

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

A comissão examinadora, abaixo assinada, aprova a dissertação

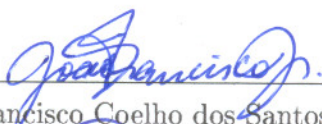
“ESTUDO DE AGLOMERADOS ESTELARES DAS
NUVENS DE MAGALHÃES USANDO FOTOMETRIA
CCD NA BANDA V”

Elaborada por **Luziane Oliveira Carvalho** como requisito parcial para a
obtenção do grau de Mestre em Física.

COMISSÃO EXAMINADORA:



Alex André Schmidt - Orientador

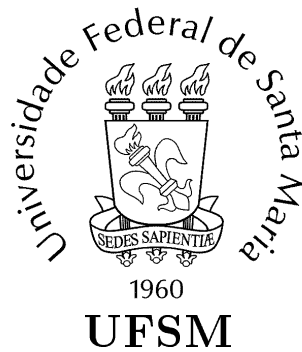


João Francisco Coelho dos Santos Júnior



Marcus Vinicius Fontana Copetti

Santa Maria, 02 de Junho de 2005.



Dissertação de Mestrado

**ESTUDO DE AGLOMERADOS
ESTELARES DAS NUVENS DE
MAGALHÃES USANDO
FOTOMETRIA CCD NA BANDA V**

Luziane Oliveira Carvalho

PPGFísica

Santa Maria, RS, Brasil

2005

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
Programa de Pós-Graduação em Física

**ESTUDO DE AGLOMERADOS
ESTELARES DAS NUVENS DE
MAGALHÃES USANDO
FOTOMETRIA CCD NA BANDA V ‡**

Luziane Oliveira Carvalho

Dissertação realizada sob a orientação do Prof. Alex A. Schmidt apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física da USFM em preenchimento parcial dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Física.

Santa Maria
2005

‡Trabalho financiado pela CAPES e CNPq.

Dedicatória

Aos meus pais José Alter e Elni Terezinha, que me deram suporte em todos os sentidos, que sempre foram exemplo de dignidade, amor, respeito e força, dedico este trabalho que só foi possível graças ao apoio e carinho de vocês. Obrigada por tanta confiança e por serem pais tão presentes na minha vida.

À minha dinda Eleni pelo enorme carinho e atenção que sempre me dedicou. Sei que onde estás segue me incentivando como sempre fez. Não existe um dia que não pense em ti, com carinho, com emoção, com saudade, muita saudade...

Agradecimentos

Agradeço de forma geral a muitas pessoas que colaboraram para a realização deste trabalho e em particular,

★ Ao meu orientador, professor Dr. Alex Schmidt pela orientação, paciência e preocupação em realizar um bom trabalho;

★ Aos professores Dr. Marcus Copetti e Dra. Maria Inês Copetti, por terem disponibilizado um agradável ambiente de trabalho e por diversos conselhos;

★ Aos professores Dr. Paulo Piquini e Dr. Sérgio Magalhães, coordenadores do Programa de Pós-Graduação em Física da UFSM, e a secretária do Programa, a Saionara, pelo auxílio prestado diversas vezes;

★ Aos meus professores da Escola Estadual Jacinto Inácio, em Santana da Boa Vista, que me acompanham desde o jardim de infância e me incentivam até hoje;

★ Aos meus colegas de laboratório, Ângela, Oli, Rogério, Tiago e Vinícius, obrigada por terem sido minha "família" em Santa Maria, pela colaboração e pela amizade ao longo desses anos. Especial menção merece o Tiago pela ajuda em aspectos fundamentais desta dissertação e pela amizade sempre presente;

★ Aos meus amigos, Aline, Andreza, Camila, Edilene, Fernando, Giovani, Ivana, Janice, Lizandro, Mário e Thunder, tão especiais e tão distantes. Lembrar dos momentos maravilhosos que passei com vocês em Pelotas ou Santana da Boa Vista sempre me deram forças para não desistir;

★ Ao seu Paulo, a dona Rosa e ao Ricardo, por terem me acolhido com tanto carinho nos finais de semana. Obrigada pelo incentivo que sempre me deram e por muitos momentos agradáveis que passei com vocês;

★ À toda minha família, meus tios, tias, primos, primas e, especialmente aos meus avós, Claudiano e Stela, Etelvino e Arlinda, por tentarem entender o meu

trabalho, por perdoarem minha ausência e por trazerem tanta felicidade a minha vida;

★ Ao meu mano, Roger, sempre amigo e companheiro. Mesmo distante, esteve sempre presente no meu coração. Obrigada pela amizade, pelas longas conversas que sempre tivemos e pelo apoio com o qual sempre posso contar;

★ Ao Luciano, meu melhor amigo, meu namorado, meu amor. Não existem palavras para agradecer o teu apoio, carinho, amor, preocupação e principalmente, tua paciência. Mesmo a 300 km de distância sempre esteve junto comigo, acompanhou todos os passos desse trabalho, compartilhou minhas vitórias e minhas frustrações. Obrigada por tanta dedicação, te amo muito!

★ Pela vida, conforto e amor incondicional, agradeço a Deus;

★ Ao CNPq e à CAPES, pelo auxílio financeiro.

Resumo

Nesse trabalho apresentamos a fotometria CCD na banda V de 13 aglomerados estelares das Nuvens de Magalhães (L10, L54, L59, L85, L96, NGC 1818, NGC 1866, NGC 1868, NGC 1978, NGC 2157, NGC 2213, NGC 2214, H11). A calibração fotométrica foi feita utilizando estrelas padrão de regiões-E (Graham, 1982) e o sistema de ajuste por mínimos quadrados GaussFit (Jefferys et al., 1988). O erro médio obtido é menor que 0.01 mag para um nível de confiança de 66%. O centro dos aglomerados foi determinado utilizando-se uma implementação do algoritmo de autocorrelação de Djorgovski (1988) com um erro médio de 1". As imagens foram limpas de contaminação estelar utilizando o pacote DAOPHOT do IRAF, onde estrelas provavelmente não pertencentes aos aglomerados foram subtraídas. Fizemos a fotometria superficial na banda V e utilizamos o modelo proposto por Elson, Fall e Freeman (Elson et al., 1987) para ajustar as curvas de brilho superficial. Os parâmetros estruturais dos aglomerados, obtidos a partir do ajuste dos dados de brilho superficial, foram utilizados para fazer uma estimativa da luminosidade e da massa de cada aglomerado.

Abstract

In this work we present CCD photometry in the V band for 13 star clusters in the Magellanic Clouds (L10, L54, L59, L85, L96, NGC 1818, NGC 1866, NGC 1868, NGC 1978, NGC 2157, NGC 2213, NGC 2214, H11). Photometric calibration has been done using standard stars from the E-regions (Graham, 1982) and the least square system GAUSSFIT (Jefferys et al.,1988). The mean error obtained was less than 0.01 mag at a 66% confidence level. Cluster centers have been determined using an implementation of the Djorgovski autocorrelation algorithm (1988) with a 1" mean error. CCD frames have been cleaned of stellar contamination using the DAOPHOT package from IRAF, where probable non-clusters stars have been removed. We made the surface photometry in the V band and used the model considered for Elson, Fall and Freeman (1987) to fit the surface brightness curves. The clusters structural parameters, obtained from fitted brightness profiles, have been used to obtain luminosity and mass estimation for all clusters.

