

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
RAPHAEL AUGUSTO PEREIRA DE OLIVEIRA**

ESTUDO FOTOMÉTRICO DE JOVENS AGLOMERADOS ESTELARES

**PORTO ALEGRE
2016**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
RAPHAEL AUGUSTO PEREIRA DE OLIVEIRA

ESTUDO FOTOMÉTRICO DE JOVENS AGLOMERADOS ESTELARES

Monografia apresentada ao Instituto de Física - IF/UFRGS, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Física: Astrofísica, sob orientação do Prof. Dr. Eduardo Luiz Damiani Bica.

PORTO ALEGRE
2016

Agradecimentos

Aos meus pais e família, pelo apoio incondicional, por me ajudarem a realizar meus sonhos e por sempre acreditarem em mim.

À minha namorada, Gabrielle, por me completar e me fazer tão feliz.

Aos meus amigos: aos de Porto Alegre, que conheci desde o primeiro ano de faculdade, grandes companhias que nunca me deixaram sentir sozinho, mesmo a 1000 km de casa; aos de Sorocaba, eternos amigos que sempre me receberam de braços abertos nestes anos.

Ao Prof. Dr. Eduardo Bica, pela gratificante orientação de TCC e IC, essencial para o meu desenvolvimento científico. Ao Prof. Dr. Charles Bonatto, pela co-orientação e pelas contribuições computacionais.

A todos os professores que contribuíram para a minha formação, desde a Prof^a Malvina que me ensinou a ler e escrever, até os professores da faculdade, por exercerem a mais bonita de todas as profissões. De modo especial, agradeço ao Prof. Lincoln, meu professor de Física do Ensino Médio e grande amigo, que me guiou e me iniciou no mundo da ciência, na Olimpíada Brasileira de Astronomia e no XXVI Encontro Regional de Ensino de Astronomia.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pela boa infra-estrutura proporcionada aos alunos e pela excelência em ensino e pesquisa.

RESUMO

No presente estudo analisa-se uma amostra de sobredensidades estelares encontradas dentro e próximo ao complexo de Carina. Localizado no braço espiral de Sagitário-Carina, a uma distância no domínio entre 2.0 e 3.1 kpc do Sol, é uma região de intensa e contínua formação estelar, envolvendo nebulosas e vários aglomerados embebidos e abertos já catalogados (tais como Trumpler 14, NGC 3324 e Trumpler 16, este último contendo WR 25 e η Carinae, duas das estrelas mais luminosas conhecidas na Via Láctea). Este estudo se baseia nos dados fotométricos do *Two Micron All-Sky Survey* e envolve a descontaminação da fotometria por estrelas de campo, elaboração de diagramas cor-magnitude intrínsecos $J \times (J-K_s)$, diagramas cor-cor $(J-H) \times (H-K_s)$ e perfis de densidade radial, para determinar a estrutura e os principais parâmetros astrofísicos dos melhores candidatos e para verificar se eles são, de fato, aglomerados embebidos. Os resultados, de modo geral, foram muito bons: em uma amostra de 101 sobredensidades encontradas, a pesquisa forneceu 15 melhores candidatos, dos quais três já eram catalogados na literatura (CCCP-C1 16, Treasure Chest e FSR 1555); os 12 restantes são descobertas que resultaram em idades abaixo de 4 Myr e distâncias compatíveis com a distância do complexo estudado, exceto por um dos candidatos. Os valores obtidos para o avermelhamento diferencial foram relativamente elevados, confirmando que se tratam de aglomerados ainda embebidos em gás e poeira. A aplicação da fotometria 2MASS foi, portanto, extremamente útil, uma vez que a radiação infravermelha é capaz de atravessar densas regiões sem sofrer tanta absorção ou espalhamento. Histogramas com a distribuição das massas, idades e distâncias também foram produzidos, para dar uma visão geral dos resultados. Concluiu-se que 11 dos novos aglomerados embebidos encontrados pertencem ao complexo de Carina.

Palavras-chave: fotometria, aglomerados embebidos, sobredensidades.

ABSTRACT

In this research we analyze a sample of stellar overdensities found on and nearby the Carina complex. Located in the Carina-Sagittarius Arm, at a distance between 2.0 and 3.1 kpc from the Sun, it is a region of intense and ongoing star formation, containing nebulae and several embedded and open clusters already catalogued (such as Trumpler 14, NGC 3324 and Trumpler 16, the latter hosting the stars Eta Carinae and WR 25, two of the most luminous stars in the Milky Way). This photometric study is based on Two Micron All-Sky Survey (2MASS) photometric data and involves the photometry decontamination of field stars, elaboration of intrinsic color-magnitude diagrams $J \times (J-K_S)$, color-color diagrams $(J-H) \times (H-K_S)$ and radial density profiles, in order to determine the structure and the main astrophysical parameters of the best candidates, and to verify if they are, in fact, embedded clusters. The results were, in general, rewarding: in a sample of 101 overdensities found, the research returned 15 best candidates, of which three were previously catalogued (CCCP-C116, Treasure Chest and FSR 1555), and the 12 remaining are discoveries that provided good results, with ages not beyond 4 Myr and distances compatible with the distance of the studied complex, except for one candidate. The resulting values for the differential reddening of most candidates were relatively high, confirming that these clusters are still (partially or fully) embedded in the surrounding gas and dust. In this perspective, the 2MASS photometry was extremely useful, since the infrared radiation can penetrate these dense regions without being much absorbed. Histograms with the distribution of the masses, ages and distances were also produced, to give an overview of the achieved results. We conclude that the 11 newly found embedded clusters belong to the Carina complex; the one remaining is a foreground cluster.

Keywords: photometry, embedded clusters, overdensities.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	6
1.1 Aglomerados estelares	6
1.2 Aglomerados embebidos	7
1.3 <i>Two Micron All-Sky Survey</i> (2MASS).....	8
1.4 Complexo de η Carinae	9
1.5 Objetivos e estrutura do trabalho	10
2. METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO	11
2.1 Busca de sobredensidades.....	11
2.2 Descontaminação por estrelas de campo	13
2.3 CMD, isócronas PARSEC e determinação dos parâmetros	15
2.3.1 Unicidade da solução	15
2.3.2 Parâmetros da simulação	16
2.3.3 Diagrama Cor-Magnitude (CMD)	17
2.4 Diagrama Cor-Cor (DCC)	19
2.5 Perfil de Densidade Radial (RDP).....	19
3. RESULTADOS	20
4. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	36
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37

1. INTRODUÇÃO

A expressiva maioria das estrelas não se forma isolada no meio interestelar, mas em grupos e aglomerados embebidos (70 – 90%, segundo Lada & Lada, 2003) dentro das regiões mais densas de nuvens moleculares gigantes (GMCs). Mais especificamente, as estrelas se formam pelo colapso gravitacional das flutuações de alta densidade no gás molecular das GMCs, geradas por movimentos turbulentos supersônicos, criando assim uma estrutura não-uniforme com diferentes densidades.

Essa estrutura fragmenta-se em densos *clumps* (condensações – nomenclatura utilizada por Williams et al., 2000); o colapso e a fragmentação destes podem dar origem a aglomerados embebidos e à posterior formação estelar. Os colapsos e instabilidades da nuvem são explicados pela teoria da instabilidade de Jeans, que formula as condições na quais ocorrem o colapso gravitacional: uma nuvem sustentada pela pressão térmica colapsa se a sua massa excede a massa de Jeans ($M_J \propto T^{3/2} \rho^{-1/2}$), ou seja, se a pressão interna do gás não é forte o suficiente para contrabalancear a pressão gravitacional.

Com o passar do tempo, os aglomerados se dissolvem ou são destruídos por interação com nuvens moleculares ou interação gravitacional, e os seus membros tornam-se estrelas de campo. As GMCs localizam-se principalmente em regiões de alta densidade estelar, como os braços espirais da Via Láctea. Portanto, as GMCs são berçários de formação estelar, e os aglomerados estelares são blocos básicos de construção das galáxias.

1.1 Aglomerados estelares

Aglomerados estelares são definidos como conjuntos de estrelas ligadas gravitacionalmente e com uma origem comum: se formaram na mesma nuvem de gás e poeira e, portanto, possuem essencialmente a mesma idade, distância e composição química inicial. As estrelas distinguem-se apenas em seu tipo espectral e massa, fator determinante no seu ciclo evolutivo.

Classicamente, são divididos em aglomerados abertos (pouco massivos, com baixa densidade de estrelas e alta metalicidade) e aglomerados globulares (bem mais velhos, com alta densidade de estrelas, e, em geral, deficiência de metais). Os aglomerados abertos (OCs) encontram-se no plano Galáctico, principalmente nos braços espirais, e são importantes traçadores de formação estelar recente e da estrutura espiral da Via Láctea. Os aglomerados globulares (GCs), por sua vez, encontram-se no halo Galáctico e em partes mais centrais, e orbitam o centro da Galáxia.

Entretanto, nas últimas décadas, estabeleceu-se uma nova classe: os aglomerados embebidos (ECs), precursores dos aglomerados abertos. Estes são aglomerados estelares ainda em fase de formação, e que ainda não expeliram o gás residual utilizado em sua formação. Quando estrelas mais massivas (tipos espectrais O e B) são formadas, estas emitem radiação ultravioleta com energia capaz de dissociar o gás molecular remanescente (predominantemente H_2), dando origem a uma região HII, ou seja, nuvens de gás hidrogênio ionizado.

Os ECs encontram-se completamente ou parcialmente imersos na nuvem molecular de origem ou na região HII. Por este motivo, durante sua formação e evolução inicial são muito absorvidos em comprimentos de onda do óptico, sofrendo uma alta extinção visual. O desenvolvimento de potentes detectores no infravermelho possibilitou a exploração do interior de nuvens moleculares, penetrando mais profundamente nas regiões de formação estelar.

1.2 Aglomerados embebidos

Limitações observacionais impediam o estudo dos aglomerados embebidos até algumas décadas atrás, mas novos instrumentos mudaram totalmente esse cenário: câmeras de imageamento no infravermelho próximo ($1 - 3 \mu m$) e espectrômetros em telescópios terrestres, e câmeras no infravermelho médio ($3 - 25 \mu m$) em telescópios espaciais, uma vez que a radiação infravermelha é muito menos afetada pela extinção da poeira interestelar.

Com a pesquisa sistemática dos ECs dentro das nuvens moleculares, reconheceu-se que o estudo desses sistemas aborda problemas astrofísicos fundamentais, tais como: formação e evolução inicial de aglomerados, de estrelas e inclusive de sistemas planetários; a interação com o material estelar ao redor e a evolução dinâmica do aglomerado com a produção de estrelas de campo, culminando, eventualmente, em aglomerados abertos ligados.

Segundo Lada & Lada (2003), a taxa de nascimentos de aglomerados embebidos excede a de aglomerados abertos por mais de uma ordem de magnitude, indicando uma alta taxa de mortalidade infantil ($4 - 7\%$ sobrevivem à emergência da nuvem molecular). Contudo, diferentemente dos OCs ligados gravitacionalmente e dos GCs, os ECs não são objetos isolados: na maioria dos casos, os complexos de nuvem molecular contêm múltiplos ECs, bem como populações distribuídas de estrelas isoladas (Allen et al., 2007).

Como já citado anteriormente, os aglomerados embebidos formam-se na fragmentação das nuvens moleculares em *clumps*, uma vez que, em sua expansão, a região HII é perturbada por diferentes agentes externos (e.g., ondas de densidade dos braços espirais, choques com envelopes de supernovas em expansão). Após sua formação, os ECs interagem fortemente com

sua nuvem progenitora, injetando energia e momentum por diversos mecanismos (e.g., fluxos protoestelares, radiação ionizante das estrelas massivas, ventos estelares) que geram gradientes de pressão na nuvem e expõem o gás e a poeira. Isso cria estruturas de bolhas, dentro das quais o aglomerado finalmente se torna transparente à radiação no visível.

A formação estelar é finalizada quando todo o gás se dispersa. Porém, muitos aglomerados embebidos não sobrevivem à expansão da região HII, pois muito de sua massa está sendo perdida, ou seja, a quantidade de energia liberada por todas as estrelas massivas excede a energia total de ligação do EC. Logo, o destino dos ECs é determinado pela massa de suas estrelas massivas e, principalmente, pela eficiência de formação estelar, definida pela razão entre a massa de seu conteúdo estelar e sua massa total. Essa expulsão do gás residual pode ser muito destrutiva, sendo que os aglomerados sobreviventes podem perder mais de 50% de suas estrelas, no que é chamado em inglês de *infant weight-loss* (Tutukov, 1978).

Outra característica notável de aglomerados jovens é o processo conhecido como segregação de massa. Uma de suas causas é a equipartição de energia, ou seja, durante o encontro de dois membros do aglomerado, a troca de energia e momentum visando a equalização das energias cinéticas ($\propto m \cdot v^2$) faz com que os membros menos massivos ganhem energia orbital, movendo-se para regiões mais afastadas do centro, e com que os mais massivos percam energia orbital, aproximando-se do centro. No entanto, Xinyue, Jiang & Yanning (2012) concluem que este não é um fenômeno tão comum para os ECs, sendo que, quando ocorrem, seria uma característica primordial estabelecida pela formação estelar, assumindo que os efeitos dinâmicos ainda não tiveram tempo significativo para alterar sua estrutura.

Finalmente, os aglomerados que sobrevivem à fase de expulsão do gás primordial, permanecendo ligados gravitacionalmente, tornam-se aglomerados abertos, tais como as Plêiades, Híades, a Caixa de Joias e o M44. Em geral, eles contêm dezenas a poucos milhares de estrelas e, também sujeitos a diversos processos de dissolução, evoluem em escalas de tempo da ordem de 100 milhões de anos (Myr).

1.3 *Two Micron All-Sky Survey (2MASS)*

O 2MASS foi um projeto de pesquisa, conduzido entre 1997 e 2001, e que foi elaborado para aprimorar nosso conhecimento do céu no infravermelho próximo (NIR). O projeto consistiu em varreduras sistemáticas de toda a esfera celeste em três bandas do NIR, com os seguintes filtros: J (1.253 μm), H (1.662 μm) e K_s (2.159 μm), capazes de detectar fontes puntiformes com brilho maior que 1 mJy ($10^{-29} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$).

Para imagear todo o céu, utilizou dois telescópios de 1,3 metros de diâmetro: um deles no Observatório de Cerro Tololo, no Chile, e o outro no Observatório Fred Lawrence Whipple, Arizona (EUA). Produziu-se assim um atlas do céu nas três bandas, incluindo galáxias e aglomerados globulares e inúmeras outras classes. Foram gerados também catálogos de fontes extensas (galáxias e nebulosas) e de fontes puntiformes, sendo este último amplamente utilizado neste trabalho. O catálogo de fontes puntiformes contém dados de mais de 500 milhões de estrelas e galáxias; o de fontes extensas possui 1.6 milhões de galáxias resolvidas e um atlas galáctico (Large Galaxy Atlas) com aproximadamente 600 galáxias próximas e aglomerados globulares.

A radiação infravermelha atravessa densas regiões de gás e poeira (grãos de silicato e carbono) sem sofrer tanta absorção ou espalhamento e, portanto, sua aplicação é fundamental no estudo dos ECs e regiões de formação estelar.

