

O EFEITO AMBIENTAL NO AGLOMERADO DE GALÁXIAS RX
J0152.3-1357, EM $Z = 0.84$

Ana Carolina Posses Nascimento

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Astronomia do Observatório Nacional, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Astronomia.

Orientador: Dr. José Eduardo Telles

Co-orientador: Dr. Roderik Adriaan Overzier

Rio de Janeiro
Novembro de 2019

"O EFEITO AMBIENTAL NO AGLOMERADO DE GALÁXIAS RX
J0152.3-1357, EM $z = 0.84$ "

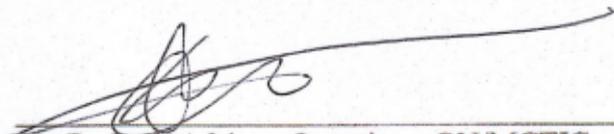
ANA CAROLINA POSSES NASCIMENTO

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 MESTRA EM ASTRONOMIA.

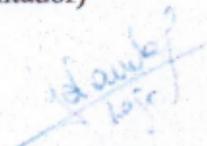
Aprovada por:



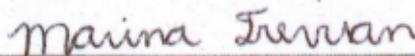
Dr. José Eduardo Telles – ON/MCTIC (Orientador)



Dr. Roderik Adriaan Overzier – ON/MCTIC
(Coorientador)



Dra. Yolanda Jiménez Teja – ON/MCTIC



Dra. Marina Trevisan - UFRGS

RIO DE JANEIRO – BRASIL

26 DE JULHO DE 2019

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus orientadores Eduardo Telles e Rodrik Overzier por me proporcionarem a realização deste frutífero projeto, pelas discussões e disponibilidade de compartilharem seu conhecimento.

Agradeço a todos os amigos que fiz no Observatório Nacional. Vocês foram fundamentais em diversos momentos difíceis em apoio e companheirismo!

Agradeço meus pais Jorge e Carmem e minha família que sempre me apoiaram em todos os passos de minha carreira e sempre acreditaram em meu potencial.

Agradeço a todos os professores que lecionaram as disciplinas que tomei durante o meu mestrado. Todo o conhecimento adquirido foi essencial em meu crescimento profissional e aplicação direta em minha pesquisa.

E, por fim, agradeço ao Pedro por todo o amor e companheirismo que me proporcionou, pelo apoio incondicional e paciência. Eu te amo!

Resumo da Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Astronomia do Observatório Nacional como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Astronomia.

O EFEITO AMBIENTAL NO AGLOMERADO DE GALÁXIAS RX
J0152.3-1357, EM $Z = 0.84$

Ana Carolina Posses Nascimento

Novembro/2019

Mecanismos externos podem transformar galáxias ao longo do tempo. Esses processos ocorrem predominantemente em ambientes densos como grupos e aglomerados de galáxias, onde as interações gravitacionais são mais complexas comparadas as que ocorrem em galáxias isoladas. Objetivando estudar essas transformações que ocorrem em aglomerados, nós realizamos um estudo do aglomerado jovem e complexo RX J0152.7-1357, localizado em $z = 0.84$. Nossos dados consistem de imagens de campo largo do ultravioleta distante e próximo do GALEX e VIMOS/VLT, fotometria ótica do telescópio Subaru e informações da morfologia por imagens do *Hubble* de centenas de membros confirmados espectroscopicamente. Pela análise das tendências de comportamento da taxa de formação estelar, a massa estelar, idade, tipo espectral e morfologia em função da densidade local e da distância ao centro do aglomerado, podemos vincular a diversos cenários de transformações de galáxias e crescimento de aglomerados de galáxias. Nós concluímos que em um aglomerado em $z = 0.84$ a relação de morfologia-densidade e a sequência vermelha já são evidentes. As transformações morfológicas já ocorrem durante o decaimento das galáxias em direção ao centro do aglomerado e se aceleram quando adentram o núcleo central.

Abstract of the Dissertation presented to the National Observatory's Graduate Program in Astronomy as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Astronomy.

ENVIRONMENTAL EFFECTS IN CLUSTER RX J0152.7-1357, AT $Z = 0.84$

Ana Carolina Posses Nascimento

November/2019

External mechanisms can transform galaxies over time. This occurs predominantly in denser environments such as groups and clusters of galaxies, where the gravitational interactions and the gas supply are more complex compared to isolated galaxies. In order to study these transformations in clusters, we are performing a study of the relatively young and complex high redshift cluster RX J0152.7-1357 at $z = 0.84$. Our data consists of wide-field images in the rest-frame far- and near-UV from GALEX and VLT/VIMOS, optical photometry from Subaru, and detailed morphological information from the Hubble Space Telescope for over a hundred spectroscopically confirmed cluster members. By analyzing the trends in properties of galaxies, such as star formation rate, stellar mass, age, spectral type and morphology as a function of the cluster-centric radius, local density, and location relative to different spatial and kinematic substructures in and around the cluster, we can constrain various scenarios for galaxy transformations and the cluster-building process. We conclude that the gravitational interactions in a cluster of galaxies at $z = 0.84$ already make evident the morphology-density relation and the appearance of the red sequence. Infalling galaxies located in the outskirts and in intermediate density environments already show signs of star formation quenching. The galaxies undergo an accelerated transformation from active to passive when they enter the central region of the cluster.

Sumário

Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	xii
1 Introdução	1
1.1 Componentes de um aglomerado	3
1.2 Formação e cosmologia	4
1.3 Efeitos ambientais	6
1.4 Sequência vermelha	7
1.5 Relação de morfologia-densidade	8
1.6 Objetivo científico	10
2 Amostra	13
2.1 Catálogos	13
2.2 Morfologia	18
2.3 Imageamento	20
2.3.1 Fotometria nas bandas óticas	21
2.3.2 Fotometria na banda U	22
2.3.3 Fotometria na banda NUV	23
2.3.4 Fotometria nas bandas J e Ks	25
3 Metodologia	26
3.1 Corte por redshift	26
3.2 União de catálogos	28
3.3 Fotometria	29
3.3.1 SExtractor	30
3.3.2 Bandas V, R, <i>i</i> e <i>z</i>	31
3.3.3 Banda U	32
3.3.3.1 Limites superiores de magnitude para a banda U	34
3.3.4 Banda J e Ks	36
3.4 Banda NUV	38
3.5 Ajuste de distribuição espectral de energia (SED)	38

3.5.1	CIGALE	39
4	Resultados	42
4.1	Classificação de galáxias	42
4.1.1	Ótico	43
4.1.2	Ultravioleta	46
4.2	Parâmetros Dinâmicos	50
4.2.1	Estrutura total do aglomerado	52
4.2.2	Subestruturas Norte e Sul	52
4.2.3	Grupos 83 e 84	53
4.3	Classificação em função do ambiente	55
4.4	Taxa de formação estelar específica em função do ambiente	62
4.5	Estudo das populações	67
4.5.1	Morfologia	67
4.5.2	Cor em função do ambiente	69
4.5.3	Histórico de formação estelar	72
4.6	Diagrama espaço de fase	84
5	Discussão	91
5.1	Aglomerado dinamicamente jovem	91
5.2	Morfologia-Densidade e SFR-Densidade	92
5.3	Populações e efeitos ambientais	95
6	Conclusões	99
	Referências Bibliográficas	101

Lista de Figuras

1.1	(a) Imagem do aglomerado de Virgo, localizado a aproximadamente 18 Mpc. (b) Imagem do aglomerado de galáxias Abell 1689, localizado em $z = 0.18$	2
1.2	Em ambos os painéis, as linhas sólidas representam as predições da função de massa de aglomerados a partir de simulações cosmológicas efetuadas por Vikhlinin et al. (2009). Os dados (pontos pretos e azuis) correspondem a 49 aglomerados no intervalo de $0.025 < z < 0.22$ (cor preta) e 36 aglomerados no de $0.3 < z < 0.9$. À esquerda: resultados para simulações cujos parâmetros cosmológicos são similares ao do modelo Λ CDM ($\Omega_m = 0.25$, $\Omega_\Lambda = 0.75$, $h = 0.72$). À direita: resultados para simulações em um Universo sem a componente de energia escura Λ CDM ($\Omega_m = 0.25$, $\Omega_\Lambda = 0$, $h = 0.72$)	5
1.3	Diagrama cor-magnitude para as galáxias pertencentes ao aglomerado RXJ0153 ($z = 0.83$; painel esquerdo), CL0016 ($z = 0.66$; painel central) e SDSS ($z = 0$; painel direito). A linha vermelha separa galáxias passivas (mais avermelhadas) das ativas (mais azuladas), segundo procedimento de Tanaka et al. (2005). As linhas tracejadas azuis localizam as galáxias no diagrama que possuem massas de $10^{11}M_\odot$ $10^{10}M_\odot$	8
1.4	Relação morfologia-densidade presente em Postman et al. (2005).As linhas pontilhadas de Postman & Geller (1984) e linhas sólidas de Dressler (1980) e Dressler et al. (1997) representam as frações de galáxias em aglomerados elípticas (E), lenticulares (S0), espirais (Sp) e Irregulares (Irr) em $z \sim 0$. Os pontos pretos de Postman et al. (2005) e linhas tracejadas de Smith et al. (2005) representam as frações de galáxias de aglomerados em $z \sim 1$	9
1.5	Imagem do aglomerado RX J0152.7-1357 obtida pelo telescópio espacial <i>Hubble</i> . Fonte: Patel et al. (2009b).	11
2.1	Distribuição espacial das galáxias presentes nos catálogos B06 (a), T06(b), D10(c) e P11(d).	17

2.2	Composição dos filtros r_{F625W} , i_{F775W} e z_{F850LP} disponíveis pelo telescópio <i>Hubble</i> para a região central do aglomerado. E 3 exemplos de classificações visuais de galáxias de nosso aglomerado de estudo	19
2.3	Espectro de duas galáxias com tempo efetivo de decaimento $\tau = 0.1$ bilhões de anos e $\tau = 1$ bilhões de anos , ambos com idade de 4.5 bilhões de anos, e curvas de transmissão para as bandas empregadas neste projeto: NUV, U, V, R, i , z	20
2.4	Representação da imagem do VIMOS/VLT, resultado do mosaico de CCDs, distribuição espacial dos objetos do aglomerado RXJ0153 e campos de visão das imagens do <i>Subaru</i> e <i>Hubble</i>	24
3.1	Distribuição de <i>redshift</i> para os catálogos de Demarco et al. (2010), Tanaka et al. (2006), Patel et al. (2011). 2011	27
3.2	Distribuição espacial das galáxias do aglomerado RXJ01253, após união de catálogos.	29
3.3	As imagens em (a) e (b) representam regiões do campo de visão da banda fotométrica z . (a) Exemplo de um par de galáxias membro do aglomerado. (b) Galáxia de nossa amostra contaminada pelo artefato de uma estrela extremamente saturada. Para ambas imagens, as galáxias de exemplo estão circuladas em vermelho.	31
3.4	Distribuição das magnitudes.	32
3.5	(a): mapa de pesos sobrepostos pelos objetos de RXJ0153 sem detecção na banda U como pontos vermelhos. Os números representam as diferentes área com contribuições de <i>pixel</i> similares. Cada uma é identificada com um número de 1 a 4. (b): distribuição espacial dos objetos detectados na imagem da banda U (pontos pretos), os objetos de RXJ0153 detectados na banda U (pontos laranjas) e objetos de RXJ0153 não detectados na banda U (triângulos azuis).	34
3.6	Etapas do processo de obtenção dos limites superiores de magnitude e resultados de cada região. (a): Distribuição espacial dos objetos detectados pelo SExtractor nos pontos pretos. Em azul claro, representamos os objetos detectados e contidos na região 1. (b): Objetos detectados pelo SExtractor na região 1 em preto e pontos da grade em vermelho. (c): Objetos detectados na região 1 em preto e em vermelho o pontos associados as regiões de céu (sem a limpeza pelo mapa de segmentação, como descrito no texto). (d): Objetos detectados na região 1 em preto e em vermelho o pontos associados as regiões de céu após limpeza via mapa de segmentação	37

3.7	Distribuição das contagens pela fotometria das regiões de céu contidas nas regiões de 1 a 4.	37
3.8	41
4.1	Diagrama cor-magnitude para cores óticas.	44
4.2	Diagrama (V - z) x (U - z) entre galáxias do aglomerado e diagrama cor-magnitude	47
4.3	Distribuição de velocidade radial do aglomerado	53
4.4	Distribuição da velocidade radial dos grupos G83 e G84	54
4.5	56
4.6	(a) Distribuição espacial das galáxias destacadas de acordo com a taxa de formação estelar específica. As galáxias são destacadas pela taxa de formação estelar específica em escalas de cinza. ; (b) Média da taxa de formação estelar em intervalos de densidade local; (c) Média da taxa de formação estelar em anéis de raio 0.5 Mpc	64
4.7	Distribuição espacial das morfologias de galáxias passivas, ativas e em transição	67
4.8	Excesso de cor em função do raio e da densidade local	70
4.9	Relação entre a idade das populações estelares com a massa (painel a), a densidade numérica local (painel b) e a distância ao centro do aglomerado (painel c). Para todos os gráficos, os diamante vermelhos representam as galáxias passivas, os triângulos verdes as galáxias transientes e as estrelas azuis as galáxias ativas. As linhas sólidas representam os ajustes lineares para as galáxias passivas (linhas vermelhas), transientes (linhas verdes) e ativas (linhas azuis).	72
4.10	Relação entre o tempo de decaimento τ para um histórico de formação estelar <i>delayed</i> com a massa (painel a), a densidade numérica local (painel b) e a distância ao centro do aglomerado (painel c). Para todos os gráficos, os diamante vermelhos representam as galáxias passivas, os triângulos verdes as galáxias transientes e as estrelas azuis as galáxias ativas. As linhas sólidas representam os ajustes lineares para as galáxias passivas (linhas vermelhas), transientes (linhas verdes) e ativas (linhas azuis).	75

4.11	Relação entre a idade das populações estelares e tempo de decaimento τ das galáxias do aglomerado RXJ0153. As galáxias passivas são representadas pelos diamantes vermelhos, as galáxias transientes menos massivas ($\log \text{Massa} < 10.6 M_{\odot}$) pelos triângulos verdes e as galáxias ativas pelas estrelas azuis. Os pontos pretos marcam as galáxias passivas com massas superiores a 10.6 . As galáxias representadas por triângulos verdes e centro com ponto branco representam as galáxias transientes mais massivas ($\log \text{Massa} > 10.6 M_{\odot}$).	78
4.12	Relação entre a taxa de formação estelar específica (sSFR) com a massa (painel a), a densidade numérica local (painel b) e a distância ao centro do aglomerado (painel c). Para todos os gráficos, os diamante vermelhos representam as galáxias passivas, os triângulos verdes as galáxias transientes e as estrelas azuis as galáxias ativas. As linhas sólidas representam os ajustes lineares para as galáxias passivas (linhas vermelhas), transientes (linhas verdes) e ativas (linhas azuis).	79
4.13	(a) Distribuição de massa para as galáxias do aglomerado RXJ0153. A linha sólida vermelha representa a distribuição das galáxias passivas, a linha tracejada azul representa a distribuição de galáxias ativas e o histograma hachurado em verde representa a distribuição de massa para galáxias transientes. O painel (b) relaciona a massa das galáxias com suas respectivas densidades numéricas locais. O painel (c) correlaciona a massa com a distância ao centro do aglomerado. Para os painéis (b) e (c): os diamante vermelhos representam as galáxias passivas, os triângulos verdes as galáxias transientes e as estrelas azuis as galáxias ativas. As linhas sólidas representam os ajustes lineares para as galáxias passivas (linhas vermelhas), transientes (linhas verdes) e ativas (linhas azuis).	82

4.14 (a) e (b) Diagrama espaço de fase para as galáxias ativas e passivas, representadas pelos pontos azuis e vermelhos, respectivamente. Os quadrados representam as galáxias pertencentes à subestrutura norte, as circunferências representam as galáxias pertencentes ao grupo G83 e as cruces marcam os objetos pertencentes ao grupo G84. Os losangos representam as galáxias pertencentes à subestrutura sul, as circunferências representam as galáxias pertencentes ao grupo R1 e as cruces marcam os objetos pertencentes ao grupo R2. (c) Diagrama espaço de fase para as galáxias da subestrutura norte pelos quadrados e sul pelos losangos. Os pontos vermelhos, azuis e verdes representam as galáxias passivas, ativas e transientes, respectivamente. Diferentemente de (a) e (b), os valores de raio virial e dispersão de velocidade são definidos pelos valores das subestruturas. (d) Diagrama espaço de fase para as galáxias transientes em pontos verdes. Destacamos as galáxias classificadas morfologicamente pelas imagens do *Hubble*: elípticas como quadrados vermelhos, lenticulares como triângulos amarelos e espirais como cruces azuis. Para todos os painéis: As linhas sólidas representam perfis cáusticos: $0.1 < R/R_{vir} \cdot v/\sigma$: galáxias virializadas; $0.1 < R/R_{vir} \cdot v/\sigma < 0.4$: galáxias virializadas e *backsplash*; $0.4 < R/R_{vir} \cdot v/\sigma < 2$: galáxias em decaimento; $R/R_{vir} \cdot v/\sigma < 2$: galáxias não ligadas ao aglomerado. A linha tracejada indica o raio virial. 90

Lista de Tabelas

2.1	Catálogo de Blakeslee et al. (2006). Número total: 107 galáxias. . . .	14
2.2	Catálogo de Tanaka et al. (2006). Número total: 192 galáxias. . . .	14
2.3	Catálogo de Demarco et al. (2010). Número total: 134 galáxias. . . .	16
2.4	Catálogo de Patel et al. (2011). Número total: 3326 galáxias. . . .	16
2.5	Representação da classificação de tipo T realizada por Postman et al. (2005) para as galáxias de nosso aglomerado, e definições para a classificação de Hubble. Além disso, consta a quantidade de objetos identificados para cada tipo.	18
2.6	Informações sobre as imagens das bandas fotométricas de nossa amostra.	25
3.1	Tabela com resumo dos parâmetros utilizados no CIGALE.	40
4.1	Resultados dos parâmetros dinâmicos do aglomerado e de cada subestrutura.	52
4.2	Frações de objetos de acordo com presença em uma região. As 8 primeiras linhas referem-se a proporção de objetos de uma determinada classificação localizada em uma região em relação a todos os objetos dessa região. as proporções com base nos objetos pertencentes a sua respectiva região. As duas últimas representam as frações para uma classificação em relação ao número total de objetos daquela classificação.	58
4.3	Tabela de indica a quantidade de tipos morfológicos classificados por Postman et al. (2005) para as galáxias centrais do aglomerado RXJ0153 para cada classificação (passiva, ativa e transiente) obtida neste trabalho pelo diagrama de cor-magnitude.	69

Capítulo 1

Introdução

Os aglomerados de galáxias são as estruturas mais massivas que observamos no Universo recente. Nós consideramos os aglomerados¹ como os sistemas gravitacionalmente ligados com massas superiores a $M = 10^{14}M_{\odot}$ (Bower et al. 2004).

Os aglomerados regulares, segundo a classificação de Abell et al. (1989), finalizaram seu processo de formação e são sistemas virializados, ou seja, dinamicamente estáveis. Suas componentes atingem o equilíbrio termodinâmico, obedecendo o teorema do virial (Clausius 1870): a energia potencial gravitacional do sistema é igual a menos 2 vezes a energia cinética de toda a estrutura ($U = -\frac{1}{2}K$).

O equilíbrio dinâmico configura ao aglomerado uma distribuição espacial tridimensional aproximadamente esférica e com raio virial² típico entre 1 e 3 Mpc. Entretanto, existem aglomerados classificados como irregulares, pois são formados por subestruturas e regiões filamentosas. Esses sistemas estão em processo de acreção e portanto sua formação (virialização) não foi concluída.

Na Figura 1.1, exemplificamos a configuração espacial desses tipos de aglomerados de galáxias. No painel (a), apresentamos o aglomerado de Virgo, que dista aproximadamente 18 Mpc ($z \sim 0$) da Terra (Fouqué et al. 2001). Este é um caso de aglomerado irregular, pois podemos notar que suas galáxias membro não se distribuem esfericamente pelo espaço. O aglomerado de Virgo é um aglomerado dinamicamente jovem e apresenta subestruturas (Lisker et al. 2018). No painel (b) temos o exemplo do aglomerado de galáxias regular Abell 1689, localizado em $z = 0.18$. A imagem (a) foi obtida pelo telescópio *Burrell Schmidt* enquanto a imagem em (b) é fruto de observações do telescópio espacial *Hubble*.

A classificação de Abell para sistemas regulares e irregulares baseia-se na distribuição espacial observada das galáxias. Porém, a grande complexidade de propri-

¹Neste trabalho, quando nos referirmos a “aglomerados”, estamos mencionando unicamente os aglomerados de **galáxias**.

²O raio virial caracteriza-se como o raio que contém 100 vezes a densidade crítica do Universo em um determinado *redshift* para uma cosmologia $\Omega_m = 0.3$ e $\Omega_{\Lambda} = 0.7$.

