pode ser aproximada pela relação

$$\Delta R = \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial n_1} \cdot \Delta n_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial C_1} \cdot \Delta C_1 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial n_r} \cdot \Delta n_r \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial C_r} \cdot \Delta C_r \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (A6)$$

## 2.1 DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA ASSOCIADA AO TOM DE CINZA

As bordas Norte e Sul são preenchidas atribuindo-se um valor de  $C_r$ , para cada pixel que compõe a região. Ao contrário da seção anterior, onde as incertezas compostas foram determinadas a partir de uma avaliação global, válida para qualquer tom de cinza, considera-se, neste caso, a incerteza

$$\Delta C_r = \pm 8$$

pois, ao seguir a forma das regiões, a maior dificuldade é observada na determinação das bordas.

## 2.2 INCERTEZA NA DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE PIXELS

Na seção anterior, avaliou-se a incerteza na determinação do número total de pixels, a partir dos valores apresentados nas Tabelas 7.9 a 7.12. Para avaliar a incerteza na determinação do número de pixels devido à reconstrução da imagem, considera-se:

$$D_n = \pm 1000$$

A incerteza do número de pixel das regiões que têm uma parte estimada é bem maior do que a incerteza do total de pixels de uma imagem, devido às possíveis dificuldades na determinação das bordas, especialmente quando existem muitas regiões.

### 2.3 ESTIMATIVA DA INCERTEZA NA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

As Figuras A3 e A4 destacam as regiões preenchidas, seguindo a tendência da imagem original e do conhecimento das distribuições de tons de cinza (intensidade) da condição nebulosidade. Como exemplo são escolhidas as imagens referentes à condição de céu encoberto não-opaco e a condição de céu limpo, respectivamente.

