



Observatório
Nacional

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

EVOLUÇÃO DE GALÁXIAS EM SUPERGRUPOS DE AGLOMERADOS DE
GALÁXIAS EM BAIXO REDSHIFT

FILIPE GÓIS DA SILVA

RIO DE JANEIRO

2023

Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
Observatório Nacional
Programa de Pós-Graduação

Dissertação de Mestrado

EVOLUÇÃO DE GALÁXIAS EM SUPERGRUPOS DE AGLOMERADOS DE
GALÁXIAS EM BAIXO REDSHIFT

por

Filipe Góis da Silva

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-graduação em Astronomia do Observatório Nacional, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Astronomia.

Orientador: Dr. Ricardo Lourenço Correia
Ogando

Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Dezembro de 2023

G616

Góis da Silva, Filipe

Evolução de Galáxias em Supergrupos de Aglomerados de Galáxias em Baixo Redshift [Rio de Janeiro] 2023.

xxiv, 105 p. 29,7 cm: graf. il. tab.

Dissertação (mestrado) - Observatório Nacional - Rio de Janeiro, 2023.

1. supergrupos. 2. galáxias: aglomerados. 3. galáxias: evolução. I. Observatório Nacional. II. Título.

CDU 000.000.000

“EVOLUÇÃO DE GALÁXIAS EM SUPERGRUPOS DE AGLOMERADOS DE
GALÁXIAS EM BAIXO REDSHIFT”

FILIPPE GÓIS DA SILVA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ASTRONOMIA DO OBSERVATÓRIO NACIONAL COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ASTRONOMIA.

Aprovada por:

Dr. Ricardo Lourenço Correia Ogando – ON/MCTI
(Orientador)

Dr. Alberto Rodríguez Ardila – LNA/MCTI,
ON/MCTI

Dr. Paulo Afrânio Augusto Lopes – OV/UFRJ

Dr. José Eduardo Telles – ON/MCTI (Suplente)

Dra. Stephane Vaz Werner de Almeida – Durham
University (Suplente)

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

19 DE DEZEMBRO DE 2023

A familiares e amigos.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus.

A minha família — nominalmente minha mãe Railda, minha irmã Sarah e minha irmã Débora (*in memoriam*) — por me apoiar por bons e maus momentos, mesmo à distância.

A meu orientador Dr. Ricardo Ogando por me ajudar durante os 2 anos de mestrado tanto com a pesquisa, quanto em “navegar” a cidade do Rio de Janeiro.

A meus amigos de ON, especialmente a Gabriel, com quem eu dividi o apartamento e muitas histórias durante um ano de convivência, e a Maria Eduarda.

A meus amigos de outras partes do país, seja em minha cidade natal, seja em outros cantos desta nação, nomeadamente Pedro e Rodrigo, pelas conversas e companhia durante do mestrado, mesmo que à distância.

Gostaria de agradecer aos professores Dr. Alberto Ardila, Dr. Paulo Lopes, Dr. Eduardo Telles e Dr.^a Stephane Werner por aceitarem o convite para participar da banca e reservarem um tempo para revisar este trabalho.

Agradeço ao ON, por prover o espaço para o aprendizado em astronomia e para o desenvolvimento. Agradecer nomeadamente à Giane e à Christiane por todo apoio prestado durante minha estada no ON, respondendo a perguntas sempre que fosse necessário. A todos os pesquisadores do Observatório que sempre estiveram disponíveis a ajudar.

Agradeço à colaboração do DES por acolher-me academicamente, sempre serem aberto a discussão e solícitos para sanar qualquer dúvida. Posso dizer que aprendi muito neste meu período em contacto com vocês.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior — Brasil (CAPES) — Código de Financiamento 001

“The universe is big. It’s vast and complicated and ridiculous. And sometimes, very rarely, impossible things just happen and we call them miracles.”

The Doctor

EVOLUÇÃO DE GALÁXIAS EM SUPERGRUPOS DE AGLOMERADOS DE
GALÁXIAS EM BAIXO REDSHIFT

RESUMO

Supergrupos são "grupos de grupos" e/ou aglomerados de galáxias com sub-estruturas que poderão colapsar em um aglomerado. Como aglomerados possuem características particulares, tais como uma sequência vermelha bem definida e concentração de galáxias *early-type*, é importante entender como tais propriedades surgiram, que fatores — tal como pré-processamento nessas estruturas — levaram a essa configuração.

Existem poucos estudos sobre Supergrupos (e.g., Brough *et al.*, 2006; Sengupta *et al.*, 2022; Smit *et al.*, 2015). Além disso, em geral os estudos focam em analisar um Supergrupo por vez. Neste contexto, vamos estudar um conjunto de Supergrupos em uma faixa significativa em *redshift* ($z < 0,5$), expandindo a lista desses objetos, e entender suas características comuns no que tange evolução e distribuição de populações estelares.

Identificamos Supergrupos no catálogo de aglomerados de galáxias do REDMAPPER usando os 5 000 graus quadrados do DES nas bandas *griz*. Analisamos a evolução de galáxias nestes usando cores, entendendo de que forma fatores como o raio e a massa do Supergrupo podem influenciar estas populações.

Para encontrar Supergrupos, buscamos por sobredensidades de aglomerados em bins de 0,1 em *redshift* até $z=0,5$ e em pixels com largura de 5 cMpc em RA e Dec. Usamos a correção K de Blanton e Roweis (2007) para ajustar as magnitudes em todas as bandas e um Modelo de Mistura Gaussiana (GMM) para separação de populações em galáxias azuis e vermelhas.

Encontramos 8 candidatos a Supergrupos com $0,1 < z < 0,4$ e massa mínima total de $0,5\text{--}1,8 \times 10^{15} M_{\odot}$. Os aglomerados membros têm m_{gap} entre a BCG e a quarta galáxia mais brilhante menor que 2,5, indicando formação recente ou em curso. Há uma correlação entre a fração de galáxias vermelhas e o raio tanto nos aglomerados individuais, quanto nos Supergrupos. Os aglomerados centrais têm, em seu interior, uma fração de vermelhas maior que os aglomerados satélites. Da mesma forma, os Supergrupos mais massivos têm uma fração de vermelhas maior que os menos massivos em todo o raio. Assim, nossos resultados indicam que a taxa de *quenching* pode estar relacionada à massa do Supergrupo e que as galáxias sofrem pré-processamento nas sub-estruturas.

Palavras-chave: supergrupos, galáxias:aglomerados, galáxias:evolução

GALAXY EVOLUTION IN SUPERGROUPS OF GALAXY CLUSTERS AT LOW
REDSHIFT

ABSTRACT

Supergroups are “groups of galaxy groups” and/or galaxy clusters with substructures that might collapse into a single cluster. Since galaxy clusters have singular characteristics, such as a well-defined red sequence and a concentration of early-type galaxies, it is important to understand how these properties came to be and which factors — such as preprocessing in these structures — might have led to this configuration.

There are few studies about Supergroups (e.g., Brough *et al.*, 2006; Sengupta *et al.*, 2022; Smit *et al.*, 2015). Besides, the studies generally focus on the analysis of one Supergroup at a time. In this context, we will study a set of Supergroups over a significant redshift range ($z < 0.5$), expanding the list of these objects, and understanding their common characteristics concerning galaxy evolution and stellar population distribution.

We identified Supergroups in the REDMAPPER galaxy clusters catalog using data from the 5,000 sq. deg. DES footprint in the *griz* bands. We analyzed the galaxy evolution inside them using colors, understanding how factors, such as the radius and the mass of the Supergroup, might influence these populations.

To find Supergroups, we searched for cluster overdensities in *redshift* bins of 0.1 out to $z=0.5$ and with 5 cMpc wide pixels in RA and Dec. We used the K correction of Blanton e Roweis (2007) to correct the magnitude in all bands and a Gaussian Mixture Model (GMM) to separate populations in blue and red galaxies.

We found 8 Supergroup candidates with $0.1 < z < 0.4$ and minimum total mass of $0.5\text{--}1.8 \times 10^{15} M_{\odot}$. The member clusters have m_{gap} between the BCG and the fourth-brightest galaxy of less than 2.5, indicating recent or ongoing formation. There is a correlation between the fraction of red galaxies and the radius in individual clusters, as well as in Supergroups. The central clusters have a greater fraction of red in their interior than the satellite clusters. Similarly, more massive Supergroups have a higher red fraction than less massive ones across all radii. Thus, our results indicate that the quenching rate could also be related to the Supergroup’s mass and that galaxies undergo preprocessing in the substructures.

Keywords: supergroups, galaxy:clusters, galaxy:evolution

Lista de Figuras

1.1	Imagem da estrela variável V1, uma das usadas por Hubble para estimar a distância de M31. Na imagem podemos ver a foto tirado originalmente por Hubble no telescópio de 100in do Observatório Carnegie na Califórnia (abaixo) e uma foto tirada 90 anos mais tarde pelo telescópio espacial que leva seu nome. Fonte: NASA, ESA, the Hubble Heritage Team (STScI/AURA) e Z. Levay (STScI).	3
1.2	Imagem do aglomerado Abell 1703 em $z=0,28$. Fonte: NASA, ESA e Johan Richard (Caltech, USA) com reconhecimentos a Davide de Martin & James Long (ESA/Hubble)	5
1.3	Exemplo da distribuição da sequência vermelha, que se encontra acima da linha, num diagrama cor-magnitude das galáxias pertencentes ao <i>Great Wall</i> . Observa-se que a sequência vermelha é formada majoritariamente por galáxias <i>early-type</i> . Fonte: Gavazzi <i>et al.</i> (2010)	6
1.4	Esquema mostrando a formação de um aglomerado de um protoaglomerado em alto <i>redshift</i> para um aglomerado massivo em $z=0$. Fonte: Rosati (2018)	10
1.5	Diferença do poço de potencial entre um aglomerado virializado e um Supergrupo. Fonte: Sengupta <i>et al.</i> (2022)	10
1.6	Distribuição das galáxias no superaglomerado de <i>Corona Borealis</i> destacando os possíveis Supergrupos. Fonte: Einasto <i>et al.</i> (2021)	12
2.1	Esquerda: Imagem do telescópio Victor M. Blanco de 4 metros no Observatório Interamericano Cerro Tololo (<i>Cerro Tololo Inter-American Observatory</i> , CTIO) usado nas observações para o DES. Fonte: CTIO/NOIRLab/NSF/AURA/R. Sparks. Direita: Imagem da <i>Dark Energy Camera</i> (DECam). Fonte: DES/DOE/FNAL/CTIO/NOIRLab/NSF/AURA/R. Hahn	16
2.2	Footprint do DES mostrando o levantamento <i>wide-area</i> (em vermelho) e os <i>deep fields</i> (círculos azuis e vermelhos). Fonte: Abbott <i>et al.</i> (2021)	16
2.3	Distribuição dos filtros da DECam usados no levantamento do DES. Fonte: Abbott <i>et al.</i> (2018)	17

2.4	Diagrama mostrando as diferentes aberturas usada pelo programa SEXTRACTOR . A AUTO é a configuração que utilizada a abertura de Kron. Fonte: Holwerda (2005)	19
2.5	Mapa da distribuição dos aglomerados do <i>RedMaPPer Y3</i> pela área do levantamento do DES. As regiões mais claras se devem ao coadd das imagens no DES e os “buracos” correspondem a regiões com estrelas brilhantes.	22
2.6	Distribuição dos aglomerados do <i>RedMaPPer Y3</i> conforme o <i>redshift</i> para estruturas com $\lambda \geq 20$	23
3.1	Exemplo da detecção de Supergrupos nos dados do <i>RedMaPPer Y3</i> . Os pixels destacados por círculos com contagem igual a 4, e, portanto, foram selecionados para a inspeção visual.	27
3.2	Gráfico da cor $g - r$ pelo <i>redshift</i> para as galáxias do catálogo RM em nossos Supergrupos. O gráfico apresenta a cor sem a correção K (pontos pretos) e com a correção K (pontos vermelhos).	30
3.3	Gráfico da cor $r - i$ pelo <i>redshift</i> para as galáxias do catálogo RM em nossos Supergrupos. O gráfico apresenta a cor sem a correção K (pontos pretos) e com a correção K (pontos vermelhos).	31
3.4	Gráfico da cor $i - z$ pelo <i>redshift</i> para as galáxias do catalogue RM em nossos Supergrupos. O gráfico apresenta a cor sem a correção K (pontos pretos) e com a correção K (pontos vermelhos).	32
3.5	Histograma mostrando a bimodalidade da cor e a classificação do GMM em população azul e vermelha para o Supergrupo RM3761 com os respectivos KDE. Cerca de 40% das galáxias vermelhas são membros do RM.	34
4.1	Distribuição dos Supergrupos dentro do <i>footprint</i> do DES. A barra de cores indica o redshift fotométrico (z_λ) de cada Supergrupo e o tamanho do ponto indica o número de aglomerados no Supergrupo.	41
4.2	Gráfico do <i>redshift</i> (z_λ) pela riqueza (λ) para os aglomerados membros dos Supergrupos. Aglomerados pertencentes ao mesmo Supergrupo têm mesma cor e formato.	43
4.3	Gráfico do KDE da distribuição da riqueza (λ). Cada linha representa um dos Supergrupos.	44
4.4	Histograma da quantidade de aglomerados membros dos Supergrupos. Metade dos Supergrupos têm três membros, três Supergrupos têm dois membros e um Supergrupo tem quatro membros.	45
4.5	Gráfico da massa mínima total do Supergrupos pela quantidade de aglomerados membros.	46

4.6	Imagem dos aglomerados do Supergrupos RM3761 (direita), com os pontos verdes indicando as posições das respectivas BCGs. As posições relativas das galáxias membros dentro de cada aglomerado (esquerda). Em ambas as imagens, leste está para cima e norte para a direita.	47
4.7	Imagem dos aglomerados do Supergrupos RM239 (esquerda), com os pontos verdes indicando as posições das respectivas BCGs. As posições relativas das galáxias membro dentro de cada cluster (direita). Em ambas as imagens, norte está para cima e leste para a esquerda.	49
4.8	Exemplo de superaglomerado com morfologia <i>fillament</i> (SCI001, acima) e <i>spider</i> (SCI019, abaixo). Fonte: Einasto <i>et al.</i> (2014)	50
4.9	Gráfico dos contornos de densidade das galáxias do <i>Gold</i> no entorno dos aglomerados (pontos) do Supergrupo RM4806. Há uma sobredensidade entre os aglomerados, há também uma concentração a nordeste do aglomerado central que demonstraria uma possível acreção de galáxia por este (em filamentos ou em um grupo).	52
4.10	Gráfico dos contornos de densidade das galáxias do <i>Gold</i> no entorno dos aglomerados (pontos) do Supergrupo RM3761. Observa-se uma concentração de galáxias conectando os aglomerados.	53
4.11	Gráfico dos contornos de densidade das galáxias do <i>Gold</i> entorno dos aglomerados (pontos) do Supergrupo RM1791. Aparentemente, há uma concentração entre os aglomerados e eles estão suficientemente próximos. A concentração em RA=25,2 e Dec=-29,2 deve-se provavelmente à contaminação um aglomerado em uma faixa diferente de <i>redshift</i>	54
4.12	Gráfico dos contornos de densidade das galáxias do <i>Gold</i> entorno dos aglomerados (pontos) do Supergrupo RM6737. As concentrações a NW e SE do aglomerado central poderiam ser indícios de filamentos.	55
4.13	Gráfico dos contornos de densidade das galáxias do <i>Gold</i> entorno dos aglomerados (pontos) do Supergrupo RM239. Há uma concentração de galáxias entre os aglomerados que indicaria a existência de filamentos entre eles. . .	56
4.14	Gráfico dos contornos de densidade das galáxias do <i>Gold</i> entorno dos aglomerados (pontos) do Supergrupo RM650. Há uma concentração de galáxias entres os dois aglomerados que poderiam indicar uma interação entre eles. .	58
4.15	Gráfico dos contornos de densidade das galáxias do <i>Gold</i> entorno dos aglomerados (pontos) do Supergrupo RM6695. A concertação no canto inferior direito se deve ao Supergrupo RM803, de qual este Supergrupo poderia fazer parte.	59

4.16	Gráfico dos contornos de densidade das galáxias do <i>Gold</i> entorno dos aglomerados (pontos) do Supergrupo RM803. Há uma aparente concentração de galáxias entre os aglomerados. A sobredensidade em RA=42,6 e Dec=-16,6 seria devida ao Supergrupo RM6695, que poderia fazer parte deste Supergrupo.	60
4.17	Diagrama cor-magnitude de M_g versus $g-r$ das galáxias do RM (vermelho) e as adicionadas com o <i>Gold</i> (azul) para nossos Supergrupos.	62
4.18	Diagrama cor-magnitude de M_r versus $r-i$ das galáxias do RM (vermelho) e as adicionadas com o <i>Gold</i> (azul) para nossos Supergrupos.	63
4.19	Diagrama cor-magnitude de M_i versus $i-z$ das galáxias do RM (vermelho) e as adicionadas com o <i>Gold</i> (azul) para nossos Supergrupos.	64
4.20	Diagrama cor-magnitude das galáxias dos Supergrupos (RM+Gold). Os pontos vermelhos representam as galáxias classificadas como vermelhas pelo GMM e os pontos azuis representam as galáxias classificadas como azuis.	65
4.21	Gráfico da média da magnitude absoluta pelo raio para os Supergrupos encontrados. As barras de erro representam 1σ da distribuição. Observa-se que a magnitude aumenta conforme o raio, indicando que se encontra as galáxias mais luminosas (e, portanto, mais massivas) nas regiões mais centrais. O r é o valor do coeficiente de correlação de Pearson.	67
4.22	Histograma dos m_{gap} para os aglomerados membros dos Supergrupos. Nenhum dos aglomerados tem $m_{gap} \geq 2,5$	69
4.23	Gráfico da massa do aglomerado por seu m_{gap} . As cores representam o Supergrupos a que os aglomerados são membros e o tamanho do círculo representa a riqueza dos aglomerados.	70
4.24	Gráfico da magnitude absoluta das BCGs na banda r pelo m_{gap} dos aglomerados pertencentes aos Supergrupos deste trabalho. Pontos com a mesma cor pertencem ao mesmo Supergrupo e seu tamanho representa a riqueza do aglomerado.	71
4.25	Fração média de população de galáxias com relação ao raio para todos os aglomerados membros dos Supergrupos. Observa-se que há uma forte correlação entre a fração de população vermelha (e também azul) e o raio. As barras de erro representam 1σ . O r é o valor do coeficiente de correlação de Pearson.	73
4.26	Fração média da população de galáxias com relação ao raio para todos os Supergrupos. Assim como no caso local, observa-se uma forte correlação entre a fração de população (tanto vermelha, quando azul) e o raio. As barras de erro representam 1σ . O r é o valor do coeficiente de correlação de Pearson.	75

4.27	Gráfico das frações de população para os aglomerados centrais (acima) e para os satélites (abaixo). O r é o valor do coeficiente de correlação de Pearson.	76
4.28	Gráfico das frações de galáxias vermelhas (em vermelho) e azuis (em azul) para os Supergrupos deste trabalho. Os Supergrupos foram agrupados segundo suas massas mínimas totais, com os Supergrupos com massa maior ou igual a $10^{15} M_{\odot}$ representados pelos círculos e linhas tracejadas e os Supergrupos com massa menor que $10^{15} M_{\odot}$ representados pelas estrelas e linhas pontilhadas. A binagem em raio é semelhante ao caso global.	77
4.29	Gráfico das frações de galáxias vermelhas (em vermelho) e azuis (em azul) para os Supergrupos deste trabalho. Os Supergrupos foram agrupados segundo suas massas mínimas totais, com os Supergrupos com massa maior ou igual a $10^{15} M_{\odot}$ representados pelos círculos e linhas tracejadas e os Supergrupos com massa menor que $10^{15} M_{\odot}$ representados pelas estrelas e linhas pontilhadas. O raio foi parametrizado com o R_{200} do aglomerado mais rico do Supergrupo.	78
A.1	Histograma mostrando a bimodalidade da cor e a devida classificação do GMM em população azul e população vermelha para o Supergrupo RM4806 com os respectivos KDE.	99
A.2	Histograma mostrando a bimodalidade da cor e a devida classificação do GMM em população azul e população vermelha para o Supergrupo RM6737 com os respectivos KDE.	100
A.3	Histograma mostrando a bimodalidade da cor e a devida classificação do GMM em população azul e população vermelha para o Supergrupo RM1791 com os respectivos KDE.	101
A.4	Histograma mostrando a bimodalidade da cor e a devida classificação do GMM em população azul e população vermelha para o Supergrupo RM650 com os respectivos KDE.	102
A.5	Histograma mostrando a bimodalidade da cor e a devida classificação do GMM em população azul e população vermelha para o Supergrupo RM239 com os respectivos KDE.	103
A.6	Histograma mostrando a bimodalidade da cor e a devida classificação do GMM em população azul e população vermelha para o Supergrupo RM803 com os respectivos KDE.	104
A.7	Histograma mostrando a bimodalidade da cor e a devida classificação do GMM em população azul e população vermelha para o Supergrupo RM6695 com os respectivos KDE.	105

Lista de Tabelas

2.1	Informações sobre a cobertura dos filtros usados no levantamento do DES como publicadas por Flaugher <i>et al.</i> (2015).	16
2.2	Valores do limite de magnitude (MAG_AUTO com $S/N = 10$), PSF FWHM média (<i>single epoch</i>) e a repetibilidade fotométrica (<i>single epoch</i>) para cada banda do levantamento <i>wide-area</i> do DES, conforme mostra Abbott <i>et al.</i> (2021).	18
4.1	Informações sobre os oito Supergrupos encontrados. Os Supergrupos receberam a identificação de seu aglomerado-membro mais rico, como no catálogo <i>RedMaPPer Y3</i> . As informações de RA, Dec e z_λ também são dos aglomerados-membro mais ricos, λ é a soma das riquezas dos aglomerados membros, R_{200} é o raio calculado a partir do somatório do λ , $n_{clusters}$ é o número de aglomerados em cada Supergrupo e M é a massa mínima total.	40
4.2	Informações sobre o λ , R_{200} e M_{200} do aglomerado mais rico de cada Supergrupo.	40
4.3	Informações sobre o tipo morfológico e os <i>matches</i> com outros catálogos de aglomerados (Abell <i>et al.</i> , 1989; Dalton <i>et al.</i> , 1997; Hilton <i>et al.</i> , 2021; Wen e Han, 2013) para os oito Supergrupos encontrados. Dois deles não apresentaram <i>match</i> em outros catálogos.	49

Sumário

Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xxi
1 Introdução	1
1.1 História	1
1.2 Definições	4
1.3 Teoria sobre Supergrupos	7
1.4 Supergrupos Conhecidos	11
1.5 Objetivos	13
1.6 Ferramentas e Cosmologia Utilizada	13
1.7 Organização	13
2 Dados	15
2.1 Dark Energy Survey (DES)	15
2.1.1 Catálogo Gold	18
2.2 RedMaPPer	21
3 Métodos	25
3.1 Busca no RedMaPPer Y3	25
3.2 Seleção de Galáxias no Catálogo Gold	28
3.3 Correção K	29
3.4 Separação de populações com <i>Gaussian Mixture Model</i>	33
3.5 Estimativa da Fração de Populações	36
3.6 <i>Magnitude Gap</i>	37
4 Resultados	39
4.1 Supergrupos selecionados	39
4.2 Distribuição de Galáxias dentro dos Supergrupos	51
4.3 Cores do Supergrupos	61
4.4 <i>Magnitude Gap</i>	68
4.5 Estudo de populações de galáxias	72

5	Conclusões	81
	Referências Bibliográficas	85
A	Histogramas GMM para os Supergrupos	99

Capítulo 1

Introdução

Aglomerados de galáxias são as maiores estruturas gravitacionalmente ligadas do Universo. São compostos principalmente de galáxias, gás, estrelas e matéria escura. Possuem características particulares como uma sequência vermelha bem definida e uma concentração de galáxias *early-type*.

Supergrupos são grupos de grupos e/ou aglomerados de galáxias que podem colapsar em um único aglomerado (Brough *et al.*, 2006; Sengupta *et al.*, 2022; Wolfinger *et al.*, 2016). O fato de estarem em baixo redshift, oferece-nos uma oportunidade ímpar de investigar a formação de aglomerados e a evolução de galáxias nessas estruturas, especialmente com relação ao papel da profundidade do potencial gravitacional na evolução e a eficiência da formação estelar.

1.1 História

O primeiro registro escrito de observação de uma estrutura externa a nossa Galáxia (apesar de não ser entendida como tal à época) se deu no século X com a descrição da Galáxia de Andrômeda como uma “mancha nebulosa” pelo astrônomo persa Al-Sufi em sua obra *O Livro de Estrelas Fixas* (Hafez, 2010; Jones, 1968).

Os primeiros registros de observações de aglomerações de nebulosas foram feitos por Charles Messier e William Herschel com seus compilados de nebulosas entre o fim do século XVIII e início do século XIX (Biviano, 2000; Herschel, 1785, 1811).

Messier, enquanto elaborava seu famoso catálogo, observou uma aglomeração de nebulosas na constelação de Virgem. Entretanto, ele não aprofundou seu estudo na distribuição de tais objetos pelo céu, sendo seu catálogo focado na identificação de, principalmente, cometas. (Biviano, 2000)

Já Herschel, que tinha interesse em tais nebulosas, também observou uma aglomeração de nebulosas na constelação de Virgem, além de aglomerações de nebulosas em outras constelações, tais como *Hydra*, *Coma Berenices*, *Ursa Maior* e *Leão*. (Herschel, 1785, 1811), hoje, conhecidos aglomerados de galáxias.

Cabe ressaltar que alguns pensadores da época acreditavam na ideia de que o universo fosse povoado por sistemas similares a nossa Galáxia (e.g., Wright 1750 e Kant 1755) e, portanto, algumas destas nebulosas fossem objetos extragalácticos. Outros acreditavam que estes objetos pertenciam a nossa Galáxia (Herschel, 1811; Spencer, 1870). Essa questão só seria resolvida de uma vez por todas no início do século XX.

O ápice da discussão entre as duas visões de Universo foi um evento chamado de O Grande Debate em 1920. Neste evento, Harlow Shapley defendeu que a Via Láctea constituía o Universo todo (com um diâmetro da ordem de 300 000 anos-luz) e as então chamadas “nebulosas espirais” faziam parte dela, enquanto Heber Curtis defendeu que o Universo seria maior que a Via Láctea (com diâmetro máximo de 30 000 anos-luz) e que as “nebulosas espirais” seriam sistemas independentes semelhantes a esta (Shapley e Curtis, 1921).

Na mesma época, havia estudos para investigar a natureza destes objetos. Pode-se citar a descoberta que “nebulosas espirais” estão se afastando através do estudo das suas velocidades radiais (Slipher, 1915), ou estudo sistemático de novas em Andrômeda e a observação de que as mesmas são mais tênues que seus congêneres em nossa Galáxias (Curtis, 1917; Ritchey, 1917). Já Shapley (1917) concluiu que as espirais só poderiam pertencer a nossa Galáxia ao observar novas nelas, pois estas teriam ofuscado a espiral hospedeira; ademais, suas dimensões angulares seriam incompatíveis com aquelas esperadas para objetos extragalácticos.

A estimativa da distância para M33 (Hubble, 1926) e M31 (Hubble, 1929) — de 263 kpc e 275 kpc, respectivamente — a partir da observação de Cefeidas (Leavitt e Pickering, 1912) consolidou a hipótese que as ditas nebulosas espirais são sistemas extragalácticos, ou seja, são galáxias (Figura 1.1).

Desta sorte, as aglomerações destes objetos conhecidas desde os tempos de Messier e Herschel (nas constelações de Virgem e *Coma Berenices*, por exemplo) foram também confirmadas como aglomerados de galáxias e, portanto, estruturas extragalácticas.

Nas décadas subsequentes, alguns estudos sobre a natureza dos aglomerados de galáxias levaram a algumas descobertas importantes. Por exemplo, como a proposição da existência de Matéria Escura partindo da comparação entre a massa encontrada através da dinâmica e a massa obtida pela luminosidade de um aglomerado (Zwicky, 1933, 1937).

As discussões sobre formação de aglomerados de galáxias já estavam em voga nas décadas de 1960 e 1970, com estudos apresentando modelos de formação dessas estruturas (Peebles, 1970; Sunyaev e Zeldovich, 1972; van Albada, 1960, 1961). Já as primeiras observações de aglomerados em formação começariam mais tarde naquela década (Davies *et al.*, 1978). Os modelos de formação serão discutidos mais adiante em outra seção.

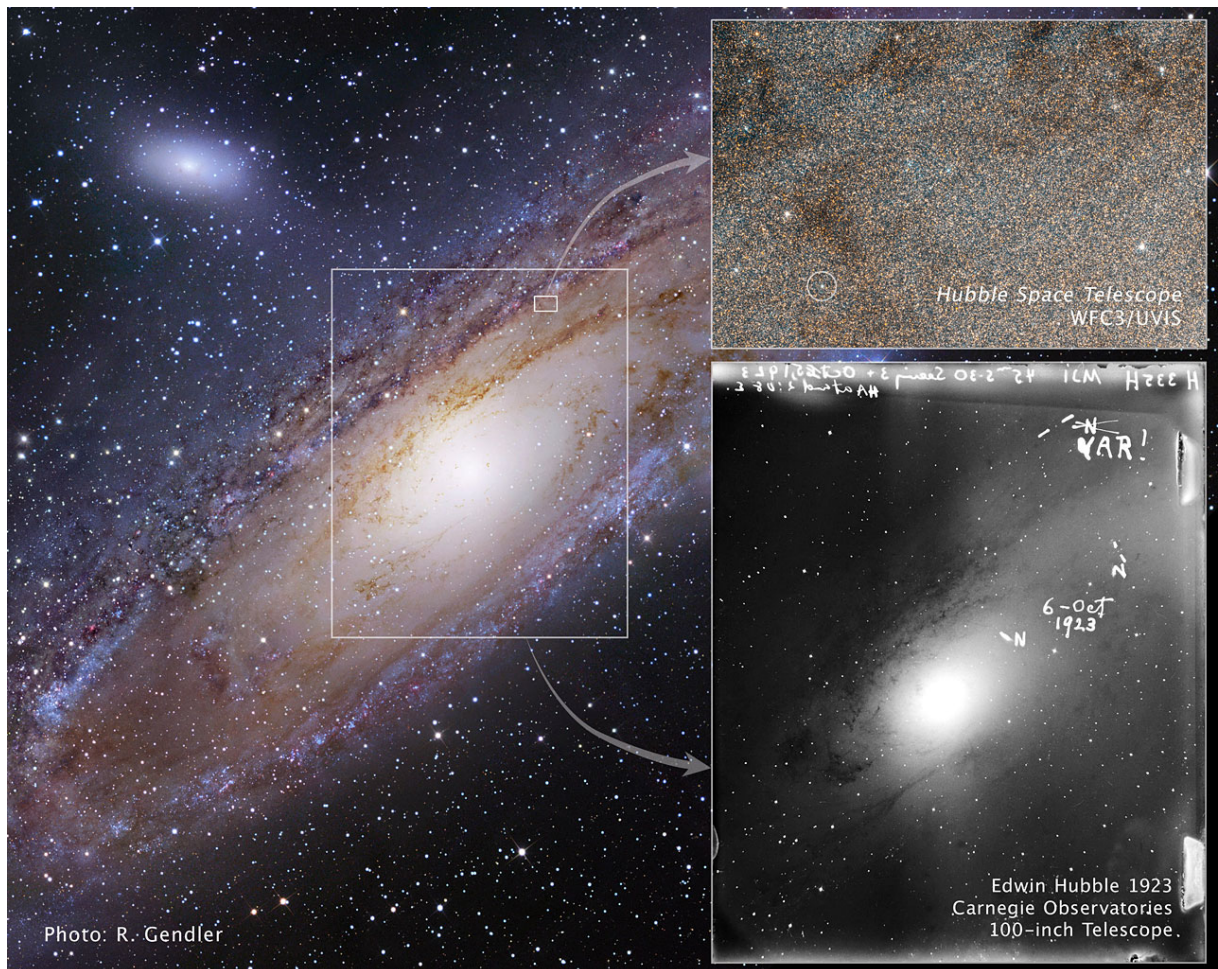


Figura 1.1: Imagem da estrela variável V1, uma das usadas por Hubble para estimar a distância de M31. Na imagem podemos ver a foto tirado originalmente por Hubble no telescópio de 100in do Observatório Carnegie na Califórnia (abaixo) e uma foto tirada 90 anos mais tarde pelo telescópio espacial que leva seu nome. Fonte: NASA, ESA, the Hubble Heritage Team (STScI/AURA) e Z. Levay (STScI).

1.2 Definição de Aglomerados, Protoaglomerados e Supergrupos

Antes de se definir o que são Supergrupos de aglomerados de galáxias, cabe-se definir aglomerados de galáxias e protoaglomerados e indicar como estes estão ligados à nossa definição de Supergrupos.

Define-se aglomerados de galáxias (Figura 1.2) como estruturas formadas por galáxias, gás, estrelas, matéria escura, etc., com um halo virializado de massa maior ou igual à $10^{14} M_{\odot}$ (Bower e Balogh, 2004). Já halos virializados entre $10^{13} M_{\odot}$ e $10^{14} M_{\odot}$ são definidos como grupos de galáxias. Adotada esta definição, lidaremos somente com aglomerados. Destaca-se aqui que, exceto quando explicitamente indicado, o termo aglomerado irá se referir a aglomerados de galáxias.

Já protoaglomerados podem ser definidos como estruturas que colapsarão em aglomerados em $z \geq 0$ (Overzier, 2016), assim, são os progenitores dos aglomerados atuais, sendo encontrados em altos *redshifts* ($z \gtrsim 2$).

Os Supergrupos são grupos de grupos de galáxias que eventualmente colapsarão em um aglomerado (Brough *et al.*, 2006; Sengupta *et al.*, 2022; Wolfinger *et al.*, 2016). Entretanto, neste trabalho, utilizaremos este termo para definir grupos de aglomerados ou aglomerados massivos com subestruturas próximas que podem colapsar em um único aglomerado. Não confundir o termo Supergrupo com superaglomerado que poderiam não estar gravitacionalmente ligados, sofrendo ação do fluxo de Hubble e, portanto, não colapsariam em uma única estrutura (Bag *et al.*, 2023). Assim, em outras palavras, Supergrupos seriam estruturas similares a protoaglomerados em baixo *redshift*.



Figura 1.2: Imagem do aglomerado Abell 1703 em $z=0,28$. Fonte: NASA, ESA e Johan Richard (Caltech, USA) com reconhecimentos a Davide de Martin & James Long (ESA/Hubble)

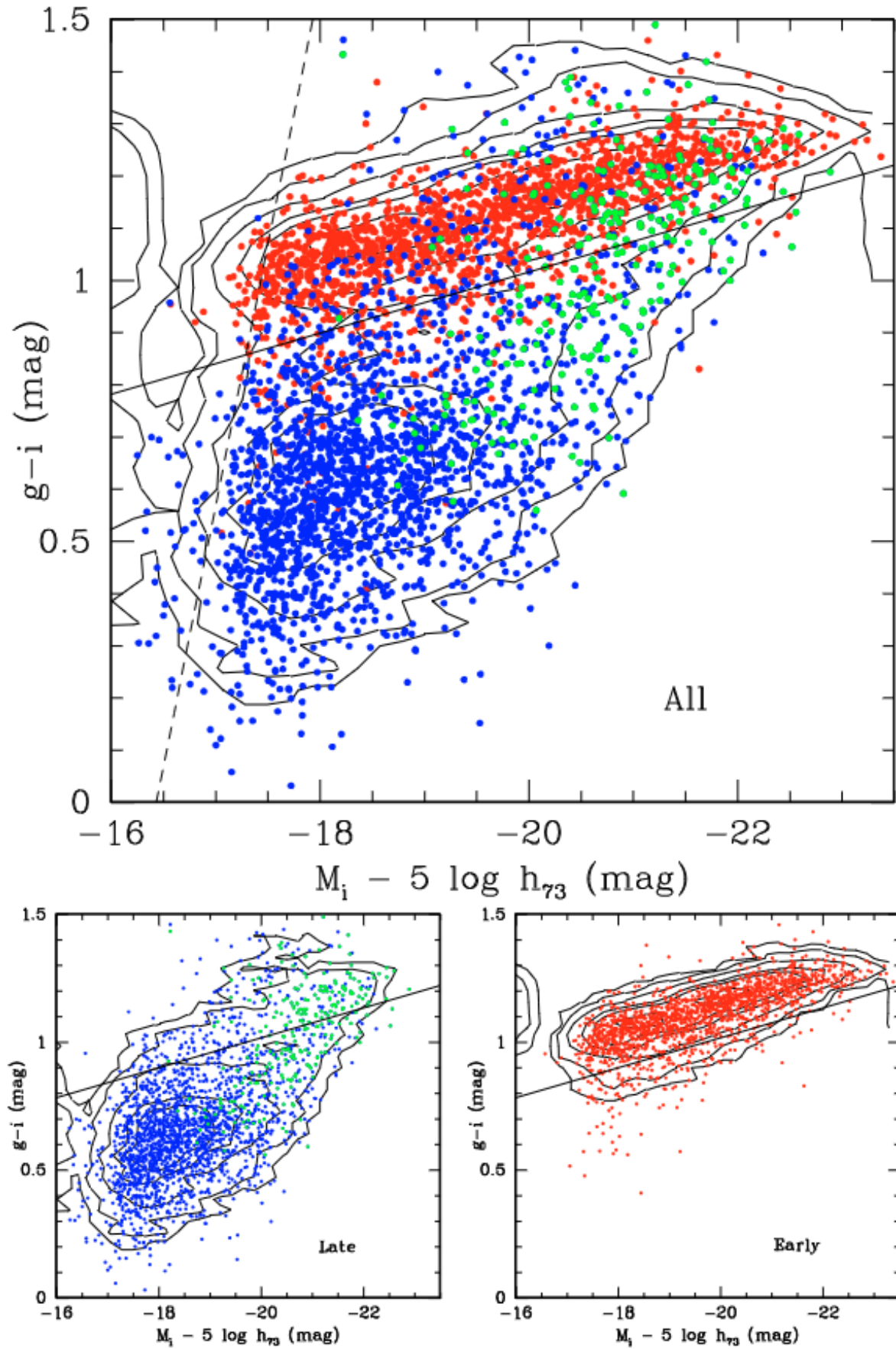


Figura 1.3: Exemplo da distribuição da sequência vermelha, que se encontra acima da linha, num diagrama cor-magnitude das galáxias pertencentes ao *Great Wall*. Observa-se que a sequência vermelha é formada majoritariamente por galáxias *early-type*. Fonte: Gavazzi *et al.* (2010)

1.3 Teoria sobre Supergrupos

O processo de colapso está fora do escopo deste trabalho de mestrado, devido às escalas temporais de tais eventos, o que impossibilitaria a observação direta destes.