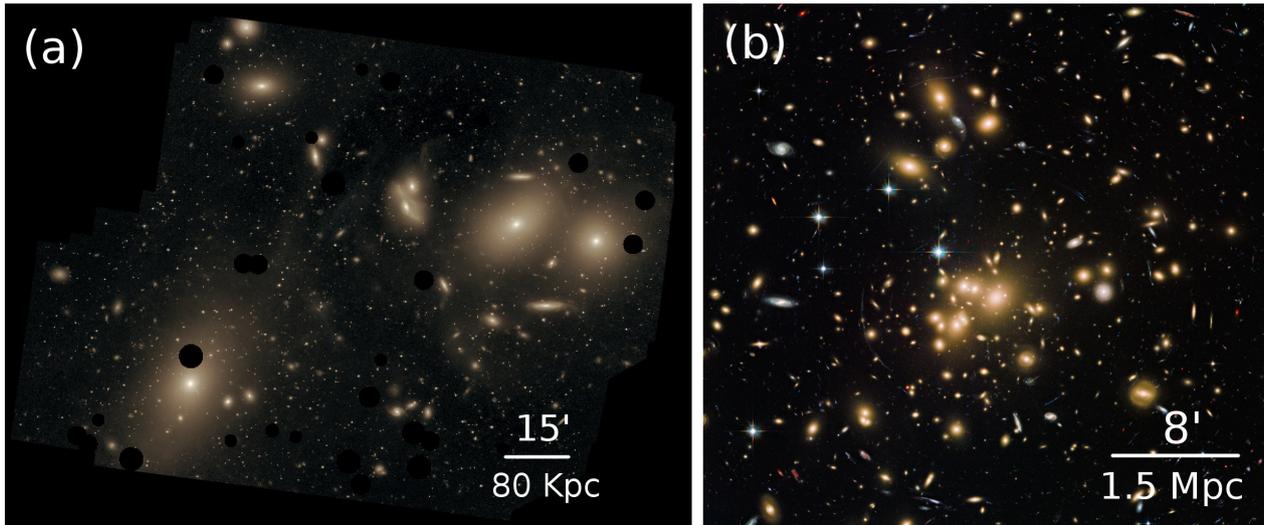


Figura 1.1: (a) Imagem do aglomerado de Virgo, localizado a aproximadamente 18 Mpc. Esse é um exemplo de um aglomerado de galáxias irregular. (b) Imagem do aglomerado de galáxias Abell 1689, localizado em $z = 0.18$. Esse é um exemplo de um aglomerado de galáxias. Crédito (a): Chris Mihos (Case Western Reserve University)/ESO/ Crédito (b): *Hubble*

idades proporciona que os aglomerados de galáxias também possam ser tipificados por outros parâmetros. Além da classificação apresentada, Abell et al. (1989) introduziu um sistema de classes baseados na riqueza de um aglomerado. São atribuídos valores de 0 a 5 de acordo com a quantidade de objetos componentes³.

Outro popular sistema é o de Bautz & Morgan (1970), cujo critério de separação se firma na característica das galáxias mais brilhantes do aglomerado. O tipo I refere-se a presença de uma galáxia cD na região central do aglomerado. Esse tipo de galáxia caracteriza-se como uma gigante elíptica circundada por um envelope de gás e poeira, fruto do processo de acreção de galáxias massivas que caem em direção ao centro do aglomerado (canibalismo galáctico).

Aglomerados de galáxias de tipo II possuem em sua região central uma galáxia com magnitudes intermediárias, não se caracterizando como uma galáxia cD. Por fim, aglomerados de tipo III não possuem uma galáxia dominante em sua região central. Segundo essas classificações, Abell 1689 é um aglomerado de tipos 4 e II, e o aglomerado de Virgo possui tipos 1 e III.

³As galáxias levadas em consideração necessitam possuir magnitudes dentro do intervalo de m_3 a $m_3 + 2$, sendo m_3 a magnitude da terceira galáxia mais brilhante do aglomerado. As classificações obedecem: 0 (30-49 objetos); 1(50-79 objetos); 2(80-129 objetos); 3 (130-199 objetos); 4(200-299 objetos); 5 (> 300 objetos);

1.1 Componentes de um aglomerado

As galáxias contribuem com 5-10% da massa total de um aglomerado, constituindo cerca de centenas a milhares de objetos membros. O sistema gravitacional é suportado pela dispersão de velocidades de seus objetos, com velocidades típicas de $\sim 1000 \text{ km s}^{-1}$. Além disso, é interessante notar que a fração e distribuição espacial de galáxias de diferentes morfologias não é homogênea.

As galáxias passivas, como as galáxias elípticas e lenticulares, compõem a maior quantidade de membros e estão concentradas nas regiões de maiores densidades numéricas e menores distâncias ao centro do aglomerado. Em contrapartida, as galáxias espirais e irregulares estão preferencialmente localizadas em grupos e em regiões de campo. Quando presentes em aglomerados, elas ocupam os ambientes menos densos e mais distantes as regiões centrais (Postman et al. 2005).

Dada a concentração espacial de galáxias gerada por aglomerados, os primeiros catálogos utilizaram imagens de bandas óticas para reportar a detecção de novos aglomerados de galáxias (Abell et al. 1989; Zwicky et al. 1961, entre outros). Entretanto, essa componente contribui com as menores frações de massa para o sistema. O meio intraglomerado é formado de estrelas e um gás altamente ionizado, constituindo 10-15% da massa total do aglomerado. O gás apresenta-se de forma difusa (densidade $n_e = 10^{-2}$ - 10^{-3} partículas cm^{-3}), atingindo um intervalo de temperatura de 10^7 - 10^8 K (Fabian 1994).

A baixa densidade e altas temperaturas tornam o meio intraglomerado opticamente fino⁴. A radiação emitida por essa componente está no intervalo espectral do raio X, devido a desaceleração dos elétrons pelos íons em uma interação livre-livre. Esse processo físico é denominado *Bremsstrahlung* térmico. Portanto, é uma possibilidade detectar aglomerados a partir de sua emissão no raio X (ROSAT Deep Cluster Survey, Rosati (1997); WARPS, Perlman et al. (2002); Bright SHARC survey, Romer et al. (2000)).

Além da emissão em altas energias, os elétrons que compõem o gás intraglomerado podem interagir com a radiação cósmica de fundo, pelo fenômeno do espalhamento Compton inverso. A colisão entre um fóton e um elétron resulta em um aumento da energia do fóton, causando uma distorção no espectro de corpo negro da radiação cósmica de fundo (efeito *Sunyaev-Zel'dovich*; Sunyaev & Zeldovich (1970)). Como consequência, em mapeamentos destinados a compreensão da radiação cósmica de fundo ($\lambda_{RCF,observada} \sim 2\text{mm}$), as regiões de aglomerados são identificadas por regiões mais frias ou mais quentes (dependendo da frequência, com $\Delta T = 0$ para 217 GHz), sendo portanto um método de detecção de aglomerados (Bleem et al. 2015; de Haan et al. 2016).

⁴Para meio opticamente fino, a profundidade ótica satisfaz $\tau_\nu \ll 1$.

Apesar de serem componentes visíveis, as galáxias e o meio intraglomerado correspondem a somente $\sim 20\%$ da massa total de um aglomerado. Os $\sim 80\%$ restantes estão na forma de matéria escura. Essa é uma tipo indetectável de matéria da qual somos somente capazes de quantificar sua influência gravitacional sobre os sistemas nos quais ela está inserida.

A matéria escura é caracterizada como fria (velocidades das partículas não são relativísticas), não dissipativa (não se resfria por emissão de radiação) e não colisional (interações são apenas gravitacionais). A compreensão de sua natureza ainda é escassa, porém supomos que seja não-bariônica. Ela é fundamental na teoria de formação de estruturas cosmológicas de maneira que possui papel de destaque no atual modelo cosmológico, Λ CDM (*Lambda Cold Dark Matter*).

1.2 Formação e cosmologia

Os aglomerados de galáxias são fruto da amplificação de instabilidades gravitacionais em regime de crescimento linear à medida que o Universo evolui em expansão. Com a quebra do regime linear, os halos de matéria escura colapsaram gerando uma estrutura bariônica em sua região central.

Todo esse mecanismo de evolução de estruturas é ditado por um modelo de formação hierárquico. Os halos de matéria escura menos massivos colapsaram primeiramente, e o crescimento das estruturas prosseguiu com a fusão de halos de massas similares ou pela acreção de halos de matéria escura por sistemas mais massivos.

Neste sentido, as simulações cosmológicas se mostram excelentes ferramentas para traçar a evolução das estruturas na história do Universo. Consistem em simulações de modelos computacionais efetuados por supercomputadores. Buscam compreender quais são os mecanismos físicos agentes no crescimento linear das estruturas e, principalmente, na solução do regime de crescimento não-linear posterior.

São simuladas caixas de 1^3 - 100^3 Mpc contendo centenas de milhões de partículas em condições iniciais de um meio com pequenas inomogeneidades. Além disso, incluímos ingredientes como a expansão do Universo, propriedades e física da matéria escura e bariônica (esta se incluso).

Nós últimos anos, diversas simulações como *Millenium* (Springel 2005), *Eagle* (Schaye et al. 2015) e *Illutris* (Nelson et al. 2015) demonstram que a distribuição de densidade de matéria escura já apresenta em $z \sim 6$ regiões de densidades moderadas, progenitoras das estruturas que observamos no Universo Local, denominados protoaglomerados.

O processo de formação dos protoaglomerados se dá de forma que, com a evolução do Universo, os halos de matéria escura menos massivos uniram-se em uma estrutura

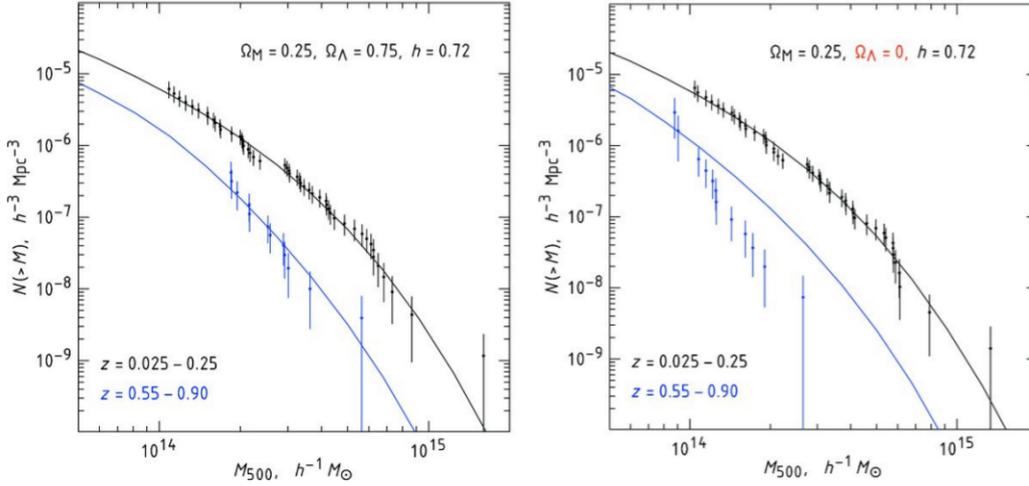


Figura 1.2: Em ambos os painéis, as linhas sólidas representam as previsões da função de massa de aglomerados a partir de simulações cosmológicas efetuadas por Vikhlinin et al. (2009). Os dados (pontos pretos e azuis) correspondem a 49 aglomerados no intervalo de $0.025 < z < 0.22$ (cor preta) e 36 aglomerados no de $0.3 < z < 0.9$. À esquerda: resultados para simulações cujos parâmetros cosmológicos são similares ao do modelo Λ CDM ($\Omega_m = 0.25$, $\Omega_\Lambda = 0.75$, $h = 0.72$). À direita: resultados para simulações em um Universo sem a componente de energia escura Λ CDM ($\Omega_m = 0.25$, $\Omega_\Lambda = 0$, $h = 0.72$)

central com redondezas tornando-se cada vez mais filamentosas. Em $z \lesssim 1$, diversos halos de matéria escura de tamanhos similares são observados em processo de fusão para finalizar sua virialização em $z \sim 0$ (Overzier 2016).

As simulações cosmológicas traçam a evolução das propriedades do Universo em diferentes *redshifts*⁵, de forma que podemos comparar com dados observacionais e estabelecer vínculos com os parâmetros cosmológicos⁶ e as propriedades físicas da matéria escura.

Como exemplo, a Figura 1.2 originalmente em Vikhlinin et al. (2009), compara a função de massa em halos de matéria escura (abundância de halos em função da massa) entre dados observacionais (pontos) e simulações numéricas (linhas sólidas) em diferentes *redshifts* e distintas cosmologias.

O dados observacionais consistem de 49 aglomerados no intervalo de $0.025 < z < 0.22$ (cor preta) e 36 aglomerados localizados em $0.3 < z < 0.9$ (cor azul) com massas estimadas por dados do telescópio espacial Chandra a partir das relações de $L_X - M_{TOTAL}$. Os dados teóricos estimam as funções de massa de halos para esses

⁵“redshift” é o termo em inglês que utilizamos ao longo da dissertação para descrever o deslocamento para o vermelho do espectro observado devido a recessão das galáxias no fluxo de Hubble. Nós nos referiremos em algumas passagens como a letra z .

⁶São eles: o parâmetro de Hubble $H(t)$, parâmetro de densidade da massa Ω_m , parâmetro de densidade do vácuo Ω_Λ , parâmetro de curvatura Ω_k , e parâmetro de desaceleração $q(t)$.

dois intervalos de *redshift* a partir de simulações numéricas (Tinker et al. 2008) por diferentes valores de parâmetros cosmológicos.

No painel direito, vemos o resultado para valores de Ω_m (parâmetro de densidade da massa) e Ω_Λ (parâmetro de densidade do vácuo) e h similares aos definidos para o modelo Λ CDM na literatura. É notável a concordância dos dados simulados com as observações para ambos os intervalos de *redshift*.

Para o painel esquerdo, as linhas sólidas representam a predição de função de massa para um Universo sem a componente da energia escura ($\Omega_\Lambda = 0$). Apesar de haver concordância com menores *redshifts*, o modelo não é capaz de prever a função observada em $z \sim 0.7$.

Portanto, esses resultados concordam com os demais vínculos presentes na literatura que visam definir os parâmetros cosmológicos. O número de aglomerados por unidade de volume é, portanto, um teste cosmológico importante. Isso nos mostra que aglomerados de galáxias podem ser utilizados como uma forma de entender como o Universo se formou e estruturou.

1.3 Efeitos ambientais

Aglomerados de galáxias compõem ambientes hostis capazes de transformar as propriedades de galáxias membro por processos gravitacionais únicos. Entre as possíveis interações gravitacionais, podemos citar:

1. Pressão de arrasto (Gunn & Gott 1972): À medida que uma galáxia cai em direção ao centro do aglomerado, ela adentra as regiões permeadas pelo gás quente do meio intraglomerado. A interação do gás quente do meio intraglomerado com o gás frio interno da galáxias retira esse repositório que futuramente seria combustível para a formação de estrelas.
2. Assédio galáctico (Moore et al. 1996): As altas velocidades associadas às galáxias de um aglomerado não permitem que objetos suficientemente próximos interajam culminando em uma fusão, mas em apenas encontro rápidos. Sucessivos encontros rápidos geram um aumento na energia interna das galáxias, de forma que as estrelas e gás tornam-se menos ligadas gravitacionalmente. Como consequência, essas componentes se tornam mais suscetíveis a futuras rupturas e deposição no meio intraglomerado. Esse processo leva galáxias espirais de tipo Sa e Sb a se transformarem-se em lenticulares, enquanto as espirais de tipo Sc e Sd se transformam em galáxias esferoidais passivas, pois seus discos são menos gravitacionalmente ligados.
3. Estrangulamento (Balogh et al. 2000; Larson et al. 1980): A entrada em regiões de maiores densidades permitem que seja removido o halo de gás quente que

circunda uma galáxia, o que seria um reservatório futuro para conversão em gás frio e conseqüente geração de novas estrelas.

Tais processos retiram e suprimem a reposição de gás que seria combustível para episódios de formação estelar posteriores. Como conseqüência, uma galáxia com população jovem e com elevada taxa de formação estelar transforma-se em uma galáxia passiva, à medida que adentra o poço potencial do sistema.

Porém, ainda não compreendemos quais processos são dominantes e suficientes para explicar em totalidade as transformações de galáxias segundo as observações. Essa questão fomenta a discussão “natureza versus ambiente” (*nature versus nurture*), que bota em cheque o papel de processos seculares internos e de interações gravitacionais externas na evolução das galáxias com o tempo.

1.4 Sequência vermelha

Apesar de ainda não haver respostas concretas, sabemos que os aglomerados possuem um papel importante na transformação dos objetos, que de fato pode ser verificado observacionalmente. A primeira característica que citamos é a sequência vermelha. Essa é uma característica exprimida no diagrama cor-magnitude por galáxias passivas. Manifesta-se como uma correlação estreita e com coeficiente negativo.

A magnitude (ótica) é um traçador da massa estelar desses objetos. As galáxias mais brilhantes, e portanto, as mais massivas, exibem as cores mais vermelhas. Mas, tanto o aumento da metalicidade, quanto da idade de uma população estelar pode tornar a cor de uma galáxia mais vermelha com o tempo. A degenerescência de idade e metalicidade (Worthey 1994) afirma que galáxias jovens e muito metálicas podem compartilhar cores similares a de galáxias velhas mas pouco metálicas.

A quebra dessa degenerescência ocorreu com Kodama & Arimoto (1997) ao simular a evolução da sequência vermelha em diferentes *redshifts* por um código de síntese de populações estelares atrelado a sua evolução química. Concluiu-se que a sequência vermelha pode ser traduzida como uma correlação de metalicidade e massa, com espalhamento devido a idade das populações estelares do objeto.

Logo, as galáxias mais massivas são mais avermelhadas e portanto mais metálicas, devido as maiores quantidades de metais na atmosfera estelar das estrelas de suas populações. Dada uma galáxia na sequência vermelha, os objetos mais avermelhados em uma mesma magnitude indicam que eles pararam de formar estrelas tardiamente (caso tenha um mesmo *redshift* de formação), ou se formaram depois.

Diversos estudos almejam identificar em que momento da história do Universo a sequência vermelha se originou e como ocorreu sua evolução até adquirir as carac-

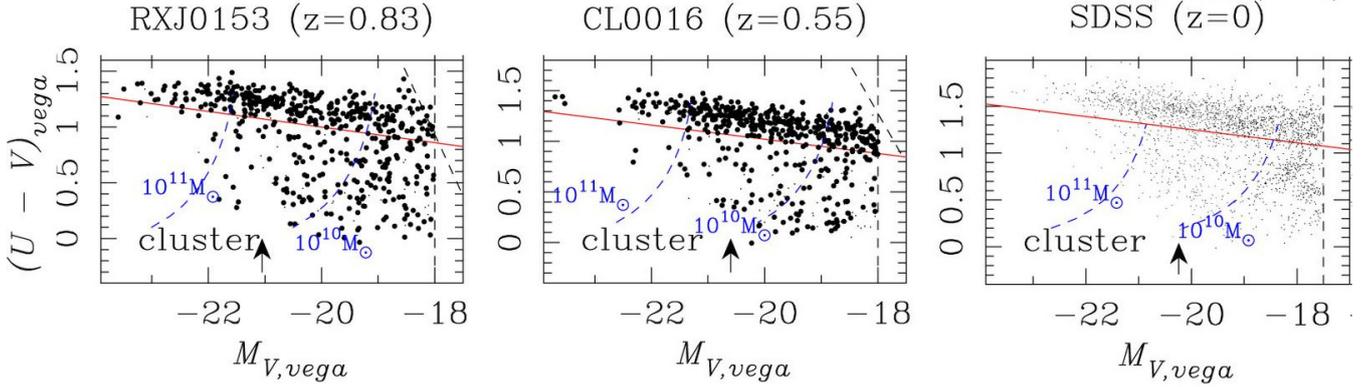


Figura 1.3: Diagrama cor-magnitude para as galáxias pertencentes ao aglomerado RXJ0153 ($z = 0.83$; painel esquerdo), CL0016 ($z = 0.66$; painel central) e SDSS ($z = 0$; painel direito). A linha vermelha separa galáxias passivas (mais avermelhadas) das ativas (mais azuladas), segundo procedimento de Tanaka et al. (2005). As linhas tracejadas azuis localizam as galáxias no diagrama que possuem massas de $10^{11}M_{\odot}$ e $10^{10}M_{\odot}$.

terísticas que encontramos no Universo Local (Cerulo et al. 2017, 2016).

A Figura 1.3, de Tanaka et al. (2005) exemplifica o aparecimento e evolução da sequência vermelha em distintas épocas do Universo. Os três diagramas representam a distribuição da cor $(U - V)_{rest-frame}$ e magnitude $V_{rest-frame}$ para o aglomerado RXJ0153 ($z = 0.83$; painel esquerdo), CL0016 ($z = 0.55$; painel central) e galáxias membro do SDSS ($z = 0$; painel direito). A linha vermelha separa as galáxias em passivas (mais avermelhados) e ativas⁷ (mais azuis) e as linhas tracejadas azuis localiza galáxias com massas $10^{11}M_{\odot}$ e $10^{10}M_{\odot}$.

Em todos os diagramas, nós detectamos uma distribuição linear acima da linha vermelha, indicando que uma sequência vermelha já é observada em $z \sim 0.8$. De fato, observações mostram a presença da sequência vermelha já em $z \sim 2$ e com pouca evolução até os tempos atuais (Andreon et al. 2014; Spitler et al. 2012; Stanford et al. 2012). O entendimento de suas propriedades pode nos clarificar sobre os mecanismos físicos presentes na evolução desses ambientes.

1.5 Relação de morfologia-densidade

As galáxias elípticas e lenticulares, protagonistas da sequência vermelha, são compostas de populações estelares velhas com pouca ou nenhuma formação estelar recente. Em contrapartida, as galáxias espirais são compostas por populações velhas e jovens e com a presença de gás e consequente formação de estrelas. A distribuição

⁷Neste projeto, nós nos referimos as galáxias ativas como as galáxias com elevadas taxas de formação estelar.