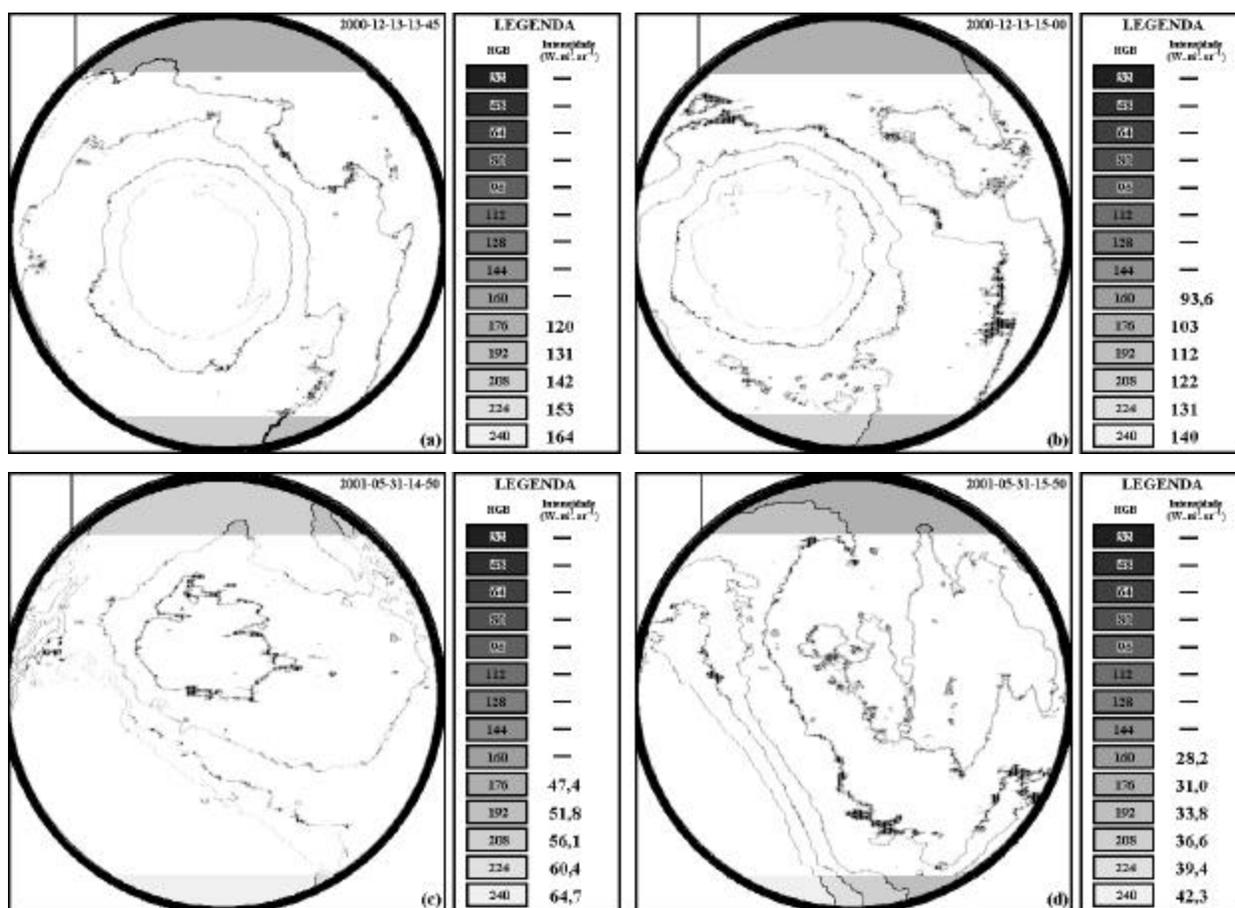


Figura A3 – Exemplo de preenchimento das regiões condição de céu encoberto não-opaco.