Usa-se o *crossing time* (i.e., o tempo que uma galáxia levaria para cruzar o aglomerado e, por tanto, o tempo que o aglomerado leva para se “comunicar” consigo mesmo) para se ter uma noção das escalas temporais de eventos dinâmicos em aglomerados. Assim, temos que o *crossing time* é:

$$t_{cross} = \frac{R}{v} \quad (1.1)$$

Onde R é o raio do aglomerado e v é a velocidade da galáxia. Assumindo que a órbita da galáxia no aglomerado seja circular, logo $v = (GM/R)^{1/2}$, tem-se:

$$t_{cross} = \frac{R}{(GM/R)^{1/2}} = \sqrt{\frac{R^3}{GM}} \quad (1.2)$$

Se assumirmos que o aglomerado é esférico, temos que a densidade é dada por:

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{3M}{4\pi R^3}$$

Logo, tem-se que o *crossing time* depende somente da densidade do aglomerado:

$$t_{cross} = \sqrt{\frac{3M}{4\pi\rho GM}} = \sqrt{\frac{3}{4G\pi\rho}} \quad (1.3)$$

Os limites de um aglomerado são difíceis de se definir, pois não há uma fronteira clara entre o aglomerado e seu entorno. Assim, algumas definições são usadas para encontrar o tamanho do aglomerado baseadas na densidade deste ou em seu estado dinâmico. Aqui cabe destacar três destas: R_{vir} é o raio calculado a partir do teorema do Virial¹; R_{500} é o raio de uma esfera que encapsula uma densidade 500 vezes maior que a densidade crítica do Universo no *redshift* do aglomerado; R_{200} tem definição análoga a R_{500} com densidade 200 vezes maior que a densidade crítica (Hansen *et al.*, 2005). Há outra definição para os últimos dois raios chamadas de R_{500m} e R_{200m} onde a densidade usada é a densidade média de matéria do Universo.

Assumindo que a densidade de um aglomerado é 200 vezes a densidade crítica do Universo em $z=0$, com $\rho_c = 3H_0^2/8\pi G$, tem-se:

$$t_{cross} = \sqrt{\frac{3 * 8G\pi}{4G\pi * 200 * 3 * H_0^2}} = \sqrt{\frac{H_0^{-2}}{100}} = \frac{H_0^{-1}}{10} \quad (1.4)$$

¹O teorema do virial afirma que, para um sistema dinâmico em equilíbrio, a energia cinética média é duas vezes a média da energia potencial. Ou seja, $\langle E_c \rangle = -2\langle E_p \rangle$.

Tomando $H_0 = 66,76 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1} = 6,92 \times 10^{-11} \text{ yr}^{-1}$ (Planck Collaboration *et al.*, 2020). Assim, o *crossing time* é:

$$t_{cross} = \frac{(6,92 \times 10^{-11})^{-1}}{10} \text{ yr} \simeq 1,4 \times 10^9 \text{ yr} \quad (1.5)$$

Ou seja, a duração de eventos dinâmicos em aglomerados (e.g., interação entre galáxias dentro destes) é da escala de bilhões de anos. Presume-se que a interação entre aglomerados tenha escalas temporais ainda maiores, assim, o estudo do processo de colapso está fora do escopo deste trabalho.

Os aglomerados apresentam características particulares quando comparados ao campo, tais como uma sequência vermelha bem definida e uma relação entre morfologia e densidade (Bower *et al.*, 1992a,b; Dressler, 1980; Mei *et al.*, 2009, 2023; Postman *et al.*, 2005; Visvanathan e Sandage, 1977). A sequência vermelha é uma região constricta no diagrama cor-magnitude (Figura 1.3), composta majoritariamente por galáxias *early-type*. Esta relação entre cor e morfologia é conhecida desde a década de 1950 (de Vaucouleurs, 1959). Os aglomerados também são povoados por galáxias *early-type*, com os seus centros dominados por estas, enquanto o campo é comparativamente dominado por galáxias *late-type* (Dressler, 1980; Springel *et al.*, 2001).

Logo, é interessante estudar como tais características surgiram e quais processos levaram a elas. Para isso, é preciso entender como os aglomerados se formaram estudando seus antecessores e estruturas em processo de formação.

Segundo o modelo Λ CDM, as estruturas no Universo formaram-se seguindo uma hierarquia, com estruturas menores formando-se primeiro e estruturas maiores formando-se mais tarde na história do Universo a partir do colapso dessas estruturas menores (Press e Schechter, 1974; White e Rees, 1978).

Assim sendo, os aglomerados atuais teriam se formado de blocos de estruturas menores (Figura 1.4). De fato, grande parte das galáxias dentro de aglomerados em $z=0$ formaram-se em protoaglomerados antes que estes colapsem em aglomerados (Muldrew *et al.*, 2018) e cerca de 40% destas galáxias foram acrescidas em grupos de galáxias (McGee *et al.*, 2009).

Houve um aumento significativos do número de protoaglomerados encontrados na última década (vide referências na seção 1 de Mei *et al.* 2023) e espera-se um aumento ainda maior na próxima década com o advento de instrumentos no infravermelho tais como o *James Webb Space Telescope* (JWST) e o *Wide Field Infrared Survey Telescope* (WFIRST) que têm por objetivo estudar os primórdios do Universo (Gardner *et al.*, 2006; Spergel *et al.*, 2015).

Entretanto, como estas estruturas estão em altos *redshifts*, estudá-las pode ser um desafio, visto que muitas de suas galáxias podem estar abaixo do limite de detecção de muitos levantamentos modernos (Popescu *et al.*, 2023; Shi *et al.*, 2019). Diferentemente

dos protoaglomerados, os Supergrupos já apresentam algumas características dos aglomerados, tais como uma sequência vermelha, principalmente nas regiões mais centrais (Brough *et al.*, 2006; Kautsch *et al.*, 2008; Sengupta *et al.*, 2022; Wolfinger *et al.*, 2016). Enquanto os protoaglomerados e/ou aglomerados, só passam a apresentar tais características em torno de $z \sim 1,4$ (Lemaux *et al.*, 2019). Para além dos Supergrupos estarem num estado “mais avançado” na evolução do Universo, eles também já possuiriam um meio intra-grupo (em inglês, *Intragroup Medium* ou IGM) que emitiriam em raio-X e também permitiria a detecção pelo efeito SZ (Sunyaev e Zeldovich, 1980). Ou seja, têm melhor cobertura pelos levantamentos modernos que os protoaglomerados.

Assim, investigar estruturas similares em baixo *redshift* poderia propiciar uma oportunidade de analisar a fundo a evolução de galáxias antes de entrarem no aglomerado e entender também se há pré-processamento das galáxias, i.e., se as galáxias teriam passado por *quenching*² antes de entrarem no aglomerados (Cortese *et al.*, 2006; De Lucia *et al.*, 2012; Dressler *et al.*, 2013; Haines *et al.*, 2015; Lopes *et al.*, 2024; Sarron *et al.*, 2019; Tomczak *et al.*, 2019), seja em grupos ou estruturas filamentosares, investigando quais processos estas galáxias passam, quando e o que levaria ao *quenching* da formação estelar.

Os Supergrupos teriam um poço de potencial mais raso que um aglomerado relaxado (Figura 1.5), o que nos permitiria estudar os mecanismos que agem sobre as galáxias (pressão de arrasto, *harassment*, etc.) nesses ambientes de maneira desacoplada tanto no espaço quanto no tempo. Já que em aglomerados já relaxados e massivos, estes mecanismos tenderiam a acontecer concomitantemente, deixando pouco tempo para testemunhar, por exemplo, a migração da população entre a população azul (jovem) e população vermelha (velha) (Sengupta *et al.*, 2022).

²O termo *quenching* não denota um processo astrofísico *per se*, mas a uma fase em que a formação estelar de uma galáxia é diminuída.

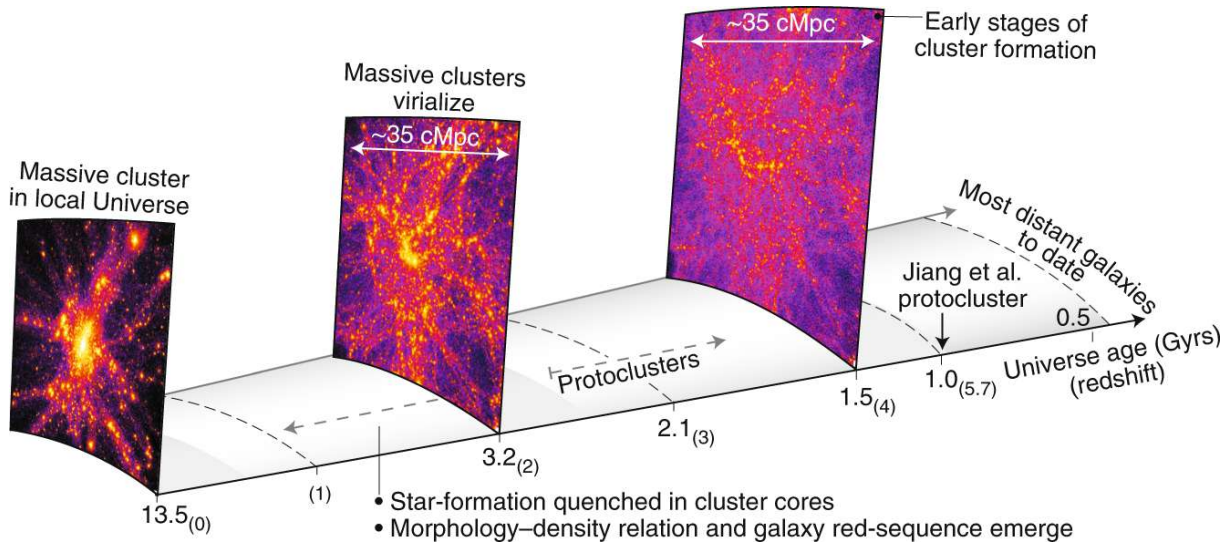


Figura 1.4: Esquema mostrando a formação de um aglomerado de um protoaglomerado em alto *redshift* para um aglomerado massivo em $z=0$. Fonte: Rosati (2018)

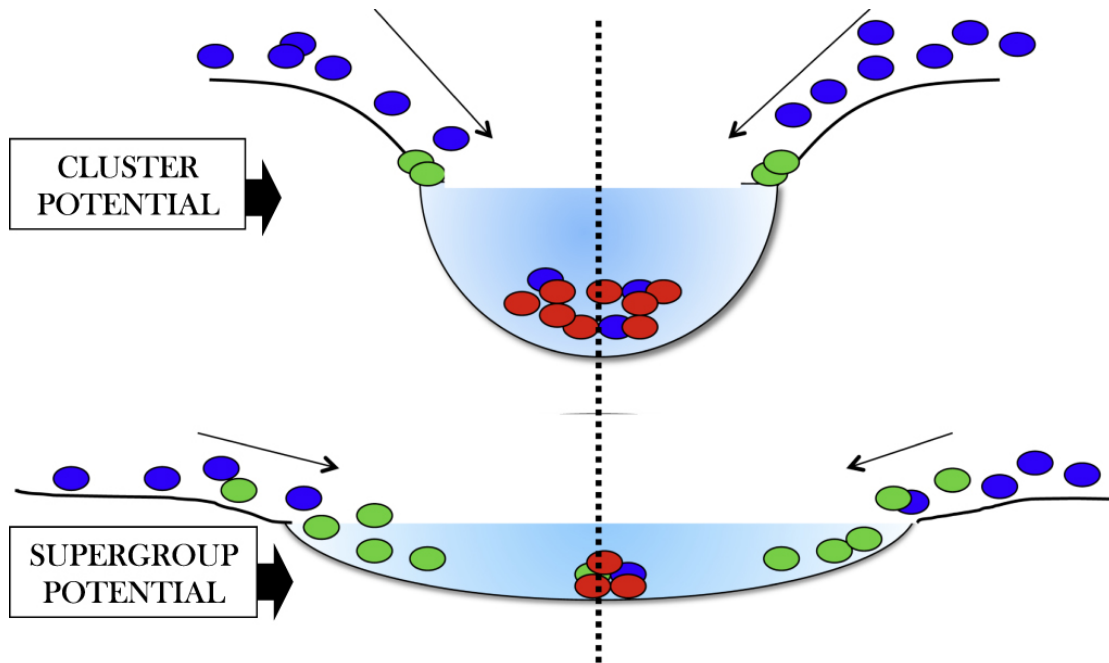


Figura 1.5: Diferença do poço de potencial entre um aglomerado virializado e um Supergrupo. Fonte: Sengupta *et al.* (2022)

1.4 Supergrupos Conhecidos

Existem vários Supergrupos conhecidos na literatura, alguns deles inclusive estão catalogados em catálogos de aglomerados como o Abell (A1822 e A2142 são exemplos), embora não sejam reconhecidos como Supergrupos nestes catálogos. Nesta seção, serão expostos alguns Supergrupos e o que se sabe sobre eles, além de uma discussão sobre evolução de galáxias a partir do conhecimento sobre estes.

Um dos primeiros Supergrupos conhecidos é o SG 1120-1202 em $z \approx 0,37$, composto de 4 grupos com uma distância projetada de 4 Mpc e massa resultante de $5,3 \times 10^{14} M_{\odot}$, equivalendo a um terço da massa de Coma (Gonzalez *et al.*, 2005; Smit *et al.*, 2015). O A1822 é um Supergrupo composto de três grupos virializados e uma rede filamentar em $z=0,139$ e com massa total de aproximadamente $2 \times 10^{14} M_{\odot}$ e raio de aproximadamente 5 Mpc (Owers *et al.*, 2013; Sengupta *et al.*, 2022).

Estruturas a até $6 h^{-1}$ dos aglomerados mais ricos (Figura 1.6) de *Corona Borealis* (Einasto *et al.*, 2021) e grupos de galáxias a até $8 h^{-1}$ Mpc de A2142 estariam colapsando destes (Einasto *et al.*, 2018), cada Supergrupo formariam estruturas com massa total de aproximadamente $4,7 \times 10^{15} M_{\odot}$ e $2,3 \times 10^{15} M_{\odot}$, respectivamente.

Cabe destacar também dois Supergrupos na vizinhança de nossa Galáxia: o Supergrupo Eridanus com 3 grupos membros e massa resultante de $\sim 7 \times 10^{13} M_{\odot}$ e que estaria se afastando de Fornax (Brough *et al.*, 2006). O Supergrupo Ursa Major com 6 grupos membros e massa resultante de $\sim 8 \times 10^{13} M_{\odot}$ poderia colapsar No aglomerado de Virgo (Wolfinger *et al.*, 2016).

Supergrupos teriam uma fração de galáxias na sequência vermelha maior que o campo, mas menor que um aglomerado virializado (Brough *et al.*, 2006; Pak *et al.*, 2014), embora haja Supergrupos que possuam frações semelhantes (Kautsch *et al.*, 2008). Isso seria um indício de pré-processamento de galáxias.

Há indícios também de que as cores e a luminosidade no UV, e, portanto, a formação estelar³, estariam correlacionadas ao raio partindo do centro do potencial gravitacional (quanto mais perto do centro, mais vermelha e menos luminosa nesta banda), da densidade do ambiente (galáxias em ambientes mais densos são mais vermelhas e menos luminosas) e a massa da galáxia (galaxias mais massivas são em geral, mas vermelhas que seus pares menos massivos nestas estruturas), o que poderia indicar a influência desses fatores na evolução de uma galáxia (Monroe *et al.*, 2017; Sengupta *et al.*, 2022).

A influência da distância ao centro do potencial gravitacional indicaria que a massa da estrutura também é preponderante para o *quenching* da formação estelar nestas estruturas. De fato, grupos mais massivos no Supergrupo de Ursa Maior apresentam fração de galáxias *early-type* maior que seus pares menos massivos (Pak *et al.*, 2014). Observa-se

³Como a emissão de UV provem majoritariamente de estrelas com curto tempo de vida (O, B e A), sua presença indicaria formação estelar recente.

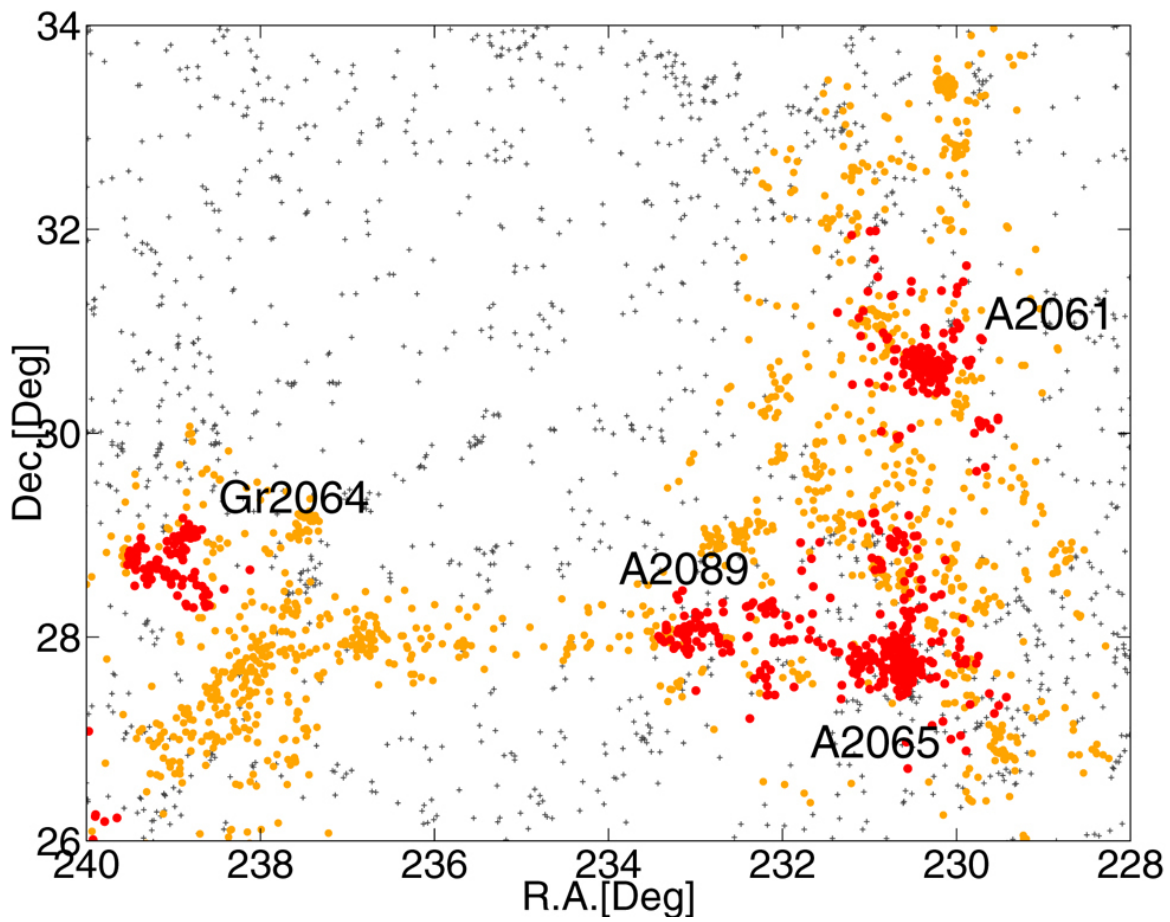


Figura 1.6: Distribuição das galáxias no superaglomerado de *Corona Borealis* destacando os possíveis Supergrupos. Fonte: Einasto *et al.* (2021)

relação semelhante em Ursa Maior com o estado dinâmico dos Supergrupos, onde grupo relaxados têm maior densidade de galáxias vermelhas que grupos não-relaxados, com grupos relaxados sendo encontrados em regiões de maior densidade (Krause *et al.*, 2013).

1.5 Objetivos

Em geral, a área sobre Supergrupos e aglomerados em formação em baixo redshift é ainda pouco explorada. Desta forma, este trabalho visa encontrar Supergrupos nos dados do *Dark Energy Survey* (DES), estendendo o número de Supergrupos conhecidos, além de fazer um estudo da evolução de galáxias nestas estruturas.

Como discutido na seção 1.3, não objetivamos entender a evolução dos Supergrupos em si, visto que o tempo de interação entre aglomerado é muito grande. Logo, temos por objetivo analisar e entender como fatores ambientais, como o raio clustercêntrico⁴, influenciam a evolução de galáxias em Supergrupos, analisando as frações de galáxias vermelhas e azuis, mas também como o potencial gravitacional influencia no *quenching* das galáxias dentro de Supergrupos.

1.6 Ferramentas e Cosmologia Utilizada

Durante esta pesquisa, fizemos uso primariamente da linguagem *Python* em sua versão 3.7. Para adquirir os dados do catálogo de galáxias, utilizamos a linguagem *SQL* para selecionar e baixar os dados deste catálogo para as regiões em torno dos Supergrupos no banco de dados do DES.

Usamos as bibliotecas *Matplotlib* (Hunter, 2007), *Seaborn* (Waskom, 2021), *SkyMaP-Per*⁵ (Melchior, 2021) e *SkyMap*⁶ para a construção de gráficos e a biblioteca *Pandas* (Team, 2020; Wes McKinney, 2010) para a manipulação de dados. Os códigos desenvolvidos foram executados no *Google Colaboratory*⁷.

Alguns de nossas seleções e algoritmos usados dependem da escolha da cosmologia. Exceto quando previamente indicado do texto, utilizamos a cosmologia de Planck Collaboration *et al.* (2020), com $H_0 = 66,76 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ e $\Omega_m = 0,31$.

1.7 Organização

Este trabalho segue a seguinte organização: no Capítulo 2, será discutido os dados utilizados neste trabalho. Os métodos aplicados tanto na obtenção, quanto na análise dos

⁴Aqui, usamos raio clustercêntrico para nos referir ao um raio centrado no aglomerado mais rico do Supergrupo.

⁵<https://github.com/pmelchior/skymapper>

⁶<https://github.com/kadrlica/skymap>

⁷<https://colab.research.google.com/>

dados serão discutidos no Capítulo 3. Os resultados e suas análises serão apresentados no Capítulo 4 e as conclusões no Capítulo 5.

Capítulo 2

Dados

Para estudar os Supergrupos de aglomerados de galáxias, usamos os dados do *Dark Energy Survey* (DES). Mais especificamente, usamos o catálogo de galáxias de alta qualidade *Gold Y3* usado nas análises cosmológicas do DES e o catálogo de aglomerados obtido com o algoritmo RedMaPPer¹ (Rozo *et al.*, 2015b; Rykoff *et al.*, 2014, 2016) aplicado ao *Gold Y3* (*RedMaPPer Y3A2*). Neste capítulo, discutiremos com mais detalhes as propriedades do DES, do catálogo *Gold* e do RedMaPPer.

2.1 Dark Energy Survey (DES)

Os dados do DES foram obtidos durante seis anos com a *Dark Energy Camera* (DECam), uma câmera de 520 megapixels com um campo de visão de $2,2^\circ$ de diâmetro construída especialmente para o levantamento e acoplada no telescópio Victor M. Blanco de 4 metros de diâmetro (Figura 2.1) no Observatório Interamericano Cerro Tololo (*Cerro Tololo Inter-American Observatory*, CTIO) no Chile. (Flaugher *et al.*, 2015). O Blanco é um telescópio da década de 70 que foi reformado especialmente para o DES e a DECam, cujos CCDs são mais sensíveis na parte vermelha do espectro para observar melhor galáxias distantes.

O DES é composto de dois levantamentos: o *wide-area* cobrindo cerca de 5 000 graus quadrados do céu do Hemisfério Sul, e o *deep fields* composto de dez campos com cerca de 2,7 graus quadrados cada (Figura 2.2) reobservados com uma cadência maior para a identificação de supernovas. O primeiro foi realizado em cinco bandas (g , r , i , z e Y), enquanto o segundo foi realizado em quatro bandas (g , r , i e z), como mostra Diehl *et al.* (2019). Os dados sobre a cobertura das bandas são apresentados na Tabela 2.1 e na Figura 2.3.

O levantamento *wide-area* (usado neste trabalho) é composto de 83 706 exposições, cada uma com um tempo de exposição de 90 segundos nas bandas g , r , i e z em todos os anos. A banda Y teve tempo de exposição nos primeiro três anos, com 45 segundos entre

¹<https://github.com/erykoff/redmapper>



Figura 2.1: Esquerda: Imagem do telescópio Victor M. Blanco de 4 metros no Observatório Interamericano Cerro Tololo (*Cerro Tololo Inter-American Observatory*, CTIO) usado nas observações para o DES. **Fonte:** CTIO/NOIRLab/NSF/AURA/R. Sparks. Direita: Imagem da *Dark Energy Camera* (DECam). **Fonte:** DES/DOE/FNAL/CTIO/NOIRLab/NSF/AURA/R. Hahn

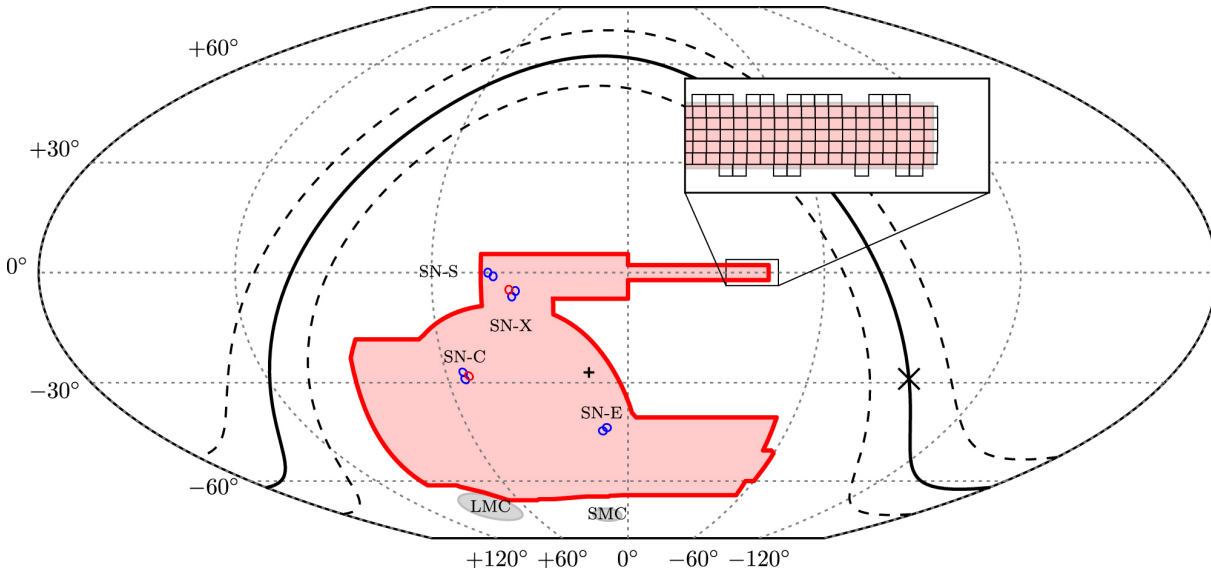


Figura 2.2: Footprint do DES mostrando o levantamento *wide-area* (em vermelho) e os *deep fields* (círculos azuis e vermelhos). **Fonte:** Abbott *et al.* (2021)

Tabela 2.1: Informações sobre a cobertura dos filtros usados no levantamento do DES como publicadas por Flaugher *et al.* (2015).

Filtro	λ_{med} (nm)	λ_{min} (nm)	λ_{max} (nm)	FWHM (nm)
DES <i>g</i>	473	398	548	150
DES <i>r</i>	642	568	716	148
DES <i>i</i>	784	710	857	147
DES <i>z</i>	926	850	1002	152
DES <i>Y</i>	1009	953	1065	112

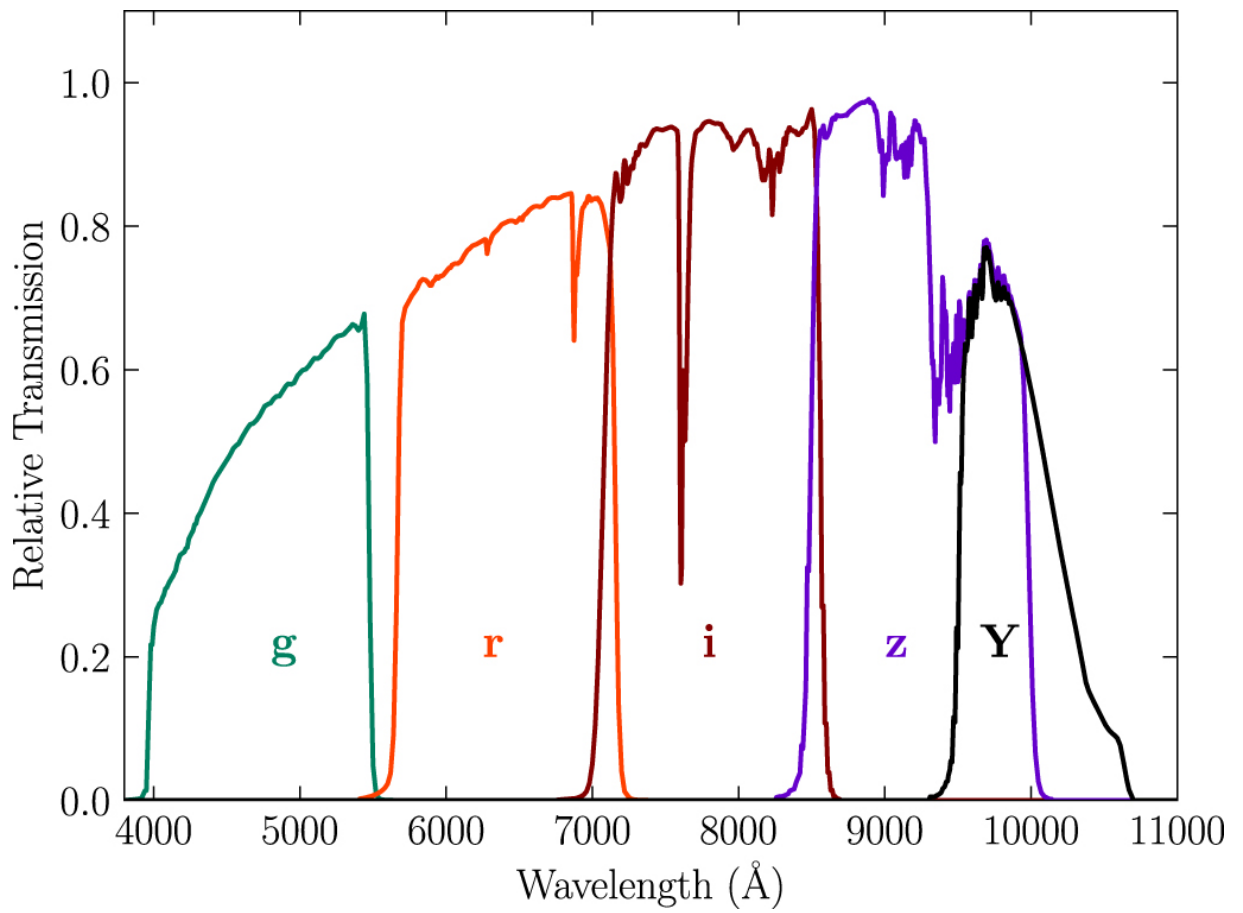


Figura 2.3: Distribuição dos filtros da DECam usados no levantamento do DES. **Fonte:** Abbott *et al.* (2018)

Tabela 2.2: Valores do limite de magnitude (MAG_AUTO com $S/N = 10$), PSF FWHM média (*single epoch*) e a repetibilidade fotométrica (*single epoch*) para cada banda do levantamento *wide-area* do DES, conforme mostra Abbott *et al.* (2021).

Filtro	Limite (mag)	PSF FWHM (arcsec)	Repetibilidade (mmag)
DES g	24,0	1,11	2,4
DES r	23,8	0,95	2,1
DES i	23,1	0,88	2,2
DES z	22,3	0,83	1,8
DES Y	20,7	0,90	2,7

o ano 1 e o ano 3. O tempo de exposição da banda Y foi incrementado para 90 segundos entre os anos 3 e 6, equiparando com as outras bandas. (Abbott *et al.*, 2021)

Como indicado na Tabela 2.2, os dados do DES têm limite de magnitude (MAG_AUTO para uma razão sinal-ruído (S/N) de 10) de $g=24,0$, $r=23,8$, $i=23,1$, $z=22,3$ e $Y=20,7$. Para uma completude de 95%, os limites de magnitude (MAG_AUTO) $g=24,6$, $r=24,3$, $i=24,0$, $z=23,7$ e $Y=23,4$.

O MAG_AUTO é a magnitude calculada pelo programa **SExtractor** (Bertin e Arnouts, 1996) com base em uma estimativa de fluxo integrando o valor de contagem dos píxeis em uma abertura elíptica ou circular de Kron (Kron, 1980), como mostra a Figura 2.4.

Os dados do DES têm boa precisão em suas medidas de fotometria (com $\leq 2,7$ mmag em todas as bandas), permitindo a aplicação para um estudo de estruturas por todo o *footprint*, já que se espera consistência nos dados fotométricos em todas as bandas. Isso é particularmente importante para as medidas de cores e *redshift* fotométricos, fundamentais para resolver efeitos de projeção em uma dada linha de visada.

2.1.1 Catálogo Gold

O *Gold* é um catálogo do DES com cortes feitos para selecionar os melhores dados fotométricos, classificação galáxia/estrela, *redshift* fotométrico, entre outros, para análises em cosmologia (Drlica-Wagner *et al.*, 2018; Sevilla-Noarbe *et al.*, 2021).

Assim, o catálogo *Gold* possui uniformidade fotométrica, com desvio de menos de 3 mmag comparado com o catálogo *Gaia Data Release 2* (Gaia Collaboration *et al.*, 2018). Ademais, possui excelente astrometria, com precisão de aproximadamente 27 mas. Tem magnitude limite de 23,3 na banda i e área semelhante ao levantamento *wide-area* (Sevilla-Noarbe *et al.*, 2021).

Comparado ao levantamento principal do DES (isto é, os dos *Data Releases 1 e 2*), o *Gold Y3* tem algumas inovações, tais como fotometria própria desenvolvida para o catálogo (*Multi-object fitting* e *Single-object fitting*), *flags* atualizadas que indicam anomalias nos dados, melhores máscaras (diferenciando entre objetos brilhantes e regiões com pro-

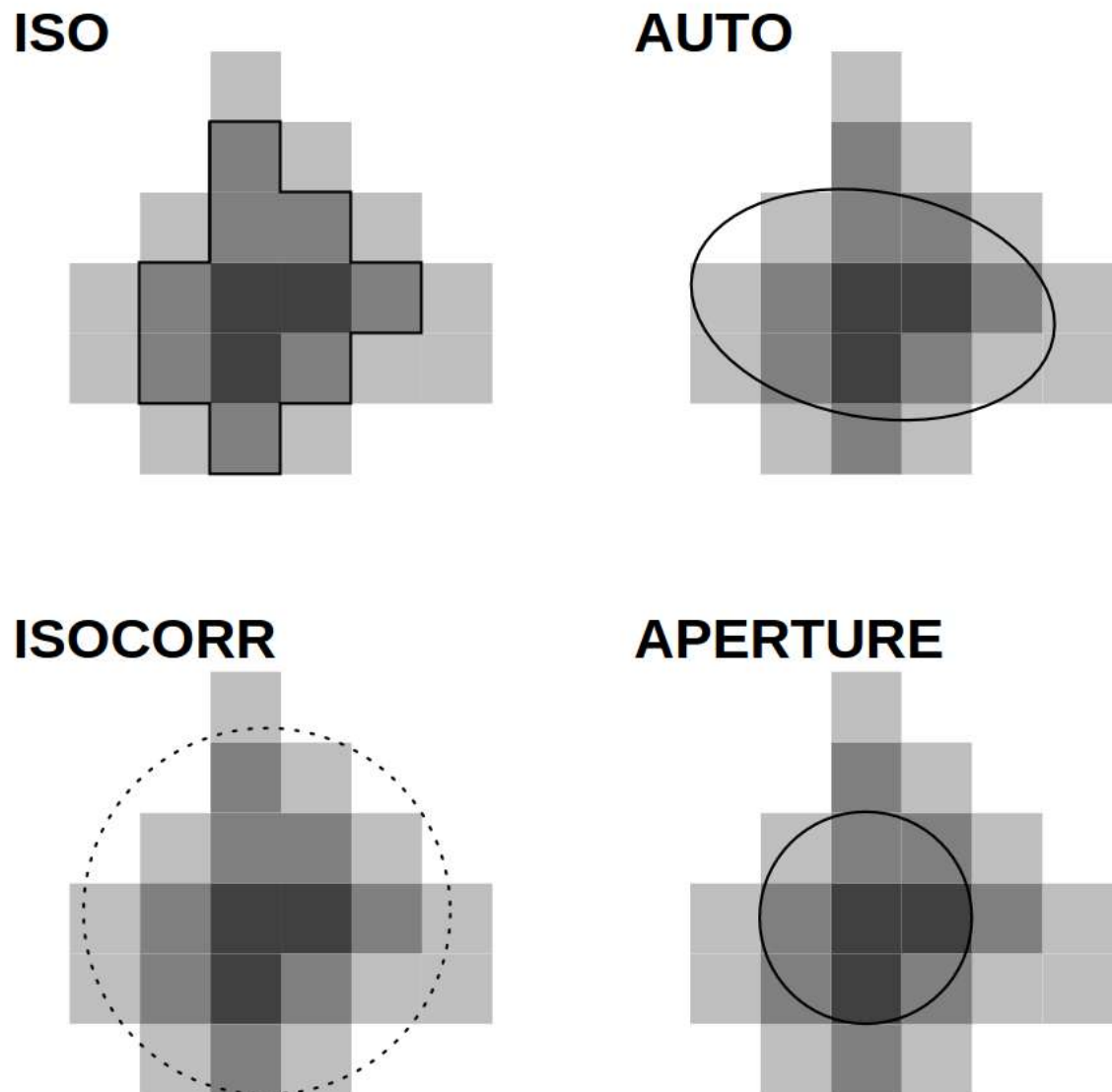


Figura 2.4: Diagrama mostrando as diferentes aberturas usada pelo programa SEXTRACTOR . A AUTO é a configuração que utilizada a abertura de Kron. Fonte: Holwerda (2005)

blemas de processamento) e mapa de propriedades do catálogo, tais como *seeing* e brilho do céu (Sevilla-Noarbe *et al.*, 2021).

A classificação galáxia/estrela (EXTENDED_CLASS_COADD) do *Gold* é semelhante ao EXTENDED_COADD do DES DR2 (Abbott *et al.*, 2021), baseando na função SPREAD_MODEL² do SExtractor. Assim, são usadas as seguintes condições booleanas para a classificação (Sevilla-Noarbe *et al.*, 2021):

$$\begin{aligned} \text{EXTENDED_CLASS_COADD} = & [(\text{SPREAD_MODEL} + 3 \cdot \text{SPREADERR_MODEL} > 0,005) \\ & + (\text{SPREAD_MODEL} + 1 \cdot \text{SPREADERR_MODEL} > 0,003) \\ & + (\text{SPREAD_MODEL} - 1 \cdot \text{SPREADERR_MODEL} > 0,001)] \quad (2.1) \end{aligned}$$

Se três destas condições forem verdadeiras, por exemplo, a fonte tem alta possibilidade de ser uma galáxia e ganha classificação 3. Assim, todas as classificações são as seguintes:

- EXTENDED_CLASS_COADD=-9: Dados indisponíveis;
- EXTENDED_CLASS_COADD=0: estrelas com alta confiança;
- EXTENDED_CLASS_COADD=1: prováveis estrelas;
- EXTENDED_CLASS_COADD=2: prováveis galáxias;
- EXTENDED_CLASS_COADD=3: galáxias com alta confiança.

A seleção de uma amostra de estrela ou galáxia com alta ou baixa confiança se traduz na pureza ou completeza desta para o tipo de objeto em questão. No caso da busca por aglomerados de galáxias e estruturas adjacentes, é frequente a escolha de uma amostra de galáxias que seja o mais completa possível³ (no caso do *Gold*, EXTENDED_CLASS_COADD ≥ 2) para mapear as estruturas — esta foi uma escolha feita tanto pelo RedMaPPer quanto por este trabalho, como será visto mais a frente. Isso também é feito para incluir fontes com algum nível de *blending*, como esperado nas regiões de alta densidade nos centros de aglomerados.

O *Gold* também disponibiliza o *redshift* fotométrico para as galáxias do catálogo. O *redshift* foi medido utilizando o *Directional Neighbourhood Fitting* (DNF, De Vicente *et al.* 2016), um algoritmo kNN (*machine learning*) que estima o *redshift* partindo de observáveis como as magnitudes para cada filtro. O *Gold* cobre uma faixa de $z \lesssim 1,2$ e uma incerteza de $\sigma_{68}/(1+z) < 0,1$ (Sevilla-Noarbe *et al.*, 2021).