1.4 Complexo de η Carinae

O complexo de η Carinae, objeto de estudo deste trabalho, situa-se no braço espiral de Sagitário-Carina em um domínio de 7 500 a 10 000 anos-luz de distância (≈ 2.3 a 3.07 kpc). Ele contém a Nebulosa Eta Carinae (NGC 3372), região de massiva e contínua formação estelar, com vários aglomerados estelares jovens associados. A estrela Eta Carinae também pertence ao complexo, e consiste num sistema binário de estrelas supermassivas, localizadas no centro de dois lóbulos ejetados numa grande erupção (Damineli et al., 2008). Além de conter uma das mais ricas concentrações de estrelas jovens massivas da Galáxia, a região é rica em filamentos, pilares e cavidades de poeira, indicativos de um histórico turbulento.



Fig. 1: Amplo panorama da Nebulosa de Carina, fotografado em infravermelho, com a câmera HAWK-I do *Very Large Telescope*, do ESO. A brilhante estrela η Carinae aparece no canto inferior esquerdo. O aglomerado Trumpler 14 encontra-se bem ao centro. Dos 15 aglomerados estudados, um deles (Oliveira 1) aparece nessa imagem, a qual tem um campo de visão de $23.24' \times 15.84'$.

1.5 Objetivos e estrutura do trabalho

O presente trabalho tem os seguintes objetivos: (i) a busca por aglomerados embebidos não-catalogados, a partir de sobredensidades encontradas nos dados fotométricos do catálogo 2MASS, na região do complexo de η Carinae; (ii) a aplicação de ferramentas de descontaminação de estrelas de campo, (iii) elaboração de diagramas cor-magnitude (CMDs), (iv) ajuste de isócronas PARSEC, (v) diagramas cor-cor (DCCs) e (vi) perfis de densidade radial (RDPs), com o propósito de determinar os principais parâmetros astrofísicos desses novos aglomerados.

O trabalho estrutura-se da seguinte forma: na seção 2 são apresentadas as metodologias e o desenvolvimento de cada etapa deste estudo fotométrico; na seção seguinte, são expostos os resultados obtidos (CMDs, DCCs e RDPs) juntamente com os parâmetros encontrados para cada aglomerado embebido, e ainda uma análise detalhada dos resultados; e, finalmente, na seção 4, as conclusões e as considerações finais, com uma visão geral da pesquisa.

2. METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO

Nesta seção, destacam-se os métodos utilizados no desenvolvimento desta pesquisa, baseada na fotometria no infravermelho próximo de uma amostra de aglomerados embebidos não-catalogados, descobertos utilizando um programa capaz de detectar sobredensidades. Os programas utilizados foram desenvolvidos pelo Prof. Dr. Charles Bonatto, também do Departamento de Astronomia/UFRGS. Cada etapa da pesquisa é colocada separadamente nas seguintes subseções e explicada detalhadamente.

Inicialmente, os dados fotométricos do catálogo de fontes puntiformes (*2MASS All-Sky Catalog of Point Sources*, Cutri et al. 2003) foram obtidos com a ferramenta Vizier, disponível em <http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR?-source=II/246>. O nome do objeto, para a obtenção dos dados, foi o aglomerado Trumpler 16, com as seguintes coordenadas centrais: ascensão reta $\alpha(J2000) = 10^{\text{h}}45^{\text{m}}10.0^{\text{s}}$ e declinação $\delta(J2000) = -59^{\circ}43'00''$. Sendo este o centro dos dados fotométricos, a dimensão inserida foi um raio de 90 minutos de arco, com o limite máximo de 0.1 mag para a incerteza total de cada magnitude J, H e K_s .

2.1 Busca de sobredensidades

Os dados fotométricos são baixados do Vizier e inseridos no programa de sobredensidades no formato de uma tabela com colunas contendo: (i) a distância entre a estrela e o centro da imagem, (ii) as coordenadas equatoriais e (iii) galácticas, (iv) as magnitudes J, H e K_s e (v) os seus respectivos erros.

O programa monta mapas de densidade e varre-os ponto a ponto, procurando por regiões onde ocorra uma densidade incomum de estrelas, ou seja, uma quantidade de pontos maior do que na região vizinha. Esse excesso de estrelas pode ser um aglomerado real ou simplesmente uma região com mais estrelas do que o normal por um motivo qualquer, i.e., uma flutuação. Os candidatos são listados, juntamente com suas coordenadas e seu tamanho, mas ainda resta saber o quão significativos são esses excessos e se não se trata de uma flutuação.

Para isso, numa suposta amostra de sobredensidades com raios que vão de décimos de minutos de arco até dezenas de minutos de arco, repete-se o seguinte processo: para cada raio são feitos anéis de mesmo tamanho, estes são jogados na imagem em dez mil posições aleatórias e conta-se quantas estrelas são encontradas nesse raio em cada posição; isto é feito para toda uma distribuição de raios e tamanhos, comparando o que se esperava ter de densidade. Fazendo uma amostragem aleatória dos anéis, pode-se fazer um gráfico com a probabilidade de densidade do campo, obtendo a probabilidade de que o candidato possa ser um aglomerado.

O gráfico abaixo é um mapa de densidade estelar, incluindo as 101 sobredensidades de alta probabilidade encontradas neste estudo. No gráfico, o eixo horizontal apresenta a ascensão reta (em graus), o eixo vertical a declinação (em graus) e a cor de fundo mostra a densidade estelar (em estrelas por minuto de arco quadrado); os raios dos círculos pretos correspondem ao raio da sobredensidade, tal como determinado pelo programa. Esse raio não necessariamente corresponde ao raio aplicado ao aglomerado, no restante do estudo fotométrico. Em alguns casos, os raios podem se intersectar ou até mesmo marcar uma mesma sobredensidade.

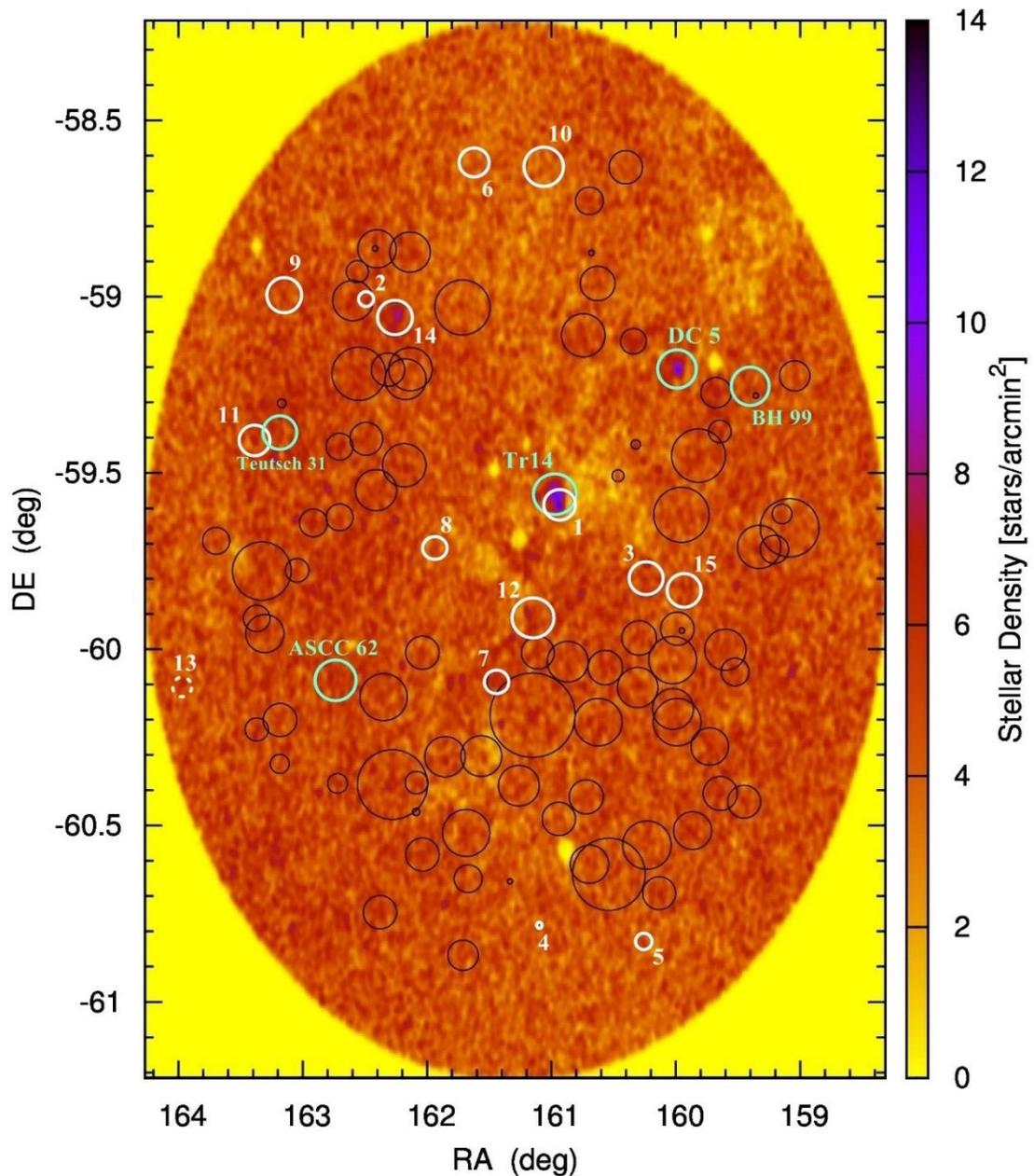


Fig. 2: Mapa de densidade estelar, com as densidades equatoriais das 101 sobredensidades de alta probabilidade encontradas, com os respectivos raios. As quinze sobredensidades selecionadas para análise estão destacadas em branco. Algumas sobredensidades que correspondem a aglomerados já catalogados são destacadas em verde claro, junto com seu nome (de acordo com Dias et al. 2002). A cor ao fundo mostra a densidade superficial de estrelas (em estrelas por minuto de arco quadrado).

#	Asc. Reta α (J2000)	Declinação δ (J2000)	Raio (arcmin)	Número de estrelas	Densid. estelar (arcmin ⁻²)	Probabil. (%)
1	10 ^h 44 ^m 36.3 ^s	-60°11'11''	20.45	895	0.82	98.49
2	10 ^h 49 ^m 6.6 ^s	-60°22'57''	16.89	788	1.41	97.39
3	10 ^h 42 ^m 8.9 ^s	-60°38'15''	17.51	770	1.17	97.27
4	10 ^h 53 ^m 18.7 ^s	-59°46'39''	14.19	533	1.01	94.77
5	10 ^h 36 ^m 20.5 ^s	-59°39'17''	14.19	262	1.30	90.28
6	10 ^h 39 ^m 16.0 ^s	-59°27'1''	12.96	282	1.05	88.90
7	10 ^h 45 ^m 2.8 ^s	-60°23'10''	9.90	308	1.40	88.35
8	10 ^h 44 ^m 36.3 ^s	-59°54'44''	9.78	234	1.93	88.05
9	10 ^h 40 ^m 55.5 ^s	-60°33'15''	11.72	230	1.14	87.66
10	10 ^h 50 ^m 11.4 ^s	-59°13'7''	12.96	369	0.86	87.51
11	10 ^h 48 ^m 43.6 ^s	-59°28'39''	10.49	215	0.80	86.94
12	10 ^h 46 ^m 44.3 ^s	-60°31'12''	11.42	276	0.90	85.95
13	10 ^h 39 ^m 49.0 ^s	-59°37'5''	13.34	245	1.22	85.86
14	10 ^h 37 ^m 36.7 ^s	-59°15'11''	9.08	300	1.41	85.83
15	10 ^h 43 ^m 28.6 ^s	-60°2'4''	9.90	250	1.70	83.66
16	10 ^h 43 ^m 54.0 ^s	-59°33'33''	9.78	240	1.97	83.13
17	10 ^h 46 ^m 51.4 ^s	-59°1'49''	13.34	254	0.85	82.75
18*	10 ^h 46 ^m 29.0 ^s	-58°37'8''	6.79	196	1.36	81.93
19	10 ^h 42 ^m 58.4 ^s	-59°6'35''	10.49	249	0.93	81.51
20	10 ^h 49 ^m 23.7 ^s	-60°8'6''	11.42	178	1.21	81.32

*Esta sobredensidade gerou um aglomerado neste estudo, o Oliveira 10 (seção 3).

Tabela 1: Tabela com as 20 primeiras sobredensidades (de um total de 101) encontradas pelo programa, ordenadas pela probabilidade de ser um aglomerado. As colunas contém as coordenadas equatoriais, o raio, o número de estrelas dentro desse raio e a densidade estelar da sobredensidade encontrada.

Este método de busca levou à identificação de 15 aglomerados estelares (seção 3), sendo 12 destes descobertos no presente estudo.

2.2 Descontaminação por estrelas de campo

A descontaminação da fotometria por estrelas de campo de aglomerados estelares projetados na direção de densos campos de estrelas é fundamental, para que se possa obter a fotometria intrínseca e os parâmetros estruturais desses aglomerados. Desde Bonatto & Bica (2007), um algoritmo baseado nos dados fotométricos do 2MASS, utilizando a magnitude J, as cores (J-H) e (J-K_s) e as respectivas incertezas, é bastante utilizado. Ele se resume a três passos: dividir o CMD em uma grade 3D (com células J, (J-H) e (J-K_s)); estimar a densidade de estrelas de campo em cada célula, comparando o número de estrelas de campo com magnitudes e cores similares às da célula; e subtrair o número de estrelas de campo em cada célula.

No entanto, um novo algoritmo, mais simples e eficiente, foi desenvolvido pelo Prof. Dr. Charles Bonatto, no qual são aplicados diagramas de Hess na descontaminação. Diferentemente do CMD, que é discreto, utilizando simplesmente os pontos e suas barras de erro (o ponto no CMD representa a maior probabilidade da medida, o centro da gaussiana, e a barra de erro reflete o 1σ , significando que há $\sim 68\%$ de probabilidade de a medida se encontrar dentro dessas barras de erro); o diagrama de Hess leva em conta a probabilidade de todos os pontos e espalha o CMD gaussianamente, dando a probabilidade como uma gaussiana que se espalha por todo o diagrama, como se fosse uma única medição.

Desse modo, o diagrama de Hess traça a densidade relativa de estrelas em um diagrama cor-magnitude. O algoritmo de descontaminação funciona da seguinte maneira: seleciona-se o raio do aglomerado e a região do campo de comparação como *input* (com dados fotométricos também baixados no Vizier, mas centrados no candidato a aglomerado), o programa produz um diagrama de Hess do aglomerado, extrai o campo e produz um diagrama de Hess do campo; normaliza pelas áreas, para que a densidade seja equivalente; e subtrai um diagrama de Hess do outro, obtendo assim uma densidade de probabilidade intrínseca do aglomerado.