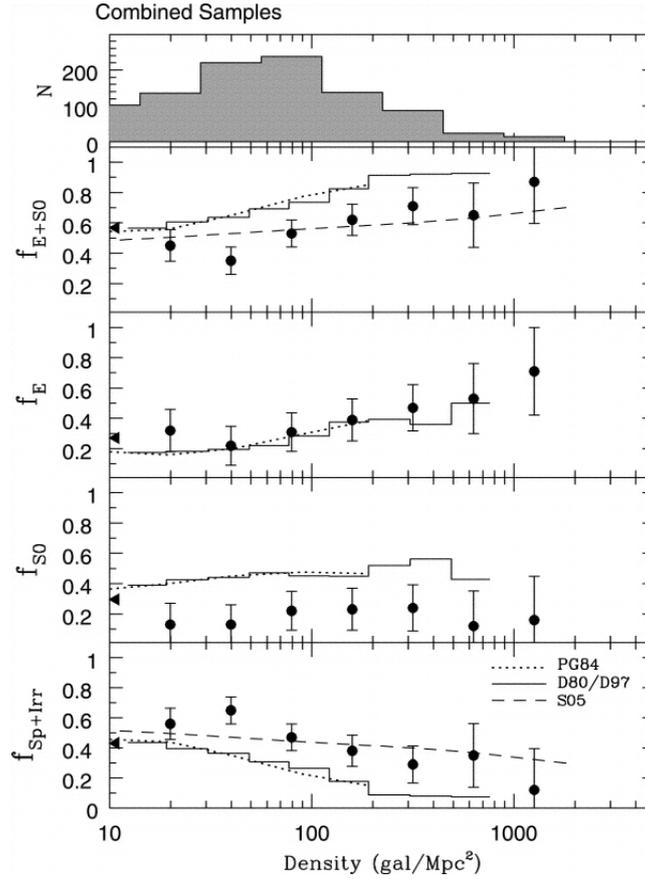


Figura 1.4: Relação morfologia-densidade presente em Postman et al. (2005). As linhas pontilhadas de Postman & Geller (1984) e linhas sólidas de Dressler (1980) e Dressler et al. (1997) representam as frações de galáxias em aglomerados elípticas (E), lenticulares (S0), espirais (Sp) e Irregulares (Irr) em $z \sim 0$. Os pontos pretos de Postman et al. (2005) e linhas tracejadas de Smith et al. (2005) representam as frações de galáxias de aglomerados em $z \sim 1$.

desses objetos no espaço conecta-se com o segundo efeito observacional verificado em aglomerados.

A relação morfologia-densidade foi inicialmente verificada por Dressler (1980) no Universo Local. É caracterizada pelo domínio de galáxias elípticas e lenticulares à medida que analisamos ambientes mais densos. As galáxias espirais e irregulares seguem o comportamento inverso, concentrando-se principalmente em ambientes menos densos.

Assim como a sequência vermelha, desejamos entender quando essa relação se estabeleceu. Postman et al. (2005) analisou 7 aglomerados de galáxias em $z \sim 1$ (círculos pretos na Figura 1.4) e, juntamente com os dados de Smith et al. (2005) (linha tracejada) para galáxias em aglomerados também localizados em $z \sim 1$, comparou a relação com aglomerados do Universo local (linhas sólidas e pontilhadas referentes a Postman & Geller (1984) e Dressler (1980)/Dressler et al. (1997), res-

pectivamente.

Quando consideramos o painel de frações de galáxias passivas (elípticas e lenticulares), observamos que o crescimento de frações para ambientes mais densos já é notável em $z \sim 1$, mas ocorre de maneira mais suave. Porém, o estudo revelou a diferença de evolução de galáxias elípticas e lenticulares.

Ao separar em diferentes componentes, percebemos que as galáxias elípticas possuem frações similares em todo o intervalo de densidade para baixos e altos *redshifts*. Porém, além de as galáxias lenticulares não apresentarem a correlação com a densidade, elas se manifestam em menores frações nos aglomerados em maiores *redshifts*. Em relação contrária, as galáxias espirais decaem em frações com o aumento da densidade, tanto para altos quanto para baixos *redshifts*, mas as galáxias em alto z possuem maiores frações nos ambiente mais densos (Densidade > 20 gal/Mpc²).

Esse resultado concorda com o observado por Butcher & Oemler (1984), sugerindo que as trajetórias evolutivas de galáxias elípticas e lenticulares são distintas, sendo esta fruto da transformação de galáxias espirais.

1.6 Objetivo científico

O aglomerado de galáxias RX J0152.7-1357 (a partir de agora, RXJ0153) está localizado em $z \simeq 0.84$ (Demarco et al. 2005), época que o Universo possuía aproximadamente metade de sua idade (~ 6.5 bilhões de anos). Foi inicialmente descoberto pelo levantamento ROSAT Deep Cluster Survey (Rosati 1997) e posteriormente citado pelo WARPS (Perlman et al. 2002) e Bright SHARC survey (Romer et al. 2000).

Esses estudos em raio X reportam em sua região central uma estrutura binuclear cujos centros se separam por $1.6'$ no plano do céu (Demarco et al. 2005). Posteriormente, Tanaka et al. (2006) ampliou as fronteiras do aglomerado, ao descobrir estruturas filamentosas e dois grupos que acreditamos estar em processo de acreção. Portanto, notamos que o aglomerado demonstra ser uma estrutura dinâmica jovem e que encontra-se em processo de fusão para formar uma estrutura massiva e virializada no Universo local.

O aglomerado é objeto central de diversos estudos como a compreensão das duas regiões de gás intraglomerado em raio X (Jee et al. 2005; Maughan et al. 2003), propriedades da sequência vermelha (Blakeslee et al. 2006; Demarco et al. 2010; Patel et al. 2009b), estrutura dinâmica (Demarco et al. 2005; Girardi et al. 2005), relação de morfologia-densidade (Postman et al. 2005), propriedades como taxa de formação estelar dos objetos (Demarco et al. 2010; Patel et al. 2011), entre outros. Portanto, temos a disposição dados que abrangem o intervalo do infravermelho próximo até o raio X. O aglomerado se mostra um excelente ambiente para darmos prosseguimento ao estudo de como a formação de aglomerados e suas interações gravitacionais podem



Figura 1.5: Imagem do aglomerado RX J0152.7-1357 obtida pelo telescópio espacial *Hubble*. Fonte: Patel et al. (2009b).

modificar a propriedade das galáxias membro.

Neste trabalho, utilizaremos dados espectroscópicos e fotométricos a fim de verificar se os efeitos ambientais já são evidentes em um ambiente jovem e não virializado. O diferencial de nosso estudo está no fato de que incluiremos dados da banda U pelo telescópio VIMOS/VLT que, devido ao desvio para comprimentos de onda mais vermelhos, comporta-se como um excelente traçador de formação estelar recente (banda emitida: ultravioleta distante). Para este aglomerado, os estudos anteriores não utilizaram informações nesse intervalo espectral emitido.

Com as imagens das bandas fotométricas ultravioleta U (VIMOS/VLT) e NUV (GALEX), das bandas fotométricas V, R, i' e z' (Subaru) e infravermelho do J (SofI) e Ks (SofI/WIRCAM) nós identificaremos os diferentes tipos de galáxias de nosso aglomerado. Com o auxílio de um ajuste espectral de energia, nós seremos capazes observar se as propriedades das galáxias, como frações de objetos, taxa de formação estelar específica, idade, tempo de decaimento da taxa de formação e estelar e massa variam entre as subestruturas e com a distância ao centro do

aglomerado e a densidade local.

No Capítulo 2, detalharemos sobre os catálogos e dados utilizados em nossos estudos. No Capítulo 3, descreveremos a metodologia. No Capítulo 4, dispomos os resultados de nossa metodologia, no Capítulo 5 nós finalizamos com uma discussão sobre os resultados e no Capítulo 6 nós concluimos as consequências dos resultados. Neste trabalho, nós utilizamos a cosmologia Λ CDM, sendo $H_0 = 70 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, $\Omega_m = 0.3$ e $\Omega_\Lambda = 0.7$.

Capítulo 2

Amostra

Objetivamos neste trabalho compreender o estágio evolutivo do aglomerado RXJ0153 e conseqüentemente identificar como o ambiente denso está transformando as propriedades físicas das suas galáxias membro. Para tal análise, disporemos principalmente das suas coordenadas equatoriais, do *redshift* e informações morfológicas e fotométricas.

Neste capítulo, nós detalharemos os parâmetros colhidos da literatura e que posteriormente serão manipulados e analisados.

2.1 Catálogos

Baseamos a análise das propriedades físicas do aglomerado RXJ0153 em 4 catálogos principais: Demarco et al. (2010) (**daqui para frente: D10**), Blakeslee et al. (2006) (**daqui para frente: B06**), Tanaka et al. (2006) (**daqui para frente: T06**) e Patel et al. (2011) (**daqui para frente: P11**).

Os primeiros levantamentos para identificação de galáxias membro focaram-se na região central do aglomerado. Demarco et al. (2005) identificaram um total de 102 membros, na região das subestruturas massivas em fusão e vizinhanças próximas ($R < 2$ Mpc). A confirmação das galáxias foi realizada pela obtenção do *redshift* no espectro gerado pelos espectrógrafo FORS, instalado no VLT (*Very Large Telescope*; Appenzeller et al. (1998)). O trabalho analisou o estado dinâmico do aglomerado e investigou as propriedades das populações estelares pelo diagrama cor-magnitude e diagrama cor-cor. As bandas de interesse foram B, R, V e I obtidas pelo *Low Resolution Imaging Spectrometer* (LRIS; Oke et al. (1995)) no Observatório *W. M. Keck* e as bandas do infravermelho próximo J e Ks obtidas pelo SofI no telescópio ESO NTT (Moorwood et al. 1998).

Posteriormente, Demarco et al. (2010) utilizaram os mesmos instrumentos e técnica para adicionar 32 novos objetos, finalizando em uma amostra de 134 galáxias

Parâmetro	unidade	Definição
ID	—	Número de identificação da fonte
RA	deg	Ascensão reta
DEC	deg	Declinação
i_{total}	mag	Magnitude da banda i_{F775W} (MAG_AUTO), obtida pelo programa SExtractor
i_{fitted}	mag	Magnitude da banda i_{F775W} , ajustada pelo programa GALFIT
R_e	"	Raio efetivo, pelo ajuste de curva de luz na banda i_{F775W} com o GALFIT
n	—	índice de Sersic, ajustado na banda i_{F775W} com o GALFIT
Morph	—	Morfologia visual
b/a	—	Razão do semi eixo menor pelo semi eixo maior, ajustado na banda i_{F775W} com o GALFIT
B	—	Parâmetro <i>bumpiness</i> (para definição, consultar artigo)
Σ	—	Densidade superficial de massa (Jee et al. 2005)
$r_{F625W} - i_{F775W}$	mag	cor das magnitudes do Hubble
$\sigma(r_{F625W} - i_{F775W})$	mag	erro da cor
$i_{F775W} - z_{F850LP}$	mag	cor das magnitudes do Hubble
$\sigma(i_{F775W} - z_{F850LP})$	mag	erro da cor
$r_{F625W} - z_{F850LP}$	mag	cor das magnitudes do Hubble
$\sigma(r_{F625W} - z_{F850LP})$	mag	erro da cor

Tabela 2.1: Catálogo de Blakeslee et al. (2006). Número total: 107 galáxias.

Parâmetro	unidade	Definição
Full	—	Ordenação numérica
[TKA2006]	—	Identificação de objetos
RAJ2000	hh:mm:ss.s	Ascensão Reta
DEJ2000	dd:mm:ss.s	Declinação
z	mag	Magnitude da banda z (Suprime-Cam/Subaru)
$V - R$	mag	Cor
$R - i'$	mag	Cor
$i' - z'$	mag	Cor
z_{ph}	—	<i>Redshift</i> fotométrico
z_{sp}	—	<i>Redshift</i> espectroscópico
z_{spmin}	—	Erro inferior <i>Redshift</i> espectroscópico
z_{spmax}	—	Erro superior <i>Redshift</i> espectroscópico

Tabela 2.2: Catálogo de Tanaka et al. (2006). Número total: 192 galáxias.

confirmadas. Para ambos os levantamentos, as galáxias membro foram definidas como aquelas localizadas dentro do intervalo de *redshift* $0.81 < z < 0.87$. O estudo atualizou a análise espectrofotométrica dos efeitos ambientais, inspecionando o comportamento do histórico de formação estelar e evolução da sequência vermelha. As magnitudes utilizadas foram F625W (r_{625}), F775W (i_{775}) e F850LP (z_{850}) pelo *Advanced Camera for Surveys* (Ford et al. 1998) componente do telescópio espacial *Hubble* e novamente J e Ks do SofI, do telescópio ESO NTT.

Blakeslee et al. (2006) utilizaram a amostra de 102 galáxias detectadas por Demarco et al. (2005). O estudo usufruiu das bandas fotométricas F625W (r_{625}), F775W (i_{775}) e F850LP (z_{850}) e do raio efetivo, índice de *Sérsic* (Sérsic 1963) e razão b/a (razão entre o semi eixo menor e semi eixo maior) obtidas pelo ajuste de curva de luz 2D para a magnitude i_{F775W} pelo programa GALFIT (Peng et al. 2002). Os parâmetros permitiram o entendimento das propriedades físicas e estruturais dos aglomerados RXJ0153 e MS 1054-031 (também localizado em $z = 0.83$). Dentre todos os parâmetros disponíveis, destacamos que ambos os catálogos B06 e D10 nos fornecem a classificação visual morfológica dessas galáxias, efetuada por Postman et al. (2005).

Os catálogos Tanaka et al. (2006) e Patel et al. (2011) expandiram as fronteiras do aglomerado RXJ0153 para distâncias ao centro do aglomerado de até 8 Mpc. Tanaka et al. (2006) confirmaram espectroscopicamente os membros com o uso do espectrógrafo FOCAS, componente do telescópio Subaru (Kashikawa et al. 2000). O levantamento identificou dois grupos de galáxias compreendidas dentro da faixa de *redshift* do aglomerado, distantes em aproximadamente 4 e 6 Mpc de seu centro.

Com as informações espectroscópicas, (H_δ e D(4000Å)), e fotométricas (bandas V, R, i' e z'^1 do instrumento *Suprime-Cam* pelo telescópio *Subaru*), eles discutem detalhadamente sobre o histórico de formação estelar, comparando com valores encontrados em regiões de campo e grupos. A análise também permitiu discutir sobre os processos físicos que causam o truncamento de formação estelar.

Finalmente Patel et al. (2011) realizaram um levantamento de campo aberto com um prisma de baixa dispersão presente no espectrógrafo IMACS (Telescópio Baade; Dressler et al. (2011)). Novos 977 objetos foram identificados, localizados tanto na região central quanto nas regiões de grupos e de menores densidades numéricas (campo). O objetivo do estudo foi analisar as taxas de formação estelar em função da densidade local através de 3 indicadores, sendo um deles a distribuição espectral de energia. Assim como Tanaka et al. (2006), utilizaram as bandas V, R, i' e z' do *Suprime-Cam* e Ks pelo instrumento *Wide Field Infrared Camera*, parte do telescópio Du Pont (Persson et al. 2002).

¹Em diversas passagens, nós nos referiremos às bandas fotométricas i' e z' como i e z .

Parâmetro	unidade	Definição
ID	—	Número de identificação da fonte
RA	deg	Ascensão reta
DEC	deg	Declinação
Z	—	<i>redshift</i>
EL	—	Presença de linhas de emissão [OIII] $_{\lambda 3727}$ (0 = sim e 1 = não)
TYPE	—	Morfologia visual
AUTO_R	mag	Magnitude r_{625} , abertura Kron
ERR_AUTO_R	mag	Erro r_{625} , abertura Kron
AP_R	mag	Magnitude r_{625} , abertura circular
ERR_AP_R	mag	Erro r_{625} , abertura circular
AUTO_I	mag	Magnitude i_{775} , abertura Kron
ERR_AUTO_I	mag	Erro i_{775} , abertura Kron
AP_I	mag	Magnitude i_{775} , abertura circular
ERR_AP_I	mag	Erro i_{775} , abertura circular
AUTO_Z	mag	Magnitude z_{850} , abertura Kron
ERR_AUTO_Z	mag	Erro z_{850} , abertura Kron
AP_Z	mag	Magnitude z_{850} , abertura circular
ERR_AP_Z	mag	Erro z_{850} , abertura circular
AUTO_J	mag	Magnitude J, abertura Kron
ERR_AUTO_J	mag	Erro J, abertura Kron
AP_J	mag	Magnitude J, abertura circular
ERR_AP_J	mag	Erro J, abertura circular
AUTO_KS	mag	Magnitude Ks, abertura Kron
ERR_AUTO_KS	mag	Erro Ks, abertura Kron
AP_KS	mag	Magnitude Ks, abertura circular
ERR_AP_KS	mag	Erro Ks, abertura circular
STEL_MASS	M_{\odot}	Massa estelar

Tabela 2.3: Catálogo de Demarco et al. (2010). Número total: 134 galáxias.

Parâmetro	unidade	Definição
ID	—	Identificação do catálogo
RA	deg	Ascensão reta
DEC	deg	Declinação
zmag_auto	mag	Magnitude z, abertura de raio Kron
zmag_col	mag	Magnitude z, abertura circular
Ks_col	mag	Magnitude Ks, abertura circular
zspec	—	<i>Redshift</i> espectroscópio
lmass	log	Massa estelar
density	Mpc^{-2}	Densidade Local

Tabela 2.4: Catálogo de Patel et al. (2011). Número total: 3326 galáxias.

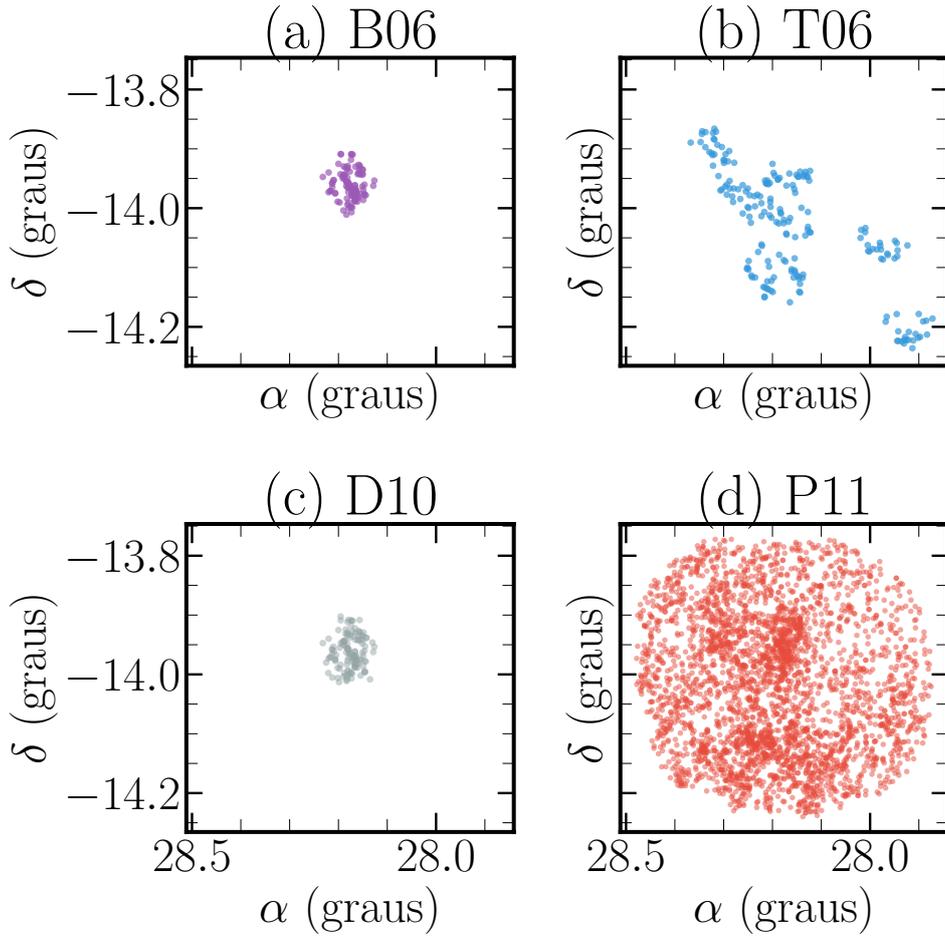


Figura 2.1: Distribuição espacial das galáxias presentes nos catálogos B06 (a), T06(b), D10(c) e P11(d).

Nas tabelas de 2.1 a 2.4 estão dispostos os parâmetros de cada catálogo. Nós usaremos de todos os catálogos as coordenadas equatoriais (ascensão reta e declinação) e *redshift*, quando disponíveis. De D10 e B06, nós extraímos as morfologias, levando em consideração que B06 contém assinalado 2 objetos com núcleo ativo. P11 disponibiliza a densidade local e massas estelares para cada objeto (por um ajuste de distribuição espectral de energia). Porém, como não há a cobertura de todas as galáxias dos demais catálogos, iremos recalcular esses parâmetros.

Sob mesmo princípio, cada trabalho realizou fotometria em imagens de diferentes telescópios, impondo diferentes aberturas e correções. Por essa heterogeneidade, utilizamos as imagens do telescópio *Subaru* para extração e obtenção das magnitudes integradas de bandas espectrais do ótico. Apenas consideraremos as magnitudes no infravermelho próximo J e Ks de D10 e Ks de P11.