²A SPREAD_MODEL é obtido a partir do discriminante linear normalizado da melhor PSF para uma fonte e um modelo estendido circular da mesma PSF. Para fontes pontuais, SPREAD_MODEL=0, e para fontes extensas, SPREAD_MODEL>0 (Bouy *et al.*, 2013; Desai *et al.*, 2012)

³A completeza nesta situação é em relação à classificação estrela/galáxia.

2.2 *Red-sequence Matched-filter Probabilistic Percolation* (RedMaPPer)

A *Red-sequence Matched-filter Probabilistic Percolation* (RedMaPPer) é um algoritmo de busca de aglomerados de galáxias pela técnica da sequência vermelha, ou seja, buscando por excesso de galáxias vermelhas já que aglomerados têm população estelar mais avermelhada (Bower *et al.*, 1992a; Mei *et al.*, 2009; Visvanathan e Sandage, 1977). Ele é um algoritmo para levantamentos ópticos, tais como o SDSS e o DES (Rykoff *et al.*, 2014, 2016).

A versão 6.4.22+2_lgt5_vl50 do catálogo RedMaPPer (doravante *RedMaPPer Y3*) foi usada nas análises desta dissertação. Nesta versão, buscou-se por aglomerados nos dados do catálogo *Gold Y3A2* por objetos com EXTENDED_CLASS_MASH_SOF⁴ ≥ 2 .

O *RedMaPPer Y3* é composto de 869 335 candidatos a grupos e aglomerados espalhados por todo o levantamento *wide-area* do DES (Figura 2.5). As regiões mais claras se devem a como o *coadd* das imagens é feito no DES, e visto que a DECam tem formato hexagonal. Enquanto no Equador o encaixe entre as imagens hexagonais é boa, as distorções na direção do polo gera uma justaposição entre as imagens em intervalos de cerca 30° em ascensão reta (Abbott *et al.*, 2018, 2021; Neilsen *et al.*, 2019).

O algoritmo do RedMaPPer também estima o *redshift* fotométrico (z_λ) dos aglomerados, que estão distribuídos por uma faixa ampla de *redshifts*, com $0.10 \lesssim z_\lambda \lesssim 0.95$ (Figura 2.6) com incertezas de $\sigma/(1+z) \sim 0,01$ em $z \lesssim 0,7$ e $\sigma/(1+z) \sim 0,02$ em $z \sim 0,9$ (Rykoff *et al.*, 2016).

Na busca por aglomerados no óptico, podemos nos deparar com o problema de definir quais galáxias pertencem de fato à estrutura. Assim, é necessário um parâmetro que descreva a população de um aglomerado e, ao mesmo tempo, considere possíveis contaminações de galáxias no *foreground* e *background*. Este parâmetro é denominado *riqueza*. Uma das definições mais célebres de riqueza foi feita por Abell (1958) para seu catálogo de aglomerado, que considerava o número de galáxias com magnitudes entre m_3 e $m_3 + 2$ (onde m_3 é a magnitude da terceira galáxia mais brilhante do aglomerado). Outros trabalhos também recorrem a critérios baseados em magnitude ou luminosidade para calcular a riqueza (Abell *et al.*, 1989; Goto *et al.*, 2002; Postman *et al.*, 1996).

A riqueza pode ser também calculada de tal forma que esta se correlacione com a massa do aglomerado, assim se podendo usar a riqueza para obter a massa da estrutura (Andreon e Hurn, 2010; Johnston *et al.*, 2007; McClintock *et al.*, 2019; Rozo *et al.*, 2009; Rykoff *et al.*, 2012; Simet *et al.*, 2017).

⁴O EXTENDED_CLASS_MASH_SOF é similar ao EXTENDED_CLASS_COADD, assim, as categorias 2 e 3 envolvem prováveis galáxias e galáxias com alta confiança, respectivamente. A diferença é que aquele usa a fotometria *single object fitting* própria do *Gold Y3A2* (Sevilla-Noarbe *et al.*, 2021), enquanto este usa fotometria do SEXTRACTOR para fazer a classificação.

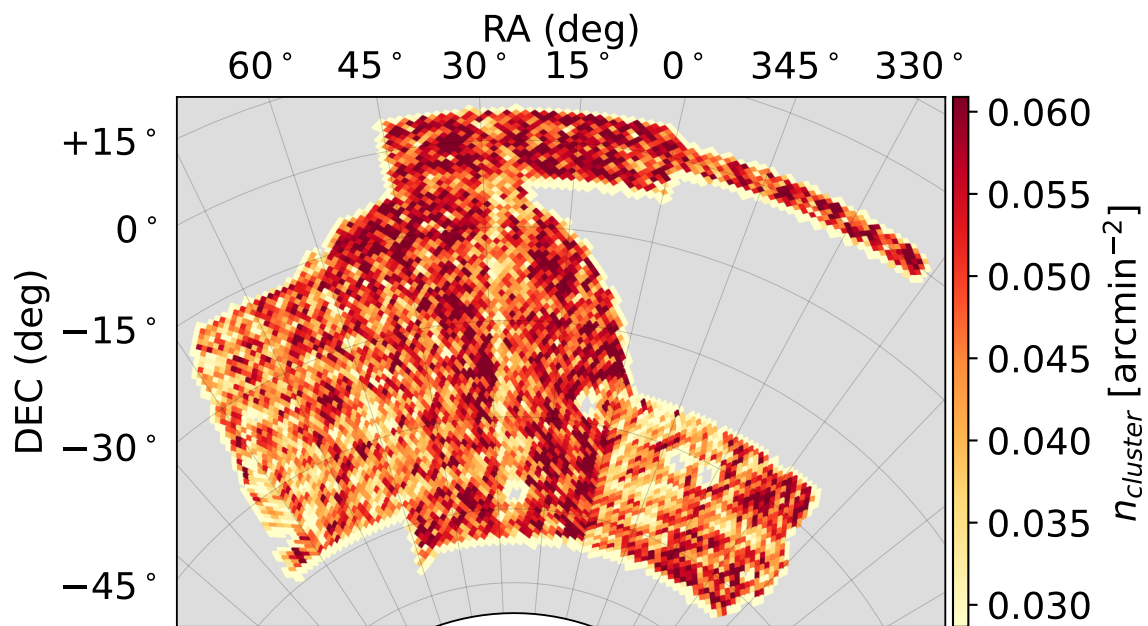


Figura 2.5: Mapa da distribuição dos aglomerados do *RedMaPPer Y3* pela área do levantamento do DES. As regiões mais claras se devem ao coadd das imagens no DES e os “buracos” correspondem a regiões com estrelas brilhantes.

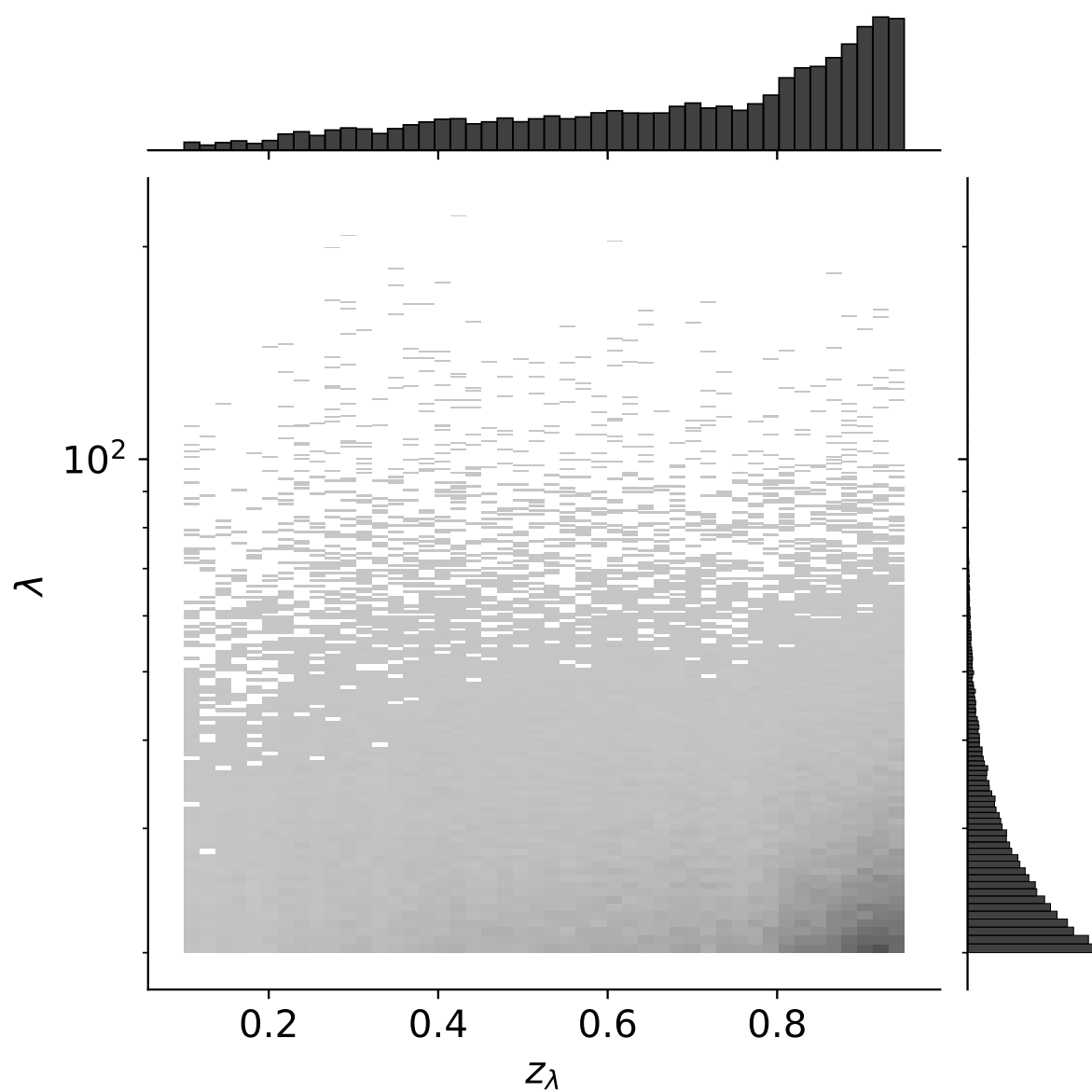


Figura 2.6: Distribuição dos aglomerados do *RedMaPPer Y3* conforme o *redshift* para estruturas com $\lambda \geq 20$.

O algoritmo do RedMaPPer calcula a riqueza do aglomerado (λ) como somatório dos produtos da probabilidade de pertencer à sequência vermelha do aglomerado, do peso da luminosidade e do peso do raio (Equação 2.2). Os pesos para luminosidade e para o raio se deve ao fato de o algoritmo se limitar a buscar aglomerações de galáxias com luminosidade maior que $0,2L_*$ e em um raio R_λ (Rozo *et al.*, 2015b). Onde L_* é a luminosidade característica (Schechter, 1976) e R_λ é o raio limite que minimiza o espalhamento na relação entre raio e riqueza de um aglomerado (veja Rykoff *et al.* 2014 para mais detalhes).

$$\lambda = \sum P_{mem} \theta_L \theta_R \quad (2.2)$$

Entretanto, a Equação 2.2 não pode ser usada para regiões onde há estrelas brilhantes, nas bordas do levantamento e/ou quando a magnitude limitante no *redshift* do aglomerado é maior que $0,2L_*$ (Rykoff *et al.*, 2016). Para estes casos, a relação utilizada é a Equação 2.3.

$$\frac{\lambda}{S} = \sum P_{mem} \quad (2.3)$$

S é o fator de escala dado pelo Equação 23 de Rykoff *et al.* (2014) (mostrado aqui na Eq. 2.4), onde C é um termo de correção para as regiões com máscaras ou nas bordas do levantamento.

$$S(z) = \frac{1}{1 - \langle C|z \rangle} \quad (2.4)$$

O catálogo tem duas versões, uma onde riqueza é $\lambda \geq 5$ ($M_{200c} \gtrsim 3 \times 10^{13} h_{70}^{-1} M_\odot$ segundo expressão apresentada no Apêndice B de Rykoff *et al.* 2012), englobando 869 335 grupos e aglomerados. E uma segunda versão com riqueza $\lambda \geq 20$ ($M_{200c} \gtrsim 1 \times 10^{14} h_{70}^{-1} M_\odot$) que englobaria 53 610 aglomerados. Esta segunda versão do *RedMaPPer Y3* é a que será usada neste trabalho.

Além disso, cada catálogo é dividido em dois subcatálogos. Um subcatálogo contém informações sobre os aglomerados. Já o outro subcatálogo com tem informações sobre os membros dos aglomerados.

Capítulo 3

Métodos

Nesta seção, serão discutidos os métodos utilizados para busca, confirmação e análise de grupos de aglomerados de galáxias, ou Supergrupos, e suas populações durante a pesquisa.

3.1 Busca de Supergrupos de Aglomerados de Galáxias no *RedMaPPer Y3*

A busca por aglomerações foi feita tanto no espaço angular (RA e Dec) quanto em *redshift*. Nesta etapa, selecionamos apenas os aglomerados com riqueza (λ) maior ou igual a 20, dado que detecções abaixo deste patamar poderiam não ser confiáveis — semelhante seleção é aplicada por Rozo *et al.* (2015a); Rykoff *et al.* (2014, 2016). Empregamos o termo “Supergrupo de aglomerados” durante esta seção e as seguintes para não haver confusão entre estes e os grupos de galáxias, mas entenda-se que os Supergrupos são formados primariamente por aglomerados e não por grupos de galáxias.

Dividimos os aglomerados em bins de *redshift* de 0,1, com incrementos de 0,05, portanto havendo superposição entre os bins e uma transição suave entre eles. Por exemplo, se os bins começam em $z=0,05$, o primeiro bin se estende de $z=0,05$ a $z=0,15$; enquanto o segundo bin se estende de $z=0,10$ a $z=0,20$, e assim por diante até $z=0,50$. Este valor para os bins é metade do utilizado por Narwal *et al.* (2020) que usou os dados do *DES SVA1* para procurar por grandes estruturas, entretanto, como se planejou buscar por grupos de aglomerados, a binagem de 0,1 é suficiente se consideramos a incerteza do photo- z do *RedMaPPer Y3*.

Então, fizemos uma busca por aglomeração no espaço de RA e Dec em cada um dos bins de *redshift*. Para isso, usamos a função `histogram2d` do Numpy¹ (Harris *et al.*, 2020), dividindo em píxeis de $5 h_{67.66}^{-1}$ cMpc tanto em RA, quanto em Dec. A conversão de unidades físicas para unidades angulares foi feita usando a biblioteca `Cosmology` de

¹<https://numpy.org/>

Astropy² (Astropy Collaboration *et al.*, 2013, 2018, 2022) levando em consideração o *redshift* da busca. Este tamanho é semelhante ao utilizado por Narwal *et al.* (2020) e condizente com os tamanhos de estruturas encontradas em baixo *redshift* (Einasto *et al.*, 2021; Gonzalez *et al.*, 2005; Sengupta *et al.*, 2022). Com a escolha dessa escala física de pixel também evitamos encontrar estruturas muito desconectadas, como em um primeiro teste com valores maiores.

Cabe ressaltar que, para otimizar o uso da memória e o tempo de processamento, dividimos o *footprint* do DES em áreas de $24^\circ \times 24^\circ$. Assim, a binagem no espaço de RA e Dec foi feita para cada uma dessas áreas.

Selecionamos, então, os píxeis com contagem igual ou maior que quatro aglomerados, este número foi escolhido por maximizar as chances de se encontrar estruturas com o método de sobredensidade utilizado. Para esta etapa de seleção, foram incluídos os píxeis adjacentes a estes, incluindo assim estruturas que poderiam estar presentes em mais de um píxel (Figura 3.1). Não utilizamos métodos mais sofisticados para encontrar essas estruturas, como calcular um certo contraste de densidade, ou tecelagem de Voronoi, pois tudo que almejamos era encontrar “aglomerados de aglomerados”, bastando para isso buscar por sobredensidades.

A fim de validar os resultados da busca automatizada por Supergrupos, fizemos uma inspeção visual de cada um dos píxeis selecionados, procurando por possíveis Supergrupos, selecionando estrutura que estivessem próximas no céu — descartando as poucas estruturas afastadas angularmente. Além disto, também averiguamos a seleção pela proximidade no espaço de *redshift*, isto é, se dois aglomerados estivessem angularmente próximos, mas muito afastados em *redshift* ($\Delta z > 0,05$), não foram considerados partes de um mesmo Supergrupo.

A seleção por proximidade no espaço de *redshift* não foi tão estrita quanto a seleção em RA e Dec, visto que as incertezas para o *redshift* fotométricos são consideráveis, enquanto os centros dos aglomerados tem incertezas que não são relevantes nesse caso — no caso de análises cosmológicas usando lentes fracas isso muda de figura (Zhang *et al.*, 2019).

Devido a esta seleção durante a inspeção visual de estruturas com proximidade em RA, Dec e *redshift*, alguns Supergrupos encontrados neste trabalho podem conter menos que quatro membros.

²<https://www.astropy.org/>

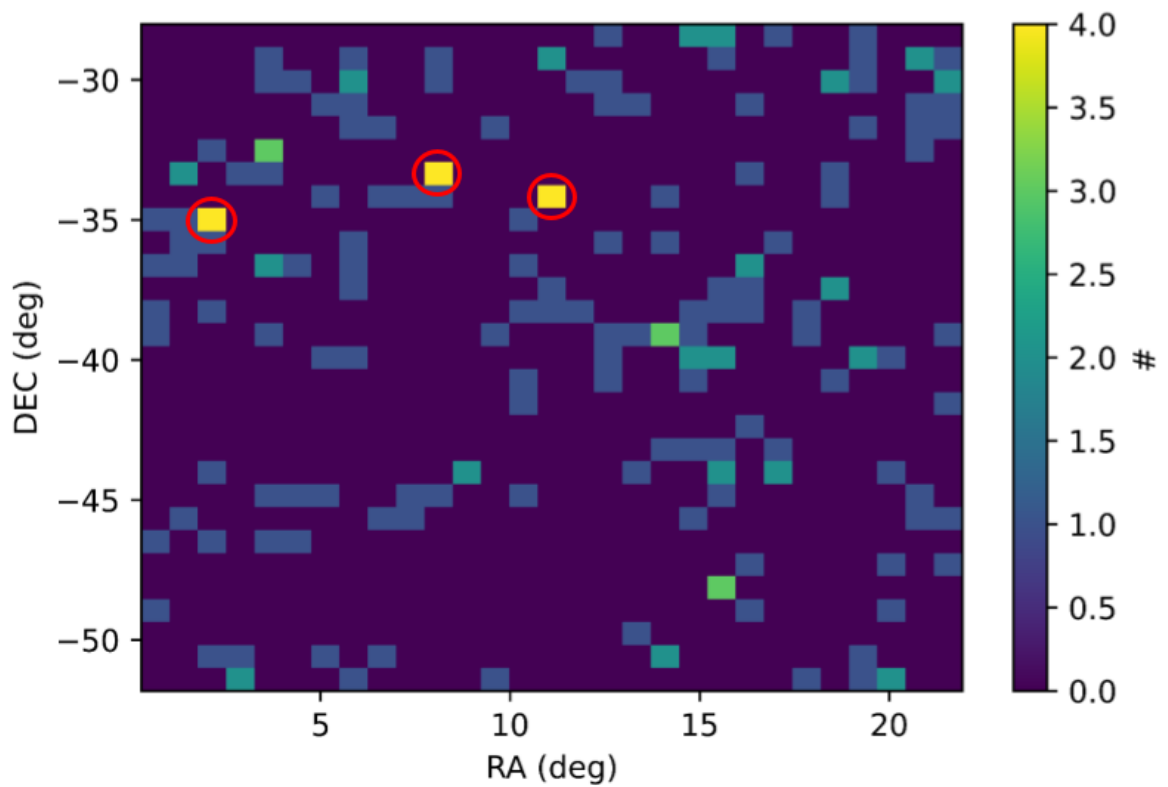


Figura 3.1: Exemplo da detecção de Supergrupos nos dados do *RedMaPPer Y3*. Os pixels destacados por círculos com contagem igual a 4, e, portanto, foram selecionados para a inspeção visual.

3.2 Seleção de Galáxias no Catálogo Gold

Como o RedMaPPer busca por sobredensidades de galáxias vermelhas para encontrar aglomerados, há um enviesamento na população de galáxias no catálogo de membros, tendendo a ser mais avermelhada. Assim sendo, fizemos uma complementação com as galáxias do catálogo *Gold* para um estudo mais completo das galáxias na região dos Supergrupos.

Realizamos uma busca no catálogo Gold Y3 por objetos a uma distância transversal de 10 Mpc da BCG do aglomerado mais rico de cada Supergrupo e em *redshift* usando a Equação 3.1, onde z_{cl} é o *redshift* fotométrico do aglomerado mais rico. Selecionamos objetos com `EXTENDED_CLASS_COADD` ≥ 2 que, como foi mostrado na seção 2.1.1, para selecionar galáxias da forma mais completa possível. Para fazer a seleção de galáxias no céu, usamos a biblioteca **Cosmology** do **Astropy**³ (Astropy Collaboration *et al.*, 2013, 2018, 2022) para fazer a conversão entre coordenadas físicas e angulares para cada *redshift*.

$$\frac{|z - z_{cl}|}{1 + z_{cl}} \leq 0,05 \quad (3.1)$$

No capítulo seguinte mostramos as densidades de galáxias do Gold com os aglomerados do RedMaPPer e notamos que elas tendem a ocupar filamentos alinhados aos aglomerados associados aos Supergrupos, portanto, com pouco efeito sobre a escolha da simetria em torno da BCG.

Em seguida, fizemos um *match* das galáxias do *Gold Y3* com as galáxias membros de cada Supergrupo usando a função **SkyCoord** da biblioteca **Astropy** (Astropy Collaboration *et al.*, 2013, 2018, 2022). Retiramos as galáxias do *Gold Y3* com distância menor que 1 arcsec das galáxias membros do Supergrupo detectadas pelo *RedMaPPer Y3* para evitar duplicação de fontes na análise.

Desta forma, além dos membros dos aglomerados, com suas respectivas probabilidades de associação ao aglomerado, temos a população de galáxias subjacente aos aglomerados, permitindo comparar as diferentes populações como veremos mais adiante.

³<https://www.astropy.org/>

3.3 Correção K

Como os Supergrupos estão distribuídos em uma faixa grande de *redshifts*, isso pode causar variações na medição do fluxo em cada banda, e afetar conseqüentemente a análise de diagramas cor-cor e cor-magnitude, com efeitos de evolução de cor que se devem somente à variação do *redshift* e não a algum efeito físico. A cor $g - r$ varia mais de 0,5 mag na faixa de *redshift* considerada. Cores mais vermelhas, como $i - z$, sofrem menos com essa variação (Figuras 3.2, 3.3 e 3.4).

Assim, utilizamos a correção K, o qual é um fator que considera essa evolução com o *redshift* para calcular a diferença entre o fluxo observado e o fluxo emitido. (Hogg *et al.*, 2002)

Neste trabalho, usamos a biblioteca `kcorrect`⁴ (Blanton e Roweis, 2007) em sua versão 5.1.0 para calcular a correção K e as magnitudes absolutas para todas as bandas. Cabe destacar aqui que a biblioteca `kcorrect` não tem as bandas do DES entre as suas bandas registradas para os cálculos. Assim, convertemos as magnitudes do DES para o sistema de bandas do SDSS, usando as transformações apresentadas no apêndice B de Abbott *et al.* (2021).

A `kcorrect` aceita as magnitudes em *maggies* (μ), esta é uma unidade de fluxo de uma fonte relativo a um fluxo padrão de tal forma que quando $\mu = 1$, $m = 0$ no sistema AB. Para a conversão, utilizamos a Equação 3.2 que foi retirada de Blanton e Roweis (2007).

$$\mu = 10^{-0,4m} \quad (3.2)$$

Para o cálculo das incertezas, que também são requeridas pela biblioteca para o cálculo da correção K, fizemos uma propagação de erros usando a incertezas das magnitudes fornecidas nos catálogos *RedMaPPer Y3* e *Gold*.

Usamos a correção K para obter as magnitudes aparentes corrigidas para a análise de cores de nossos Supergrupos e as magnitudes absolutas (que também são fornecidas pelo algoritmo).

⁴<https://kcorrect.readthedocs.io/en/5.1.0/>

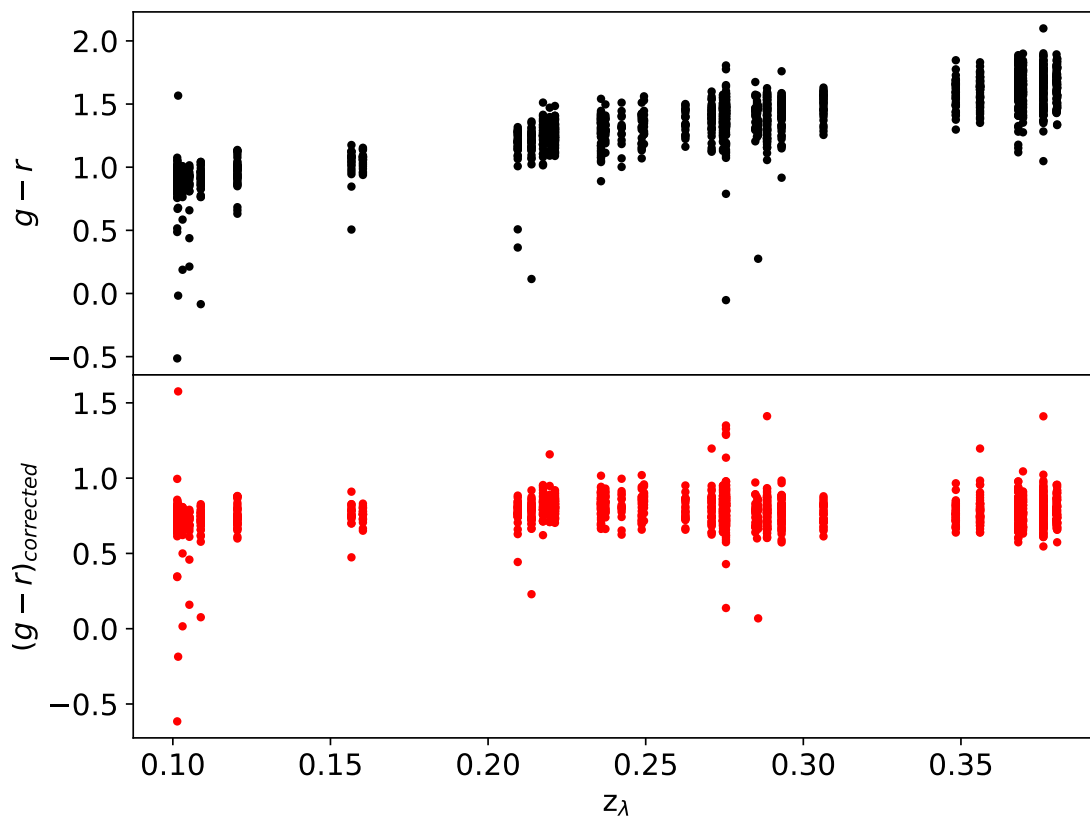


Figura 3.2: Gráfico da cor $g-r$ pelo *redshift* para as galáxias do catálogo RM em nossos Supergrupos. O gráfico apresenta a cor sem a correção K (pontos pretos) e com a correção K (pontos vermelhos).

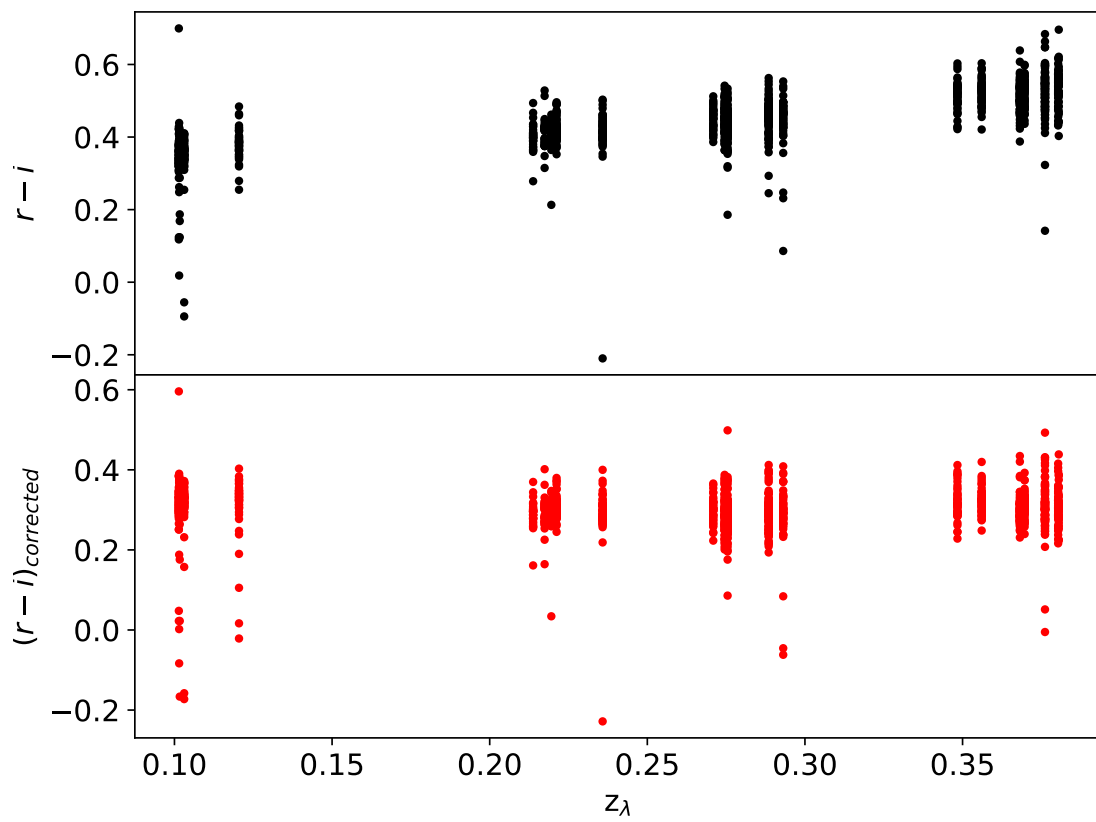


Figura 3.3: Gráfico da cor $r - i$ pelo *redshift* para as galáxias do catálogo RM em nossos Supergrupos. O gráfico apresenta a cor sem a correção K (pontos pretos) e com a correção K (pontos vermelhos).

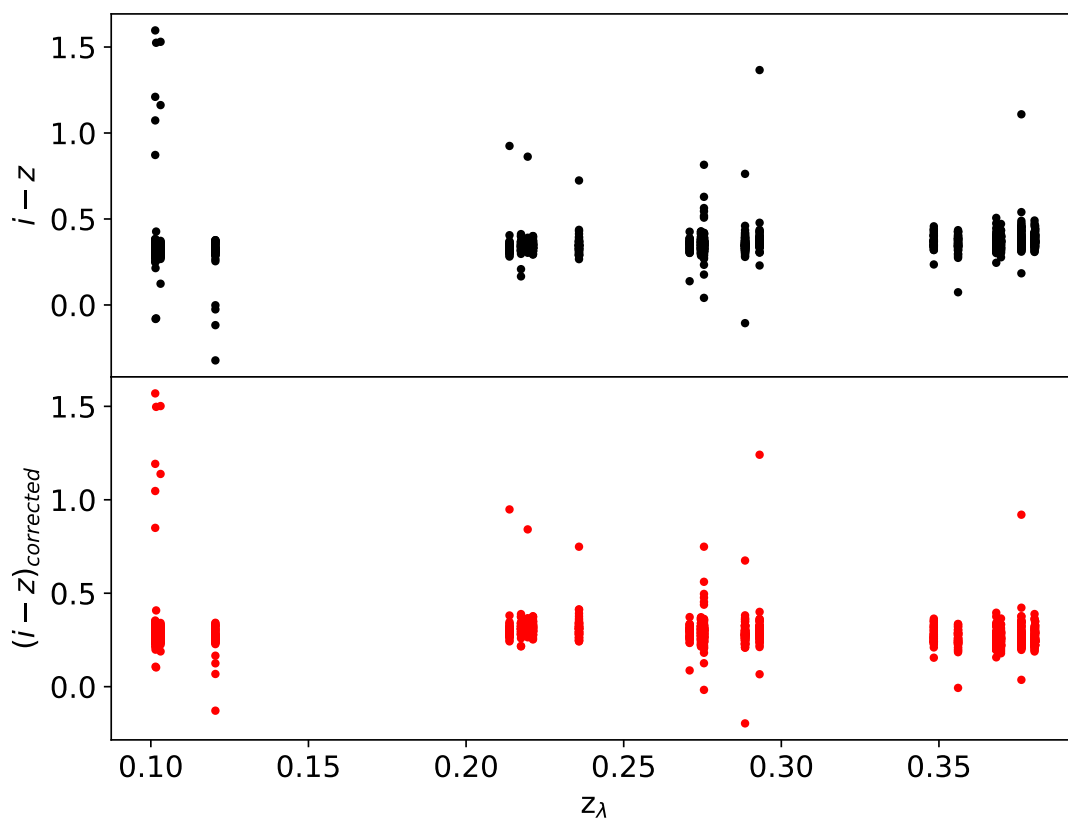


Figura 3.4: Gráfico da cor $i-z$ pelo *redshift* para as galáxias do catalogue RM em nossos Supergrupos. O gráfico apresenta a cor sem a correção K (pontos pretos) e com a correção K (pontos vermelhos).

3.4 Separação de populações com *Gaussian Mixture Model*

A fotometria pode ser utilizada para estudar a idade e a formação estelar em uma galáxia através do estudo das cores, isto é, galáxias mais velhas e com menor taxa de formação estelar são mais vermelhas. Cabe destacar que há uma degenerescência entre idade e metalicidade nas cores (Worthey *et al.*, 1995). Isto é, uma população jovem e rica em metais poder aparecer tão vermelha num diagrama cor-magnitude quando uma população velha e pobre em metais. Sabe-se também que as galáxias em aglomerados são mais ricas em metais (Ellison *et al.*, 2009; Ogando *et al.*, 2010).

Enquanto só a fotometria não nos permite separar os efeitos da idade e da metalicidade na distribuição de uma população no diagrama cor-magnitude, as cores podem nos dar uma estimativa da idade da população e a taxa de formação estelar (se uma população passou por *quenching*).

Há uma conhecida bimodalidade na cor $g - r$ de galáxias com um pico em uma população vermelha e outro em uma azul (vide Blanton *et al.* 2001, 2003; Strateva *et al.* 2001 como exemplos). Isto se deve, em parte, ao fato de a descontinuidade de Balmer ($\sim 4000\text{\AA}$) se encontrar nos limites do filtro g em um referencial em $z=0$.

Entretanto, esta descontinuidade se encontra no limite inferior da banda g (o limite mínimo do filtro g está em $\sim 3800\text{\AA}$ para os levantamentos DES e, similarmente, SDSS). Assim, dados da banda u e, por conseguinte, cor $u - r$ poderiam ser melhores indicadores para a separação entre populações vermelhas e azuis de galáxias, sendo esta banda comumente usado para estudos de população de galáxias (e.g., Strateva *et al.* 2001).

As cores usando dados do ultravioleta próximo (NUV) e distante (FUV) e do óptico também seriam excelentes indicadores de formação estelar, visto que a emissão naquela banda é dominada por estrelas do tipo O, B e A, cujo tempo de vida é igual ou inferior a 1 Gyr. Assim, FUV- r e NUV- r mais azuis indicaria presença destas estrelas jovens na galáxia e, por conseguinte, formação estelar recente (Wyder *et al.*, 2007). As cores no ultravioleta também permitiriam investigar o *Green Valley* (Salim, 2014), isto é, populações com história de formação estelar recente, mas que já apresentam uma diminuição desta e estariam transitando da população azul para a vermelha.

Porém, como mostrado no Capítulo 2, os dados do DES não cobrem a banda u . Além disso, as galáxias dos Supergrupos também estão além do limite de detecção do GALEX, impossibilitando o uso dos dados da banda NUV e FUV para verificar se uma galáxia atende à definição de *Green Valley*⁵.

Os modelos de misturas (em inglês, *mixture models*) nos permitem separar popula-

⁵Alternativamente, há outras definições de *Green Valley* que não usam as cores do Ultravioleta. Como considerar uma região entre os dois picos de populações vermelha e azul nas cores do óptico como *Green Valley* (e.g., Olave-Rojas *et al.* 2018)

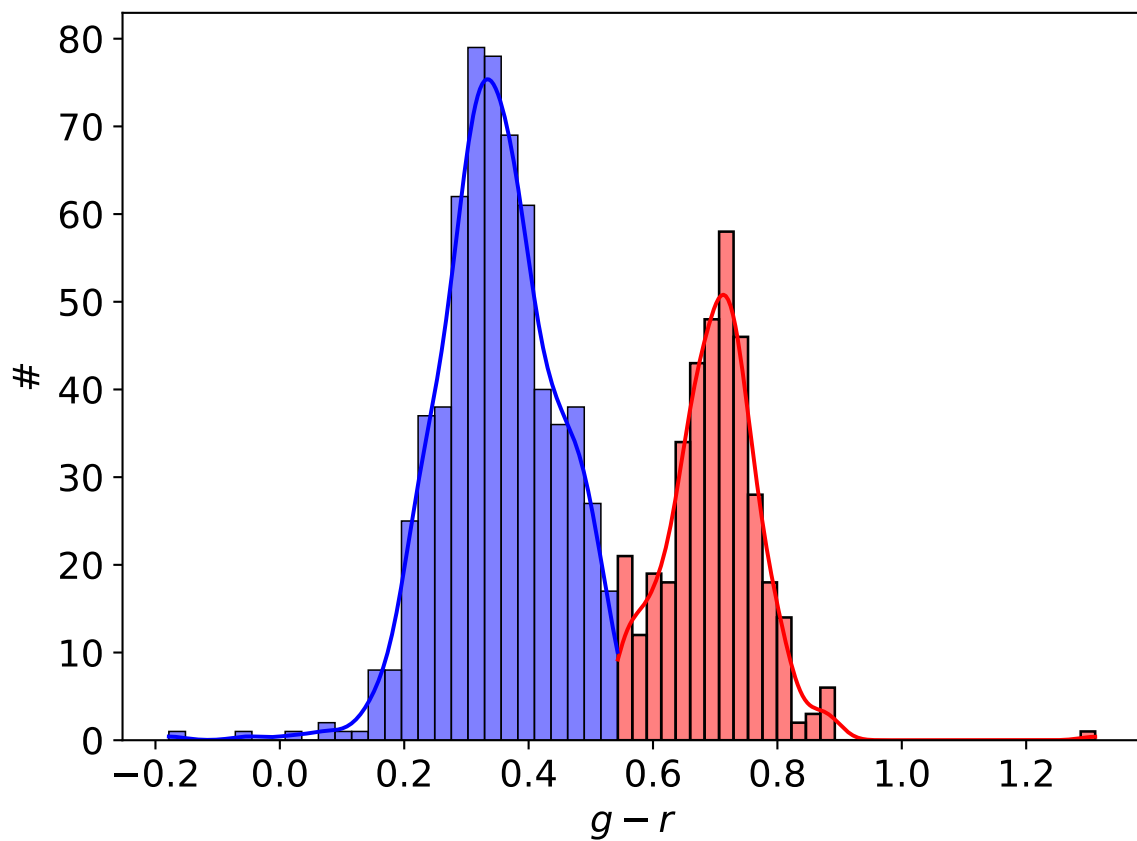


Figura 3.5: Histograma mostrando a bimodalidade da cor e a classificação do GMM em população azul e vermelha para o Supergrupo RM3761 com os respectivos KDE. Cerca de 40% das galáxias vermelhas são membros do RM.

