

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Instituto de Física

**Desvendando Galáxias Difusas e seus
sistemas de Aglomerados Globulares
em um ambiente de baixa densidade
em torno de NGC 3115**

Marco Antonio Canossa Gosteinski

Porto Alegre
2023

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Instituto de Física

**Desvendando Galáxias Difusas e seus sistemas de
Aglomerados Globulares em um ambiente de baixa
densidade em torno de NGC 3115**

Marco Antonio Canossa Gosteinski

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Física - ênfase em Astrofísica.

Orientadora: Prof^a. Dra. Ana Leonor Chies Santiago Santos

Co-orientadora: Prof^a. Dra. Cristina Furlanetto

Porto Alegre
2023

Agradecimentos

Meus agradecimentos começam pela pessoa que mais me educou e me incentivou a seguir meus sonhos e objetivos, e que desde que era uma criança mostrou a importância da educação e do conhecimento e fez eu me tornar quem sou hoje, a minha mãe Alexandra Canossa. O meu muito obrigado pelo apoio, por todo o esforço nos momentos difíceis, amor e dedicação ao longo de todos esses anos. Agradeço por estar sempre do meu lado quando precisei. Você tem minha admiração e inspiração. Sem você nada disso teria acontecido. Muito obrigado!

Agradeço a minha família: minha mãe, meus dindos Nadia e Agostinho, minha avó, meu avô, meu padrasto João Ricardo e ao Cícero por toda ajuda e apoio, carinho, amor e suporte durante todos esses anos desafiadores. Vocês foram fundamentais para que eu chegasse ao dia de hoje e sem o apoio de vocês não teria conseguido.

Agradeço a todos professores que tive contato ao longo de todos esses anos. Aos professores da minha educação básica que foram muito especiais; aos professores do Instituto Federal do Rio Grande do Sul pela inspiração em seguir na carreira científica. Em especial as professoras Josiane de Souza por ter feito me apaixonar pela física, a professora Camila De Bom por ter me encantado com a Astronomia desde o primeiro ano do ensino médio e a professora Júlia Marques com quem fiz minha primeira iniciação científica e me fez ficar encantado com o fazer científico. Vocês foram muito importantes para mim estar aqui hoje. Aos professores da UFRGS com os quais tive contato nas cadeiras e nas atividades acadêmicas e que contribuíram para meu aprendizado. A professora Daniela Pavani que me orientou durante minha participação no projeto de extensão Observatório Educativo Itinerante. Ao professor Charles Bonatto pelos seus ensinamentos e contribuições para o desenvolvimento deste trabalho. E ao professor Roderick Overzier do Observatório Nacional pelas discussões e apoio importantes para este trabalho.

As minhas orientadoras Ana Leonor Chies Santos e Cristina Furlanetto que foram fundamentais em minha formação científica e acadêmica. Agradeço pelos conhecimentos e sabedorias compartilhados, pelo apoio, pelas oportunidades, pelas conversas e pela inspiração que vocês são para mim. Admiro muito vocês.

Agradeço as grandes amigades que fiz durante esse curso: minha querida amiga Tainá com a qual aprendi muito e passei praticamente todo o curso junto. Pelas palavras de conforto, pelo apoio sempre que precisei, pelas incontáveis horas de Skype e por termos seguidos juntas durante todo o período difícil do ERE. As minhas queridas amigas e amigo Nicole, Kelen, Ana Antonini, Gabriela e Leonardo com as quais sempre estivemos nos apoiando e seguindo em frente. Agradeço pelo acolhimento, pelas risadas, pelo cuidado nas horas difíceis, por nunca termos soltado a mão de ninguém, pela amizade de vocês que é muito especial e foi fundamental para mim. Aos amigos do Café da Física de 2022/02

(Amanda, Gustavo, Isadora, Neto, Naãma e Taína) com os quais passamos longas tardes de verão juntos. E aos meus amigos de fora do curso que conheci na UFRGS e no IFRS, em especial a Bruna e ao Victor pelo carinho, suporte, pelas conversas e por todos esses anos.

Agradeço aos colegas de laboratório e de grupo de pesquisa pelas trocas de conhecimento e experiência, em especial ao Rodrigo Freitas, Emílio Zanatta e a Micheli Moura, pela paciência e pelos ensinamentos nas técnicas desde o começo da Iniciação Científica (IC) até hoje. Seus conhecimentos e conversas foram muito importantes.

Agradeço ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS) que foi instituído e ampliado nos governos de Lula e Dilma e que transformaram minha vida e possibilitaram eu vislumbrar e acreditar em um futuro melhor.

Agradeço a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) pela excelência em educação, pela oportunidade de estudar na melhor Universidade Federal do Brasil e que se manteve firme durante os últimos anos difíceis. Aos órgãos de fomento CNPq e da UFRGS pelas bolsas de Iniciação Científica e de extensão proporcionadas a mim durante minha graduação para meu desenvolvimento acadêmico e de minha pesquisa.

Agradeço a todas e todos que contribuíram de alguma forma para minha formação e desenvolvimento. Muito obrigado!

"Exploring the Universe is a unique adventure of profound beauty and exhilaration, lifting us far beyond our normal self-centered concerns to a degree that no other field can do quite as powerfully."

-W. E. Harris.

Resumo

Galáxias de baixo brilho superficial (LSB) e galáxias anãs estão entre os objetos mais numerosos e também um dos mais misteriosos do Universo, já que a observação e o estudo desses tipos de objetos astronômicos ainda são desafios devido à baixa luminosidade que eles possuem. As galáxias anãs de baixo brilho superficial (LSBds) foram descobertas nos anos 80 na vizinhança da Via-Láctea e no Grupo Local. Entretanto, apenas recentemente tornou-se possível obter dados para estudar essas galáxias em regiões mais distantes do Universo. Quando iniciamos este trabalho, a maioria das LSBds eram encontradas em ambientes de alta densidade e ainda pouco se sabia sobre as propriedades dessas galáxias em ambientes de baixa densidade. As galáxias possuem uma importante correlação entre seus mecanismos de evolução e os ambientes em que elas se encontram. Encontrar e entender as LSBds em um ambiente de baixa densidade é fundamental para construir a teoria por trás da formação de galáxias em pequena escala no Universo. Para ajudar a entender e obter mais informações sobre essas galáxias os Aglomerados Globulares (GCs) nos possibilitam a recuperação de informações acerca do estágio inicial da formação de galáxias, já que eles possivelmente se formam nesse mesmo estágio e preservam as informações dessa época. Além disso, é possível obter informações acerca de sua galáxia principal, como a sua massa, população estelar, distâncias e a quantidade de matéria escura presente no halo da galáxia. Assim, nosso trabalho apresenta a identificação de 24 LSBds identificadas no ambiente de baixa densidade na vizinhança de NGC 3115. Algumas dessas galáxias possuíam fontes pontuais de interesse como candidatos a GCs e, assim, por meio da obtenção de dados mais profundos utilizando o Telescópio Gemini, foi feita a identificação dos sistemas de GCs de 9 LSBds previamente identificadas. Por meio da população de GCs dessas galáxias foi possível determinar a Função Luminosidade dos Aglomerados Globulares e obter um limite superior de massa total dessas galáxias difusas. Além disso, com o objetivo de identificar um sistema análogo ao estudado observacionalmente por este trabalho em simulações, foi implementado um método de seleção e classificação de subhalos na IllustrisTNG-50 em busca de identificar galáxias lenticulares em ambiente de baixa densidade com semelhança à NGC 3115.

Palavras-chave: Galáxias Anãs de Baixo brilho Superficial, Ambiente de baixa densidade, Aglomerados Globulares, Galáxias Lenticulares.

Abstract

Low surface brightness galaxies (LSBs) and dwarf galaxies are among the most numerous and also one of the most mysterious objects in the Universe, as the observation and study of these types of astronomical objects are still challenging due to their low luminosity. Low surface brightness dwarf galaxies (LSBDs) were discovered in the 1980s in the vicinity of the Milky Way and in the Local Group. However, only recently it was possible to obtain data to study these galaxies in more distant regions of the Universe. Having been found mostly in high-density environments, at the start of this work little was known about the properties of these galaxies in low-density environments. Galaxies have an important correlation between their evolution mechanisms and the environments in which they are found. Finding and understanding LSBDs in a low-density environment is critical to building the theory behind small-scale galaxy formation in the Universe. To help understanding and gaining more information about these galaxies, Globular Clusters (GCs) enable us to recover information about the early stage of galaxy formation, since they form at this same stage and preserve information from that time. In addition, it is possible to obtain information about their main galaxy, such as its mass, stellar population, distances, and the amount of dark matter present in the galaxy halo. Thus, our work presents the identification of 24 LSBDs in the low-density environment in the neighborhood of NGC 3115. Some of these galaxies have point sources of interest as GCs candidates, and so, by obtaining deeper data using the Gemini Telescope, the identification of the GC systems of 9 previously identified LSBDs was performed. By means of the GC population of these galaxies it was possible to determine the Luminosity Function of Globular Clusters and to obtain an upper limit of the total mass of these diffuse galaxies. Furthermore, in order to identify a system analogous to the one studied observationally by this work in simulations, a subhalos selection and classification method was implemented in IllustrisTNG-50 in search of identifying lenticular galaxies in a low-density environment with similarity to NGC 3115.

Keywords: low-surface brightness dwarf galaxy, Globular Clusters, Lenticular galaxies, low density environment.

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Sequência de Hubble	1
Figura 1.2 – Fração de galáxias S0s do SAMI em cada ambiente	4
Figura 1.3 – NGC 3115, a galáxia Lenticular mais próxima da Via-Láctea, a 9.7 Mpc. Fonte: NASA/ESA.	5
Figura 1.4 – Aglomerado Globular da Via-Láctea	6
Figura 1.5 – Relação morfologia-densidade das galáxias	8
Figura 2.1 – Campos em torno de NGC 3115 DECam	11
Figura 2.2 – Campo da LSBd 13 GMOS	12
Figura 2.3 – Exemplo de Modelo obtido pela fotometria	16
Figura 2.4 – Diagrama cor-magnitude	18
Figura 3.1 – Distribuição espacial das LSBds identificadas em torno de NGC 3115 .	24
Figura 3.2 – distribuição de cores (g-r)	24
Figura 3.3 – Diagrama magnitude-tamanho	25
Figura 3.4 – Follow-up no Observatório Gemini	26
Figura 3.5 – Exemplo dos resultados para a LSBd 16	27
Figura 3.6 – N_{GC} como função da magnitude absoluta na banda V (M_V)	28
Figura 3.7 – Imagem de resíduo centrada na LSBd 22 na banda i obtida pelo teles- cópio Gemini, com a galáxia elíptica no canto inferior esquerdo.	29
Figura 3.8 – Frequência Específica obtida para os sistemas de GCs	30
Figura 3.9 – Limite superior de massa total para as LSBds	31
Figura 3.10–Distribuição da densidade do ambiente para os subhalos candidatos a S0	32
Figura 3.11–Distribuição da população de galáxias S0 identificadas	33
Figura 3.12–Distribuição final dos subhalos S0	34
Figura 3.13–Subhalo 557712	35
Figura 3.14–Subhalo 515296	35
Figura A.1–Catálogo das LSBds identificadas na banda r	46
Figura A.1–Continuação.	47
Figura A.2–Painel da análise dos sistemas de GCs identificados	50
Figura A.2–Continuação.	51

Lista de Tabelas

Tabela 2 – Descrição dos dados observados no telescópio Gemini	13
Tabela 3 – Identificação de LSBds	23
Tabela 4 – Comparação entre NGC 3115 e ID557721	34
Tabela 5 – Propriedades Estruturais das LSBds	45
Tabela 6 – Propriedades Fotométricas das LSBds	47
Tabela 7 – Catálogo final de Subhalos classificados como S0 em ambientes de baixa densidade	48
Tabela 8 – Continuação.	49

Lista de Abreviações

As abreviações e acrônimos a seguir são usadas ao longo dessa monografia:

Abreviação	Descrição
LSBs	Galáxias Anãs de Baixo Brilho Superficial
UDGs	Galáxias Ultra-Difusas
GCs	Aglomerados Globulares
GCLF	Função Luminosidade dos Aglomerados Globulares
N_{GC}	Número total de aglomerados globulares
DECam	Dark Energy Camera
GMOS	Espectrográfo Multi-Objeto do Gemini
MCMC	Markov Chain Monte Carlo
SFR	Taxa de formação estelar
S0	Galáxias Lenticulares
FWHM	Largura à meia altura
PSF	Função de espalhamento pontual

Sumário

Lista de Figuras	8
Lista de Tabelas	9
Lista de Abreviações	10
1 Introdução	1
1.1 Galáxias	1
1.1.1 Galáxias Lenticulares	3
1.1.2 Galáxias Anãs de Baixo Brilho Superficial (LSBds)	4
1.2 Aglomerados Globulares	6
1.3 A Importância do Ambiente na Formação e Evolução de Galáxias	7
1.4 IllustrisTNG	9
1.5 Objetivos e Estrutura	9
2 Abordagem Observacional e Metodológica	11
2.1 Dados	11
2.1.1 DECam	11
2.1.2 GMOS	12
2.1.3 Dados de simulação - IllustrisTNG50	13
2.2 Amostra e Análise	14
2.2.1 Identificando LSBds no Ambiente de Baixa Densidade de NGC 3115	14
2.2.2 Identificando Populações de GCs	16
2.2.3 Estimativa do Número Total de GCs	18
2.2.4 Galáxias Lenticulares em Simulações	19
3 Resultados e Discussão	22
3.1 Propriedades das LSBds	22
3.2 Sistema de Aglomerados Globulares	26
3.3 Galáxias Análogas a NGC 3115 em Simulações	31
4 Sumário e Conclusões	36
5 Considerações Finais e Perspectivas	38
Referências	39
A APÊNDICE	45

1 Introdução

1.1 Galáxias

As galáxias são sistemas auto-gravitantes de estrelas, gás e permeadas por um halo de matéria escura que se formam a partir de sobredensidades de matéria. Elas são encontradas em diferentes tipos de ambientes no Universo, desde ambientes de baixa densidade, como galáxias isoladas, até ambientes de alta densidade, como um aglomerado de galáxias.

Nosso conhecimento acerca delas começou a se tornar relevante somente no início do século XX. Anteriormente, acreditava-se que os objetos que hoje identificamos como galáxias eram nebulosas e sistemas internos à Via-Láctea. Pelo trabalho de Edwin Hubble em determinar a distância da Nebulosa de Andrômeda de maneira acurada, se constata que essa "nebulosa" não pertencia à Via-Láctea (Lamon e Lima, 2017).

O trabalho de Hubble em provar que a galáxia de Andrômeda não pertencia à Via-Láctea abriu portas para o surgimento de uma nova área do conhecimento na Astronomia: a Astronomia Extragaláctica. Além de conseguir determinar distâncias, seu trabalho em observar diferentes tipos de galáxias mostrou que existem diferenças morfológicas significativas nas quais poderíamos dividir as galáxias em três grupos principais, como apresentado na figura 1.1. Os dois principais são os das galáxias Elípticas e Espirais e o terceiro corresponde a uma zona intermediária chamada de Lenticulares. A diferença entre esses grupos não se limita a sua morfologia, pois existe uma correlação entre a morfologia das galáxias e suas propriedades físicas.

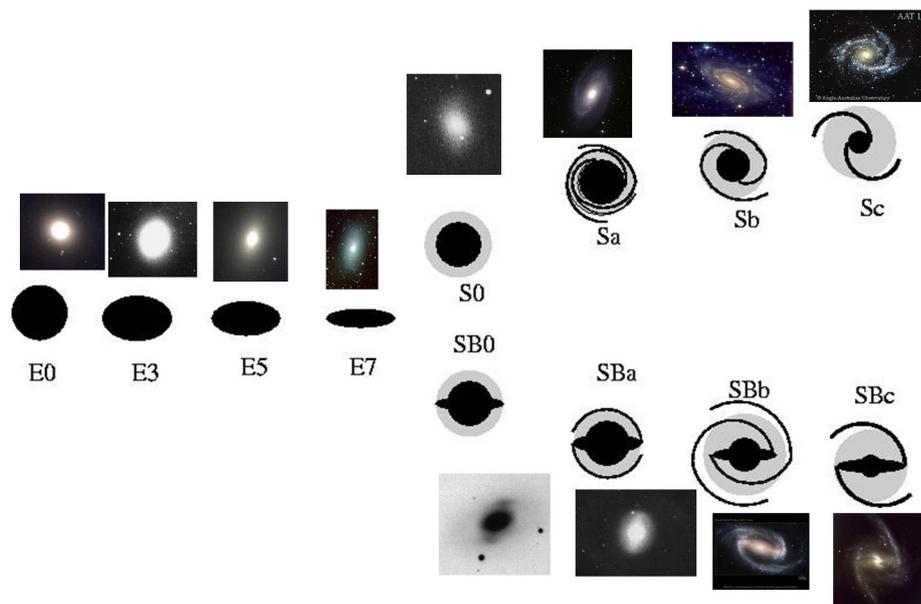


Figura 1.1 – A sequência de Hubble, modelo de classificação morfológica para galáxias regulares com imagens de galáxias de exemplo. Fonte: IF-UFRGS.

As galáxias Espirais são caracterizadas pela presença de um disco em rotação com braços espirais que se conectam a uma região central mais densa. Essas galáxias são conhecidas também como *late-type* pelo fato de possuírem atividade de formação estelar significativa até os dias de hoje. Elas possuem cores azuladas e uma população estelar mais jovem em comparação com os outros grupos (Schneider, 2006).

Já as galáxias Elípticas se caracterizam por sua forma elipsoidal. Elas são conhecidas também como galáxias "*Early-Type*" por não possuírem mais formação estelar significativa e terem formado suas estrelas em um período rápido. Elas possuem populações estelares mais velhas e cores avermelhadas (Schneider, 2006).

As lenticulares ficam em uma zona intermediária entre as elípticas e as espirais no diagrama de Hubble. Elas são caracterizadas por possuir uma estrutura de disco em que as estrelas se localizam (semelhante com as galáxias espirais) e uma região central esferóide, não sendo possível classificá-las como espirais nem elípticas já que elas possuem semelhanças com ambos grupos. Grande parte delas não possuem formação estelar significativa recente, possuindo uma população estelar mais velha. Além desses três grupos do esquema classificatório de Hubble existem outros tipos de galáxias, como as Galáxias Anãs, Irregulares, Ativas e Starbursts (Schneider, 2006).

Além de sua classificação morfológica, as galáxias passam por processos de mudança ao longo do tempo chamado de **Evolução de Galáxias** e, uma das grandes perguntas da Astronomia Extragaláctica se concentra em entender a formação e evolução de galáxias. Há vários fatores que influenciam a formação de uma galáxia e sua evolução dependerá deles. A área de evolução de galáxias também estuda os fenômenos que interferem nas propriedades físicas ao longo do tempo e as mudanças que uma galáxia pode sofrer do momento de sua formação até hoje.

Os processos que conduzem à formação e evolução de galáxias são consequência de propriedades externas da galáxia, como o ambiente em que ela está inserida, e de suas propriedades físicas internas. As interações com o meio externo levam a efeitos como o *Ram-pressure stripping*, fusões entre galáxias e efeitos de interação por maré, entre outros. Os efeitos internos são ventos de supernovas que podem expulsar o gás e parar a formação estelar, núcleo ativo de uma galáxia (AGN), entre outros. Não existe um consenso sobre qual processo domina a evolução de galáxias (Schneider, 2006).

O efeito de *Ram-pressure stripping* é um mecanismo que tem prevalência em ambientes de alta densidade e é causado pela interação da galáxia e de seu conteúdo de gás interior que, ao cair para as regiões centrais de um aglomerado de galáxias, sofrerá uma pressão de arrasto do meio (gás quente) e terá seu gás removido (gás frio). O gás frio é um dos ingredientes fundamentais para uma galáxia formar estrelas, da remoção de seu conteúdo de gás a consequência será a diminuição ou perda de sua formação estelar.

As *fusões* são eventos de interação entre galáxias que ocorrem quando elas colidem entre si. Elas se dividem em duas categorias: as *grandes fusões*, que são quando duas

galáxias massivas se fundem, e as *pequenas fusões*, que ocorre quando uma galáxia massiva agrega uma de menor massa (também conhecido como canibalismo galáctico). Durante as *grandes fusões* é comum que, pelo encontro do gás, ocorra um surto de formação estelar que irá consumir a maior parte do gás frio do interior das galáxias, transformando-o em novas estrelas. Os processos físicos envolvidos nesses eventos poderão levar a mudanças morfológicas e à *quiescência* da galáxia final (Schneider, 2006).