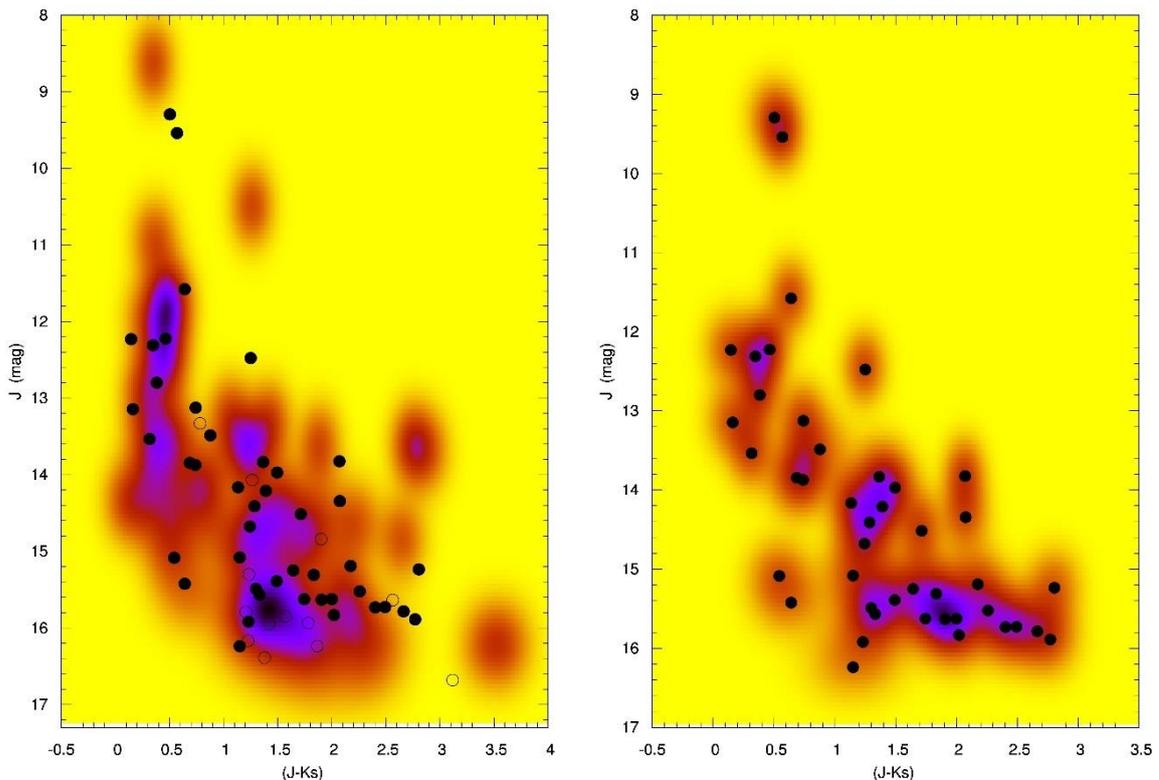


Fig. 3: Exemplo ilustrando a descontaminação de um dos candidatos da amostra (Oliveira 1). À esquerda, temos o diagrama de Hess do campo ao fundo; os pontos vazios são as estrelas excluídas e os pontos preenchidos são as estrelas descontaminadas. À direita, temos o diagrama de Hess das estrelas descontaminadas ao fundo; e os pontos superpostos são as próprias estrelas descontaminadas (assim como no diagrama à esquerda).

2.3 CMD, isócronas PARSEC e determinação dos parâmetros

A descontaminação da fotometria por estrelas de campo (não-membros) é essencial para revelar a morfologia intrínseca do CMD dos aglomerados embebidos do presente estudo. Feita a descontaminação, uma nova tabela de dados é gerada com as estrelas descontaminadas, com colunas contendo a distância da estrela ao centro da imagem, as coordenadas equatoriais, as três magnitudes (J, H e K_s) e seus erros, e os três índices de cor (J-H), (J- K_s) e (H- K_s) com os respectivos erros. Esses são os dados necessários para construir um CMD descontaminado.

O terceiro programa, também em linguagem Fortran, utiliza-os como entrada e permite que sejam inseridos limites (mínimo e máximo) nos seis parâmetros da simulação: massa intrínseca do aglomerado, idade em milhões de anos, módulo de distância, excesso de cor, avermelhamento diferencial (ajustado por uma gaussiana) e dispersão no avermelhamento. É necessário inserir também se é assumido que as estrelas do aglomerado se formaram em um instante único ou se a formação estelar se espalha por todo o intervalo de tempo até a sua idade (espalhamento de formação estelar – *Star-Formation Spread*); se a taxa de formação estelar é uniforme ou decai linearmente com o tempo; e finalmente se a função inicial de massa (IMF) é do tipo Kroupa (Kroupa, 2001) ou Salpeter (Salpeter, 1955).

Com todas essas informações inseridas, o programa é executado, seguindo os seguintes passos: ele gera um diagrama de Hess com as estrelas observadas, ajusta isócronas PARSEC (Bressan et al., 2012) e os seis parâmetros da simulação num hiperespaço de seis dimensões, segundo um diagrama de Hess modelo; e faz a subtração entre o diagrama de Hess modelo e o observado. Esse processo é repetido várias vezes, para certificar que a solução encontrada possui o resíduo mínimo, ou seja, para confirmar que esse mínimo é global, e não apenas local. Além disso, devido à natureza estatística do processo, o código deve ser aplicado várias vezes para confirmar que essa é a melhor solução (menor resíduo RMS). A minimização de resíduos é feita a partir da adaptação de um método chamado *adaptive simulated annealing* (ver Goffe, Ferrier & Rogers 1994; Bonatto, Lima & Bica 2012).

2.3.1 Unicidade da solução

Como o algoritmo é estatístico, é necessário ressaltar que a solução fornecida não é única, ou seja, não se trata simplesmente de inserir os dados fotométricos de um candidato a aglomerado, executar o programa e uma única solução mínima é obtida. A limitação dos parâmetros para a simulação demonstra que essa solução não é única e nem exclusiva: quaisquer que sejam

os limites, o programa sempre retornará uma solução. Por exemplo, se for inserido um limite de massa entre 10 e 20 M_{\odot} , por mais que a massa real do aglomerado seja 1 000 M_{\odot} , o programa encontrará uma solução para os seis parâmetros, com uma massa entre 10 e 20 M_{\odot} . Portanto, a escolha dos limites deve ser extremamente minuciosa e rigorosa.

Experienci a aplicação desse programa durante um ano e meio de Iniciação Científica, e posso dizer que essas escolhas de limites são a parte mais minuciosa da pesquisa. Sempre com a orientação do Prof. Dr. Eduardo Bica, vários limites foram testados. Observando as imagens nas várias bandas disponíveis no *software* Aladin Sky Atlas, ficou claro que os candidatos eram aglomerados embebidos jovens, por estarem localizados dentro de estruturas de poeira. Por isso, os limites de idade inseridos foram 0 – 5 Myr. Se a resposta de algum dos parâmetros ficava sempre muito próxima dos limites inferior ou superior, os limites eram alterados.

2.3.2 Parâmetros da simulação

Nesta subseção, cada um dos parâmetros é explicado com mais detalhes. Primeiramente, duas massas são determinadas: uma é a massa extrapolada pelas estrelas de baixa massa da pré-sequência principal (PMS), usando a função de Kroupa; a outra é a massa total do aglomerado, correspondente à sua massa observada, ou seja, a soma da massa de todas as estrelas que o constituem (estrelas essas que passaram pela descontaminação da fotometria). Essa massa total é a massa colocada nos resultados e ajustada no hiperespaço pela simulação. O segundo parâmetro, a idade do aglomerado, pode se encontrar num intervalo entre 0.01 Myr e 100 Myr, mas, uma vez que quase todos os aglomerados desta amostra são aglomerados embebidos, espera-se que as idades não ultrapassem os 3 Myr (Lada & Lada, 2003).

O terceiro parâmetro é o módulo de distância, que é definido como a diferença entre a magnitude aparente e a magnitude absoluta, ou seja, $(m - M)_0$. Essa grandeza se relaciona com a distância do aglomerado de acordo com a expressão:

$$(m - M)_0 = 5 \times \log d(\text{pc}) - 5 \Leftrightarrow d(\text{pc}) = 10^{[(m-M)_0+5]/5} \quad (2.1)$$

O valor do módulo de distância é obtido a partir do deslocamento vertical em magnitude no ajuste das isócronas PARSEC de metalicidade solar ($Z_{\odot} = 0.0152$). As isócronas utilizadas pertencem ao sistema fotométrico UBVRJHK (Bessell 1990 + Bessell & Brett 1998), foram retiradas do PARSEC 1.2S + NBC e estão disponíveis em <http://stev.oapd.inaf.it/cgi-bin/cmd>.

A relação entre o módulo de distância na magnitude J e o módulo de distância absoluto:

$$(m - M)_J = 5 \times \log d - 5 + A_J \Leftrightarrow (m - M)_0 = (m - M)_J - A_J \quad (2.2)$$

onde A_J é a correção por absorção interestelar na banda J, a qual se relaciona com a correção por absorção na banda V segundo a relação de Schlegel et al. (1998):

$$\frac{A_J}{A_V} = 0.276 \quad (2.3)$$

A correção por absorção na banda V também é dada por:

$$A_V = R_V \times E(B - V) \quad (2.4)$$

onde R_V é a razão entre a extinção total e a seletiva, cujo valor, segundo Cardelli et al. (1989), é 3.1. No mesmo artigo, obtém-se o valor de 0.52 para a razão $E(J - K_S)/E(B - V)$. Usando todas essas equações, é possível calcular uma relação direta entre os módulos de distância:

$$(m - M)_0 = (m - M)_J - 0.276A_V = (m - M)_J - 0.276 \times R_V \times \left[\frac{E(J - K_S)}{0.52} \right] \quad (2.5)$$

$$(m - M)_0 = (m - M)_J - 1.645 E(J - K_S) \quad (2.6)$$

O excesso de cor $E(J - K_S)$, grandeza acoplada ao módulo de distância, também é um dos parâmetros da simulação: corresponde ao deslocamento horizontal em cor no ajuste das isócronas. O excesso de cor é de extrema importância pois considera a extinção interestelar, devida à poeira interestelar presente no plano da Galáxia. Como a luz azul (menor comprimento de onda) é mais afetada do que a luz vermelha, ou seja, é mais espalhada e absorvida, a extinção faz com que as estrelas pareçam mais vermelhas do que o real, fenômeno conhecido como avermelhamento interestelar.

O último dos parâmetros é o avermelhamento diferencial, muito importante no caso de aglomerados localizados em regiões com grande quantidade de gás e poeira (composta predominantemente por grãos de silicato e carbono), tais como os aglomerados embebidos. O gás e a poeira causam uma alta e heterogênea absorção da radiação eletromagnética, deslocando as estrelas em direção à borda vermelha do diagrama (canto inferior direito). No algoritmo, o avermelhamento diferencial (DR) do candidato a aglomerado é ajustado por uma distribuição normal/gaussiana, caracterizada pela média $aV(DR)$ e pelo desvio padrão $\sigma_{aV(DR)}$ em torno da média, ambos como parâmetros livres (Bonatto, Lima & Bica, 2012).

2.3.3 Diagrama Cor-Magnitude (CMD)

O diagrama cor-magnitude corresponde a um diagrama de Hertzsprung-Russell observacional (ao invés de teórico, como é frequentemente apresentado), substituindo o tipo espectral por um índice de cor, neste trabalho por (J-K_S). Há também uma grande diferença nas isócronas:

no diagrama H-R teórico mostra-se normalmente a evolução temporal de uma única massa; por outro lado, no CMD é apresentado um conjunto de estrelas de diferentes massas, com uma única idade.

As estrelas de um aglomerado não se distribuem uniformemente em um CMD, mas seguem uma sequência evolutiva desse aglomerado, a qual é ajustada por isócronas obtidas a partir de modelos teóricos. Como explicitado na seção 2.3.2, o ajuste das isócronas fornece alguns dos parâmetros da solução, tais como distância, idade e excesso de cor. Esse ajuste não é tão simples, uma vez que vários fatores provocam o espalhamento dos pontos no CMD: incertezas fotométricas (maiores para as estrelas da PMS), a presença de estrelas T Tauri e binárias, avermelhamento diferencial, e o *star-formation spread* (este último causando um espalhamento de idades no aglomerado). Abaixo um exemplo das isócronas teóricas em um diagrama H-R e em um CMD, ambos extraídos de Bressan et al. (2012):

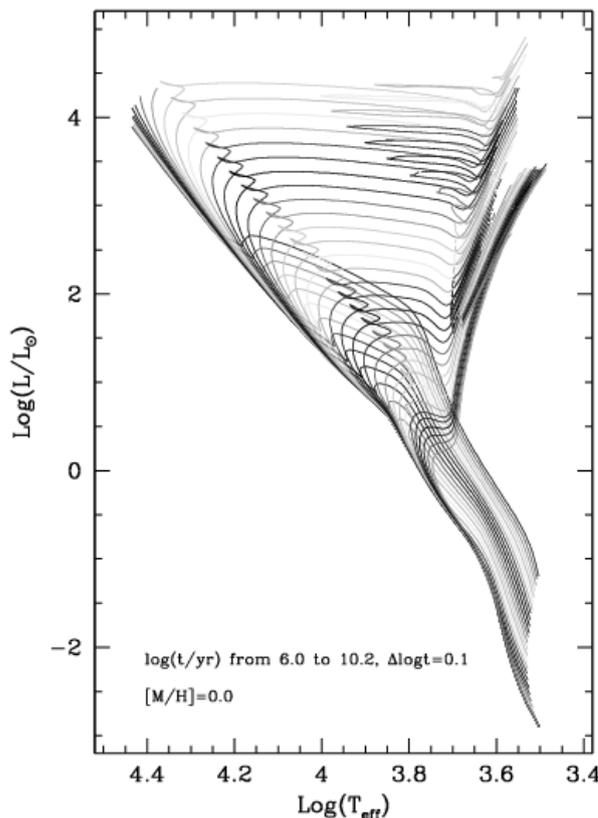


Fig. 4: Isócronas teóricas em um diagrama H-R, com idades de 1 Myr a 15.8 Gyr (10^9 anos) e $Z_{\odot} = 0.0152$.

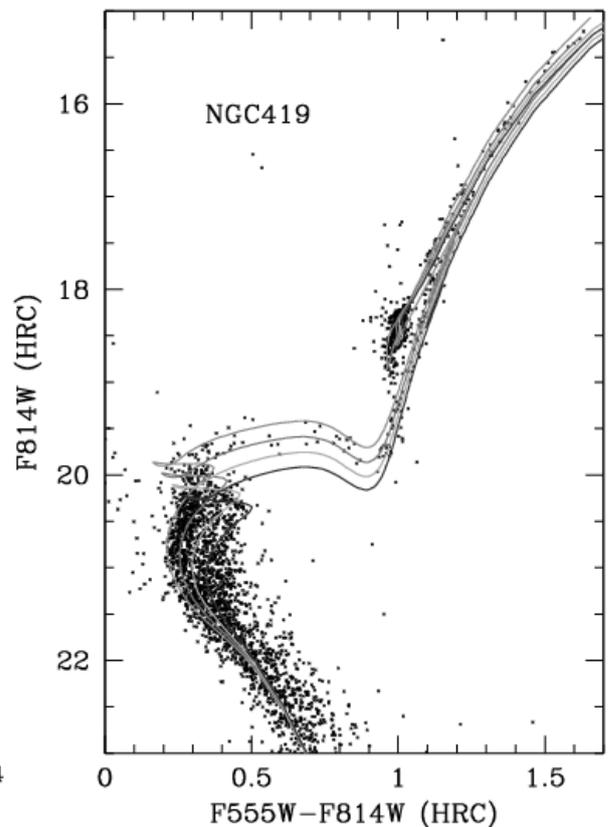


Fig. 5: Isócronas PARSEC (1.4 – 2 Gyr) sobrepostas no CMD do aglomerado de idade intermediária NGC 419, pertencente à Pequena Nuvem de Magalhães. Fotometria do High-Resolution Channel (Telescópio Espacial Hubble).

2.4 Diagrama Cor-Cor (DCC)

Os diagramas cor-cor são frequentemente utilizados no estudo de regiões de formação estelar no infravermelho, uma vez que o estado de uma estrela em formação ou seu estágio evolutivo podem ser determinados pela sua posição no diagrama.