ções dentro de amostras com os modelos de misturas de gaussianas (em inglês, *gaussian mixture models*, GMM) fazendo ajustes normalizados de gaussianas para separar as populações dentro da amostra assumindo que os dados são gerados por um conjunto finito de distribuições gaussianas.

Os filtros do DES permitem uma separação entre galáxias vermelhas e azuis usando a bimodalidade na cor $g - r$ (Figura 3.5), sendo necessário o uso de uma ferramenta robusta para a separação destas, principalmente para definir o limiar para as galáxias que se encontram entre os dois picos de distribuição da cor. Para isso, utilizamos o *Gaussian Mixture Model* (GMM) tal como disponível pela biblioteca *Scikit-learn*⁶ (Pedregosa *et al.*, 2011).

Assim, fizemos o ajuste para a cor $g - r$ escolhendo o número de gaussianas (`n_components`) como dois, com o intuito de separar populações vermelhas e azuis. Para a covariância, escolhemos o tipo “full”, permitindo que cada componente tivesse sua própria matriz de covariância. Este tipo de configuração da covariância permite o ajuste independente das Gaussianas nas respectivas populações.

Com o modelo treinado e ajustado para os dados (cabe ressaltar que o GMM é um algoritmo de *machine learning*), ele atribui rótulos para cada componente dos dados (em nosso caso, galáxias) conforme o número de gaussianas atribuídas com o `n_components` (em nosso caso, os rótulos foram 0 e 1). Assim, pudemos separar as populações entre vermelhas e azuis.

Enquanto a maioria dos Supergrupos encontrados neste estudo apresentam uma bimodalidade na cor $g - r$, os dois Supergrupos (RM803 e RM6695) com maior redshift não apresentam uma bimodalidade clara (Figuras A.6 e A.7). Deste modo, não há um “vale” dividindo os dois picos. Isto poderia ser devido à contaminação por galáxias no *background* ou *foreground*, mas uma investigação minuciosa é necessária para entender este comportamento (o que está fora do escopo deste trabalho).

A seguir, vamos discutir a fração de galáxias azuis e vermelhas nessas regiões.

⁶<https://scikit-learn.org/stable/index.html>

3.5 Estimativa da Fração de Populações

Para investigar a distribuição das populações pelo Supergrupo e entender os efeitos do ambiente na evolução das galáxias, é interessante analisar a percentagem de galáxias vermelhas e azuis em diferentes regiões da estrutura. Assim, podemos estudar as frações de cada população em relação ao raio, luminosidade/magnitude absoluta, etc. (Olave-Rojas *et al.*, 2018; Sengupta *et al.*, 2022; Valentinuzzi *et al.*, 2011; Wetzel *et al.*, 2012)

O cálculo da fração de galáxias vermelhas e azuis foi feito em duas etapas: uma para os aglomerados individuais (local) e outra para os Supergrupos na totalidade (global).

Para o caso global, escolhemos a BCG do aglomerado mais rico como centro da estrutura e dividimos o espaço angular no entorno destas estruturas em anéis concêntricos com uma espessura de 0,5 Mpc, verificamos o número de galáxias vermelhas, o número de azuis, e o total de galáxias dentro de cada anel e calculamos a fração para cada anel.

Para o caso local, dividimos os anéis em unidades de R_{200} (com incrementos de 0,5) do aglomerado para parametrizar a distribuição e equiparar as áreas de influência de aglomerados de diferentes riquezas. Calculamos o raio R_{200} , usamos uma relação entre este raio e a riqueza (λ) como dada por Rykoff *et al.* (2014) e mostrada na Equação 3.3.

$$R_{200} \approx 1,5h^{-1} \left(\frac{\lambda}{100} \right)^{0,2} \text{ Mpc} \quad (3.3)$$

Esta equação vem da relação entre R_{200} e R_λ , que, como mostrado na seção 2.2, é o raio limite que minimiza o espalhamento na relação entre riqueza e massa do aglomerado. Sendo a relação entre os dois raios dada por $R_{200} \approx 1,5R_\lambda$.

Em ambos os casos, fizemos a média das frações para todas as estruturas a fim de verificar se há correlações entre as frações de populações e sua posição dentro dos aglomerados (caso local) e dos Supergrupos (caso global). Os gráficos (e as discussões) da estimativa de fração serão apresentados no capítulo 4.

3.6 *Magnitude Gap*

Entender o estado dinâmico dos aglomerados membros do Supergrupo pode nos indicar se estes membros estariam de fato interagindo, já que o estado dinâmico mostraria uma história recente de acreção (ou talvez que esta ainda estivesse acontecendo). Entretanto, como não temos dados espectroscópicos disponíveis, necessitamos de estratégias que usem dados fotométricos para tal fim.

Para isso, usaremos o *magnitude gap* (m_{gap}), i.e., a diferença de magnitude entre a BCG ($m_{r_{BCG}}$) e a quarta galáxia mais brilhante (m_{r_4}) do aglomerado (Equação 3.4). Em aglomerados com história de acreção recente, teríamos galáxias com luminosidade comparável àquela da BCG (algumas desta poderiam ser BCGs de grupos que foram acretados); enquanto em aglomerados com história mais antiga, estas galáxias satélites poderiam ter colapsado em uma única BCG, incrementando a diferença de magnitude desta para outros membros do aglomerado e, portanto, aumentando o m_{gap} .

$$m_{gap} = |m_{r_{BCG}} - m_{r_4}| \quad (3.4)$$

Segundo Dariush *et al.* (2010), aglomerados com formação mais antiga (entre eles, aglomerados relaxados), teriam $m_{gap} \geq 2,5$. Enquanto os autores apontam que este índice não pôde detectar alguns aglomerados mais antigos, utilizamos este como auxiliar no indicativo de possível interação entre os aglomerados.

Para tal, selecionamos as galáxias como probabilidade de membro (P_{mem}) maior ou igual a 0,9 e em um raio de $0,5R_{200}$. Para encontrar o R_{200} , utilizamos também a Equação 3.3. Cabe ressaltar que o m_{gap} foi calculado para cada aglomerado membro dos Supergrupos e não os Supergrupos em sua totalidade.

No capítulo a seguir exploramos essa propriedade da amostra.

Capítulo 4

Resultados

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos durante os anos de pesquisa do mestrado, assim como as respectivas análises. Usando os métodos descritos no Capítulo 3, encontramos e selecionamos 8 possíveis Supergrupos, os mesmos serão apresentados a seguir.

4.1 Supergrupos selecionados

Com a busca em *bins* de *redshift* e pixeis de RA e Dec, encontramos 72 pixeis com contagem maior ou igual a 4. Após análise visual destes pixeis e seleção de aglomerados em proximidade angular e em *redshift*, encontramos 8 estruturas de interesse que poderiam ser Supergrupos.

A Tabela 4.1 apresenta os dados das coordenadas e do *redshift* fotométrico (z_λ) do aglomerado mais rico do Supergrupo, visto que consideramos este como o centro do Supergrupo durante toda a análise (exceto quando dito contrário). Assim também, nomeamos os Supergrupos com RM mais o número do aglomerado mais rico no catálogo *RedMaPPer Y3*. Ademais, é apresentado o número de aglomerado para cada Supergrupos (vide também Figura 4.4). A Tabela 4.2 apresenta a riqueza (λ), R_{200} e M_{200} para o aglomerado mais rico de cada Supergrupo.

Usando a fórmula de relação entre riqueza e massa de McClintock *et al.* (2019), podemos calcular a massa estimada para cada aglomerado dos Supergrupos. Somando as massas de todos os aglomerados dentro do Supergrupo, temos uma estimativa de uma **massa mínima total**. Aqui chamaremos massa mínima total, porque esta estimativa não inclui a massa de estruturas adjacente detectadas no catálogo *Gold*. Entretanto, esta estimativa nos dá uma noção de qual seria a massa mínima total se estes aglomerados colapsassem em um só.

A Figura 4.1 mostra como os Supergrupos estão distribuídos no *footprint* do DES.

Os Supergrupos estão distribuídos entre $z_\lambda = 0,1$ e $z_\lambda = 0,4$, com riqueza (λ) entre 20, devido à seleção de estruturas com λ acima disto, como mostrado no capítulo 3, e 115

Tabela 4.1: Informações sobre os oito Supergrupos encontrados. Os Supergrupos receberam a identificação de seu aglomerado-membro mais rico, como no catálogo *RedMaPPer Y3*. As informações de RA, Dec e z_λ também são dos aglomerados-membro mais ricos, λ é a soma das riquezas dos aglomerados membros, R_{200} é o raio calculado a partir do somatório do λ , $n_{clusters}$ é o número de aglomerados em cada Supergrupo e M é a massa mínima total.

Nome	RA	Dec	z_λ	λ	R_{200} (Mpc)	$n_{clusters}$	M (M_\odot)
RM4806	78,328	-41,720	0,101	71,264	2,072	2	$5,74 \pm 1,71 \times 10^{14}$
RM3761	47,749	-47,435	0,101	92,290	2,182	3	$6,94 \pm 1,59 \times 10^{14}$
RM1791	24,811	-29,563	0,221	71,142	2,071	2	$5,53 \pm 1,59 \times 10^{14}$
RM6737	7,918	-33,353	0,236	80,559	2,123	3	$5,63 \pm 1,33 \times 10^{14}$
RM239	38,939	-51,351	0,275	180,067	2,494	3	$1,79 \pm 0,52 \times 10^{15}$
RM650	35,478	-36,867	0,288	103,788	2,234	2	$9,22 \pm 2,74 \times 10^{14}$
RM6695	42,309	-16,346	0,356	82,389	2,133	3	$5,60 \pm 1,30 \times 10^{14}$
RM803	42,700	-16,808	0,376	175,480	2,481	4	$1,47 \pm 0,32 \times 10^{15}$

Tabela 4.2: Informações sobre o λ , R_{200} e M_{200} do aglomerado mais rico de cada Supergrupo.

Nome	λ	R_{200} (Mpc)	M_{200} (M_\odot)
RM4806	47,005	1,906	$4,08 \pm 1,57 \times 10^{14}$
RM3761	36,601	1,813	$2,90 \pm 1,10 \times 10^{14}$
RM1791	45,815	1,896	$3,82 \pm 1,44 \times 10^{14}$
RM6737	36,464	1,812	$2,79 \pm 1,08 \times 10^{14}$
RM239	114,752	2,279	$1,31 \pm 0,50 \times 10^{15}$
RM650	72,130	2,077	$6,95 \pm 2,60 \times 10^{14}$
RM6695	35,701	1,671	$2,64 \pm 1,01 \times 10^{14}$
RM803	69,155	2,059	$6,44 \pm 2,44 \times 10^{14}$

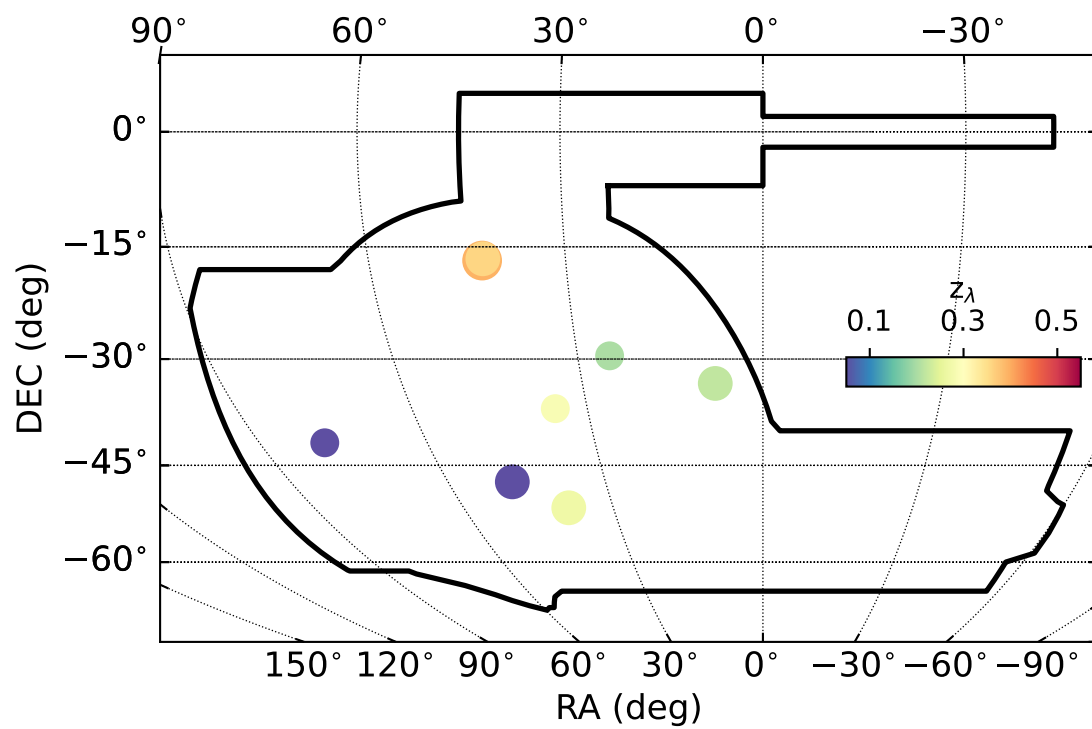


Figura 4.1: Distribuição dos Supergrupos dentro do *footprint* do DES. A barra de cores indica o redshift fotométrico (z_λ) de cada Supergrupo e o tamanho do ponto indica o número de aglomerados no Supergrupo.

(Figura 4.2). O aglomerado com $\lambda \approx 115$ (o que equivaleria a $M_{200m} = 1,31 \times 10^{15} M_{\odot}$) é o RM239, o qual será discutido mais a frente. A maioria dos aglomerados tem riqueza menor que 50, ou seja, com massa menor que $4,4 \times 10^{14} M_{\odot}$, seguindo a fórmula de equivalência da riqueza pela massa de McClintock *et al.* (2019).

Observa-se na Figura 4.2 que alguns aglomerados pertencentes ao mesmo Supergrupo podem ter valores de *redshift* ligeiramente diferentes dos demais. Cabe destacar que *redshift* aqui utilizado é o fotométrico (no caso dos aglomerados, ele é calculado pelo próprio *RedMaPPer*), cuja medida pode possuir incertezas maiores do que aquelas obtidas com *redshifts* espectroscópicos. Desse modo, escolhemos incluir esses aglomerados ligeiramente distantes em seus respectivos Supergrupos.

Observa-se também na Figura 4.2 que, a exceção dos aglomerados mais ricos ($\lambda \gtrsim 60$), λ é consistente em todas as faixas de *redshift* ocupadas por nossos Supergrupos. Esta consistência na distribuição de λ é bem ilustrada quando fazemos a Estimativa de Densidade Kernel (em inglês, *Kernel Density Estimation* ou KDE) da distribuição (Figura 4.3), onde se observa que grande parte dos aglomerados têm λ entre 20 e 50.

Os Supergrupos encontrados neste trabalho são compostos de 2 a 4 aglomerados, com 50% deles possuindo 3 aglomerados, enquanto só um, o RM803, é composto de 4 aglomerados (Figura 4.4).

Não há uma relação direta entre o número de aglomerados do Supergrupos deste trabalho e sua massa mínima total. Enquanto o Supergrupo com a menor massa mínima total tem a quantidade mínima de aglomerados, isto não é verdade para o Supergrupo com maior massa mínima total que possui três aglomerados (Figura 4.5).

Em outras palavras, um Supergrupo pode ser formado de vários aglomerados menores, enquanto outro Supergrupos pode ser formado de poucos aglomerados massivos, de forma que o número de aglomerados num Supergrupo não é um indicador direto da massa deste.

O Supergrupo com menor massa mínima total (RM1791) tem $\log_{10}(M/M_{\odot}) = 14,74$ ou $M = 5,53 \times 10^{14} M_{\odot}$ (vide Tabela 4.1 e Figura 4.5). Essa massa é ligeiramente menor que a massa do Aglomerado de Virgo (Kashibadze *et al.*, 2020).

Por outro lado, o Supergrupo RM239 tem massa mínima maior que a massa do aglomerado de Coma, um dos aglomerados mais massivos na vizinhança do grupo local. O aglomerado central deste Supergrupo sozinho tem massa comparável àquela de Coma (Ho *et al.*, 2022).

O RM3761 (Figura 4.6) foi um dos Supergrupos encontrados nesta pesquisa. Ele tem um possível *match* com um aglomerado do catálogo Abell (*A3093*). Enquanto não há estudos sobre o estado dinâmico de *A3093* em específico, sua proximidade ($z \approx 0,1$) e a presença de dois aglomerados vizinhos faz deste um alvo interessante para o estudo.

Já o RM239 (Figura 4.7) também foi encontrado nesta pesquisa. O aglomerado tem um *match* no catálogo ACT (*ACT-CL J0235-5121*), com este *match* sendo corroborado pelo próprio catálogo ACT (Hilton *et al.*, 2021). Este aglomerado apresenta evidência de

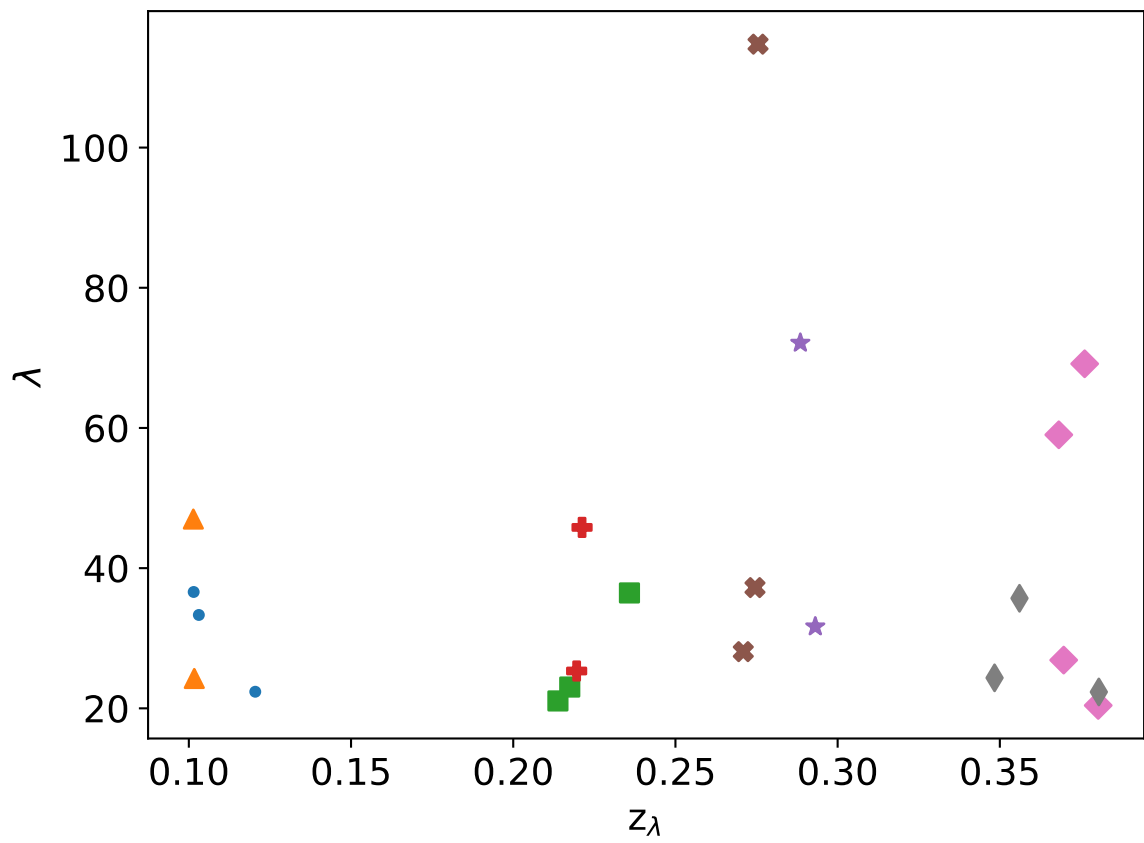


Figura 4.2: Gráfico do *redshift* (z_λ) pela riqueza (λ) para os aglomerados membros dos Supergrupos. Aglomerados pertencentes ao mesmo Supergrupo têm mesma cor e formato.

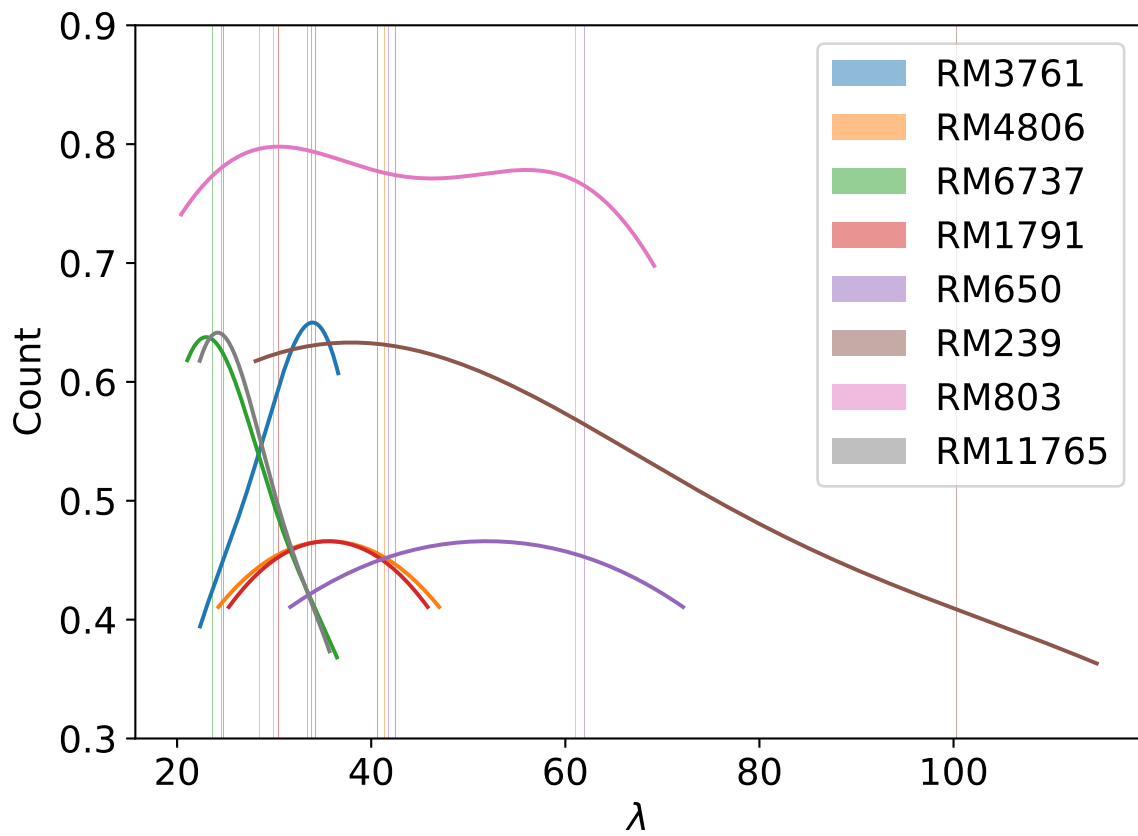


Figura 4.3: Gráfico do KDE da distribuição da riqueza (λ). Cada linha representa um dos Supergrupos.

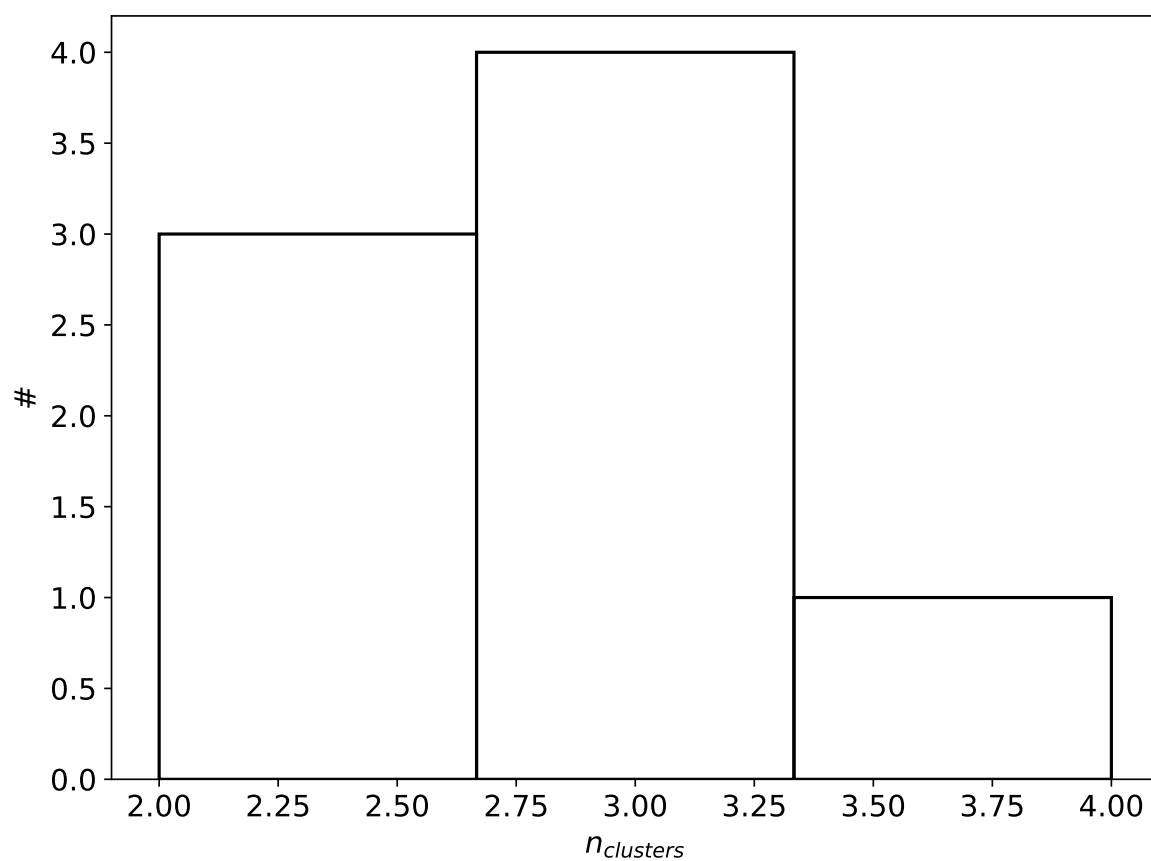


Figura 4.4: Histograma da quantidade de aglomerados membros dos Supergrupos. Metade dos Supergrupos têm três membros, três Supergrupos têm dois membros e um Supergrupo tem quatro membros.

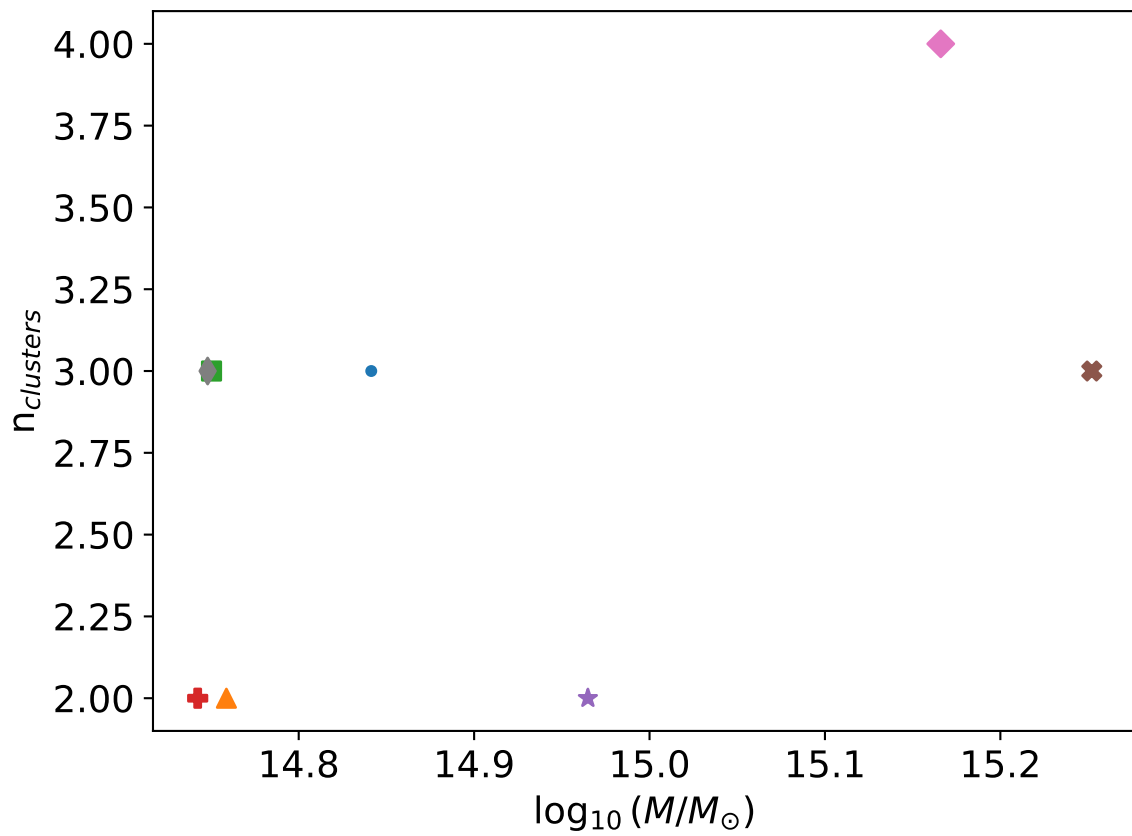


Figura 4.5: Gráfico da massa mínima total do Supergrupos pela quantidade de aglomerados membros.

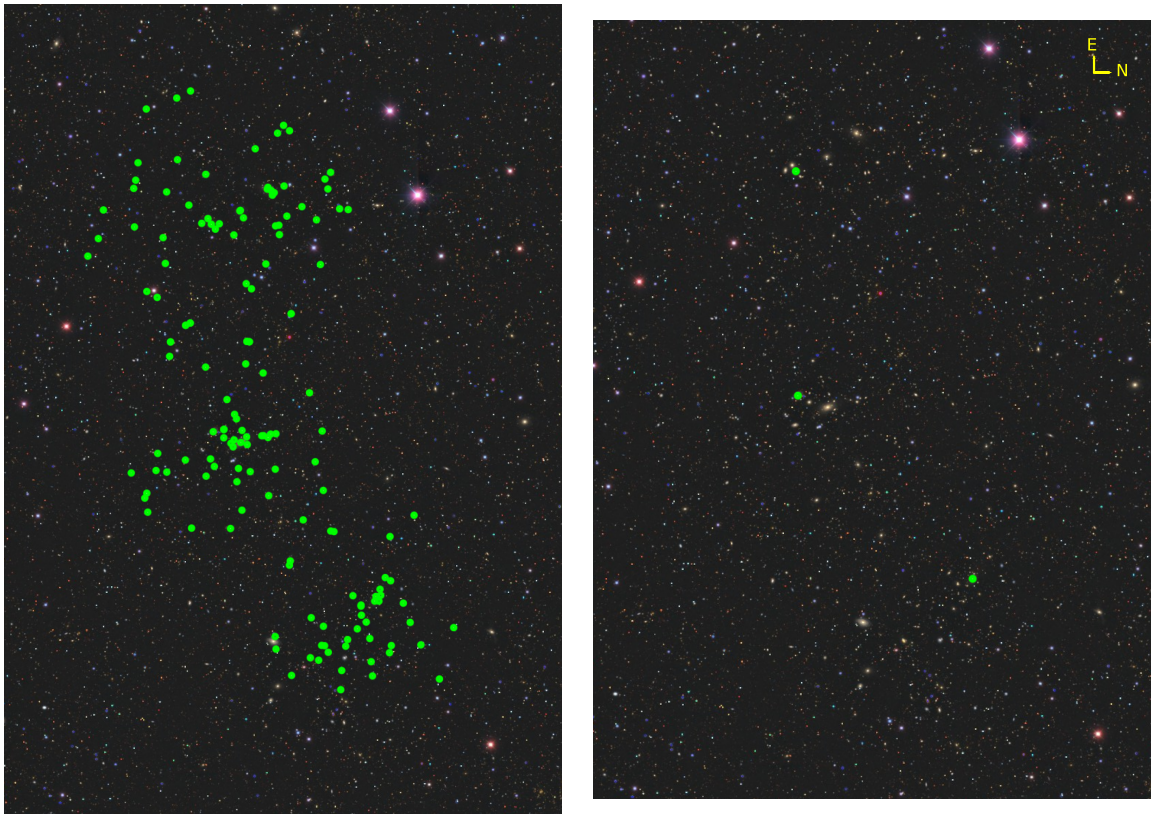


Figura 4.6: Imagem dos aglomerados do Supergrupos RM3761 (direita), com os pontos verdes indicando as posições das respectivas BCGs. As posições relativas das galáxias membros dentro de cada aglomerado (esquerda). Em ambas as imagens, leste está para cima e norte para a direita.

subestruturas (Sifón *et al.*, 2013) e com morfologia perturbada com evidências de *merger* em raios X (Bîrzan *et al.*, 2017). Isso é uma evidência interessante de que alguns de nossos Supergrupos são, de fato, estruturas ainda em formação e que poderiam estar ainda em colapso.

O RM239 também é um aglomerado supermassivo ($M = 1,31 \times 10^{14} M_{\odot}$, como mostrado mais acima), com massa comparável à do aglomerado de Coma em $z_{\lambda} \approx 0,28$. Assim sendo, ele, por si só, já seria interessante para entender a evolução de galáxias em estruturas supermassivas.

Como notado nos dois parágrafos anteriores, fizemos o *match* dos Supergrupos encontrados durante esta pesquisa com a base de dados do NED. Para isso, usamos a biblioteca PyVO¹ para fazer buscas usando o serviço de *Table Access Protocol* (TAP) do NED². Fizemos a busca por estruturas identificadas como aglomerados em um raio de 10arcmin ao redor do aglomerado central (isto é, nas coordenadas da BCG³ do aglomerado central). Então, selecionamos os aglomerados com maior proximidade em redshift com nossos Supergrupos.

Tivemos *matches*, nomeadamente, no catálogo do *Abell* (siglas A e AS; Abell *et al.*, 1989), no catálogo de aglomerados do *APM Galaxy Survey* (APMCC; Dalton *et al.*, 1997), no catálogo de aglomerados do *Atacama Cosmology Telescope* (ACT-CL; Hilton *et al.*, 2021, e no catálogo de *Wen+* (WHL; Wen e Han, 2013). Somente dois dos oito Supergrupos (RM17091 e RM6737) não tiveram *matches* em nenhum dos catálogos cruzados (Tabela 4.3).

Separámos os Supergrupos em dois tipos morfológicos: *fillament* e *spider* (Einasto *et al.*, 2007, 2011, 2014). Os *fillaments* apresentam estrutura mais alongada com centros de concentração (i.e., aglomerações) ligado por poucos filamentos. Já os *spiders* apresentam vários centros de concentração ligados por vários filamentos, dispostos em forma de uma teia de aranha (de onde vem o nome). Em outras palavras, enquanto um apresenta uma estrutura mais centralizada, o outro apresenta uma estrutura menos centralizada e concentrada (Figura 4.8).

Neste estudo, fizemos a classificação visual dos Supergrupos para separá-los nos tipos morfológicos acima. Cabe destacar que enquanto Einasto *et al.* (2007, 2011, 2014) citam também os tipos de *multibranching* e *multispider*, decidimos por seguir Einasto *et al.* (2014) e classificar os Supergrupos em *fillament* e *spider* somente. A classificação morfológica dos Supergrupos são apresentadas na Tabela 4.3.

¹<https://pyvo.readthedocs.io/en/latest/>

²<https://ned.ipac.caltech.edu/Documents/Guides/Interface/TAP>

³Do inglês *Brightest Cluster Galaxy* (Galáxia mais brilhante do aglomerado).

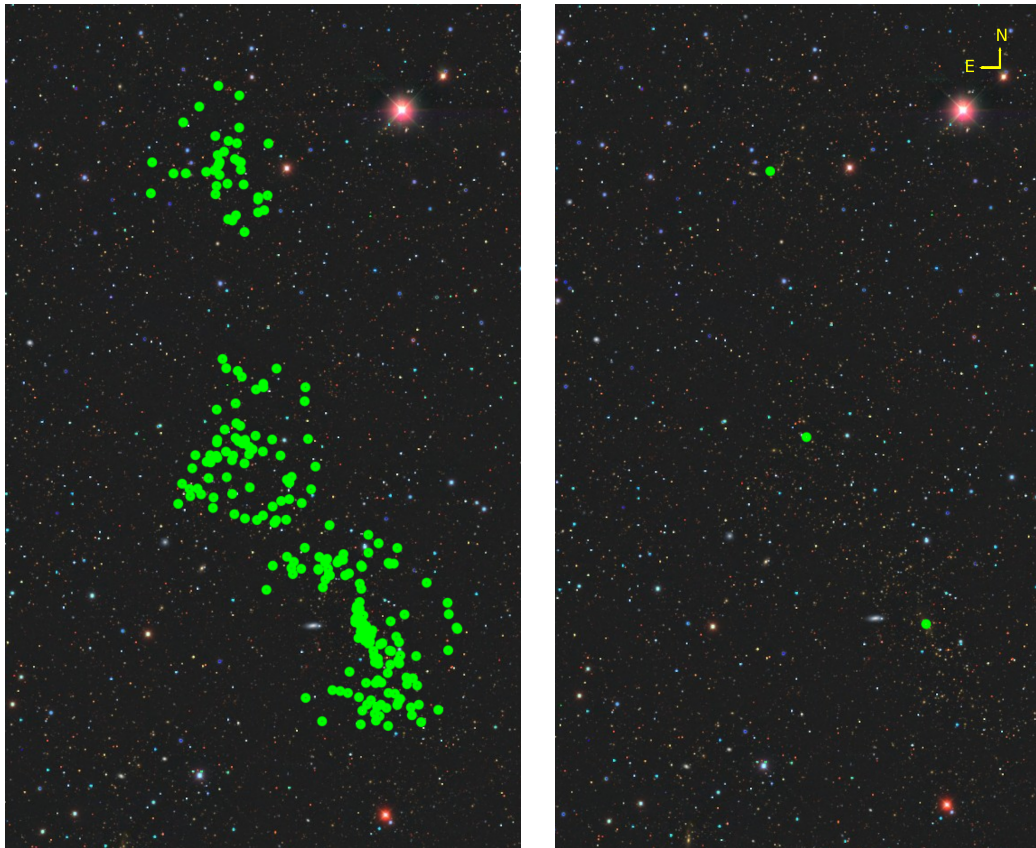


Figura 4.7: Imagem dos aglomerados do Supergrupos RM239 (esquerda), com os pontos verdes indicando as posições das respectivas BCGs. As posições relativas das galaxias membro dentro de cada cluster (direita). Em ambas as imagens, norte está para cima e leste para a esquerda.

Tabela 4.3: Informações sobre o tipo morfológico e os *matches* com outros catálogos de aglomerados (Abell *et al.*, 1989; Dalton *et al.*, 1997; Hilton *et al.*, 2021; Wen e Han, 2013) para os oito Supergrupos encontrados. Dois deles não apresentaram *match* em outros catálogos.