1.1.1 Galáxias Lenticulares

Inicialmente na classificação de Hubble as galáxias Lenticulares (S0) eram pensadas como galáxias que estão em um nível intermediário (de transição) entre as galáxias Espirais e Elípticas, por possuírem um bojo esferoidal em sua região central e um disco. Além disso, as galáxias Lenticulares são conhecidas por possuírem pouco gás e baixa fração de formação estelar comparada com galáxias Espirais (van den Bergh, 1979). Começamos a observar essas galáxias em grande quantidade no Universo Local e em ambientes de mais alta densidade. Pela estrutura morfológica delas, acreditava-se que seu caminho de formação principal ocorria como a evolução de uma galáxia Espiral que havia cessado sua formação estelar e que por estar em interação com um ambiente denso era levada à perda de seus braços espirais. Porém, esse caminho não explica a existência de S0s no Universo de baixa densidade (Dolfi et al., 2020). Novos caminhos de formação e evolução foram propostos e estudados. Pelas evidências existentes hoje há 2 caminhos principais: processo de remoção de gás pelo *Ram-pressure stripping* durante a entrada em um grupo ou aglomerado de galáxias e grandes fusões (Coccatto et al., 2022; Deeley et al., 2021).

Recentes estudos que tentaram traçar os caminhos de formação e evolução dessas galáxias mostraram que parece existir uma correlação entre o ambiente que elas estão inseridas, os caminhos que levavam a sua formação e propriedades físicas intrínsecas a elas. Galáxias Lenticulares em ambientes de baixa densidade tem preferência por se formarem por meio de *grande* ou *pequenas* fusões, enquanto que em ambientes de alta densidade há uma tendência pela formação por meio do *Ram-pressure stripping* do gás devido à queda durante a entrada em um grupo denso de galáxias (Deeley et al., 2021). Sendo assim, o ambiente é um fator importante para determinar que mecanismos contribuíram para a sua formação e evolução e, por consequência, suas propriedades físicas nos dias de hoje.

O trabalho de Deeley et al. (2020a), que utiliza simulações, também indica haver uma preferência pelos mecanismos de formação citados acima, as S0s que possuem suporte rotacional (alta densidade) também têm suas componentes de gás e estrelas em co-rotação enquanto que nas S0s que possuem suporte de pressão há um desalinhamento dessas duas componentes, indicando uma origem externa para a componente de gás (Deeley et al., 2020b). Isso evidencia o fato de que as S0s no campo se formam preferencialmente por interações enquanto que as de ambientes de alta-densidade por um processo de remoção de seu gás.

As galáxias Lenticulares são mais frequentemente encontradas em ambientes de alta densidade, como em regiões centrais de aglomerados de galáxias, e em mais baixos *redshifts*, enquanto que a fração de espirais diminui proporcionalmente (Dressler, 1980). Isso indica que a evolução delas está conectada tanto com o ambiente quanto com o *redshift*. A figura 1.2 obtida por Deeley et al. (2021) apresenta a fração de S0s em diferentes ambientes no *redshift* atual.

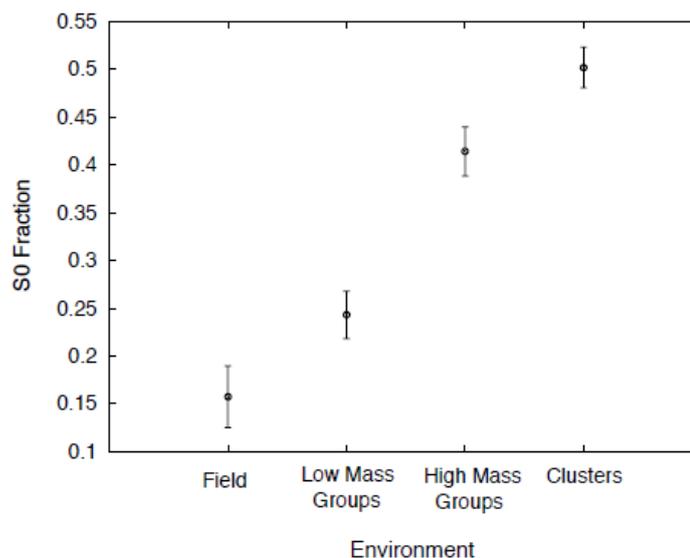


Figura 1.2 – Fração de galáxias S0 na amostra do SAMI Survey em cada ambiente, de campo até aglomerados de galáxias. Fonte: (Deeley et al., 2021).

A galáxia Lenticular mais próxima da Via-Láctea é a NGC 3115, que está a 9.7 Mpc de distância e possui uma população estelar antiga ($\sim 12\text{Gyr}$) e baixa formação estelar e quantidade de gás (Cantiello et al., 2015). A figura 1.3 mostra uma imagem de NGC 3115. A galáxia NGC 3115 possui uma estrutura formada por um disco nuclear central e externo e uma grande quantidade de aglomerados globulares ~ 166 (Cantiello et al., 2018) que apresentam bimodalidade em cor ($(V-I)_0=0.96$ e 1.17) o que indica uma bimodalidade em metalicidades (Guérou et al., 2016).

1.1.2 Galáxias Anãs de Baixo Brilho Superficial (LSBds)

As galáxias anãs de baixo brilho superficial (LSBds, do inglês *low-surface brightness dwarf galaxies*) são objetos caracterizados por possuírem baixo brilho superficial ($\mu_0(B) \gtrsim 24 \text{ mag arcsec}^{-2}$), possuírem massa estelar típica de anãs ($M_\star \lesssim 10^9 M_\odot$) e por possuírem um raio efetivo da ordem de $10 - 170 \text{ pc}$ (Prole et al., 2021). Essas galáxias são encontradas em uma grande diversidade de ambientes e tamanhos. Elas estão entre o tipo de galáxia mais populoso do Universo e podem guardar importantes pistas sobre a formação e evolução de galáxias no geral. Entretanto observá-las ainda é um desafio (Prole et al., 2019b; Martin et al., 2019).



Figura 1.3 – NGC 3115, a galáxia Lenticular mais próxima da Via-Láctea, a 9.7 Mpc. Fonte: NASA/ESA.

Apesar de as galáxias de baixo brilho superficial serem descritas desde os anos de 1980 (Sandage e Binggeli, 1984), foi a descoberta por van Dokkum et al. (2015) de uma galáxia ultra-difusa (ou UDG, do inglês *ultra-diffuse galaxy*) que parece não conter matéria escura que fez ressurgir o grande interesse nessa população de galáxias. As UDGs se caracterizam como um tipo extremo de LSBd pelo fato de serem difusas mas possuem um raio efetivo maior que as LSBds (Conselice, 2018). As UDGs são caracterizadas como galáxias que possuem $R_e \gtrsim 1.5 \text{ kpc}$ e $M_V \lesssim -15$ e com massa estelar $M_\star \gtrsim 10^7 M_\odot$ (van Dokkum et al., 2015). Essa variedade em propriedades físicas sugere que existem diferentes caminhos que levam a formação e evolução dessa população que podem ocorrer por mecanismos seculares ou de ambiente (Prole et al., 2021; Martin et al., 2019; Prole et al., 2019b).

Sendo as galáxias anãs o tipo de galáxia mais numeroso do Universo, encontrar e entender essa população de galáxias é fundamental para se obter uma teoria completa da formação e evolução de galáxias. Esses objetos foram descobertos e estudados, em sua maioria, em ambientes de alta densidade, como grupo e aglomerados de galáxias. Isso ocorre devido a facilidade em se determinar distâncias associando elas ao ambiente denso, o que não é possível em LSBds isoladas, além de requerer maiores tempos de exposição e dificuldades observacionais, como em se obter dados espectroscópicos (Prole et al., 2021). Muitos estudos indicam que suas propriedades variam de acordo com o ambiente no qual elas estão inseridas.

Em ambientes de baixa densidade, as LSBds possuem cores mais azuis e formação

estelar (Zaritsky et al., 2019; Prole et al., 2019b; Tanoglidis et al., 2020), enquanto que em ambiente de alta densidade tendem a ser vermelhas, possuírem uma população considerável de aglomerados globulares (GCs) e população estelar mais velha (> 7 Gyrs). Entretanto, poucas foram encontradas em ambiente de baixa densidade (Lim et al., 2018; Prole et al., 2019a).

1.2 Aglomerados Globulares



Figura 1.4 – Exemplo de Aglomerado Globular, um dos GCs da Via-Láctea Messier 15. Fonte: ESA/NASA.

Aglomerados Globulares (GCs, do inglês *globular clusters*) são agrupamentos esferoidais e compactos de estrelas com uma alta concentração de estrelas ligadas gravitacionalmente em torno de uma região central e que não possuem matéria escura (Beasley, 2020). A figura 1.4 apresenta um exemplo de GC da Via-Láctea: o Messier 15. Os GCs são ligados gravitacionalmente a uma galáxia que os hospeda e ficam nas redondezas dessa galáxia ou em seu halo ¹. Um sistema de aglomerados globulares é a coleção de todos GCs de uma galáxia e suas propriedades se relacionam com a galáxia central. Os GCs possuem população estelar velha (12 Gyr) e não apresentam formação estelar (Harris, 1991).

Os GCs nos permitem obter importantes informações sobre as galáxias que os hospedam pelo fato de se formarem junto com elas e preservarem informações da época de sua formação (Chies-Santos et al., 2011; Beasley, 2020). Através da análise dos GCs, é possível

¹ podendo estarem ligados em aglomerados e não a uma galáxia específica.

obter informações como a massa e a quantidade de matéria escura da galáxia hospedeira. Além disso, a bimodalidade em cor que os sistemas de GCs apresentam pode fornecer detalhes acerca da metalicidade e da idade da população estelar. Por meio da Função de Luminosidade dos Aglomerados Globulares (GCLF, do inglês *Globular Cluster Luminosity Function*) podemos determinar distâncias, através da determinação do pico da GCLF, e até um limite superior para a massa total da galáxia central (Beasley, 2020).

Mais especificamente, a bimodalidade em cores ópticas é referida à característica da população de GCs de possuir dois picos em cor, um para azul (pobres em metais) e uma para vermelho (rico em metais). Além de fornecer informações referentes à metalicidade (Fe/H), a bimodalidade em cor também é associada a mecanismos de formação e evolução de galáxias. Isso ocorre pelo fato de GCs pobres em metais estarem associados a uma origem ex-situ (que foi acretaada pela galáxia) enquanto os vermelhos parecem possuir uma origem in-situ (que se formaram junto com a galáxia, Cantiello et al., 2018).

Fora do Grupo Local temos dificuldades em resolver as estrelas individuais dos GCs. Para galáxias além do Grupo Local começamos a tratar os GCs como fontes pontuais e, dado seu alto brilho superficial, eles são facilmente detectados no Universo próximo. Deste modo, tratamos o sistema de estrelas individuais do grupo local como um agrupamento único para GCs extragaláticos. Eles se tornam uma ferramenta muito importante para estudar galáxias, pois podemos obter informações como a metalicidade, interações, idades, entre outros fatores que nos ajudam a entender melhor os caminhos de formação e evolução da galáxia que os hospedam, além de podermos utilizar esses objetos para determinar distâncias (Harris, 1991; Beasley, 2020).

1.3 A Importância do Ambiente na Formação e Evolução de Galáxias

O ambiente onde uma galáxia se encontra parece contribuir para a sua formação e evolução no Universo. Como já mencionado, os ambientes são definidos como de alta densidade para galáxias que estão presentes em grupos e aglomerados de galáxias. E de baixa densidade para galáxias que estão no campo em isolamento ou cercada por poucas vizinhas (Deeley et al., 2021).

Ambientes de alta densidade são definidos como ambientes com alta fração de galáxias próximas uma das outras, isso é encontrado por exemplo em aglomerados de galáxias, regiões do Universo em que encontramos estruturas formadas por um grande número de galáxias que estão ligadas gravitacionalmente. Os aglomerados de galáxias estão entre as maiores estruturas do Universo já encontradas.

Ambientes de baixa densidade, por outro lado, são aqueles em que encontram-se galáxias que não estão ligadas gravitacionalmente a nenhuma, ou quase nenhuma, outra galáxia ou estrutura e estão gravitacionalmente isoladas.

A existência de uma população diversa de galáxias em termos morfológicos e outras

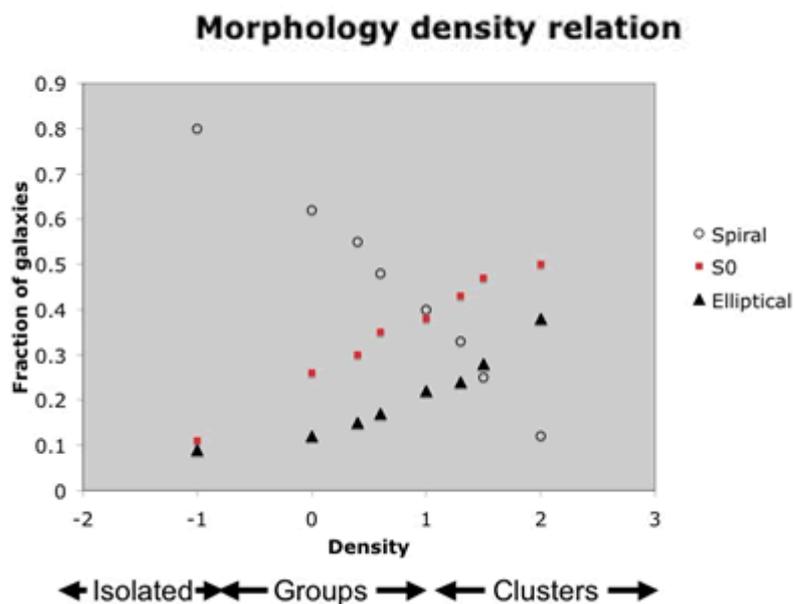


Figura 1.5 – Relação morfologia-densidade das galáxias. Fonte: Cosmos - Swinburne University.

propriedades físicas mostram como a formação e evolução delas irá influenciar suas características. O ambiente, nesse sentido, desempenhará um papel importante em definir os caminhos de formação de uma galáxia e sua evolução. Como por exemplo irá determinar que tipo de *fusão* e interações essa galáxia pode sofrer, mecanismos de interação com gás (como o *Ram-pressure stripping*), interações de maré e efeitos de importunação galáctico, quando galáxias passam próximas o suficiente para interagirem.

Existe uma relação entre densidade do ambiente e morfologia (Figura 1.5) que mostra que há uma preferência para formar galáxias do tipo S0 e elípticas em ambientes de mais alta densidade como grupos e aglomerados de galáxias. Já galáxias Espirais têm preferência por ambientes de baixa densidade. Esse resultado indica que as propriedades das galáxias têm uma dependência quanto ao ambiente que elas estão localizadas (Dressler, 1980).

Existem inúmeras técnicas para determinar o ambiente em torno de uma galáxia: os que utilizam o método baseado no vizinho mais próximo e os de abertura fixa (Muldrew et al., 2012; Cebrián e Trujillo, 2014). O método de vizinho mais próximo é baseado na distância em que encontramos o vizinho mais próximo da galáxia em questão. Uma desvantagem desse método é a questão de projeção. Esse método se mostra útil quando é necessário determinar o ambiente local, dentro de um halo da galáxia. O método de medir ambientes utilizando aberturas fixas se baseia em contar o número de galáxias vizinhas dentro de uma certa abertura com a galáxia de estudo no centro, quanto mais vizinhas essa galáxia possuir mais denso será seu ambiente. Esse método é utilizado para determinar o ambiente em escala maior que um halo (Muldrew et al., 2012).

1.4 IllustrisTNG

A IllustrisTNG é uma simulação cosmológica magneto-hidrodinâmica de formação de galáxias que busca entender os processos físicos que levam uma galáxia a se formar e evoluir ao longo do tempo (de $z = 127$ até $z = 0$). As simulações são feitas em caixas de volume cúbico de 50, 100 e 300 Mpc com componentes de matéria escura, células de gás, traçadores de gás passivo, estrelas, partículas de vento estelar e buracos negros supermassivos. As simulações são feitas com o código AREPO, que consiste em resolver equações de sistemas magneto-hidrodinâmicos com gravidade própria (Pillepich et al., 2018). Cada caixa de simulação possui uma resolução e as três se complementam. Como, por exemplo, a caixa de 300 Mpc pode ser utilizada para estudar grandes estruturas do Universo como aglomerados de galáxias, enquanto que a de 50 Mpc que possui maior resolução, podendo ser utilizada para estudar objetos menores como galáxias individuais, permitindo acessar com mais detalhes as propriedades estruturais dessas galáxias.

A simulação além de utilizar o código AREPO, também emprega modelos físicos de processos relevantes para formação e evolução de galáxias, como: processos radiativos de gás, formação estelar no meio inter-estelar, evolução de populações estelares e enriquecimento químico devido a supernovas, vento de supernovas, processos de formação e crescimento de buracos negros supermassivos entre outros (Nelson et al., 2019).

As informações das partículas na simulação são registradas em *snapshots* de diferentes redshifts ao longo da simulação. Cada *snapshot* é referente a um dado redshift indo de $z = 40$ até $z = 0$ (hoje).

As grandes estruturas (chamadas de Halos) são identificadas na simulação utilizando um algoritmo *friends-of-friends* (FoF) que identifica essas estruturas por sobredensidades de partículas de matéria escura, sendo um equivalente a grupos ou aglomerado de galáxias. Após a identificação dessas grandes estruturas é realizada a identificação de estruturas menores (subhalos) contidas nesses halos principais utilizando o algoritmo SUBFIND. Na simulação as galáxias são representadas por estes subhalos de matéria (Nelson et al., 2015).

Um Halo pode conter inúmeros subhalos que evoluem ao longo dos diferentes *snapshots*. Essas interações entre halos e subhalos são registradas ao longo de Merger Trees que registra ao longo dos *snapshots* os subhalos e halos que são descendentes, e progenitores.

1.5 Objetivos e Estrutura

Este trabalho buscou identificar e estudar galáxias anãs de baixo brilho superficial e seus GCs no ambiente de baixa densidade em torno da galáxia lenticular mais próxima da Via-Láctea NGC 3115. E também, buscamos identificar e estudar uma galáxia com propriedades físicas semelhantes às encontradas em NGC 3115 em simulações cosmológicas. Para isso, foi realizada a fotometria e seleção de uma população de LSBs em torno

de NGC 3115, identificadas suas populações de aglomerados globulares, analisadas as suas propriedades físicas e morfológicas e desenvolvido um método de seleção de galáxias lenticulares em ambientes de baixa densidade na IllustrisTNG-50. Assim, poderemos obter mais informações sobre essas galáxias inseridas em um ambiente nem sempre explorado com prioridade.

2 Abordagem Observacional e Metodológica

Neste capítulo está descrito como os dados utilizados para esse trabalho foram obtidos, os métodos de seleção utilizados e os métodos de análise empregados para a obtenção dos resultados finais.

2.1 Dados

2.1.1 DECam

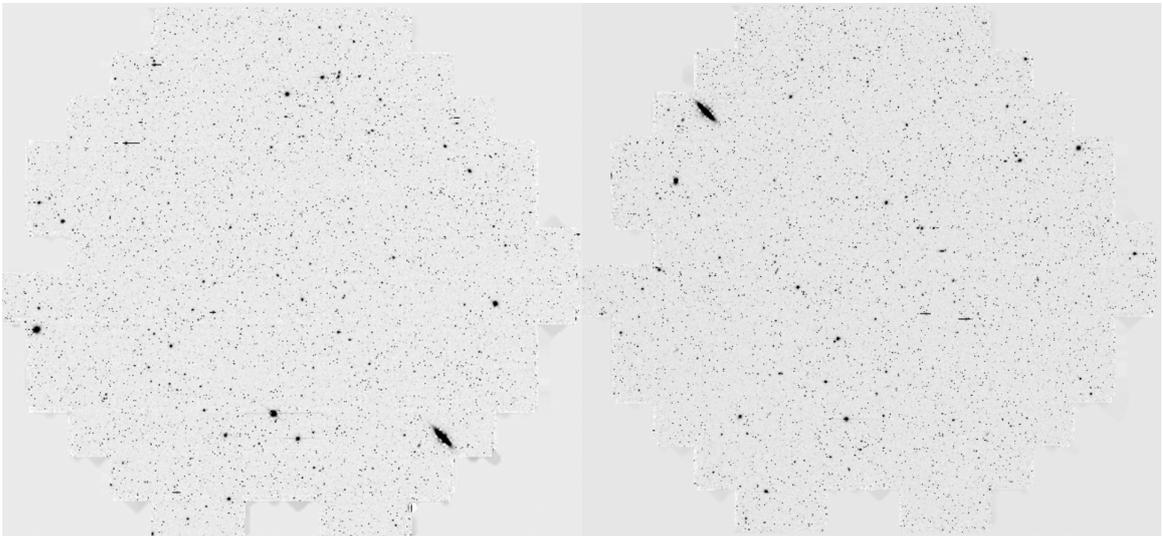


Figura 2.1 – Imagem mostrando os dois campos obtidos com a DECam em torno de NGC 3115, no canto inferior direito e no canto superior esquerdo, com escala de cinza invertida.