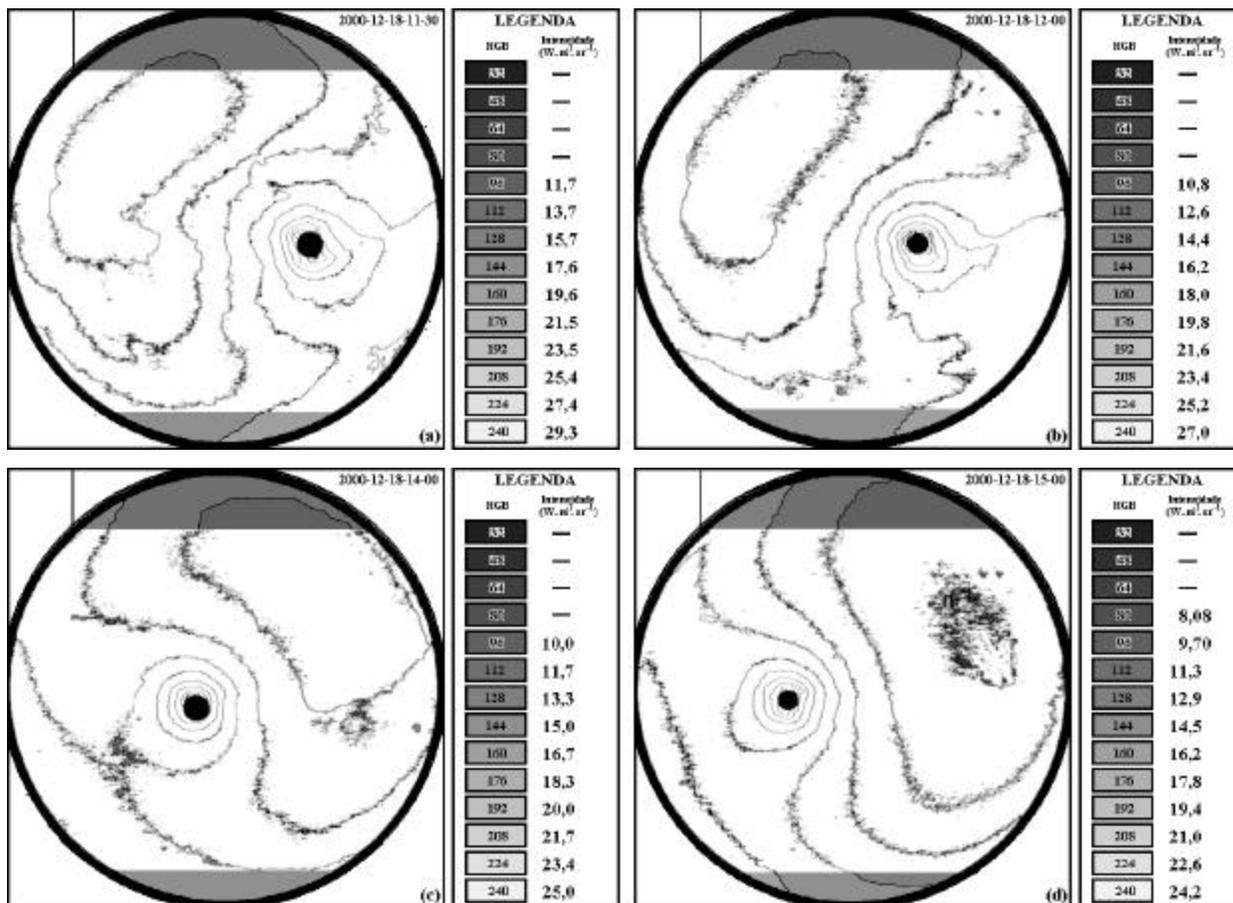


Figura A4 – Exemplo de preenchimento das regiões condição de céu limpo.

As Tabelas A8 e A9 apresentam os resultados das incertezas estimadas, decorrentes da aplicação da metodologia. Os dados de entrada, para o cálculo da incerteza, referentes ao número de pixels de cada tom de cinza são apresentados no Capítulo 7.

Tabela A8 – Estimativa da incerteza devido à reconstrução de imagens adquiridas em condições de céu encoberto não-opaco.

Nome do Arquivo	Código	níveis de cinza nas bordas	$\frac{DR}{R}$ (%)
13Dz 1345	2000-12-13-13-45	3	1,2
13Dz 1500	2000-12-13-15-00	3	1,3
31Ma1450	2001-05-31-14-50	2	1,3
31Ma1550	2001-05-31-15-50	5	1,5

Tabela A9 – Estimativa da incerteza devido à reconstrução de imagens adquiridas em condições de céu limpo.

Nome do Arquivo	Código	níveis de cinza nas bordas	$\frac{DR}{R}$ (%)
18Dz1130	2000-12-18-13-45	5	1,3
18Dz1200	2000-12-18-15-00	5	1,3
18Dz1400	2000-12-18-14-50	4	1,1
18Dz1500	2000-12-18-15-50	5	1,3

As incertezas devido à metodologia variam entre 1,17 e 1,52 para a condição de céu encoberto não-opaco e entre 1,09 e 1,33 para a condição de céu limpo. Os altos valores são obtidos quando existem muitas regiões nas bordas e / ou quando as regiões que cruzam as bordas têm um número total de pixels, relativamente baixo. Estas características são coerentes com a dificuldade existente no preenchimento da região.

Por outro lado esta análise demonstra que o preenchimento criterioso das bordas da imagem é muito melhor do que a simples rejeição dos pixels, correspondentes à parte que está fora do alcance da câmera.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ann Arbor, Michigan, 2001 - documento consultado durante a realização da tese, na página da web: <http://idmp.entpe.fr/stations/usa01/usa01.html>

Batlles, F.J., Olmo, F. J. e Alados, A. L., 1995. **“On Analyses of Shadowband Correction Methods for Diffuse Irradiance Measurements”**, Solar Energy, Vol. 54, p. 105-114.

Belkacem-Boussaid, K. e Beghdadi, A., 2000. **“A New Image Smoothing Method Based on a Simple Model Spatial Processing in the Early Stages of Human Vision”**, IEEE Trans. Image Processing, Vol. 9, nº 2, p. 220 – 226.

Beyer, H. G.; Hammer, A.; Luther, J.; Poplawska, J.; Stolzenburg, K. e Wieting, P., 1994. **“Analysis and Sinthesis of Cloud Patern for Radiation Field Studies”**, Solar Energy, Vol. 52, nº 5, p. 379-390.

Beyer, H. G.; Constanzo, C. e Heinemann, D., 1996. **“Modifications of the Heliosat Procedure for Irradiance Estimates from Sattelite Images”**, Solar Energy, Vol. 56, nº 3, p. 207 - 212.

Bird, R. E. e Hutstrom R. L., 1981. **“A Simplified Clear Sky Model for Direct and Diffuse Insolation on Horizontal Surfaces”**, Solar Energy Research Institute - SERI / TR-642-761, 38p.

Brine, D. T. e Iqbal, M., 1983. **“Diffuse and Global Solar Spectral Irradiance Under Cloudless Skies”**, Solar Energy, Vol. 30, n° 5, p. 447-453.