Um último programa aplicado nesta pesquisa, também em Fortran, simula um aglomerado com os parâmetros obtidos com o programa da seção 2.3 (massa, idade, distância, excesso de cor, avermelhamento diferencial e dispersão no avermelhamento) e os dados fotométricos descontaminados (seção 2.2). Ele gera um diagrama cor-cor, com a cor (J-H) no eixo vertical e a cor (H-Ks) no eixo horizontal, com as isócronas correspondentes, com uma seta vermelha representando o avermelhamento e com o diagrama de Hess ao fundo.

2.5 Perfil de Densidade Radial (RDP)

Por último, são gerados perfis de densidade radial, para analisar a distribuição radial de estrelas em torno do centro do aglomerado, construídos a partir de uma contagem de estrelas em anéis concêntricos. Desse modo, o RDP descreve a estrutura do aglomerado, assumindo, por simplicidade, simetria esférica na distribuição radial das estrelas. Os RDPs são construídos após a aplicação de um filtro cor-magnitude nos dados fotométricos observados, para isolar as estrelas com grande probabilidade de pertencerem ao aglomerado.

O perfil é gerado da seguinte maneira: são feitos anéis na imagem do aglomerado, conta-se quantas estrelas encontram-se em cada anel, dividido pela área do anel, obtendo assim a densidade de estrelas (arcmin^{-2}). Assumindo uma distribuição poissoniana, o erro nessa densidade é dado por $\sqrt{N_i}/A_i$, onde N_i é o número de estrelas do i -ésimo anel e A_i a área desse anel. Os anéis concêntricos têm espessura, portanto a incerteza no raio (eixo x) associada a cada anel corresponde a metade da espessura do anel. O perfil de King, um ajuste empírico que aproxima o aglomerado a uma esfera isotérmica, não é aplicável aos aglomerados embebidos, pois estes são pouco povoados e não apresentam relaxamento dinâmico, por serem muito jovens.

3. RESULTADOS

A aplicação de todos os programas explicitados na seção anterior, na região do complexo de η Carinae, centrado nas coordenadas do aglomerado Trumpler 16 ($10^{\text{h}}45^{\text{m}}10^{\text{s}}$ e $-59^{\circ}43'$) e com um raio de 90 minutos de arco, resultou em uma amostra de 101 *overdensities* com probabilidade maior que 50%. Todas as sobredensidades foram analisadas separadamente e, destas, 15 foram selecionadas como sendo ótimos candidatos a aglomerados embebidos, por apresentar maior contraste na densidade de estrelas. Segue uma tabela com suas coordenadas e raios do aglomerado e do campo (coroa circular com raios interno e externo) usado na descontaminação.

Nome	Asc. Reta α	Declinação δ	Raio do aglom.	Campo (arcmin)
Oliveira 1	$10^{\text{h}}43^{\text{m}}41.2^{\text{s}}$	$-59^{\circ}35'50''$	46.8 arcsec	1.112 – 1.457
Oliveira 2	$10^{\text{h}}50^{\text{m}}10.5^{\text{s}}$	$-58^{\circ}57'45''$	1.368 arcmin	2.00 – 6.77
Oliveira 3	$10^{\text{h}}40^{\text{m}}56.5^{\text{s}}$	$-59^{\circ}47'60''$	4.0 arcmin	5.50 – 10.00
Oliveira 4	$10^{\text{h}}44^{\text{m}}38.5^{\text{s}}$	$-60^{\circ}48'3''$	1.7 arcmin	3.00 – 6.90
Oliveira 5	$10^{\text{h}}40^{\text{m}}58.9^{\text{s}}$	$-60^{\circ}49'48''$	2.048 arcmin	4.084 – 8.428
Oliveira 6	$10^{\text{h}}47^{\text{m}}03^{\text{s}}$	$-58^{\circ}35'26''$	1.406 arcmin	1.866 – 4.481
Oliveira 7*	$10^{\text{h}}45^{\text{m}}42.2^{\text{s}}$	$-60^{\circ}05'27''$	3.0 arcmin	4.5 – 8.0
Oliveira 8	$10^{\text{h}}47^{\text{m}}53.1^{\text{s}}$	$-59^{\circ}43'14''$	1.744 arcmin	5.187 – 8.711
Oliveira 9	$10^{\text{h}}51^{\text{m}}52.4^{\text{s}}$	$-58^{\circ}59'24''$	1.287 arcmin	3.205 – 6.805
Oliveira 10	$10^{\text{h}}46^{\text{m}}11.5^{\text{s}}$	$-58^{\circ}39'13''$	1.791 arcmin	2.912 – 4.941
Oliveira 11	$10^{\text{h}}53^{\text{m}}47.2^{\text{s}}$	$-59^{\circ}22'50''$	1.473 arcmin	3.139 – 6.288
Oliveira 12*	$10^{\text{h}}45^{\text{m}}53.6^{\text{s}}$	$-59^{\circ}57'03''$	1.5 arcmin	2.7 – 5.7
Oliveira 13	$10^{\text{h}}56^{\text{m}}29.7^{\text{s}}$	$-60^{\circ}06'11''$	1.85 arcmin	4.257 – 7.944
Oliveira 14*	$10^{\text{h}}48^{\text{m}}56.2^{\text{s}}$	$-59^{\circ}02'52''$	1.037 arcmin	1.037 – 3.528
Oliveira 15	$10^{\text{h}}39^{\text{m}}23^{\text{s}}$	$-59^{\circ}45'13''$	2.0 arcmin	3.2 – 7.0

*O aglomerado está catalogado na literatura (ver texto abaixo). Nas discussões que seguem, a denominação Oliveira é mantida para fins de uniformidade.

Tabela 2: Coordenadas equatoriais, raio do aglomerado e raios interno e externo do campo de comparação, para cada uma das sobredensidades encontradas (Oliveira 1 – Oliveira 15).

O raio do aglomerado foi determinado visualmente, e o campo de comparação utilizado na descontaminação foi escolhido de modo que a distribuição das estrelas de campo fosse basicamente uniforme. Também é necessário que a área do campo seja maior que a área do aglomerado, devido à natureza estatística do algoritmo de descontaminação. Feita uma verificação das coordenadas desses 15 candidatos, constatou-se que 3 deles já estão catalogados na literatura: (i) Oliveira 7 é CCCP-CI 16 (Feigelson et al., 2011); (ii) Oliveira 12 foi descoberto por Dutra & Bica (2001) e renomeado de “Treasure Chest” (Arca do Tesouro) por Smith, Stassun & Bally (2005); e (iii) Oliveira 14 corresponde ao aglomerado aberto velho FSR 1555 (Bonatto & Bica, 2009). Neste último, por ter uma idade de 1.5 ± 0.5 Gyr, não aplicou-se o programa de CMDs, pois o limite de idade é de 100 Myr.

A seguir são exibidas imagens de cada um dos 15 objetos, todas obtidas com o *software* Aladin Sky Atlas, em diferentes bandas dos telescópios no infravermelho 2MASS e WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer, infravermelho médio), e no DSS (Digitized Sky Survey, no óptico), como descrito nas legendas.

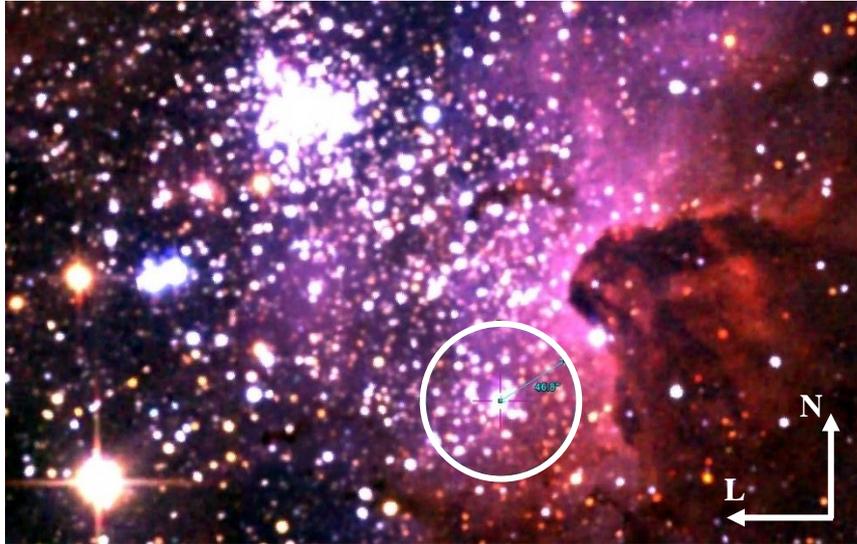


Fig. 6: O candidato Oliveira 1, em imagem do 2MASS JHK_s, com o raio do aglomerado destacado em branco. Mais em cima, à esquerda, encontra-se o aglomerado Trumpler 14. O referencial mostrado é o mesmo adotado em todas as próximas figuras (Fig. 7 – Fig. 20).

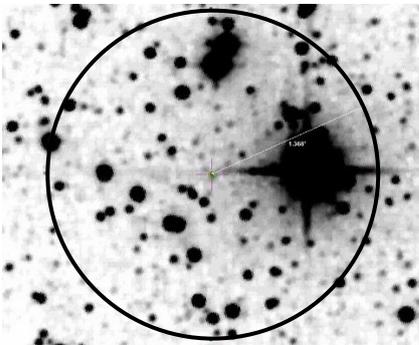


Fig. 7: Oliv. 2 - Banda J (2MASS)

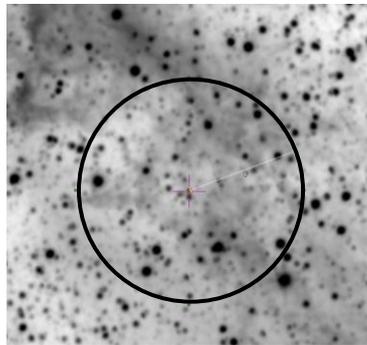


Fig. 8: Oliv. 3 - Banda W1 (WISE)

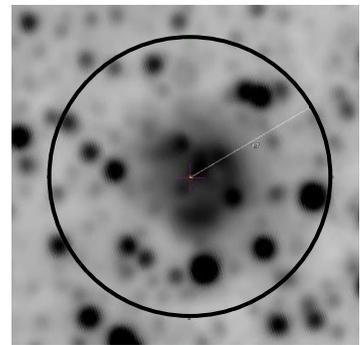


Fig. 9: Oliv. 4 - Banda W2 (WISE)

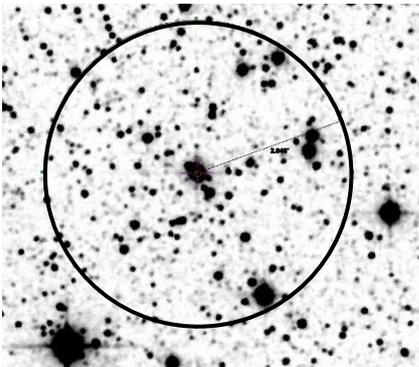


Fig. 10: Oliv. 5 - Banda H (2MASS)

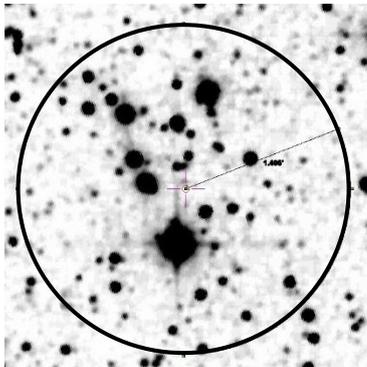


Fig. 11: Oliv. 6 - Banda H (2MASS)

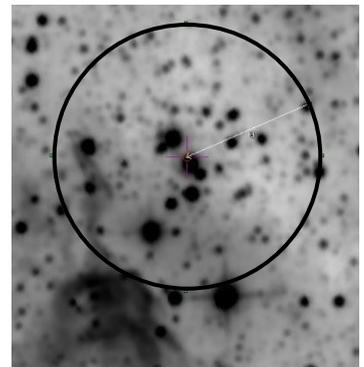


Fig. 12: Oliv. 7 - Banda W1 (WISE)

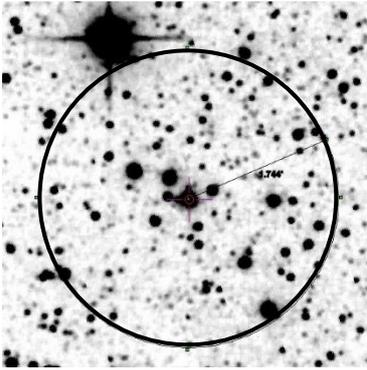


Fig. 13: Oliv. 8 - Banda H (2MASS)

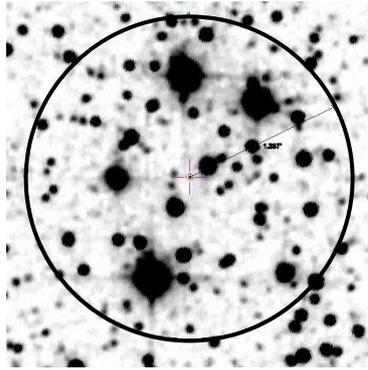


Fig. 14: Oliv. 9 - Banda H (2MASS)

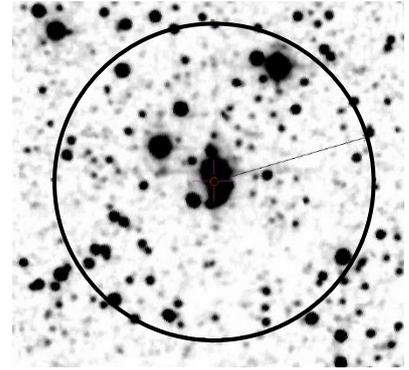


Fig. 15: Oliv. 11 - Banda K_s (2MASS)

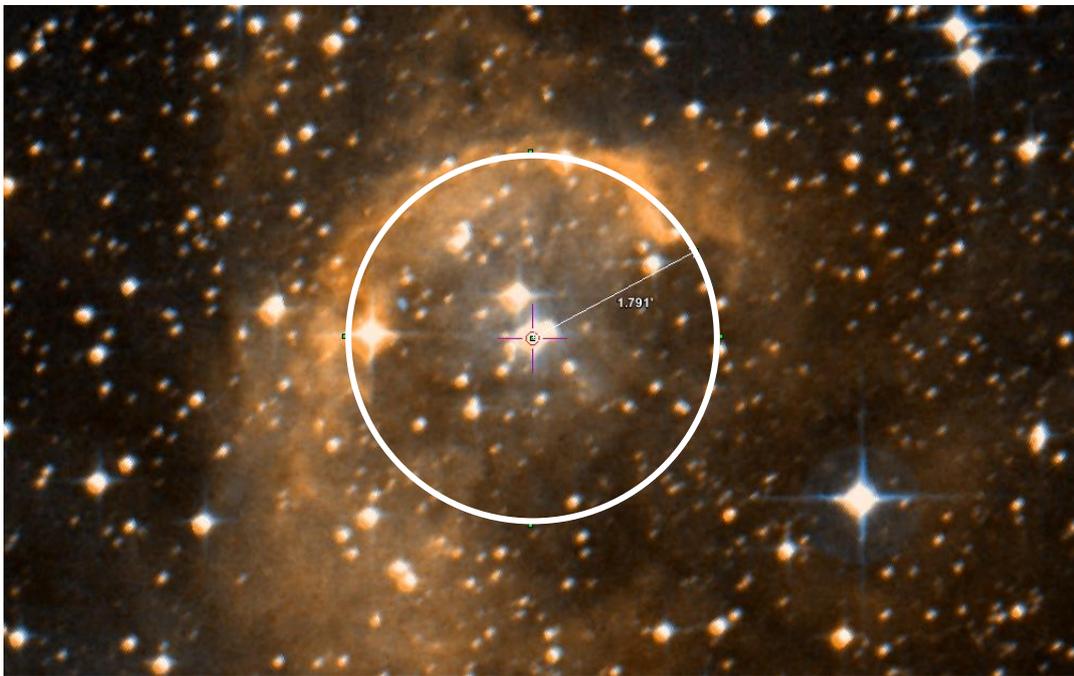


Fig. 16: O candidato Oliveira 10, em imagem do DSS, com uma casca de poeira envolvendo-o.