Conteúdo

1	Introdução	5
1.1	As Nuvens de Magalhães	5
1.2	Aglomerados globulares	7
1.3	Fotometria	7
1.4	Sistema fotométrico UBVRI	9
1.5	O presente trabalho	9
2	Observação e Redução dos Dados	11
2.1	Observação dos dados	11
2.2	Dados da literatura	12
2.3	Redução dos dados	13
2.4	Correção por extinção atmosférica	15
2.5	Calibração fotométrica	16
2.5.1	Erro da calibração e intervalos de confiança	18
3	Fotometria Superficial	22
3.1	Determinação do céu	22
3.2	Determinação do centro dos aglomerados	26
3.3	Determinação da fotometria superficial	28
3.3.1	Função de espalhamento pontual da imagem (PSF)	29
3.3.2	Fotometria superficial	29
3.3.3	Determinação do erro do fluxo	30
3.3.4	Influência do erro de centragem na determinação da fotometria superficial	32
3.3.5	Calibração fotométrica	34
3.4	Ajuste da lei de brilho	35
4	Resultados	39
4.1	Perfis de brilho superficial	39

4.2	Parâmetros estruturais	46
4.3	Estimativas de massa e luminosidade	49
4.3.1	Luminosidade	49
4.3.2	Massa	51
4.3.3	Comparação com trabalhos anteriores	52
5	Considerações Finais e Perspectivas Futuras	56
A	Imagens dos Aglomerados	59
B	Detalhes dos Cálculos	64
B.1	Obtenção da expressão para a densidade volumétrica de luminosidade $j(R)$	64
B.2	Conversão de unidades do parâmetro μ_0	66
B.3	Diferença entre o brilho superficial central obtido e o brilho superficial central da literatura	68
C	Extração das Estrelas de Campo	69
C.1	Examinando as imagens	69
C.2	Encontrando estrelas	69
C.3	Determinando estrelas PSF	70
C.4	Removendo estrelas e obtendo as imagens finais	70

Lista de Figuras

1.1	Grande Nuvem de Magalhães	6
1.2	Pequena Nuvem de Magalhães	6
1.3	Curvas de transmissão dos filtros UBVRI	10
2.1	Relação idade-metalicidade dos aglomerados observados	14
2.2	Curvas de calibração fotométrica: Filtros U e B	19
2.3	Curvas de calibração fotométrica: Filtros V e R	20
2.4	Curvas de calibração fotométrica: Filtros I	21
3.1	Histograma da distribuição de brilho do céu: L54 (NGC 330)	23
3.2	Histograma da distribuição de brilho do céu depois do truncamento: L54 (NGC 330)	23
3.3	Efeito do erro na centragem do objeto	26
3.4	Método de autocorrelação espelhada	27
3.5	Grade de abertura para a fotometria	30
3.6	Peso atribuído a um pixel em função de sua distância	33
3.7	Comparação entre o modelo de King e o modelo EFF	36
4.1	Perfis de brilho superficial: L10 e L54	40
4.2	Perfis de brilho superficial: L59 e L85	41
4.3	Perfis de brilho superficial: L96 e NGC 1818	42
4.4	Perfis de brilho superficial: NGC 1866 e NGC 1868	43
4.5	Perfis de brilho superficial: NGC 1978 e NGC 2157	44
4.6	Perfis de brilho superficial: NGC 2213 e NGC 2214	45
4.7	Perfis de brilho superficial: H11	46
4.8	Comparação dos valores obtidos para μ_0	47
4.9	Comparação dos valores obtidos para a	48
4.10	Comparação dos valores obtidos para γ	48

4.11 Geometria da integração da densidade de luminosidade ao longo da linha de visada	49
4.12 Comparação dos valores obtidos para L_∞	54
4.13 Comparação dos valores obtidos para L_m	54
4.14 Comparação dos valores obtidos para M_∞	55
4.15 Comparação dos valores obtidos para M_m	55
A.1 L10 (NGC 121)	60
A.2 L54 (NGC 330)	60
A.3 L59 (NGC 339)	60
A.4 L85 (NGC 419)	60
A.5 L96 (NGC 458)	61
A.6 NGC 1818	61
A.7 NGC 1866	61
A.8 NGC 1868	61
A.9 NGC 1978	62
A.10 NGC 2157	62
A.11 NGC 2213	62
A.12 NGC 2214	62
A.13 H11 (SL 868)	63
C.1 Perfis de brilho – L96 (NGC 458)	72
C.2 Perfis de brilho – NGC 2213	73

Lista de Tabelas

1.1	Comprimento de onda efetivo para os filtros do sistema fotométrico UBVRI e largura dos filtros	9
2.1	Identificação, coordenadas e parâmetro de idade dos aglomerados . . .	12
2.2	Tempos de exposição das imagens e <i>seeing</i> medido	13
2.3	Idade e metalicidade dos aglomerados observados	14
2.4	Filtro, identificação e coeficiente de extinção	16
2.5	Estrelas padrão das regiões-E (Graham, 1982)	17
2.6	Filtros, coeficientes angular e linear da calibração	17
2.7	Distribuição <i>t</i> de Student	18
3.1	Brilho do céu para os aglomerados	25
3.2	Centro dos aglomerados	28
4.1	Parâmetros estruturais obtidos para os aglomerados	47
4.2	Relação M/L dos aglomerados e estimativas de f_0 e j_0	52
4.3	Estimativas de massa e luminosidade	52

Capítulo 1

Introdução

1.1 As Nuvens de Magalhães

Importantes fontes de informações sobre a formação e evolução de estrelas e galáxias, justamente por serem tão próximas, a Grande e a Pequena Nuvem de Magalhães são duas galáxias satélites da Via Láctea, facilmente visíveis a olho nu no Hemisfério Sul. Elas situam-se nas vizinhanças do pólo sul celeste e estão, em termos cósmicos, extremamente próximas da Terra, sendo que a Grande Nuvem dista aproximadamente 180.300 anos-luz (50.1 ± 2.3 kpc) (Panagia et al., 1991) e a Pequena Nuvem, encontra-se a aproximadamente 197.230 anos-luz (60.5 ± 4.0 kpc) (Hilditch et al., 2005).

Inicialmente estas vizinhas da Via Láctea eram conhecidas como as Nuvens do Cabo, pelo fato de que há cerca de 500 anos elas teriam sido percebidas por navegantes que cruzaram o Cabo da Boa Esperança, na África do Sul – segundo o escritor italiano Pedro Mártir de Anghiera (1459 - 1526). Mas acabou predominando o nome de Nuvens de Magalhães em homenagem ao navegador português Fernão de Magalhães (1480-1521), que em 1520 descreveu os objetos celestes.