Nome	Morfologia	Matches	Notas ^a
RM4806	Spider	APMCC578	-
RM3761	Spider	A3093	Sistema não tem diferença do centroide em raios-x
RM1791	Fillament	-	-
RM6737	Fillament	-	-
RM239	Fillament	ACT-CLJ0235-5121	-
RM650	Fillament	AS0249	-
RM6695	Fillament	WHLJ024942.7-162849	-
RM803	Spider	WHLJ025048.1-164830	-

^a Conforme informações do site do [NED](#)

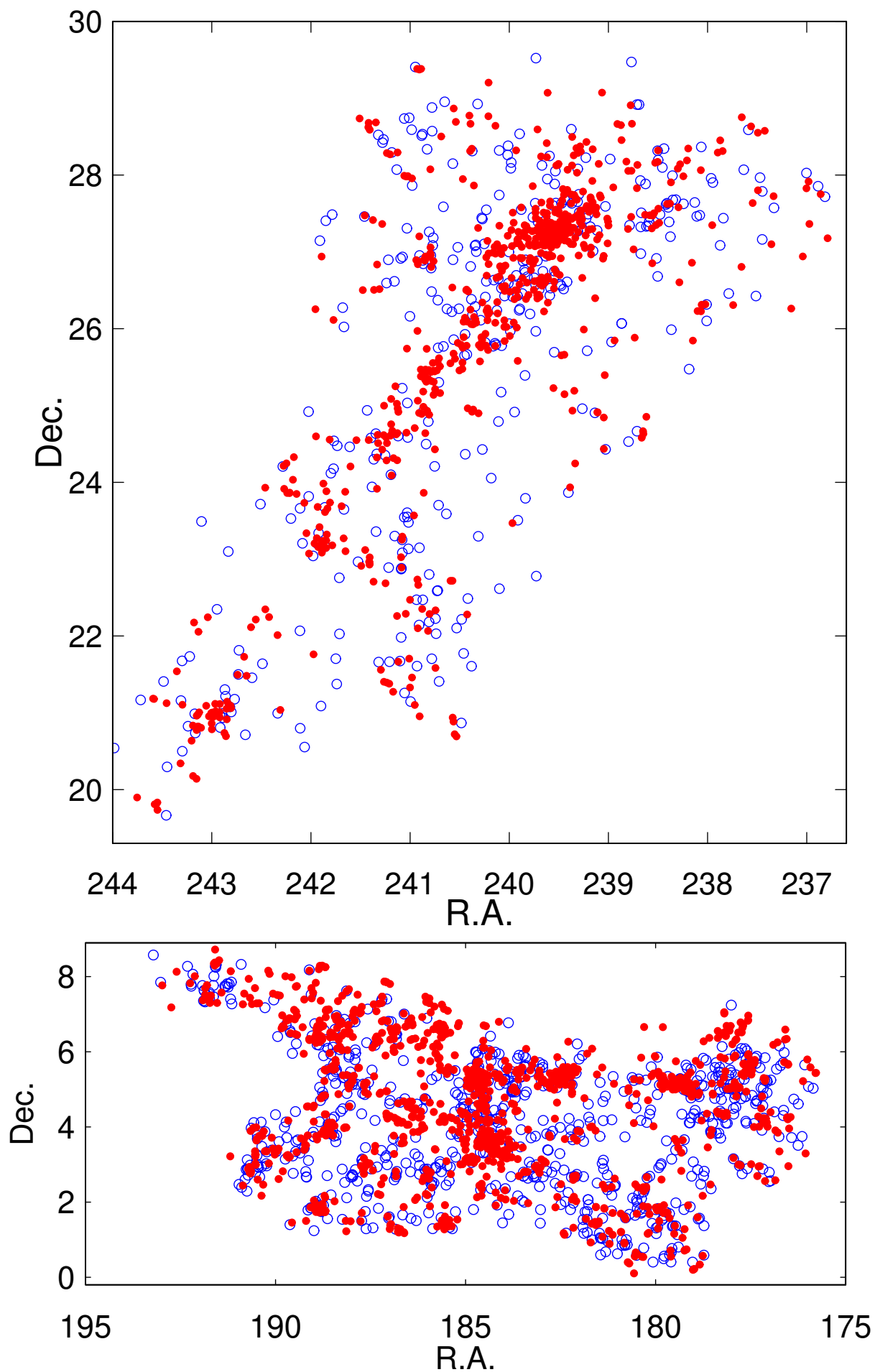


Figura 4.8: Exemplo de superaglomerado com morfologia *fillament* (SCI001, acima) e *spider* (SCI019, abaixo). Fonte: Einasto *et al.* (2014)

4.2 Distribuição de Galáxias dentro dos Supergrupos

Para se entender como os aglomerados de nossos Supergrupos estão conectados, investigamos como as galáxias do catálogo *RedMaPPer Y3* e *Gold* estão distribuídas dentro e no entorno dos aglomerados. Para isso, analisamos a distribuição de densidade destas galáxias a até 10 Mpc do aglomerado central. Nesta seção, serão analisados os resultados da distribuição de densidade para cada Supergrupo. Link para imagens da região de cada Supergrupo serão disponibilizados em rodapé.

As imagens apresentadas nesta seção serão dos contornos de densidade de galáxias do *RedMaPPer Y3* e *Gold* juntas na região dos Supergrupos, com os pontos indicando as posições das galáxias do *RedMaPPer Y3* e seus respectivos formatos indicando a qual aglomerado pertencem.

O Supergrupo RM4806⁴ (Figura 4.9) apresenta uma sobredensidade entre os aglomerados e uma sobredensidade a nordeste do aglomerado central, podendo indicar presença de filamentos ou grupos que estariam em processo de acreção. Ademais, sua proximidade nos levou a classificá-lo como Supergrupo.

Para o Supergrupo RM3761⁵ (Figura 4.10), há uma clara sobredensidade de galáxias interconectando os aglomerados. Assim, isto seria uma indicação de que estes aglomerados estariam conectados na teia cósmica tais como filamentos e que este Supergrupo poderia estar em processo de colapso para formar uma única estrutura com massa $M \gtrsim 6,7 \times 10^{14} M_{\odot}$. Ou seja, com, ao menos, massa similar ao aglomerado de Virgo (Kashibadze *et al.*, 2020).

O Supergrupo RM1791⁶ (Figura 4.11) foi classificado como tal pela proximidade entre os aglomerados membros e pela aparente concentração entre estes. A sobredensidade a nordeste poderia ser a contaminação de um aglomerado em outra faixa de *redshift*, visto que se pode ter um espalhamento de um aglomerado ao longo do *redshift* fotométrico devido à sua incerteza. Dados espectroscópicos são necessário para melhor entender esta estrutura.

O Supergrupo RM6737⁷ (Figura 4.12) contém uma sobredensidade entre seus aglomerados, embora esta possa não ser tão clara. Proximidade entre dois dos aglomerados membros, uma ligação com o terceiro aglomerado e uma sobredensidade ao norte e a sudeste (que poderiam ser indicativos da presença de filamentos) do aglomerado central fez-nos classificar estes três aglomerados como parte de um mesmo Supergrupo.

⁴Imagem de RM4806: <https://www.legacysurvey.org/viewer?ra=78.327679&dec=-41.719639&layer=des-dr1&zoom=11>

⁵Imagem de RM3761: <https://www.legacysurvey.org/viewer?ra=47.749071&dec=-47.434682&layer=des-dr1&zoom=11>

⁶Imagem de RM1791: <https://www.legacysurvey.org/viewer?ra=24.810781&dec=-29.562973&layer=des-dr1&zoom=11>

⁷Imagem de RM6737: <https://www.legacysurvey.org/viewer?ra=7.917592&dec=-33.353270&layer=des-dr1&zoom=11>

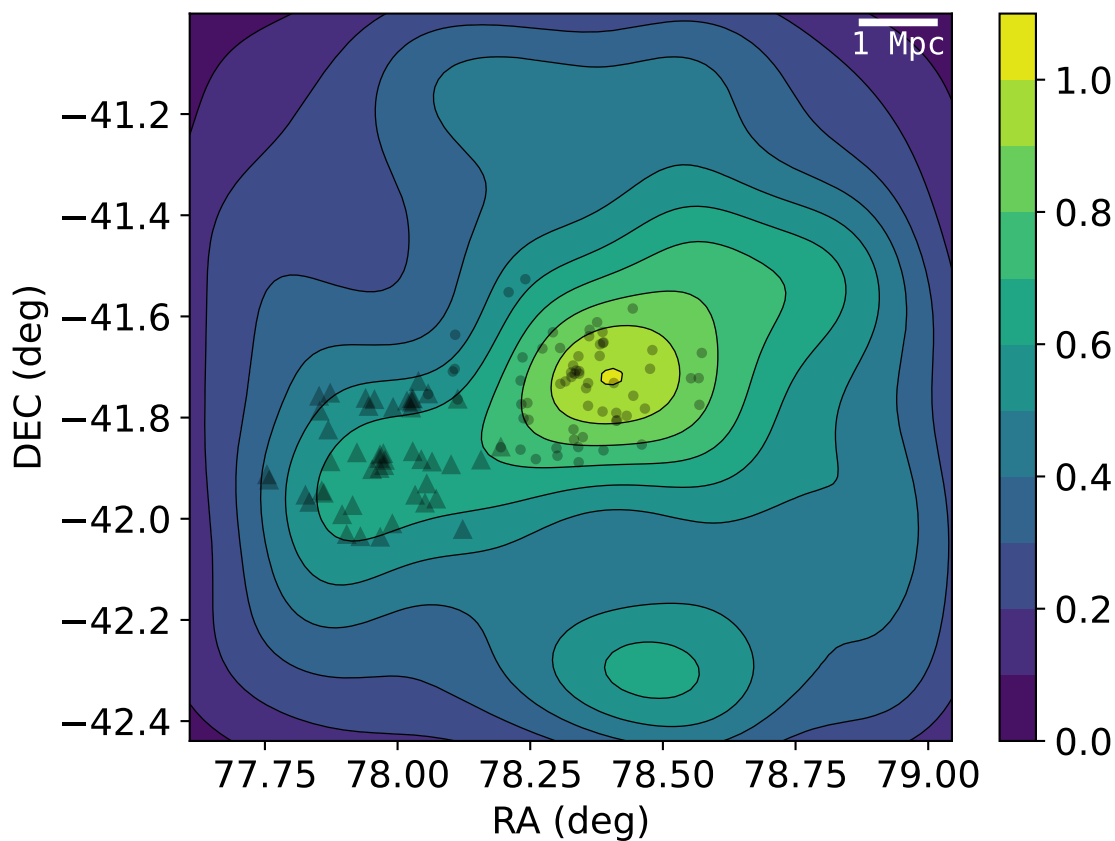


Figura 4.9: Gráfico dos contornos de densidade das galáxias do *Gold* no entorno dos aglomerados (pontos) do Supergrupo RM4806. Há uma sobredensidade entre os aglomerados, há também uma concentração a nordeste do aglomerado central que demonstraria uma possível acreção de galáxia por este (em filamentos ou em um grupo).

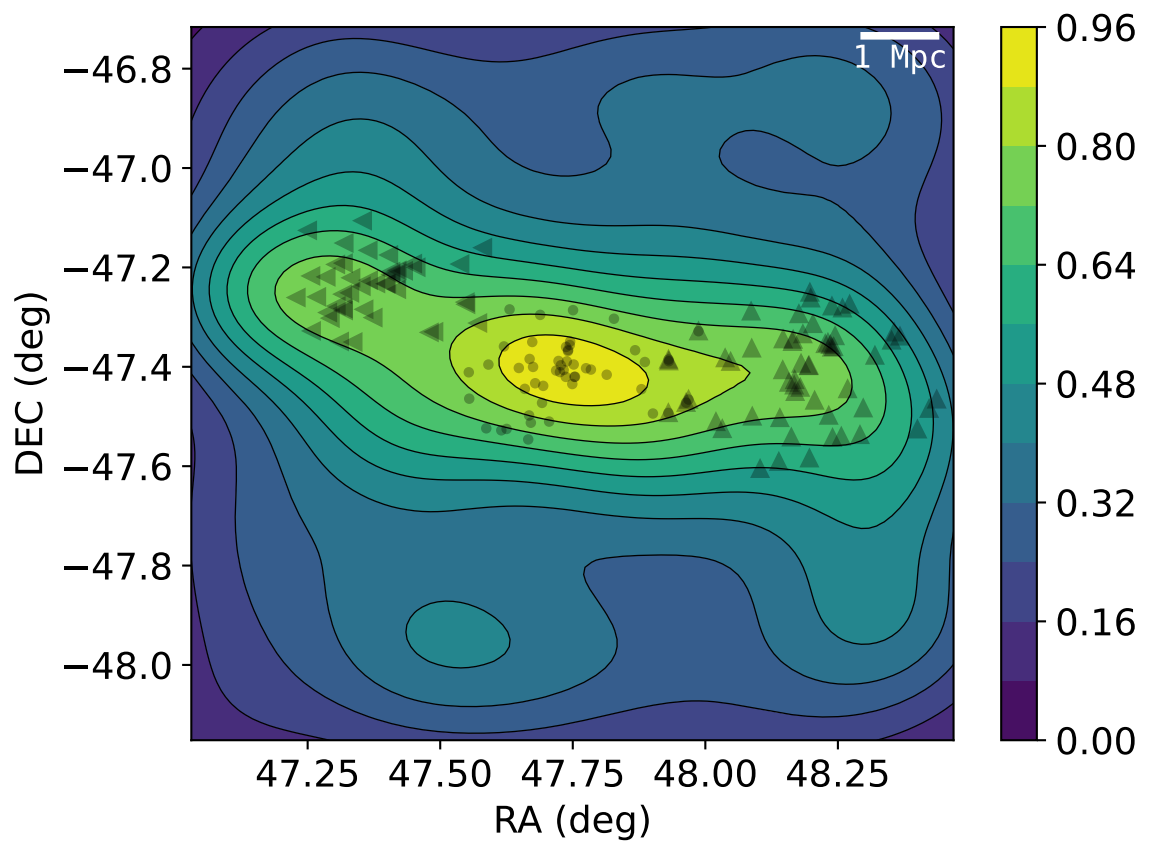


Figura 4.10: Gráfico dos contornos de densidade das galáxias do *Gold* no entorno dos aglomerados (pontos) do Supergrupo RM3761. Observa-se uma concentração de galáxias conectando os aglomerados.

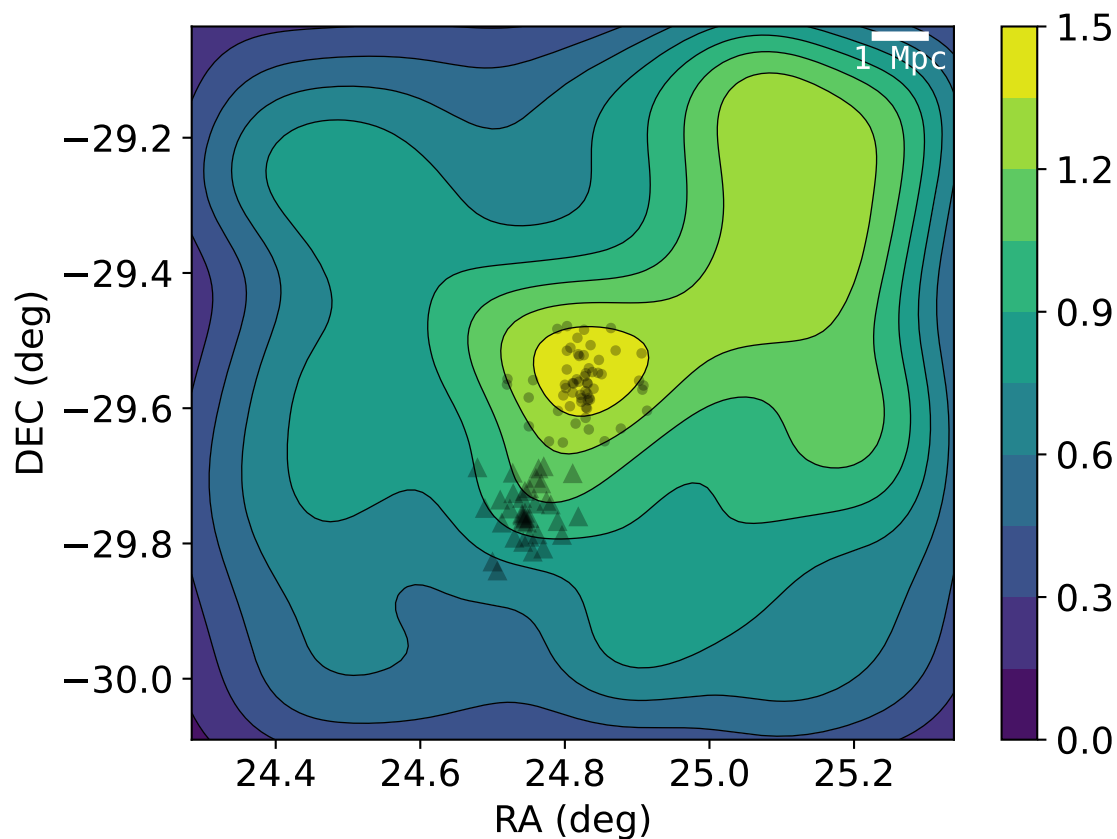


Figura 4.11: Gráfico dos contornos de densidade das galáxias do *Gold* entorno dos aglomerados (pontos) do Supergrupo RM1791. Aparentemente, há uma concentração entre os aglomerados e eles estão suficientemente próximos. A concentração em RA=25,2 e Dec=-29,2 deve-se provavelmente à contaminação um aglomerado em uma faixa diferente de *redshift*.

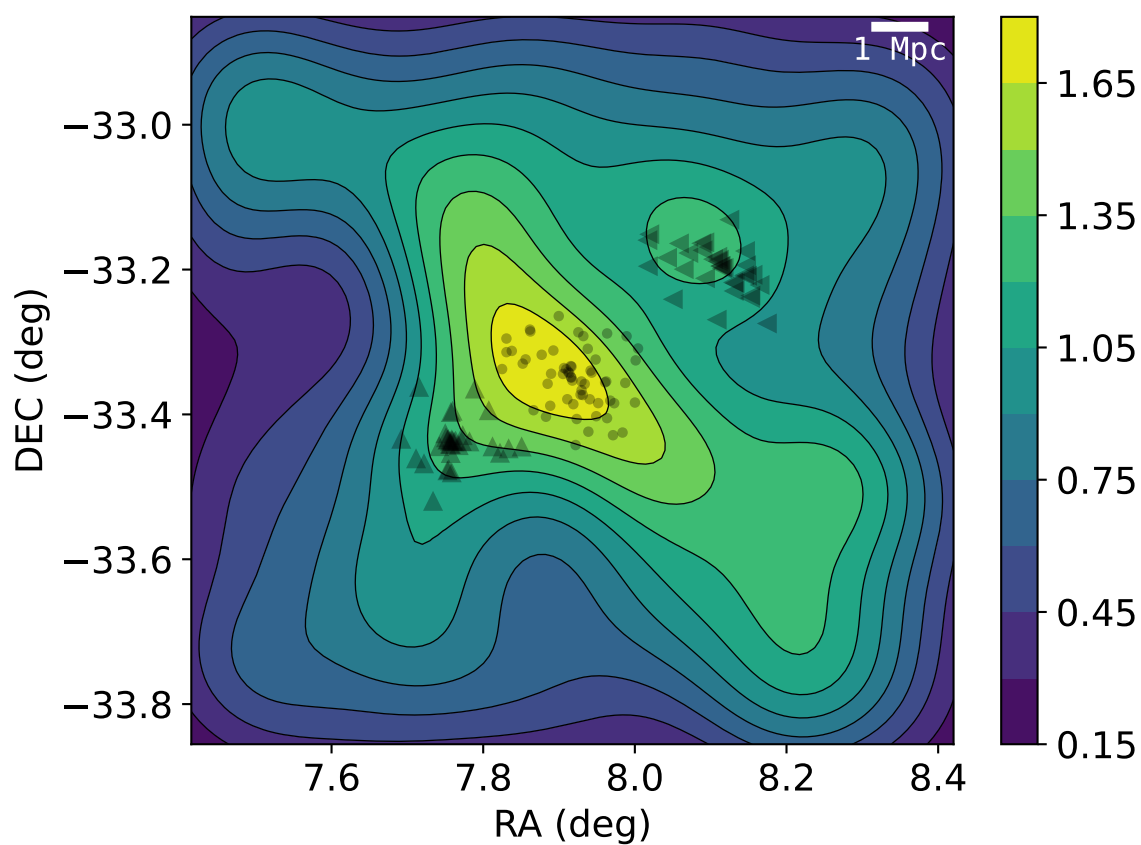


Figura 4.12: Gráfico dos contornos de densidade das galáxias do *Gold* entorno dos aglomerados (pontos) do Supergrupo RM6737. As concentrações a NW e SE do aglomerado central poderiam ser indícios de filamentos.

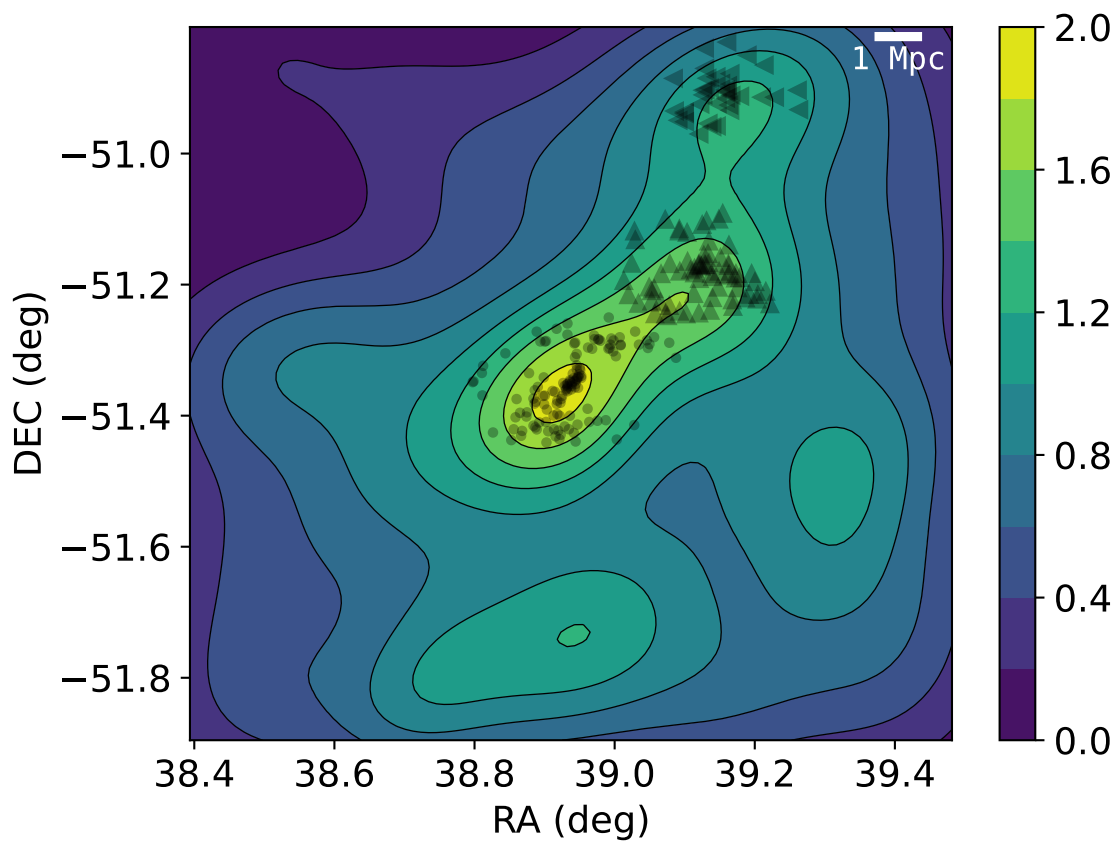


Figura 4.13: Gráfico dos contornos de densidade das galáxias do *Gold* entorno dos aglomerados (pontos) do Supergrupo RM239. Há uma concentração de galáxias entre os aglomerados que indicaria a existência de filamentos entre eles.

O Supergrupo RM239⁸ contém o aglomerado mais massivo dentre todos os Supergrupos, além disto, este tem um aglomerado vizinho e possui sinais de interação recente (como foi discutido na seção anterior). Estas características por si só já seriam um forte indício da condição de Supergrupo destes dois aglomerados. Um possível filamento entre estes dois e um terceiro aglomerado (Figura 4.13), levou a inclusão deste no Supergrupo RM239. Se este Supergrupo colapsar, ele formaria um aglomerado com massa maior que Coma (considerando a massa encontrada por Ho *et al.* 2022).

O Supergrupo RM650⁹ tem uma clara sobredensidade entre seus aglomerados (Figura 4.14). Isto poderia ser indício de interação entre os aglomerados e que estes poderiam colapsar em uma só estrutura.

O Supergrupo RM6695¹⁰ tem uma sobredensidade entre seus membros, embora de a sobre com o aglomerado a noroeste não seja tão clara. A sobredensidade em RA=42,7 e Dec=16,8 é devida a RM803, que poderiam formar uma só estrutura, mas, dada a distância angular projetada entre ambas, decidimos classificá-los como dois Supergrupos.

O Supergrupo RM803¹¹ é o “mais rico” (em número de aglomerados membros) dentre os Supergrupos deste trabalho e há uma aparente sobredensidade entre os quatro aglomerados (Figura 4.16) que poderia indicar uma possível interação entre estes. A sobredensidade a noroeste do aglomerado central é devida ao Supergrupo RM6695, estes dois poderiam ser parte de um só Supergrupo, mas resolvemos dividi-los em dois (como dito no parágrafo anterior) dada a distância angular projetada entre eles.

Assim, com a análise da distribuição das galáxias do *Gold* dentro dos Supergrupos, verificamos que nosso Supergrupos são bons candidatos a serem de fatos Supergrupos. No entanto, dados espectroscópicos são necessários para melhor investigar a natureza destas estruturas.

Analisaremos os Supergrupos calculando a média de algumas de suas características (e.g., fração de galáxias vermelhas e azuis). Assim, qualquer possível contaminação, como variações entre as cores ou as frações de galáxias dadas a contaminação pelo campo e/ou aglomerados no *foreground/background* ou características particulares ao Supergrupo em questão, deve ser diluída neste processo.

⁸Imagem de RM239: <https://www.legacysurvey.org/viewer?ra=38.938628&dec=-51.351279&layer=des-dr1&zoom=11>

⁹Imagem de RM650: <https://www.legacysurvey.org/viewer?ra=35.478205&dec=-36.866656&layer=des-dr1&zoom=11>

¹⁰Imagem de RM6695: <https://www.legacysurvey.org/viewer?ra=42.308658&dec=-16.345710&layer=des-dr1&zoom=11>

¹¹Imagem de RM803: <https://www.legacysurvey.org/viewer?ra=42.700212&dec=-16.808262&layer=des-dr1&zoom=11>

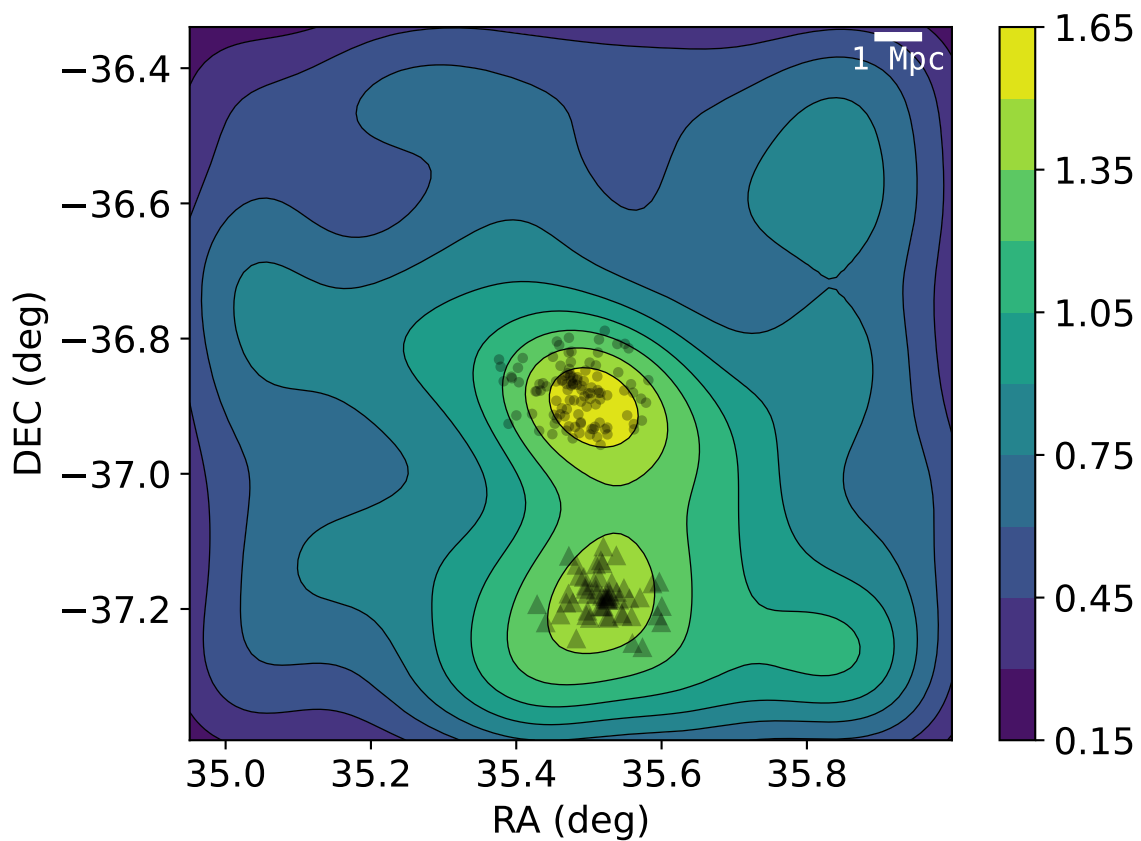


Figura 4.14: Gráfico dos contornos de densidade das galáxias do *Gold* entorno dos aglomerados (pontos) do Supergrupo RM650. Há uma concentração de galáxias entres os dois aglomerados que poderiam indicar uma interação entre eles.

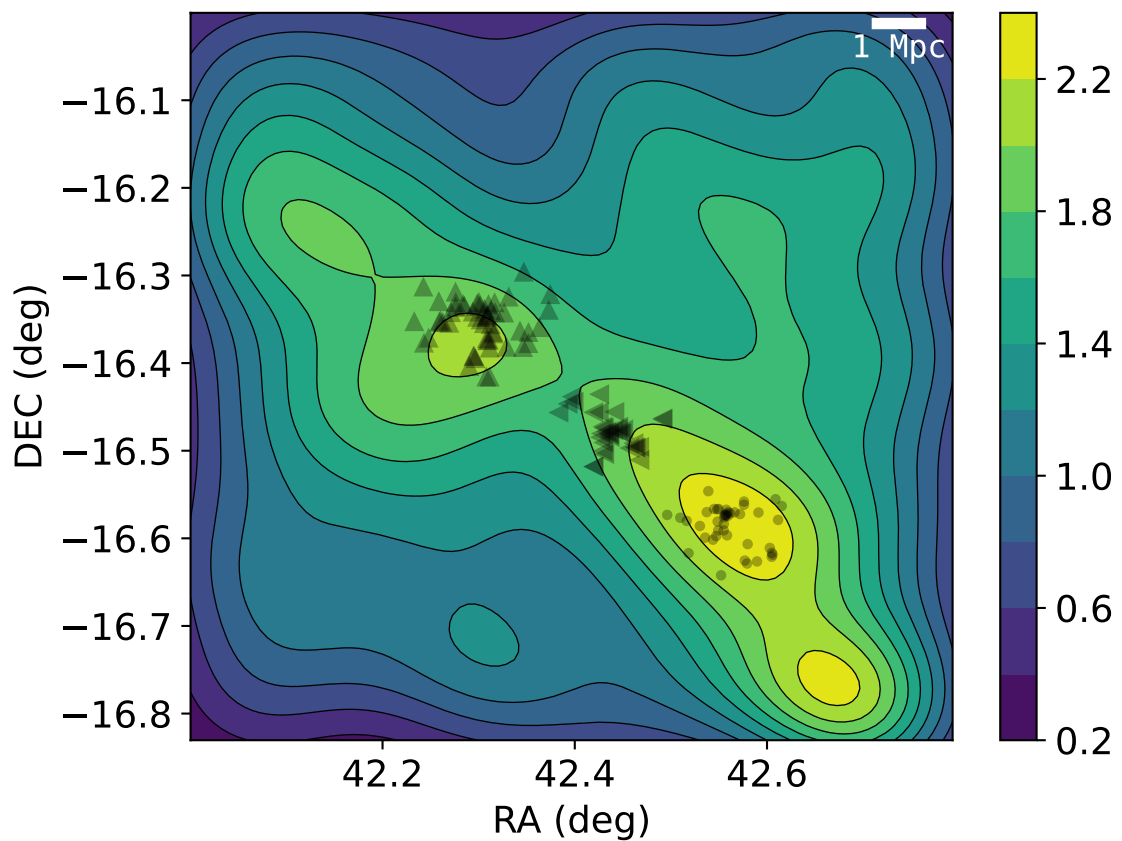


Figura 4.15: Gráfico dos contornos de densidade das galáxias do *Gold* entorno dos aglomerados (pontos) do Supergrupo RM6695. A concertação no canto inferior direito se deve ao Supergrupo RM803, de qual este Supergrupo poderia fazer parte.

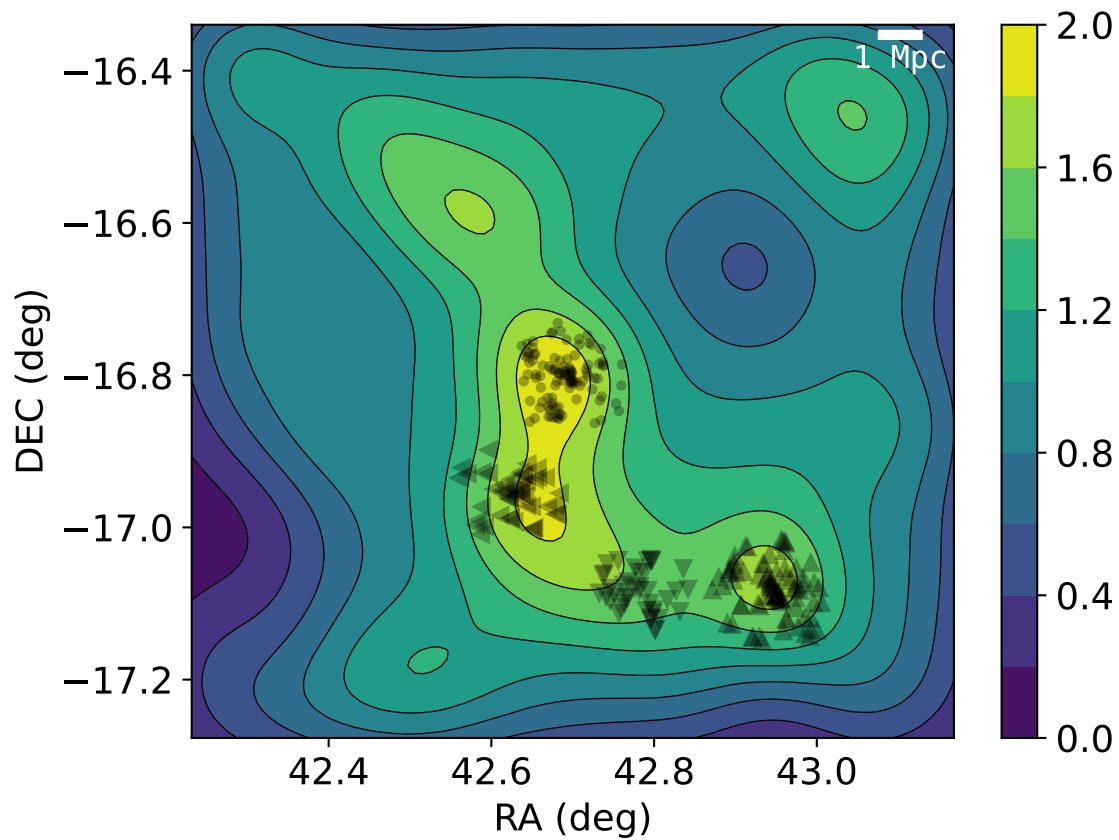


Figura 4.16: Gráfico dos contornos de densidade das galáxias do *Gold* entorno dos aglomerados (pontos) do Supergrupo RM803. Há uma aparente concentração de galáxias entre os aglomerados. A sobredensidade em RA=42,6 e Dec=-16,6 seria devida ao Supergrupo RM6695, que poderia fazer parte deste Supergrupo.

4.3 Cores do Supergrupos

Como discutido no Capítulo 2, o *RedMaPPer* busca por sobredensidades de galáxias vermelhas para encontrar aglomerados. Por conseguinte, a população das galáxias do *RedMaPPer Y3* é mais avermelhada (como discutido no Capítulo 3). Isso fica evidente ao se fazer um diagrama cor-magnitude (CMD, do inglês *colour-magnitude diagram*) para as galáxias do *RedMaPPer Y3* e do *Gold* (Figuras 4.17, 4.18 e 4.19).

Ou seja, as galáxias do *RedMaPPer Y3* são bem mais vermelhas que as do *Gold* em todas as cores com os filtros do DES (g , r , i e z), assim como as primeiras apresentam distribuição de cores mais uniformes que as últimas. Assim sendo, o uso do *Gold* nesta pesquisa foi necessário para um estudo mais completo da população de galáxias dos Supergrupos. O estudo das frações e distribuição de população será feito com galáxias de ambos os catálogos, sem haver discriminação entre um e outro.

Entretanto, há galáxias no *Gold* cujas cores são comparáveis àquelas dos membros do *RedMaPPer*. Assim sendo, somente a separação *Gold/RedMapper Y3* não é suficiente para classificar populações vermelhas e azuis. Por isso, utilizamos o algoritmo GMM que fez uma classificação de populações baseado na cor $g - r$ e, assim, pudemos ter uma separação robusta entre elas (Figura 4.20).

A relação massa-luminosidade de uma galáxia ou um aglomerado de galáxias é bastante conhecida na literatura (e.g., Bell e de Jong, 2001; Faber e Gallagher, 1979; Faber e Jackson, 1976). Por ser uma relação linear (cabe ressaltar que este valor pode variar conforme alguns fatores, tais como tipo morfológico, função de massa inicial, etc.), de forma que a luminosidade incrementa a medida que a massa incrementa, e considerando haver uma relação direta entre magnitude absoluta e luminosidade, podemos usar a magnitude absoluta como um indicador aproximado (e, de certa forma, grosseiro) da massa.

Observa-se que as galáxias em estruturas (isto é, as do *RedMaPPer Y3*), para além de serem mais vermelhas, têm magnitude absoluta mais brilhante e, portanto, seriam mais massivas se comparadas com as galáxias dos Supergrupos que se encontram fora dos aglomerados (isto é, as do *Gold*), como mostra a Figura 4.17. Cabe ressaltar que, quando nos referimos as estruturas aqui, estamos somente considerando os aglomerados dentro dos Supergrupos.