Na Figura 2.1, mostramos a distribuição espacial do campo de visão do aglomerado RXJ0153. B06 (Figura 2.1a) e D10 (Figura 2.1c) possuem todas as galáxias

	Classificação															
Número de galáxias	28	16	1	12	17	14	12	0	16	4	0	4	2	4	0	0
Classificação de Vaucouleurs	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Classificação Hubble	Elíptica			Lenticular			Espiral						Irregular			

Tabela 2.5: Representação da classificação de tipo T realizada por Postman et al. (2005) para as galáxias de nosso aglomerado, e definições para a classificação de Hubble. Além disso, consta a quantidade de objetos identificados para cada tipo.

confirmadas dentro do aglomerado. T06 (Figura 2.1b) possui galáxias localizadas em regiões similares a B06 e D10, mas compreendem objetos localizados em agrupamentos e regiões filamentosas distantes da região central. Apesar de não ser diretamente evidente na Figura 2.1, diversos objetos de T06 não encontram-se em *redshifts* próximos a 0.8 ($z_{RXJ0153} \simeq 0.84$). P11 (Figura 2.1d) apresenta galáxias localizadas tanto nas regiões centrais dominadas por B06 e D10, quanto é notável uma maior densidade de objetos nas regiões de grupo cobertas por T06. Também é visível a presença de objetos em regiões afastadas ao aglomerado, em menores densidades numéricas locais. Assim como T06, muitas galáxias não estão compreendidas dentro do intervalo de *redshift* do aglomerado ($z \sim 0.8$). Portanto, posteriormente iremos selecionar os objetos pertencentes ao aglomerado.

Finalmente, computamos um total de 107 objetos em B06, 134 objetos em D10, 192 objetos em T06 e 3326 objetos em P11.

2.2 Morfologia

O aglomerado RXJ0153 é um dos 7 aglomerados em alto *redshift* estudados por Postman et al. (2005), cujo principal objetivo era examinar o comportamento da relação de morfologia-densidade em aglomerados em diferentes épocas do Universo. Nesse trabalho, as galáxias foram visualmente classificadas a partir das imagens obtidas pela *Advanced Camera for Surveys* (ACS; Clampin et al. (2002)), componente do telescópio espacial *Hubble*. Para o nosso aglomerado, foram classificados os objetos no intervalo de magnitude $i_{775} < 23.5$ mag. Desta forma, foi possível realizar uma classificação comparada a de galáxias locais.

Para o aglomerado RXJ0153, Postman et al. (2005) basearam-se na classificação das galáxias confirmadas espectroscopicamente por Demarco et al. (2005). Demarco et al. (2010) adicionaram classificações de morfologia para os 32 membros adicionais. Portanto, temos a disposição a morfologia dos objetos localizados na região central do aglomerado. Não foram classificados os objetos para as regiões mais distantes como os grupos descobertos por Tanaka et al. (2006), e para alguns objetos das regiões centrais que foram identificados posteriormente por Patel et al. (2011).

Os objetos foram classificados com base em sua morfologia observada, e atribuídos

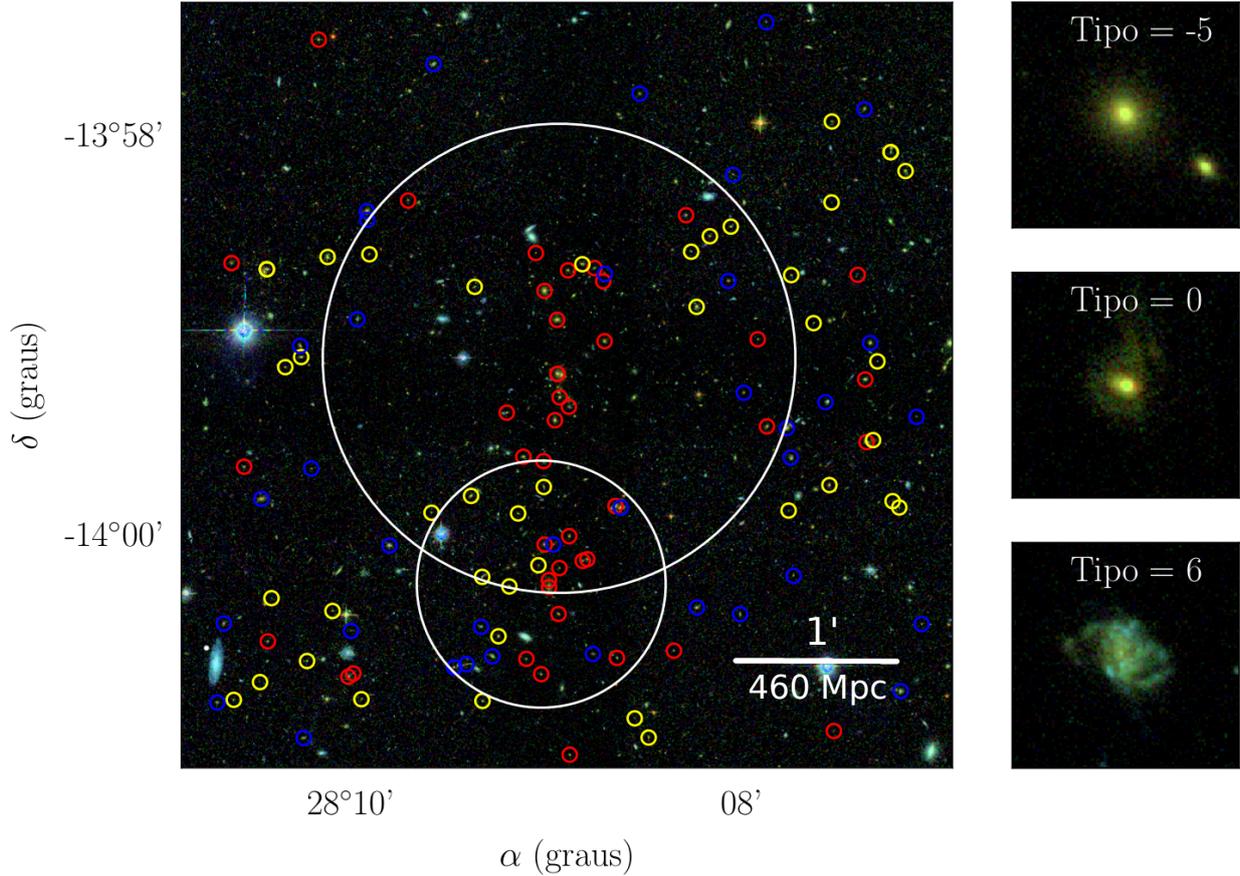


Figura 2.2: À esquerda: Composição dos filtros r_{F625W} , i_{F775W} e z_{F850LP} disponíveis pelo telescópio *Hubble* para a região central do aglomerado. À direita: 3 exemplos de classificações visuais de galáxias de nosso aglomerado de estudo. Os círculos vermelhos representam as galáxias elípticas, os círculos amarelos representam as galáxias lenticulares e os círculos azuis representam as galáxias espirais.

números de “tipo T”, inicialmente definidos por de Vaucouleurs et al. (1976). O intuito é de classificar as galáxias por números discretos no intervalo de -5 a 10. Números negativos, 0 inclusive, são classificados como passivas (elípticas e lenticulares), enquanto números positivos são classificados como ativas (espirais e irregulares). Na tabela 2.5 estão dispostas as classificações baseadas em de Vaucouleurs et al. (1976), as respectivas correspondentes para as classificações de *Hubble* e a quantidade de objetos classificados dessa forma em nossa amostra.

Temos um total de 130 objetos visualmente classificados na região central do aglomerado RXJ0153. Segundo a tabela 2.5, 35% dos objetos foram classificados como galáxias elípticas, 34% como galáxias lenticulares e 32% como espirais (não há galáxias irregulares). A maior presença de galáxias passivas (elípticas + lenticulares) é coerente com as relações de morfologia-densidade previstas para essa região por Postman et al. (2005).

A Figura 2.2 representa a composição dos filtros r_{625} , i_{775} e z_{850} do campo central

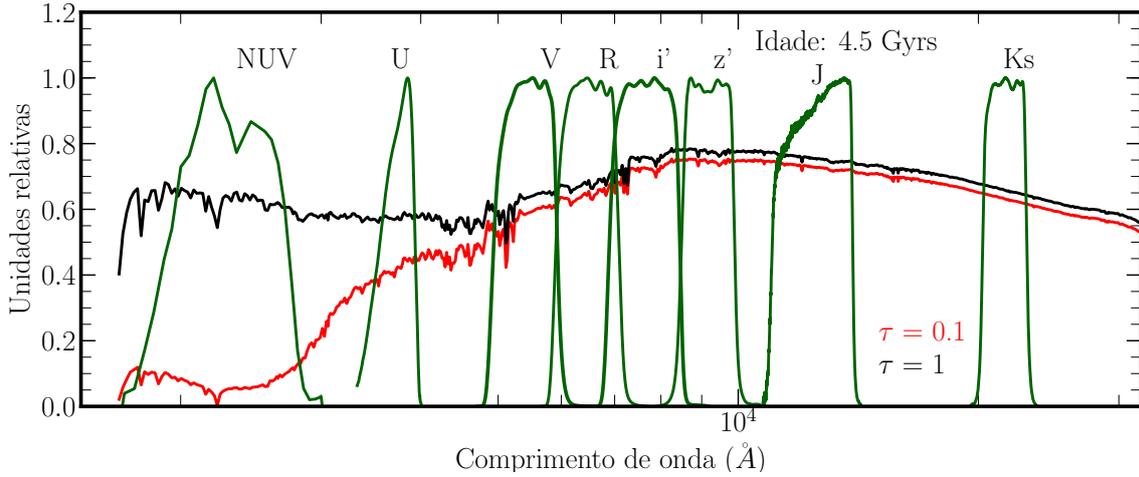


Figura 2.3: Espectro de duas galáxias com tempo efetivo de decaimento $\tau = 0.1$ bilhões de anos (linha sólida vermelha) e $\tau = 1$ bilhões de anos (linha sólida preta), ambos com idade de 4.5 bilhões de anos. As linhas sólidas verdes representam as curvas de transmissão para as bandas empregadas neste projeto: NUV, U, V, R, i' , z' , J e Ks. As unidades estão normalizadas para maior clareza na visualização.

do aglomerado, observado pelo telescópio espacial *Hubble*. As cores dos objetos catalogados por D10 representam galáxias elípticas em circunferências vermelhas, lenticulares em amarelo e espirais em azul. Os círculos brancos maior e menor representam os raios viriais das subestruturas norte e sul, respectivamente, definidas por Patel et al. (2009b)². Além disso, na lateral direita, apresentamos três exemplos de galáxias classificadas como elíptica ($T = -5$), lenticular ($T = 0$) e espiral ($T = 6$).

2.3 Imagemento

A escolha dos filtros é fundamental para que nós possamos identificar e analisar parâmetros físicos das galáxias em função do ambiente do aglomerado. Na imagem 2.3, observamos que tipo de informação espectral, e conseqüentemente, que tipo de propriedade física será possível ser avaliada pelas magnitudes integradas utilizadas neste trabalho.

Como ilustração, modelamos os espectros de duas galáxias com idade de 4.5 bilhões de anos (Gyrs) pelo programa *PEGASE* (Fioc & Rocca-Volmerange 2019), em um intervalo desde o infravermelho distante ao ultravioleta distante. Assumimos o histórico de formação estelar caracterizado pelo declínio exponencial da taxa de

²Os raios viriais foram obtidos pela dispersão de velocidades da distribuição de velocidades radiais das galáxias pertencentes as subestruturas norte e sul.

formação estelar, com tempo efetivo de decaimento τ^3 ($\text{SFR}(t) \propto e^{-\frac{t}{\tau}}$).

As linhas verdes sólidas correspondem as curvas de transmissão das bandas empregadas neste projeto (NUV, U, V, R, *i*, *z*, J e Ks). Nós normalizamos as unidades do espectro e curvas de transmissão para que seja claro qual o intervalo espectral no qual o fluxo integrado será detectado.

O espectro em vermelho possui tempo efetivo de decaimento $\tau = 0.1$ bilhão de anos e o espectro em preto um tempo efetivo de $\tau = 1$ bilhão de anos. Para a idade de 4.5 bilhões de anos, o espectro vermelho representa uma galáxia com pouca contribuição de fluxo de radiação na região do ultravioleta (banda U e NUV), caracterizando uma galáxia passiva. O espectro preto corresponde a uma galáxia ativa, ou seja, com um maior fluxo emitido no ultravioleta próximo e distante devido à presença de estrelas massivas e quentes formadas nas últimas centenas de milhões de anos.

Como queremos simular uma galáxia localizada em $z \sim 0.84$, devemos considerar o desvio para o vermelho do comprimento de onda. Logo, convertemos a distribuição emitida para a distribuição de fluxo observado. Nas seções subsequentes, descreveremos todas as informações fotométricas das 8 magnitudes utilizadas neste trabalho. A tabela 2.6 mostra um resumo da instrumentação utilizada nas observações nas diversas bandas fotométricas neste trabalho.

2.3.1 Fotometria nas bandas óticas

As magnitudes óticas coletadas pelo telescópio *Subaru*, V, R, *i* e *z* caem exatamente na região do ótico e ultravioleta próximo do espectro emitido pelas galáxias em $z \simeq 0.84$. Aliadas às bandas ultravioletas (U e NUV), estas magnitudes serão úteis para que possamos identificar as galáxias passivas e ativas e as em processo de transição de um tipo a outro. Além disso, poderemos obter informações sobre a massa estelar e idade dos objetos de forma a analisar possíveis correlações com o ambiente em que habitam.

O telescópio *Subaru* de 8.2 metros se localiza no Observatório de *Mauna Kea*, Havaí. Até o ano de 2017, dispunha-se em seu foco primário o instrumento *Subaru Prime Focus Camera* (Suprime-Cam), importante em nosso trabalho (Miyazaki et al. 2002). Compunha um total de 9 filtros de banda larga e 4 filtros de banda estreita, cobrindo desde o ótico ao infravermelho próximo. Um importante diferencial é o fato de que carregava um total de 10 CCDs⁴ em mosaico, possibilitando um amplo campo de visão de $34' \times 27'$ e escala de *pixel* de $\sim 0.2''$. Este campo de visão permite que as 4 imagens referente às quatro bandas fotométricas englobem todos os objetos

³Em inglês, o termo refere-se a *e-folding time*

⁴CCD (*Couple charged device*) - dispositivo de carga acoplada. É o detector instalado no foco primário do telescópio para realização de imageamento.

de nossa amostra.

2.3.2 Fotometria na banda U

Na literatura, a separação entre galáxias passivas e ativas comumente é efetuada pelas diferentes distribuições desses tipos de galáxias em um diagrama cor-magnitude. São escolhidas bandas dispostas anteriormente e posteriormente a descontinuidade de 4000\AA ⁵.

Porém, atentemo-nos novamente para a Figura 2.3. As magnitudes V, R, *i* e *z* compreendem o intervalo espectral do ultravioleta próximo e ótico emitido. Os espectros reproduzem galáxias de mesma idade de 4.5 bilhões de anos, mas com diferentes tempos efetivos de decaimento: $\tau = 1$ bilhão de ano (linha sólida preta) e $\tau = 0.1$ bilhão de anos (linha sólida vermelha).

Para comprimentos de onda inferiores a 5000\AA , verificamos que a galáxia com $\tau = 1$ bilhão de anos possui um maior fluxo de emissão em comparação com galáxias com $\tau = 0.1$ bilhão de anos. Podemos afirmar que a galáxia em linha vermelha tem comportamento passivo enquanto a galáxia em linha preta possui um comportamento ativo.

Porém, notamos que o fluxo de radiação para comprimentos de onda maiores que 5000\AA são similares. Portanto, a escolha de filtros óticos que localizam-se anteriormente e posteriormente ao decaimento de 4000\AA ($\lambda_{\text{observado}} = 7360\text{\AA}$, compreendido na banda i_{755}), como por exemplo V - *z* e R - *z* não gerará uma grande diferença nos valores de cor para que façamos uma discriminação entre esses dois tipos eficientemente.

Logo, torna-se evidente que há uma degenerescência de cor para objetos com idades de populações estelares similares, mesmo que possuam históricos de formação estelar diferentes.

As magnitudes ultravioletas nos são essenciais para que essa degenerescência seja quebrada, e para que possamos ter um bom traçador de formação estelar recente. Dado o efeito de desvio para o vermelho, a magnitude U nos permite observar o fluxo emitido referente ao ultravioleta próximo para galáxias em $z \simeq 0.84$.

Trabalhamos com os dados da banda U ($\lambda_{\text{eff}} = 3700\text{\AA}$) coletados pelo VIMOS (*Visible Multi-Object Spectrograph*), que está instalado no foco primário da unidade 3 (*Melipal*) do VLT. O instrumento possui um total de 6 filtros, cobrindo a região espectral do ótico e infravermelho próximo ($3600 - 10000\text{\AA}$).

O telescópio VLT (*Very Large Telescope*) é operado pela ESO (*European Southern*

⁵A descontinuidade de 4000\AA é caracterizada pela queda do fluxo de radiação para comprimentos menores do que 4000\AA . Esse fenômeno ocorre pela intensa absorção causada pela sobreposição de linhas de absorção (Ca, H e K, Na), presentes na atmosfera estelar de estrelas velhas e pouco massivas.

Observatory) e localiza-se no Observatório Paranal, no Chile. É composto por 4 telescópios principais de espelho primário com diâmetro de 8.2 metros e 4 telescópios auxiliares móveis de 1.8 metros.

Os filtros foram desenvolvidos de forma que o instrumento foque-se no estudo do Universo jovem, iniciando sua operação em 2002. As possibilidades de observação seguem o modo de imageamento de campo largo e espectroscopia multi-objeto. O instrumento é composto de um mosaico de 4 CCDs permitindo um campo de visão $7' \times 8'$ em cada CCD separados por uma distância de $2'$.

Obtivemos a imagem da banda fotométrica U no período de observação 83A⁶ e ela encontra-se atualmente disponível no banco de dados da ESO pela seguinte identificação: 383.A-0523(A). Pela disposição e tamanho dos CCDs, o campo de visão do instrumento não é suficiente para cobrir todas as galáxias de nossa amostra. Portanto, executamos diversos apontamentos para englobar o maior número de objetos possíveis.

O resultado pode ser observado na imagem 2.4, na qual expomos a imagem da banda U. Em círculos verdes, destacamos as galáxias que pertencem ao aglomerado que serão identificadas no próximo capítulo. Além disso, sobreposmos em linha pontilhada azul claro o campo de visão de $34' \times 27'$ do telescópio *SUBARU* e em linhas tracejadas brancas o campo de visão das imagens do *Hubble*, anteriormente exibidas na imagem 2.2.

Como podemos perceber, o campo de visão fruto de distintos apontamentos englobou a maior parte dos objetos mas houve uma perda de 23 objetos localizados nas lacunas da composição de imagem. As principais informações sobre a imagem estão descritas na tabela 2.6.

2.3.3 Fotometria na banda NUV

As magnitudes que abrangem o intervalo do ultravioleta no espectro eletromagnético são essenciais para que possamos analisar se as galáxias do aglomerado apresentam formação estelar recente. Portanto, utilizamos a magnitude do ultravioleta próximo (NUV), disponibilizadas pelo telescópio GALEX.

O GALEX (Martin et al. 2005) é o telescópio espacial parte de uma missão da NASA, e liderado pela *California Institute of Technology*. Possui uma abertura de 50 centímetros e a disposição dois filtros de banda larga, cobrindo o ultravioleta distante (FUV - 1350-1750Å) e próximo (NUV - 1750-2800Å).

Seu principal objetivo foi investigar como ocorre a formação estelar dentro das galáxias, desde o Universo distante ao recente. O telescópio iniciou a coleta de dados em 2003, permanecendo ativo até o início de 2012. A sua escala de *pixel*

⁶PI: Roderik Overzier, tempo de exposição = 702 segundos.

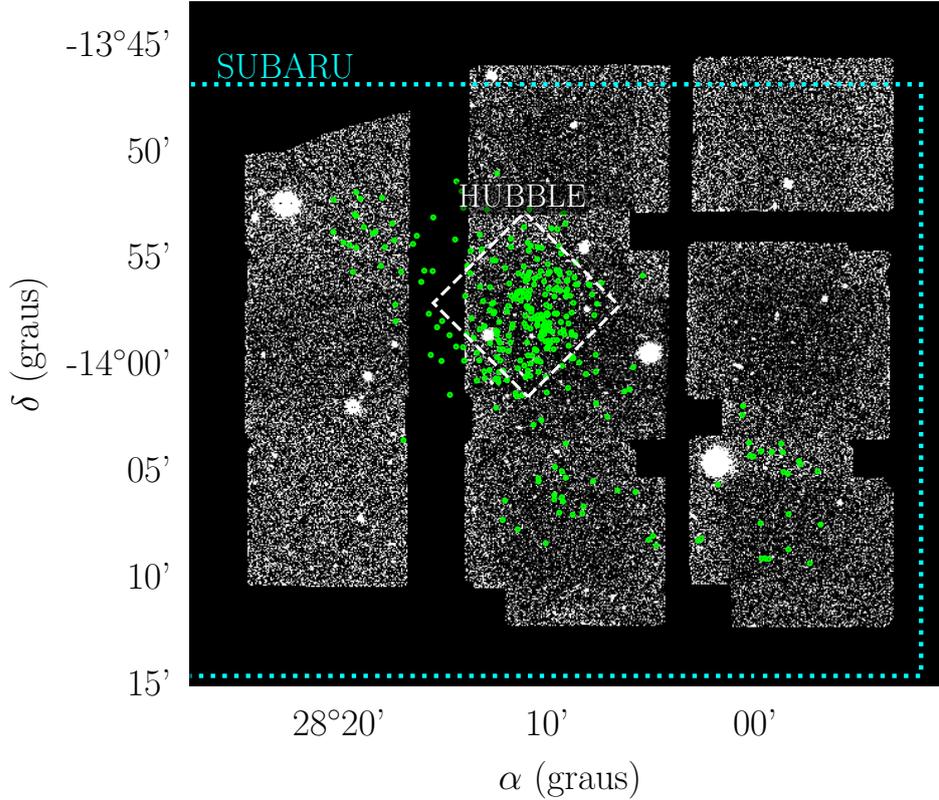


Figura 2.4: Representação da imagem do VIMOS/VLT, resultado do mosaico de CCDs. Os círculos verdes representam os objetos de nossa amostra, que serão selecionados no próximo capítulo. A linha pontilhada azul claro compreende o campo de visão das imagens da banda ótica do *Subaru* e a linha tracejada compreende o campo de visão do *Hubble*. O campo de visão do GALEX contém toda a região mostrada, portanto não demonstramos suas fronteiras.

para ambas as bandas é de $1.5''$ e campo de visão de 1.2° de diâmetro. Na Figura 2.4, não representamos o campo de visão do GALEX pois este contém toda a área representada e sua fronteira excede os limites da imagem da banda U.