A Dark Energy Camera (DECam) é um conjunto de CCDs (com campo de visão de 3 graus quadrados) e está montada no Telescópio de 4 m Victor Blanco localizado no Cerro Tololo Observatório Inter-Americano (CTIO) no Chile (NOIRLab, 2023). Ela permite realizar observações com 9 filtros no intervalo de comprimento de onda de 350-1050 nm

Com o objetivo de identificar uma população de LSBds no ambiente de baixa densidade de NGC 3115 colaboradores obtiveram dados de dois campos na vizinhança de NGC 3115 (com uma distância de aproximadamente 200 vezes o raio efetivo de NGC 3115) utilizando a DECam, durante 4 noites de Fevereiro de 2017, nas bandas g e r (P.I. Ana Chies). O exemplo de um dos campos obtidos é exibido na figura 2.1.

Uma amostra de 41 candidatas a LSBds foi identificada previamente por inspeção visual feita por colaboradores, utilizando os dados obtidos com a DECam (ver seção 2.2). Foi realizada a fotometria dessas candidatas a fim de se obter seus parâmetros estruturais.

2.1.2 GMOS



Figura 2.2 – Exemplo da imagem final de um dos campos (ID 13) na banda g obtidos utilizando GMOS.

O Gemini é um observatório astronômico constituído por dois telescópios de 8.1 metros localizados um em cada hemisfério da Terra, denominados de Gemini Norte e Gemini Sul e localizados no Havaí (Mauna Kea) e no Chile (Cerro Pachon) respectivamente. Juntos, possuem uma cobertura de aproximadamente todo o céu do hemisfério sul e norte nos comprimentos de onda do óptico e regiões do infravermelho.

Os espectrógrafos multi-objeto do Gemini (GMOS) permitem realizar espectroscopia de fenda longa e multi fenda, bem como o imageamento de objetos em 5.5 minutos de arco quadrados de campo de visão. Existe um GMOS em cada telescópio Gemini e eles permitem obter imageamento de banda larga e, também, de banda estreita utilizando determinados filtros (com intervalo de comprimento de onda entre 350 a 1030 nm) ¹.

Foi realizado o *follow-up* (P.I. Cristina Furlanetto) para obter dados mais profundos e de melhor qualidade para estudar os sistemas de GCs de 9 LSBds, previamente identificadas na DECam, em 6 campos de interesse no GMOS Norte e Sul. As observações ocorreram durante 7 noites entre Novembro e Dezembro de 2020 nas bandas g e i ou g e z para alguns campos. As observações foram realizadas em uma série de exposições de 6x300s para a banda g e 8x150s na banda z no Gemini Norte. As exposições na banda i no Gemini

¹ Disponível em: <http://www.gemini.edu/instrumentation/gmos>

Sul variam entre 6x300s e 8x150s, dependendo da magnitude do objeto. Dois campos observados continham duas ou mais LSBds, devido a sua proximidade no céu. Assim, as LSBds 17, 18 e 19; e LSBds 23 e 24 foram observadas em mesmos campos.

Após as observações, os dados foram reduzidos utilizando o pacote de tarefas *DRAGONS - GMOS data reduction*² do Gemini, onde se aplicou a co-adição das exposições, correções de viés, *flat field* e franja (para os dados vindos do Gemini Norte) e após foi realizado o *stacking* das exposições. As co-adições se referem a combinar as imagens de diferentes exposições em uma imagem única, as correções de viés se referem a correções de ruído induzidos pelo CCD e de *flat field* para corrigir a resposta do CCD à luz.

Como as observações vieram sem informações de magnitude de ponto zero, foram obtidos os valores a partir da calibração pela correspondência de objetos contidos no catálogo do Pan-STARRS (Chambers et al., 2016) e pelo Gaia (Gaia Collaboration et al., 2022) com os objetos nos campos observados pelo Gemini. O *seeing* de cada campo foi determinado utilizando o IRAF por meio da determinação do FWHM médio, utilizando as estrelas não saturadas.

A tabela 2 apresenta os dados gerais da observação como *seeing*, tempo de exposição e a magnitude de ponto zero para cada campo. A figura 2.2 apresenta um exemplo da imagem de ciência final obtida na banda g para a LSBd 13.

ID	<i>g</i>			<i>i/z</i>			
	t_{exp} (s)	m_0 (mag)	seeing (")	t_{exp} (s)	m_0 (mag)	seeing (")	banda
13	3000	32.756	0.59	3360	32.004	0.58	i
14	3000	32.881	0.64	1800	32.627	0.56	z
16	1800	32.503	0.66	1200	32.729	0.53	i
17-19	1800	32.483	0.76	1200	32.884	0.54	i
22	6600	32.035	0.80	4950	31.836	0.57	z
23-24	3000	32.192	0.64	1800	32.273	0.52	z

Tabela 2 – Descrição dos campos observados no telescópio Gemini. O tempo de exposição é representado por t_{exp} e a magnitude de ponto zero é representado por m_0 . A coluna banda apresenta em que banda além da g o campo foi observado.

2.1.3 Dados de simulação - IllustrisTNG50

A simulação IllustrisTNG50 é uma simulação do Universo que permite estudar galáxias individuais pelo fato de possuir uma maior resolução em comparação com as outras duas disponíveis do mesmo projeto. Os seus ingredientes são: matéria escura, células de gás, traçadores de gás passivo, estrelas, partículas de vento estelar e buracos negros supermassivos. Ela combina um grande volume e uma alta resolução permitindo estudar galáxias, seus satélites e, pela re-simulação utilizando um modelo semi-analítico, de seus

² Disponível em: <https://www.gemini.edu/observing/phase-iii/reducing-data/dragons-data-reduction-software>

aglomerados globulares (Doppel et al., 2022). A simulação consiste em uma caixa de 50 Mpc³ com resolução de massa bariônica de $8.5 \cdot 10^4 M_{\odot}$, que permite estudar galáxias com $M_{\star} \lesssim 10^9 M_{\odot}$ e limite superior $M_{\star} \lesssim 10^{12} M_{\odot}$.

As informações são separadas em diferentes *Snapshots* que representam diferentes *redshifts* na simulação. As galáxias são definidas como subhalos que são sub-estruturas encontradas em um halo de matéria da simulação. Isso possibilita recuperar informações no tempo de formação e evolução dos subhalos e seus halos progenitores.

Os dados disponibilizados pela simulação podem ser acessados por meio de uma interface web (API) através de consultas (*queries*) e requisições web, permitindo a busca, extração, visualização e análise dos dados em diferentes *redshifts*. Para isso, utilizou-se a implementação de um código em Python para selecionar uma amostra de galáxias candidatas a S0 e em um ambiente de baixa densidade no *snapshot 99* (que corresponde a $z=0$).

2.2 Amostra e Análise

Nessa seção está descrito o método de seleção e análise de galáxias candidatas a LSBds no ambiente de baixa densidade em torno de NGC 3115 através de seus parâmetros estruturais utilizando os dados da DECam; o método de seleção e identificação de sistemas de aglomerados globulares em torno dessas LSBds utilizando os dados do GMOS e o método de seleção de uma sub-amostra de galáxias lenticulares isoladas nos dados da IllustrisTNG-50.

2.2.1 Identificando LSBds no Ambiente de Baixa Densidade de NGC 3115

Identificar e estudar LSBds em ambientes de baixa densidade é um desafio. No entanto, é fundamental para entender a formação de galáxias. O projeto iniciou com os dados obtidos pela DECam em 2017 com o objetivo de estudar as imediações de NGC 3115 buscando objetos com brilho superficial de até ~ 27 mag *arcsec*⁻² e procurar por galáxias ultra difusas (UDG) e LSBds em um ambiente de baixa densidade. Como descrito na seção de Dados, foram obtidos dois campos com raio de 0.5 Mpc nas redondezas de NGC 3115 nas bandas g e r.

Após a inspeção visual dos dois campos obtidos pela DECam, chegou-se à amostra de 41 objetos candidatos a LSBds. Os trabalhos se iniciaram pela realização da fotometria desses objetos utilizando o software IMFIT e *SExtractor*. O IMFIT (Erwin, 2015) é um software especializado na modelagem de imagens astronômicas. Seu método de funcionamento é baseado na minimização de χ^2 , que pode ser feita por meio de diferentes algoritmos. A escolha do algoritmo de minimização é feita pelo usuário e indicada no arquivo de configuração. A modelagem é feita com o uso de funções 2D para representar o perfil de

brilho do objeto estudado. Por meio dele, podemos obter a imagem modelo e de resíduo da galáxia e os parâmetros estruturais obtidos com base no modelo adotado. Esse software possui a vantagem de ser menos dependente de chutes iniciais, que não necessitam estar bem próximos dos valores corretos.

Já o Source Extractor (*SExtractor*) Bertin e Arnouts (1996) é um software de imagens astronômicas que cria catálogos de objetos que estão nessas imagens. Ele é utilizado para a detecção automática de fontes e para a fotometria preliminar desses objetos.

As imagens das 41 candidatas consistiam em um *stamp* de 400 pixel x 400 pixel. Por se tratarem de objetos de baixo brilho superficial, ao realizar a fotometria, precisamos tomar alguns cuidados com objetos luminosos que estejam próximos do alvo. As etapas de análise iniciaram-se utilizando o software *SExtractor* para criar máscaras para retirar objetos luminosos próximos à galáxia candidata com 2σ acima da luz de fundo para que eles não interferissem na obtenção dos parâmetros estruturais e também para quantificar a luz de céu dessas imagens. Para realizar a fotometria superficial é necessário ter uma imagem de modelo para como a luz se espalha nas condições de quando as observações foram realizadas. Para isso, foi feito o modelo de PSF para cada candidata e nas duas bandas utilizando a função gaussiana 2D com a FWHM, obtida pelo *SExtractor* para fontes pontuais não saturadas de cada campo.

Para a fotometria foi utilizado o software IMFIT e para a modelagem do brilho superficial utilizou-se um modelo elipsoidal 2D de perfil de Sérsic (Sersic, 1968) com componente único. Por se tratarem de baixo brilho superficial, o processo de modelagem é sensível à diferenciação da luz de céu e o objeto. Para melhorar a estabilidade do processo de modelagem utilizou-se a função *Sky Background* para modelar uma luz de céu uniforme juntamente com o perfil de Sérsic (o valor de céu para o modelo era obtido pela estimativa do *SExtractor*). A modelagem foi realizada em cada banda separadamente e utilizando os mapas de peso da DECam. Para candidatas nucleadas foi necessário mascarar o núcleo para evitar uma superestimação do índice de Sérsic.

O processo de modelagem foi feito em três etapas: primeiro era feito um modelo utilizando chutes iniciais dos parâmetros da função de Sérsic (como raio efetivo, ângulo de posição, elipticidade e intensidade de brilho superficial) obtidos pela inspeção visual da galáxia e o índice de Sérsic era deixado livre e com valor inicial 1 para ser encontrado pelo modelo. Esse processo era feito com o algoritmo de Levenberg-Marquardt. Em seguida, eram analisados os parâmetros estruturais obtidos pelo modelo e a imagem de resíduo, para modelos que não convergiam ou que a imagem de resíduo possuía erros era refeito o modelo fixando um parâmetro da função até se obter o melhor modelo. Os modelos eram avaliados então pelo valor de χ^2 obtidos e pelos fatores descritos acima. Por fim, era feito um modelo final com base nos parâmetros obtidos pela segunda etapa utilizando o algoritmo de Evolução Diferencial (DE) do IMFIT, que é menos sensível a mínimos locais quando comparado com o Levenberg-Marquardt. A figura 2.3 mostra um exemplo do



Figura 2.3 – Exemplo do modelo obtido na banda r para a LSBd 13. O painel da esquerda é a imagem original da candidata, o painel do meio é o modelo pelo *IMFIT* e o painel a direita é a imagem de resíduo.

modelo final obtido para a LSBd 13.

O *IMFIT* não obtém valores para magnitudes diretamente, apenas os parâmetros que descrevem o perfil de brilho superficial. A magnitude m é calculada utilizando o fluxo total e a magnitude de ponto zero do respectivo campo. O fluxo total do modelo pode ser obtido por meio da seguinte equação: (Graham e Driver, 2005):

$$F = 2\pi R_e^2 I_e \frac{ne^{b_n}}{b_n^{2n}} \Gamma(2n)(1 - \epsilon), \quad (2.1)$$

onde b_n é uma constante, n é o índice de Sérsic, $\Gamma(2n)$ é uma função gamma, ϵ representa a elipticidade, R_e o raio efetivo, I_e a intensidade de brilho superficial no raio efetivo.

E então, foi possível obter o brilho superficial médio dentro do raio efetivo usando a equação (Graham e Driver, 2005):

$$\langle \mu \rangle_e = m + 2.5 \log(2\pi R_e^2). \quad (2.2)$$

Os parâmetros estruturais e as magnitudes obtidos são salvos em uma tabela e seus resultados são apresentados no capítulo 3 e no apêndice A.

2.2.2 Identificando Populações de GCs

Os GCs são importantes objetos astronômicos pois preservam informações dos estágios iniciais de uma galáxia e podemos utilizá-los como uma ferramenta para estudar as galáxias que os hospedam. Ao analisar as imagens de resíduos dos modelos obtidos com a DECam e descritos na subseção 2.2.1 notou-se que muitas candidatas a LSBds possuíam fontes pontuais de interesse que poderiam ser GCs.

Com o objetivo de identificar populações de GCs nas LSBds em torno de NGC 3115, foi feito um *follow-up* dessas LSBds no telescópio Gemini, para obter dados mais profundos e de melhor qualidade, utilizando o GMOS no segundo semestre de 2020. Foram observadas

9 LSBds em 6 campos do GMOS e mais detalhes acerca da observação e redução de dados são apresentados na seção 2.1.2.

Com os campos obtidos pelo GMOS reduzidos foi prosseguido pela criação das imagens das galáxias no tamanho de 128"x 128" em cada uma das bandas. Para identificar e analisar as fontes pontuais candidatas a GCs precisamos subtrair a galáxia da imagem final para evitar contaminações da luz da galáxia nas fontes. Dessa forma, seguiu-se os mesmos procedimentos adotados para fotometria descritos na subseção 2.2.1 para gerar imagens de resíduo com o IMFIT a partir dos dados do GMOS.

Para detectar e medir as fontes pontuais na imagem de resíduo utilizou-se o *SExtractor* no modo *dual-band* em que se utiliza uma banda de melhor *seeing* para detectar os objetos e eles são medidos nas duas bandas com base na localização dessas fontes na banda de melhor qualidade. Para a detecção de fontes utilizando o modo *dual-band* escolheu-se a banda *i* (quando a observação havia sido feita nas bandas *g* e *i*) e a banda *g* (quando as observações haviam sido feitas nas bandas *g* e *z*).

O *SExtractor* gera um catálogo das fontes detectadas de uma imagem com informações referente às coordenadas de cada objeto, bem como medidas como magnitude, FWHM, raio, entre outros. Por meio desses catálogos foi feita a seleção das fontes pontuais candidatas a GCs.

Para fazer a seleção da amostra de candidatos a GCs foi criado um método de seleção com base na magnitude, cor, distância até a galáxia central e parâmetro *CLASS_STAR* do *SExtractor*. Esse último parâmetro utiliza inteligência artificial para separar objetos como galáxia (valor = 0) e estrela (fonte pontual, valor = 1) e pode variar entre 0 e 1. Utilizou-se esse parâmetro nas bandas de melhor qualidade com o critério de $CLASS_STAR \geq 0.05$ para excluir possíveis resíduos da galáxia que poderiam permanecer na imagem de resíduo.

O critério de seleção em cor para os GCs foi adotado seguindo o intervalo do valor esperado para os GCs confirmados de NGC3115 (Forbes et al., 2017). A seleção das fontes pontuais candidatas a GCs seguiu o seguinte critério em cor: $0.25 \leq (g - z) \leq 2$ e $-0.1 \leq (g - i) \leq 1.85$. A figura 2.4 exemplifica o processo de criação do método de seleção mostrando a região esperada dos objetos de NGC3115 (Forbes et al., 2017), do Gaia para comparação e onde caem as fontes pontuais selecionadas como GCs e os intervalos de seleção em cor (linhas verticais) e magnitude (linha horizontal). Para distância adotou-se o critério de objetos a até 3.5 raios efetivos da galáxia principal, onde considerou-se o R_e obtido pelo IMFIT. Por fim, foram utilizados os objetos identificados no Gaia e utilizando o software TriLegal para fazer a descontaminação dos objetos pertencentes à Via-Láctea.

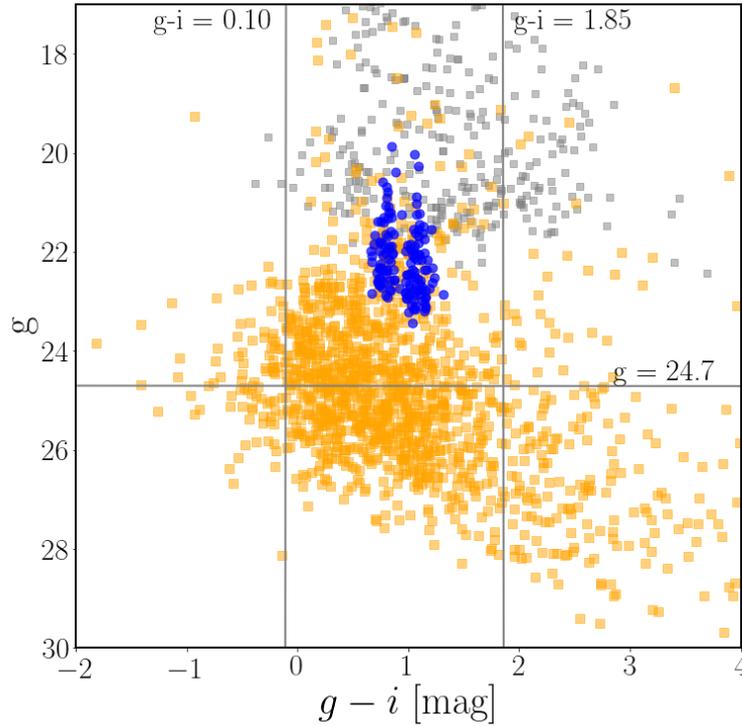


Figura 2.4 – Diagrama cor-magnitude para as fontes pontuais das 9 LSBds em amarelo. Os círculos azuis representam os GCs pertencentes a NGC 3115 (Forbes et al., 2017). Os pontos cinza são as fontes do Gaia. As linhas verticais representando o corte em cor feito.

Em resumo, o critério de classificação das fontes pontuais na imagem de resíduo e de seleção de candidatos a GCs obedeceu os seguintes critérios, foram selecionadas fontes pontuais cujas quais obedeciam:

- **Corte em cor:** $0.25 \leq (g - z) \leq 2$ e $-0.1 \leq (g - i) \leq 1.85$;
- **Corte em magnitude:** $m_g \leq 24.7$;
- **Corte em distância:** $D \leq 3.5R_{eff}$;
- **Corte em *CLASS_STAR* na banda g:** $CLASS_STAR_g \geq 0.05$.

2.2.3 Estimativa do Número Total de GCs

Após a identificação de fontes pontuais candidatas a GCs nos dados obtidos com o telescópio Gemini e da análise dessas populações, foi feita a estimativa do número total de GCs dessas LSBds. A estimativa do número total de GCs (N_{GC}) é um parâmetro estatístico importante, pois por meio dele conseguimos extrair mais informações sobre as galáxias que hospedam esses sistemas. Por exemplo, o N_{GC} se correlaciona muito bem com a massa total da galáxia que os hospeda ($N_{GC} \propto M_T^{0.92}$) (Harris et al., 2017; Zaritsky, 2022a).

Para estimar esse parâmetro, precisa-se obter a função de luminosidade dos aglomerados globulares (GCLF). Essa função é definida como o número relativo de GCs por unidade de magnitude e possui a forma de uma função Gaussiana clássica. A GCLF da Via-Láctea, por exemplo, possui um pico, chamado por *turn-over* em $M_V = -7.4$ e que pode ser utilizado como uma forma de estimar distâncias (Harris, 1991). Por meio da GCLF podemos inferir estatisticamente propriedades físicas da galáxia que os hospeda, como por exemplo: a população total de GCs dessa galáxia (N_{GC}), distribuições espaciais, entre outras (Harris, 1991).