De fato, observamos esta tendência de concentração de galáxias mais luminosas e massivas nos aglomerados ao fazer um gráfico da magnitude absoluta (M_g) pelo raio clustercêntrico (Figura 4.21). Temos galáxias com o M_g médio mais brilhantes conforme mais perto do centro do Supergrupo elas estão, isto poderia indicar que as galáxias mais massivas seriam encontradas mais ao centro dos Supergrupos, em consonância com o que se sabe para os aglomerados de galáxias. Entretanto, dado a incerteza, este resultado é inconclusivo e, portanto, um estudo mais aprofundado (com mais Supergrupos e/ou com dados espectroscópicos) e necessário para confirmar se, de fato, esta relação existe para

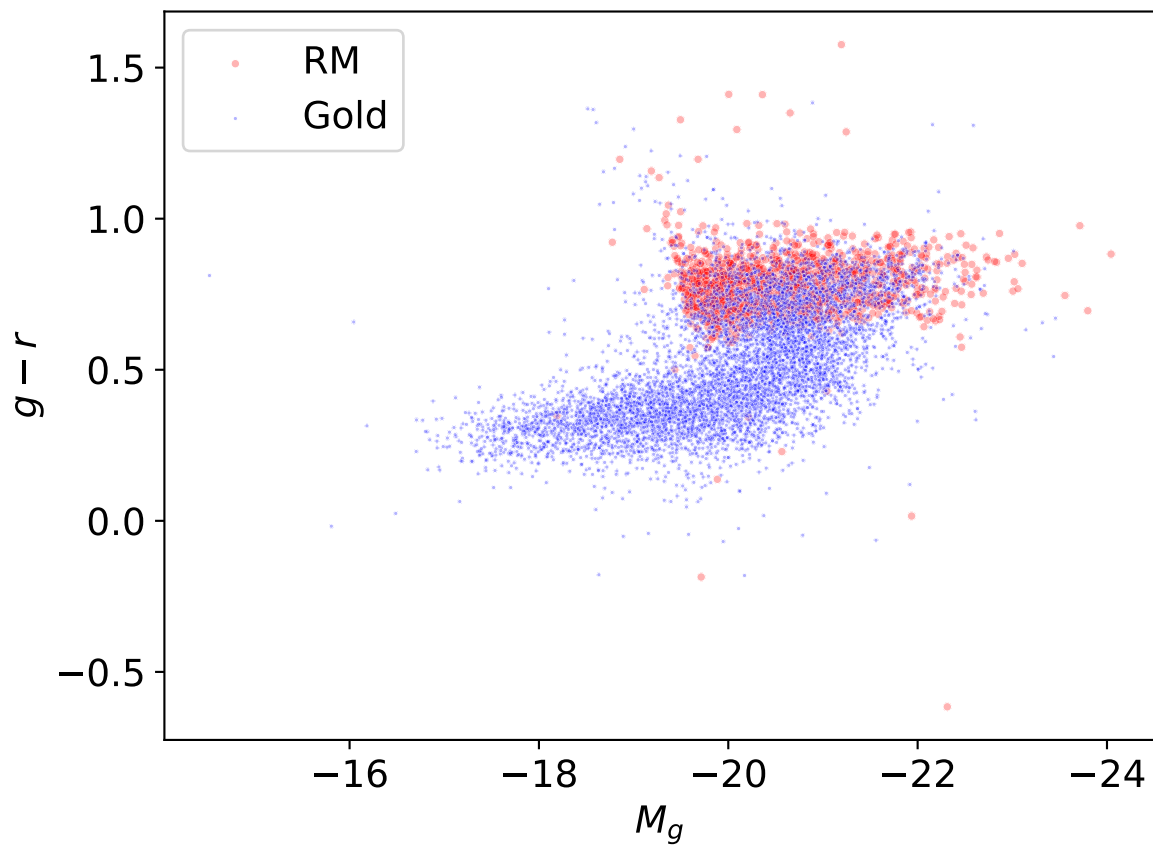


Figura 4.17: Diagrama cor-magnitude de M_g versus $g-r$ das galáxias do RM (vermelho) e as adicionadas com o *Gold* (azul) para nossos Supergrupos.

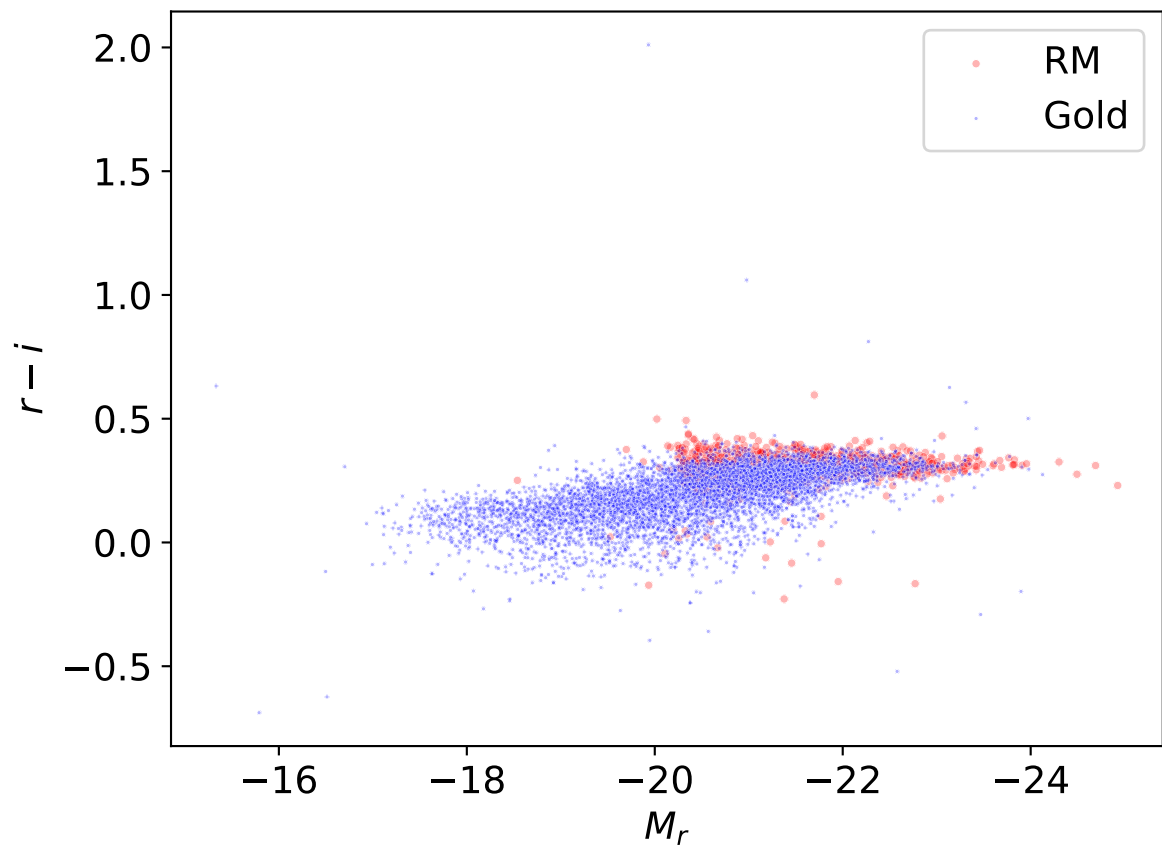


Figura 4.18: Diagrama cor-magnitude de M_r versus $r-i$ das galáxias do RM (vermelho) e as adicionadas com o *Gold* (azul) para nossos Supergrupos.

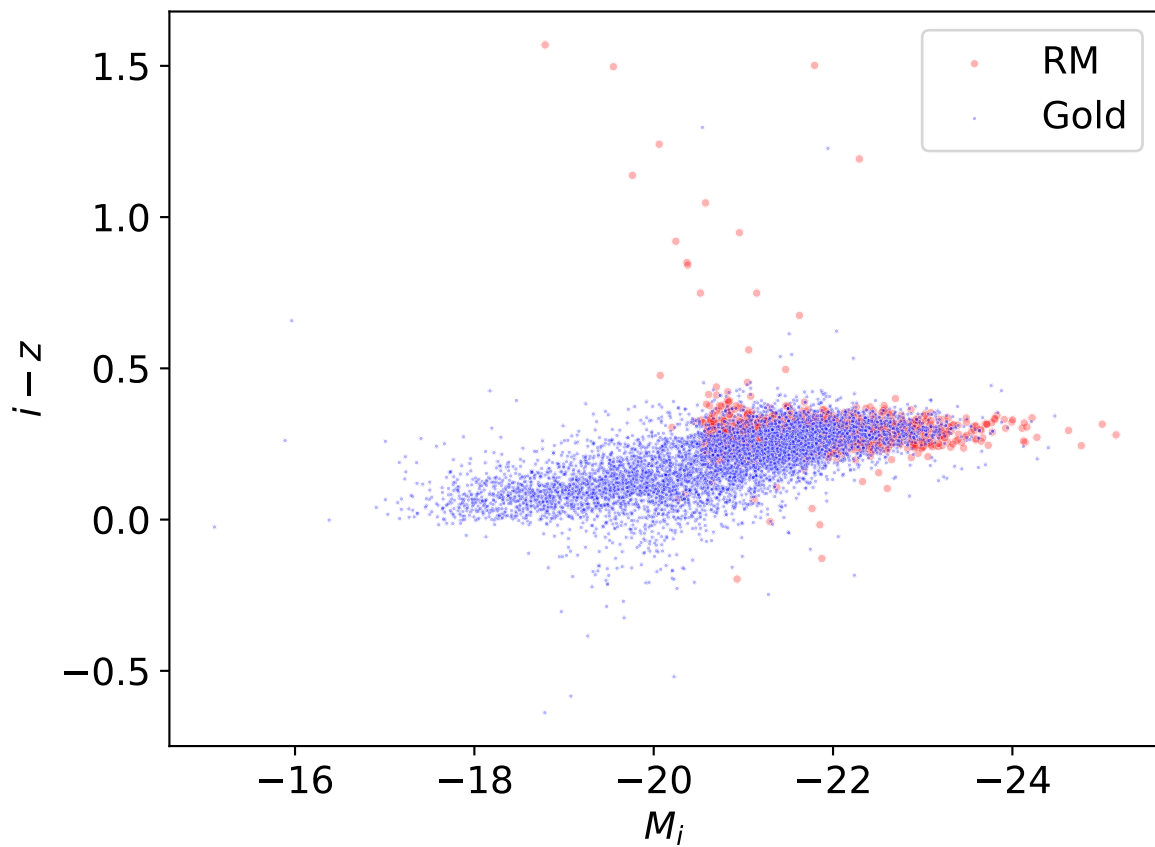


Figura 4.19: Diagrama cor-magnitude de M_i versus $i - z$ das galáxias do RM (vermelho) e as adicionadas com o *Gold* (azul) para nossos Supergrupos.

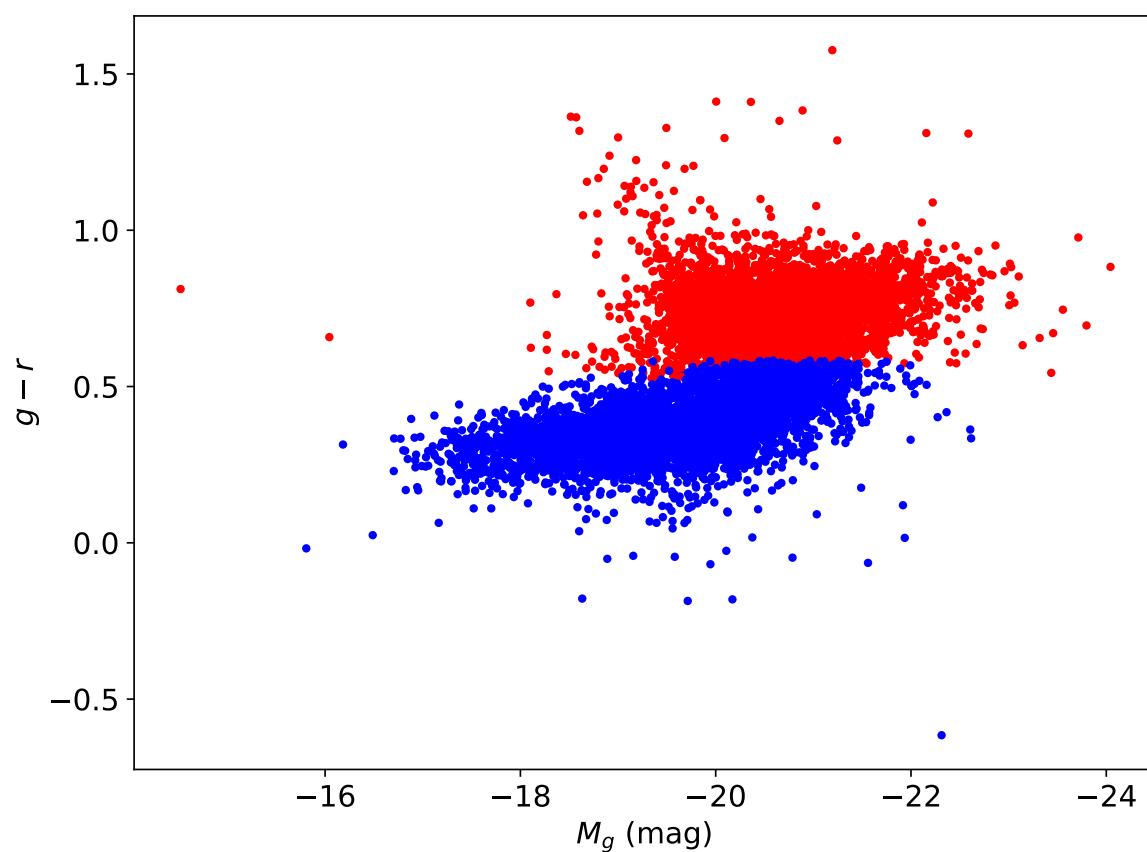


Figura 4.20: Diagrama cor-magnitude das galáxias dos Supergrupos (RM+Gold). Os pontos vermelhos representam as galáxias classificadas como vermelhas pelo GMM e os pontos azuis representam as galáxias classificadas como azuis.

Supergrupos.

Cabe destacar que este resultado pode estar atrelado a nossa definição de Supergrupo, visto que escolhemos o aglomerado mais rico como centro da estrutura neste trabalho. Como, naturalmente, espera-se que as galáxias mais brilhantes e massivas estejam em aglomerados mais massivos, isto tem um reflexo em neste resultado.

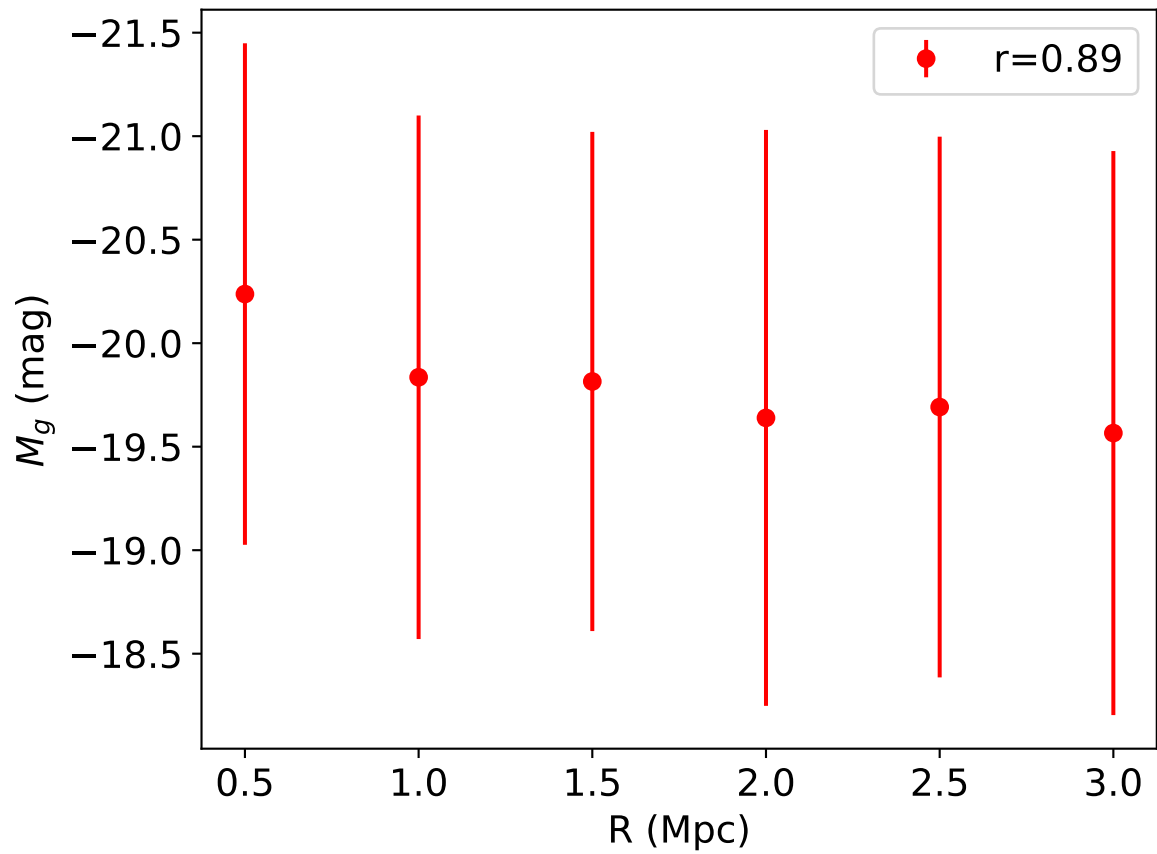


Figura 4.21: Gráfico da média da magnitude absoluta pelo raio para os Supergrupos encontrados. As barras de erro representam 1σ da distribuição. Observa-se que a magnitude aumenta conforme o raio, indicando que se encontra as galáxias mais luminosas (e, portanto, mais massivas) nas regiões mais centrais. O r é o valor do coeficiente de correlação de Pearson.

4.4 *Magnitude Gap*

Como dito na seção 3.6, o *magnitude gap* pode nos dar um vislumbre do estado dinâmico dos aglomerados membros do Supergrupos, indicando (ou não) possíveis interações e acreção de massa na história recente destes.

Nenhum dos aglomerados da nossa amostra tem m_{gap} maior que 2,5 (Figura 4.22). Isso poderia indicar, portanto, uma história recente de interação deles e também poderia ser indicio de que os aglomerados dentro dos Supergrupos poderia estar, de fato, interagindo entre si, acrescentando massa de estruturas em seus entornos.

Investigamos se o m_{gap} poderia ter alguma relação com a massa do aglomerado. Enquanto alguns Supergrupos apresentam uma fraca tendência de incremento do m_{gap} com a massa do aglomerado, outros não aparentam ter qualquer tendência (Figura 4.23). Assim, concluímos não haver uma tendência clara entre a massa do aglomerado e o m_{gap} . Este resultado vai ao encontro de trabalhos na literatura que também não encontram correlação entre o m_{gap} e a massa total do halo. (Farahi *et al.*, 2020; Trevisan e Mamon, 2017)

Farahi *et al.* (2020) encontraram uma forte correlação entre a massa da BCG e o m_{gap} (assim como a massa do gás e a massa estelar das galáxias satélites). Para investigar se isto de fato ocorre em nossos Supergrupos, olhamos a magnitude absoluta das BCGs dos aglomerados dos Supergrupos por seus respectivos m_{gap} (Figura 4.24).

De fato, se observa uma forte correlação ($r = -0,8$) entre a magnitude absoluta da BCG e o m_{gap} dos aglomerados. Desta forma, quanto mais brilhantes a BCG, maior será o m_{gap} do aglomerado. Este resultado estaria relacionado ao fato de que BCG em halos mais antigos teriam um tempo maior para se fundir com outras galáxias satélites, aumento suas massa e, portanto, sua luminosidade, ao passo que BCG em halos mais jovens seriam menos massivas e menos luminosas (Farahi *et al.*, 2020; Golden-Marx e Miller, 2018, 2019).

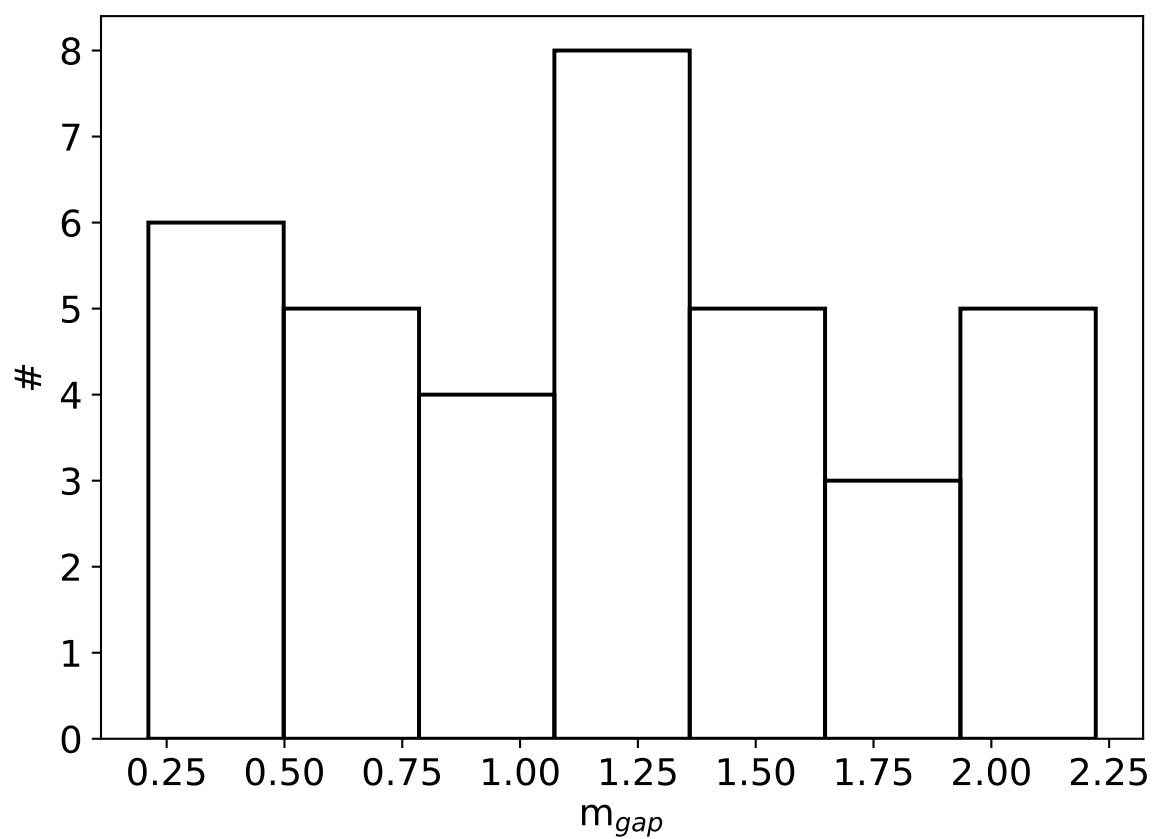


Figura 4.22: Histograma dos m_{gap} para os aglomerados membros dos Supergrupos. Nenhum dos aglomerados tem $m_{gap} \geq 2,5$.

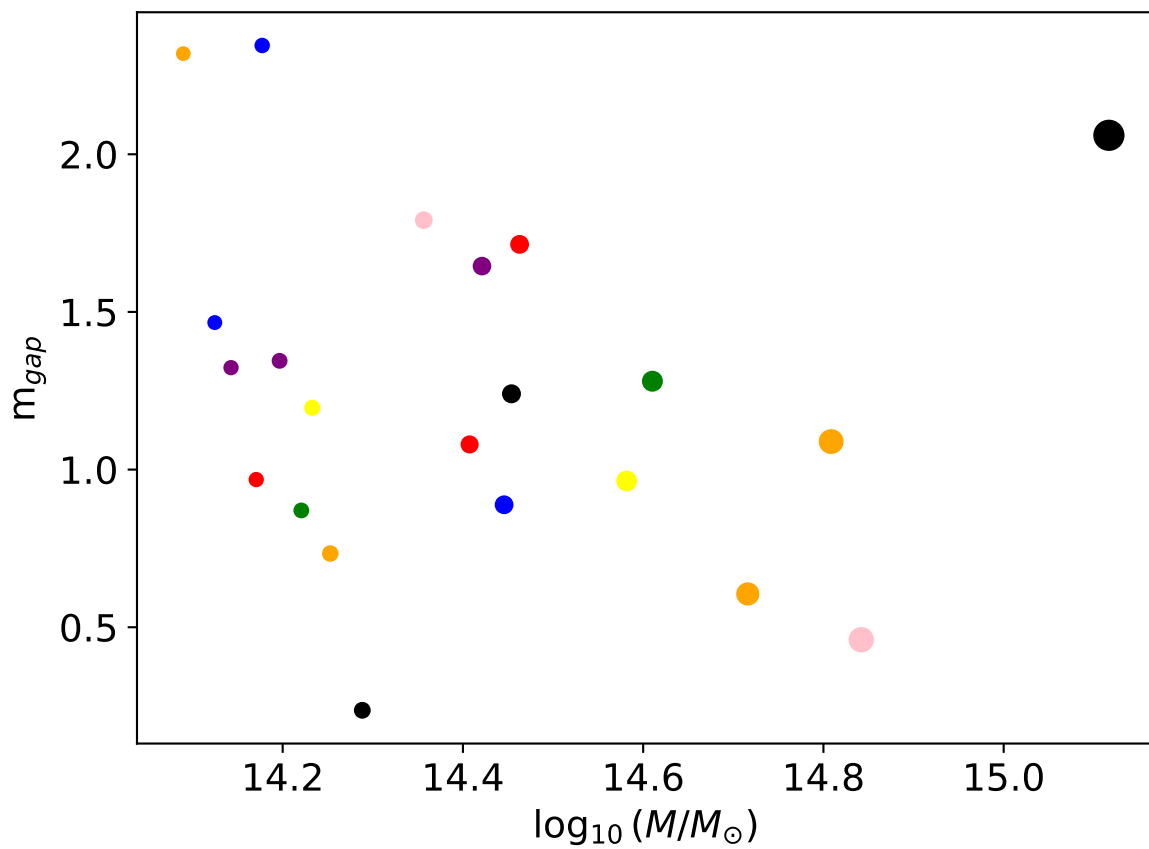


Figura 4.23: Gráfico da massa do aglomerado por seu m_{gap} . As cores representam o Supergrupos a que os aglomerados são membros e o tamanho do círculo representa a riqueza dos aglomerados.

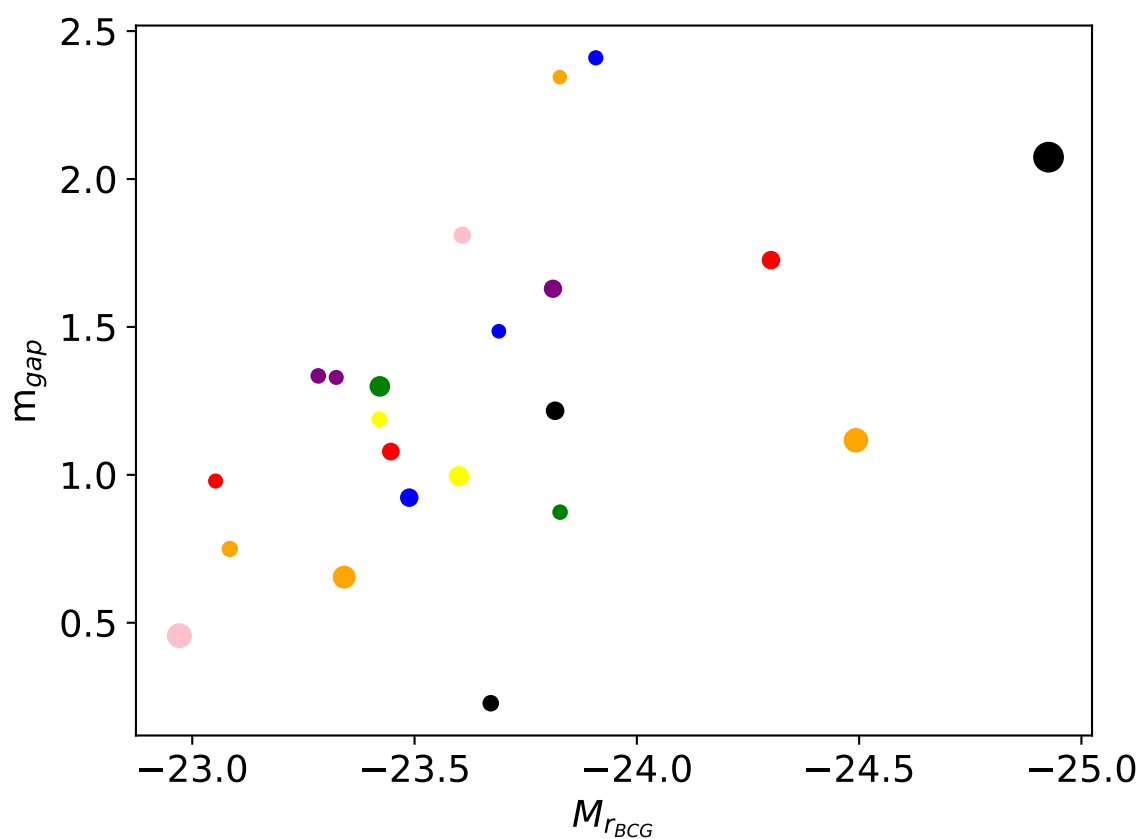


Figura 4.24: Gráfico da magnitude absoluta das BCGs na banda r pelo m_{gap} dos aglomerados pertencentes aos Supergrupos deste trabalho. Pontos com a mesma cor pertencem ao mesmo Supergrupo e seu tamanho representa a riqueza do aglomerado.

4.5 Estudo de populações de galáxias

Visto que as cores das populações podem estar atreladas a suas idades e taxas de formações estelares¹², investigar suas distribuições dentro do Supergrupo ajuda-nos a compreender quais características levam a evolução destas populações e como estas ocorrem. Assim, é interessante fazer a separação das populações de galáxias dentro dos Supergrupos para que se tenha um vislumbre de sua evolução.

Como discutido na seção 3.4, a ausência de dados na banda u para o DES e de detecção no UV, nos levou a buscar alternativas para fazer a separação de populações somente com a cor $g - r$. Assim, lançamos mão de utilizar um recurso de *machine learning* para fazer esta separação: o GMM.

Cabe ressaltar, que este método é utilizado na literatura tanto diretamente, quanto com adaptações ao método. Podemos citar aqui a separação de populações de galáxias nos aglomerados MACSJ0416.1-2403 e MACSJ1206.2-0847 (Olave-Rojas *et al.*, 2018), a separação da *red sequence* em 13 823 aglomerados usando uma versão modificada do algoritmo (Hao *et al.*, 2009). Assim como para classificar a *red sequence* e a *blue cloud* no campo COSMOS usando dados do DES (Black e Evrard, 2023).

Assim, separamos as populações em *red sequence* (RS) e *blue cloud* (BC). Então, calculamos a frações de RS e BC para cada um dos *bins* do raio, tanto em escala local (i.e., para os aglomerados membros) quanto em escala global (i.e., para os Supergrupos na totalidade). Como isso, visamos entender se há uma relação entre o raio e as frações para ambos os casos.

Para confirmar se, de fato, há correlação entre estes, usamos o coeficiente de correlação de Pearson (r) usando a biblioteca de Numpy (Harris *et al.*, 2020). Como o r de Pearson mede a correlação linear entre duas variáveis, podemos utilizá-lo para determinar se existe uma correlação entre as frações e o raio.

Para o caso local (Figura 4.25), encontramos uma fração de galáxias avermelhada maior nas regiões mais internas dos aglomerados. Entretanto, a fração de galáxias azuis é maior nas regiões mais externas do aglomerado ($R \sim 1R_{200}$), com esta relação se mantendo mais ou menos constante fora destes aglomerados.

Observa-se uma tendência semelhante para o caso global (Figura 4.26), onde a fração de galáxias vermelha é maior nas partes mais internas dos Supergrupos que nas partes mais externas, com a fração se invertendo em $R \sim 1,5$ Mpc. Esse comportamento poderia indicar que nossos Supergrupos são, de fato, aglomerados em formação.

Entretanto, este resultado poderia ser um viés por termos escolhido como centro o aglomerado mais rico. Assim, é necessário entender a influência dos aglomerados centrais

¹²Como discutido na seção 3.4, há uma degenerescência entre idade e metalicidade no espaço de cores. Desta forma, uma galáxia vermelha pode ser velha e/ou rica em metais. Não se pode separar os efeitos de cada propriedade somente com fotometria, mas a observação de uma população por inteiro pode nos dar um vislumbre da idade desta.

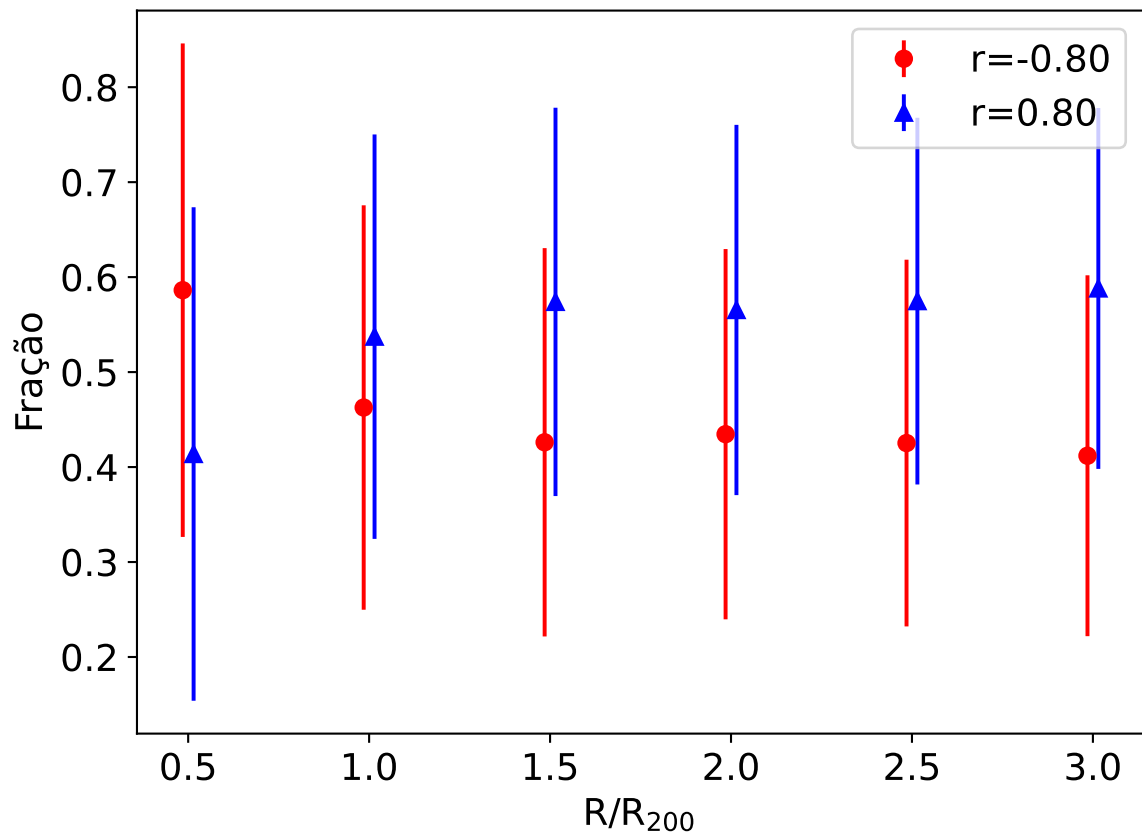


Figura 4.25: Fração média de população de galáxias com relação ao raio para todos os aglomerados membros dos Supergrupos. Observa-se que há uma forte correlação entre a fração de população vermelha (e também azul) e o raio. As barras de erro representam 1σ . O r é o valor do coeficiente de correlação de Pearson.

nesta relação.

Para entender o enviesamento e a influência dos aglomerados centrais nas frações, comparamos as frações médias nos aglomerados centrais com as frações médias dos seus satélites, onde definimos os aglomerados não-centrais como tal (Figura 4.27). De fato, observa-se que a fração de galáxias vermelhas é maior nas partes mais internas dos aglomerados centrais quando comparados aos satélites. Nos aglomerados centrais, a fração de vermelhas continua maior que a de azuis mesmo até $R \sim R_{200}$. Não obstante, a tendência local de maior fração vermelha no centro dos aglomerados satélites se mantém, mesmo que mais suave, em acordo com a literatura, como veremos à frente.

De volta ao caso global (Figura 4.26), temos uma fração mais elevada de galáxias vermelhas entre $R=1$ e $R=2$ quando comparada às frações em $R>2$. Isso poderia indicar a presença de estruturas filamentosares, assim como grupos menores que poderiam estar sendo acretados pelo Supergrupo.

Além disso, este resultado pode indicar que as galáxias são preprocessadas antes de entrar no aglomerado central, visto que temos uma fração de galáxias vermelhas maior que em raios maiores, mas em estrutura que ainda estariam fora dos aglomerados.

Em todos os casos, nossos resultados concordam com outros resultados na literatura que encontram que uma correlação entre a quantidade de galáxias vermelhas e o raio ao centro da estrutura — e, conseqüentemente, do potencial gravitacional - como Monroe *et al.* (2017) que verificou que galáxias massivas e vermelhas são encontradas em sua maior parte em raios menores a partir do centro de SG 1120-1202 ($z=0,37$ e $M = 5,3 \times 10^{14} M_{\odot}$), Olave-Rojas *et al.* (2018) que encontrou que a fração de galáxias vermelhas é maior em raios menores para dois aglomerados em $z \sim 0,4$, e Sengupta *et al.* (2022) também encontrou uma relação similar com a fração de galáxias vermelhas é maior no Supergrupo A1822 ($z=0,138$ e $M \sim 2 \times 10^4 M_{\odot}$) para $R < 1,4$ Mpc.

Como discutido na seção 1.3 (vide Figura 1.5 e discussão em Sengupta *et al.* 2022), Supergrupos devem apresentar um poço de potencial gravitacional menos profundo do que o de um aglomerado massivo. Para entender como a profundidade do poço de potencial afeta a evolução de galáxias dentro destas estruturas, dividimos nossos Supergrupos de acordo com sua massa mínima total (ou seja, em Supergrupos com massa maior que $10^{15} M_{\odot}$ ou menor que $10^{15} M_{\odot}$) e fizemos a fração para cada bin de raio em semelhança com o que se fez no caso global (Figura 4.28). Devido à incerteza na massa de RM650 e à diferença entre a massa deste e a dos outros Supergrupos com $M < 10^{15} M_{\odot}$ e por ter uma distribuição de λ semelhante a RM239 e RM803 (Figura 4.3), colocamos este entre os Supergrupos mais massivos (como visto na Figura 4.5 e na Tabela 4.1).

Observa-se que os Supergrupos mais massivos têm uma fração de galáxias vermelhas maior que os Supergrupos menos massivos para todos os raios (Figura 4.28). Mesmo que o raio seja parametrizado em função do R_{200} do aglomerado mais rico (Figura 4.29), qualitativamente temos curvas semelhantes para as frações e, igualmente, as frações de galáxias

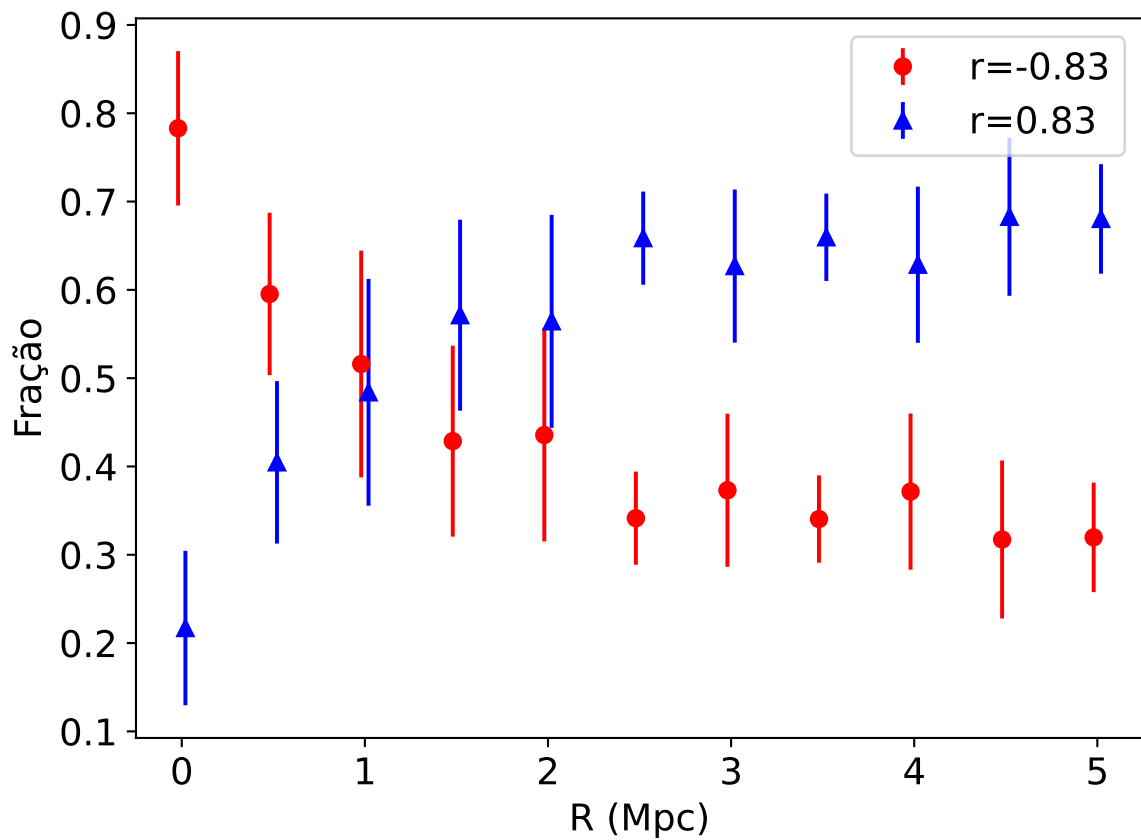


Figura 4.26: Fração média da população de galáxias com relação ao raio para todos os Supergrupos. Assim como no caso local, observa-se uma forte correlação entre a fração de população (tanto vermelha, quanto azul) e o raio. As barras de erro representam 1σ . O r é o valor do coeficiente de correlação de Pearson.