Somente em 1912 essas galáxias começaram a ser objeto de curiosidade científica. Foi a astrônoma americana Henrietta Leavitt que primeiro estudou as variáveis Cefeidas da Pequena Nuvem e percebeu que o período de variação do brilho dessas estrelas estava ligado à sua luminosidade intrínseca. Assim, era possível saber a luminosidade real e, conseqüentemente, a distância de uma estrela variável, apenas acompanhando o período de variação de seu brilho.

Desde então muitos trabalhos vêm sendo feitos utilizando como base estas galáxias, que são os dois exemplos mais conhecidos de galáxias irregulares, classificadas assim por não terem uma forma definida e serem privadas de qualquer simetria circular

ou rotacional (Figuras 1.1 e 1.2); embora a Grande Nuvem apresente uma barra central e nas extremidades algo semelhante a braços espirais. Portanto, por conta de sua proximidade e riqueza de corpos celestes, as Nuvens de Magalhães oferecem uma oportunidade única para estudos astronômicos.



Figura 1.1: Grande Nuvem de Magalhães (tamanho aparente de 650 x 550 minutos de arco, com a direção norte para cima e leste para a esquerda). A imagem foi obtida por David Malin no Anglo-Australian Observatory, Austrália.



Figura 1.2: Pequena Nuvem de Magalhães (tamanho aparente de 280 x 160 minutos de arco, com a direção norte para cima e leste para a esquerda). No lado direito da imagem é possível notar o aglomerado globular 47 Tucanae (NGC 104) da nossa própria Galáxia. A imagem foi obtida por David Malin no Anglo-Australian Observatory, Austrália.

1.2 Aglomerados globulares

Os cúmulos ou aglomerados globulares são agrupamentos compactos e em geral esféricos de estrelas que num espaço de 100 a 300 anos-luz de diâmetro reúnem entre centenas de milhares até um milhão de estrelas, unidas pela força gravitacional e que foram formadas aproximadamente ao mesmo tempo da mesma nuvem de gás primordial tendo, portanto, a mesma idade e composição química.

Dentro de um aglomerado, as estrelas apresentam diferentes massas e sendo a massa um parâmetro determinante em sua evolução, as estrelas estão em diferentes estágios evolutivos, apesar de terem a mesma idade, uma vez que aquelas que possuem massas maiores evoluirão mais rapidamente do que as que possuem massas menores. Os aglomerados globulares das Nuvens de Magalhães se distribuem numa ampla faixa de idade, que varia de 50 milhões até 15 bilhões de anos.

Uma revisão extensa das propriedades desses objetos foi feita por Van den Bergh (1991), diferenciando os aglomerados das Nuvens de Magalhães daqueles existentes na nossa Galáxia.

Dessa forma, os aglomerados estelares da Grande e Pequena Nuvem de Magalhães – que são galáxias extremamente ricas nestes sistemas – têm sido alvo de vários estudos, pois providenciam um bom laboratório para testar teorias de evolução estelar e ajudam a esclarecer a história da formação estelar nessas galáxias.

1.3 Fotometria

A palavra fotometria provém do grego, sendo que *photos* significa luz e *metron*, medida. A fotometria consiste em medir a quantidade de luz emitida por um objeto, mais precisamente, mede-se o fluxo, ou seja, a energia por unidade de área e por unidade de tempo, que chega ao detector.

Medidas quantitativas fotométricas em Astronomia foram feitas pela primeira vez em 1729 por Pierre Bouguer (1698–1758), que comparou o brilho aparente de objetos celestiais com o da chama de uma vela. Ele construiu tabelas de refração atmosférica, investigou a absorção da luz pela atmosfera e formulou uma lei sobre a atenuação de um feixe de luz ao passar por um meio translúcido. Já em 1760, Johann Heinrich Lambert (1728–1777) desenvolveu os conceitos básicos e a nomenclatura de sistemas fotométricos.

Para medir o fluxo é necessário o uso de detectores. O primeiro instrumento utilizado para fazer observações astronômicas foi o olho humano, auxiliado por vários

dispositivos mecânicos que mediam a posição dos corpos celestes. Já no século XVII, foi inventado o telescópio, com o qual Galileo realizou diversas observações astronômicas. Atualmente existem diversas formas de se fazer fotometria, sendo que duas delas são a fotometria fotográfica e a fotometria CCD.

Para fazer **fotometria fotográfica** utiliza-se um dos mais tradicionais detectores, que são as placas fotográficas. Estas placas possuem uma eficiência pequena comparada a outras técnicas, mas sua grande área possibilita a coleta de informações de uma grande parte do campo de visão de um telescópio. A imagem pode ser convertida em uma forma digital num processo conhecido como digitalização de imagens. Como desvantagens desta técnica temos que a placa precisa ser pré-sensibilizada, ela satura facilmente e sua calibração não é linear.

Já a **fotometria CCD** é uma técnica mais recente na qual as imagens são obtidas usando câmaras eletrônicas, chamadas sensores ou detectores CCD (Charge Coupled Device) acoplados aos telescópios. Estes detectores são constituídos por uma superfície sólida sensível à luz, dotada de circuitos que permitem ler e armazenar eletronicamente imagens digitais. No momento que a luz incide sobre essa superfície, a qual é composta por diversos elementos de área, conhecidos como *pixels*, produz cargas elétricas por efeito fotoelétrico, que são por sua vez armazenadas, medidas e transformadas por um conversor analógico-digital em números binários que ao serem lidos pelo computador são traduzidos como o número de contagens.

Os CCDs possuem uma resposta linear ao fluxo incidente de fótons numa ampla faixa de intensidade (Mclean, 1989), fator ausente nas placas fotográficas e nos detectores fotoelétricos. Também são aproximadamente 50 vezes mais sensíveis do que uma chapa fotográfica, o que permite gravar em um minuto uma imagem que levaria em torno de uma hora para gravar na chapa. O uso do CCD apresenta algumas desvantagens, pois ele opera a temperaturas baixas (refrigerado em nitrogênio líquido), a resposta ao comprimento de onda é limitada e ele possui uma pequena área de cobertura. Mas devido à distância das Nuvens de Magalhães, os CCDs são ideais para captar imagens dos aglomerados estelares, já que o tamanho aparente desses é ideal para escala das imagens ($\sim 16''/\text{mm}$) obtidas em telescópios de porte médio (1-2 m de diâmetro) e CCDs com tamanho em torno de 2 cm.

Uma comparação direta entre duas técnicas – a fotometria fotoelétrica e a fotometria CCD – foi feita por Walker (1990), que demonstrou a precisão da fotometria CCD e concluiu que essa pode, com vantagens, substituir a fotometria fotoelétrica.

1.4 Sistema fotométrico UBVRI

O sistema fotométrico UBVRI de Johnson-Cousins é composto de cinco filtros ou bandas que restringem a detecção da radiação emitida pela estrela a uma determinada faixa de frequências ou comprimentos de onda – U (Ultravioleta), B (Azul), V (Visível), R (Vermelho), e I (Infravermelho).