Neste trabalho, obtivemos a imagem no ultravioleta próximo (NUV) para o aglomerado RXJ0153. Pelo campo de visão disponibilizado pelo instrumento, torna-se suficiente para que todas as regiões de interesse sejam englobadas na imagem. Trabalhamos com uma imagem centrada no aglomerado, obtida no modo de imageamento direto. Para esta banda espectral, temos uma escala de *pixel* em nossa imagem de $1.5''/\text{pixel}$ e FWHM⁷ de $5.3''$. As principais informações sobre a imagem estão descritas na tabela 2.6.

⁷FWHM é a abreviação para a expressão em inglês *Full Width Half Maximum*, ou largura à meia altura. É caracterizada pela distribuição bidimensional de luz de um objeto pontual astronômico e chamada de *seeing* das observações que quantifica a qualidade da imagem.

Banda	Instrumento (Telescópio)	Campo de visão	Escala de <i>pixel</i> (" /pixel)	λ_{eff} Å	FWHM "	Ponto Zero mag
NUV	GALEX (GALEX)	1.2° diâmetro	1.5	2271	5.3	20.10
U	VIMOS (VLT)	4 CCDs: 7' x 8'	0.25	3700	1.26	25.92
V	Suprime-Cam (Subaru)	34' x 27'	0.2	5493	0.65	34.70
R	Suprime-Cam (Subaru)	34' x 27'	0.2	6550	0.65	34.86
i'	Suprime-Cam (Subaru)	34' x 27'	0.2	7709	0.65	34.05
z'	Suprime-Cam (Subaru)	34' x 27'	0.2	9054	0.65	32.76
J	SofI (ESO NTT)	4.9' x 4.9'	0.29	12470	0.95	27.26
Ks	SofI (ESO NTT)	4.9' x 4.9'	0.29	21620	0.94	26.74
Ks	<i>Wide Field Infrared Camera</i> (DuPont)	26' X 26'	0.7	21500	0.7	na

Tabela 2.6: Informações sobre as imagens das bandas fotométricas de nossa amostra. Indicamos o instrumento e respectivo telescópio, o campo de visão da imagem, a escala de *pixel*, *seeing* (FWHM) e ponto zero de magnitude.

2.3.4 Fotometria nas bandas J e Ks

Temos disponíveis as magnitudes J em D10 e Ks tanto em D10 e P11. As magnitudes J e Ks por D10 são fruto das observações do instrumento SofI (ESO NTT; Moorwood et al. (1998)) e Ks de P11 pelo instrumento *Wide Field Infrared Camera* (telescópio DuPont; Wilson et al. (2003)). Não temos as imagens, apenas as magnitudes já medidas e disponibilizadas em um catálogo.

Para o *redshift* do aglomerado, as bandas nos dão informações sobre a luz do infravermelho próximo advinda da população de estrelas velhas, não afetadas pela formação estelar recente. Logo, neste trabalho, utilizaremos essas magnitudes para obter informações sobre a massa e idade do conteúdo estelar das galáxias, através de um ajuste de distribuição espectral de energia.

Temos a informação de J e Ks de 111 objetos presentes na região central do aglomerado. Para P11, temos um total de 262 objetos presentes tanto na região central, quanto nas regiões mais externas. Dentre os objetos, existem 78 objetos que possuem valores de magnitude Ks tanto em D10 e P11.

Na tabela 2.6, dispomos as principais informações sobre as bandas fotométricas.

Capítulo 3

Metodologia

Neste capítulo, descreveremos a metodologia adotada a fim de entendermos sobre o estágio de evolução das galáxias no aglomerado.

3.1 Corte por redshift

Neste trabalho, usufruímos de 4 catálogos (B06, D10, T06, P11) contendo galáxias confirmadas e candidatas a membro do aglomerado de galáxias RXJ0153. Pontuamos pela Figura 2.1 que os catálogos B06 e D10 são caracterizados apenas por objetos confirmados espectroscopicamente, e localizados na região central do aglomerado.

Os catálogos P11 e T06 possuem objetos localizados dentro da faixa de *redshift* espectroscópico do aglomerado RXJ0153, mas sofrem a contaminação de objetos de fundo ou mais próximos localizados no mesmo campo de visão. Para esses catálogos, eliminaremos os objetos que estão fora de um intervalo de *redshift* a ser decidido que defina as fronteiras entre o aglomerado e o campo.

Nós impomos limites de *redshift* inferior e superior como condição para decidir se uma galáxia da amostra pertence ao aglomerado. Estão dispostas na Figura 3.1 as distribuições de *redshift* para os diferentes catálogos. Demarco et al. (2005) definiram o intervalo de *redshift* para o aglomerado em $0.81 < z < 0.87$. Esses limites são representados na Figura 3.1 pelas linhas sólidas laranjas. Portanto, confirmamos que os catálogos P11 (linha sólida verde) e T06 (linha tracejada roxa) possuem uma grande contaminação de objetos externos ao aglomerado.

O catálogo P11 contém um total de 3326 objetos. Apesar de não visíveis na Figura 3.1, existem 2973 galáxias ($\sim 88\%$ do catálogo P11) cujos valores de *redshift* espectroscópicos não estão disponíveis. Logo, nós representados no gráfico as 353 galáxias restantes com um evidente pico no *redshift* central do aglomerado ($z \simeq 0.84$). Estão presentes objetos contaminantes em um intervalo de $z_{\text{minimo,Patel}} = 0.6$ até $z_{\text{maximo,Patel}} = 1.2$.

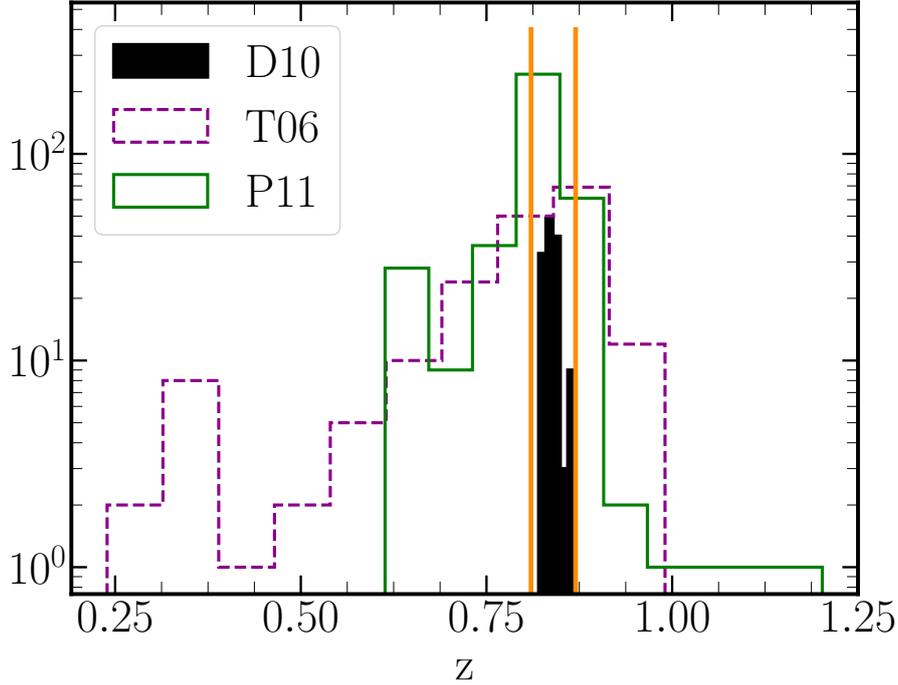


Figura 3.1: Distribuição de *redshift* para os catálogos de D10 (preto preenchido), T06 (linha tracejada roxa) e P11 (linha sólida verde). O catálogo B06 está contido em D10. As duas linhas sólidas laranjas representam o intervalo de $0.81 < z < 0.87$, atribuído ao aglomerado por Demarco et al. (2005). Percebemos picos evidentes no *redshift* central do aglomerado em todos os catálogos porém uma grande contaminação de galáxias em intervalos externos ao escolhido por D10 nos catálogos P11 e T06.

T06, cuja distribuição de *redshift* é representada em linha tracejada roxa na Figura 3.1, apresenta um total de 192 objetos. Estes estão dispostos em uma região mais abrangente entre $0.2 < z < 1$. Assim como P11, observamos na distribuição de T06 um pico de *redshift* próximo à região central do aglomerado RXJ0153. Por fim, o histograma preenchido em preto representa a distribuição de *redshift* para os objetos catalogados por D10 (necessariamente contendo B05), todos confirmados como membros internos ao aglomerado. As linhas sólidas laranjas compreendem as regiões $0.81 < z < 0.87$, sendo este o intervalo que utilizaremos neste trabalho para restringir as galáxias membro.

Nós baseamos a escolha desse intervalo no estudo dinâmico conduzido por Demarco et al. (2005). A análise obteve a dispersão de velocidades do aglomerado gerada a partir da distribuição de velocidades radiais de 102 galáxias analisadas. Portanto, o intervalo de *redshift* escolhido abrange $3\sigma_{Demarco}$ da distribuição de velocidades radiais encontrada ($\sigma_{Demarco} \sim 1600$ km/s).

Inicialmente, P11 e T06 apresentavam um total de 3326 e 192 objetos em seus respectivos catálogos. Como resultado do corte, temos a disposição um total de 272 e 86 galáxias de P11 e T06, respectivamente. Para os catálogos de B05 e D10, não houve alteração pois ambos são base para a definição dos intervalos de *redshift* do aglomerado RXJ0153. Como resultado até o momento, temos para B05 um total de 107 objetos membros e para D10, um total de 134 objetos membros.

3.2 União de catálogos

Após retirarmos as galáxias de campo de todos os catálogos, nós iremos identificar as galáxias presentes em mais de um levantamento e gerar um catálogo unificado. As galáxias contempladas em apenas em dos levantamentos não são excluídas. Nós definimos como critério de identificação uma distância angular máxima entre os objetos.

A escolha de uma separação angular de intersecção entre objetos deve evitar a combinação equivocada de objetos distintos e evitar que não seja identificado a contrapartida de um objeto em diferentes catálogos. Levando em consideração inspeções visuais, adotamos $2''$ como um distanciamento capaz de impedir ou minimizar os problemas citados. A união gerou uma única tabela contendo a combinação de todos os catálogos e seus respectivos parâmetros.

Anteriormente a união, nós testamos para cada catálogo quais são as distâncias mínimas entre os objetos. Notamos aproximadamente 6 pares de galáxias cujas distâncias entre os objetos são menores que $2''$. Portanto, quando nosso código identificava mais de uma galáxia em um raio de $2''$, escolhemos como mesmo objeto aquele que apresentou uma menor distância angular. Para checar se a decisão adotada era conveniente, realizamos uma inspeção visual nesses casos especiais e notamos que não havia nenhum tipo de erro de identificação.

Como resultado final, temos um total de 351 objetos identificados. 180 objetos foram identificados por apenas um dos catálogos, 169 objetos possuem detecção em mais de um levantamento e apenas 2 possuem informações completas de todos os catálogos.

Como dito da seção 2.1, não possuímos informações espectroscópicas do catálogo de B06. Nós identificamos 8 objetos presentes apenas no catálogo B06, portanto, eliminamos tais objetos resultando em um total de 343 objetos membros do aglomerado identificados nesta etapa.

Na Figura 3.2, observamos o resultado final da união. Diferenciamos os pontos de acordo com seu catálogo de origem, e os sobrepomos, para que seja nítido quais objetos estão contidos em mais de um catálogo. A cruces vermelhas, localizadas majoritariamente nas regiões centrais, são originárias do catálogo de D10, os pontos

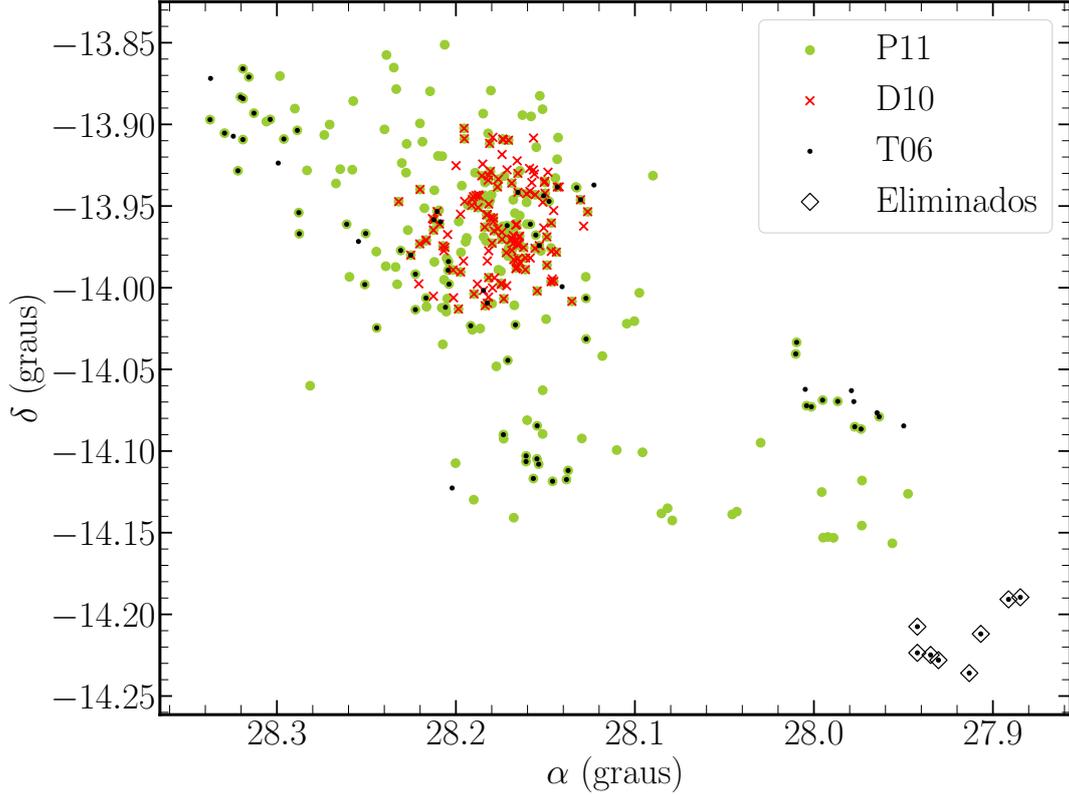


Figura 3.2: Distribuição espacial das galáxias do aglomerado RXJ01253. Sobreponemos os pontos de cada catálogo a fim de evidenciar os objetos disponíveis. As cruces vermelhas representam objetos de D10, os pontos pretos representam objetos de T06 e os pontos verdes claros representam objetos de P11. Os diamantes vazados pretos são objetos eliminados de nossa amostra.

verdes claros pertencem ao catálogo de P11 e os pontos pretos pertencem ao catálogo T06.

Os diamantes vazados representam 8 objetos com declinação $\delta < -14.17^\circ$, originados do catálogo T06. Após análise, percebemos que eles se encontram afastados dos grupos principais e estão demasiadamente espalhados pelo intervalo de $0.81 < z < 0.87$. Por não apresentarem uma característica de agrupamento, eliminamos esse objetos de nossa amostra. Logo, o resultado final dessa etapa se dá em um total de 335 galáxias.

3.3 Fotometria

Nesta seção, nós discutiremos sobre o processo de obtenção das magnitudes integradas das galáxias de nossa amostra. Conforme evidenciado na seção 2.3, cada banda fotométrica nos fornece informações essenciais sobre as propriedades físicas dos objetos.

Para todas as magnitudes integradas, nós corrigimos o avermelhamento causado

pela poeira interestelar presente na Galáxia (Schlafly & Finkbeiner 2011).

3.3.1 SExtractor

Neste processo, nós empregamos o programa SExtractor nas imagens da banda U do instrumento VIMOS (VLT) e na bandas óticas V, R, *i* e *z* do instrumento *Suprime-Cam* (telescópio *Subaru*). Informações técnicas sobre as imagens podem ser obtidas na seção 2.3, do Capítulo 2.

Source Extractor (SExtractor) (Bertin & Arnouts 1996) é um programa cuja finalidade é de performar a detecção e fotometria de fontes de emissão em uma imagem em formato *fits*.

Como primeiro passo, nós fornecemos ao programa a imagem e as informações essenciais para o processo de detecção, como por exemplo o ganho do CCD, escala de *pixel*, o ponto zero de magnitude e o *seeing*¹ da observação.

O programa identifica a média e desvio padrão que caracteriza a distribuição normal de ruído do céu. À seguir, é definido o limite de detecção como 1.5 vezes o desvio padrão da distribuição do céu. Após a identificação do limite do céu, o programa segmenta a imagem: detecta como objeto astronômico uma quantidade mínima de *pixels* agrupados que apresentam valores acima do limite de detecção de um *pixel*.

Com a identificação das regiões consideradas como objetos, o programa SExtractor calcula a astrometria e fotometria das fontes de emissão, a partir das aberturas que predeterminamos no arquivo de entrada. Como saída final, o programa gera um catálogo contendo a identificação de todos os objetos detectados na imagem, suas respectivas fotometrias e demais parâmetros disponíveis e/ou desejados.

Temos um total de 4 bandas óticas (V, R, *i* e *z*) e 2 infravermelhas (J e Ks) disponíveis nos 4 catálogos (B06, D10, 706 e P11). Entretanto, devido a heterogeneidade de instrumentos de coleta e de aberturas, decidimos realizar uma nova fotometria para as magnitudes de banda ótica, que será descrita na subseção abaixo. Além disso, também medimos pelo programa SExtractor a magnitude da banda ultravioleta U. Tanto para as bandas óticas e infravermelhas quanto para a banda ultravioleta, mantemos a homogeneidade escolhendo como abertura o raio de Kron para a integração do fluxo total, resultando como saída do programa a magnitude integrada comumente conhecida por *MAG_AUTO* (Kron 1980).

¹O *seeing* é definido como tamanho o angular de uma estrela devido a efeitos atmosféricos (FWHM, ou, largura à meia altura), em segundos de arco, para uma determinada imagem. Esse parâmetro identifica a qualidade de uma observação e é influenciado pela altitude do observatório e as condições atmosféricas da noite de observação. A FWHM de uma estrela em uma imagem inclui a PSF instrumental.

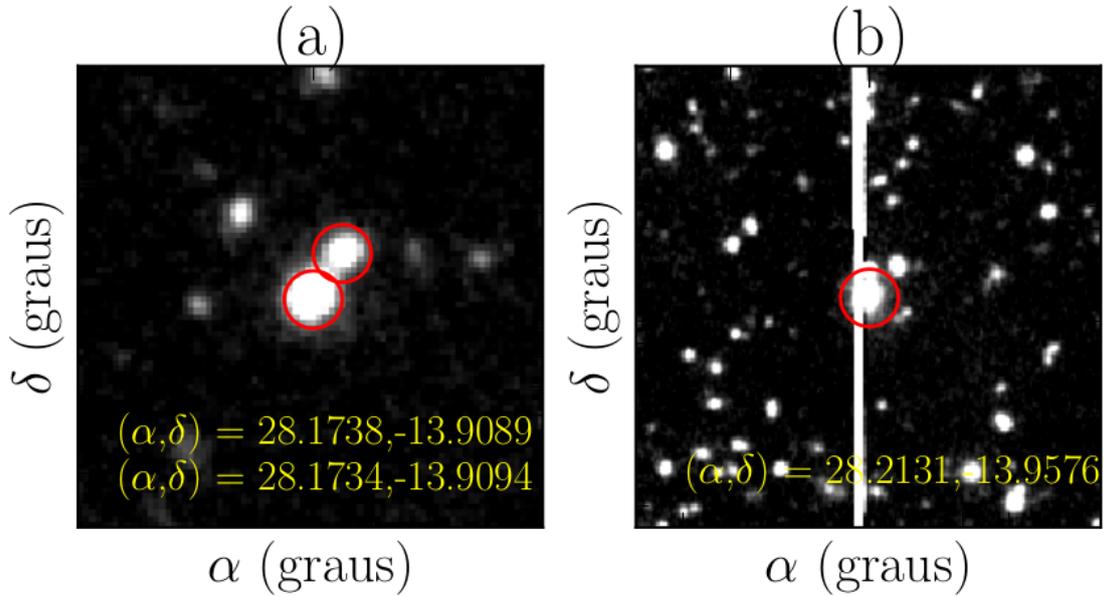


Figura 3.3: As imagens em (a) e (b) representam regiões do campo de visão da banda fotométrica z . (a) Exemplo de um par de galáxias membro do aglomerado. (b) Galáxia de nossa amostra contaminada pelo artefato de uma estrela extremamente saturada. Para ambas imagens, as galáxias de exemplo estão circuladas em vermelho.