Brunger, A. P. e Hooper (a), F. C., 1993. **“Anisotropic Sky Radiance Model Based On Narrow Field of View Measurements of Shortwave Radiance”**, Solar Energy, Vol 51, p. 53-64.

Brunger, A. P. e Hooper (b), F. C., 1993. **“Erratum to Anisotropic Sky Radiance Model Based On Narrow Field of View Measurements of Shortwave Radiance”** Solar Energy, Vol. 51, n° 6, p. 523.

Brunger, A. P. and Hooper (c), F. C., 1993. **“Erratum to Anisotropic Sky Radiance Model Based On Narrow Field of View Measurements of Shortwave Radiance”** Solar Energy, Vol. 51, n° 6, p. 523.

Chain, C., Dumortier, D. e Fontoynt M., F. C., 1993. **“A Comprehensive Model of Luminance, Correlated Colour Temperature and Spectral Distribution of Skylight: Comparision With Experimental Data”** Solar Energy, Vol. 65, n° 5, p. 285 - 295.

Chandrasekhar, S., 1960 **“Radiative Transfer”**, Dover Publications, Inc. New York, 393 p.

Coombes, C. A. e Harrison, A.W., 1982. **“An Automatic All Sky Scanning Radiometer”**, Canadian J. of Phys., Vol 60, p. 919-925.

Coombes, C. A. e Harrison, A.W, 1988. **“Angular Distribution of Overcast Sky Short Wavelength Radiance”**, Solar Energy, Vol. 40, n° 2, p. 161-166.

Coulson, K., 1975. **“Solar and Terrestrial Radiation – Methods and Measurements”**, A. Press, New York 322 p.

Costa, R. D. e Starkey, J., 2001. **“PhotoLin: a Program to Identify and Analyze Linear Structures in Aerial Photographs, Satellite Images and Maps”**, Computers Geosciences, Vol. 27, p. 527-534.

Dave, J. V., 1977. **“Validity of Isotropic-Distribution Aproximation in Solar Energy Estimations”**, Solar Energy, Vol 19, p. 331-333.

Dave, J. V., 1978. **“Extensive Datasets of the Diffuse Radiation in Realistic Atmospheric Models with Aerosols and Common Absorbing Gases”**, Solar Energy, Vol 21, p. 361-369.

Domingues, F. A. 1976, **“Geometria da Insolação”**, USP, São Paulo, 1976

Drummond, A. J., 1956, **“On Measurement of Sky Radiation”**, Arch. Met. Geophys. Bioclimatol., Vol. 7, 413-435.

Duffie, J. A. e Beckman W.A. , 1980. **“Solar Engineering of Thermal Processes”**, Jonh Wiley, New York, 762p.

Facon, J., 1993. **“Processamento de Imagens”**, Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, VI Escola Brasileiro-Argentina de Informática, 1993.

Feister, U.;Shields, J.; Karr, M. **“Ground-Based Cloud Images and Sky Radiances in the Visible and Near Infrared Region From Whole Sky Imager Measurements”** – documento consultado durante a realização da tese, na página da web: [www.eumetsat.de/en/area2/proceedings/eump31/](http://www.eumetsat.de/en/area2/proceedings/eump31/).

Frölich, C.; Geist, J. e Kendall, J., 1973. **“The Third International Comparisions of Pyrheliometers and a Comparision of Radiometric Scales”**, Solar Energy, Vol. 14, p. 157-166.

Fuentes, L. M., 1999. **“Construcción de un Fotómetro de Imagen Digital. Calibración Detallada y Aplicaciones”**, Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias – Edición Revisada Universidad de Valladolid – Facultad de Ciencias, Departamento de Óptica y Física Aplicada, 128p.

Gueymard, C, 1993. **“Critical Analysis and Performance Assessment of Clear Sky Solar Irradiance Models Using Theoretical and Measured Data”**, Solar Energy, Vol. 51, nº 2, p. 121-138.

Hand, I. F., 1948 **“Charts to Obtain Solar Altitudes and Azimuths”**, Heating and Ventilating, 45 (10) p. 86 – 88;

Hartenstein, H.; Ruhl, M e Saupe, D., 2000.**“Region-Based Fractal Image Compression”**, IEEE Trans. Image Processing, Vol. 9, nº 7, p. 1171 – 1184.

Harrison, A. W., 1991. **“Directional Sky Luminance Versus Cloud Cover and Solar Position”**, Solar Energy, Vol. 46, nº 1, p. 13-19.