Este sistema fornece cinco luminosidades aparentes ou fluxos (quantidade de energia por cm^2 por segundo), e as razões entre esses fluxos definem índices de cor para a estrela, ou seja, a diferença entre duas magnitudes do sistema fornece uma medida quantitativa do índice de cor da estrela.

O comprimento de onda efetivo λ_{eff} e largura $\Delta\lambda$ para cada filtro do sistema Johnson-Cousins é dado na Tabela 1.1. A curva dos filtros e a resposta do CCD utilizado são mostradas na Figura 1.3.

Tabela 1.1: Comprimento de onda efetivo (λ_{eff}) para os filtros do sistema fotométrico UBVRI e largura de banda dos filtros ($\Delta\lambda$).

Filtro	λ_{eff} (Å)	$\Delta\lambda$ (Å)
U	3650	700
B	4400	1000
V	5500	900
R	7000	2200
I	8800	2400

Fonte: Lang (1998)

1.5 O presente trabalho

Neste trabalho realizamos um estudo sistemático das propriedades dos aglomerados globulares das Nuvens de Magalhães, apresentando aqui a fotometria CCD na banda V de Johnson-Cousins para o conteúdo estelar de 13 aglomerados globulares destas galáxias.

O trabalho está estruturado como segue. No capítulo 2 será feita uma síntese de como foram realizadas as observações, a redução dos dados, a correção por extinção e a calibração fotométrica.

No capítulo 3 estimaremos o brilho do céu para os aglomerados em todas as bandas do sistema fotométrico UBVRI; discutiremos os procedimentos adotados

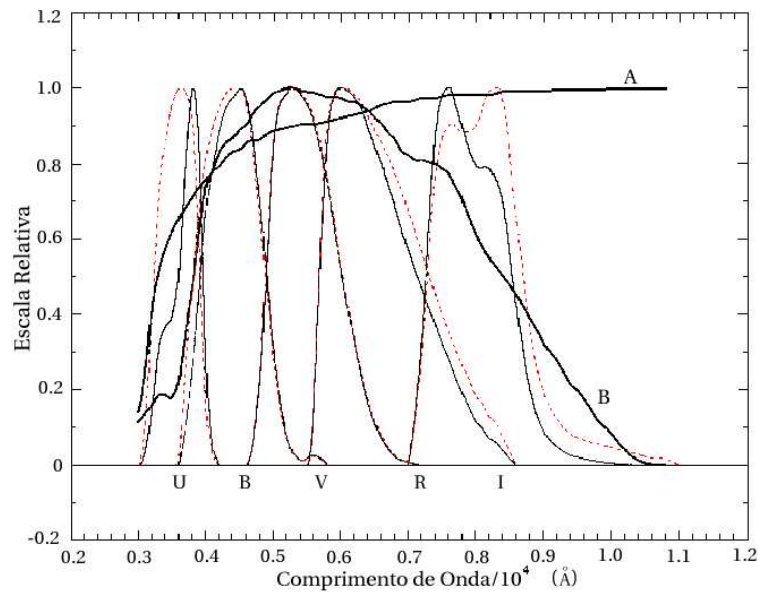


Figura 1.3: Curvas de transmissão dos filtros UBVRI: as curvas tracejadas são do sistema fotométrico padrão e as curvas contínuas são do sistema fotométrico utilizado nas observações. (A) Curva de extinção atmosférica do sítio do ESO, Chile. (B) Curva da eficiência quântica do CCD. Todas as curvas foram normalizadas em 1.

para determinar o centro dos aglomerados e faremos uma discussão sobre o efeito do erro na centragem dos objetos. Explicaremos como foi realizada a fotometria superficial para as imagens obtidas na banda V, como foram removidas estrelas não pertencentes aos objetos, como foi propagado o erro da fotometria e como foram obtidos os parâmetros estruturais dos objetos a partir do ajuste dos perfis de brilho superficial.

Com a realização da fotometria construiremos perfis de brilho superficial que são apresentados no capítulo 4. Realizaremos uma estimativa da massa e luminosidade dos aglomerados utilizando os parâmetros estruturais obtidos anteriormente. Como para todos os aglomerados estudados nesse trabalho, com exceção do aglomerado NGC 1978, têm perfis de brilho superficial publicados, estimativas dos parâmetros estruturais, das massas e luminosidades, principalmente nos quatro grandes estudos de Mackey & Gilmore (2003a), Mackey & Gilmore (2003b), Kontizas & Kontizas (1983) e Chun (1978), apresentaremos uma comparação dos nossos resultados com os obtidos por esses autores.

Finalmente, no capítulo 5 relataremos nossas conclusões e perspectivas futuras.

Capítulo 2

Observação e Redução dos Dados

Os dados utilizados neste trabalho foram observados por A. A. Schmidt e constam de treze aglomerados de estrelas da Pequena Nuvem (L10, L54, L59, L85, L96) e da Grande Nuvem de Magalhães (NGC 1818, NGC 1866, NGC 1868, NGC 1978, NGC 2157, NGC 2213, NGC 2214, H11). As imagens destes aglomerados na banda V são apresentadas no Apêndice A. A utilização destes dados se deve ao fato de que as Nuvens de Magalhães são galáxias extremamente ricas em aglomerados estelares em uma ampla faixa de idade e composição química e estes, por sua vez, se destacam como uma importante fonte de dados observacionais para a confrontação com teorias de formação e evolução de estrelas e sistemas de estrelas. A Tabela 2.1 apresenta identificações dos aglomerados, suas coordenadas equatoriais (ascensão reta RA e declinação DEC) no ano 2000 e o parâmetro de idade s , que é diretamente proporcional à idade do objeto (Elson & Fall, 1985).

2.1 Observação dos dados

As observações foram realizadas nas noites de 16 a 20 de novembro de 1990, no *European Southern Observatory* (ESO), La Silla, Chile, utilizando o telescópio dinamarquês de 1.54 m de diâmetro com $f/8.46$ que fornece uma escala de $15.83''/\text{mm}$. O detector utilizado foi o CCD RCA (SID 501 EX, ESO # 5) de 320×512 pixels, com ganho de $12.278 e^-/\text{ADU}$ e ruído de leitura de 2.54 ADU. A escala das imagens é de $0.4749''\text{pxl}^{-1}$ em um campo total de 15.6×9.8 mm. Foram tomadas exposições de *bias* no início de cada noite, seguidas de *flat-field* para cada um dos filtros e *dark current* no final de cada noite de observação. Para a calibração em fluxo foram observadas as estrelas padrão das regiões-E de Graham (1982). As imagens foram obtidas utilizando filtros U, B, V, R, I do sistema fotométrico Johnson-Cousins.