Para determinar a GCLF de cada LSBd foi assumido uma distribuição Gaussiana e então utilizado o algoritmo de Markov Chain Monte Carlo (MCMC) através do desenvolvimento de um código baseado no pacote *emcee* (Foreman-Mackey et al., 2013) para obter os parâmetros da distribuição Gaussiana na banda g (média μ_g , dispersão σ_g e amplitude A_g). Para utilizar o pacote *emcee* é necessário inserir valores de chutes iniciais, assim, utilizou-se valores típicos para a distribuição de sistemas de GCs em LSBds encontrados na literatura. O MCMC foi implementado por meio de 32 caminhantes e 50000 passos devido ao baixo número de fontes pontuais classificadas como GCs encontrados nessas LSBds. Ao fim desse processo obteve-se as GCLFs dos sistemas de GCs das LSBds da nossa amostra.

Para determinar o N_{GC} utilizou-se o pacote *scipy* em Python com a função *integrate.quad* para integrar a Gaussiana com os valores de distribuição da banda g obtidos pelo MCMC. O número de GCs é definido pela equação (Harris, 1991):

$$N_{GC} = \int_0^{\infty} A \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx, \quad (2.3)$$

onde A é a amplitude da distribuição, x é o valor de magnitude de cada ponto, μ é o valor médio da distribuição de magnitude e σ é a dispersão da distribuição.

O *emcee*, ao fim do processo, disponibiliza as incertezas de cada parâmetro estimado. Propagando-se as incertezas nesses parâmetros, obteve-se a incerteza no N_{GC} . Baseado no trabalho de Prole et al. (2019b), que mostrou que sistemas de GCs com N_{GC} menores que 1 são consistentes com não possuírem GCs, foram excluídos da amostra duas LSBds que satisfazem essa condição.

2.2.4 Galáxias Lenticulares em Simulações

As simulações mostram que, apesar de ter tendências para formar mais halos de matéria escura do que o que observamos, repetem com certa confiança as propriedades de galáxias que observamos. Buscou-se identificar uma galáxia com propriedades semelhantes às de NGC 3115 na simulação cosmológica IllustrisTNG com o objetivo de em trabalhos futuros simular a evolução de GCs nos sistemas de galáxias S0 isoladas e suas satélites anãs e analisar se as mesmas propriedades que as vistas observacionalmente são encontradas

(Doppel et al., 2022).

Para isso, utilizou-se a IllustrisTNG-50 por ter uma alta resolução que permitirá estudar as galáxias satélites e seus sistemas de GCs. Os dados da simulação são separados em diferentes *Snapshots* (diferentes *redshifts*) o que permite acessar diferentes estágios evolutivos dos subhalos em estudo.

Para identificar um subhalo com características semelhantes às encontradas em NGC 3115, foi criado um método de seleção com base em propriedades físicas da galáxia e um método de determinação e seleção de ambiente.

Para determinar os subhalos candidatos a galáxias S0 primeiramente, foi selecionada uma amostra de subhalos impondo um limite inferior de massa estelar $M_{\star} \geq 10^{10} M_{\star}$. Esse critério de seleção foi baseado em (Deeley et al., 2020a; Dolfi et al., 2022), obtendo uma amostra de 881 subhalos. Também foi estabelecido um limite superior para a taxa de formação estelar (SFR) de $SFR \leq 1 M_{\odot} yr^{-1}$ para garantir que a amostra só contenha galáxias sem formação estelar significativa, como é esperado para galáxias S0 (Xu et al., 2021; Dolfi et al., 2022, 2020). Aplicando o corte em SFR chegou-se a uma amostra final de 370 subhalos candidatos a galáxias S0.

Segundo os trabalhos de Muldrew et al. (2012); Cebrián e Trujillo (2014) existem dois métodos principais para se determinar o ambiente de uma galáxia: um para determinar o ambiente local dentro do halo (vizinho mais próximo) e outro para determinar o ambiente em larga escala (abertura fixa). Baseado nisso, optou-se por utilizar o método de medição de ambiente baseada em abertura fixa, que consiste em contar o número de vizinhos de uma galáxia dentro de certa abertura, para classificar o ambiente de cada subhalo.

Foi necessário implementar um código para calcular distâncias entre os subhalos da Illustris (considerando os limites periódicos da caixa de 50 Mpc para evitar erros no cálculo da distância de objetos próximos às bordas) e com as distâncias selecionar os subhalos dentro da abertura em torno de cada candidata a S0.

O código consiste em obter as informações dos subhalos candidatos a S0 e de todos os subhalos da Illustris com $M_{\star} \geq 10^8 M_{\odot}$ e, então, utilizando a função da biblioteca *scipy* chamada *cKDTree* para calcular a distância de todos subhalos para selecionar aqueles que estão dentro de uma abertura fixa de cada galáxia candidata a S0. A função *cKDTree* cria uma árvore com pontos de 3 dimensões (para esse caso) e consegue encontrar os vizinhos próximos dentro de certo raio de maneira rápida e levando em consideração os limites periódicos da caixa. Foi escolhido o raio de abertura fixa igual a 2 Mpc até o subhalo em estudo baseado nos trabalhos de Cebrián e Trujillo (2014); Dolfi et al. (2022); Johnston et al. (2022).

Após usar a função *cKDTree* eram retornados os IDs dos subhalos dentro da abertura fixa de cada candidata a S0. Com isso é possível determinar o número de vizinhos próximos a cada galáxia candidata e a massa estelar de cada vizinho. A densidade do ambiente é

definida como (Cebrián e Trujillo, 2014):

$$\rho_i = \frac{1}{4/3\pi R^3} \sum_K^N M_{ik}, \quad (2.4)$$

onde R é a abertura fixa definida como 2 Mpc e M_{ik} é a massa estelar total dos k vizinhos com $M_* \geq 10^8 M_\odot$ dentro de 2 Mpc da galáxia em questão.

A próxima etapa consistiu em classificar morfologicamente os subhalos classificados, para isso utilizou-se os catálogos de classificação morfológicas disponíveis pela Illustris e elaborado por Rodriguez-Gomez et al. (2019) pela fotometria de imagens simuladas para o Pan-STARRS e SDSS.

3 Resultados e Discussão

Neste capítulo estão descritos os resultados obtidos a partir da análise das propriedades das LSBds, de seus candidatos a aglomerados globulares e da identificação de uma galáxia semelhante a NGC 3115 em simulações.

3.1 Propriedades das LSBds

Nesta seção serão apresentados a análise estrutural e de fotometria para as candidatas a LSBd selecionadas na amostra final. Pela identificação e análise da população de 41 LSBds foi possível obter as propriedades físicas dessas galáxias e comparar com outros trabalhos anteriores. Após a análise das propriedades físicas obtidas pelo *IMFIT*, como raio efetivo, magnitude aparente, e pelo modelo gerado foram descartadas 17 objetos candidatos por não satisfazerem os critérios para serem consideradas LSBd (Por possuir propriedades estruturais diferentes ou serem considerados artefatos). Assim, encontrou-se uma amostra final de 24 objetos candidatos a LSBds.

A tabela 3 mostra a amostra final de 24 candidatas a LSBds identificadas por este trabalho. Algumas das candidatas identificadas foram reportadas por outros trabalhos como o de Cantiello et al. (2018), que identificou oito LSBds em torno de NGC 3115 (ID 4, 17, 18, 19, 21), o de Sharina et al. (2005), que identificou a LSBd ID16 e, mais recentemente enquanto o trabalho estava em finalização, Carlsten et al. (2022) identificou 8 LSBds em comum com nossa amostra (identificados por * na tabela).

As propriedades estruturais e fotométricas obtidas ao fim do processo de análise estão apresentadas nas tabelas 5 e 6 no apêndice A. Utilizando o módulo de distância de NGC 3115 foram obtidos os valores de raio efetivo para cada LSBd em Kpc. Por meio desses dados apresentados nas tabelas foi possível comparar a amostra de LSBds com outros trabalhos da literatura, confirmando os valores encontrados e analisando suas propriedades.

A figura 3.1 apresenta a distribuição no céu, com os dois campos obtidos pela DECam para a amostra final de 24 galáxias candidatas a LSBd pertencentes ao ambiente de baixa densidade de NGC 3115, elas são apresentadas com suas cores, posição angular e elipticidades obtidas a partir do modelo de cada uma. As galáxias candidatas identificadas possuem um valor mediano, médio e de desvio padrão de cor (g-r) igual a 0.40, 0.38 e 0.28 respectivamente.

Além disso, é possível notar da figura 3.1 que parece existir uma correlação entre a cor da LSBd em relação a sua proximidade com NGC 3115, e com LSBds mais vermelhas próximas a região central e mais azuis nas regiões mais distantes.

A figura 3.2 apresenta a distribuição de cores para as LSBds identificadas comparadas com a amostra do Volume Local de Carlsten et al. (2022) e a amostra do Dark Energy

ID	Nome	RA (J2000)	Dec (J2000)
1	dw100649-082105	10:06:49.155	-08:21:05.24
2*	dw100634-082819	10:06:34.818	-08:28:19.13
3	dw1006009-082426	10:06:09.229	-08:24:26.36
4	dw100553-075248	10:05:53.759	-07:52:48.97
5	dw100539-082337	10:05:39.688	-08:23:37.28
6*	dw100535-074459	10:05:35.057	-07:44:59.31
7	dw100216-075729	10:02:16.977	-07:57:29.82
8	dw100158-085117	10:01:58.141	-08:51:17.70
9	dw100201-081836	10:02:01.053	-08:18:36.60
10	dw100136-075230	10:01:36.995	-07:52:30.49
11*	dw100054-083149	10:00:54.926	-08:31:49.70
12	dw100053-082223	10:00:53.542	-08:22:23.22
13*	dw100000-074116	10:00:00.851	-07:41:16.90
14	dw101023-065948	10:10:23.914	-06:59:48.31
15	dw100955-071929	10:09:55.493	-07:19:29.69
16*	dw100720-071547	10:07:20.228	-07:15:47.51
17*	dw100626-073257	10:06:26.642	-07:32:57.41
18*	dw100633-073033	10:06:33.600	-07:30:33.05
19*	dw100612-073002	10:06:12.626	-07:30:02.41
20	dw100532-063420	10:05:32.809	-06:34:20.37
21	dw100512-073256	10:05:12.004	-07:32:56.75
22	dw100454-064231	10:04:54.206	-06:42:31.69
23	dw100407-064747	10:04:07.131	-06:47:47.06
24	dw100356-064527	10:03:56.460	-06:45:27.86

Tabela 3 – ID e coordenadas equatoriais para as candidatas a LSBds identificadas neste trabalho. Os objetos em comum com Carlsten et al. 2022 estão marcados por *.

Survey de Tanoglidis et al. (2020). Nela é possível identificar que a amostra de LSBds identificadas em torno de NGC 3115 segue o que é encontrado em outros trabalhos.

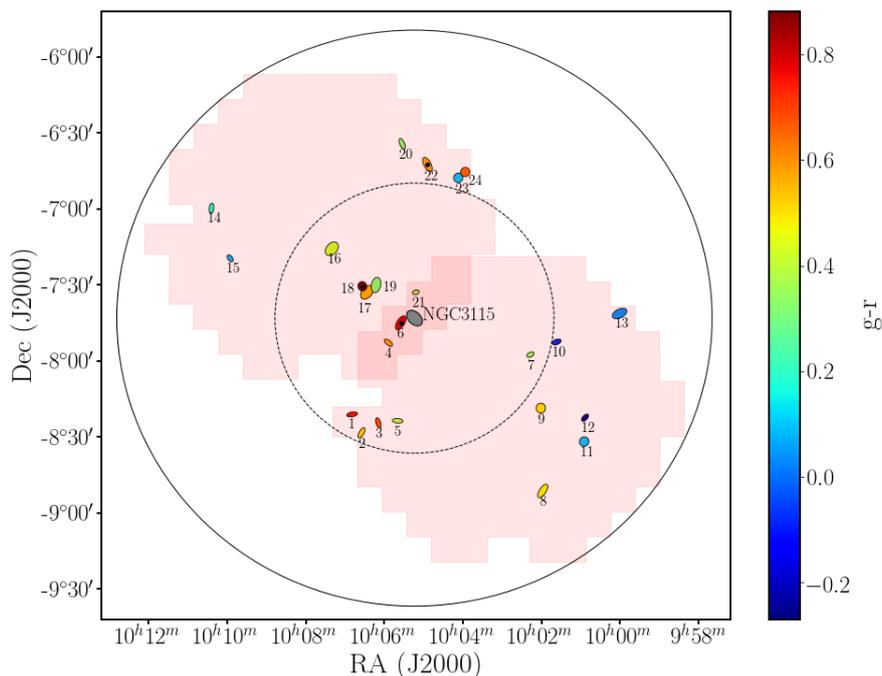


Figura 3.1 – Distribuição espacial das 24 LSBds em torno de NGC 3115 com os dois campos observados pela DECam sobrepostos. As LSBds são representadas por suas cores ($g-r$), elipticidades e posições angulares obtidas pelo *IMFIT* e as nucleadas possuem um ponto no centro. O círculo tracejado representa o raio de 150 kpc e o sólido de 320 kpc. Fonte: Chies-Santos et al. *In prep.*

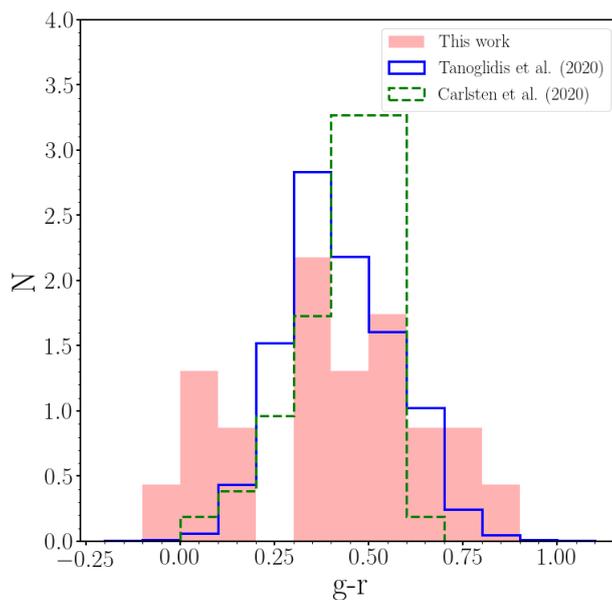


Figura 3.2 – Distribuição de cores ($g-r$) para as candidatas a LSBd identificadas. Fonte: Chies-Santos et al. *In prep.*

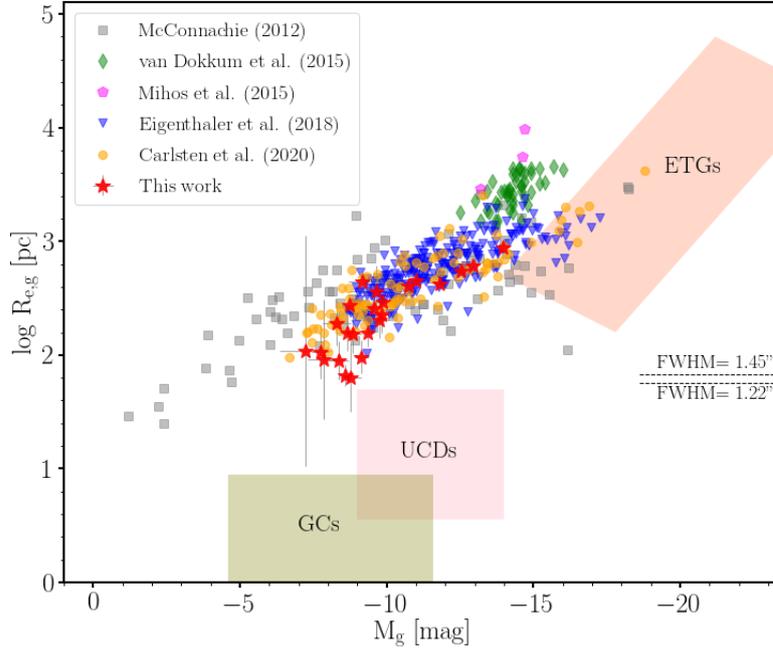


Figura 3.3 – Diagrama de magnitude absoluta (M_g) por tamanho (raio efetivo na banda g) para a amostra de LSBds identificadas (estrelas vermelhas) Fonte: Chies-Santos et al. *In prep.*.

Uma das LSBds identificadas (ID6) já foi amplamente estudada por Sharina et al. (2005) que analisou seus aglomerados globulares, o que pode ser utilizado como comparação dos métodos empregados por esse trabalho. No trabalho de Sharina et al. (2005), é encontrada a magnitude na banda V para a LSBd ID6 igual a $M_V = -14.4$. Utilizando a equação de Lupton¹ $V = g - 0.5784 \cdot (g - r) - 0.0038$ podemos obter uma conversão para magnitude na banda V por meio das magnitudes encontradas por este trabalho na banda g e r. Assim, foi obtido o valor de $M_V = -14.32$ para nossos dados da DECam, um valor próximo que demonstra a acurácia do método de fotometria aplicado.

Para confirmar que os objetos identificados possuíam propriedades físicas referentes a galáxias LSBd foi feita um diagrama de magnitude absoluta na banda g pelo tamanho (raio efetivo na banda g) comparando os valores encontrados para as 24 galáxias com outras amostras na literatura de galáxias anãs e UDGs. Para calcular a magnitude absoluta consideramos que todas LSBds estão na mesma distância de NGC 3115 (módulo de distância $m-M = 29.93$ Tonry et al. (2001)). A figura 3.3 mostra o diagrama obtido onde é possível notar que os objetos identificados em torno de NGC 3115 caem na mesma região dos de Carlsten et al. (2020) e Eigenthaler et al. (2018), confirmando que esses objetos são candidatos a LSBds satélites de NGC 3115, e não UDGs, que possuem um raio maior ($R_{eff} \geq 1.5 kpc$).

¹ <https://www.sdss4.org/dr12/algorithms/sdssUBVRITransform/Lupton2005>

3.2 Sistema de Aglomerados Globulares

Durante o processo de análise da fotometria das LSBds nos dados da DECam notou-se que muitas delas possuíam fontes pontuais em sua imagem de resíduo que poderiam ser populações de aglomerados globulares. Deste modo, obteve-se tempo de observação (de 9.5 hr) no Observatório Gemini (ver seção 2.1.2 e 2.2.2) para obter dados mais profundos e de melhor qualidade para identificar essas populações de GCs.

Após, procedemos como descrito nas seções anteriores (2.2.2 e 2.2.3), tendo como passo final a seleção das fontes pontuais candidatas a GCs. A figura 3.4 exibe um painel com as imagens finais na banda g dos dados das 9 LSBds, observadas com o Gemini, após o processo de redução.

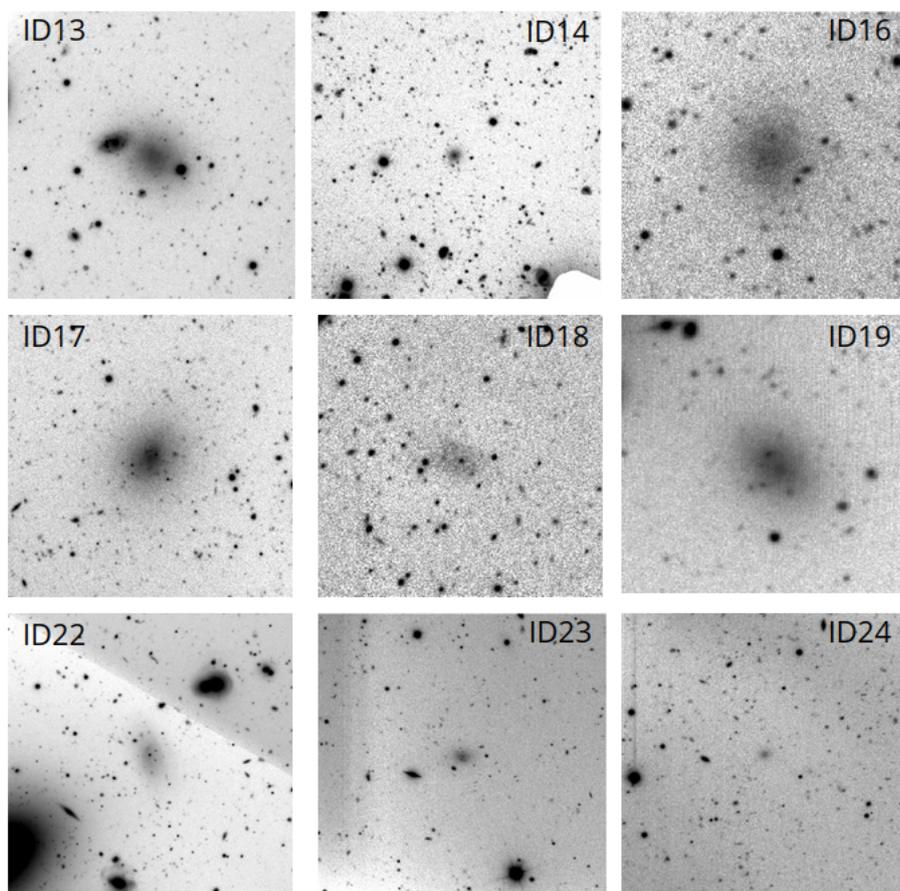


Figura 3.4 – Imagem na banda g obtidas após o processo de redução dos dados do Gemini para as 9 LSBds que tiveram *follow-up*.