3.3.2 Bandas V, R, i e z .

As quatro imagens obtidas com o telescópio *Subaru* compreendem uma região retangular do céu com dimensão $34' \times 27'$ (para visualização desse campo, consultar Figura 2.4). A distância do centro do aglomerado até o objeto mais distante de nosso catálogo é de $\sim 17'$. Portanto, temos garantido que todos os objetos estão compreendidos dentro de cada imagem de bandas óticas do *Subaru*.

Entre todos os parâmetros os quais o SExtractor é capaz de computar, limitamos a uma saída contendo as coordenadas equatoriais ascensão reta e declinação e a magnitude de Kron e seu erro associado.

Conforme modo permitido pelo programa (*double-image mode*), compelimos à imagem da banda z a base para a detecção das fontes de emissão pois obtém a maior contribuição de fluxo por estrelas de idade intermediária a velhas entre todas as bandas óticas. Nós realizamos a fotometria dessa bandas e nas demais V, R e i . No total, detectamos um total de 124712 objetos. Como não é possível realizar a fotometria diretamente pelas posições das galáxias membro do aglomerado RXJ0153, identificamos à seguir quais dos objetos detectados são galáxias de nosso catálogo.

Da mesma maneira como unimos os catálogos, nós associamos às galáxias de nossa amostra as fontes detectadas na imagem da banda z com distâncias angulares menores que $2''$. Caso houvesse mais de um objeto detectado dentro desse raio, escolheríamos aquele de menor separação angular. Conferimos visualmente todos os

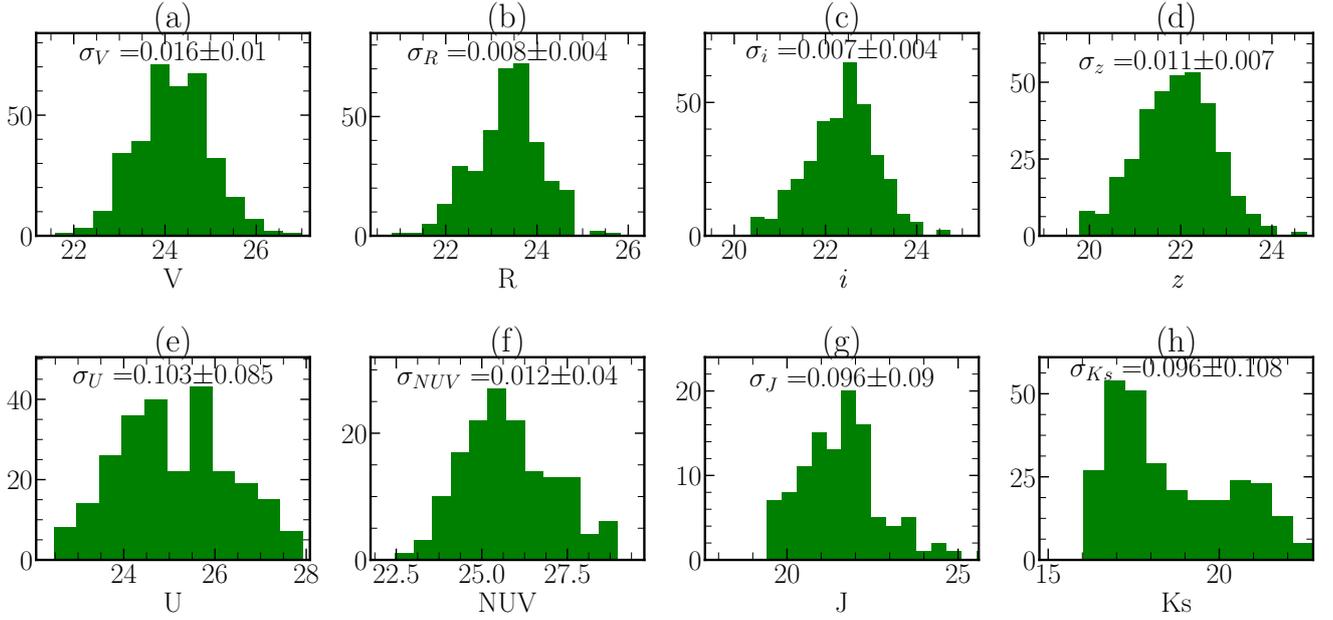


Figura 3.4: Distribuição das magnitudes. O índice σ representa a média e desvio padrão dos erros das magnitudes integradas.

objetos na imagem da banda z , dando atenção especial àquelas 6 fusões já observadas na união dos catálogos. Exemplificamos um desses pares na Figura 3.3a. Na imagem, identificamos os objetos pelos círculos vermelhos e estão descritas suas coordenadas equatoriais. Nessa inspeção, não houve objetos mal selecionados.

Entretanto, constatamos que, nas imagens da banda V e R , existem 5 galáxias localizadas próximas a estrelas saturadas ou sofrendo do vazamento de elétrons para *pixels* vizinhos devido a estrelas saturadas. Um exemplo desse problema está representado na Figura 3.3b. Logo, eliminamos esses objetos de nossa amostra.

A Figura 3.4 de (a) a (d) apresenta as distribuições das 4 magnitudes obtidas. Os painéis de (e) a (h) apresentam as distribuições das magnitudes no ultravioleta e infravermelho, descritas abaixo. Tanto para as magnitudes óticas quanto para as magnitudes ultravioleta (NUV e U) e infravermelha (J e Ks) estão indicados nos gráficos a média e o desvio padrão dos erros pela letra grega σ .

3.3.3 Banda U

Devido ao efeito de desvio para o vermelho (*redshift*), a banda U do VIMOS detecta a radiação eletromagnética emitida em $z \simeq 0.84$ dentro na faixa espectral do ultravioleta próximo (conversão do comprimento de onda efetivo da banda U para o equivalente ao efetivo no *redshift* do aglomerado: $\lambda_{eff,emitido} \sim 2000\text{\AA}$).

Portanto, somos capazes de detectar os objetos que contêm estrelas massivas

formadas nos últimos 100 milhões de anos. Esse traçador é crucial em nosso estudo, pois um de nossos objetivos é compreender como ambientes densos influenciam na taxa de formação de estrelas das galáxias membro.

A Figura 2.4 no Capítulo 2 retratou o resultado da observação do instrumento VIMOS no campo de visão do aglomerado RXJ0153. O instrumento é composto de 4 CCDs em mosaico, cada um com uma campo de $7' \times 8'$, separados por uma lacuna de $2'$. Essa configuração não possibilita que o instrumento mapeie integralmente a área de céu ocupada pelo aglomerado em um único apontamento.

Como consequência, a imagem final é resultado de uma composição de apontamentos. Essa combinação gera diferentes profundidades na imagem, significando um valor de ruído de céu não constante. Portanto, o programa SExtractor alcança a homogeneidade desse tipo de ruído com um mapa de pesos. Esta é uma imagem caracterizada por conter as mesmas dimensões da imagem na qual os objetos foram observados mas com as indicações da intensidade de ruído de céu para cada *pixel*.

A Figura 3.5a apresenta o mapa de pesos para a banda U, arquivo de entrada para a detecção de objetos e fotometria operada pelo programa SExtractor. Os tons de cinza configuram a intensidade do ruído de céu *pixel-a-pixel*, de maneira que maiores valores estão associados a cor branca e menores a cor preta. Os pontos vermelhos indicam os membros do aglomerado não detectados na banda U pelo SExtractor e as regiões identificadas pelos retângulos verdes (tanto o claro quanto o escuro), enumerados de 1 a 4, indicam regiões cujos valores de intensidade de ruído contidos em seu interior são similares entre si.

Assim, como descrito no processo anterior, nós utilizamos uma abertura elíptica, segundo o raio de Kron (MAG_AUTO). Como saída, geramos um catálogo contendo as coordenadas equatoriais, a magnitude integrada de Kron e magnitude com abertura circular de raio $2''$. O programa SExtractor detectou um total de 43098 objetos na imagem da banda U, representados pelos pontos pretos na Figura 3.5b. Neste catálogo de saída, nós reconhecemos as galáxias de nossa amostra como aquelas com uma distância menor do que $2''$.

Diferentemente do resultado para o ótico, nossa análise visual detectou 4 galáxias associadas incorretamente. Para esse objetos, modificamos na tabela o valor de magnitude U para nulo.

Além disso, o programa não foi capaz de detectar 85 dos objetos pertencentes ao aglomerado, aparentando portanto não ter formação estelar recente (pontos vermelhos na Figura 3.5a e como triângulos azuis escuros em 3.5b). Dentre esses objetos, 23 estão localizados nas lacunas do CCD. Dos 62 objetos restantes, 20 são classificados morfologicamente como elípticas ou lenticulares, 5 como espirais e as demais não possuem classificações morfológicas.

A Figura 3.5b apresenta como pontos pretos todos as fontes detectadas na ima-

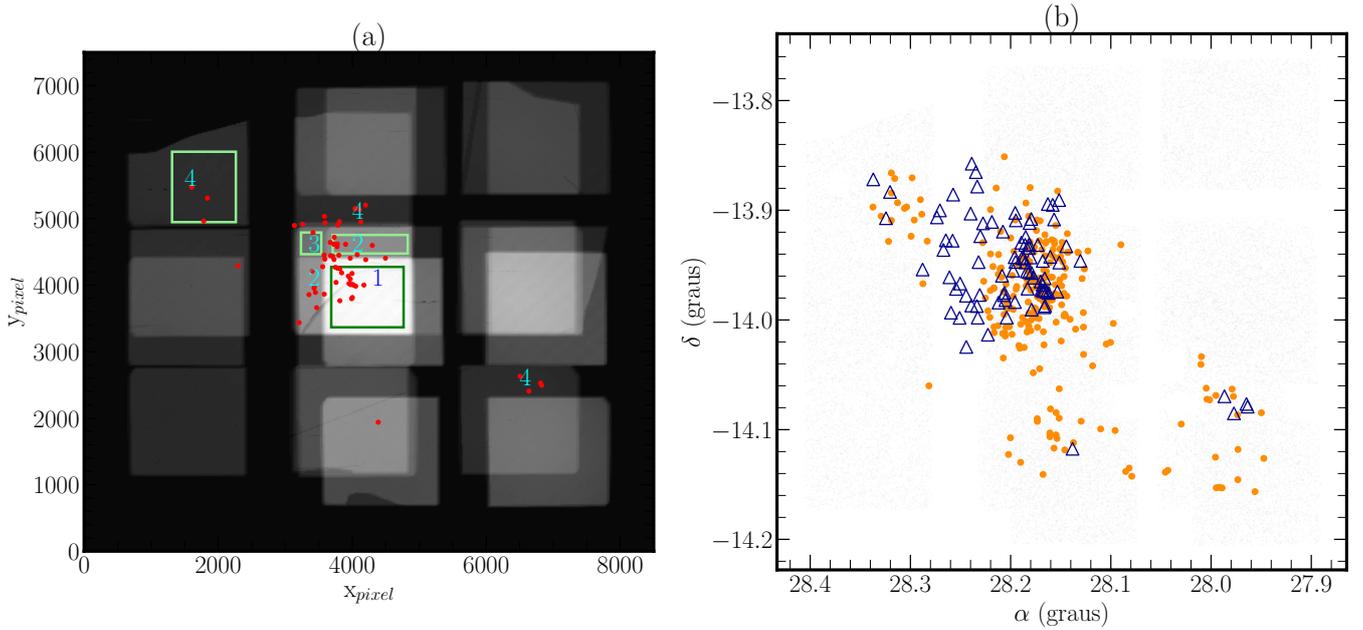


Figura 3.5: (a): mapa de pesos sobrepostos pelos objetos de RXJ0153 sem detecção na banda U como pontos vermelhos. Os números representam as diferentes área com contribuições de *pixel* similares. Cada uma é identificada com um número de 1 a 4. (b): distribuição espacial dos objetos detectados na imagem da banda U (pontos pretos), os objetos de RXJ0153 detectados na banda U (pontos laranjas) e objetos de RXJ0153 não detectados na banda U (triângulos azuis).

gem do VIMOS. Os pontos laranjas representam todas as galáxias do aglomerado detectadas com magnitude U e os triângulos vazados azuis representam aquelas galáxias não detectadas nessa banda (equivalentes aos pontos vermelhos em 3.5a). Podemos perceber que esses objetos estão mais concentrados nas regiões centrais no aglomerado.

Para os 253 detectados, nós mostramos a distribuição de magnitude no histograma da Figura 3.4e.

3.3.3.1 Limites superiores de magnitude para a banda U

Dentre as 85 galáxias não detectadas pelo SExtractor, devemos considerar que a sensibilidade do instrumento pode ter ocasionado a não detecção de objetos com algum resquício não nulo de formação estelar recente. Portanto, nós associamos a esses objetos limites superiores de magnitude.

Nós adotaremos como limites superiores o limite de detecção do instrumento. Isso significa que adotaremos o valor de 3 vezes o desvio padrão da distribuição normal que caracteriza a contribuição do céu.

Como já exposto, a imagem da banda U do VIMOS é composta de diferentes

observações com distintos apontamentos. Essa união resulta em um valor de ruído de céu não homogêneo por toda a imagem. Logo, discriminamos diferentes regiões baseados no mapa de pesos e na localização dos objetos não detectados.

Definimos quatro regiões com intensidades de ruído de céu distintas e numeradas de 1 a 4, representadas em retângulos verdes na Figura 3.5a. Nós iremos determinar a magnitude limite de cada região e associar esses valores aos objetos não detectados na banda U. Cada objeto receberá um limite superior de magnitude baseado na intensidade do ruído de céu de sua localização. Descreveremos à seguir o procedimento executado nos quatro tipos de regiões. Devido à repetição das etapas e similaridades de resultados, esboçamos na Figura 3.6(a-d) apenas os resultados das etapas para a região 1 (representada na Figura 3.5a).

Na Figura 3.6a, nós exibimos novamente a distribuição espacial de todos os objetos detectados pelo SExtractor no campo de visão observado (pontos pretos), pertencentes ao aglomerado ou não. Destacamos em pontos azuis claros as fontes de emissão detectadas contidas na região 1, a fim de destacar a área do procedimento.

O objetivo principal desse método é de identificar áreas de céu dentro de cada região analisada e realizar a fotometria dessas áreas por uma abertura circular de raio igual a $2''$. Inicialmente, nós definimos uma grade de pontos igualmente espaçadas contidas dentro da região 1.

Na Figura 3.6b, temos a distribuição espacial da região 1 e o resultado dessa etapa. Os pontos da grade são representados em vermelho e as fontes detectadas pelo programa SExtractor são representadas em pontos pretos (anteriormente representados em azul claro na Figura 3.6a).

Nós consideramos os pontos da grade como candidatos a centro da abertura no qual obteremos o fluxo integrado. Para verificar que um ponto está centralizado em uma região de céu, nós impomos que ele seja descartado caso haja um objeto detectado pelo programa SExtractor em um raio de $4''$. Caso não haja, consideraremos, à princípio, uma região de céu.

O resultado desse passo está disponível na Figura 3.6c. Os pontos vermelhos restantes representam as posições dos pontos que satisfizeram a condição anterior. Entretanto, percebemos que alguns pontos aceitos como regiões de céu são falsos positivos. Isso ocorre pelo fato de que alguns objetos detectados como fontes de emissão (pontos pretos) possuem diâmetros ângulos superiores a $4''$. Como exemplo, em $(\alpha, \delta) \sim (28.130, -13.965)$ notamos que há um agrupamento de pontos vermelhos dentro da área de uma estrela saturada.

Para eliminar esse problema, nós contamos com o auxílio do mapa de segmentação, uma imagem *fits* produto da saída do programa SExtractor. Ela é caracterizada pelas dimensões similares da imagem original da banda fotométrica U. Mas, cada *pixel* considerado como pertencente a um objeto detectado recebe um

valor inteiro igual à identificação de objetos atribuído pelo programa. *Pixels* não associados a nenhuma fonte de emissão recebe o valor de 0.

Portanto, além da ausência de objetos detectados em um raio de 4" do ponto candidato a região de céu, nós impomos que os *pixels* dentro da caixa de 8" de lado centrada no ponto da grade (pontos vermelhos), devem ter valores iguais a 0 no mapa de segmentação. O resultado dessa etapa é observado na Figura 3.6d.

Com a identificação dos pontos de céu, nós realizamos a fotometria dos objetos para uma abertura circular de 2" (M_2 é a magnitude integrada na banda U em uma circunferência de raio 2"). A Figura 3.7 mostra a distribuição de contagem para as regiões centradas nos pontos vermelhos, similares ao resultado da Figura 3.6d. Obtivemos a média e desvio padrão da distribuição de contagem a partir do ajuste de uma distribuição normal *skew* (linha tracejada preta nos painéis da Figura 3.7), pois observamos uma cauda para valores positivos.

Para obter os limites superiores de magnitude integrada, utilizamos aberturas circulares de raio igual a 2". Porém, conforme descrito nesta seção, obtivemos as magnitudes integradas por uma abertura de raio Kron (parâmetro MAG_AUTO do programa SExtractor). Logo correlacionamos as magnitudes de raio Kron com as aberturas circulares das fontes de emissão detectadas. Nós obtivemos a equação de transformação $M_{AUTO,U} = (0.9918 \pm 0.0005)M_2 + (-0.8363 \pm 0.01)$.

Após o fim das conversões obtivemos os seguintes valores para as regiões de 1 a 4:

- Região 1: 26.91 ± 0.0063 mag
- Região 2: 26.59 ± 0.0115 mag
- Região 3: 26.59 ± 0.0168 mag
- Região 4: 26.03 ± 0.0157 mag

Para atribuir aos objetos não detectados os limites superiores, nós analisamos sua localização no mapa de pesos e decidimos pela intensidade do ruído de céu em qual região o objeto se assemelha. As incertezas foram obtidas através de uma *jackknife resampling*.

3.3.4 Banda J e Ks

Temos a informação de J e Ks de 111 objetos presentes na região central do aglomerado. Para P11, temos um total de 262 objetos presentes tanto na região central, quanto nas regiões mais externas. Entre os objetos, existem 78 objetos que possuem valores de magnitude Ks tanto em D10 e P11.

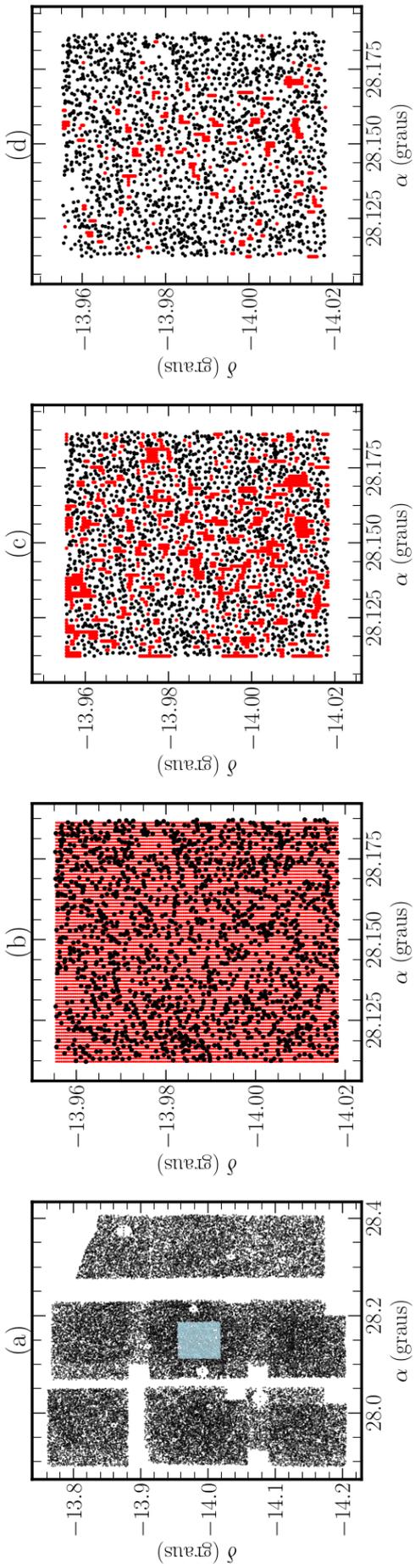


Figura 3.6: Etapas do processo de obtenção dos limites superiores de magnitude e resultados de cada região. (a): Distribuição espacial dos objetos detectados pelo SExtractor na região 1 em preto e pontos da grade em vermelho. (b): Objetos detectados pelo SExtractor na região 1 em preto e pontos da grade em vermelho. (c): Objetos detectados na região 1 em preto e em vermelho o pontos associados as regiões de céu (sem a limpeza pelo mapa de segmentação, como descrito no texto). (d): Objetos detectados na região 1 em preto e em vermelho o pontos associados as regiões de céu após limpeza via mapa de segmentação

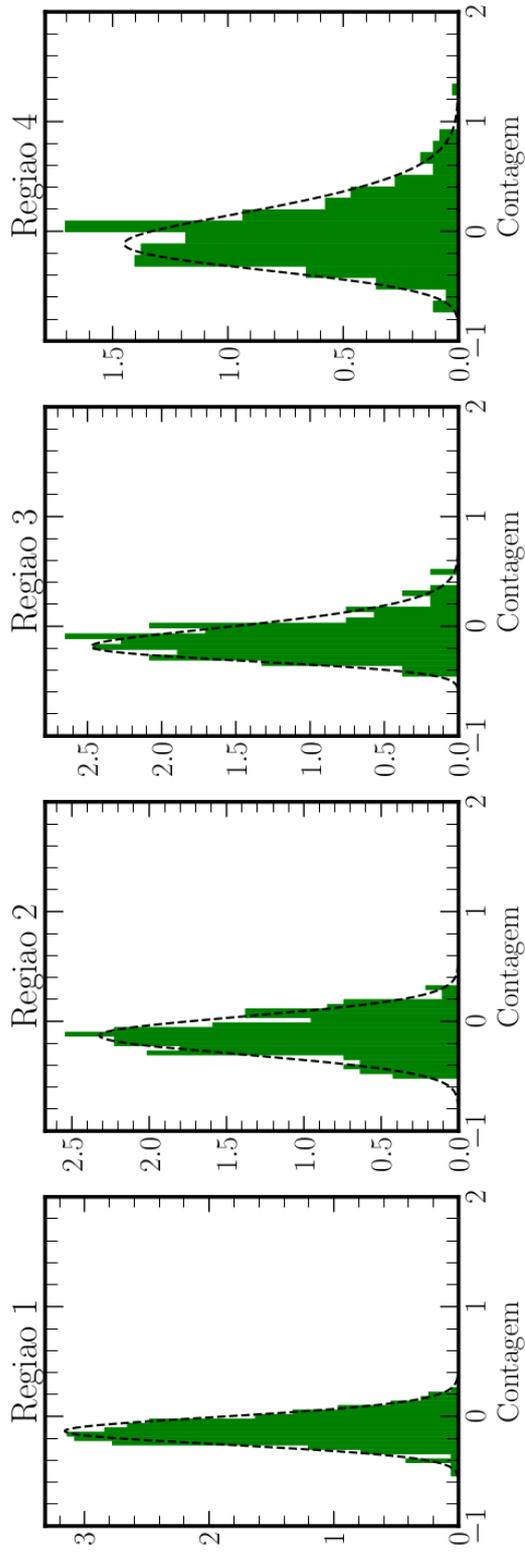


Figura 3.7: Distribuição das contagens pela fotometria das regiões de céu contidas nas regiões de 1 a 4.