Tabela 2.1: Identificação, coordenadas e parâmetro de idade dos aglomerados

Identificação	RA (2000)	DEC (2000)	s^a
L10 (NGC 121)	00 ^h 26 ^m 47 ^s	-71° 32' 20"	47
L54 (NGC 330)	00 ^h 56 ^m 19 ^s	-72° 27' 50"	19
L59 (NGC 339)	00 ^h 57 ^m 45 ^s	-74° 28' 21"	49
L85 (NGC 419)	01 ^h 08 ^m 20 ^s	-72° 53' 02"	38
L96 (NGC 458)	01 ^h 14 ^m 54 ^s	-71° 32' 57"	25
NGC 1818	05 ^h 04 ^m 14 ^s	-66° 26' 06"	18
NGC 1866	05 ^h 13 ^m 39 ^s	-65° 27' 54"	27
NGC 1868	05 ^h 14 ^m 36 ^s	-63° 57' 18"	33
NGC 1978	05 ^h 28 ^m 45 ^s	-66° 14' 02"	45
NGC 2157	05 ^h 32 ^m 19 ^s	-67° 31' 20"	25
NGC 2213	06 ^h 10 ^m 42 ^s	-71° 32' 42"	39
NGC 2214	06 ^h 12 ^m 57 ^s	-68° 15' 36"	22
H11 (SL 868)	06 ^h 14 ^m 22 ^s	-69° 50' 54"	51

^a Elson & Fall (1985)

O *seeing*¹ das imagens variou entre 1.2" e 2.7". A Tabela 2.2 lista os tempos de exposição das imagens e o *seeing* medido.

2.2 Dados da literatura

As informações sobre nomenclatura e posição dos aglomerados, listadas na Tabela 2.1, foram obtidas do *Simbad Astronomical Database* (<http://simbad.u-strasbg.fr>).

Para complementar as informações sobre nossos objetos, realizamos uma pesquisa na literatura para obter valores de idade e metalicidade² dos aglomerados. As estimativas de idade encontradas foram obtidas, em sua maior parte, por meio de análises de diagramas cor-magnitude. Já no caso das metalicidades grande parte foi obtida por espectroscopia de linhas.

Na Tabela 2.3 listamos as idades e metalicidades obtidas da literatura para os treze aglomerados, juntamente com as referências bibliográficas. Analisando a relação idade-metalicidade dos objetos – apresentada na Figura 2.1 – percebemos que a maior parte dos nossos dados são aglomerados jovens, estando numa faixa de idade que varia de 0.01 a 3.0 Giga-anos. Entretanto, faz parte da nossa amostra o

¹O *seeing* é uma deformação da imagem, provocada pela turbulência atmosférica. Seu valor pode ser estimado como sendo a largura a meia altura no perfil Gaussiano de uma estrela.

²Metalicidade é uma medida da abundância relativa de elementos mais pesados que o hidrogênio e o hélio.

Tabela 2.2: Tempos de exposição das imagens e *seeing* medido

Identificação	Tempo total de exposição (s)					<i>Seeing</i> (")				
	U	B	V	R	I	U	B	V	R	I
SMC										
L10 (NGC 121)	900	900	360	240	120	2.2	1.8	1.6	1.6	1.4
L54 (NGC 330)	180	200	100	120	45	1.7	1.6	1.5	1.3	1.3
L59 (NGC 339)	1080	480	180	180	180	2.0	2.1	1.9	1.9	1.7
L85 (NGC 419)	—	—	120	120	60	—	—	1.9	1.8	1.5
L96 (NGC 458)	480	240	240	120	65	1.7	1.5	1.6	1.3	1.2
LMC										
NGC 1818	270	—	10	10	10	1.7	—	1.6	1.5	1.4
NGC 1866	610	60	30	30	30	2.1	2.0	1.8	1.9	1.5
NGC 1868	480	180	120	120	60	2.2	2.0	1.8	1.8	1.9
NGC 1978	720	480	160	40	40	1.6	1.6	1.5	2.0	1.4
NGC 2157	120	180	120	100	60	2.1	2.1	2.1	2.2	2.1
NGC 2213	720	360	120	80	40	1.6	1.9	2.2	2.2	2.3
NGC 2214	480	90	50	50	50	2.0	1.9	1.8	1.6	1.6
H11 (SL 868)	—	—	120	60	60	—	—	2.2	2.7	1.9

aglomerado H11, que foi classificado por Elson & Fall (1988) e Girardi et al. (1995) como sendo um dos mais antigos aglomerados globulares. Já o estudo realizado por Mighell et al. (1996) estabeleceu H11 como sendo o mais antigo aglomerado globular das Nuvens de Magalhães.

2.3 Redução dos dados

Os dados apresentados neste trabalho passaram pelas rotinas padrão de redução de dados de detectores CCD, que tem por objetivo eliminar os efeitos instrumentais e atmosféricos.

Procedimentos de redução, como subtração do *bias*, subtração do *dark current* e divisão por *flat-field* foram feitos por A. A. Schmidt, em 1991, utilizando o sistema IHAP, *Image Handling And Processing* (Middelburg, 1980).

- Subtração do *bias*

O *bias* (corrente de viés) é uma carga residual artificialmente adicionada ao CCD e pode ser obtida expondo este à luz durante um intervalo de tempo quase nulo a fim de determinar um nível zero das contagens de fótons para uma dada observação. Esta medida foi subtraída de todas as imagens.

Tabela 2.3: Idade e metalicidade dos aglomerados observados

Identificação	Idade (Gyr)	Ref.	Metalicidade [Fe/H]	Ref.
L10 (NGC 121)	11.90 ± 1.30	3	-1.71 ± 0.10	3
L54 (NGC 330)	0.025 ± 0.015	1	-0.82 ± 0.11	9
L59 (NGC 339)	6.30 ± 1.30	3	-1.50 ± 0.14	3
L85 (NGC 419)	1.20 ± 0.50	2	-0.60 ± 0.21	7
L96 (NGC 458)	0.05 ± 0.01	5, 14	-0.23 ± 0.25	1
NGC 1818	0.017 ± 0.001	5	-0.80 ± 0.20	6, 11
NGC 1866	0.086 ± 0.005	15	-0.50 ± 0.10	4
NGC 1868	0.33 ± 0.03	5	-0.50 ± 0.20	12
NGC 1978	2.50 ± 0.50	10	-0.60 ± 0.21	7
NGC 2157	0.03 ± 0.02	5	-0.60 ± 0.30	8
NGC 2213	1.3 ± 0.50	13	-0.40 ± 0.15	17
NGC 2214	0.04 ± 0.01	5	-1.20 ± 0.20	8
H11 (SL 868)	15 ± 03	16	-2.06 ± 0.20	12

Lista de referências: (1) Da Costa & Hatzidimitriou (1998); (2) Durand et al. (1984); (3) Mighell et al. (1998); (4) Hill et al. (2000); (5) Hodge (1983); (6) Will et al. (1995); (7) De Freitas Pacheco et al. (1998); (8) Richtler & Nelles (1983); (9) Hill (1999); (10) Sagar & Pandey (1989); (11) Richtler et al. (1989); (12) Olszewski et al. (1991); (13) Da Costa et al. (1985); (14) Alvarado et al. (1995); (15) Becker & Mathews (1983); (16) Mighell et al. (1996); (17) Geisler (1987).