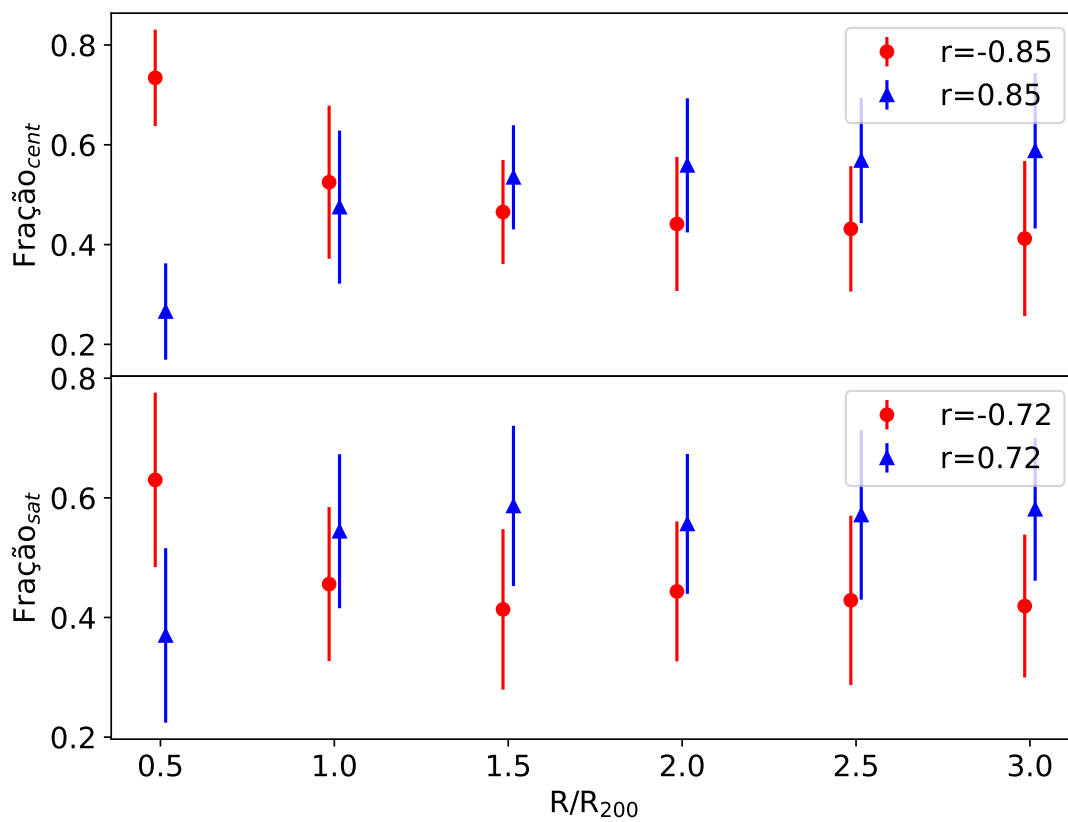


Figura 4.27: Gráfico das frações de população para os aglomerados centrais (acima) e para os satélites (abaixo). O r é o valor do coeficiente de correlação de Pearson.

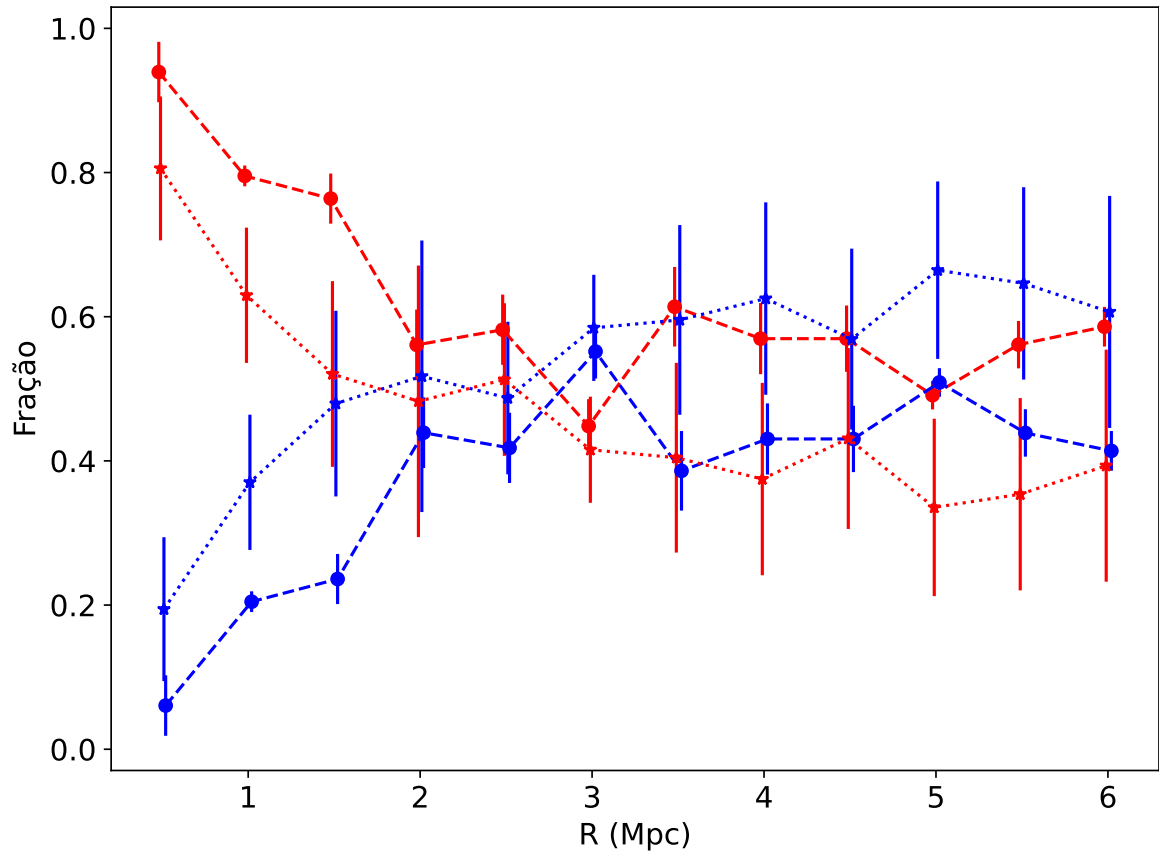


Figura 4.28: Gráfico das frações de galáxias vermelhas (em vermelho) e azuis (em azul) para os Supergrupos deste trabalho. Os Supergrupos foram agrupados segundo suas massas mínimas totais, com os Supergrupos com massa maior ou igual a $10^{15} M_{\odot}$ representados pelos círculos e linhas tracejadas e os Supergrupos com massa menor que $10^{15} M_{\odot}$ representados pelas estrelas e linhas pontilhadas. A binagem em raio é semelhante ao caso global.

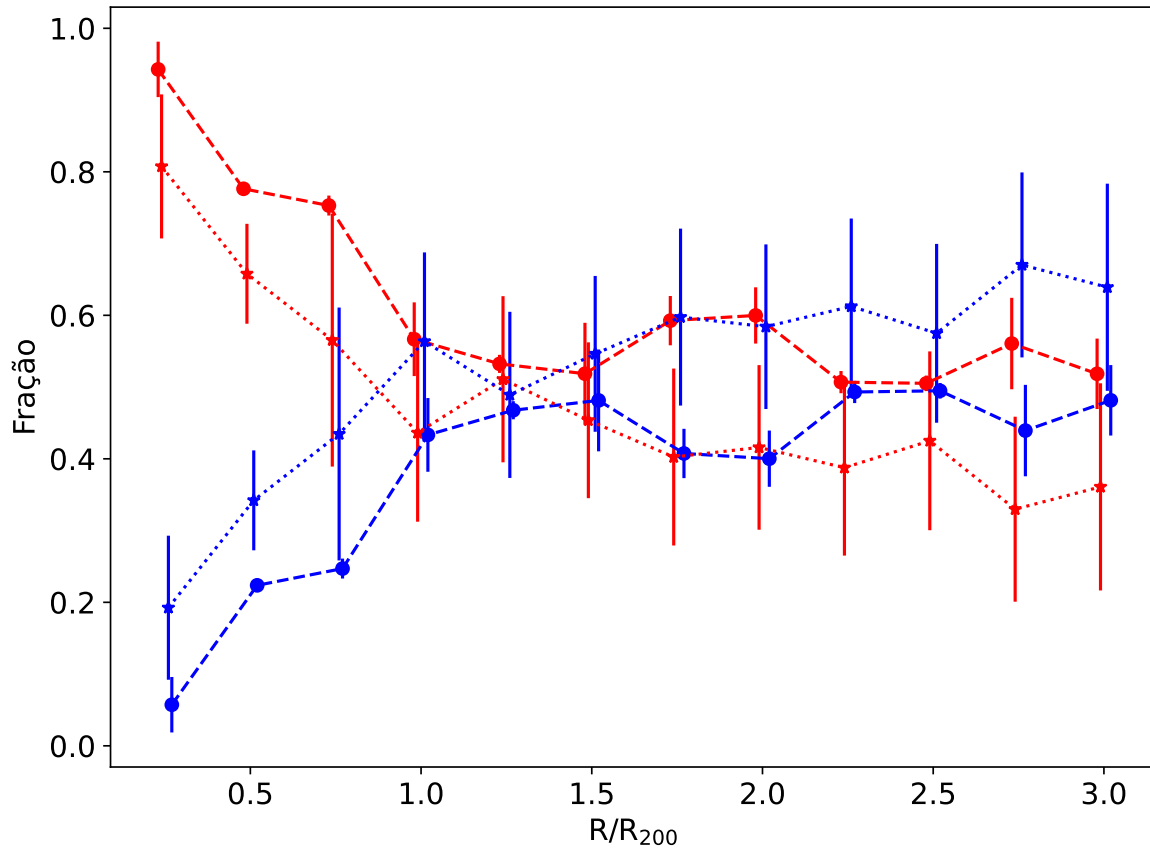


Figura 4.29: Gráfico das frações de galáxias vermelhas (em vermelho) e azuis (em azul) para os Supergrupos deste trabalho. Os Supergrupos foram agrupados segundo suas massas mínimas totais, com os Supergrupos com massa maior ou igual a $10^{15} M_{\odot}$ representados pelos círculos e linhas tracejadas e os Supergrupos com massa menor que $10^{15} M_{\odot}$ representados pelas estrelas e linhas pontilhadas. O raio foi parametrizado com o R_{200} do aglomerado mais rico do Supergrupo.

vermelhas nos Supergrupos mais massivos é maior que as frações de galáxias vermelhas nos Supergrupos menos massivos para todo o raio. Isso mostraria que a profundidade do poço de potencial e, por conseguinte, o ambiente afeta a evolução destas galáxias. Cabe destacar, ainda, que nas regiões internas do Supergrupos mais massivos, a fração média de galáxias vermelhas é aproximadamente 93% para $R < 0,5$ Mpc ($\approx 94\%$ para $R < 0.25 R_{200}$).

Isso poderia indicar que a formação estelar nas regiões centrais dos Supergrupos mais massivos foi muito mais intensa, mas hoje é muito baixa, e as galáxias que aí se encontram, independentemente da massa, já teriam passado por *quenching*.

Também, o fato de fração de galáxias vermelhas ser maior nos Supergrupos massivos, poderia indicar que há pré-processamento também, visto que estes tem maior chance de possuírem estrutura filamentosares em seu entorno, considerando que seu potencial também é maior. Cabe destacar que nas estruturas mais massivas, a fração de vermelhas é sempre maior que 50% em todo o raio.

De todo modo, parece haver uma correlação entre a fração de galáxias vermelhas e a massa da estrutura — e, conseqüentemente, o potencial gravitacional do halo. Assim, para além do raio ao centro do potencial (como discutido acima), da densidade numérica de galáxias (Sengupta *et al.*, 2022) e da massa da própria galáxia (Kuchner *et al.*, 2017), a fração de galáxias vermelhas também seria função do tamanho do potencial gravitacional, e, portanto, do tamanho do halo de matéria escura da estrutura.

Este resultado é diferente do que foi obtido por Balogh e McGee (2010) que não encontrou uma tendência da massa do halo com a fração de galáxias passivas para grupos e aglomerados ($M > 10^{13} h^{-1} M_{\odot}$) do SDSS até $z=0,1$. No entanto, *mergers* entre aglomerados poderia causar variações na SFR dentro destes (Mulroy *et al.*, 2017). Aglomerados mais massivos poderiam ter passado por uma maior quantidade de *mergers* comparado a aglomerados menos massivos, o que poderia explicar a diferença encontrada neste trabalho.

Entretanto, para entender a razão deste comportamento, são necessários mais dados fotométricos (por exemplo, usando a banda u) assim como dados espectroscópicos. Este último possibilitaria entender exatamente o que estaria ocorrendo nas galáxias dos Supergrupos, já que permite calcular indicadores tais como o índice D_{4000} e a SFR para elas.

Capítulo 5

Conclusões

Este trabalho visa a investigação da evolução de galáxias em Supergrupos de diferentes tamanhos identificados no catálogo de aglomerados *RedMaPPer Y3* do DES.

Para a identificação de Supergrupos, buscamos por sobredensidades no catálogo de aglomerados *RedMaPPer Y3* em bins de 0,1 de redshift e em pixels de $(5\text{cMpc})^2$ no céu. Assim, encontramos 8 possíveis Supergrupos que validamos visualmente.

Estes Supergrupos estão distribuídos por uma faixa de redshift fotométrico entre 0,1 e 0,4. Com massa mínima total, a soma da massa dos aglomerados membros do Supergrupo, que vai de $0,5 \times 10^{15} M_{\odot}$ a $1,8 \times 10^{15} M_{\odot}$. Como referência, os Supergrupos formariam estruturas com massas entre a massa do aglomerado de Virgem e cerca de 1,5 vezes a massa de Coma.

Destacamos que os oito Supergrupos são bons candidatos a serem de fato estruturas colapsantes. Também se destaca que um dos Supergrupos mais distantes (RM6695) poderia ser parte de outro Supergrupo desta lista (RM803), ou de um filamento maior conectando ambos. Um estudo com dados espectroscópicos é necessário para confirmar de fato a condição das oito estruturas como Supergrupos.

Na ausência de espectroscopia, analisamos o *magnitude gap* (m_{gap}) dos aglomerados, uma vez que ele é um indicador do seu estado dinâmico, ou de outra forma, de sua idade, uma vez que se espera que a BCG fique mais brilhante com o tempo, à medida que absorve mais satélites, aumentando o m_{gap} . Todos os aglomerados membros têm m_{gap} menor que 2,5 (valores maiores ou iguais a 2,5 indicam que o aglomerado possa estar relaxado). Isto poderia ser um indício, nessa faixa de baixo *redshift*, de que os aglomerados realmente ainda crescem massa, ou são relativamente jovens, e poderiam estar em processo de interação com o meio em seu entorno e, dessa forma, com os aglomerados em sua vizinhança (isto é, no mesmo Supergrupo). Cabe reforçar que essa é uma evidência indireta que não substitui a espectroscopia, fora do escopo desse trabalho.

No estudo das frações de galáxias vermelhas e azuis, observa-se uma (anti-)correlação entre galáxias (vermelhas) azuis e o raio tanto para os aglomerados, quanto para os Supergrupos. Este resultado está em concordância com outros resultados na literatura -

como no superaglomerado A2142 ($z \approx 0,09$ e $M_{tot} \approx 2,3 \times 10^{15} M_{\odot}$) Einasto *et al.* (2018) onde as galáxias do aglomerado central têm população mais velha que nos grupos ao redor. Uma relação entre a fração de população de galáxias e o raio foi também encontrada para dois aglomerados em $z \sim 0,4$, com uma maior fração de galáxias (vermelhas) azuis em raios (menores) maiores (Olave-Rojas *et al.*, 2018). Semelhantemente, no Supergrupo A1822 ($z=0,138$ e $M \sim 2 \times 10^4 M_{\odot}$), há uma maior fração de galáxias vermelhas em regiões mais centrais (Sengupta *et al.*, 2022).

Para além de encontrar um resultado similar a estes estudos, nosso trabalho expandiu a análise para 8 Supergrupos em uma expressiva faixa de *redshifts* e massas. Assim, conseguimos aplicar a estatística para obter resultado e conseguimos responder se algumas destas características e relações são particulares de alguns Supergrupos ou se elas são comuns a estas estruturas.

Observa-se uma fração maior de galáxias vermelhas nos aglomerados centrais que nos satélites, os aglomerados centrais são mais ricos (e mais massivos) que os satélites. Isto poderia ser indício de que a massa da estrutura também tem influência no *quenching* da formação estelar em galáxias dentro do Supergrupo.

O mesmo é observado quando separamos os Supergrupos pela massa mínima total (a soma da massa de todos os aglomerados dentro do Supergrupo). Os Supergrupos mais massivos têm frações de galáxias vermelhas maiores ao longo de todo o raio projetado em comparação aos Supergrupos menos massivos. Isso indicaria que o pré-processamento pode ter um papel importante na formação da sequência vermelha em aglomerado, visto que temos uma fração de galáxias vermelhas em estruturas mais massivas e com maiores chances de ter estruturas filamentosas em seu entorno.

Para o futuro, espera-se investigar mais a fundo a evolução de galáxias nestes Supergrupos. Um primeiro passo seria o cruzamento com um levantamento com profundidade semelhante ao DES com dados na banda u para um estudo da população em cores incluindo esta banda.

Outro passo seria o cruzamento com levantamento no infravermelho próximo (NIR) e médio (MIR), tal como o UNWISE, para que se possa estudar as galáxias com mais detalhes fazendo um ajuste com o SED. Com a complementação dos dados do DES com a banda u e bandas do NIR e MIR, poderíamos fazer SEDs com uma boa precisão para o estudo das estruturas e explorar o “vale verde” de galáxias.

Seria importante também pedir tempo nos telescópios SOAR e/ou Gemini, dependendo da amostra, para investigar alguns dos Supergrupos. Obter o espectro de galáxias permitiria calcular a taxa de formação estelar (SFR), obter a massa das galáxias para compreender com esta afeta a SFR, calcular a massa da estrutura como um todo (incluindo filamentos), e remover possíveis galáxias contaminantes do campo que foram incluídas na amostra, refinando a análise.

Durante o curso dessa análise, reparamos que boa parte dos estudos da literatura focam

em poucos objetos bastante conhecidos e próximos. Nesse estudo, ficou clara a necessidade de se melhorar o entendimento desse tipo de estrutura no universo, seja com fotometria ou espectroscopia. A amostra do DES nos permitiu contribuir, também, com uma lista de candidatos a Supergrupos e dar um pontapé inicial de um estudo mais completo. Uma análise mais profunda do *RedMaPPer* com os dados dos 6 anos de observações do DES é um passo interessante no futuro próximo, além de usar dados de levantamentos como o LSST e Euclid, que irão levar a profundidade e precisão de definição de estruturas a um novo patamar.

Referências Bibliográficas

- Abbott, T. M. C., Abdalla, F. B., Allam, S., et al., 2018, “The Dark Energy Survey: Data Release 1”, *Astrophys. J. Suppl.*, 239(2):18. doi: 10.3847/1538-4365/aae9f0.
- Abbott, T. M. C., Adamów, M., Aguena, M., et al., 2021, “The Dark Energy Survey Data Release 2”, *Astrophys. J. Suppl.*, 255(2):20. doi: 10.3847/1538-4365/ac00b3.
- Abell, G. O., 1958, “The Distribution of Rich Clusters of Galaxies.” *Astrophys. J. Suppl.*, v. 3 (maio), pp. 211. doi: 10.1086/190036.
- Abell, G. O., Corwin, Harold G., J., Olowin, R. P., 1989, “A Catalog of Rich Clusters of Galaxies”, *Astrophys. J. Suppl.*, v. 70 (maio), pp. 1. doi: 10.1086/191333.
- Andreon, S., Hurn, M. A., 2010, “The scaling relation between richness and mass of galaxy clusters: a Bayesian approach”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 404, n. 4 (jun.), pp. 1922–1937. doi: 10.1111/j.1365-2966.2010.16406.x.
- Astropy Collaboration, Robitaille, T. P., Tollerud, E. J., et al., 2013, “Astropy: A community Python package for astronomy”, *Astron. Astrophys.*, 558:A33. doi: 10.1051/0004-6361/201322068.
- Astropy Collaboration, Price-Whelan, A. M., Sipőcz, B. M., et al., 2018, “The Astropy Project: Building an Open-science Project and Status of the v2.0 Core Package”, *Astron. J.*, 156(3):123. doi: 10.3847/1538-3881/aabc4f.
- Astropy Collaboration, Price-Whelan, A. M., Lim, P. L., et al., 2022, “The Astropy Project: Sustaining and Growing a Community-oriented Open-source Project and the Latest Major Release (v5.0) of the Core Package”, *Astrophys. J.*, 935(2):167. doi: 10.3847/1538-4357/ac7c74.
- Bag, S., Liivamägi, L. J., Einasto, M., 2023, “The shape distribution of superclusters in SDSS DR12”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 521, n. 3 (maio), pp. 4712–4730. doi: 10.1093/mnras/stad811.
- Balogh, M. L., McGee, S. L., 2010, “Implications of the remarkable homogeneity of galaxy groups and clusters”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 402, n. 1 (fev.), pp. L59–L63. doi: 10.1111/j.1745-3933.2009.00800.x.

- Bell, E. F., de Jong, R. S., 2001, “Stellar Mass-to-Light Ratios and the Tully-Fisher Relation”, *Astrophys. J.*, v. 550, n. 1 (mar.), pp. 212–229. doi: 10.1086/319728.
- Bertin, E., Arnouts, S., 1996, “SExtractor: Software for source extraction.” *Astron. Astrophys. Suppl.*, v. 117 (jun.), pp. 393–404. doi: 10.1051/aas:1996164.
- Birzan, L., Rafferty, D. A., Brüggén, M., et al., 2017, “A study of high-redshift AGN feedback in SZ cluster samples”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 471, n. 2 (out.), pp. 1766–1787. doi: 10.1093/mnras/stx1505.
- Biviano, A., 2000, “From Messier to Abell: 200 Years of Science with Galaxy Clusters”. In: Durret, F., Gerbal, D. (Eds.), *Constructing the Universe with Clusters of Galaxies*, p. 1, jan. doi: 10.48550/arXiv.astro-ph/0010409.
- Black, W. K., Evrard, A., 2023, “Cosmic Dragons: Galactic evolution in the COSMOS field”, *arXiv e-prints*, art. arXiv:2310.09374. doi: 10.48550/arXiv.2310.09374.
- Blanton, M. R., Roweis, S., 2007, “K-Corrections and Filter Transformations in the Ultraviolet, Optical, and Near-Infrared”, *Astron. J.*, v. 133, n. 2 (fev.), pp. 734–754. doi: 10.1086/510127.
- Blanton, M. R., Dalcanton, J., Eisenstein, D., et al., 2001, “The Luminosity Function of Galaxies in SDSS Commissioning Data”, *Astron. J.*, v. 121, n. 5 (maio), pp. 2358–2380. doi: 10.1086/320405.
- Blanton, M. R., Hogg, D. W., Bahcall, N. A., et al., 2003, “The Broadband Optical Properties of Galaxies with Redshifts $0.02 < z < 0.22$ ”, *Astrophys. J.*, v. 594, n. 1 (set.), pp. 186–207. doi: 10.1086/375528.
- Bouy, H., Bertin, E., Moraux, E., et al., 2013, “Dynamical analysis of nearby clusters. Automated astrometry from the ground: precision proper motions over a wide field”, *Astron. Astrophys.*, 554:A101. doi: 10.1051/0004-6361/201220748.
- Bower, R. G., Lucey, J. R., Ellis, R. S., 1992a, “Precision photometry of early-type galaxies in the Coma and Virgo clusters : a test of the universality of the colour-magnitude relation - II. Analysis.” *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 254 (fev.), pp. 601. doi: 10.1093/mnras/254.4.601.
- Bower, R. G., Balogh, M. L., 2004, “The Difference Between Clusters and Groups: A Journey from Cluster Cores to Their Outskirts and Beyond”. In: Mulchaey, J. S., Dressler, A., Oemler, A. (Eds.), *Clusters of Galaxies: Probes of Cosmological Structure and Galaxy Evolution*, p. 325, jan. doi: 10.48550/arXiv.astro-ph/0306342.

- Bower, R. G., Lucey, J. R., Ellis, R. S., 1992b, “Precision photometry of early-type galaxies in the Coma and Virgo clusters : a test of the universality of the colour-magnitude relation - I. The data.” *Mon. Not, Roy. Astron. Soc.*, v. 254 (fev.), pp. 589–600. doi: 10.1093/mnras/254.4.589.
- Brough, S., Forbes, D. A., Kilborn, V. A., et al., 2006, “Eridanus - a supergroup in the local Universe?” *Mon. Not, Roy. Astron. Soc.*, v. 369, n. 3 (jul.), pp. 1351–1374. doi: 10.1111/j.1365-2966.2006.10387.x.
- Cortese, L., Gavazzi, G., Boselli, A., et al., 2006, “Witnessing galaxy preprocessing in the local Universe: the case of a star-bursting group falling into Abell 1367”, *Astron. Astrophys.*, v. 453, n. 3 (jul.), pp. 847–861. doi: 10.1051/0004-6361:20064873.
- Curtis, H. D., 1917, “Novae in the Spiral Nebulae and the Island Universe Theory”, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, v. 29, n. 171 (out.), pp. 206–207. doi: 10.1086/122632.
- Dalton, G. B., Maddox, S. J., Sutherland, W. J., et al., 1997, “The APM Galaxy Survey - V. Catalogues of galaxy clusters”, *Mon. Not, Roy. Astron. Soc.*, v. 289, n. 2 (ago.), pp. 263–284. doi: 10.1093/mnras/289.2.263.
- Dariush, A. A., Raychaudhury, S., Ponman, T. J., et al., 2010, “The mass assembly of galaxy groups and the evolution of the magnitude gap”, *Mon. Not, Roy. Astron. Soc.*, v. 405, n. 3 (jul.), pp. 1873–1887. doi: 10.1111/j.1365-2966.2010.16569.x.
- Davies, R. D., Pedlar, A., Mirabel, I. F., 1978, “A search for neutral hydrogen in primordial protoclusters at $z = 3.33$ and 4.92 .” *Mon. Not, Roy. Astron. Soc.*, v. 182 (mar.), pp. 727–733. doi: 10.1093/mnras/182.4.727.
- De Lucia, G., Weinmann, S., Poggianti, B. M., et al., 2012, “The environmental history of group and cluster galaxies in a Λ cold dark matter universe”, *Mon. Not, Roy. Astron. Soc.*, v. 423, n. 2 (jun.), pp. 1277–1292. doi: 10.1111/j.1365-2966.2012.20983.x.
- de Vaucouleurs, G. H., 1959, “Magnitudes and colors of galaxies in the UBV system”, *Lowell Observatory Bulletin*, v. 4, n. 97 (jan.), pp. 105–114.
- De Vicente, J., Sánchez, E., Sevilla-Noarbe, I., 2016, “DNF - Galaxy photometric redshift by Directional Neighbourhood Fitting”, *Mon. Not, Roy. Astron. Soc.*, v. 459, n. 3 (jul.), pp. 3078–3088. doi: 10.1093/mnras/stw857.
- Desai, S., Armstrong, R., Mohr, J. J., et al., 2012, “The Blanco Cosmology Survey: Data Acquisition, Processing, Calibration, Quality Diagnostics, and Data Release”, *Astrophys. J.*, 757(1):83. doi: 10.1088/0004-637X/757/1/83.

- Diehl, H. T., others, 2019, “The Dark Energy Survey and Operations: Year 6 – The Finale”, (10). doi: 10.2172/1596042.
- Dressler, A., 1980, “Galaxy morphology in rich clusters: implications for the formation and evolution of galaxies.” *Astrophys. J.*, v. 236 (mar.), pp. 351–365. doi: 10.1086/157753.
- Dressler, A., Oemler, Augustus, J., Poggianti, B. M., et al., 2013, “The IMACS Cluster Building Survey. II. Spectral Evolution of Galaxies in the Epoch of Cluster Assembly”, *Astrophys. J.*, 770(1):62. doi: 10.1088/0004-637X/770/1/62.
- Drlica-Wagner, A., Sevilla-Noarbe, I., Rykoff, E. S., et al., 2018, “Dark Energy Survey Year 1 Results: The Photometric Data Set for Cosmology”, *Astrophys. J. Suppl.*, 235(2):33. doi: 10.3847/1538-4365/aab4f5.
- Einasto, M., Saar, E., Liivamägi, L. J., et al., 2007, “The richest superclusters. I. Morphology”, *Astron. Astrophys.*, v. 476, n. 2 (dez.), pp. 697–711. doi: 10.1051/0004-6361:20078037.
- Einasto, M., Liivamägi, L. J., Tago, E., et al., 2011, “SDSS DR7 superclusters. Morphology”, *Astron. Astrophys.*, 532:A5. doi: 10.1051/0004-6361/201116564.
- Einasto, M., Lietzen, H., Tempel, E., et al., 2014, “SDSS superclusters: morphology and galaxy content”, *Astron. Astrophys.*, 562:A87. doi: 10.1051/0004-6361/201323111.
- Einasto, M., Gramann, M., Park, C., et al., 2018, “Supercluster A2142 and collapse in action: infalling and merging groups and galaxy transformations”, *Astron. Astrophys.*, 620:A149. doi: 10.1051/0004-6361/201833711.
- Einasto, M., Kipper, R., Tenjes, P., et al., 2021, “The Corona Borealis supercluster: connectivity, collapse, and evolution”, *Astron. Astrophys.*, 649:A51. doi: 10.1051/0004-6361/202040200.
- Ellison, S. L., Simard, L., Cowan, N. B., et al., 2009, “The mass-metallicity relation in galaxy clusters: the relative importance of cluster membership versus local environment”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 396, n. 3 (jul.), pp. 1257–1272. doi: 10.1111/j.1365-2966.2009.14817.x.
- Faber, S. M., Gallagher, J. S., 1979, “Masses and mass-to-light ratios of galaxies.” *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, v. 17 (jan.), pp. 135–187. doi: 10.1146/annurev.aa.17.090179.001031.

- Faber, S. M., Jackson, R. E., 1976, “Velocity dispersions and mass-to-light ratios for elliptical galaxies.” *Astrophys. J.*, v. 204 (mar.), pp. 668–683. doi: 10.1086/154215.
- Farahi, A., Ho, M., Trac, H., 2020, “Aging haloes: implications of the magnitude gap on conditional statistics of stellar and gas properties of massive haloes”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 493, n. 1 (mar.), pp. 1361–1374. doi: 10.1093/mnras/staa291.
- Flaugher, B., Diehl, H. T., Honscheid, K., et al., 2015, “The Dark Energy Camera”, *Astron. J.*, 150(5):150. doi: 10.1088/0004-6256/150/5/150.
- Gaia Collaboration, Brown, A. G. A., Vallenari, A., et al., 2018, “Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties”, *Astron. Astrophys.*, 616:A1. doi: 10.1051/0004-6361/201833051.
- Gardner, J. P., Mather, J. C., Clampin, M., et al., 2006, “The James Webb Space Telescope”, *Space Sci. Rev.*, v. 123, n. 4 (abr.), pp. 485–606. doi: 10.1007/s11214-006-8315-7.
- Gavazzi, G., Fumagalli, M., Cucciati, O., et al., 2010, “A snapshot on galaxy evolution occurring in the Great Wall: the role of Nurture at $z = 0$ ”, *Astron. Astrophys.*, 517:A73. doi: 10.1051/0004-6361/201014153.
- Golden-Marx, J. B., Miller, C. J., 2018, “The Impact of Environment on the Stellar Mass-Halo Mass Relation”, *Astrophys. J.*, 860(1):2. doi: 10.3847/1538-4357/aac2bd.
- Golden-Marx, J. B., Miller, C. J., 2019, “The Impact of Environment on Late-time Evolution of the Stellar Mass-Halo Mass Relation”, *Astrophys. J.*, 878(1):14. doi: 10.3847/1538-4357/ab1d55.
- Gonzalez, A. H., Tran, K.-V. H., Conbere, M. N., et al., 2005, “Galaxy Cluster Assembly at $z=0.37$ ”, *Astrophys. J. Lett.*, v. 624, n. 2 (maio), pp. L73–L76. doi: 10.1086/430518.
- Goto, T., Sekiguchi, M., Nichol, R. C., et al., 2002, “The Cut-and-Enhance Method: Selecting Clusters of Galaxies from the Sloan Digital Sky Survey Commissioning Data”, *Astron. J.*, v. 123, n. 4 (abr.), pp. 1807–1825. doi: 10.1086/339303.
- Hafez, I., 2010, *Abd al-Rahman al-Sufi and his book of the fixed stars: a journey of re-discovery*. Tese de Doutorado, James Cook University, Australia, out.
- Haines, C. P., Pereira, M. J., Smith, G. P., et al., 2015, “LoCuSS: The Slow Quenching of Star Formation in Cluster Galaxies and the Need for Pre-processing”, *Astrophys. J.*, 806(1):101. doi: 10.1088/0004-637X/806/1/101.

- Hansen, S. M., McKay, T. A., Wechsler, R. H., et al., 2005, “Measurement of Galaxy Cluster Sizes, Radial Profiles, and Luminosity Functions from SDSS Photometric Data”, *Astrophys. J.*, v. 633, n. 1 (nov.), pp. 122–137. doi: 10.1086/444554.
- Hao, J., Koester, B. P., McKay, T. A., et al., 2009, “Precision Measurements of the Cluster Red Sequence Using an Error-Corrected Gaussian Mixture Model”, *Astrophys. J.*, v. 702, n. 1 (set.), pp. 745–758. doi: 10.1088/0004-637X/702/1/745.
- Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., et al., 2020, “Array programming with NumPy”, *Nature*, v. 585, n. 7825 (set.), pp. 357–362. doi: 10.1038/s41586-020-2649-2.
- Herschel, W., 1785, “On the Construction of the Heavens.” *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series I*, v. 75 (jan.), pp. 213–266.
- Herschel, W., 1811, “Astronomical Observations Relating to the Construction of the Heavens, Arranged for the Purpose of a Critical Examination, the Result of Which Appears to Throw Some New Light upon the Organization of the Celestial Bodies”, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series I*, v. 101 (jan.), pp. 269–336.
- Hilton, M., Sifón, C., Naess, S., et al., 2021, “The Atacama Cosmology Telescope: A Catalog of >4000 Sunyaev-Zel’dovich Galaxy Clusters”, *Astrophys. J. Suppl.*, 253(1):3. doi: 10.3847/1538-4365/abd023.
- Ho, M., Ntampaka, M., Rau, M. M., et al., 2022, “The dynamical mass of the Coma cluster from deep learning”, *Nature Astronomy*, v. 6 (jun.), pp. 936–941. doi: 10.1038/s41550-022-01711-1.
- Hogg, D. W., Baldry, I. K., Blanton, M. R., et al., 2002, “The K correction”, *arXiv e-prints*, art. astro-ph/0210394. doi: 10.48550/arXiv.astro-ph/0210394.
- Holwerda, B. W., 2005, “Source Extractor for Dummies v5”, *arXiv e-prints*, art. astro-ph/0512139. doi: 10.48550/arXiv.astro-ph/0512139.
- Hubble, E. P., 1929, “A spiral nebula as a stellar system, Messier 31.” *Astrophys. J.*, v. 69 (mar.), pp. 103–158. doi: 10.1086/143167.
- Hubble, E., 1926, “No. 310. A spiral nebula as a stellar system. Messier 33.” *Contributions from the Mount Wilson Observatory / Carnegie Institution of Washington*, v. 310 (jan.), pp. 1–39.
- Hunter, J. D., 2007, “Matplotlib: A 2D graphics environment”, *Computing in Science & Engineering*, v. 9, n. 3, pp. 90–95. doi: 10.1109/MCSE.2007.55.