Harrison, A. W. e Coombes, C. A., 1988. **“Angular Distribution of Clear Sky Short Wavelength Radiance”**, Solar Energy, Vol. 40, nº 1, p. 57-63.

Hay, J. E. e Hanson, K. J., 1985. **“Evaluating The Solar Resouce: A Review of Problems Resultin From Temporal, Spatial and Angular Variations”**, Solar Energy, Vol. 34, nº 2, p. 151-161.

Hopkinson, R., Petherbridge, P. e Longmore, J., 1975, **“Iluminação Natural”**, Fundação. Calouste Gulbenkian, Lisboa, 774p.

Horch, E.; Franz, O. G. e Ninkov, Z., 2000. **“CCD Sperckle Observations of Binary Stars From the Southern Hemisphere. II Measures from the Lowell-Tololo Tesescope During 1999”**, The Astronomical Journal, 120: 2638-2648.

Ineichen, P., Gremaud, J. M., Guisan, O. and Mermoud, A., 1984. **“Study of the Corrective Factor Involved When Measuring the Diffuse Solar Radiation by Use of the Ring Method”**, Solar Energy, Vol. 32, n° 5, p. 585-590.

Ineichen, P.; Molineaux, B. and Perez, R., 1994. **“Sky Luminance Data Validation: Comparision of Seven Models With Four Data Banks”**, Solar Energy, Vol. 52, n° 4, p. 337-346.

Iqbal, M., 1983. **“An Introduction to Solar Radiation”**, Academic Press, Toronto, 390p.

Islam, M. R.; Exell, R. H., 1996. **“Solar Radiation Mapping from Image Using a Low Cost System”**, Solar Energy, Vol. 56, n° 3, p. 225-237.

Karayel, M.; Navvab, M.; Neweman, E. e Selkowitz, S., 1983 **“Zenith Luminance and Sky Luminance Distributions for Daylighting Calculations”**, Energy and Buildings, Vol. 6, n° 3, p. 511-516.

Kittler, R., 1994 **“Some Qualities of Scattering Functions Defining Sky Radiance Distributions”**, Solar Energy, Vol. 53, n° 6, p. 511-516.

Kittler, R. e Valko, P., 1993 **“Radiance Distributions on Densely Overcast Skies: Comparisions With CIE Luminance Standard”**, Solar Energy, Vol. 51, n° 5, p. 349-355.

Kittler, R. e Darula, S., 1998 **“Parametrization Problems of the Very Bright Cloudy Sky Conditions”**, Solar Energy, Vol. 62, n° 2, p. 93 - 100.

Kline, S. J. e McClintock, F. A., 1953 **“Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments”**, Mech. Eng., p. 3 – conforme citado em Holman, J. P., 1971 **“Experimental Methods for Engineers”**, McGraw-Hill, New York, 422p.

Kondratyev K. YA., 1969. **“Radiation in the Atmosphere”**, A. Press, New York 912 p.

Kudish, A. I. e Ianetz, A., 1993. **“Analyses of Diffuse Radiation Data for Beer Sheva: Measured (Shadow Ring) Versus Calculated (Global-Horizontal Beam) Values”**, Solar Energy, Vol. 51, p. 495-503.

LeBaron, B. A., Peterson, W. A., e Dirmhirn, I., 1980, **“Corrections for Diffuse Irradiance Measured with Shadowbands”**, Solar Energy, Vol. 25, n° p. 1-17.

Leckner, B., 1978. **“The Spectral Distribution of Solar Radiation at the Earth’s Surface - Elements of a Model”**, Solar Energy, Vol 20, p. 143-150.

Li, D. H. W. e Lam, J. C., 2001 **“Evaluation of Lighting Performance in Office Buildings With Daylighting Controls”**, Energy and Buildings, Vol. 33, n° 8, p. 793-803.

Littlefir, P. J., 1994. **“A Comparision of Sky Luminance Models With Measured Datas From Garston, United Kingdon”**, Solar Energy, Vol. 53, N° 4, p. 315-322.

Marques Filho, O. e Vieira Neto, H., 1999. **“Processamento Digital de Imagens”**, Brasport Livros e Multimídia Ltda., Rio de Janeiro, 406p.