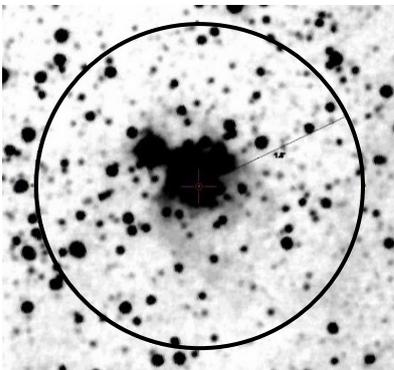


Fig. 17: Oliv. 12 - Banda H (2MASS)

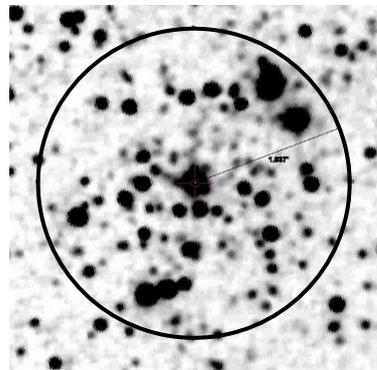


Fig. 18: Oliv. 14 - Banda K_s (2MASS)

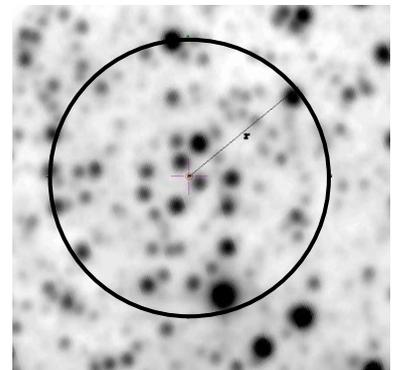


Fig. 19: Oliv. 15 - Banda W1 (WISE)

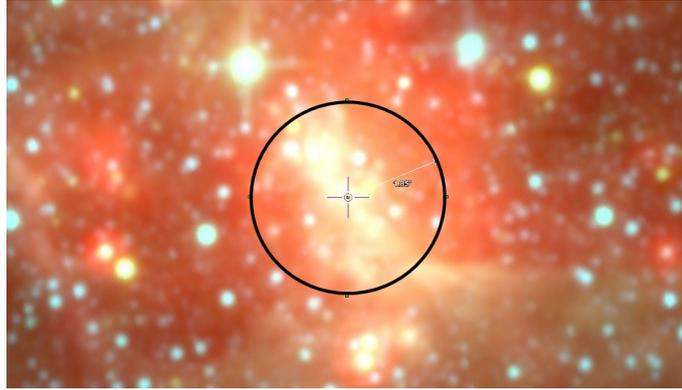


Fig.20: O candidato Oliveira 13, em imagem do WISE (infravermelho médio).

Feita a descontaminação da fotometria por estrelas não-membros, o programa de CMD e isócronas PARSEC foi aplicado a todos os objetos. Os limites nos parâmetros da simulação foram os seguintes: 10 – 10 000 M_{\odot} para a massa, 0 – 5 Myr para a idade, 9 – 13 mag para o módulo de distância (cerca de 0.63 – 4 kpc), 0 – 1 mag para excesso de cor $E(J-K_S)$, 0 – 10 mag para o centro da gaussiana ajustada para o avermelhamento diferencial e 0 – 10 mag para a dispersão dessa gaussiana. Além disso, foi selecionado um *star-formation spread* que assume formação estelar durante toda a vida do aglomerado (por se tratar de ECs, nos quais geralmente ainda ocorre formação estelar), com uma taxa linear decrescente, e uma IMF do tipo Kroupa.

São colocados abaixo o CMD resultante dos 15 objetos, em ordem:

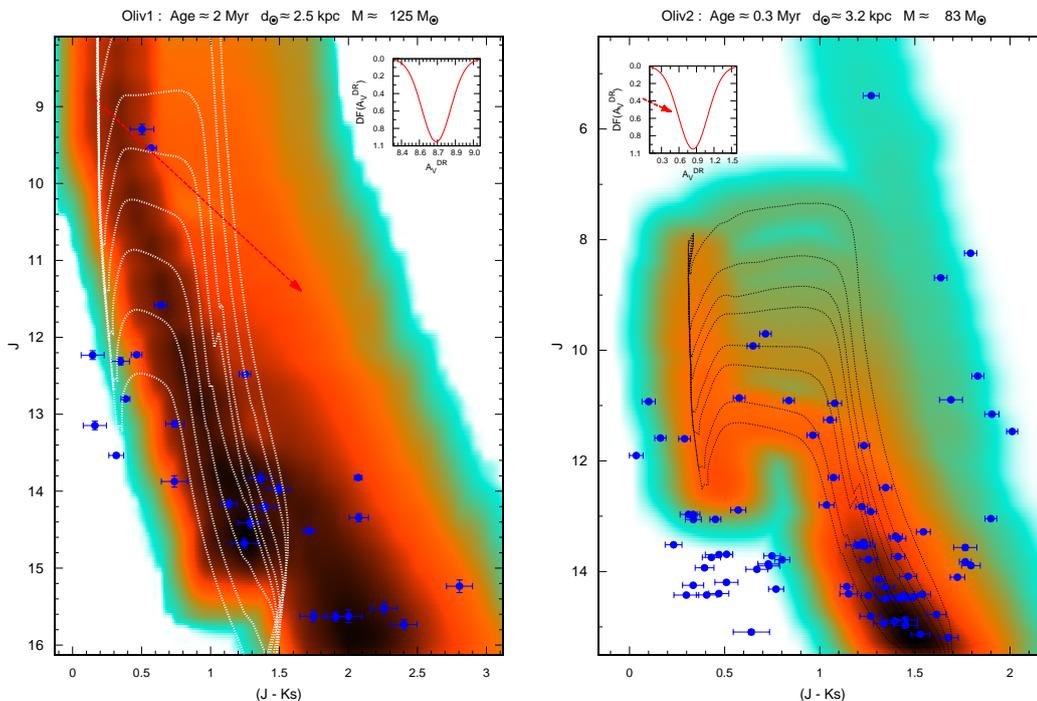


Fig.21: Diagramas cor-magnitude $J \times (J-K_S)$ dos dois primeiros objetos: os pontos azuis são as estrelas com as incertezas, a gaussiana (invertida no eixo y) é o ajuste do avermelhamento diferencial (flecha vermelha) e o diagrama de Hess descontaminado ao fundo, com a densidade relativa de estrelas.

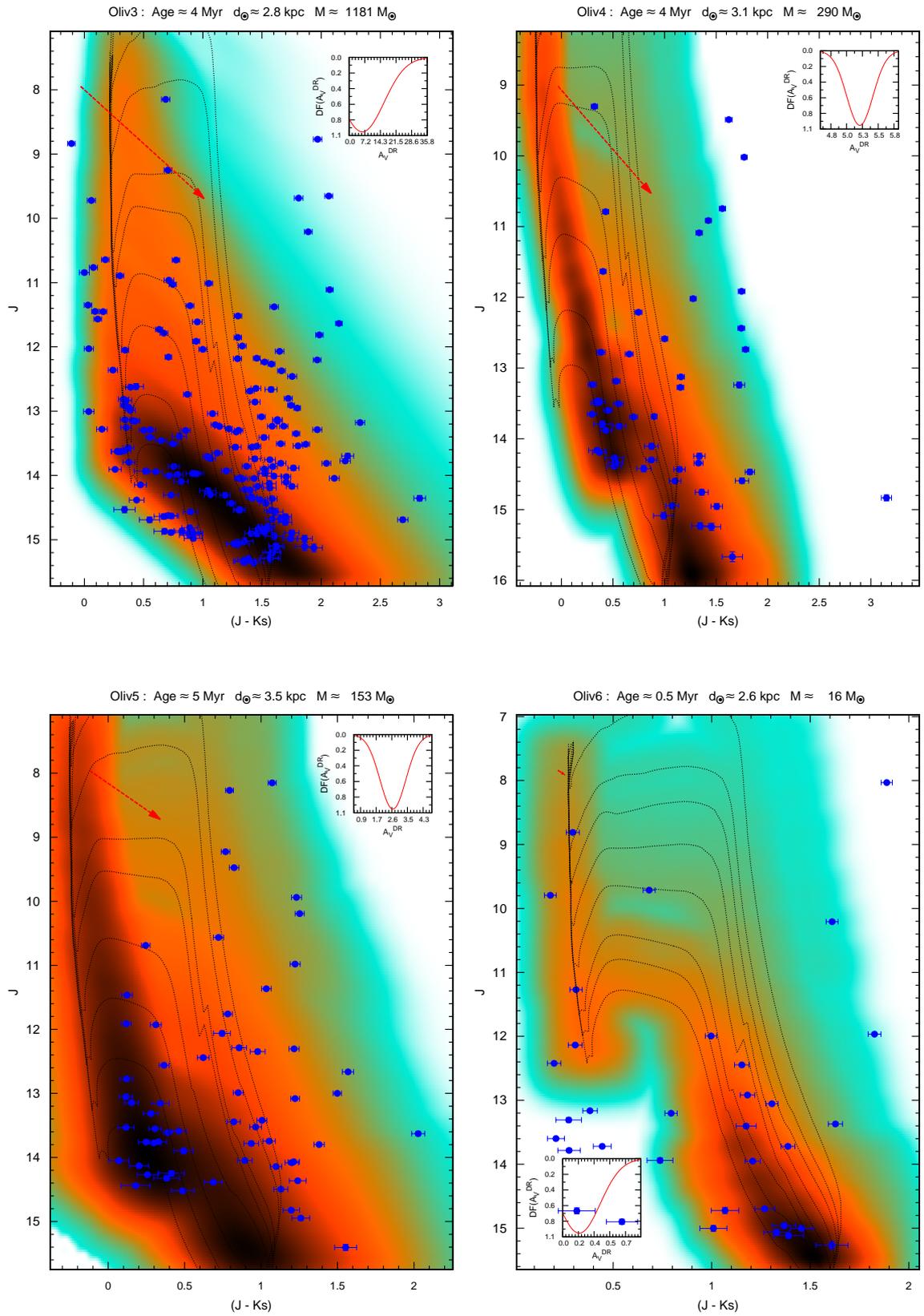


Fig.22: Diagramas cor-magnitude $J \times (J-Ks)$ dos objetos Oliveira 3 a Oliveira 6.

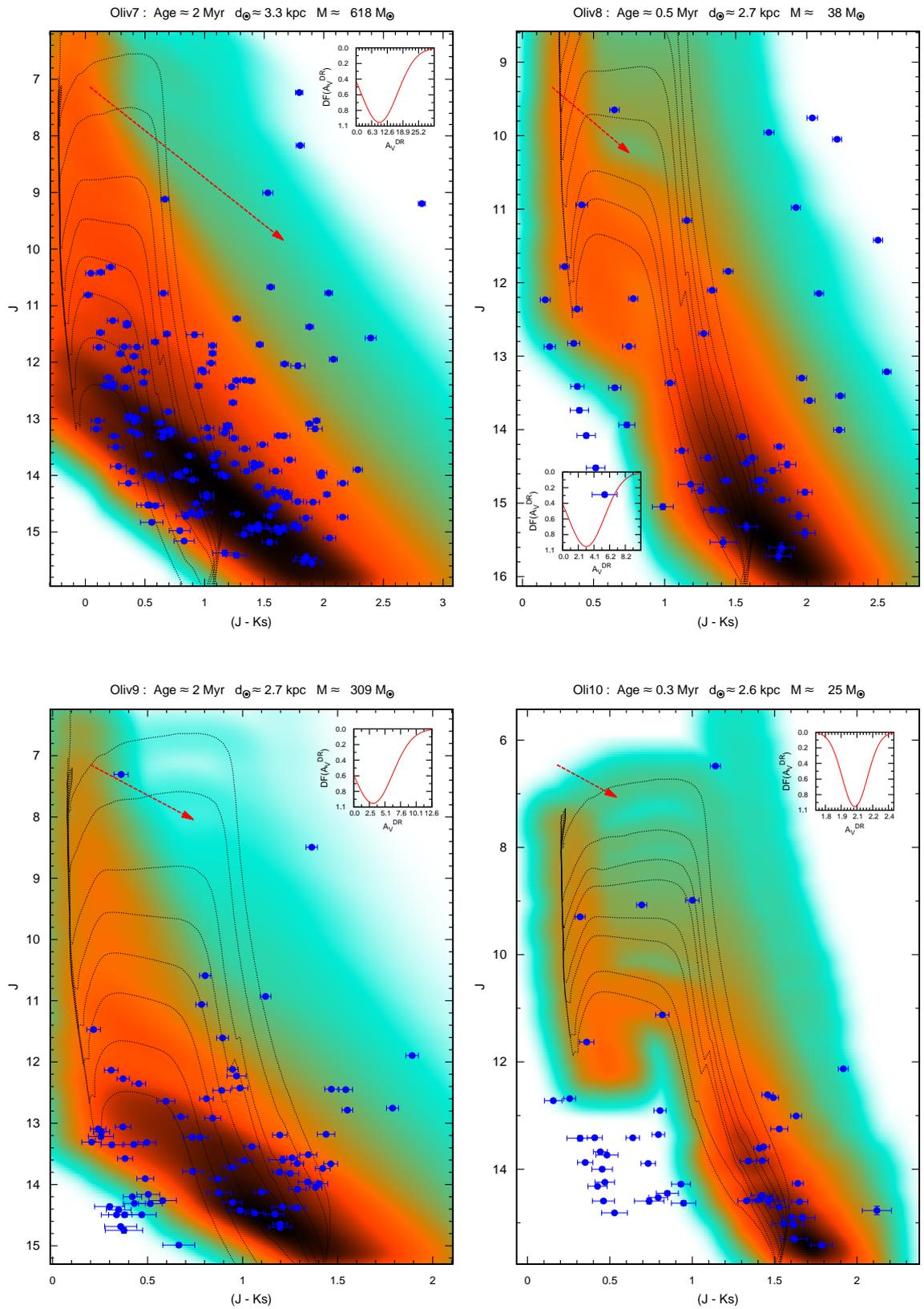


Fig.23: Diagramas cor-magnitude $J \times (J-Ks)$ dos objetos Oliveira 7 a Oliveira 10.