Utilizaremos a magnitude J integralmente, mas, para o caso da magnitude Ks, temos que escolher um dos catálogos pois foram obtidas por diferentes instrumentos e diferentes aberturas. Para o caso de D10, o cálculo de fluxo foi feito em uma abertura de raio Kron, também utilizando o programa SExtractor. Já para P11, as magnitudes obtidas são referentes a uma abertura circular de 2'' de raio. Portanto, iremos realizamos uma conversão para as magnitudes de D10 pois manterá uma homogeneidade com as magnitudes obtidas até então neste trabalho. A equação de transformação, a partir dos objetos interseccionantes, é:

$$K_{SD10} = (1.23 \pm 0.03)K_{SP11} + (-2.20 \pm 0.63) \quad (3.1)$$

Nós a obtemos como resultado de um ajuste linear entre as magnitudes Ks dos objetos que estão simultaneamente nos catálogos de D10 e P11.

3.4 Banda NUV

Assim como a banda U, a imagem na banda NUV se comporta como um traçador de formação estelar recente. Como descrito na seção 2.3.3, temos a disposição a imagem NUV do GALEX centrada no aglomerado, com um campo de visão de 1.2° de diâmetro.

Devido a escala de *pixel*, nós utilizamos as coordenadas dos objetos detectados pelo SExtractor na magnitude U como base para um ajuste de PSF (*point spread function*) de todos os objetos ao mesmo tempo, pois a distância permite que as galáxias se comportem como aproximadamente uma fonte pontual. Para maiores detalhes, consultar Llebaria et al. (2008).

Como resultado do procedimento, obtivemos um catálogo formado por 35386 fontes emissoras do ultravioleta próximo observado. À seguir, da mesma maneira como procedemos nas magnitudes anteriores, nós utilizamos uma separação angular máxima para associar corretamente os objetos. Porém, devido a resolução, nós definimos um raio de 5''.

Como confirmação final, analisamos todos as posições dos objetos identificados na imagem NUV a fim de eliminar associações incorretas e objetos não resolvidos. Neste caso, finalizamos o procedimento com uma eliminação de 31 magnitudes.

3.5 Ajuste de distribuição espectral de energia (SED)

Nós empregamos o programa CIGALE (*Code Investigating GALaxy Emission*) para o ajuste da distribuição espectral de energia das galáxias de nossa amostra. Temos

um total de 8 bandas espectrais (NUV, U, V, R, i , z , J e Ks) nos permitindo cobrir desde o ultravioleta até o infravermelho próximo.

Os processos que caracterizam a evolução das propriedades físicas de uma galáxia ao longo do tempo estão impressos em seu espectro. Portanto, o ajuste de SED² nos permite recuperar informações como a massa estelar, atenuação de poeira e idade das populações estelares.

3.5.1 CIGALE

O CIGALE é uma atualização do código em FORTRAN desenvolvido por Burgarella et al. (2005) para a linguagem *python*. Possibilita principalmente o estudo da evolução de galáxias ao comparar modelos de distribuição espectral de energia com observações, sob análise bayesiana.

O ajuste final consiste de uma composição de populações estelares simples nas versões de Bruzual & Charlot (2003) ou Maraston (2005). A versão utilizada do programa neste trabalho, .v2018 (Boquien et al. 2019), disponibiliza 3 principais históricos de formação estelar: exponencial única ou dupla (este caracterizando um surto de formação estelar posterior), exponencial *delayed* (também possibilitando um surto de formação posterior) e formação estelar periódica.

Durante a síntese, o programa leva em consideração a contribuição de emissão no contínuo e de linhas para o gás ionizado por estrelas massivas. Além disso, na atual versão do programa, a atenuação da poeira é caracterizada por leis de atenuação modificadas de Charlot & Fall (2000) e Calzetti et al. (2000). Para a emissão térmica da poeira no infravermelho médio e distante, estão disponíveis 5 modelos: Casey (2012), Draine et al. (2014), Draine & Li (2007), Dale et al. (2014) e Jones et al. (2017).

Temos confirmações para a região central do aglomerado de duas galáxias com núcleo ativo, porém, não utilizaremos tais objetos, e portanto, não incluímos uma componente associada à emissão de um núcleo ativo de galáxia em nosso modelo.

Para os parâmetros introduzidos na entrada do programa, são computados grades de modelos, e calculados o ajuste com os dados observacionais a partir de uma distribuição de verossimilhança. É atribuído ao objeto aquele modelo espectral que apresenta o menor valor de χ^2 . Porém, o CIGALE possui um diferencial de não gerar apenas os parâmetros físicos do melhor ajuste. O melhor ajuste é obtido através do resultado de uma função de probabilidade sob estatística bayesiana. Nessa opção, os resultados de saída também apresentam suas respectivas incertezas.

Aplicamos o ajuste em um total de 343 galáxias. Os parâmetros utilizados estão resumidos na tabela 3.1. Nós descartamos as galáxias cujos valores de χ^2

²do inglês, *Spectral Energy Distribution*, ou distribuição espectral de energia.

Parâmetro	Valor
SFH	exponencial <i>delayed</i>
Idade [Myr]	300, 500, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 7000
Duration (τ) [Myr]	100, 500, 1000, 5000, 7000, 10000, 13000, 16000
Modelo de população estelar	BC03 (1)
IMF	Chabrier
Metalicidade	0.02
Emissão nebular	
Parâmetro de ionização	logU = -2.0
Fração de fótons do contínuo de Lyman escapando da galáxia	0.0
Fração de fótons do contínuo de Lyman absorvidos pela poeira	0.0
Atenuação da poeira	Calzetti et al. (2000)
$A_{v,jovem}$	0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0
Emissão da poeira	Nenhum
AGN template	Nenhum
Radio	NONE

Tabela 3.1: Tabela com resumo dos parâmetros utilizados no CIGALE.

são superiores a 3, significando um péssimo ajuste. Como resultado final, temos um total de 288 galáxias com parâmetros físicos adicionados. Devemos salientar que as galáxias localizadas nas lacunas (23 objetos) não possuem nenhum tipo de informação no ultravioleta, portanto, temos como estimativas interessantes apenas a massa estelar e idade.

Na Figura 3.8, temos os painéis (a) e (b) que apresentam o resultado do ajuste de distribuição espectral de duas galáxias de nossa amostra. Para ambos os espectros, a linha sólida preta representa o espectro final (*Model spectrum*), a linha sólida laranja representa a contribuição de fluxo de estrelas com a atenuação da poeira interestelar (*Stellar attenuated*), a linha tracejada azul representa a contribuição de fluxo de estrelas sem a atenuação da poeira interestelar (*Stellar unattenuated*), a linha sólida bege representa a contribuição de fluxo da emissão nebular (*Nebular spectrum*), os pontos vermelhos representam os fluxos das magnitudes modelados (*Model fluxes*) e a caixa azul representa os fluxos observados (*Observed fluxes*). Abaixo de cada distribuição, existe um painel contendo o resíduo relativo de fluxo (*Relative residual flux*).

A Figura 3.8a apresenta uma galáxia em $z = 0.844$ e com $\chi^2 = 0.53$. Esse objeto foi utilizado nas nossas análises posteriores. A Figura 3.8b apresenta uma galáxia em $z = 0.842$ fruto de um ajuste não satisfatório pois χ^2 é superior a 3 ($\chi^2 = 12.23$). Esse objeto, por exemplo, foi descartado de nossas análises.

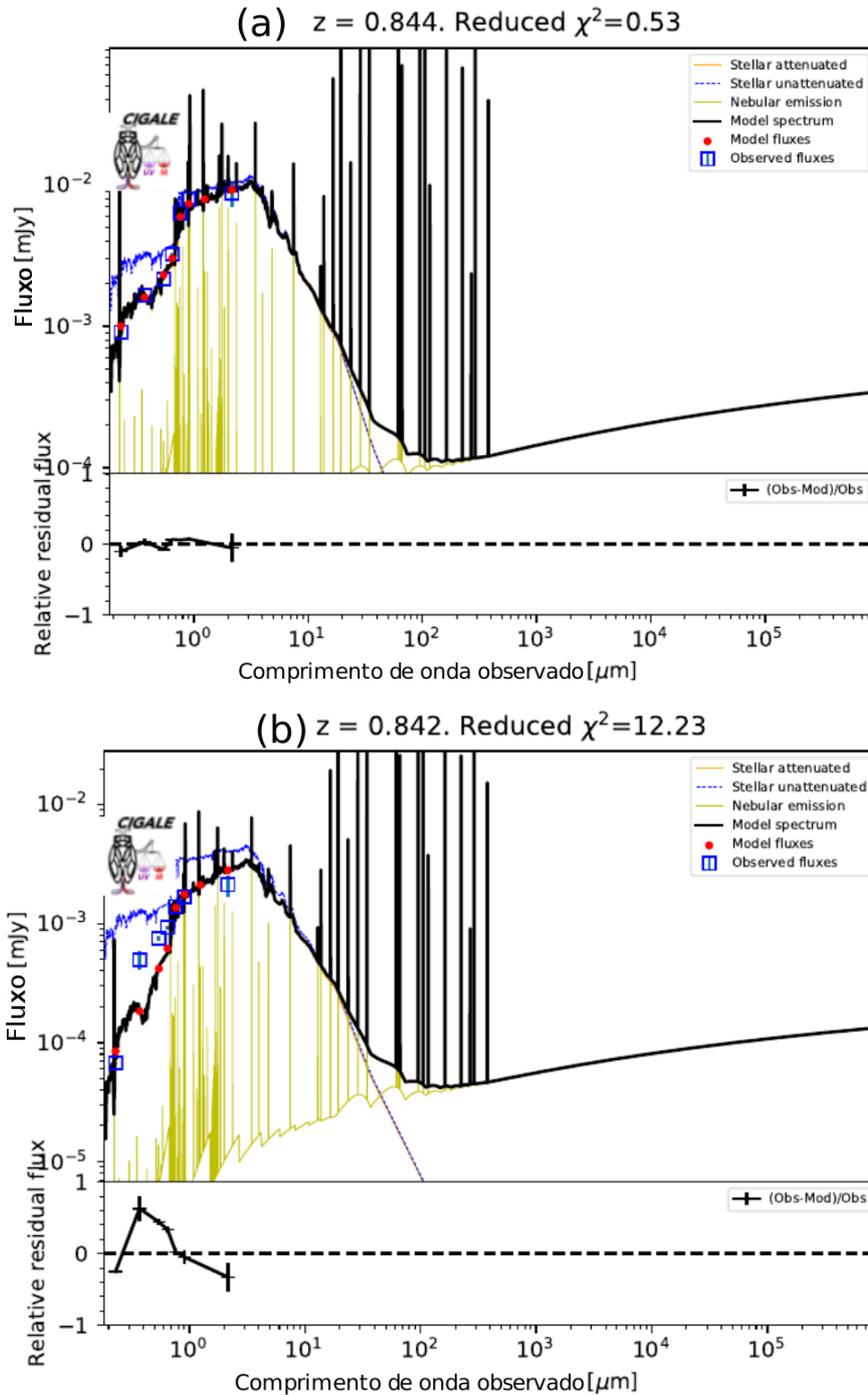


Figura 3.8: Resultado do ajuste de distribuição espectral de duas galáxias. Em (a), temos uma galáxia localizada em $z = 0.844$ e com $\chi^2 = 0.53$. Em (b), temos uma galáxia localizada em $z = 0.842$ e $\chi^2 = 12.53$. Para ambos os espectros, a linha sólida preta representa o espectro final modelado (*Model spectrum*), a linha sólida laranja representa a contribuição de fluxo de estrelas com a atenuação da poeira interestelar (*Stellar attenuated*), a linha tracejada azul representa a contribuição de fluxo de estrelas sem a atenuação da poeira interestelar (*Stellar unattenuated*), a linha sólida bege representa a contribuição de fluxo da emissão nebulosa (*Nebular spectrum*), os pontos vermelhos representam os fluxos das magnitudes modelados (*Model fluxes*) e a caixa azul representa os fluxos observados (*Observed fluxes*). Abaixo de cada distribuição, existe um painel contendo o resíduo relativo de fluxo (*Relative residual flux*).

Capítulo 4

Resultados

À seguir, apresentamos os resultados de nossa análise das galáxias em função do ambiente. Inicialmente, caracterizaremos a sequência vermelha no ótico e classificaremos as galáxias como ativas, passivas e transientes por uma combinação de informações óticas e no ultravioleta.

O aglomerado RXJ0153 é irregular, composto de duas subestruturas massivas centrais e 2 grupos em processo de acreção. Nós localizaremos essas regiões e seus respectivos graus de evolução dinâmico de forma a identificar quais galáxias pertencem a cada uma das estruturas. Após esse processo, examinaremos o comportamento da fração dos diferentes tipos de galáxias e a taxa de formação estelar específica em função da densidade numérica local e da distância ao centro do aglomerado.

Finalizaremos comparando as propriedades físicas dos grupos de acordo com a morfologia, idade, histórico de formação estelar e estágio de acreção. Para a produção dos resultados, nós utilizaremos as galáxias que possuem $z \leq 22.5$ mag, dado como limite de magnitude de completude da amostra de 75% (Patel et al. 2009b). Portanto, trabalharemos com um total de 260 galáxias.

4.1 Classificação de galáxias

A sequência vermelha é uma associação linear exibida por galáxias passivas no diagrama cor-magnitude. Essa correlação traduz-se em uma relação de massa e metalicidade, com espalhamento devido a idade da população estelar principal (Kodama & Arimoto 1997). Diversos estudos buscam compreender em que momento a sequência vermelha começou a ser formada, e quais são os processos físicos que ditam o caminho evolutivo das galáxias para que resultem no que observamos no Universo local e distante.

Blakeslee et al. (2006) analisaram o comportamento das galáxias de nosso aglomerado morfologicamente classificadas por Postman et al. (2005) e notaram uma correlação aproximadamente plana para a cor $r_{625} - z_{850}$ (ACS/HST). Demarco et al.

(2010) discriminaram os objetos de acordo com diferentes regiões da sequência vermelha e, dessa forma, exploraram o comportamento das subamostras com o histórico de formação estelar e ambiente.

O estudo da sequência vermelha torna evidente o comportamento bimodal de cor entre galáxias passivas e ativas, e conseqüentemente, apresenta-se como bom método de diferenciação de galáxias.

No nosso estudo, nós empregaremos a combinação de filtros ultravioleta e ótico. Dessa forma, teremos uma maior sensibilidade à formação estelar recente e quebraremos a degenerescência de idade e histórico de formação estelar presente quando a análise é desenvolvida pelo uso de somente cores óticas.

Nas próximas subseções, obteremos o comportamento das galáxias na análise clássica da sequência vermelha (cores óticas) e, à seguir, classificaremos as galáxias de acordo com a cor U - z. Dessa forma, poderemos identificar aquelas galáxias que estão em processo de transição de ativas para passivas.

4.1.1 Ótico

A Figura 4.1 mostra o diagrama cor-magnitude das galáxias de nosso aglomerado, para a cor ótica V - z e magnitude da banda ótica z. Nós evidenciamos os objetos que possuem classificações morfológicas visuais decorrentes da imagem da banda i_{775} do telescópio espacial *Hubble*.

Os quadrados vermelhos representam as galáxias classificadas como elípticas (tipo $T \leq 3$), os triângulos amarelos representam as galáxias lenticulares ($-2 \leq T \leq 0$) e as cruces azuis correspondem às galáxias espirais ($T \geq 1$). Não há galáxias irregulares em nossa amostra. Nós realçamos as duas galáxias previamente classificadas como de núcleo ativo por diamantes roxos (no catálogo de B06, recebe tipo $T = 11$). Ambos os objetos são classificados como galáxias espirais por Demarco et al. (2010): tipo $T = 1$ (localizada em $z \sim 20.29$ mag) e tipo $T = 3$ (localizada no diagrama cor-magnitude em $z \sim 19.87$ mag). As demais galáxias do aglomerado RXJ0153 não possuem uma classificação e são expressas por círculos cinzas.

A linha tracejada cinza vertical indica o limite de completeza de magnitude da banda z, referindo-se ao valor de $z = 22.5$ mag. Conforme informado anteriormente, nós analisaremos apenas as propriedades físicas das galáxias com magnitudes da banda ótica z menores do que este valor.

A linha sólida preta é resultado de um ajuste linear da sequência vermelha deste aglomerado, para as cores nas bandas óticas V - z e magnitude nas banda ótica z. Nós empregamos como subamostra para o ajuste as galáxias elípticas com $z < 22.5$ mag. Para o ajuste linear, nós aplicamos o estimador *biweight*. O espalhamento σ_{elip} da relação linear é dado pelo desvio padrão, também resultado do mesmo estimador

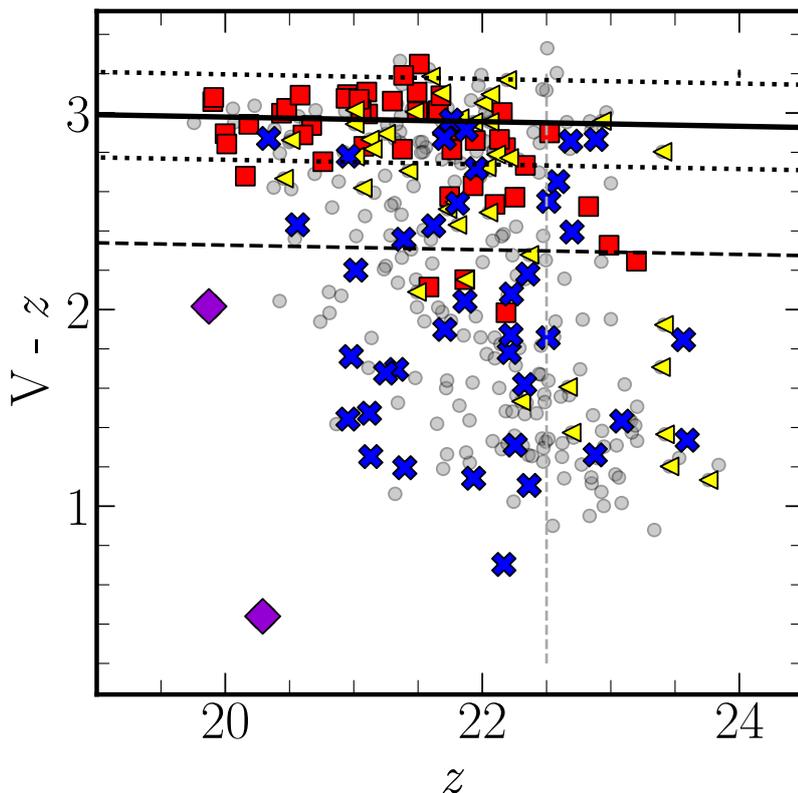


Figura 4.1: Diagrama cor-magnitude para cores óticas. Todas as galáxias estão representadas em cinza, mas destacamos aquelas que possuem classificação morfológica. Os quadrados vermelhos se referem às galáxias elípticas, os triângulos amarelos se referem as galáxias lenticulares, as cruces azuis representam as galáxias espirais e os diamantes roxos representam duas galáxias de núcleo ativo. A linha sólida preta corresponde a sequência vermelha, obtida por um ajuste linear pelo estimador *biweight*. A linha tracejada preta representa 3σ da sequência vermelha e a linha tracejada cinza representa o limite de magnitude para a banda z .

para essa população de elípticas. Como resultado, obtivemos o valor de $\sigma_{elip} = 0.22$ mag.

As linhas pontilhadas pretas acima e abaixo da linha sólida refletem $+1\sigma_{elip}$ e $-1\sigma_{elip}$ da relação linear, respectivamente. A linha tracejada preta reflete $-3\sigma_{elip}$ da sequência vermelha.

As galáxias se distribuem no intervalo para a banda z de 19.5 e 24 mag e para as cores $V - z$ entre o intervalo de 0.3 e 3.5 mag. Nós observamos que, de modo geral, existe um comportamento inverso entre a cor $V - z$ e a magnitude ótica z . À medida que analisamos galáxias mais brilhantes (menores valores de z), notamos que os objetos apresentam cores mais avermelhadas.