- Johnston, D. E., Sheldon, E. S., Wechsler, R. H., et al., 2007, “Cross-correlation Weak Lensing of SDSS galaxy Clusters II: Cluster Density Profiles and the Mass–Richness Relation”, *arXiv e-prints*, art. arXiv:0709.1159. doi: 10.48550/arXiv.0709.1159.
- Jones, K. G., 1968, “The Search for the Nebulae-I*”, *Journal of the British Astronomical Association*, v. 78 (maio), pp. 256–267.
- Kant, I., 1755, *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels*.
- Kashibadze, O. G., Karachentsev, I. D., Karachentseva, V. E., 2020, “Structure and kinematics of the Virgo cluster of galaxies”, *Astron. Astrophys.*, 635:A135. doi: 10.1051/0004-6361/201936172.
- Kautsch, S. J., Gonzalez, A. H., Soto, C. A., et al., 2008, “Forming Early-Type Galaxies in Groups Prior to Cluster Assembly”, *Astrophys. J. Lett.*, v. 688, n. 1 (nov.), pp. L5. doi: 10.1086/593978.
- Krause, M. O., Ribeiro, A. L. B., Lopes, P. A. A., 2013, “Distribution and evolution of galaxy groups in the Ursa Major supercluster”, *Astron. Astrophys.*, 551:A143. doi: 10.1051/0004-6361/201220071.
- Kron, R. G., 1980, “Photometry of a complete sample of faint galaxies.” *Astrophys. J. Suppl.*, v. 43 (jun.), pp. 305–325. doi: 10.1086/190669.
- Kuchner, U., Ziegler, B., Verdugo, M., et al., 2017, “The effects of the cluster environment on the galaxy mass-size relation in MACS J1206.2-0847”, *Astron. Astrophys.*, 604:A54. doi: 10.1051/0004-6361/201630252.
- Leavitt, H. S., Pickering, E. C., 1912, “Periods of 25 Variable Stars in the Small Magellanic Cloud.” *Harvard College Observatory Circular*, v. 173 (mar.), pp. 1–3.
- Lemaux, B. C., Tomczak, A. R., Lubin, L. M., et al., 2019, “Persistence of the colour-density relation and efficient environmental quenching to $z \sim 1.4$ ”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 490, n. 1 (nov.), pp. 1231–1254. doi: 10.1093/mnras/stz2661.
- Lopes, P. A. A., Ribeiro, A. L. B., Brambila, D., 2024, “The role of groups in galaxy evolution: compelling evidence of pre-processing out to the turnaround radius of clusters”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 527, n. 1 (jan.), pp. L19–L25. doi: 10.1093/mnrasl/sl4d134.
- McClintock, T., Varga, T. N., Gruen, D., et al., 2019, “Dark Energy Survey Year 1 results: weak lensing mass calibration of redMaPPer galaxy clusters”, *Mon.*

- Not, Roy. Astron. Soc., v. 482, n. 1 (jan.), pp. 1352–1378. doi: 10.1093/mnras/sty2711.
- McGee, S. L., Balogh, M. L., Bower, R. G., et al., 2009, “The accretion of galaxies into groups and clusters”, *Mon. Not, Roy. Astron. Soc.*, v. 400, n. 2 (dez.), pp. 937–950. doi: 10.1111/j.1365-2966.2009.15507.x.
- Mei, S., Holden, B. P., Blakeslee, J. P., et al., 2009, “Evolution of the Color-Magnitude Relation in Galaxy Clusters at $z \sim 1$ from the ACS Intermediate Redshift Cluster Survey”, *Astrophys. J.*, v. 690, n. 1 (jan.), pp. 42–68. doi: 10.1088/0004-637X/690/1/42.
- Mei, S., Hatch, N. A., Amodeo, S., et al., 2023, “Morphology-density relation, quenching, and mergers in CARLA clusters and protoclusters at $1.4 < z < 2.8$ ”, *Astron. Astrophys.*, 670:A58. doi: 10.1051/0004-6361/202243551.
- Melchior, P., 2021. “Skymapper: Mapping astronomical survey data on the sky”. *Astrophysics Source Code Library*, record ascl:2107.007, jul.
- Monroe, J. T., Tran, K.-V. H., Gonzalez, A. H., 2017, “SG1120-1202: Mass-quenching as Tracked by UV Emission in the Group Environment at $z=0.37$ ”, *Astrophys. J.*, 836(1):7. doi: 10.3847/1538-4357/836/1/7.
- Muldrew, S. I., Hatch, N. A., Cooke, E. A., 2018, “Galaxy evolution in protoclusters”, *Mon. Not, Roy. Astron. Soc.*, v. 473, n. 2 (jan.), pp. 2335–2347. doi: 10.1093/mnras/stx2454.
- Mulroy, S. L., McGee, S. L., Gillman, S., et al., 2017, “Galaxy cluster luminosities and colours, and their dependence on cluster mass and merger state”, *Mon. Not, Roy. Astron. Soc.*, v. 472, n. 3 (dez.), pp. 3246–3255. doi: 10.1093/mnras/stx2108.
- Narwal, T., Goto, T., Hashimoto, T., et al., 2020, “Discovery of a Supercluster Candidate at $z \sim 1.1$ ”, *Astrophys. J.*, 898(2):159. doi: 10.3847/1538-4357/ab9c28.
- Neilsen, Eric H., J., Annis, J. T., Diehl, H. T., et al., 2019, “Dark Energy Survey’s Observation Strategy, Tactics, and Exposure Scheduler”, *arXiv e-prints*, art. arXiv:1912.06254. doi: 10.48550/arXiv.1912.06254.
- Ogando, R., Maia, M., Pellegrini, P., et al., 2010, “Ages and metallicities of early-type galaxies”. In: Bruzual, G. R., Charlot, S. (Eds.), *Stellar Populations - Planning for the Next Decade*, v. 262, pp. 400–401, abr. doi: 10.1017/S1743921310003418.
- Olave-Rojas, D., Cerulo, P., Demarco, R., et al., 2018, “Galaxy pre-processing in substructures around $z \sim 0.4$ galaxy clusters”, *Mon. Not, Roy. Astron. Soc.*, v. 479, n. 2 (set.), pp. 2328–2350. doi: 10.1093/mnras/sty1669.

- Overzier, R. A., 2016, “The realm of the galaxy protoclusters. A review”, *Astron. Astrophys. Rev.*, 24(1):14. doi: 10.1007/s00159-016-0100-3.
- Owers, M. S., Baldry, I. K., Bauer, A. E., et al., 2013, “Galaxy and Mass Assembly (GAMA): Witnessing the Assembly of the Cluster ABELL 1882”, *Astrophys. J.*, 772(2):104. doi: 10.1088/0004-637X/772/2/104.
- Pak, M., Rey, S.-C., Lisker, T., et al., 2014, “The properties of early-type galaxies in the Ursa Major cluster”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 445, n. 1 (nov.), pp. 630–647. doi: 10.1093/mnras/stu1722.
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., et al., 2011, “Scikit-learn: Machine Learning in Python”, *Journal of Machine Learning Research*, v. 12 (out.), pp. 2825–2830. doi: 10.48550/arXiv.1201.0490.
- Peebles, P. J. E., 1970, “Structure of the Coma Cluster of Galaxies”, *Astron. J.*, v. 75 (fev.), pp. 13. doi: 10.1086/110933.
- Planck Collaboration, Aghanim, N., Akrami, Y., et al., 2020, “Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters”, *Astron. Astrophys.*, 641:A6. doi: 10.1051/0004-6361/201833910.
- Popescu, R., Pope, A., Lee, K.-S., et al., 2023, “Tracing the Total Stellar Mass and Star Formation of High-redshift Protoclusters”, *Astrophys. J.*, 958(1):12. doi: 10.3847/1538-4357/acee79.
- Postman, M., Franx, M., Cross, N. J. G., et al., 2005, “The Morphology-Density Relation in $z \sim 1$ Clusters”, *Astrophys. J.*, v. 623, n. 2 (abr.), pp. 721–741. doi: 10.1086/428881.
- Postman, M., Lubin, L. M., Gunn, J. E., et al., 1996, “The Palomar Distant Clusters Survey. I. The Cluster Catalog”, *Astron. J.*, v. 111 (fev.), pp. 615. doi: 10.1086/117811.
- Press, W. H., Schechter, P., 1974, “Formation of Galaxies and Clusters of Galaxies by Self-Similar Gravitational Condensation”, *Astrophys. J.*, v. 187 (fev.), pp. 425–438. doi: 10.1086/152650.
- Ritchey, G. W., 1917, “Novae in Spiral Nebulae”, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, v. 29, n. 171 (out.), pp. 210. doi: 10.1086/122638.
- Rosati, P., 2018, “The ancestors of most massive galaxy clusters”, *Nature Astronomy*, v. 2 (out.), pp. 944–945. doi: 10.1038/s41550-018-0618-6.

- Rozo, E., Rykoff, E. S., Bartlett, J. G., et al., 2015a, “redMaPPer - III. A detailed comparison of the Planck 2013 and SDSS DR8 redMaPPer cluster catalogues”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 450, n. 1 (jun.), pp. 592–605. doi: 10.1093/mnras/stv605.
- Rozo, E., Rykoff, E. S., Becker, M., et al., 2015b, “redMaPPer - IV. Photometric membership identification of red cluster galaxies with 1 per cent precision”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 453, n. 1 (out.), pp. 38–52. doi: 10.1093/mnras/stv1560.
- Rozo, E., Rykoff, E. S., Koester, B. P., et al., 2009, “Improvement of the Richness Estimates of maxBCG Clusters”, *Astrophys. J.*, v. 703, n. 1 (set.), pp. 601–613. doi: 10.1088/0004-637X/703/1/601.
- Rykoff, E. S., Koester, B. P., Rozo, E., et al., 2012, “Robust Optical Richness Estimation with Reduced Scatter”, *Astrophys. J.*, 746(2):178. doi: 10.1088/0004-637X/746/2/178.
- Rykoff, E. S., Rozo, E., Busha, M. T., et al., 2014, “redMaPPer. I. Algorithm and SDSS DR8 Catalog”, *Astrophys. J.*, 785(2):104. doi: 10.1088/0004-637X/785/2/104.
- Rykoff, E. S., Rozo, E., Hollowood, D., et al., 2016, “The RedMaPPer Galaxy Cluster Catalog From DES Science Verification Data”, *Astrophys. J. Suppl.*, 224(1):1. doi: 10.3847/0067-0049/224/1/1.
- Salim, S., 2014, “Green Valley Galaxies”, *Serbian Astronomical Journal*, v. 189 (dez.), pp. 1–14. doi: 10.2298/SAJ1489001S.
- Sarron, F., Adami, C., Durret, F., et al., 2019, “Pre-processing of galaxies in cosmic filaments around AMASCFI clusters in the CFHTLS”, *Astron. Astrophys.*, 632: A49. doi: 10.1051/0004-6361/201935394.
- Schechter, P., 1976, “An analytic expression for the luminosity function for galaxies.” *Astrophys. J.*, v. 203 (jan.), pp. 297–306. doi: 10.1086/154079.
- Sengupta, A., Keel, W. C., Morrison, G., et al., 2022, “The Preprocessing of Galaxies in the Early Stages of Cluster Formation in Abell 1882 at $z = 0.139$ ”, *Astrophys. J. Suppl.*, 258(2):32. doi: 10.3847/1538-4365/ac3761.
- Sevilla-Noarbe, I., Bechtol, K., Carrasco Kind, M., et al., 2021, “Dark Energy Survey Year 3 Results: Photometric Data Set for Cosmology”, *Astrophys. J. Suppl.*, 254(2):24. doi: 10.3847/1538-4365/abeb66.
- Shapley, H., 1917, “A Faint Nova in the Nebula of Andromeda”, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, v. 29, n. 171 (out.), pp. 213–217. doi: 10.1086/122669.

- Shapley, H., Curtis, H. D., 1921, “The Scale of the Universe”, *Bulletin of the National Research Council*, v. 2, n. 11 (maio), pp. 171–217.
- Shi, K., Lee, K.-S., Dey, A., et al., 2019, “A Census of Galaxy Constituents in a Coma Progenitor Observed at $z > 3$ ”, *Astrophys. J.*, 871(1):83. doi: 10.3847/1538-4357/aaf85d.
- Sifón, C., Menanteau, F., Hasselfield, M., et al., 2013, “The Atacama Cosmology Telescope: Dynamical Masses and Scaling Relations for a Sample of Massive Sunyaev-Zel’dovich Effect Selected Galaxy Clusters”, *Astrophys. J.*, 772(1):25. doi: 10.1088/0004-637X/772/1/25.
- Simet, M., McClintock, T., Mandelbaum, R., et al., 2017, “Weak lensing measurement of the mass-richness relation of SDSS redMaPPer clusters”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 466, n. 3 (abr.), pp. 3103–3118. doi: 10.1093/mnras/stw3250.
- Slipher, V. M., 1915, “Spectrographic Observations of Nebulae”, *Popular Astronomy*, v. 23 (jan.), pp. 21–24.
- Smit, M., Schrabback, T., Velandar, M., et al., 2015, “Mass distribution in an assembling super galaxy group at $z = 0.37$ ”, *Astron. Astrophys.*, 582:A82. doi: 10.1051/0004-6361/201525905.
- Spencer, H., 1870, “Where are the Nebulae ?” *Nature*, v. 1, n. 14 (fev.), pp. 359–360. doi: 10.1038/001359a0.
- Spergel, D., Gehrels, N., Baltay, C., et al., 2015, “Wide-Field Infrared Survey Telescope-Astrophysics Focused Telescope Assets WFIRST-AFTA 2015 Report”, *arXiv e-prints*, art. arXiv:1503.03757. doi: 10.48550/arXiv.1503.03757.
- Springel, V., White, S. D. M., Tormen, G., et al., 2001, “Populating a cluster of galaxies - I. Results at $z=0$ ”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 328, n. 3 (dez.), pp. 726–750. doi: 10.1046/j.1365-8711.2001.04912.x.
- Strateva, I., Ivezić, Ž., Knapp, G. R., et al., 2001, “Color Separation of Galaxy Types in the Sloan Digital Sky Survey Imaging Data”, *Astron. J.*, v. 122, n. 4 (out.), pp. 1861–1874. doi: 10.1086/323301.
- Sunyaev, R. A., Zeldovich, I. B., 1980, “Microwave background radiation as a probe of the contemporary structure and history of the universe”, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, v. 18 (jan.), pp. 537–560. doi: 10.1146/annurev.aa.18.090180.002541.
- Sunyaev, R. A., Zeldovich, Y. B., 1972, “Formation of Clusters of Galaxies; Protocluster Fragmentation and Intergalactic Gas Heating”, *Astron. Astrophys.*, v. 20 (ago.), pp. 189.

- Team, T. P. D., 2020. “pandas-dev/pandas: Pandas”. fev. Disponível em: <<https://doi.org/10.5281/zenodo.3509134>>.
- Tomczak, A. R., Lemaux, B. C., Lubin, L. M., et al., 2019, “Conditional quenching: a detailed look at the SFR-density relation at $z \sim 0.9$ from ORELSE”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 484, n. 4 (abr.), pp. 4695–4710. doi: 10.1093/mnras/stz342.
- Trevisan, M., Mamon, G. A., 2017, “A finer view of the conditional galaxy luminosity function and magnitude-gap statistics”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 471, n. 2 (out.), pp. 2022–2038. doi: 10.1093/mnras/stx1656.
- Valentinuzzi, T., Poggianti, B. M., Fasano, G., et al., 2011, “The red-sequence of 72 WINGS local galaxy clusters”, *Astron. Astrophys.*, 536:A34. doi: 10.1051/0004-6361/201117522.
- van Albada, G. B., 1960, “Formation and evolution of clusters of galaxies (Errata: 15 330)”, *Bull. Astron. Inst. Netherlands*, v. 15 (dez.), pp. 165.
- van Albada, G. B., 1961, “Evolution of clusters of galaxies under gravitational forces”, *Astron. J.*, v. 66 (dez.), pp. 590. doi: 10.1086/108469.
- Visvanathan, N., Sandage, A., 1977, “The color - absolute magnitude relation for E and S0 galaxies. I. Calibration and tests for universality using Virgo and eight other nearby clusters.” *Astrophys. J.*, v. 216 (ago.), pp. 214–226. doi: 10.1086/155464.
- Waskom, M. L., 2021, “seaborn: statistical data visualization”, *Journal of Open Source Software*, v. 6, n. 60, pp. 3021. doi: 10.21105/joss.03021. Disponível em: <<https://doi.org/10.21105/joss.03021>>.
- Wen, Z. L., Han, J. L., 2013, “Substructure and dynamical state of 2092 rich clusters of galaxies derived from photometric data”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 436, n. 1 (nov.), pp. 275–293. doi: 10.1093/mnras/stt1581.
- Wes McKinney, 2010, “Data Structures for Statistical Computing in Python”. In: Stéfan van der Walt, Jarrod Millman (Eds.), *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*, pp. 56 – 61. doi: 10.25080/Majora-92bf1922-00a.
- Wetzell, A. R., Tinker, J. L., Conroy, C., 2012, “Galaxy evolution in groups and clusters: star formation rates, red sequence fractions and the persistent bimodality”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 424, n. 1 (jul.), pp. 232–243. doi: 10.1111/j.1365-2966.2012.21188.x.

- White, S. D. M., Rees, M. J., 1978, “Core condensation in heavy halos: a two-stage theory for galaxy formation and clustering.” *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 183 (maio), pp. 341–358. doi: 10.1093/mnras/183.3.341.
- Wolfinger, K., Kilborn, V. A., Ryan-Weber, E. V., et al., 2016, “The Ursa Major Cluster Redefined as a ‘Supergroup’”, *Publ. Astron. Soc. Australia*, 33:e038. doi: 10.1017/pasa.2016.31.
- Worthey, G., Trager, S. C., Faber, S. M., 1995, “The Galaxian Age-Metallicity Relation”. In: Buzzoni, A., Renzini, A., Serrano, A. (Eds.), *Fresh Views of Elliptical Galaxies*, v. 86, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, p. 203, jan.
- Wright, T., 1750, *An original theory or new hypothesis of the universe : founded upon general phaenomena of the visible creation; and particularly the Via the laws of nature, and solving by mathematical principles : the Lactea ...compris'd in nine familiar letters from the author to his friendand : illustrated with upward of thirty graven and mezzotinto plates ...* doi: 10.3931/e-rara-28672.
- Wyder, T. K., Martin, D. C., Schiminovich, D., et al., 2007, “The UV-Optical Galaxy Color-Magnitude Diagram. I. Basic Properties”, *Astrophys. J. Suppl.*, v. 173, n. 2 (dez.), pp. 293–314. doi: 10.1086/521402.
- Zhang, Y., Jeltema, T., Hollowood, D. L., et al., 2019, “Dark Energy Surveyed Year 1 results: calibration of cluster mis-centring in the redMaPPer catalogues”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 487, n. 2 (ago.), pp. 2578–2593. doi: 10.1093/mnras/stz1361.
- Zwicky, F., 1933, “Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln”, *Helvetica Physica Acta*, v. 6 (jan.), pp. 110–127.
- Zwicky, F., 1937, “On the Masses of Nebulae and of Clusters of Nebulae”, *Astrophys. J.*, v. 86 (out.), pp. 217. doi: 10.1086/143864.

Apêndice A

Histogramas GMM para os Supergrupos

A seguir, serão apresentados os histogramas das cores com a classificação em azul e vermelho pelo algoritmo GMM para todos os Supergrupos encontrados (exceto RM3761 que já foi apresentando na Figura 3.5).

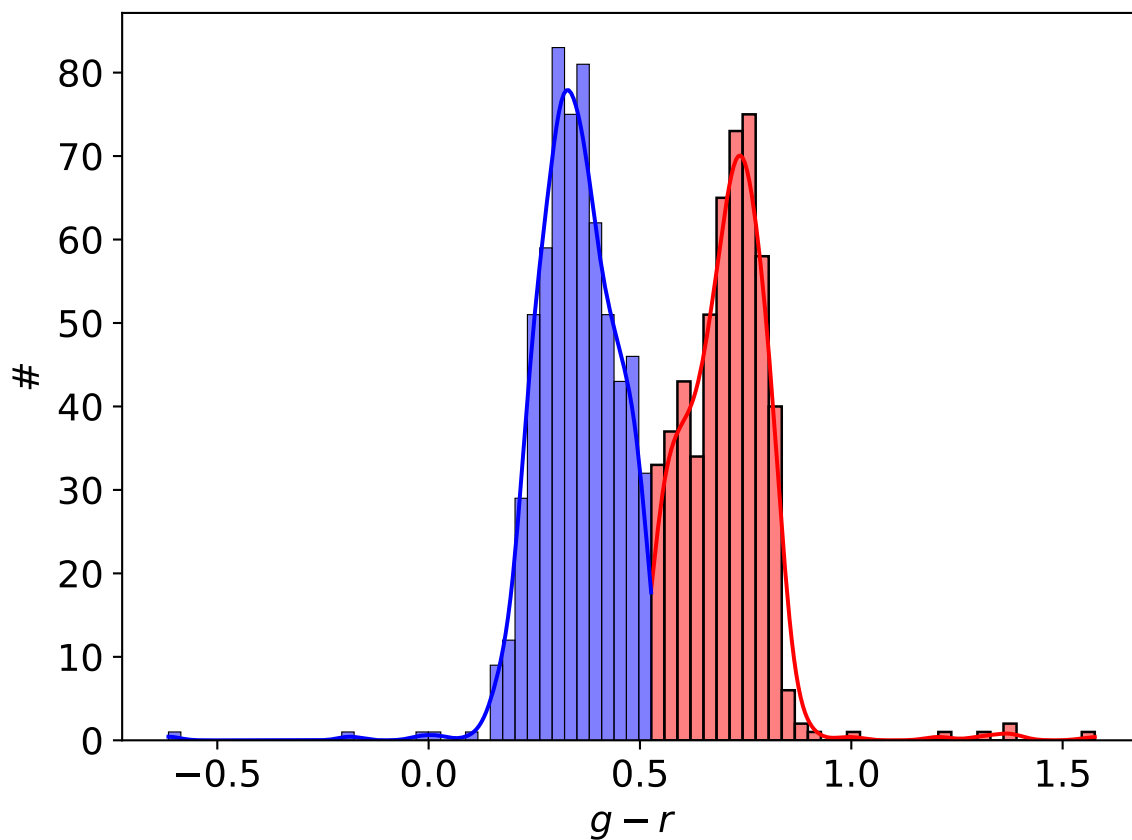


Figura A.1: Histograma mostrando a bimodalidade da cor e a devida classificação do GMM em população azul e população vermelha para o Supergrupo RM4806 com os respectivos KDE.

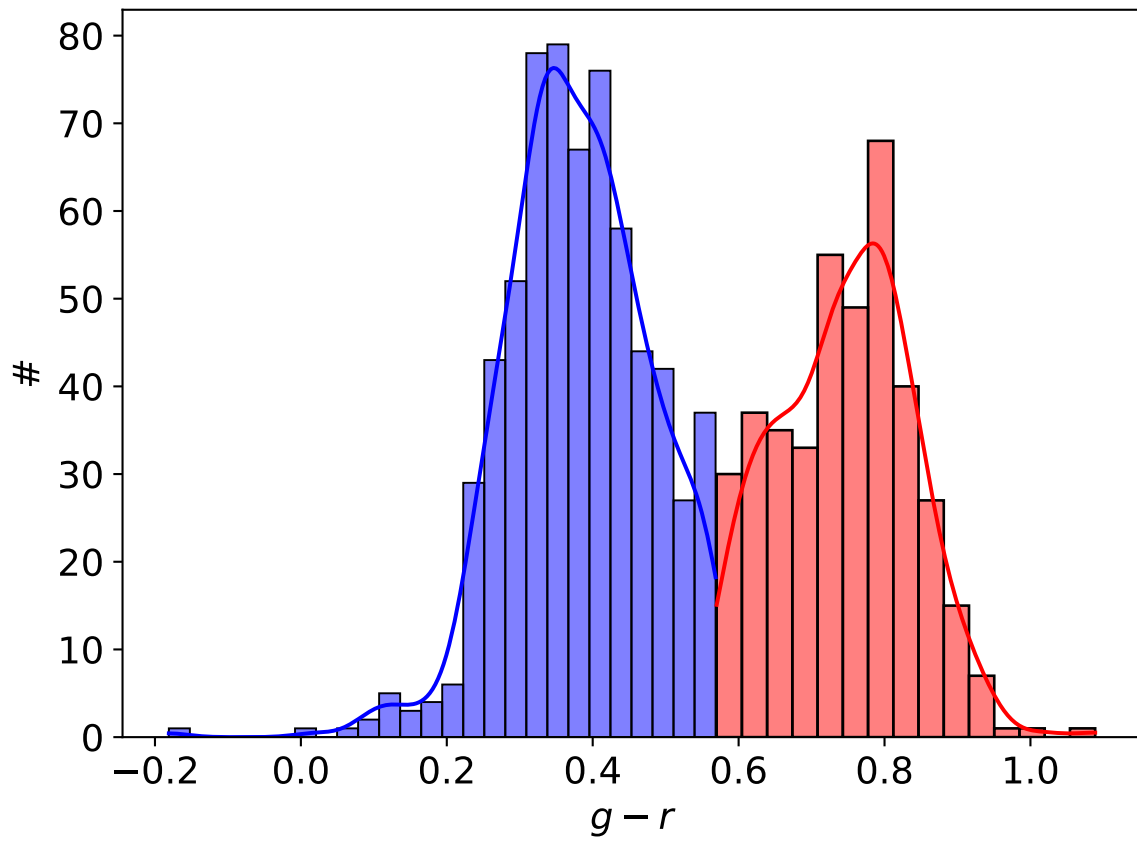


Figura A.2: Histograma mostrando a bimodalidade da cor e a devida classificação do GMM em população azul e população vermelha para o Supergrupo RM6737 com os respectivos KDE.

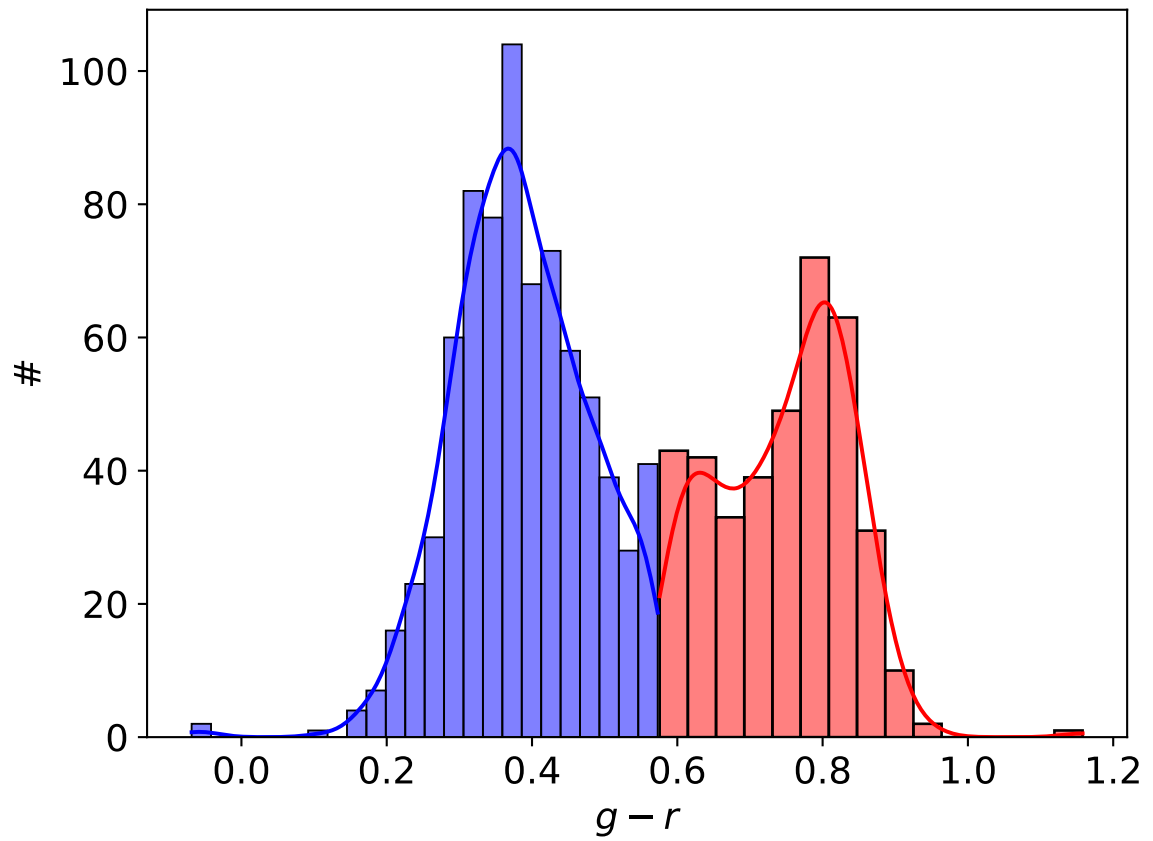


Figura A.3: Histograma mostrando a bimodalidade da cor e a devida classificação do GMM em população azul e população vermelha para o Supergrupo RM1791 com os respectivos KDE.

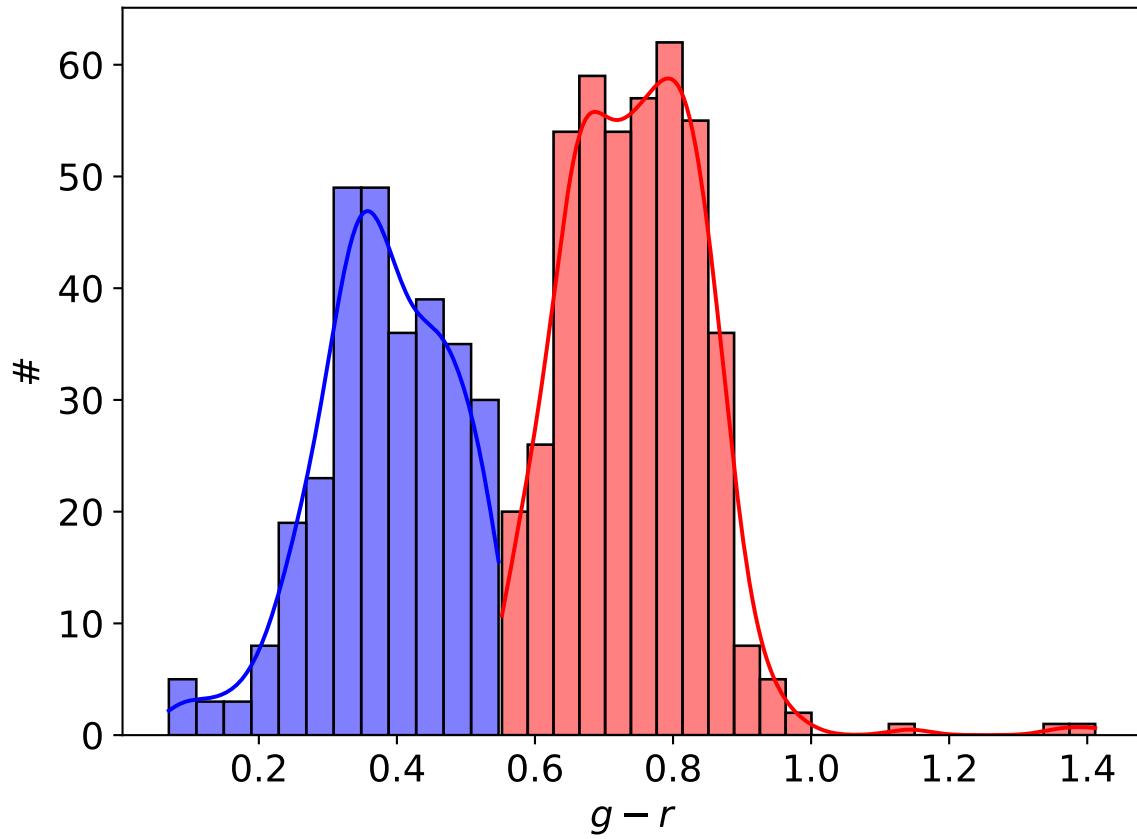


Figura A.4: Histograma mostrando a bimodalidade da cor e a devida classificação do GMM em população azul e população vermelha para o Supergrupo RM650 com os respectivos KDE.

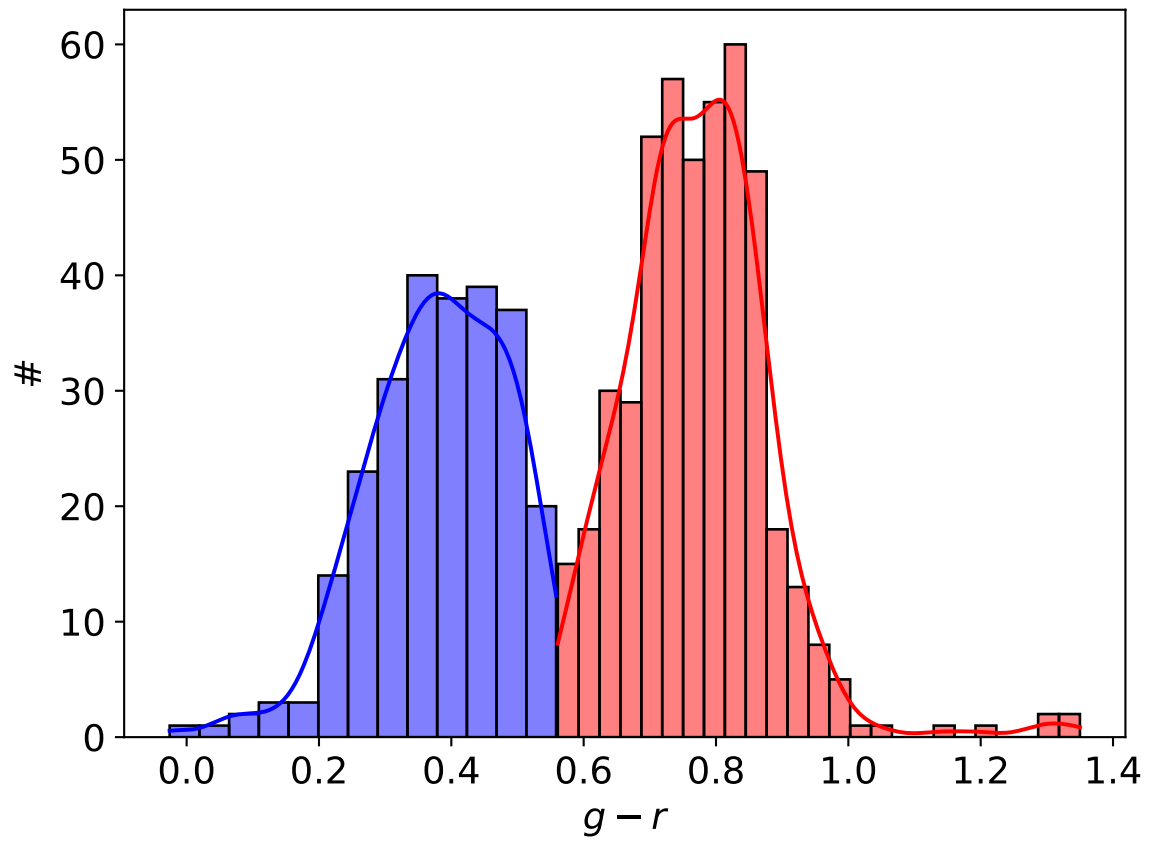


Figura A.5: Histograma mostrando a bimodalidade da cor e a devida classificação do GMM em população azul e população vermelha para o Supergrupo RM239 com os respectivos KDE.

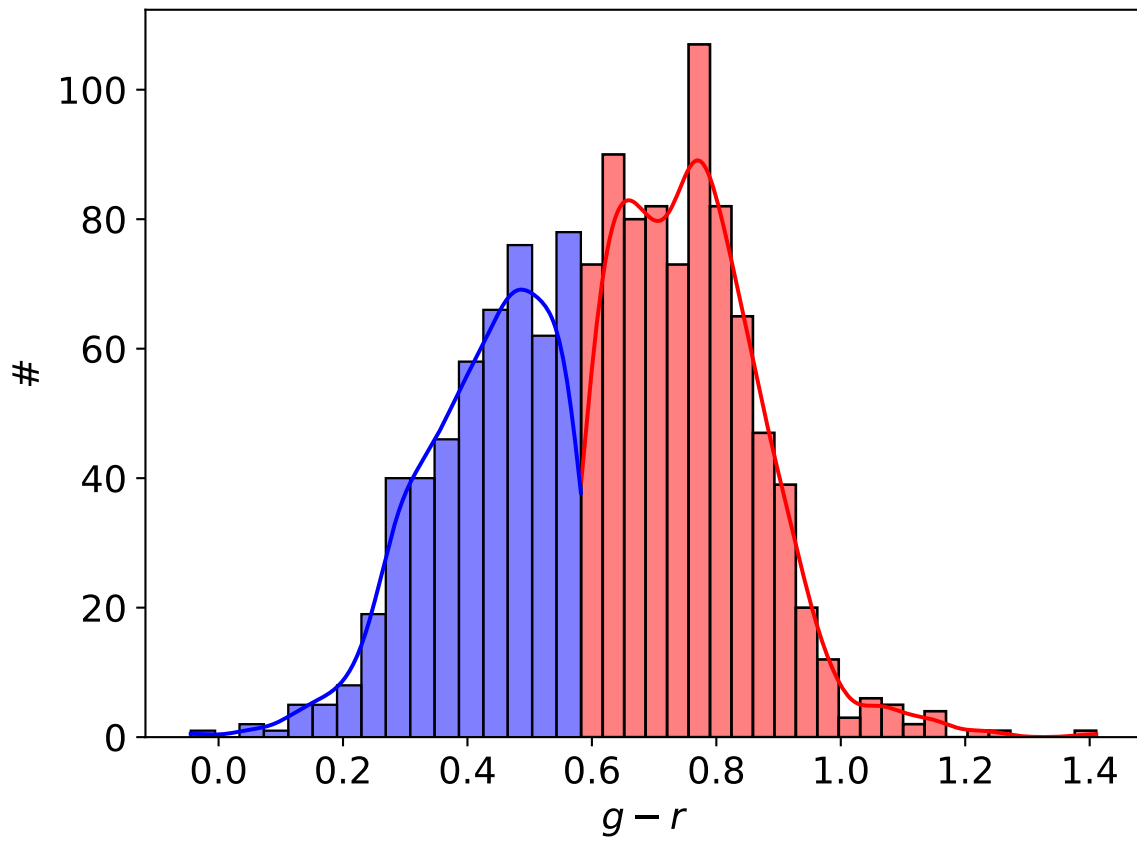


Figura A.6: Histograma mostrando a bimodalidade da cor e a devida classificação do GMM em população azul e população vermelha para o Supergrupo RM803 com os respectivos KDE.

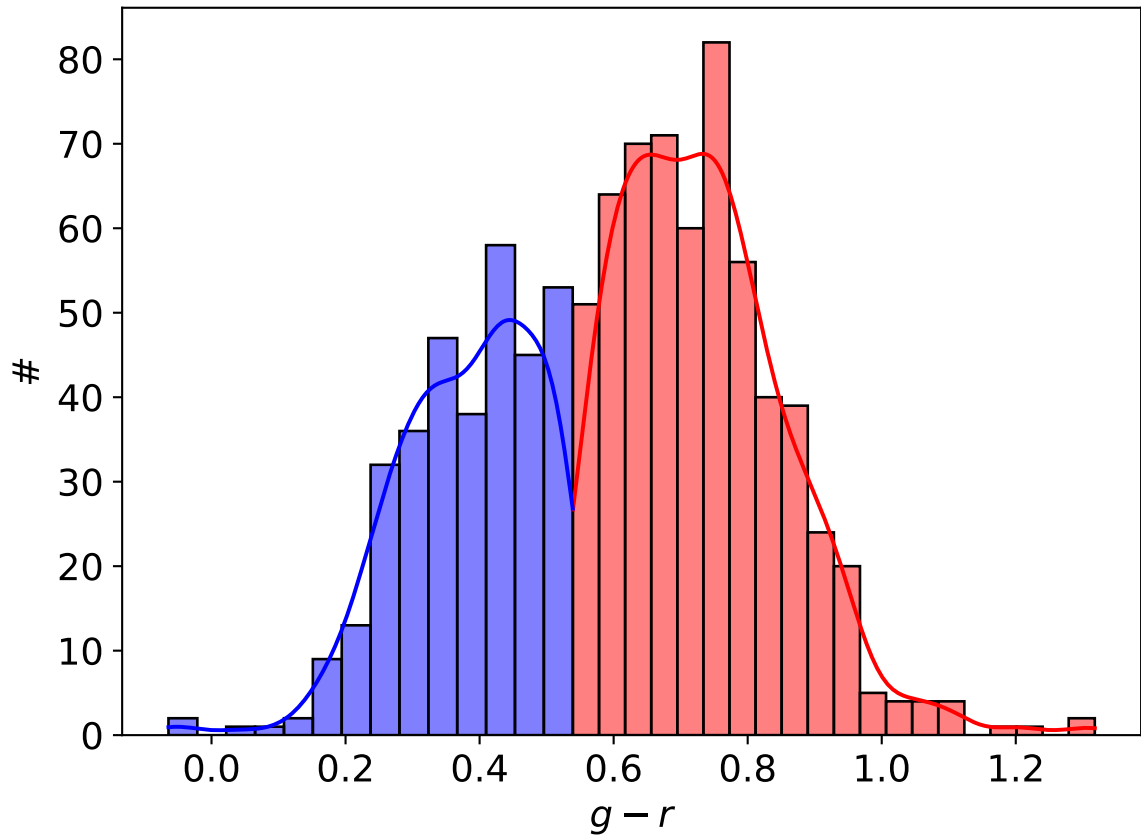


Figura A.7: Histograma mostrando a bimodalidade da cor e a devida classificação do GMM em população azul e população vermelha para o Supergrupo RM6695 com os respectivos KDE.