Seguindo o critério de seleção baseado em cor, magnitude, distância da galáxia central e pelo parâmetro CLASS_STAR (ver seção 2.2.2) do SExtractor obteve-se as populações de objetos candidatos a GCs para as LSBds citadas e por meio destes objetos as GCLFs de seus respectivos sistemas.

Ao fim do processo de seleção das populações de objetos candidatos a GC de cada LSBd e da determinação da GCLF de cada sistema foi possível recuperar o número total

de GCs (N_{GC}) para cada galáxia como descrito na seção 2.2.3. Neste processo foram encontradas duas LSBds com N_{GC} consistente como não possuindo uma população de GCs, a LSBd 14 e 24, que foram eliminadas da amostra para os próximos passos.

A figura 3.5 apresenta um exemplo dos resultados obtidos pelos processos descritos anteriormente de seleção dos objetos candidatos a GCs, sua distribuição em cor e a GCLF obtida. No painel à esquerda é exibido a distribuição espacial no céu dos objetos candidatos a GC que passaram pelo critério de seleção. No painel do meio é apresentado o diagrama cor-magnitude em $g - z$ vs g para as fontes selecionadas em torno de LSBd 16, em que os pontos azuis representam os objetos selecionados com $CLASS_STAR_g \geq 0.05$. Já no painel à direita é apresentada a GCLF obtida para a mesma LSBd. É possível notar que o pico da GCLF obtida indica uma distância maior do que a de NGC 3115. Entretanto, isso pode estar relacionado ao baixo número de GCs dessa galáxia.

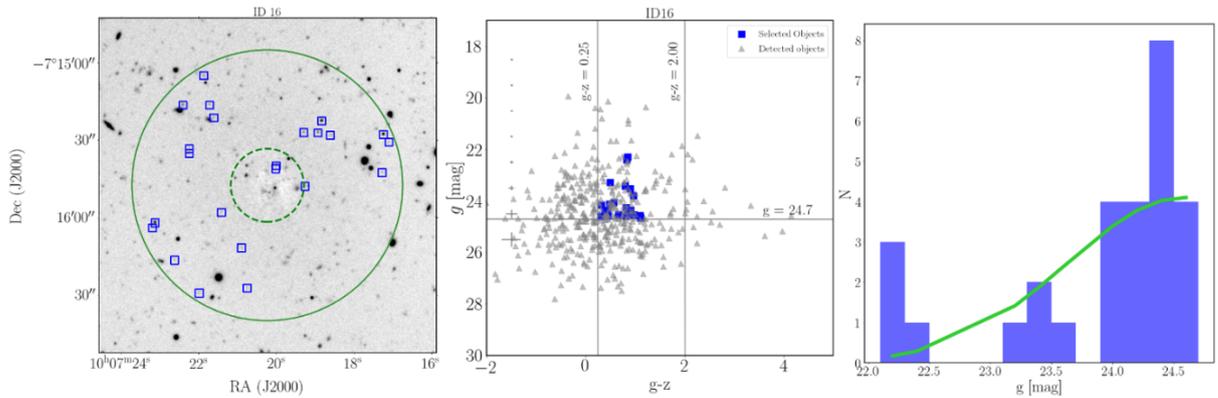


Figura 3.5 – *Painel esquerdo*: A distribuição espacial para os objetos candidatos a GCs da LSBd 16 com os objetos selecionados marcados pelos quadrados azuis. A linha sólida verde indica a distância de $3.5 R_e$ e a linha tracejada verde representa a distância de $1 R_e$. *Painel do meio*: Diagrama cor-magnitude para a respectiva LSBd. A linha horizontal cinza indica o corte em magnitude e as linhas verticais cinzas representam os cortes em cores. *Painel direito*: Número de GCs por bin de magnitude para a respectiva LSBd com a GCLF obtida ajustada representada pela linha verde.

Por meio da equação 2.3 foram obtidas as estimativas de número total de GCs para cada galáxia. A figura 3.6 apresenta o N_{GC} como função da magnitude absoluta na banda V (M_V) para as respectivas galáxias LSBds hospedeiras em torno de NGC 3115, contando também com dados da literatura para comparação. Pela figura é possível notar que, com exceção do ponto que representa a LSBd 22, todos os outros seguem a tendência da distribuição de Prole et al. (2019b), estando sistematicamente acima dos mesmos. Vale notar que a amostra de Prole et al. (2019b) é composta de galáxias anãs de Fornax, que estão a uma distância razoavelmente próxima à NGC 3115 (distância de Fornax ~ 20 Mpc).

O que ocorre com a LSBd 22 é que, como a figura 3.7 mostra, ela está próxima de uma galáxia elíptica massiva (MCG-01-26-016) a 70 Mpc da Via-Láctea (da Costa et al., 1998).

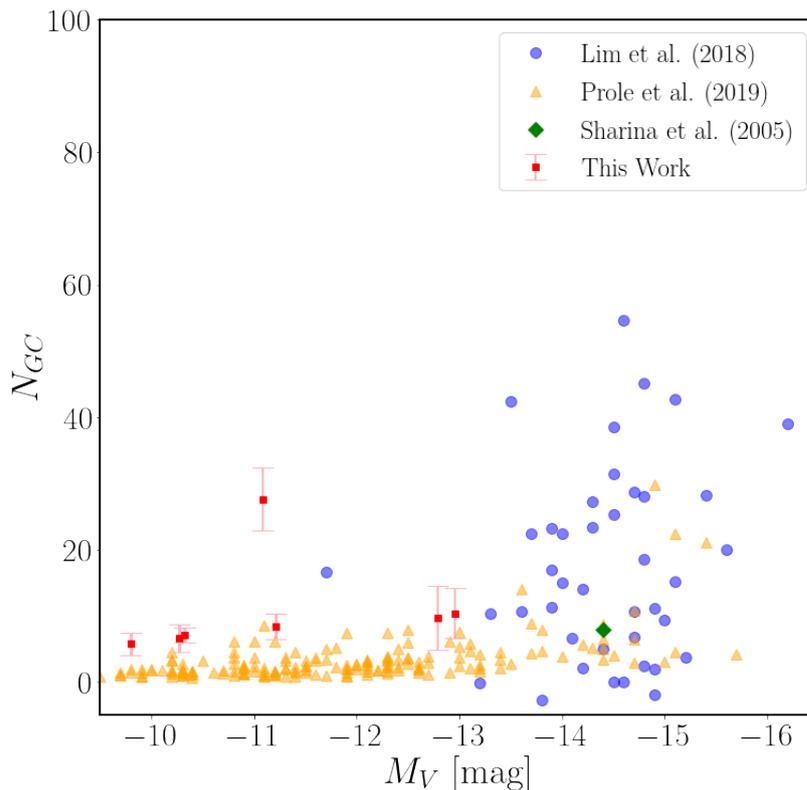


Figura 3.6 – N_{GC} como função da magnitude absoluta na banda V (M_V) para os sistemas de GCs analisados em LSBds nas redondezas de NGC 3115 (this work). Os círculos azuis representam as galáxias anãs do aglomerado de galáxias de Coma (Lim et al., 2018). Os triângulos amarelos representam as anãs do aglomerado de galáxias de Fornax (Prole et al., 2019b) e o ponto verde representa a LSBd 6 de Sharina et al. (2005).

A proximidade com essa galáxia pode estar contaminando a amostra de GCs de LSBd 22 causando uma superestimativa de seus GCs.

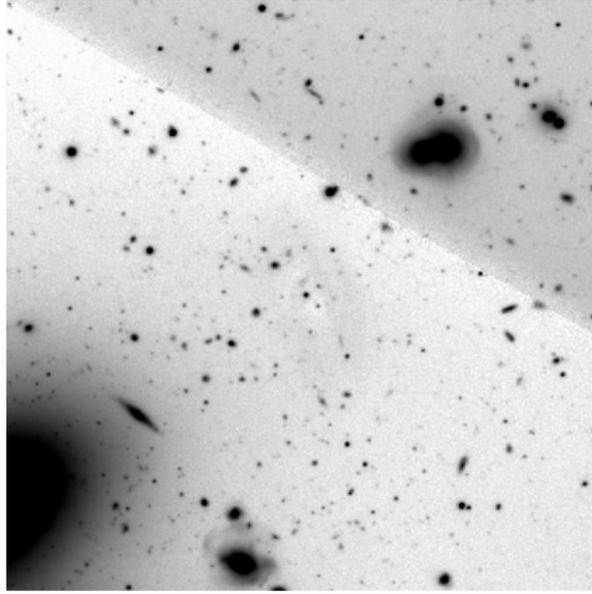


Figura 3.7 – Imagem de resíduo centrada na LSBd 22 na banda i obtida pelo telescópio Gemini, com a galáxia elíptica no canto inferior esquerdo.

A partir dos resultados obtidos pelo ajuste da GCLF e da estimativa de N_{GC} foi possível determinar a frequência específica (S_N) de cada sistema. A frequência específica é definida como o número de aglomerados globulares por unidade da luminosidade da galáxia (normalizada para a magnitude absoluta na banda V padrão de $M_V = -15$), de acordo com a seguinte equação (Harris et al., 2017):

$$S_N = N_{GC} \cdot 10^{0.4(M_V + 15)}. \quad (3.1)$$

A figura 3.8 apresenta a S_N de cada LSBd comparado com os resultados de Prole et al. (2019b); Lim et al. (2018); Sharina et al. (2005). Para fazer a figura as magnitudes absolutas na banda g (M_g) foram convertidas para M_V utilizando a equação de Lupton. Por meio do gráfico pode-se observar que a amostra de LSBds identificadas nas redondezas de NGC 3115 cai na mesma região que aquelas de Fornax (Prole et al., 2019b), com exceção de LSBd 22 e 19. Como citado anteriormente, LSBd 22 possui contaminação de sua amostra de GCs e a LSBd 19 não obteve um bom modelo para o ajuste da GCLF pelo baixo número de candidatos a GCs selecionados pelo nosso método.

Muitos estudos têm mostrado que o número de GCs (N_{GC}) se correlaciona muito bem com a massa total da galáxia central (Harris et al., 2017; Forbes et al., 2018; Zaritsky, 2022b). Essa correlação é apresentada em Zaritsky (2022b) como sendo da ordem de $N_{GC} \propto M_{Total}^{0.92}$. Deste modo, conseguir estimar o número total de GCs de uma galáxia pode ser uma forma útil de estimar um limite superior para sua massa total.

Assim, utilizando o N_{GC} obtido foi possível recuperar o limite de massa superior para as 7 LSBds que tiveram seu ajuste de GCLF obtidos. O resultado final é apresentado na figura 3.9 que apresenta o N_{GC} pela magnitude absoluta na banda V e pela sua Massa total (M_{total}) para as LSBds estudadas. Na mesma figura é feita comparação com os dados

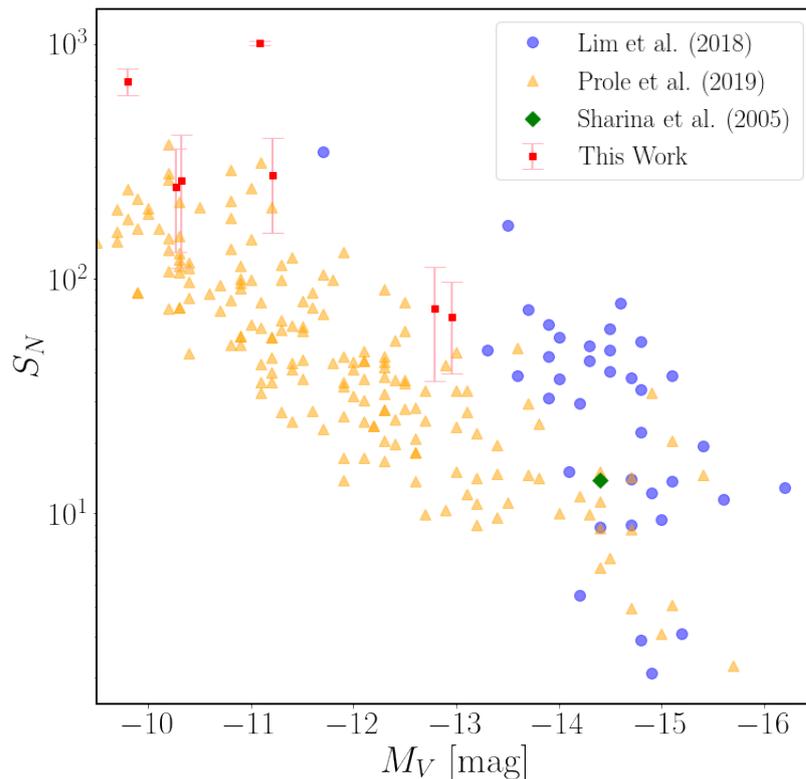


Figura 3.8 – A frequência Específica (S_N) para o sistema de GCs das LSBds analisadas (this work), anãs de Coma (Lim et al., 2018), anãs de Fornax (Prole et al., 2019b) e LSBd 6 de (Sharina et al., 2005).

das anãs de Fornax, Coma e LSBd 6 (Prole et al., 2019b; Lim et al., 2018; Sharina et al., 2005).

Também, foi possível recuperar o valor médio para a massa total, como o apresentado na figura 3.9, para as LSBds no ambiente de baixa densidade em torno de NGC 3115 identificadas por este trabalho.

$$M_{Total} \sim 10^{10.6} M_{\odot} \quad (3.2)$$

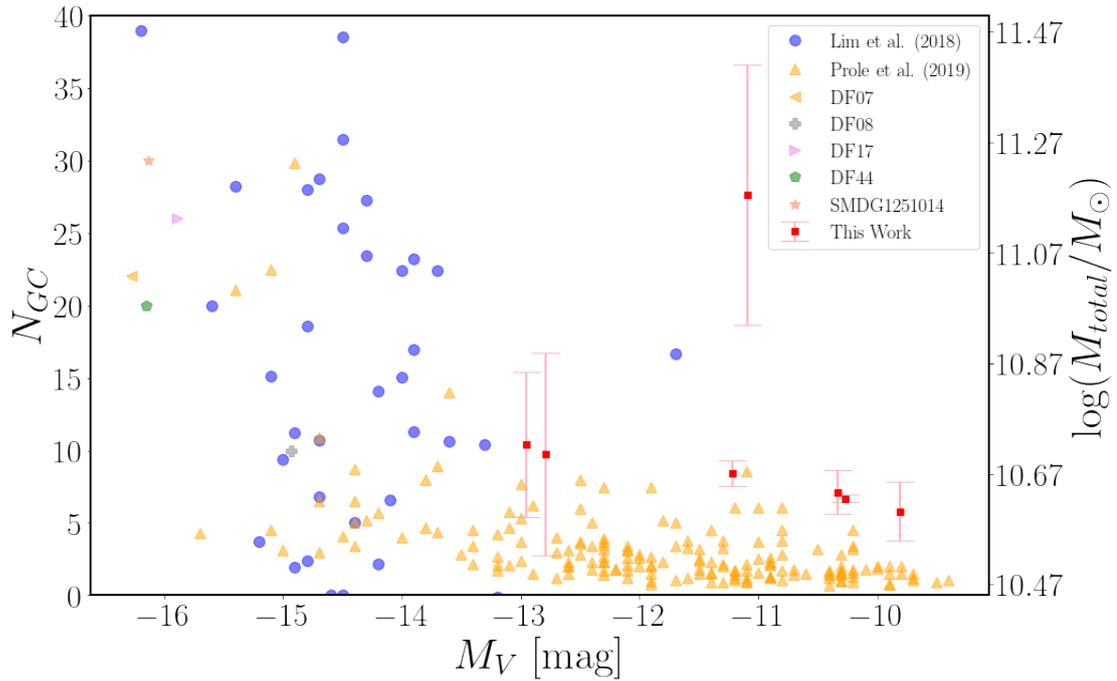


Figura 3.9 – Limite superior de massa total para as LSBds identificadas em torno de NGC 3115 pelo N_{GC} e M_V (this work).

3.3 Galáxias Análogas a NGC 3115 em Simulações

Após a seleção inicial de uma amostra de 370 subhalos candidatos a S0 nos dados da IllustrisTNG com base no corte de massa estelar e SFR (ver seção 2.2.4) e, foi determinado o ambiente de cada subhalo.

A figura 3.10 apresenta os resultados obtidos após esse processo de determinação do ambiente dos 370 subhalos selecionados por massa estelar e SFR. Um ambiente de alta densidade é definido por Cebrián e Trujillo (2014) como aquele que possui $\rho \geq 0.76 M_{\odot}/Mpc^3$, neste trabalho adotou-se como ambiente de baixa densidade aquele com $\rho \leq 0.76 M_{\odot}/Mpc^3$. Sendo assim, chegou-se a amostra final de 178 subhalos candidatos a S0 em um ambiente de baixa densidade.

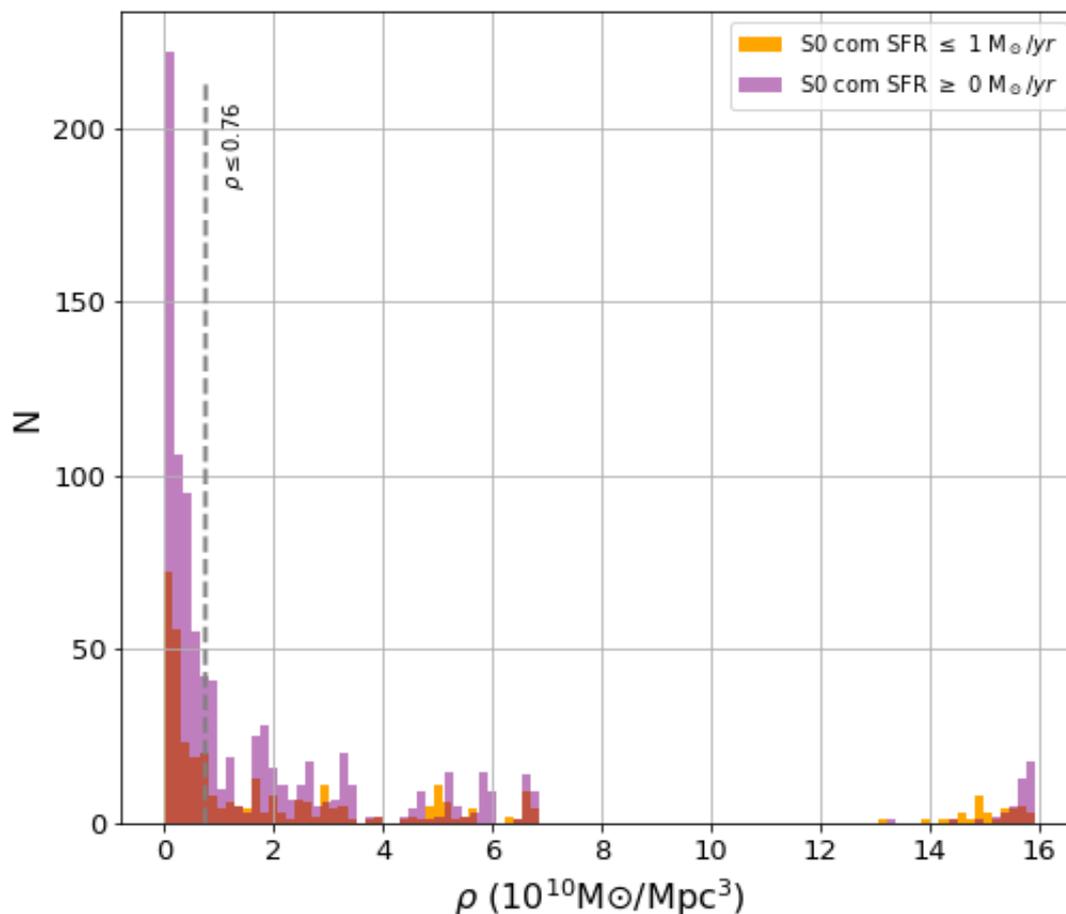


Figura 3.10 – Distribuição da densidade do ambiente para a amostra final de subhalos candidatos a S0s.