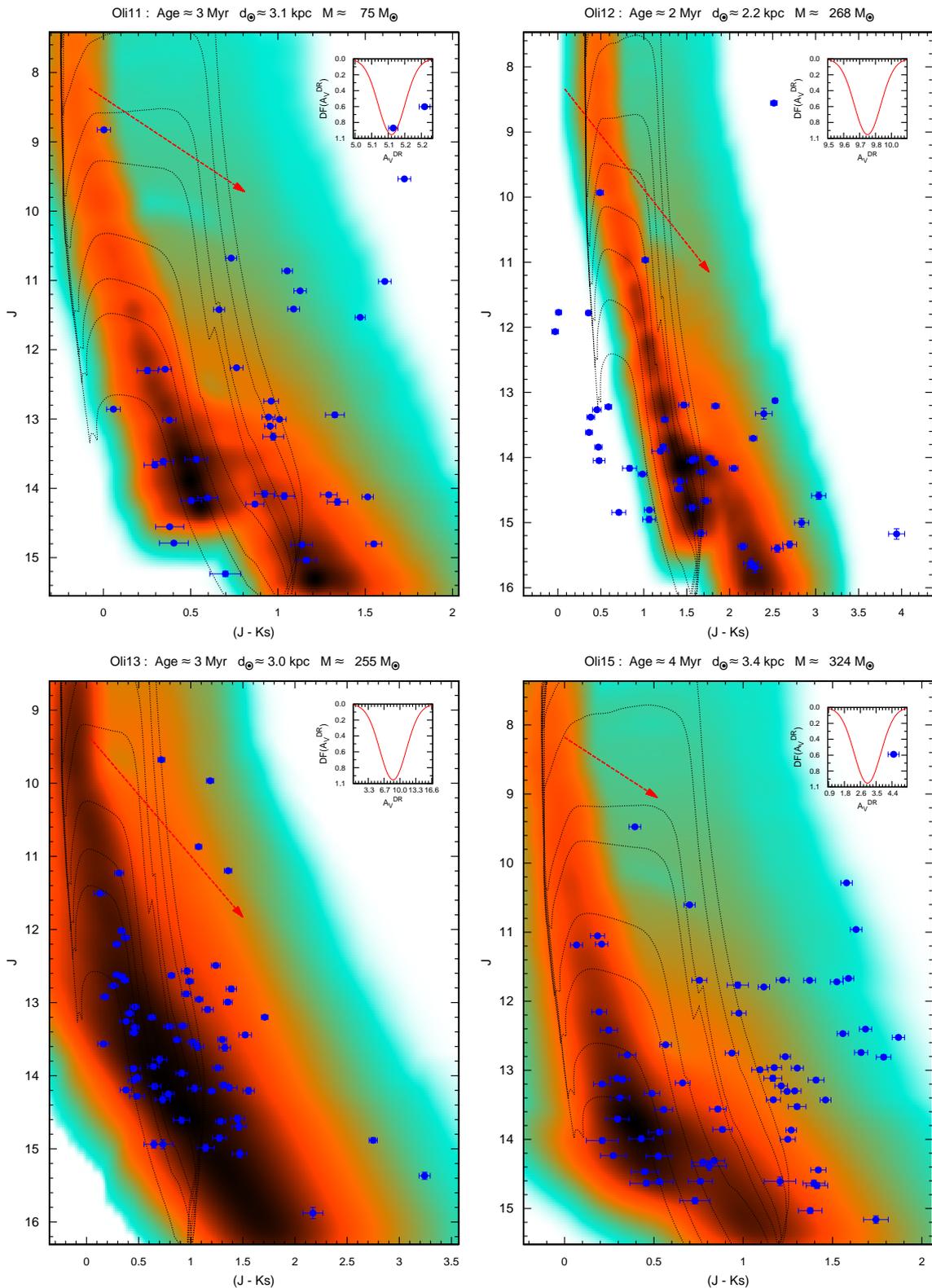


Fig.24: Diagramas cor-magnitude $J \times (J-Ks)$ dos objetos Oliveira 11 a Oliveira 15. Lembrando que o objeto Oliveira 14, encontrado com o programa de sobredensidades, corresponde ao aglomerado aberto velho FSR 1555, com idade 1.5 ± 0.5 Gyr (Bonatto & Bica, 2009). Não foi possível aplicar o programa de CMDs a esse objeto, pois a idade máxima de suas isócronas é de 100 Myr.

Os CMDs intrínsecos (com a fotometria descontaminada) de todos os objetos apresentaram bons ajustes das isócronas, apesar de serem pouco populosos, e parâmetros astrofísicos condizentes com as expectativas iniciais, ou seja, idades não ultrapassando os 3 ou 4 milhões de anos (coerente com a fase de aglomerado embebido, Lada & Lada 2003) e distâncias muito próximas a 3 kpc (distância aproximada do complexo de η Carinae).

Além de todos os parâmetros, o CMD também fornece uma visão geral do estágio evolutivo das estrelas do aglomerado. As estrelas que compõem os ECs encontram-se em processo de formação ou em estágios iniciais de evolução e várias estão na fase de pré-sequência principal (PMS), na qual a estrela ainda não iniciou a fusão nuclear de hidrogênio. Observa-se que a maioria dos ECs desta amostra são pouco populosos, apresentam uma sequência principal quase vertical e uma PMS bem desenvolvida, afetada por avermelhamento diferencial.

Para os objetos Oliveira 2 e Oliveira 10, nota-se a presença de dois poços na região da PMS ($M_J > 13$ mag), duas grandes concentrações de estrelas. Um estudo mais detalhado de Oliveira 10 mostrou que as estrelas que encontram-se no poço mais vermelho (à direita), claramente são as estrelas que estão na poeira, na casca que envolve o aglomerado; as estrelas azuis (canto inferior esquerdo) encontram-se na parte mais central, região pouco afetada pela poeira. Algumas dessas estrelas podem ter passado pela descontaminação (*foreground stars*). Os CMDs dos objetos 6, 8, 9 e 12 também apresentam algumas estrelas nessas regiões.

A seguir, uma tabela com os resultados da melhor solução (com menor resíduo), junto com as respectivas incertezas, para mais e para menos, já que as incertezas não são simétricas em relação ao valor central. Depois da tabela, seguem os diagramas cor-cor dos aglomerados, em ordem, gerados a partir dos parâmetros das soluções obtidas com os CMDs.

#	Idade (Myr)		Distância (kpc)		Massa (M_{\odot})		E(J-Ks) (mag)		aV(DR) (mag)		$\sigma_{aV(DR)}$ (mag)	
1	1.88	(+) 1.47 (-) 0.38	2.5	(+) 0.2 (-) 0.2	124.6	(+) 50.3 (-) 77.6	0.43	(+) 0.25 (-) 0.21	8.69	(+) 0.75 (-) 1.01	0.1	(+) 5.7 (-) 0.1
2	0.33	(+) 2.22 (-) 0.11	3.2	(+) 1.2 (-) 0.5	83.4	(+) 72.8 (-) 50.3	0.57	(+) 0.1 (-) 0.11	0.84	(+) 4.52 (-) 0.48	0.3	(+) 5.4 (-) 0.2
3	3.84	(+) 0.68 (-) 1.53	2.8	(+) 0.1 (-) 0.6	1181.1	(+) 827.1 (-) 512.0	0.47	(+) 0.27 (-) 0.24	6.04	(+) 2.17 (-) 3.02	9.9	(+) 0.1 (-) 4.7
4	4.33	(+) 0.39 (-) 1.03	3.1	(+) 0.4 (-) 0.3	289.5	(+) 151.3 (-) 146.7	0.00	(+) 0.15 (-) 0.00	5.24	(+) 2.59 (-) 0.93	0.2	(+) 5.6 (-) 0.1
5	4.58	(+) 0.25 (-) 1.47	3.5	(+) 0.6 (-) 0.7	152.9	(+) 152.9 (-) 70.1	0.00	(+) 1.1 (-) 0.00	2.67	(+) 3.41 (-) 1.53	0.7	(+) 5.3 (-) 0.4
6	0.53	(+) 2.66 (-) 0.22	2.6	(+) 0.2 (-) 0.7	15.6	(+) 34.6 (-) 5.6	0.53	(+) 0.41 (-) 0.27	0.19	(+) 2.62 (-) 0.12	0.2	(+) 5.5 (-) 0.2
7	1.56	(+) 1.97 (-) 0.66	3.3	(+) 0.3 (-) 0.8	618.4	(+) 428.5 (-) 272.8	0.03	(+) 0.30 (-) 0.02	9.39	(+) 0.36 (-) 2.65	7.4	(+) 1.5 (-) 3.7
8	2.57	(+) 1.41 (-) 1.31	0.7	(+) 0.5 (-) 0.2	11.5	(+) 38.6 (-) 1.52	0.43	(+) 0.83 (-) 0.21	2.49	(+) 2.40 (-) 1.23	1.3	(+) 4.9 (-) 0.7
9	2.12	(+) 1.66 (-) 0.77	2.7	(+) 0.2 (-) 0.6	308.9	(+) 326.6 (-) 166.1	0.33	(+) 0.31 (-) 0.19	3.12	(+) 3.78 (-) 1.69	3.2	(+) 3.9 (-) 1.7
10	0.18	(+) 2.82 (-) 0.07	3.0	(+) 0.2 (-) 0.5	20.9	(+) 29.2 (-) 10.9	0.23	(+) 0.22 (-) 0.09	3.76	(+) 2.22 (-) 0.73	0.1	(+) 5.3 (-) 0.1
11	3.13	(+) 1.08 (-) 1.35	3.1	(+) 0.6 (-) 1.2	75.4	(+) 139.3 (-) 25.3	0.01	(+) 0.92 (-) 0.01	5.16	(+) 2.75 (-) 2.94	0.0	(+) 5.8 (-) 0.0
12	2.46	(+) 1.21 (-) 0.66	2.2	(+) 0.2 (-) 0.3	268.3	(+) 240.5 (-) 133.8	0.57	(+) 0.20 (-) 0.30	9.78	(+) 0.14 (-) 1.45	0.1	(+) 5.6 (-) 0.1
13	2.99	(+) 1.16 (-) 1.04	3.0	(+) 0.5 (-) 0.6	255.5	(+) 233.9 (-) 119.1	0.00	(+) 0.34 (-) 0.00	8.54	(+) 0.85 (-) 2.70	2.8	(+) 4.2 (-) 1.6
14	--	-- --	--	-- --	--	-- --	--	-- --	--	-- --	--	-- --
15	4.44	(+) 0.33 (-) 1.39	3.4	(+) 0.2 (-) 0.61	323.7	(+) 229.2 (-) 163.8	0.13	(+) 0.36 (-) 0.07	3.04	(+) 2.61 (-) 1.48	0.7	(+) 5.3 (-) 0.4

Tabela 3: Resultados das soluções com menor resíduo, acompanhados das incertezas para mais e para menos (colocadas ao lado do resultado) em torno do mínimo.

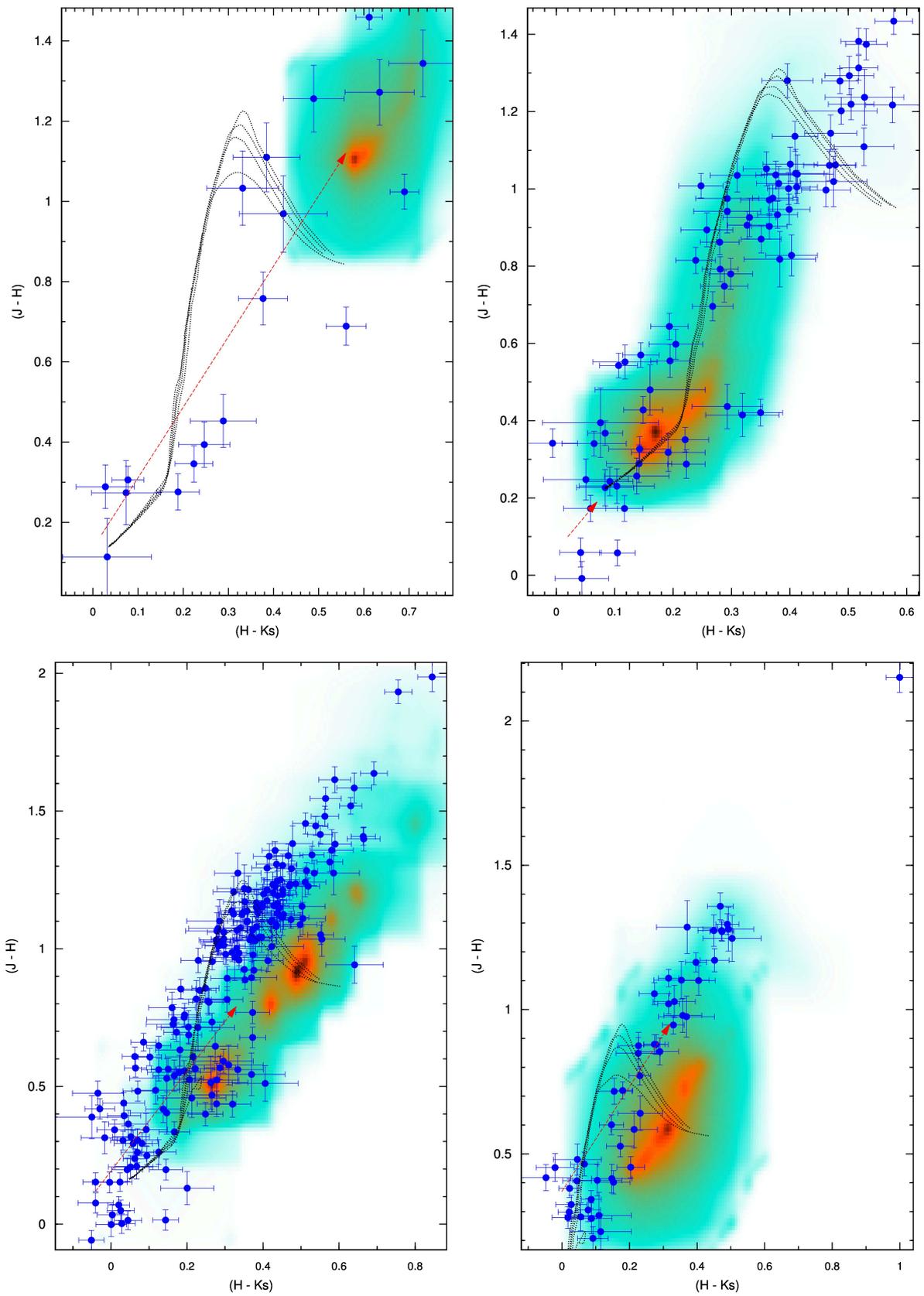


Fig.25: Diagramas cor-cor $(J-H) \times (H-Ks)$ dos quatro primeiros objetos (Oliveira 1 - Oliveira 4), em ordem.