McArthr, J. B. e Hay, J. E., 1981. **“An Assessment of the Techniques for Determining the Distribution of Diffuse Solar Radiance for the Sky Hemisphere”**, Solar Energy, Technical Note, Vol. 25, p. 573-574.

McArthr, J. B. e Hay, J. E., 1981. **“A Technique for Mapping the Distribution of Diffuse Solar Radiation over the Sky Hemisphere”**, J. Appl. Meteorol., 20(4), p 421-429.

Michalsky, J. J.; Harrison, L. e LeBaron, B. A., 1987. **“Empirical Radiometric Correction of a Silicon Photodiode Rotating Shadowband Pyranometer”**, Solar Energy, Vol 39, n° 2, p. 87-96.

Miller, E., 1999. **“Statistically Based Methods for Anomaly Characterization in Images from Observations of Scattered Radiation”**, IEEE Trans. Image Processing, Vol. 8, n° 1, p. 92 – 101.

Miñano, J. C. D., 1985, **“Aspectos Relativos a la Sintesis de Concentradores Para Fuentes SolaresExtensas”**, Universidade Politécnica de Madrid – Tesis Doctoral, Madrid, p 265.

Morgan, D. H., 1998. **“Ha Emission from Point Sources in the Magellanic Clouds”**, Publ. Astron. Soc. 15, 123-7.

Modest, M. F., 1989. **“Radiative Heat Transfer”**, McGraw-Hill, New York, 832p.

Noia, M.; Ratto, C. F. e Festa, R., 1993. **“Solar Irradiance Estimation from Geostationary Satellite Data: I Statistical Models”**, Solar Energy, Vol. 51, n° 6, p. 449 – 456.

Noia, M.; Ratto, C. F. e Festa, R., 1993. **“Solar Irradiance Estimation from Geostationary Satellite Data: II Physical Models”**, Solar Energy, Vol. 51, n° 6, p. 457 – 465.

Olmo, F. J.; Vida, J.; Foyo, I.; Castro-Diez, Y. e Alados-Arboledas, L., 1999. **“Prediction of Global Irradiance on Inclined Surfaces from Horizontal Global Irradiance”**, Energy, Vol. 24, p. 689 - 704

Painter, H. E., 1981. **“The Shade Ring Correction for Diffuse Irradiance Measurements”**, Solar Energy, Vol. 26, p. 361-363.

Parker, J. R., 1997. **“Algorithms for Image Processing and Computer Vision”**, Wiley Computer Publishing, 417p.

Pereira, E. B.; Abreu, S. L.; Stuhlmann, R.; Rieland, M. e Colle, S., 1996. **“Survey of the Incident Solar Radiation in Brazil by Use of Meteosat Satellite Data”**, Solar Energy, Vol. 57, nº 2, p. 125 – 132.

Perez, R.; Webster, K.; Seals, R.; Stewart R. and Barron, J., 1987. **“Variation of the Luminous Efficacy of Global and Diffuse Radiation and Zenith Luminance With Weather Conditions – Description of a Potential Method to Generate Key Daylight Availability data From Existing Solar Radiation Data Bases”**, Solar Energy, Vol. 38, nº 1, p. 33 – 44.

Perez, R.; Seals, R.; Ineichen, P.; Stewart, R. e Menicucci, D., 1987. **“A New Simplified Version of the Perez Diffuse Irradiance Model for Tilted Surfaces”**. Solar Energy, Vol. 39, nº 3, p. 221 – 231.

Perez, R., Seals, R. e Michalsky, J., 1993. **“All Weather Model for Sky Luminance Distribution”**, Solar Energy, Vol. 50, nº 3, p. 235 – 245.

Perez, R.; Seals, R.; Michalsky, J. e Ineichen, P., 1993. **“Geostatistical Properties and Modeling of Random Cloud Patterns for Real Skies”**, Solar Energy, Vol. 51, nº 1, p. 7 – 18.

Reddy, S. J., 1974. **“An Empirical Method for Estimating Sunshine From Total Cloud Amount”**, Solar Energy, Vol. 15, p. 281 – 285.

Reinhart, C. F. e Walkenhorst, O., 2001 **“Validation of Dynamic RADIANCE-based Daylighting Simulations for a Test Office With External Blinds”**, Energy and Buildings, Vol. 33, nº 7, p. 683-697.