Com base nisso, o passo seguinte consistiu em classificar morfologicamente essa população de candidatas a S0. Para isso, foi utilizado o catálogo de Rodriguez-Gomez et al. (2019) que consiste em imagens sintéticas simuladas do Pan-STARRS (banda g e r) e SDSS (banda g, i e r) dos subhalos de IllustrisTNG50. Essas imagens simuladas foram criadas utilizando o código SKIRTS que utiliza o método de transferência radiativa e, também foram adicionados outros artifícios observacionais.

Além da geração de imagens simuladas para 27000 subhalos da IllustrisTNG-50, também foram obtidos parâmetros fotométricos para essas galáxias como elipticidade, índice de Sérsic, raio efetivo entre outros dados pelo ajuste de um modelo 2D de Sérsic Rodriguez-Gomez et al. (2019).

Foram selecionadas galáxias com base no índice de Sérsic e também com base em *flags* de usabilidade do dado disponíveis na tabela (como sinal ruído maior que 5, *flags* de confiabilidade dos parâmetros morfológicos e de Sérsic) para garantir a confiabilidade nas medidas.

Com base no catálogo de Rodriguez-Gomez et al. (2019) foi feita uma subamostra de galáxias que possuíam índice de Sérsic $Sérsic_n \geq 2$. Para isso foi utilizado o catálogo de Pan-STARRS na banda g. A classificação morfológica executada foi com base no índice de Sérsic já que ele é um bom indicativo para classificar galáxias *Early-Type* (índice de Sérsic maior) e *Late-type* (índice de Sérsic menor). O critério de seleção para o índice de Sérsic foi escolhido seguindo o valor entrado por Deeley et al. (2020a), que estudou galáxias S0 no SAMI Survey e encontrou um valor inferior para o índice de Sérsic próximo ao valor adotado por este trabalho.

Ao fim dessa seleção chegou-se a amostra final de 74 subhalos classificados morfológica-mente pelo índice de Sérsic a candidatos a galáxias S0 em um ambiente de baixa densidade ($\rho \leq 0.76$). A figura 3.11 apresenta a distribuição em índice de Sérsic, elipticidade, raio efetivo e massa estelar dessa população de 74 subhalos identificados.

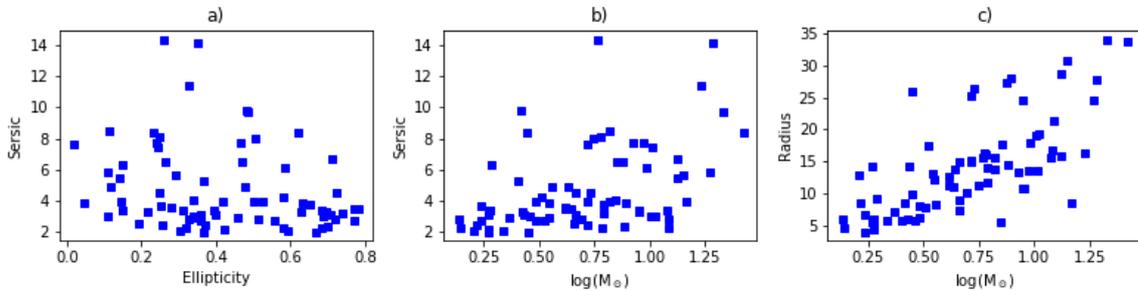


Figura 3.11 – Distribuição de propriedades físicas dos subhalos classificados como candidatos a S0 ($\log(M_{\star})$ em 10^{10}).

Com a amostra final de 74 galáxias classificadas como S0 o passo final foi encontrar subhalos com propriedades análogas às encontradas em NGC 3115. Assim, foi feita uma inspeção visual nas galáxias com massa estelar próximas as de NGC 3115 para classificar as mais semelhantes com NGC 3115 em morfologia e massa estelar.

A figura 3.12 apresenta a distribuição de massa estelar e densidade para as 74 candidatas a S0 selecionadas morfológica-mente. Para comparação foram incluídas os 158 subhalos sem classificação morfológica e NGC 3115 (Brodie et al., 2014; Dolfi et al., 2020). Como o gráfico apresenta, não há nenhum subhalo com características exatamente iguais a NGC 3115, isso pode ser devido ao fato de que o tamanho da caixa da IllustrisTNG 50 seja limitado em volume, o que causa uma limitação na diversidade de ambientes.

	NGC 3115	ID 557721	ID 515296
M_{\star} ($10^{10}M_{\odot}$)	8.85	4.31	7.08
ρ ($10^{10}M_{\odot}/\text{Mpc}^3$)	0.08	0.13	0.17

Tabela 4 – Massa estelar e densidade de NGC 3115 (Brodie et al., 2014; Dolfi et al., 2020) comparado com o subhalo 557721 e 5115296.

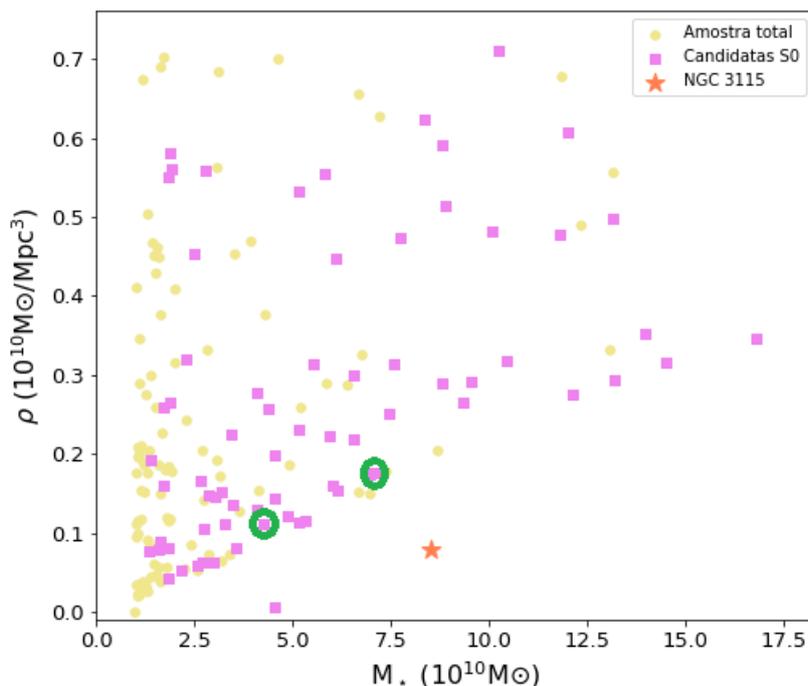


Figura 3.12 – Distribuição final de massa estelar e densidade para os 74 subhalos classificados morfologicamente como candidatos a S0 (com o círculos em verde representando os dois subhalos classificados como semelhantes), juntamente com a amostra não classificada morfologicamente (Amostra Total) e NGC 3115 (Brodie et al., 2014; Dolfi et al., 2020).

Apesar da limitação em volume imposta pela IllustrisTNG50, flexibilizando os parâmetros de seleção foram encontrados dois subhalos com características semelhantes a de NGC 3115 (IDs 557712 e 5115296), um deles que pela classificação morfológica possui características visuais e de ambiente análogas às encontradas em NGC 3115 porém com menor massa estelar. O outro ponto a ser analisado é o parâmetro de densidade encontrado para NGC 3115 em Brodie et al. (2014) que pode ter uma metodologia diferente da adotada por este trabalho. A tabela 4 apresenta os valores de referência de NGC 3115 utilizados a fim de comparação, bem como o subhalo classificado como possuindo propriedades semelhantes a NGC 3115 (subhalos de ID 557712 e 5115296). A figura 3.13 e a figura 3.14 apresentam imagens da distribuição de luz desse subhalo na IllustrisTNG bem como com sua imagem simulada no Pan-STARRS.

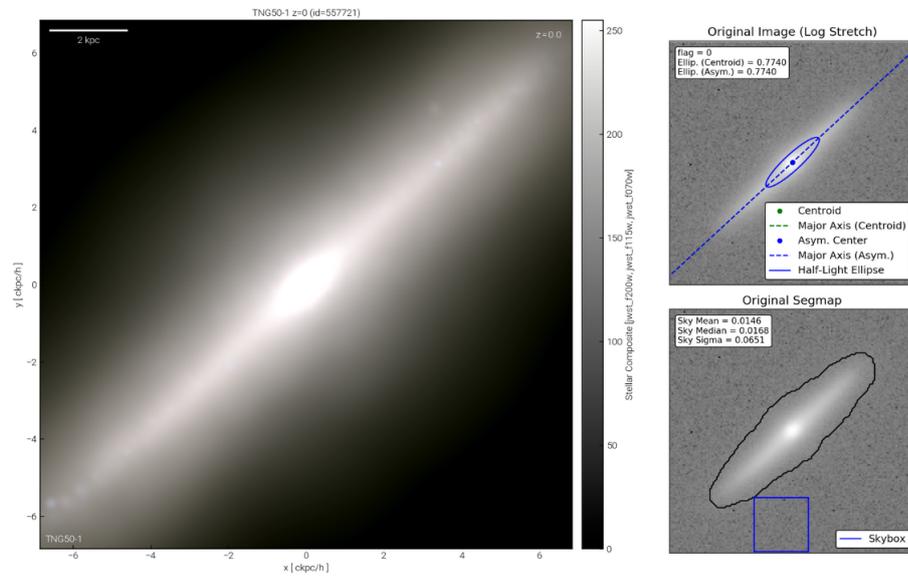


Figura 3.13 – *Painel Esquerdo*: Imagem obtida pela IllustrisTNG 50 para o subhalo 557721 da distribuição de luz estelar do respectivo subhalo (IllustrisTNG-50). *Painel Direito*: Imagem do subhalo 557712 simulada com as características do Pan-STARRS na banda i com o mapa de segmentação da respectiva galáxia (Rodríguez-Gomez et al., 2019).

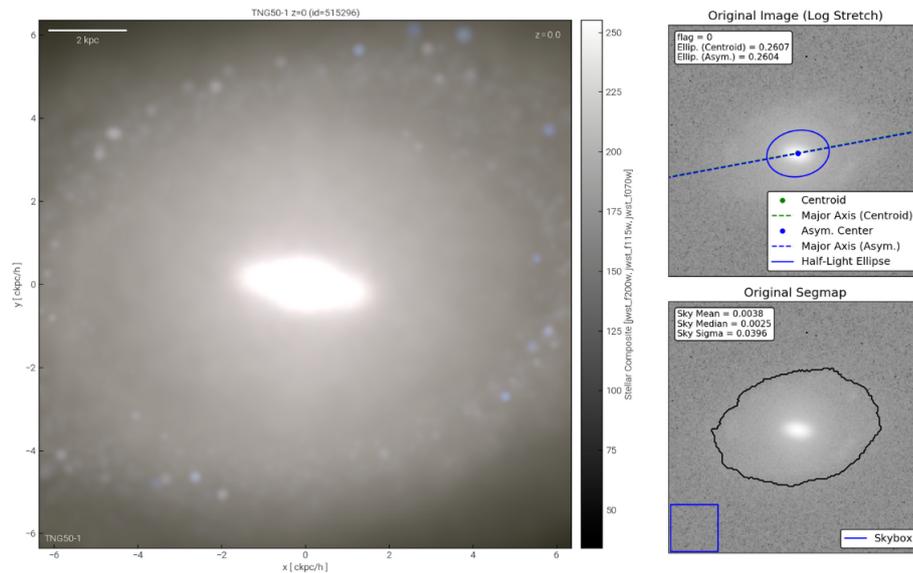


Figura 3.14 – *Painel Esquerdo*: Imagem obtida pela IllustrisTNG 50 para o subhalo 515296 da distribuição de luz estelar do respectivo subhalo (IllustrisTNG-50). *Painel Direito*: Imagem do subhalo 515296 simulada com as características do Pan-STARRS na banda i com o mapa de segmentação da respectiva galáxia (Rodríguez-Gomez et al., 2019).

4 Sumário e Conclusões

Neste trabalho foi conduzido um estudo sobre uma população de galáxias anãs de baixo brilho superficial (LSBs) e seus sistemas de aglomerados globulares (GCs) em um ambiente único de baixa densidade nas redondezas de NGC 3115, a galáxia S0 mais próxima de nós. Além disso, também foi identificadas galáxias com propriedades semelhantes a NGC 3115 em simulações cosmológicas para em trabalhos futuros estudar sua população de galáxias satélites e aglomerados globulares. As principais análises e resultados obtidos foram:

- a) Identificação de uma amostra de 24 LSBs em torno de NGC 3115, por meio de dados da DECam, através da obtenção e análise de suas propriedades físicas obtidas por meio da modelagem de um perfil de Sérsic utilizando o IMFIT e SExtractor.
- b) A amostra final selecionada como candidatas a LSBd apresenta raio efetivo menor do que o valor típico encontrado para uma galáxia UDG e sua distribuição em magnitude absoluta na banda g e raio efetivo acompanha as de outras LSBs estudadas por trabalhos anteriores.
- c) A amostra final apresenta uma vasta distribuição em cor que parece depender de sua proximidade com NGC 3115. Sua distribuição em cor, segue a obtida por outros trabalhos que estudaram galáxias anãs encontrados na literatura.
- d) Realizou-se um *follow-up* de 9 LSBs no Telescópio Gemini a fim de identificar e analisar as fontes pontuais em torno desses objetos poderiam ser candidatos a aglomerados globulares. Esses dados foram reduzidos a fotometria foi feita novamente para remover a luz da galáxia.
- e) Aplicamos um método para identificação das fontes pontuais e classificação de objetos candidatos a Aglomerados Globulares por meio de sua distribuição em cor, magnitude, distância ao centro da galáxia e do parâmetro *CLASS_STAR* do SExtractor.
- f) A análise dos sistemas de objetos classificados como GCs foi feita por meio da obtenção da GCLF de cada sistema, que foi obtida utilizando MCMC da distribuição em magnitude desses sistemas.
- g) Por meio da determinação da GCLF foi possível obter a estimativa do Número total de GCs e a frequência específica de cada sistema.
- h) Os valores obtidos para N_{GC} são comparáveis com os obtidos para as anãs do aglomerado de Fornax, localizadas a 20Mpc da Via-Láctea e razoavelmente próximas a NGC 3115.

- i) Por meio dos GCs foi possível recuperar um limite superior para a massa total das LSBds que tiveram seus sistemas de GCs estudados. Encontrando-se um valor médio para as 7 LSBds, localizadas em torno de NGC 3115, em $\log(M/M_{\odot})$ de 10.6.

Por fim, foi desenvolvido um método de identificação e classificação de subhalos da IllustrisTNG-50 como candidatos a galáxias S0 em ambientes de baixa densidade. A classificação dos subhalos candidatos a S0 foi realizada por meio da classificação em massa estelar, SFR e pelo índice de Sérsic desses subhalos. Já a classificação de ambiente foi feita utilizando o método de medição de ambiente baseado em abertura fixa.

Por meio desse método encontrou-se 74 subhalos candidatos a galáxias S0 e em ambientes de baixa densidade na amostra total da IllustrisTNG-50. Porém, devido a limitação de volume da simulação não se identificou subhalos com propriedades análogas a NGC 3115, apenas similares. Dentre esses subhalos destaca-se o ID 557712 e ID 5115296 que possui massa estelar menor mas valor de densidade e aparência morfológica semelhantes as de NGC 3115.

5 Considerações Finais e Perspectivas

Como próximos passos do estudo da população de LSBds em torno de NGC 3115, por meio da análise das populações de aglomerados globulares, busca-se ganhar tempo de observação GMOS/Gemini ou GRANTECAN/MEGARA a fim de obter dados de espectroscopia multi-objeto para confirmar a associação dos candidatos a GCs a suas galáxias centrais, medir massas dinâmicas para esses sistemas e obter mais informações acerca dessa população.

Além disso, utilizar simulações de formação e evolução de galáxias como a IllustrisTNG com o objetivo de buscar por galáxias com propriedades semelhantes a NGC 3115. Com a possibilidade de aplicar o método desenvolvido neste trabalho a uma caixa maior como a IllustrisTNG-100 ou as com propriedades semelhantes identificadas na IllustrisTNG-50. Com uma amostra de subhalos análogos a NGC 3115 em simulações será possível, por meio do método de *GC tagging*, simular a evolução de GCs nos sistemas de galáxias S0 isoladas e suas satélites anãs (Doppel et al., 2022). Também, trabalhos futuros com identificação de LSBds e seus sistemas de GCs poderão ser feitos no LSST. Todos estes estudos permitirão obter mais informações sobre essas galáxias inseridas em um ambiente ainda pouco explorado.

Referências

- Beasley, M. A. (2020). Globular Cluster Systems and Galaxy Formation. Em *Reviews in Frontiers of Modern Astrophysics; From Space Debris to Cosmology*, páginas 245–277.
- Bertin, E. e Arnouts, S. (1996). SExtractor: Software for source extraction. *Astronomy and Astrophysics Supplement*, 117:393–404.
- Brodie, J. P., Romanowsky, A. J., Strader, J., Forbes, D. A., Foster, C., Jennings, Z. G., Pastorello, N., Pota, V., Usher, C., Blom, C., Kader, J., Roediger, J. C., Spitler, L. R., Villaume, A., Arnold, J. A., Kartha, S. S. e Woodley, K. A. (2014). The SAGES Legacy Unifying Globulars and GalaxieS Survey (SLUGGS): Sample Definition, Methods, and Initial Results. *Astrophysical Journal*, 796(1):52.
- Cantiello, M., Capaccioli, M., Napolitano, N., Grado, A., Limatola, L., Paolillo, M., Iodice, E., Romanowsky, A. J., Forbes, D. A., Raimondo, G., Spavone, M., La Barbera, F., Puzia, T. H. e Schipani, P. (2015). VEGAS-SSS. A VST early-type galaxy survey: analysis of small stellar systems. Testing the methodology on the globular cluster system in NGC 3115. *Astronomy & Astrophysics*, 576:A14.
- Cantiello, M., D’Abrusco, R., Spavone, M., Paolillo, M., Capaccioli, M., Limatola, L., Grado, A., Iodice, E., Raimondo, G., Napolitano, N., Blakeslee, J. P., Brocato, E., Forbes, D. A., Hilker, M., Mieske, S., Peletier, R., van de Ven, G. e Schipani, P. (2018). VEGAS-SSS. II. Comparing the globular cluster systems in NGC 3115 and NGC 1399 using VEGAS and FDS survey data. The quest for a common genetic heritage of globular cluster systems. *Astronomy & Astrophysics*, 611:A93.
- Carlsten, S. G., Greco, J. P., Beaton, R. L. e Greene, J. E. (2020). Wide-field Survey of Dwarf Satellite Systems around 10 Hosts in the Local Volume. *Astrophysical Journal*, 891(2):144.
- Carlsten, S. G., Greene, J. E., Beaton, R. L. e Greco, J. P. (2022). ELVES II: Globular Clusters and Nuclear Star Clusters of Dwarf Galaxies: the Importance of Environment. *Astrophysical Journal*, 927(1):44.
- Cebrián, M. e Trujillo, I. (2014). The effect of the environment on the stellar mass-size relationship for present-day galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 444(1):682–699.
- Chambers, K. C., Magnier, E. A., Metcalfe, N. e et al. (2016). The Pan-STARRS1 Surveys. *arXiv e-prints*, página arXiv:1612.05560.