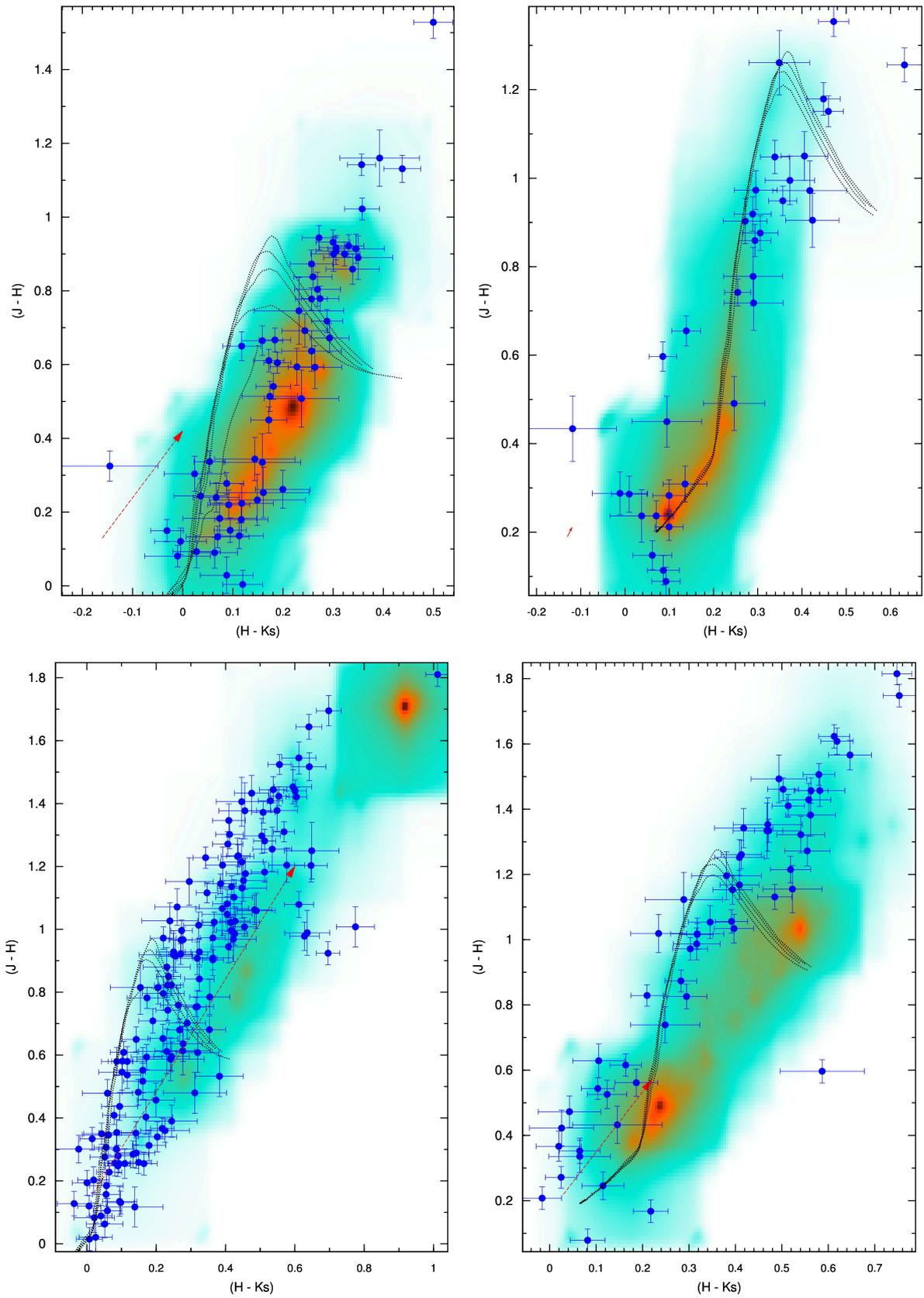


Fig.26: Diagramas cor-cor $(J-H) \times (H-Ks)$ dos objetos Oliveira 5 a Oliveira 8, em ordem.

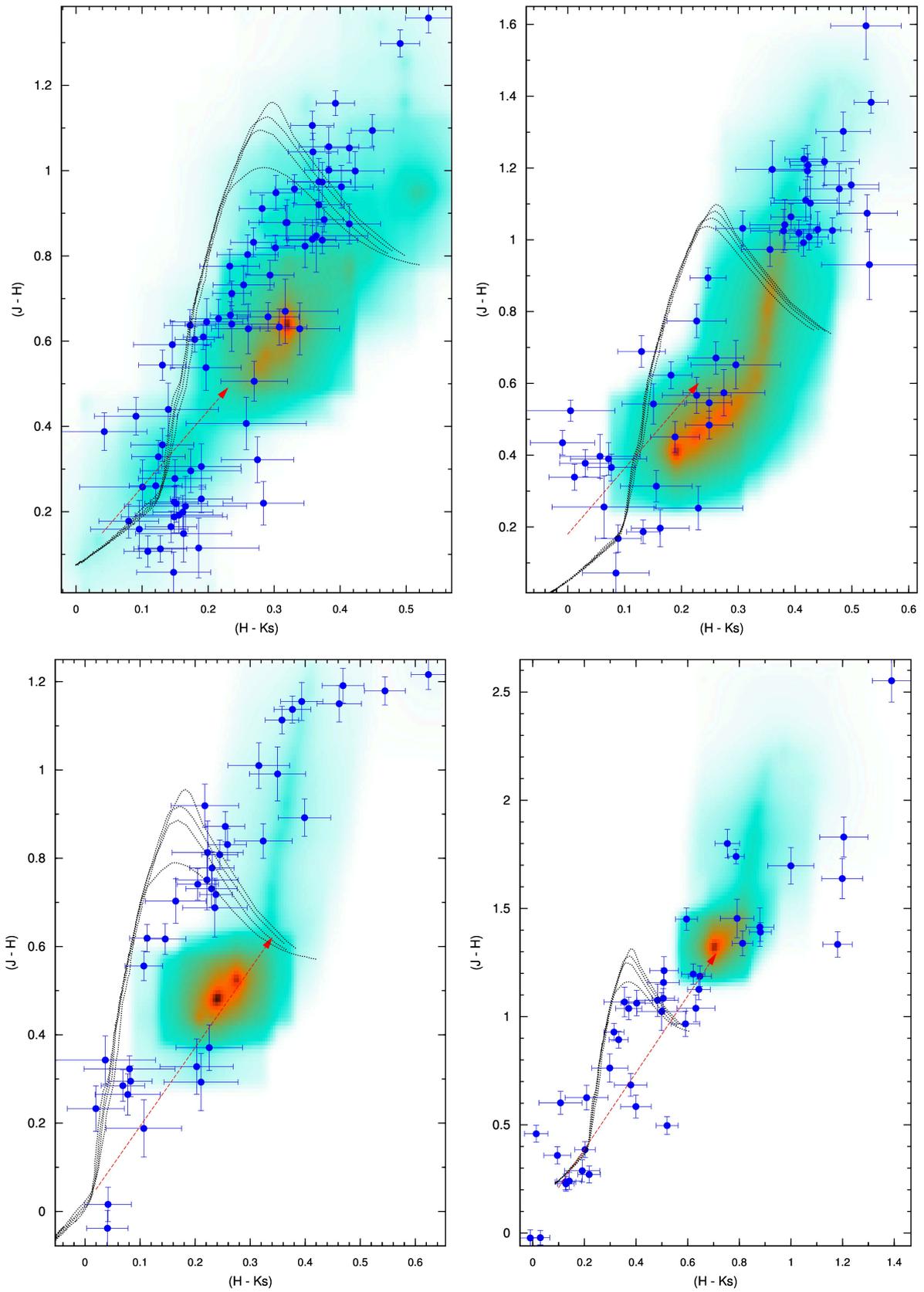


Fig.27: Diagramas cor-cor $(J-H) \times (H-Ks)$ dos objetos Oliveira 9 a Oliveira 12, em ordem.

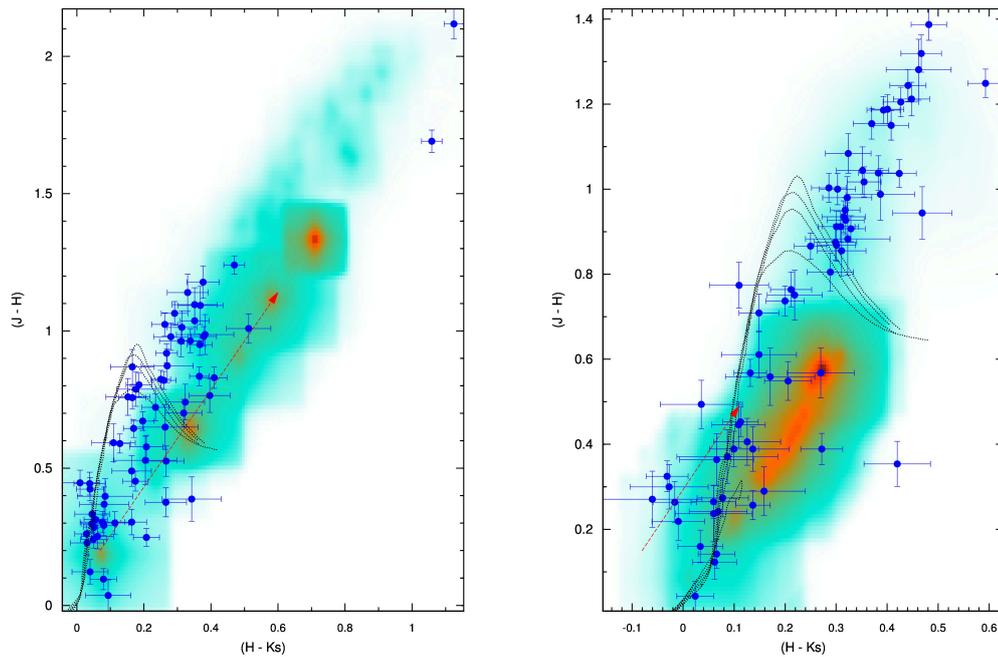


Fig.28: Diagramas cor-cor $(J-H) \times (H-Ks)$ dos objetos Oliveira 13 e Oliveira 15, em ordem.

Os diagramas cor-cor, assim como os CMDs, forneceram ótimos resultados para todos os 14 objetos: os ajustes das isócronas foram adequados, sendo que as estrelas com suas incertezas seguem o caminho traçado pelas isócronas. Pode-se concluir dos diagramas que os objetos são de fato aglomerados embebidos, muito jovens, pertencem ao complexo de η Carinae (exceto Oliveira 8, ver adiante) pois suas distâncias são próximas a 3 kpc, e são pouco povoados, com uma PMS bem destacada (como observamos tanto nos CMDs quanto nos DCCs).

Os perfis de densidade radial também contribuem muito no estudo dos aglomerados embebidos, dando uma visão geral de suas estruturas e da distribuição radial de estrelas em torno do centro do aglomerado. Seguem os RDPs dos 15 aglomerados da amostra de sobredensidades, com o raio (em arcmin) no eixo x e a densidade superficial de estrelas (em arcmin^{-2}) no eixo y :

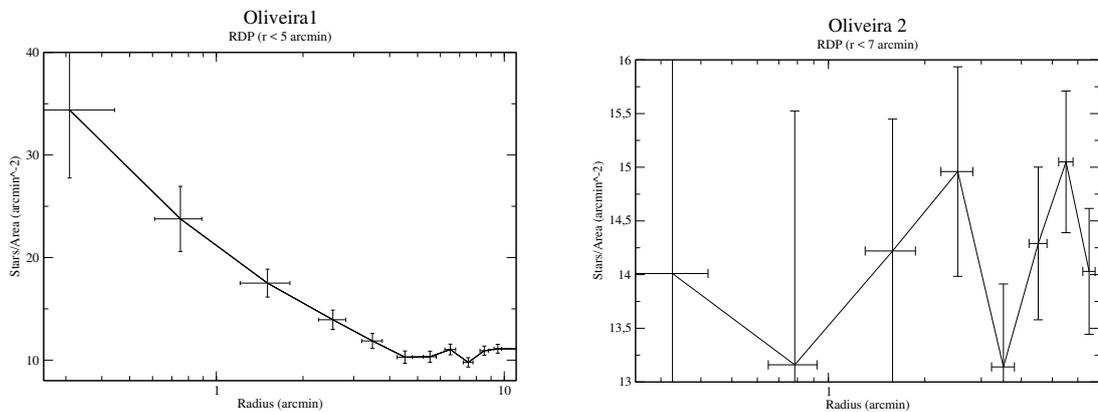


Fig.29: Perfis de densidade radial dos aglomerados Oliveira 1 e Oliveira 2.

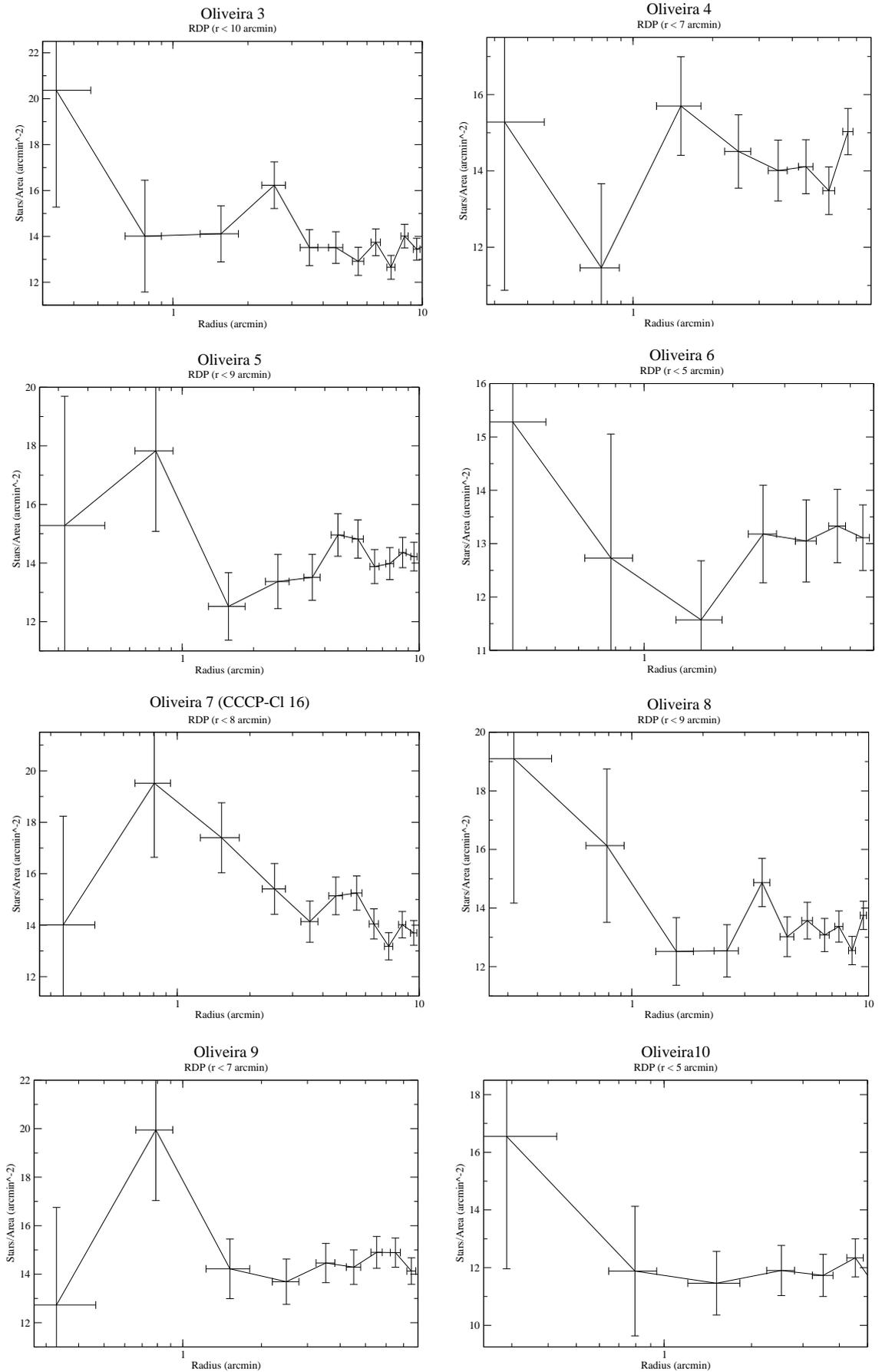


Fig.30: Perfis de densidade radial dos aglomerados de Oliveira 3 a Oliveira 10.