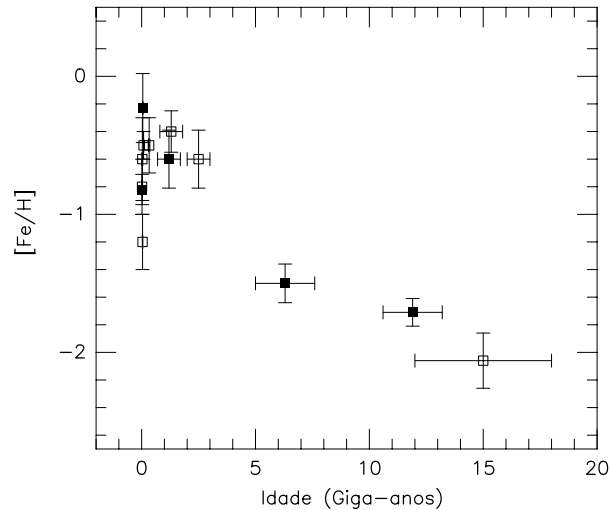


Figura 2.1: Relação idade-metalicidade dos aglomerados observados. Os pontos indicados por quadrados sólidos representam os aglomerados da Pequena Nuvem de Magalhães e os pontos indicados por quadrados vasados, os aglomerados da Grande Nuvem de Magalhães.

- Subtração do *dark current*

O *dark current* (corrente escura) é um ruído registrado pelo detector com o obturador fechado durante um tempo de exposição comparável ao tempo de observação dos objetos. A origem deste ruído é a radiação emitida pelo ambiente incluindo os próprios instrumentos de observação. Assim como o *bias*, o *dark current* foi subtraído de todas as outras imagens, exceto do próprio *bias*.

- Divisão por *flat-field*

O *flat-field* (campo plano) é um tipo de imagem obtido expondo o CCD a uma fonte de luz branca homogênea a fim de determinar a variação pixel a pixel da sensibilidade do mesmo. Neste caso, as contagens de cada imagem foram divididas pelas contagens do *flat-field* obtendo-se então uma resposta linear do CCD.

- Correção dos pixels defeituosos

Utilizando o software de processamento de dados IRAF (*Image Reduction and Analysis Facility*), fizemos uma análise estatística dos pixels das imagens com a tarefa *imstat* e notamos que muitas imagens apresentavam pixels com valores negativos. Para removê-los, inicialmente convertemos as imagens do formato FITS para o formato IRAF, utilizando a tarefa *rfits*, em seguida, usamos a tarefa *imexpr* que gera um arquivo de saída para cada imagem, o qual armazena os pixels defeituosos destas. Estes arquivos de saída são usados pela tarefa *fxpix* que faz uma interpolação linear ao longo das linhas ou colunas utilizando os pixels não defeituosos mais próximos. Feito isso, convertemos novamente as imagens IRAF para o formato FITS com a tarefa *wfits*.

2.4 Correção por extinção atmosférica

As medidas dos fluxos de radiação são afetadas pela atmosfera da Terra, de maneira que o brilho das estrelas é atenuado. Os efeitos do espalhamento e absorção da radiação são representados por coeficientes de extinção, obtidos através da convolução da curva de extinção do sítio do ESO, Chile e da distribuição de energia padrão das estrelas do Catálogo Espectral Vilnius (Straizys & Sviderskiene, 1972).

Já que um aglomerado possui estrelas de diferentes tipos espectrais, foi feita uma média dos coeficientes de extinção de estrelas de vários tipos espectrais para cada

banda. Os coeficientes de extinção e o erro correspondente obtidos estão listados na Tabela 2.4.

Para fazer a correção por extinção subtraímos da magnitude instrumental medida (m_i) a parcela que corresponde à fração do fluxo atenuado pela atmosfera numa determinada banda. Este fator é dado pelo produto do coeficiente de extinção (k) nesta banda pela massa de ar (x) da observação. Portanto,

$$m_i^c = m_i - kx. \quad (2.1)$$

Tabela 2.4: Filtro, identificação e coeficiente de extinção

Banda	Filtro (ESO n°)	k (magnitude/massa de ar)
U	571	0.42218 ± 0.00553
B	450	0.20703 ± 0.00433
V	451	0.11065 ± 0.00093
R	452	0.06511 ± 0.00149
I	461	0.02017 ± 0.00015

2.5 Calibração fotométrica

A finalidade da calibração fotométrica é transformar as medidas instrumentais para o sistema fotométrico padrão, expresso em magnitudes. No presente trabalho foram utilizadas dez estrelas padrão das regiões-E de Graham (1982), listadas na Tabela 2.5, observadas em conjunto com os aglomerados estelares. As curvas de calibração fotométrica foram ajustadas utilizando o sistema de mínimos quadrados GaussFit³ (Jefferys et al., 1988), que possibilita a inclusão dos erros tanto para a variável dependente (magnitude calibrada) quanto para a variável independente (magnitude instrumental observada).

Para obter as curvas de calibração inicialmente criamos arquivos de entrada necessários para estabelecer o problema do ajuste ao GaussFit. Os dados de entrada listam as magnitudes instrumental e aparente das estrelas padrão. Os outros arquivos especificam detalhes tais como: as aproximações iniciais dos parâmetros a serem ajustados (os coeficientes angular e linear da calibração), número de iterações

³O GaussFit é um sistema de regressão que foi desenvolvido como uma plataforma para facilitar a solução de mínimos quadrados e problemas de estimação robusta para redução de dados astrométricos.

Tabela 2.5: Estrelas padrão das regiões-E (Graham, 1982) utilizadas para calibração¹

Estrela	V	$U - B$	$B - V$	$V - R$	$R - I$
E1-35-R	9.471 [07]	1.679 [08]	1.427 [05]	0.777 [05]	0.722 [05]
E1-20-Q	9.855 [08]	0.275 [09]	0.736 [08]	0.402 [04]	0.387 [05]
E1-49-V	11.640 [17]	0.019 [09]	0.564 [13]	0.332 [10]	0.327 [14]
E2-4-F	8.190 [05]	0.157 [05]	0.127 [02]	0.061 [03]	0.067 [03]
E2-34-Q	8.771 [07]	0.834 [04]	1.007 [05]	0.543 [03]	0.488 [03]
E3-49798	8.279 [07]	-1.169 [14]	-0.289 [06]	-0.115 [02]	-0.147 [04]
E3-33-T	10.053 [03]	1.116 [08]	1.158 [06]	0.580 [05]	0.520 [04]
E3-55-R	10.659 [04]	0.003 [09]	0.058 [06]	0.014 [05]	0.025 [01]
E3-38-S	9.526 [09]	1.597 [25]	1.386 [09]	0.737 [06]	0.689 [09]
E9-G	12.698 [11]	0.680 [24]	0.894 [16]	0.509 [16]	0.424 [07]

¹O erro entre colchetes está expresso em unidades de milésimos de magnitude.

e critério de convergência, o método de redução a ser usado e a equação que iremos ajustar aos dados. De posse destes arquivos é feita a execução do GaussFit.