- Chies-Santos, A. L., Larsen, S. S., Kuntschner, H., Anders, P., Wehner, E. M., Strader, J., Brodie, J. P. e Santos, J. F. C. (2011). An optical/NIR survey of globular clusters in early-type galaxies. II. Ages of globular cluster systems and the relation to galaxy morphology. *Astronomy & Astrophysics*, 525:A20.
- Coccatto, L., Fraser-McKelvie, A., Jaffé, Y. L., Johnston, E. J., Cortesi, A. e Pallero, D. (2022). Formation of S0s in extreme environments III: the role of environment in the formation pathways. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 515(1):201–212.
- Conselice, C. J. (2018). Ultra-diffuse Galaxies Are a Subset of Cluster Dwarf Elliptical/Spheroidal Galaxies. *Research Notes of the American Astronomical Society*, 2(1):43.
- da Costa, L. N., Willmer, C. N. A., Pellegrini, P. S., Chaves, O. L., Rit e, C., Maia, M. A. G., Geller, M. J., Latham, D. W., Kurtz, M. J., Huchra, J. P., Ramella, M., Fairall, A. P., Smith, C. e L ipari, S. (1998). The Southern Sky Redshift Survey. *Astronomical Journal*, 116(1):1–7.
- Deeley, S., Drinkwater, M., Sweet, S., Bekki, K., Couch, W., Forbes, D. e Dolfi, A. (2021). The two formation pathways of s0 galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 508:895–911.
- Deeley, S., Drinkwater, M. J., Sweet, S. M., Diaz, J., Bekki, K., Couch, W. J., Forbes, D. A., Bland-Hawthorn, J., Bryant, J. J., Croom, S., Cortese, L., Lawrence, J. S., Lorente, N., Medling, A. M., Owers, M., Richards, S. N. e van de Sande, J. (2020a). The SAMI galaxy survey: a range in S0 properties indicating multiple formation pathways. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 498(2):2372–2383.
- Deeley, S., Drinkwater, M. J., Sweet, S. M., Diaz, J., Bekki, K., Couch, W. J., Forbes, D. A., Bland-Hawthorn, J., Bryant, J. J., Croom, S., Cortese, L., Lawrence, J. S., Lorente, N., Medling, A. M., Owers, M., Richards, S. N. e van de Sande, J. (2020b). The SAMI galaxy survey: a range in S0 properties indicating multiple formation pathways. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 498(2):2372–2383.
- Dolfi, A., Forbes, D. A., Couch, W. J., Ferr e-Mateu, A., Bellstedt, S., Bekki, K., Diaz, J., Romanowsky, A. J. e Brodie, J. P. (2020). The assembly history of the nearest S0 galaxy NGC 3115 from its kinematics out to six half-light radii. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 495(1):1321–1339.
- Dolfi, A., Pfeffer, J., Forbes, D. A., Couch, W. J., Bekki, K., Brodie, J. P., Romanowsky, A. J. e Kruijssen, J. M. D. (2022). The present-day globular cluster kinematics of lenticular galaxies from the E-MOSAICS simulations and their relation to the galaxy assembly histories. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 511(3):3179–3197.

- Doppel, J. E., Sales, L. V., Nelson, D., Pillepich, A., Abadi, M. G., Peng, E. W., Marinacci, F., Naiman, J., Torrey, P., Vogelsberger, M., Weinberger, R. e Hernquist, L. (2022). Modelling globular clusters in the TNG50 simulation: predictions from dwarfs to giant galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 518(2):2453–2470.
- Dressler, A. (1980). Galaxy morphology in rich clusters: implications for the formation and evolution of galaxies. *Astrophysical Journal*, 236:351–365.
- Eigenthaler, P., Puzia, T. H., Taylor, M. A., Ordenes-Briceño, Y., Muñoz, R. P., Ribbeck, K. X., Alamo-Martínez, K. A., Zhang, H., Ángel, S., Capaccioli, M., Côté, P., Ferrarese, L., Galaz, G., Grebel, E. K., Hempel, M., Hilker, M., Lançon, A., Mieske, S., Miller, B., Paolillo, M., Powalka, M., Richtler, T., Roediger, J., Rong, Y., Sánchez-Janssen, R. e Spengler, C. (2018). The Next Generation Fornax Survey (NGFS). II. The Central Dwarf Galaxy Population. *Astrophysical Journal*, 855(2):142.
- Erwin, P. (2015). IMFIT: A Fast, Flexible New Program for Astronomical Image Fitting. *Astrophysical Journal*, 799(2):226.
- Forbes, D. A., Alabi, A., Brodie, J. P., Romanowsky, A. J., Strader, J., Foster, C., Usher, C., Spitler, L., Bellstedt, S., Pastorello, N., Villaume, A., Wasserman, A. e Pota, V. (2017). The SLUGGS Survey: A Catalog of Over 4000 Globular Cluster Radial Velocities in 27 Nearby Early-type Galaxies. *The Astronomical Journal*, 153(3):114.
- Forbes, D. A., Read, J. I., Gieles, M. e Collins, M. L. M. (2018). Extending the globular cluster system-halo mass relation to the lowest galaxy masses. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 481(4):5592–5605.
- Foreman-Mackey, D., Hogg, D. W., Lang, D. e Goodman, J. (2013). emcee: The MCMC Hammer. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 125(925):306.
- Gaia Collaboration, Vallenari, A., Brown, A. G. A. e et al. (2022). Gaia Data Release 3: Summary of the content and survey properties. *arXiv e-prints*, página arXiv:2208.00211.
- Graham, A. W. e Driver, S. P. (2005). A Concise Reference to (Projected) Sérsic $R^{1/n}$ Quantities, Including Concentration, Profile Slopes, Petrosian Indices, and Kron Magnitudes. *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 22(2):118–127.
- Guérou, A., Emsellem, E., Krajnović, D., McDermid, R. M., Contini, T. e Weilbacher, P. M. (2016). Exploring the mass assembly of the early-type disc galaxy NGC 3115 with MUSE. *Astronomy & Astrophysics*, 591:A143.
- Harris, W. E. (1991). Globular cluster systems in galaxies beyond the local group. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 29(1):543–579.

- Harris, W. E., Blakeslee, J. P. e Harris, G. L. H. (2017). Galactic Dark Matter Halos and Globular Cluster Populations. III. Extension to Extreme Environments. *Astrophysical Journal*, 836(1):67.
- Johnston, E. J., Häußler, B., Jegatheesan, K., Fraser-McKelvie, A., Coccato, L., Cortesi, A., Jaffé, Y., Galaz, G., Mora, M. e Ordenes-Briceño, Y. (2022). BUDDI-MaNGA II: the star-formation histories of bulges and discs of S0s. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 514(4):6141–6156.
- Lamon, J. e Lima, J. A. d. S. (2017). O grande debate e a descoberta da expansão do universo. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo.
- Lim, S., Peng, E. W., Côté, P., Sales, L. V., den Brok, M., Blakeslee, J. P. e Guhathakurta, P. (2018). The Globular Cluster Systems of Ultra-diffuse Galaxies in the Coma Cluster. *Astrophysical Journal*, 862:82.
- Martin, G., Kaviraj, S., Laigle, C., Devriendt, J. E. G., Jackson, R. A., Peirani, S., Dubois, Y., Pichon, C. e Slyz, A. (2019). The formation and evolution of low-surface-brightness galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 485(1):796–818.
- Muldrew, S. I., Croton, D. J., Skibba, R. A., Pearce, F. R., Ann, H. B., Baldry, I. K., Brough, S., Choi, Y.-Y., Conselice, C. J., Cowan, N. B., Gallazzi, A., Gray, M. E., Grützbauch, R., Li, I. H., Park, C., Pilipenko, S. V., Podgorzec, B. J., Robotham, A. S. G., Wilman, D. J., Yang, X., Zhang, Y. e Zibetti, S. (2012). Measures of galaxy environment - I. What is 'environment'? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 419(3):2670–2682.
- Nelson, D., Pillepich, A., Genel, S., Vogelsberger, M., Springel, V., Torrey, P., Rodriguez-Gomez, V., Sijacki, D., Snyder, G. F., Griffen, B., Marinacci, F., Blecha, L., Sales, L., Xu, D. e Hernquist, L. (2015). The illustris simulation: Public data release. *Astronomy and Computing*, 13:12–37.
- Nelson, D., Pillepich, A., Springel, V., Pakmor, R., Weinberger, R., Genel, S., Torrey, P., Vogelsberger, M., Marinacci, F. e Hernquist, L. (2019). First results from the TNG50 simulation: galactic outflows driven by supernovae and black hole feedback. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 490(3):3234–3261.
- NOIRLab (2023). Dark energy camera (decam).
url<https://noirlab.edu/public/programs/ctio/victor-blanco-4m-telescope/decam/>.
- Pillepich, A., Springel, V., Nelson, D., Genel, S., Naiman, J., Pakmor, R., Hernquist, L., Torrey, P., Vogelsberger, M., Weinberger, R. e Marinacci, F. (2018). Simulating galaxy formation with the IllustrisTNG model. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 473(3):4077–4106.

- Prole, D. J., Hilker, M., van der Burg, R. F. J., Cantiello, M., Venhola, A., Iodice, E., van de Ven, G., Wittmann, C., Peletier, R. F., Mieske, S., Capaccioli, M., Napolitano, N. R., Paolillo, M., Spavone, M. e Valentijn, E. (2019a). Halo mass estimates from the globular cluster populations of 175 low surface brightness galaxies in the Fornax cluster. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 484(4):4865–4880.
- Prole, D. J., van der Burg, R. F. J., Hilker, M. e Davies, J. I. (2019b). Observational properties of ultra-diffuse galaxies in low-density environments: field UDGs are predominantly blue and star forming. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 488(2):2143–2157.
- Prole, D. J., van der Burg, R. F. J., Hilker, M. e Spitler, L. R. (2021). The quiescent fraction of isolated low surface brightness galaxies: observational constraints. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 500(2):2049–2062.
- Rodriguez-Gomez, V., Snyder, G. F., Lotz, J. M., Nelson, D., Pillepich, A., Springel, V., Genel, S., Weinberger, R., Tacchella, S., Pakmor, R., Torrey, P., Marinacci, F., Vogelsberger, M., Hernquist, L. e Thilker, D. A. (2019). The optical morphologies of galaxies in the IllustrisTNG simulation: a comparison to Pan-STARRS observations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 483(3):4140–4159.
- Sandage, A. e Binggeli, B. (1984). Studies of the Virgo cluster. III - A classification system and an illustrated atlas of Virgo cluster dwarf galaxies. *Astronomical Journal*, 89:919–931.
- Schneider, P. (2006). *Extragalactic Astronomy and Cosmology*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Sersic, J. L. (1968). *Atlas de Galaxias Australes*.
- Sharina, M. E., Puzia, T. H. e Makarov, D. I. (2005). Hubble Space Telescope imaging of globular cluster candidates in low surface brightness dwarf galaxies. *Astronomy & Astrophysics*, 442(1):85–95.
- Tanoglidis, D., Drlica-Wagner, A., Wei, K. e et al. (2020). Shadows in the Dark: Low-Surface-Brightness Galaxies Discovered in the Dark Energy Survey. *arXiv e-prints*, página arXiv:2006.04294.
- Tonry, J. L., Dressler, A., Blakeslee, J. P., Ajhar, E. A., Fletcher, A. B., Luppino, G. A., Metzger, M. R. e Moore, C. B. (2001). The SBF Survey of Galaxy Distances. IV. SBF Magnitudes, Colors, and Distances. *Astrophysical Journal*, 546(2):681–693.
- van den Bergh, S. (1979). The origin of lenticular galaxies. *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, 73:198–202.

- van Dokkum, P. G., Abraham, R., Merritt, A., Zhang, J., Geha, M. e Conroy, C. (2015). Forty-seven Milky Way-sized, Extremely Diffuse Galaxies in the Coma Cluster. *Astrophysical Journal*, 798:L45.
- Xu, K., Gu, Q., Lu, S., Ge, X., Xiao, M. e Contini, E. (2021). Star-forming S0 galaxies in the SDSS-IV MaNGA survey. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 509(1):1237–1244.
- Zaritsky, D. (2022a). *Revisiting the relation between the number of globular clusters and galaxy mass for low mass galaxies.*
- Zaritsky, D. (2022b). Revisiting the relation between the number of globular clusters and galaxy mass for low-mass galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 513(2):2609–2614.
- Zaritsky, D., Donnerstein, R., Dey, A., Kadowaki, J., Zhang, H., Karunakaran, A., Martínez-Delgado, D., Rahman, M. e Spekkens, K. (2019). Systematically Measuring Ultra-diffuse Galaxies (SMUDGes). I. Survey Description and First Results in the Coma Galaxy Cluster and Environs. *Astrophysical Journals*, 240(1):1.

A APÊNDICE

Nesta seção estão anexadas informações complementares do trabalho apresentado, como os catálogos finais de propriedades físicas, fotométricas e de seleção.

As tabelas 5 e 6. apresentam as propriedades estruturais e fotométricas obtidas para as LSBds identificadas neste trabalho. A tabela 5 apresenta os valores de raio efetivo (R_e), índice de Sérsic (n) e elipticidade (ϵ) nos dados da DECam nas bandas r e g obtidos para as 24 LSBds identificadas no ambiente de baixa densidade em torno de NGC 3115. A tabela 6 apresenta os valores de magnitude aparente, magnitude absoluta e de média do brilho superficial obtidos pela fotometria das 24 LSBds identificadas.

A tabela 7 apresenta o catálogo final de subhalos da IllustrisTNG-50 classificados como galáxias do tipo S0 em ambientes de baixa densidade. A tabela apresenta os valores de ID, massa estelar e SFR do subhalo, o número de galáxias, a massa estelar total e a densidade identificadas em um raio de 2 Mpc do centro do subhalo.

Também, as figuras A.1 apresentam um painel dos modelos obtidos por meio da fotometria das LSBds. A figura A.2 apresenta os sistemas de GCs identificados para as LSBds, com seu diagrama cor-magnitude e a GCLF obtida.

Tabela 5 – Propriedades Estruturais das LSBds identificadas com a DECam no ambiente de baixa densidade de NGC 3115. Tipo \circ são não nucleadas, \odot são nucleadas.

ID	Tipo	g			r		
		R_e (pc)	n	ϵ	R_e (pc)	n	ϵ
1	\circ	91.27 ± 63.80	0.71 ± 0.88	0.12 ± 0.26	103.58 ± 20.00	0.75 ± 0.23	0.12 ± 0.10
2	\circ	66.06 ± 12.74	0.46 ± 0.30	0.08 ± 0.11	150.79 ± 46.83	1.29 ± 0.29	0.06 ± 0.07
3	\circ	108.93 ± 98.40	0.59 ± 1.00	0.15 ± 0.49	111.63 ± 70.97	0.98 ± 0.59	0.15 ± 0.19
4	\circ	89.95 ± 29.18	0.81 ± 0.52	0.21 ± 0.16	124.70 ± 47.87	1.38 ± 0.48	0.20 ± 0.08
5	\circ	63.61 ± 31.68	1.0 ± 0.39	0.15 ± 0.11	68.19 ± 30.27	1.32 ± 0.57	0.15 ± 0.05
6	\odot	875.11 ± 78.32	0.87 ± 0.14	0.39 ± 0.01	1071.88 ± 472.87	0.68 ± 0.28	0.39 ± 0.01
7	\circ	096.21 ± 27.45	0.90 ± 0.31	0.39 ± 0.06	92.38 ± 59.15	0.71 ± 0.20	0.35 ± 0.03
8	\circ	438.55 ± 74.31	0.41 ± 0.45	0.48 ± 0.14	397.28 ± 74.41	0.61 ± 0.21	0.49 ± 0.07
9	\circ	226.73 ± 69.50	0.82 ± 0.32	0.21 ± 0.10	270.71 ± 26.14	0.37 ± 0.1	0.49 ± 0.01
10	\circ	364.97 ± 148.93	0.66 ± 0.50	0.58 ± 0.06	265.10 ± 68.02	0.48 ± 0.48	0.51 ± 0.04
11	\circ	257.13 ± 68.98	0.84 ± 0.35	0.22 ± 0.17	254.22 ± 112.32	0.94 ± 0.36	0.22 ± 0.09
12	\circ	156.50 ± 38.01	1.07 ± 0.27	0.29 ± 0.08	175.54 ± 42.47	1.10 ± 0.27	0.26 ± 0.05
13	\circ	612.62 ± 66.10	0.60 ± 0.12	0.3 ± 0.16	562.86 ± 26.58	0.73 ± 0.10	0.25 ± 0.01
14	\circ	154.44 ± 49.63	1.27 ± 0.50	0.17 ± 0.23	118.87 ± 25.61	0.93 ± 0.25	0.055 ± 0.12
15	\circ	158.14 ± 49.66	0.70 ± 0.39	0.37 ± 0.16	141.07 ± 41.81	0.72 ± 0.26	0.22 ± 0.15
16	\circ	551.02 ± 35.67	0.90 ± 0.08	0.14 ± 0.02	664.31 ± 49.70	0.88 ± 0.03	0.14 ± 0.01
17	\circ	452.37 ± 47.53	0.75 ± 0.12	0.18 ± 0.07	504.26 ± 48.84	0.92 ± 0.13	0.16 ± 0.04
18	\odot	295.40 ± 85.38	0.68 ± 0.27	0.31 ± 0.10	409.37 ± 58.46	1.05 ± 0.14	0.30 ± 0.05
19	\circ	422.76 ± 40.91	0.90 ± 0.14	0.26 ± 0.03	384.20 ± 21.88	0.81 ± 0.03	0.24 ± 0.01
20	\circ	190.79 ± 70.87	0.67 ± 0.44	0.08 ± 0.46	235.96 ± 96.24	1.24 ± 0.36	0.21 ± 0.15
21	\circ	106.82 ± 44.26	0.14 ± 0.59	0.46 ± 0.16	111.50 ± 38.41	0.29 ± 0.43	0.44 ± 0.10
22	\odot	402.94 ± 43.91	0.67 ± 0.11	0.44 ± 0.04	422.73 ± 33.99	0.72 ± 0.05	0.41 ± 0.02
23	\circ	203.51 ± 63.41	1.08 ± 0.36	0.26 ± 0.10	164.47 ± 51.01	0.77 ± 0.26	0.26 ± 0.05
24	\circ	273.42 ± 39.87	1.90 ± 0.42	0.27 ± 0.30	264.66 ± 57.10	1.76 ± 0.28	0.19 ± 0.13

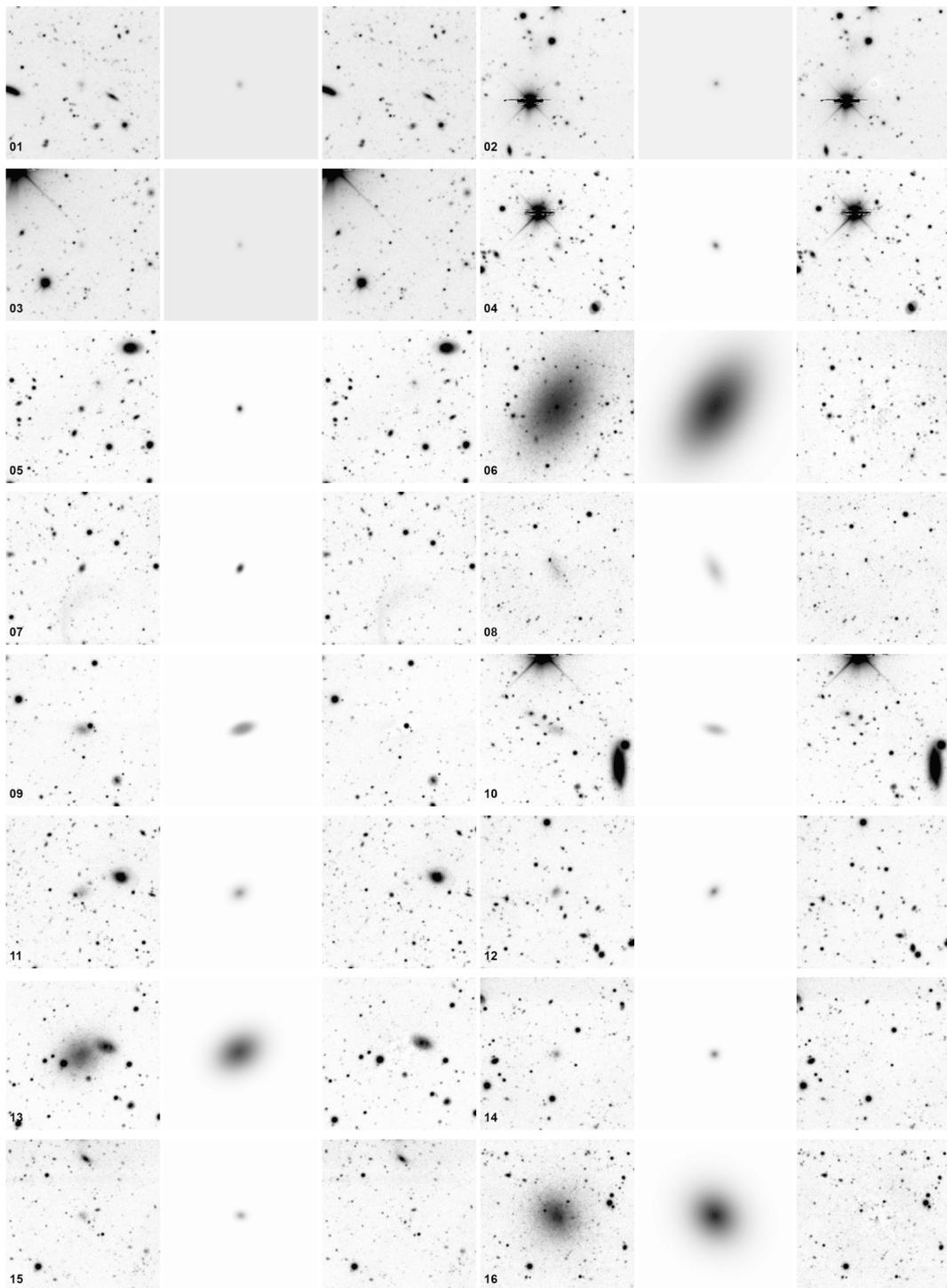


Figura A.1 – Catálogo em duas colunas apresentando os modelos obtidos para as LSBds na banda r. As colunas são compostas por três painéis cada. *Painel Esquerdo*: Imagem original da LSBd obtida pela DECam na banda r. *Painel do meio*: Modelo obtido pelo IMFIT para a imagem. *Painel Direito*: Imagem de resíduo que consiste na imagem original com a luz da galáxia subtraída (modelo) obtida pelo IMFIT.