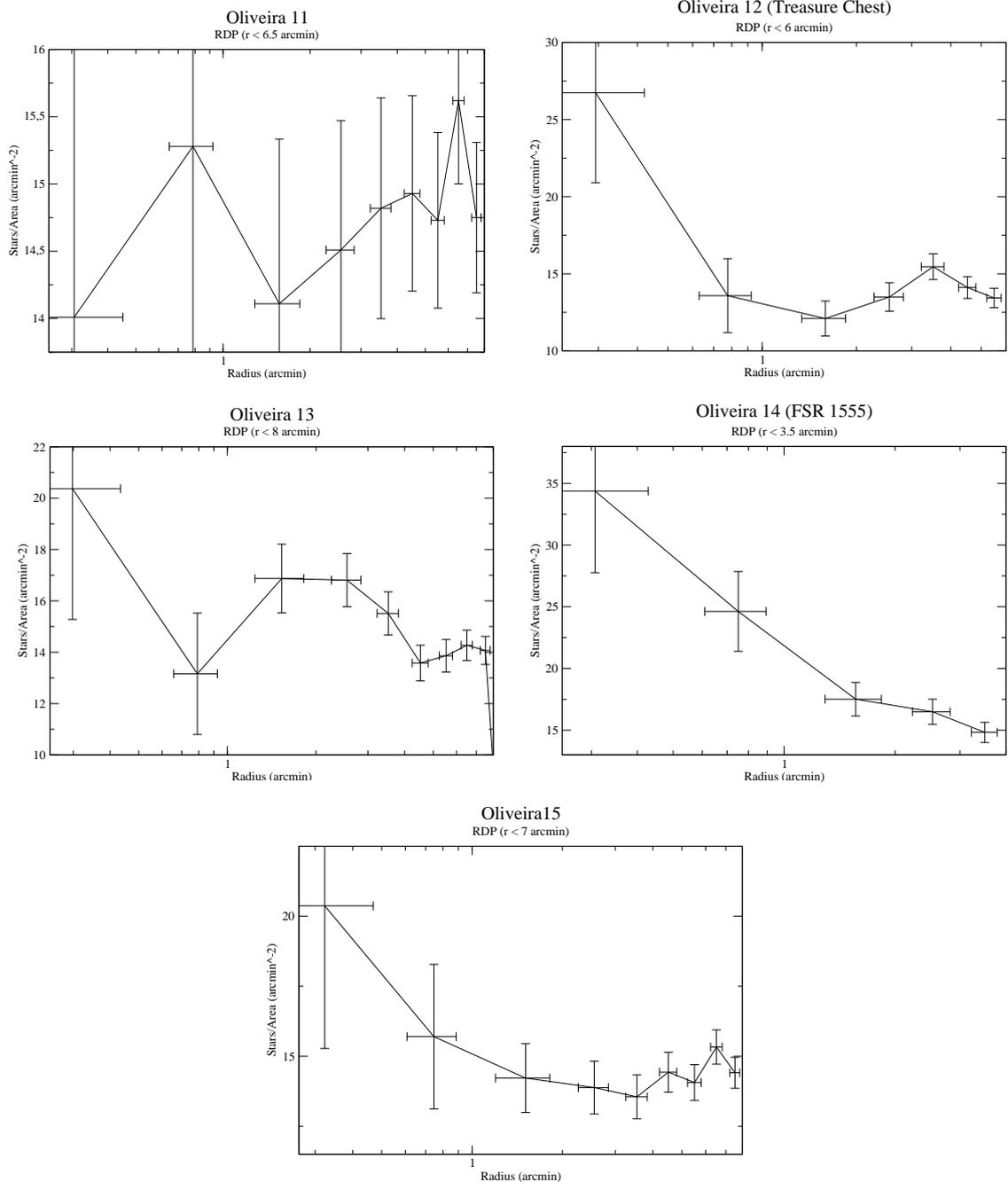


Fig.31: Perfis de densidade radial dos aglomerados Oliveira 11 a Oliveira 15.

Os erros na densidade de estrelas e a incerteza no raio já foram explicados em detalhes na metodologia (seção 2.5). Em vários casos (objetos 1, 3, 8, 10, 12, 14 e 15), o RDP apresenta um pico central, mostrando que são centralmente condensados; nestes casos, é provável que o perfil de King se ajuste, apesar de os aglomerados não terem alcançado o relaxamento dinâmico. Em outros casos (objetos 5, 7 e 9) os picos não são centrais, pois as densidades maiores não ocorrem exatamente no centro. Os casos restantes (objetos 2, 4, 6, 11 e 13) tratam-se de vários picos e baixas contagens, possivelmente resultados de flutuações extrínsecas devido à absorção de poeira e ao pequeno número de membros envolvidos.

Visto que a amostra é extensa, dificultando uma visão geral dos parâmetros obtidos ou comparações entre eles, são apresentados abaixo histogramas com a distribuição de massas, idades e distâncias obtidas como solução para os aglomerados (exceto o Oliveira 14/FSR 1555).

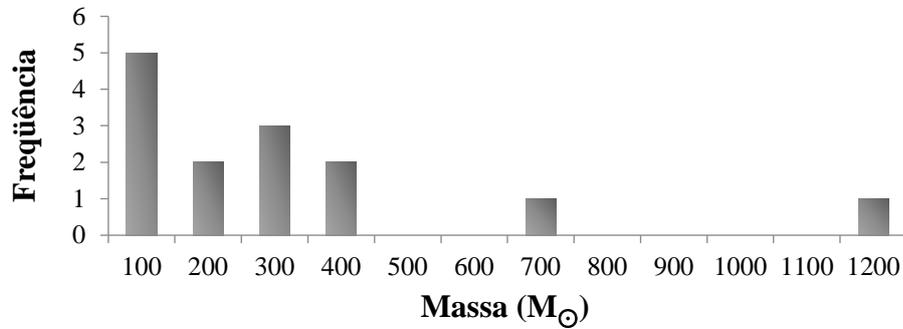


Fig. 32: Histograma mostrando a distribuição das massas para a amostra de 14 aglomerados.

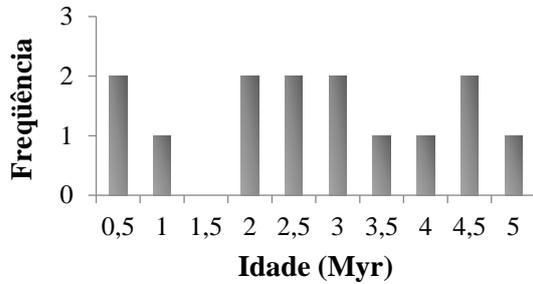


Fig. 33: Histograma mostrando a distribuição das idades para a amostra de 14 aglomerados.

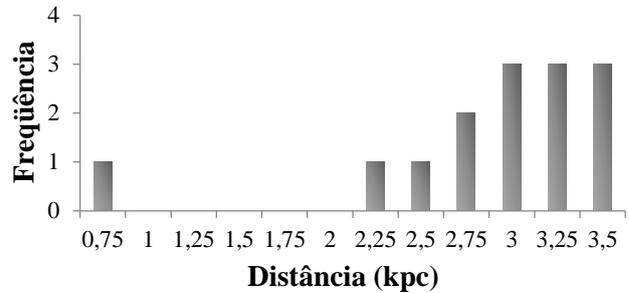


Fig. 34: Histograma mostrando a distribuição das distâncias para a amostra de 14 aglomerados.

4. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os aglomerados embebidos, presentes essencialmente nos braços espirais da Via Láctea, regiões de alta densidade estelar, são considerados, juntamente com os aglomerados abertos e globulares, blocos básicos de construção das galáxias. Por este motivo, são importantes laboratórios para o estudo da formação e da evolução estelar, das interações dinâmicas e da estrutura do disco galáctico. Observa-se uma alta taxa de mortalidade infantil para os ECs, resultado da baixa eficiência de formação estelar e rápida dispersão do gás residual utilizado na formação.

Neste trabalho, através da fotometria 2MASS, foram analisadas quinze sobredensidades como ótimos candidatos a aglomerados estelares, localizadas no complexo de η Carinae, região de intensa e contínua formação estelar. O estudo fotométrico desses candidatos, constituído pela descontaminação da fotometria por estrelas não-membros, diagramas cor-magnitude, diagramas cor-cor e perfis de densidade radial, determinando os seus principais parâmetros astrofísicos, permitiu confirmar que eles (exceto o Oliveira 14) são de fato aglomerados embebidos.

Três das quinze sobredensidades encontradas tratavam-se de aglomerados catalogados: (i) Oliveira 7/CCCP-CI 16 não teve parâmetros determinados em Feigelson et al. (2011), (ii) Oliveira 12 tornou-se aglomerado de controle, e (iii) FSR 1555 não pôde ser estudado em detalhes, por ser um aglomerado muito velho. O Oliveira 12 apresentou neste trabalho os resultados: idade de 2.5 Myr, distância de 2.2 kpc, excesso de cor nulo e avermelhamento diferencial de 8.54 mag. Os parâmetros obtidos no artigo de Smith et al. (2004) são: 0.1 Myr, 2.3 kpc, excesso $E(B-V) = 0.34$ mag e correção por absorção A_V da ordem de 50. Comparando, as distâncias são semelhantes, no entanto, o artigo obtém uma idade menor para este aglomerado.

Para os doze aglomerados restantes, conclui-se que são aglomerados embebidos, extremamente jovens, com uma idade máxima de 4.5 Myr, e com distâncias muito próximas a 3 kpc, distância do complexo de η Carinae. O aglomerado Oliveira 8 apresentou uma distância bem menor, de 0.7 kpc, podendo se tratar de erro no ajuste das isócronas, um aglomerado realmente localizado fora do complexo (porém na mesma linha de visada, em primeiro plano), ou então, tratar-se uma flutuação na sobredensidade encontrada nessa região.

De modo geral, os valores de avermelhamento diferencial foram bem elevados, confirmando que são aglomerados ainda imersos no gás e poeira interestelar que o deram origem. Nesse sentido, a fotometria 2MASS (infravermelho próximo) foi extremamente útil, uma vez que a radiação infravermelha é capaz de penetrar essas densas regiões de gás e poeira sem sofrer absorção; o estudo em comprimentos de onda do óptico não seria tão eficaz.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, L.; MEGEATH, S. T.; GUTERMUTH, R.; MYERS, P. C.; WOLK, S.; ADAMS, F. C.; MUZEROLLE, J.; YOUNG, E.; PIPHER, J.L. The Structure and Evolution of Young Stellar Clusters. 2007, *Protostars and Planets V*, p. 361-376.
- BESSELL, M. S. UBVRi passbands. 1990, *Astronomical Society of the Pacific*, v. 102, p. 1181-1199.
- BESSELL, M. S.; BRETT, J. M. JHKLM photometry - Standard systems, passbands, and intrinsic colors. 1988, *Astronomical Society of the Pacific*, v. 100, p. 1134-1151.
- BONATTO, C.; BICA, E. Investigating the age and structure of the infrared old open clusters LK 1, LK 10, FSR 1521 and FSR 1555. 2009, *MNRAS*, v. 392, p. 483-496.
- BONATTO, C.; BICA, E. Open clusters in dense fields: the importance of field-star decontamination for NGC 5715, Lyngå 4, Lyngå 9, Trumpler 23, Trumpler 26 and Czernik 37. 2007, *MNRAS*, v. 377, p. 1301-1323.
- BONATTO, C.; BICA, E. The fate of the pre-main sequence-rich clusters Collinder 197 and vdB 92: dissolution?. 2010, *A&A*, v. 516, A81, 11 p..
- BONATTO, C.; LIMA, E. F.; BICA, E. Unveiling hidden properties of young star clusters: differential reddening, star-formation spread, and binary fraction. 2012, *A&A*, v. 540, A137.
- CAMARGO, D., BICA, E., BONATTO, C., SALERNO, G. Discovery of two embedded clusters with WISE in the high Galactic latitude cloud HRK 81.4-77.8. 2015, *MNRAS*, v. 448, p. 1930-1936.
- CARDELLI, J. A.; CLAYTON, G. C.; MATHIS, J. S. The relationship between infrared, optical, and ultraviolet extinction. 1989, *ApJ*, v. 345, p. 245-256.
- CUTRI, R. M. et al. 2MASS All Sky Catalog of point sources. *The IRSA 2MASS All-Sky Point Source Catalog NASA/IPAC Infrared Science Archive*, 2003.
- DAMINELI, A.; HILLIER, D. J.; CORCORAN, M. F.; STAHL, O.; LEVENHAGEN, R. S.; LEISTER, N. V.; GROH, J. H.; TEODORO, M.; ALBACETE COLOMBO, J. F.; GONZALEZ, F.; ARIAS, J.; LEVATO, H.; GROSSO, M.; MORRELL, N.; GAMEN, R.; WALLERSTEIN, G.; NIEMELA, V. The periodicity of the η Carinae events. 2008, *MNRAS*, v. 384, p. 1649-1656.
- DIAS, W. S.; ALESSI, B. S.; MOITINHO, A.; LÉPINE, J. R. D. New catalogue of optically visible open clusters and candidates. 2002, *A&A*, v. 389, p. 871-873.

- DUTRA, C. M.; BICA, E. New infrared star clusters and candidates in the Galaxy detected with 2MASS. 2001, *A&A*, v. 376, p. 434-440.
- ER, X.; JIANG, Z.; FU, Y. Mass Segregation of Embedded Clusters in the Milky Way. 2013, *Research in Astronomy and Astrophysics*, v. 13, p. 277-289.
- FEIGELSON, E. D.; GETMAN, K. V.; TOWNSLEY, L. K.; BROOS, P. S.; POVICH, M. S.; GARMIRE, G. P.; KING, R. R.; MONTMERLE, T.; PREIBISCH, T.; SMITH, N.; STASSUN, K. G.; WANG, J.; WOLK, S.; ZINNECKER, H. X-ray Star Clusters in the Carina Complex. 2011, *The Astrophysical Journal Supplement*, v. 194, A9, 11 p..
- FROEBRICH, D.; SCHOLZ, A.; RAFTERY, C. L. A systematic survey for infrared star clusters with $|b| < 20^\circ$ using 2MASS. 2007, *MNRAS*, v. 374, p. 399-408.
- GOFFE, W. L.; FERRIER, G. D.; ROGERS, J. Global optimization of statistical functions with simulated annealing. 1994, *J. Econ.*, v. 60, p. 65-99
- KHARCHENKO, N. V.; PISKUNOV, A. E.; SCHILBACH, E.; RÖSER, S.; SCHOLZ, R. -D. Global survey of star clusters in the Milky Way: II. The catalogue of basic parameters. 2013, *A&A*, v. 558, A53, 8 p..
- KROUPA, P. On the variation of the initial mass function. 2001, *MNRAS*, v. 322, p. 231-246.
- LADA, C. J.; LADA, E. A. Embedded Clusters in Molecular Clouds. 2003, *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*, v. 41, p. 57-115.
- SALPETER, E. E. The Luminosity Function and Stellar Evolution. 1955, *ApJ*, v. 121, p. 161-167.
- SCHLEGEL, D. J.; FINKBEINER, D. P.; DAVIS, M. Maps of Dust Infrared Emission for Use in Estimation of Reddening and Cosmic Microwave Background Radiation Foregrounds. 1998, *ApJ*, v. 500, p. 525-553.
- SMITH, N.; STASSUN, K. G.; BALLY, J. Opening the Treasure Chest: A Newborn Star Cluster Emerges from Its Dust Pillar in Carina. 2005, *AJ*, v. 129, p. 888-899.
- TUTUKOV, A. V. Early Stages of Dynamical Evolution of Star Cluster Models. 1978, *A&A*, v. 70, p. 57.
- WILLIAMS, J. P.; BLITZ, L.; MCKEE, C. F. The Structure and Evolution of Molecular Clouds: from Clumps to Cores to the IMF. 2000, *Protostars and Planets IV*, p. 97.