As curvas de calibração, ou seja, a relação entre as magnitudes padrão m_0 e instrumental m_i^c é obtida assumindo-se uma transformação linear entre m_i^c e m_0 :

$$m_o = \alpha m_i^c + \beta, \quad (2.2)$$

sendo que α é o coeficiente angular da transformação e β , o coeficiente linear. Os valores dos coeficientes obtidos nesse trabalho estão listados na Tabela 2.6, juntamente com seu erro, além de S e S_{xx} (ver Equações 2.4 e 2.5).

Tabela 2.6: Filtros, coeficientes angular e linear da calibração, S e S_{xx} .

Filtros	$\alpha \pm \sigma_\alpha$	$\beta \pm \sigma_\beta$	S	S_{xx}
U	1.0144 ± 0.0220	18.9820 ± 0.1834	0.12704	41.48248
B	1.0367 ± 0.0139	21.9395 ± 0.1549	0.11862	23.99484
V	0.9984 ± 0.0061	21.9063 ± 0.0744	0.02566	18.76767
R	0.9980 ± 0.0086	21.8417 ± 0.0111	0.05882	18.21067
I	0.9931 ± 0.0029	20.7466 ± 0.0358	0.03185	18.94212

Como utilizamos os filtros bastante similares aos do sistema fotométrico Johnson-Cousins original, consideramos desnecessário fazer a correção por cor na calibração fotométrica. Analisando também os resíduos do ajuste, que serão apresentados na próxima seção, notamos que esses não apresentaram efeitos sistemáticos, justificando assim nossa abordagem.

Nas Figuras (2.2), (2.3) e (2.4) apresentamos as curvas de calibração fotométrica

para os filtros UBVRI. Juntamente com as curvas dos intervalos de confiança do ajuste linear de 66% (que equivale a 1 desvio-padrão) e 95%, apresentamos os resíduos do ajuste.

2.5.1 Erro da calibração e intervalos de confiança

Para obter o erro da calibração $\sigma_{calib}(m_i)$ para uma dada magnitude instrumental m_i consideramos inicialmente o erro do ajuste, que é dado pela seguinte equação:

$$\sigma_{calib}(m_i) = t_{\theta/2} S \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(m_i - \bar{m}_i)^2}{S_{xx}}}, \quad (2.3)$$

n é o número de pontos, S é o desvio padrão do ajuste, dado por:

$$S = \sqrt{\frac{S_{yy} - S_{xy}^2/S_{xx}}{n - 2}}, \quad (2.4)$$

sendo que

$$\begin{aligned} S_{xx} &= \sum (m_i - \bar{m}_i)^2 \\ S_{yy} &= \sum (m_o - \bar{m}_o)^2 \\ S_{xy} &= \sum (m_i - \bar{m}_i)(m_o - \bar{m}_o). \end{aligned} \quad (2.5)$$

Para um intervalo de confiança de $100(1 - \theta)\%$, o valor de $t_{\theta/2}$ é obtido da distribuição t de Student (Mendenhall et al., 1986), dado pela tabela abaixo.

Tabela 2.7: Distribuição t de Student

n	$t_{\theta/2}$	
	$\theta = 0.05$	$\theta = 0.34$
09	2.262	1
10	2.228	1
11	2.201	1

Para a banda V, por exemplo, a estimativa de erro da magnitude foi obtida da Equação 2.3 com $t_{\theta/2} = 1$, correspondendo a um intervalo de confiança de 66% e um erro médio de 0.008 mag. Já o erro estimado para a banda U, com $n = 10$, foi de 0.040 mag; para a banda B, com $n = 9$, erro de 0.039 mag e para as bandas R e I, ambas com $n = 9$, estimamos erros de 0.018 mag e 0.010 mag, respectivamente.

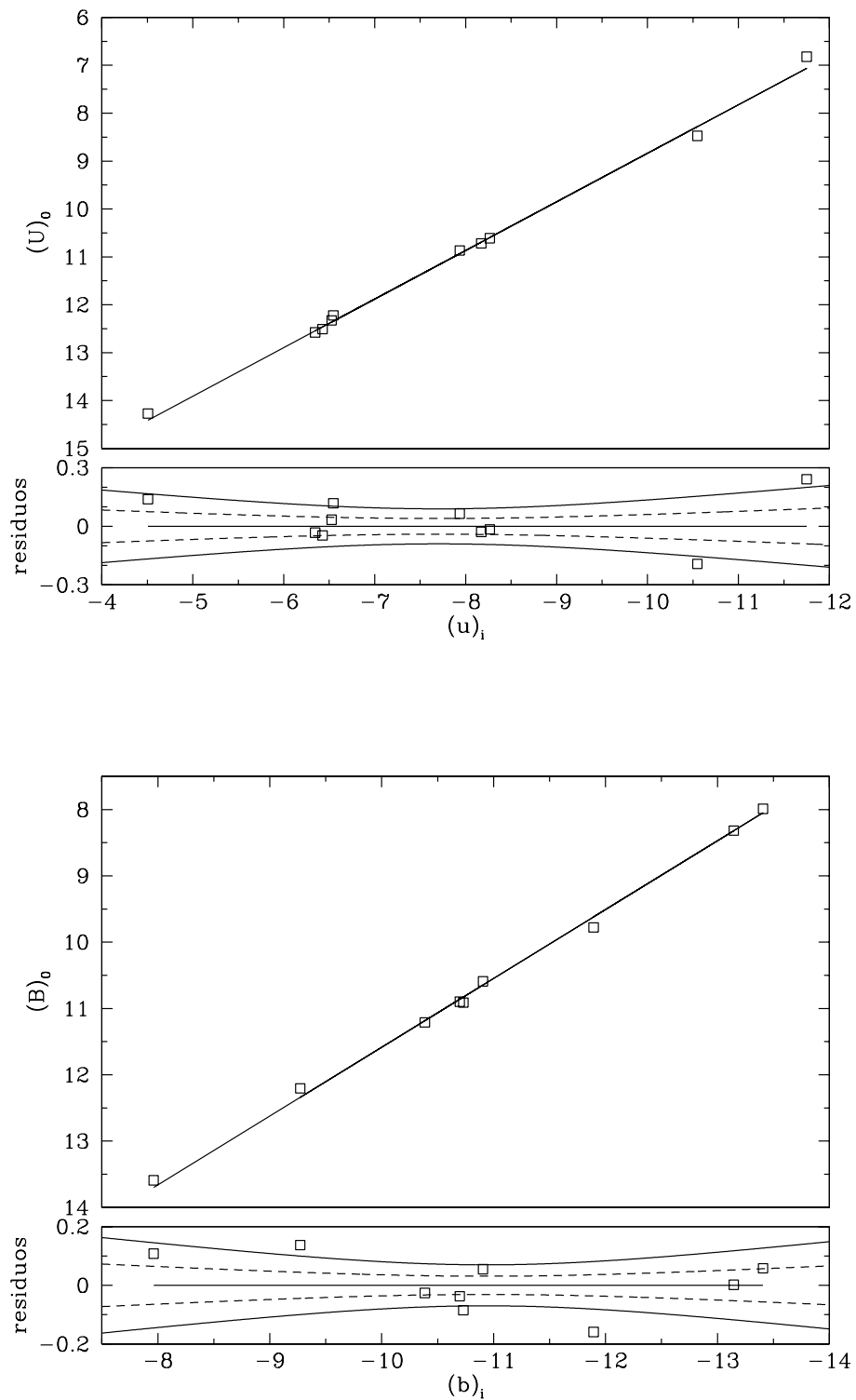


Figura 2.2: Curvas de calibração fotométrica com os respectivos resíduos para as bandas U e B. A linha contínua corresponde ao intervalo de confiança de 95% e a linha tracejada corresponde ao intervalo de confiança de 66%.