Remund, J.; Salvisberg, E. e Kunz, S.,1998 **“On The Generation Of Hourly Shortwave Radiation Data On Tilted Surfaces”** Solar Energy, Vol 62, nº 5, p. 331 – 344

Ricieri, R. P., Escobedo, J. F. e Frisina, V. A.,1998. **“Avaliação de Métodos de Medição da Radiação Solar Difusa”**, VII *ENCIT* – Rio de Janeiro, p716 – 721.

Rocha, F. J. M., 1992. **“Projeto e Construção de um Pireliômetro Fotovoltaico para Operação Sistemática”**, Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia, UFRGS, PROMEC, Porto Alegre, 120p.

Rosen, M. A., 1992. **“Investigation of the Validity of the TDRC Model for the Distribution Diffuse Sky Radiance”**, Solar Energy, Vol 48, nº 2, p123 – 131.

Rossini, E. G. e Krenzinger, A. e Macagnan, M. H., 1995. **“Caracterização do Espectro Solar com um Mínimo de Filtros”**, Anais do XIII Congresso Brasileiro e II Congresso Ibero-Americano de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, MG.

Rossini, E. G. e Krenzinger, A., 2000. **“Metodologia para Caracterização da Radiação Solar Difusa”**, Nutau 2000, p823 – 829.

Rossini, E. G. e Krenzinger, A., 2002. **“Characterization of the Solar Spectrum With a Set of Three Filters”**, submetido para publicação à Renewable Energy (Elsevier Science).

Seiz, G. e Baltsavias, B., 2001. **“Cloud Mapping Using Ground-Based Imagers”**, AMS Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation, Albuquerque, 15 - 18.

Siala, F. M. F., Rosen M. A., Hooper, F. C., 1990. **“Models For Directional Distribution of the Diffuse Sky Radiance”**, ASME, Vol 112, p.102-108.

Siegel, R. e Howell, J. R., 1972. **“Thermal Radiation Heat Transfer”**, McGraw-Hill, New York, 812p.

Silva, A. C., 1964; **“Resolução de Problemas Geométricos de Iluminação Solar”**, Lisboa.

Suehrcke, H., 1994. **“The Effect of Time Errors on The Accuracy of Solar Radiation Dynamic Measurements”**, Solar Energy, Vol 53, nº 4, p.353-357.

Suzuky, A. e Kobayashi, S., 1994. **“Yearly Distributed Insolation Model and Optimum Design of de Two Dimensional Compound Parabolic Concentrator”**, Solar Energy, Vol 54, Nº 5, p.327-331.

Syrjäsuo, M., 1996. **“All-Sky Camera”**, documento consultado durante a realização da tese, na página da web: : [http://www.geo.fmi.fi/~syrjasuo/asc\\_index.shtml](http://www.geo.fmi.fi/~syrjasuo/asc_index.shtml)

Taubman, D., 2000.**“High Performance Scalable Image Compression With EBCOT”**, IEEE Trans. Image Processing, Vol. 9, nº 7, p. 1158 – 1170.

Temps, R. C. e Coulson, K. L., 1977. **“Solar Radiation Incident Upon Slopes of Different Orientations”**, Solar Energy, Vol 19, p.179-184.

Utrillas, M. P. e Martinez-Lozano, J. A., **“Performance Evaluation of Several Versions of The Perez Tilted Diffuse Irradiance Model”**, Solar Energy, Vol 53, Nº 2 p.155-162.

Vora, P. L.; Farrell, E J.; Tietz, J. D. e Brainard, D. H., 2001. **“Image Capture: Simulation of Sensor Responses from Hyperspectral Images”**, IEEE Trans. Image Processing, Vol. 10, nº 2, p. 307 – 316.

VTLC, 2001. **Video Time Lapsed Camera** – documento consultado durante a realização da tese, na página da web: <http://www.arm.gov/docs/instruments/static/vtlc.html>.

Wagner, S., 1998. “**Calibration of Gray Values of Hemispherical Photographs for Image Analysis**”, Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 90, p. 103 – 117.

WSI, 2001. **Whole-Sky Imager** - documento consultado durante a realização da tese, na página da web: <http://www.arm.gov/docs/instruments/static/wsi.html>.

Zanesco, I., 1991. “**Análise e Construção de um Piranômetro Fotovoltaico**”, Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia, UFRGS, PROMEC, Porto Alegre, 120p.