Tabela 6 – Propriedades fotométricas das LSBds obtidas nas bandas g e r utilizando os dados da DECam.

ID	<i>g</i>			<i>r</i>		
	<i>m</i> (mag)	<i>M</i> (mag)	$\langle\mu\rangle_e$ (mag arcsec ⁻²)	<i>m</i> (mag)	<i>M</i> (mag)	$\langle\mu\rangle_e$ (mag arcsec ⁻²)
1	22.06	-07.87	25.65	21.31	-08.62	25.12
2	21.33	-08.60	24.21	20.82	-09.11	24.854
3	22.70	-07.23	26.67	22.02	-07.91	25.90
4	21.57	-08.36	25.13	21.02	-08.91	25.14
5	21.16	-08.77	23.96	20.78	-09.15	23.66
6	15.95	-13.98	24.50	15.16	-14.77	24.05
7	20.79	-09.14	24.49	20.45	-09.48	24.01
8	20.77	-09.16	27.76	20.29	-09.64	27.20
9	20.09	-09.84	25.65	19.59	-10.34	25.29
10	20.3	-09.63	26.90	20.33	-09.54	26.22
11	20.37	-09.56	26.20	20.27	-09.66	26.04
12	20.57	-09.36	25.33	20.84	-09.09	25.23
13	17.00	-12.93	24.72	16.96	-12.97	24.44
14	21.09	-08.84	25.82	20.9	-09.02	25.02
15	21.27	-08.66	26.06	21.2	-8.73	25.76
16	17.39	-12.54	24.88	16.97	-12.96	24.61
17	18.93	-11.00	25.99	18.36	-11.5761	25.61
18	20.05	-09.88	26.19	19.17	-10.76.97	25.97
19	18.12	-11.81	25.04	17.8	-12.13	24.43
20	21.63	-08.30	26.82	21.31	-08.62	26.26
21	22.18	-07.75	26.12	21.83	-08.10	25.80
22	19.17	-10.75	26.00	18.60	-11.33	25.53
23	20.19	-09.74	25.52	20.09	-09.84	24.91
24	21.18	-08.75	27.15	20.52	-09.41	26.37

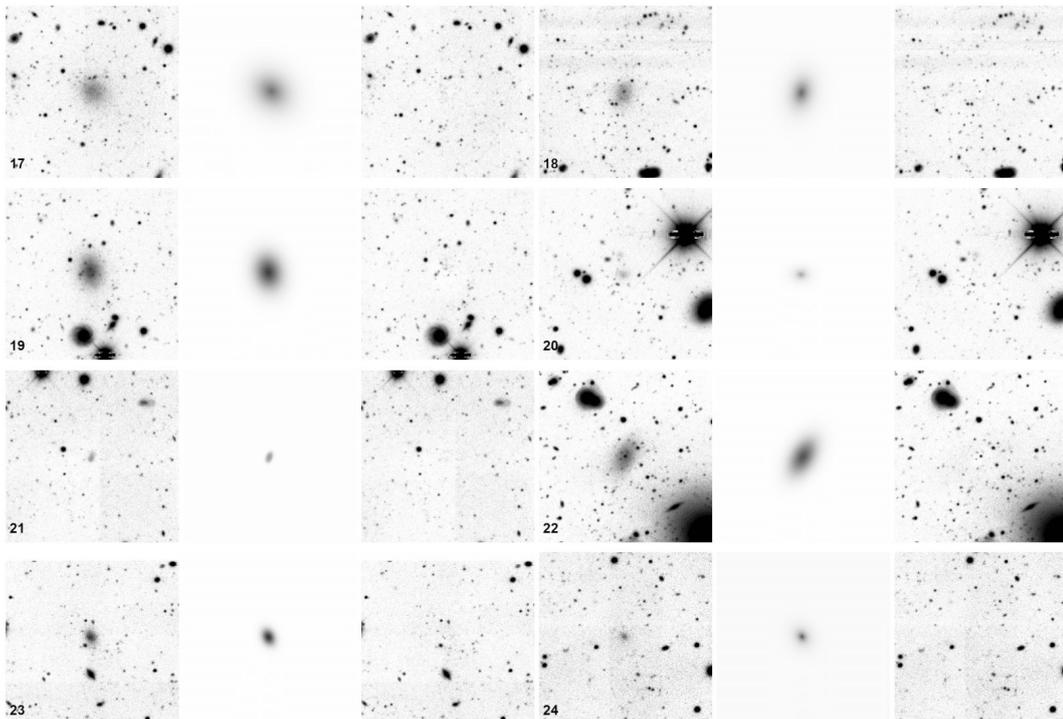


Figura A.1 – Continuação.

Tabela 7 – Catálogo dos subhalos da Illustris classificados por massa estelar, SFR, densidade do ambiente e morfologicamente pelo perfil de Sérsic como subhalos candidatos a S0 em ambientes de baixa densidade.

Subhalo ID	Massa Estelar ($10^{10} M_{\odot}$)	SFR	Nº de galáxias	Massa Estelar Total	Densidade ($10^{10} M_{\odot}/\text{Mpc}^3$)
198186	1.6301741954532034	0.011959	10	3.00428656023	0.0896525730985
294868	5.173324475937408	0.0758787	6	7.73352387827	0.23078035364
377656	8.370652494833186	0.315746	31	20.8720300496	0.622853766516
390932	26.219368172423973	0.201118	13	19.4642910054	0.580844648866
390933	1.874623560673162	0.178484	13	19.4642910054	0.580844648866
392276	8.877472689695898	0.562024	26	17.2576827267	0.51499603355
392277	5.149822852081488	0.930375	29	17.808775519	0.531441497675
396628	19.096693238854442	0.274699	19	16.2499530902	0.484923817372
400973	16.821966341895482	0.271185	6	11.6274595968	0.346981438207
410037	21.281960436964866	0.810171	15	15.4833409768	0.462046922255
418335	18.474756421612046	0.00485462	13	14.3678477453	0.428758873173
428177	10.43331857100679	4.4753E-5	11	10.61697728	0.316827077776
434356	13.17112488928255	0.00752576	14	16.6593790092	0.497141722153
439099	13.21479185119575	0.621259	10	9.82735179923	0.293263428066
447914	14.522630646589905	0.0	11	10.5939321853	0.316139376389
454171	7.570962503690582	0.00253801	15	10.5279559921	0.314170544401
454172	5.515382344257455	0.149187	15	10.5213557985	0.313973584379
462710	12.14406554472985	0.837174	6	9.23531072587	0.27559600369
465255	9.33714201358134	0.167082	13	8.89628400188	0.265478920134
466550	4.10786832004724	0.420227	18	9.29701578431	0.277437378389
468590	13.98652199586655	0.831747	17	11.8132661311	0.352526193529
471248	11.801756716858577	0.0	27	16.0157515006	0.477934878498
478216	5.927649837614408	0.017258	16	7.44508436974	0.222172871096
482155	12.0272660171243	0.0120113	17	20.3591979425	0.607550060614
484448	10.244080307056391	0.239094	32	23.7920941291	0.709993010092
486919	1.3819427221730145	0.0	14	6.41434727516	0.191414076666
489206	9.572069678181283	0.0952943	22	9.77615904249	0.291735756762
492876	8.819914378506054	0.273483	16	9.67411687505	0.288690660134
494709	7.7369205786832005	0.429812	13	15.865417663	0.473448683491
495451	6.974461175081194	0.0	11	5.84309359454	0.174366980347
498522	10.078181281369943	0.0	23	16.1745996624	0.482675154151
503987	6.1312518452908185	0.0725668	5	5.15987085178	0.153978553458
505100	5.804871567759079	0.660318	12	18.5898816474	0.554750916689
511920	8.816563330380868	0.0	42	19.8158742394	0.591336438167
512425	5.309625036905817	0.864759	5	3.89291782677	0.116170709096
513105	4.5568940064954235	0.0954492	2	0.183110274374	0.0054642947433

Tabela 8 – Continuação.

Subhalo ID	Massa Estelar ($10^{10} M_{\odot}$)	SFR	Nº de galáxias	Massa Estelar Total	Densidade ($10^{10} M_{\odot}/\text{Mpc}^3$)
523548	7.458695010333629	0.860534	7	8.38417663332	0.250196841553
524506	4.565648066135223	0.0	8	4.81622090749	0.143723505834
526879	3.0195453203424862	0.0246666	11	4.86764842272	0.145258182695
529365	6.559270741068793	0.364374	14	7.31481263321	0.218285360319
530330	6.101431945674639	0.104053	35	15.0219899993	0.448279493151
534628	6.03231473280189	0.677292	4	5.37265918031	0.160328487393
540082	5.17511071744907	0.0	7	3.76814108342	0.112447177443
542662	3.294966046648952	0.819785	13	3.75377526972	0.112018479269
543114	6.550250959551226	0.00367945	17	10.0643962687	0.300337202887
545003	1.879185119574845	0.00172367	15	8.8766854573	0.26489406915
546114	4.540611160318867	0.00169337	9	6.67239167821	0.199114522093
546870	4.249055211101269	9.60571E-4	4	3.72791394033	0.111246737067
550475	3.5682314732801896	0.0148029	6	2.73272651061	0.081548799803
555815	1.8648361381753764	0.075335	7	2.7314642081	0.0815111307372
556699	2.6532772364924715	0.108763	12	5.5759261176	0.166394288237
557721	4.116991437850606	0.0392388	9	4.31224590912	0.1286841098
558731	3.0029081783289047	0.52948	3	2.07617187127	0.0619561905041
564498	2.857189253026277	0.0790962	11	4.974907903	0.148458972036
571454	4.371936817242397	0.0108885	10	8.61327877734	0.257033605058
574037	3.2000147623265427	0.0	12	5.08305946924	0.151686382605
575356	3.480853262474166	7.25202E-4	9	4.5640394818	0.136198020749
576705	1.7027015057573074	0.00767293	12	5.39286227059	0.160931378958
586169	2.503277236492471	0.720597	24	15.1882088045	0.453239720239
588399	2.3006200177147917	0.0	7	10.684288105	0.318835737249
588831	3.4490552111012702	0.0	12	7.51038494706	0.224121541659
589320	2.6863448479480367	0.59459	8	2.13180460036	0.0636163574724
590792	2.7973427812223206	0.74295	43	18.6923390394	0.557808404263
590926	1.7020076764098022	0.605489	17	8.66139696445	0.258469526433
591796	2.76380277531739	0.03336	4	3.50743288733	0.104667240297
593694	2.5856067316209033	0.0	2	1.98296387494	0.0591747192504
598539	1.9176705048715674	0.788718	24	18.801238142	0.561058122476
604066	2.159949808089755	0.00241006	8	1.77934553567	0.0530984320258
604667	1.8413345143194568	0.14022	3	1.42692803591	0.042581746941
606907	1.5912016533805726	0.863244	5	2.66633041669	0.0795674373247
618950	1.8488337762031295	0.0	10	18.4633135926	0.550973929522
625800	1.3540876882196635	0.668566	5	2.59448777139	0.0774235413016

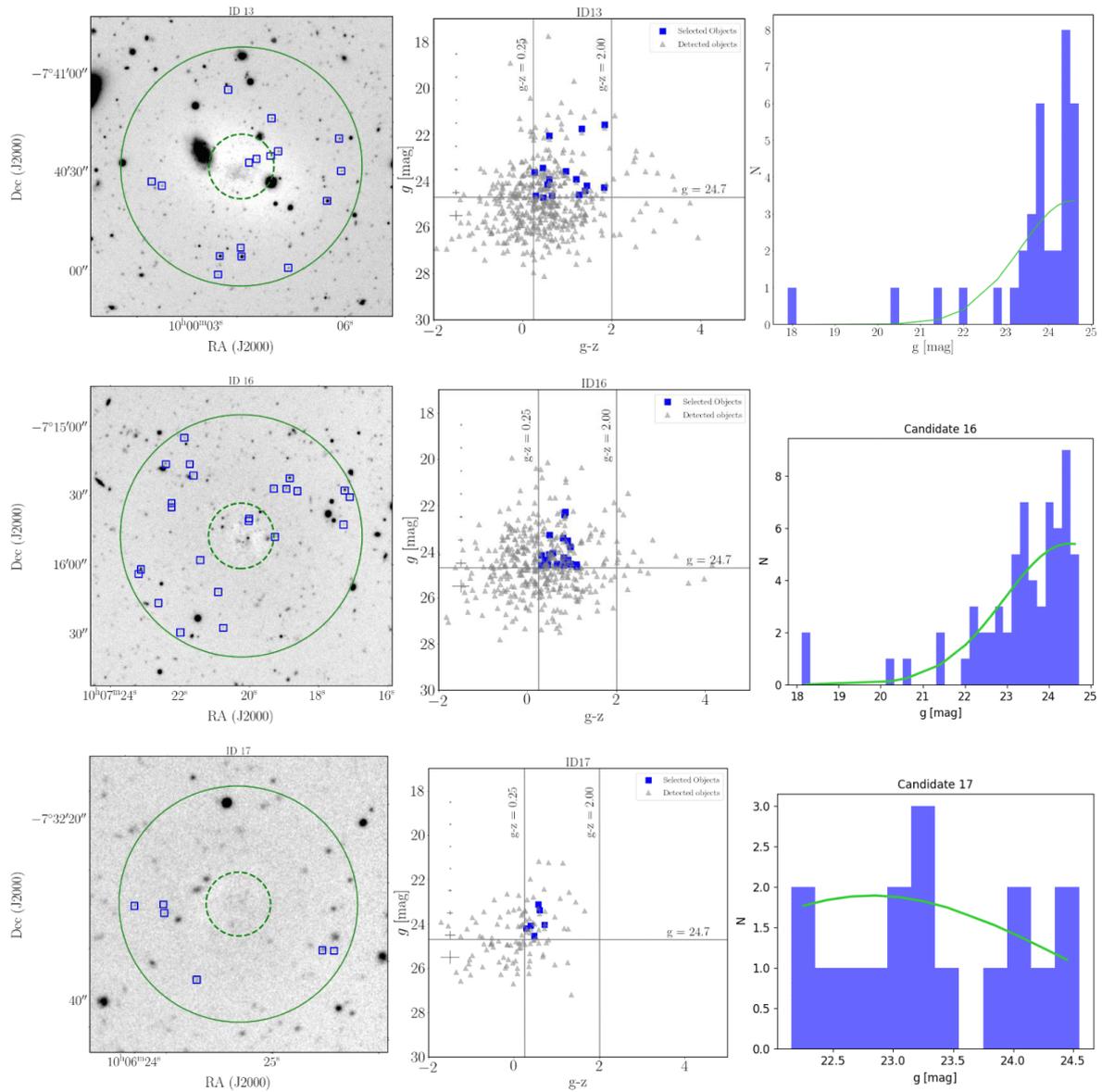


Figura A.2 – Painel apresentando os resultados obtidos para a população de GCs identificado em torno de LSBs utilizando os dados do Gemini. *Painel Esquerdo:* Distribuição espacial dos objetos candidatos a GCs identificados, a linha tracejada representa a distância de R_{ef} e a linha verde sólida representa a distância de $3.5 R_{ef}$. *Painel do meio:* Diagrama cor-magnitude (CMD) obtido para cada sistema de GCs analisados, os pontos azuis representam os objetos selecionados como candidatos a GCs e os pontos em cinza representam todas fontes pontuais identificadas pelo SExtractor. *Painel Direito:* Histograma de magnitude na banda g obtido para cada LSBd com o ajuste da função luminosidade dos aglomerados globulares (GCLF) obtida.

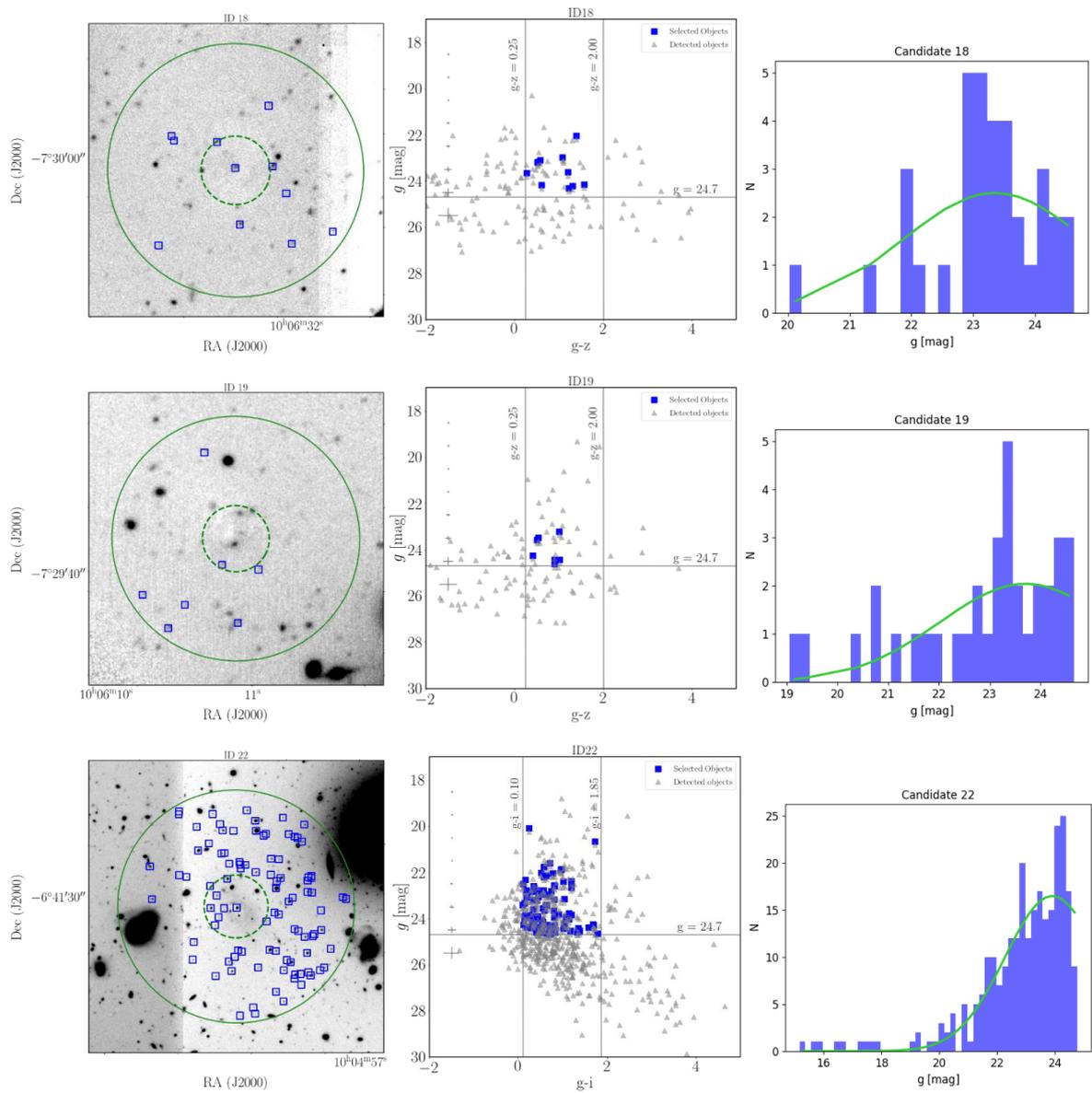


Figura A.2 – Continuação.