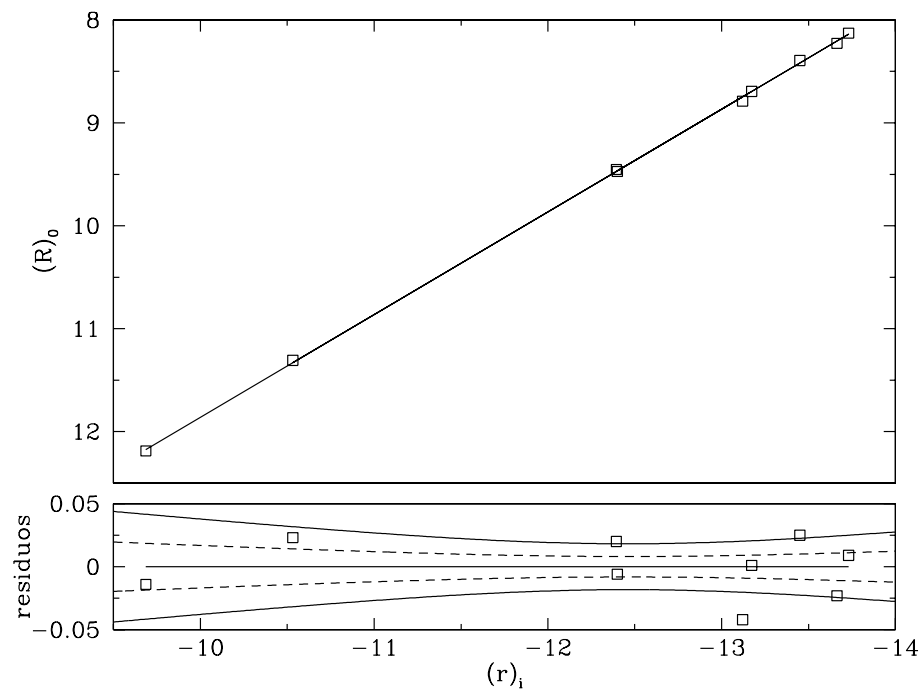
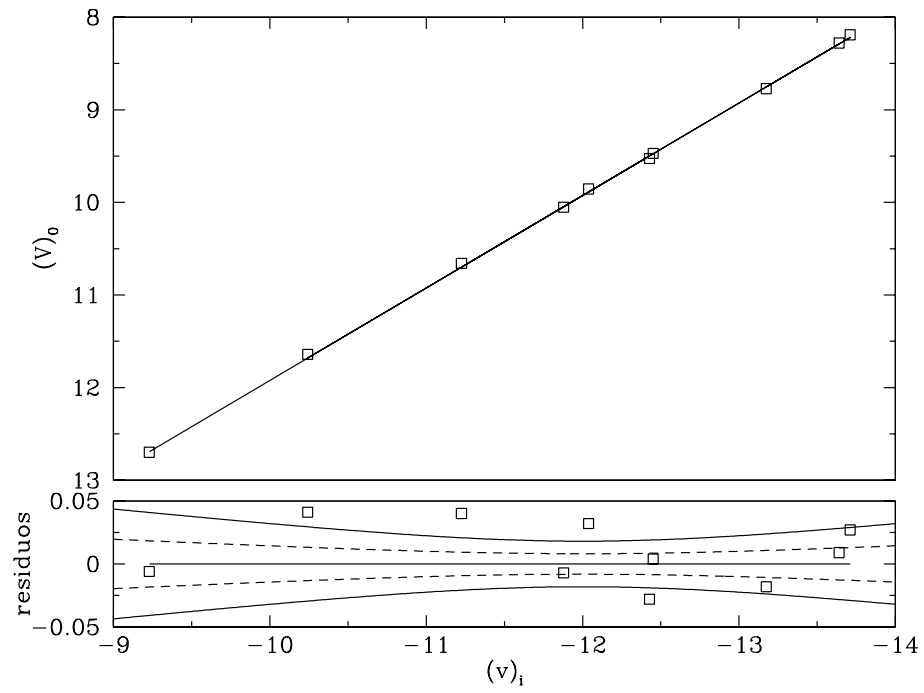


Figura 2.3: Mesmo que para Figura 2.2 para as bandas V e R.

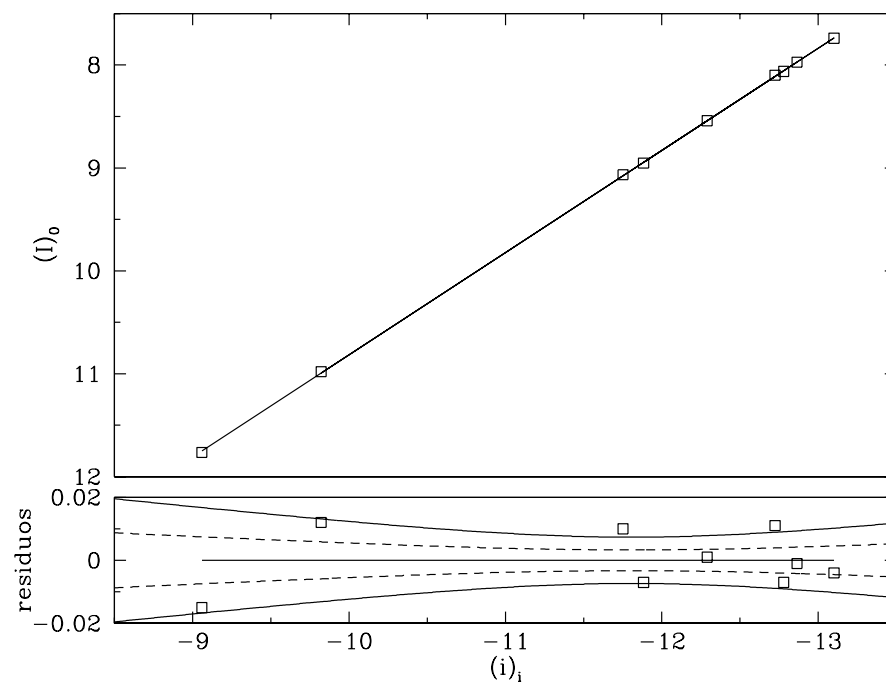


Figura 2.4: Mesmo que para Figura 2.2 para a banda I.