Porém, nós frisamos que as galáxias de núcleo ativo não demonstram esse comportamento. A galáxia de núcleo ativo localizada em $z = 19.87$ mag possui uma

cor $V - z \sim 2$ mag, enquanto os objetos da amostra com magnitudes z similares se localizam concentradas na sequência vermelha ($V - z \sim 3$), gerando uma diferença de 1 mag para o azul. A segunda galáxia de núcleo ativo possui magnitude $z = 20.29$ mag e $V - z \simeq 0.4$ mag, sendo o objeto mais azul de nossa amostra. Os demais objetos cuja magnitude z se assemelha a dessa galáxia de núcleo ativo também concentram-se na sequência vermelha, próximas a $V - z \sim 3$ mag.

As galáxias elípticas (quadrados vermelhos) assumem majoritariamente as cores $V - z$ mais vermelhas. Dentre todas as 65 galáxias desse tipo em nossa amostra, 31 estão localizadas entre $-1\sigma_{elip}$ e $+1\sigma_{elip}$ da relação linear da sequência vermelha. Essas elípticas que estão compreendidas na sequência vermelha ocupam as magnitudes mais brilhantes de toda a amostra ($z \sim 20$ mag) e se estendem até $z = 22.5$ mag, nosso limite de completeza. Esse comportamento é esperado, dado que nos baseamos apenas nesses objetos para ajustar a sequência vermelha.

Para magnitudes na banda z menores que 21.5 mag, nós notamos que não há galáxias passivas com cores mais azuladas que $V - z = 2.6$ mag. Porém, para magnitudes menos brilhantes ($z > 21.5$ mag), nós verificamos que, além dos objetos localizados em $1\sigma_{elip}$ na sequência vermelha, 6 objetos passivos estão localizados entre $-1\sigma_{elip}$ e $-3\sigma_{elip}$ (para um intervalo de $21.5 < z < 23.3$ mag) e 4 possuem valores menores que $-3\sigma_{elip}$ da distribuição. 3 galáxias elípticas nesse regime se localizam em $21.5 < z < 22.5$ mag e $1.8 < V - z < 2.2$ e o outro está além do limite de completeza, em $z = 23.3$ mag e $V - z \sim 2.3$ mag.

As galáxias lenticulares (triângulos amarelos) apresentam um comportamento similar ao exposto para as galáxias elípticas. A maioria dos objetos desse tipo morfológico permanece concentrado entre $1\sigma_{elip}$ da sequência vermelha. Dos 40 objetos classificamos como lenticulares, 21 estão nesse regime descrito. Considerando apenas as lenticulares dispostas em $1\sigma_{elip}$, nós constatamos que eles ocupam intervalos de magnitude z entre 20.5 e 22.5 mag. Apenas duas galáxias lenticulares estão localizadas na extremidade da sequência vermelha mais brilhante ($z < 20.3$ mag).

Assim como as galáxias elípticas, não há galáxias lenticulares mais azuis que $V - z = 2.6$ mag, para as magnitudes mais brilhantes que $z = 21.5$ mag. Porém, para magnitudes mais fracas que este limite, notamos uma cauda de galáxias lenticulares, tornando-se mais azuladas para maiores valores de z . A cauda se inicia em 2 objetos com cores próximas a $V - z = 2.5$ mag, alongando-se até $V - z \sim 1.2$ mag e $z \sim 23.5$ mag.

As galáxias espirais possuem um maior espalhamento em comparação aos das galáxias elípticas e lenticulares. Enquanto possuem o maior espalhamento $\sigma_{esp} = 0.55$ mag, as elípticas e lenticulares se concentram-se devido a $\sigma_{elip} = 0.22$ e $\sigma_{lent} = 0.27$, respectivamente. Mas, apesar de também ocuparem regiões mais avermelhadas, 26 das 41 galáxias espirais se localizam abaixo de $-3\sigma_{elip}$ da sequência vermelha,

apresentando portanto as cores mais azuis da amostra.

4.1.2 Ultravioleta

Diversos estudos classificam galáxias de aglomerados pelo comportamento bimodal de cores baseadas no ótico. Entretanto, esse método de discriminação sofre um efeito de degenerescência entre o histórico de formação estelar e a idade da população principal.

Discutimos sobre esse problema na seção 2.3 sob análise da Figura 2.3. Nela, nós observamos os intervalos espectrais abrangidos pelas bandas fotométricas utilizadas neste trabalho. Além disso, a Figura 2.3 contém espectros de duas galáxias em $z \simeq 0.84$, de mesma idade (4.5 bilhões de anos) e histórico de formação estelar de tipo exponencial com tempos efetivos de decaimento de $\tau = 0.1$ bilhão de ano e $\tau = 1$ bilhão de ano.

Apesar de distintos históricos de formação estelar, as galáxias possuem fluxos próximos para comprimentos de onda maiores que 5000\AA . As cores das bandas óticas V, R, i e z abrangem essa região, portanto elas mostram cores similares para os objetos.

Nós podemos explorar essa propriedade pela Figura 4.2a. Ela dispõe o diagrama cor-cor para as galáxias do aglomerado pelas cores V - z e U - z . Para efeitos de comparação, identificamos os objetos a partir da posição no diagrama cor-magnitude ótico, na Figura 4.1 da seção anterior. Os pontos amarelos referem-se aos objetos localizados dentro de $3\sigma_{elip}$ da sequência vermelha (objetos localizados acima da linha tracejada preta na Figura 4.1). Os pontos roxos referem-se aos objetos localizados fora de $3\sigma_{esp}$ da sequência vermelha (cores mais azuis que as delimitadas pela linha tracejada na Figura 4.1). Os pontos verdes referem-se aos objetos não detectado pelo programa SExtractor na imagem da banda U do VIMOS. Nós representamos no canto superior esquerdo da Figura 4.2a os erros médios $\delta_{U-z} = 0.1$ e $\delta_{V-z} = 0.01$.

Como já discutido, a banda fotométrica U do instrumento VIMOS, para galáxias em $z \sim 0.84$, está detectando a radiação emitida por uma galáxia no ultravioleta próximo. Essa contribuição é dominada por estrelas jovens e massivas, formadas nas últimas centenas de milhões de anos. Aliada à magnitude da banda ótica z , que traça a massa estelar das galáxias, a cor U - z é um indicador da taxa de formação estelar específica de uma galáxia¹. Por sua vez, para esse *redshift*, a cor V - z é dominada pela emissão da componente de estrelas de idades intermediárias e velhas que dominam a massa estelar total.

Ao analisar a Figura 4.2a, notamos que existe uma correlação positiva entre as

¹A taxa de formação estelar específica ($sSFR(t)$) é definida pela razão entre a taxa de formação estelar ($SFR(t)$) instantânea e a massa estelar de uma galáxia. $sSFR(t) = \frac{SFR(t)}{M_*}$

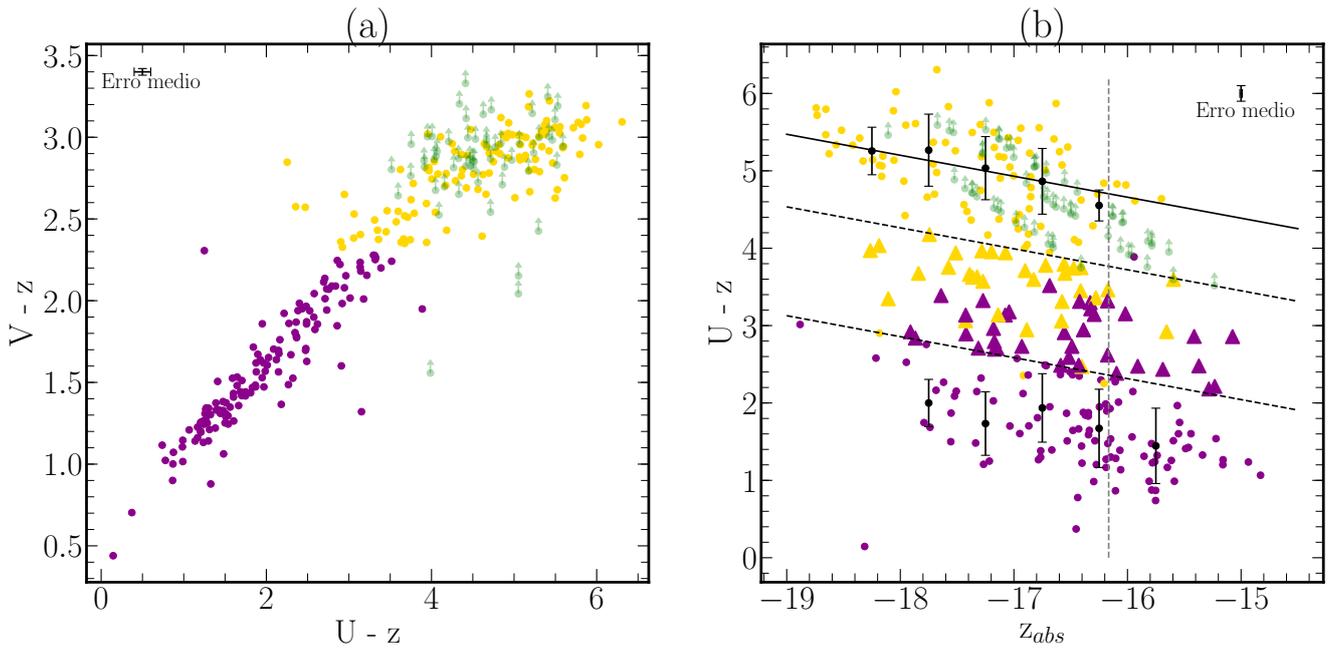


Figura 4.2: (a): Diagrama cor-cor entre as galáxias do aglomerado. As cores roxo e amarelo identificam galáxias classificadas como ativas e passivas pelo diagrama da Figura 4.1, respectivamente. Os pontos verdes identificam galáxias com limites superiores de magnitude na banda U. (b): Diagrama cor-magnitude para as galáxias com detecções no U. As cores roxa e amarela possuem mesmo significado do gráfico vizinho. Os pontos verdes com setas representam objetos com limites superiores. A linha solida representa o ajuste linear para as médias das galáxias passivas calculadas por bins de magnitude. As linhas tracejadas superior e inferior representam 2σ e 5σ da sequência vermelha e dão limites para as galáxias transitentes, representadas por triângulos.

cores $U - z$ e $V - z$. Porém, o intervalo de magnitudes das galáxias abrangido por cada cor diverge. Todas as galáxias se dispõem em um intervalo de cor $V - z$ de 0.4 a 3.5 mag (aproximadamente compreendendo 3 magnitudes). Para a cor $U - z$, as galáxias se distribuem em um intervalo de aproximadamente 6.5 magnitudes, ou seja, em $0 < U - z < 6$ mag. Especificadamente, as galáxias ativas (pontos roxos) ocupam um intervalo de 0.4 a 2.4 mag para a cor $V - z$ e de 0 a 4 mag para a cor $U - z$. As galáxias classificadas como passivas (pontos amarelos) se dispõem em um intervalo de 2.3 a 3.5 mag para a cor $V - z$ mas para a cor $U - z$ ocupam um intervalo de 2 a 6 mag. Portanto, concluímos que as galáxias passivas demonstram uma maior abrangência de cores $U - z$ do que observamos para a cor $V - z$.

Como exemplo, caso consideremos o estreito intervalo de $2.95 < V - z < 3.05$. Esses objetos possuem cores similares, indicando que possuem idades de população estelar próximas. Porém, podemos notar na Figura 4.2a que esses objetos se distri-

buem em um intervalo de $3.8 < U - z < 6$ mag. Portanto, concluímos que a cor $V - z$ não é suficiente para nos indicar se um objeto está passando por formação estelar recente.

Demonstremos outro exemplo. Existem três galáxias localizadas no intervalo de cor $V - z$ de 2.5 a 3.0 mag e $U - z$ de 2 a 2.7. Caso nós considerássemos apenas como método de diferenciação entre galáxias o aplicado na Figura 4.1, nós classificaríamos esses objetos como galáxias passivas. Porém, as cores $U - z$ desses objetos demonstram que eles na verdade possuem uma taxa de formação estelar específica mais convergente as de galáxias ativas. Logo, apesar desses objetos possuírem idades de população estelar mais velhas do que as galáxias classificadas como ativas pelo diagrama cor-magnitude ótico, eles estão enfrentando maiores taxas de formação estelar do que os objetos que possuem cores $V - z$ similares a eles.

Nosso último exemplo pode ser conferido pelos objetos em verde localizados em $((U - z)_1, (V - z)_1) \sim (5.0, 2.04)$ e $((U - z)_2, (V - z)_2) \sim (5.0, 2.15)$. Para o método de filtros óticos, esses objetos seriam classificados como galáxias ativas, pois suas respectivas cores se localizam abaixo de $-3\sigma_{esp}$ da sequência vermelha. Entretanto, essas galáxias não foram detectadas pelo programa SExtractor, portanto são objetos que possuem pouca ou nula formação estelar recente.

Recapitulando, para as galáxias de nosso aglomerado localizado em $z \sim 0.84$, enquanto a cor $V - z$ é um indicador da idade efetiva das populações estelares das galáxias, a cor $U - z$ é um indicador da taxa de formação estelar específica. Neste trabalho, nós objetivamos entender como o ambiente do aglomerado de galáxias RXJ0153 está afetando as propriedades das galáxias membro, dentre esses parâmetros está a taxa de formação estelar desses objetos.

Logo, concluímos pela Figura 4.2a que existe uma degenerescência entre a idade e o histórico de formação estelar para as cores na banda ótica de forma que isso interferiria negativamente na nossa capacidade de definir se um objeto possui características de uma galáxia passiva ou ativa. Para uma mesma idade traçada pela cor $V - z$, podem haver uma variedade de objetos com distintos históricos de formação estelar. Portanto, a cor $U - z$ será essencial para a quebra dessa degenerescência.

Nós reafirmamos que os estudos anteriores envolvendo o aglomerado RXJ01253 se basearam em cores óticas, como as que obtivemos pelas imagens do *Subaru*. Portanto, temos uma oportunidade única de analisar as populações estelares das galáxia membro do aglomerado sem a existência dessa degenerescência.

Como próximo passo, desejamos classificar os objetos em galáxias passivas, ativas e em um estágio intermediário entre galáxias passivas e ativas. Nós efetuaremos esse procedimento com o auxílio do diagrama cor-magnitude para a cor $U - z$ e magnitude absoluta z_{abs} ², representado na Figura 4.2b.

² $z_{abs} = 5(1 - \log D_L(z_{cosm})) + z_{aparente}$, sendo $D_L(z_{cosm})$ a distância cosmológica de luminosidade

Assim como na Figura 4.2a, ilustraremos as classificações feitas pelo diagrama cor-magnitude ótico. Objetos com cores amarelos estão compreendidos dentro de $3\sigma_{elip}$ da distribuição da sequência vermelha na Figura 4.1. Objetos roxos referem-se àqueles dispostos em cores mais azuis que $3\sigma_{elip}$. Os objetos verdes identificam as galáxias não detectadas na banda U do VIMOS/VLT, indicando que possuem pouca ou nenhuma formação estelar recente. A linha tracejada cinza indica o limite de completeza de magnitude para 75% dos objetos para o *redshift* central do aglomerado ($z = 0.8387$), calculado na próxima seção.

Os pontos pretos, as linhas sólidas e tracejadas pretas são resultado do nosso processo de classificação que descreveremos à seguir. Nós buscamos caracterizar a população de galáxias passivas, de modo a possibilitar uma diferenciação entre os tipos.

Não podemos ajustar pelo mesmo procedimento da seção anterior, pois o espalhamento dos objetos passivos é muito maior. Portanto, adotamos método similar ao feito por Coenda & Muriel (2014), para uma amostra de galáxias do SDSS. Nós almejamos efetivar uma regressão linear sobre a média e desvio padrão das cores em intervalos de magnitude.

Inicialmente, nós usufruímos do comportamento bimodal tanto para cor U - z quanto para magnitude z. Nós procedemos um ajuste de duas gaussianas bidimensional na distribuição, pelo método estatístico *Gaussian Mixture Model*. Pelas médias encontradas ($[\mu_{z,ativas}, \mu_{U-z,ativas}] = [-16.51, 2.06]$ mag, $[\mu_{z,passivas}, \mu_{U-z,passivas}] = [-17.24, 4.71]$ mag), eliminamos da amostra os objetos do intervalo $\mu_{U-z,ativas} + 0.5 < (U - z)_i < \mu_{U-z,passivas} - 0.5$ mag, pois são galáxias com alta probabilidade de serem de transição. Além disso, dividimos a amostra em intervalos de 0.5 mag entre -18 e -16 mag.

Assim, aplicamos o ajuste de duas gaussianas unidimensionais para as cores de cada intervalo de magnitude, coletando as médias e respectivos desvios padrões. Além disso, ajustamos para o intervalo entre -18.5 e -18 mag, uma única gaussiana e adicionamos as médias acima, pois neste caso, existe apenas galáxias passivas. Os valores das médias para galáxias passivas e ativas estão representados como círculos pretos e erros (desvio padrão) na Figura 4.2b.

Para as médias das galáxias passivas, efetuamos uma regressão linear (linha sólida) que assumiremos como sequência vermelha nas análises das seções à seguir. Nós impomos, como σ_{SV} , o desvio padrão da população total passiva sem a contaminação de galáxias candidatas a transientes (objetos dentro do intervalo de cor $\mu_{U-z,ativas} + 0.5 < (U - z)_i < \mu_{U-z,passivas} - 0.5$ mag).

Finalmente, nós dividimos as galáxias entre passivas ($< 2\sigma$, limite na linha tracejada preta superior), transientes (entre 2 e 5σ) e ativas (maior que 5σ , limite na

dade, z_{cosm} o *redshift* do objeto e $z_{aparente}$ a magnitude aparente na banda z.

linha tracejada preta inferior). Os triângulos mostram as galáxias que definimos como sendo transientes. Dado o limite de completeza, nós utilizaremos em nossa amostra apenas as galáxias dentro do intervalo $z < 22.5$. Além disso, nós classificamos as galáxias sem detecção em U de acordo com sua posição no diagrama cor-magnitude, excluindo as galáxias que entram-se na lacuna do CCD.

Como resultado, das 260 galáxias iniciais selecionadas no ótico por $z < 22.5$ mag, 19 pertencem as lacunas do CCD e foram descartadas. Portanto, temos um total no fim desta etapa de 241 com informações na banda U, sendo 121 galáxias passivas, 66 galáxias ativas e 54 galáxias em transição.

4.2 Parâmetros Dinâmicos

O aglomerado RXJ0153 é formado por uma estrutura complexa e não-virializada. Demarco et al. (2005) verificaram que a distribuição espacial no raio X revela uma região central binuclear, fruto do gás intraglomerado de duas distintas subestruturas em processo de fusão.

Além das estruturas centrais, Tanaka et al. (2006) e Patel et al. (2011) complementaram a detecção de membros nas redondezas, descobrindo a presença de dois grupos que supomos que estejam se deslocando em direção à estrutura central massiva.

Devido ao fato de que unimos catálogos de diferentes levantamentos (B06, D10, T06, P11), desejamos nessa seção atualizar o valor dos parâmetros dinâmicos do aglomerado e de suas subestruturas. Dessa forma, seremos capazes de estimar o grau de virialização do aglomerado e portanto o grau de evolução a partir das propriedades físicas das galáxias membro de cada região.

Em referência à disposição espacial, a ascensão reta e declinação nos permitem localizar cada alvo sob o sistema de Coordenadas Equatorial Celeste. Nós temos interesse em encontrar o *redshift* central do aglomerado a fim de relacioná-lo ao *redshift* cosmológico, devido a expansão do Universo. A partir desse parâmetro, nós somos capazes de obter a distribuição de velocidades radiais das galáxias, que caracteriza-se como a componente de movimento na direção da linha de visada. Objetos com velocidades negativas e positivas indicam que estão, respectivamente, se aproximando e se afastando do observador.

Por meio da distribuição de velocidades radiais, desejamos obter a dispersão de velocidade do aglomerado, caracterizando-se como sendo 1σ dessa distribuição, e conseqüentemente como sendo um valor de velocidade típica dos membros nos movimentos internos do aglomerado.

A dispersão de velocidade permite que nós descubramos o raio virial do aglomerado, definido como o raio da esfera que contém 200 vezes a densidade crítica do

Universo, naquela determinada época da história do Universo (*redshift*). Dadas as definições, descrevamos o método de obtenção dessas variáveis.

Nós identificamos a ascensão reta, declinação e *redshift* pela localização central (média) de cada distribuição por via do estimador *biweight*. Esse tipo de estimador é qualificado como uma estatística robusta, capaz de lidar com elementos muito discrepantes da população principal (*outliers*). Os erros desses parâmetros são fruto da técnica de reamostragem *jackknife*³ (Efron & Stein 1981).

Nós definimos a velocidade radial da *i*-ésima galáxia em relação ao centro do aglomerado pela forma clássica de variação do *redshift* acrescentado por um fator de correção devido à expansão do Universo:

$$\Delta v_i = \frac{1}{1 + z_{cosm}} c (z_i - z_{cosm}), \quad (4.1)$$

sendo *c* a velocidade da luz, *z_i* o *redshift* observado da *i*-ésima galáxia e *z_{cosm}* o *redshift* cosmológico associado ao aglomerado. Nós consideramos *z_{cosm}* como sendo o *redshift* central do aglomerado. Nós calculamos a dispersão de velocidades de cada distribuição utilizando a escala (desvio padrão) do estimador *biweight* e, novamente, consideramos como erro o desvio padrão resultado de *jackknife*.

O raio virial é produto da dispersão de velocidade, da seguinte forma:

$$r_{200} = \frac{\sqrt{3}\sigma}{10 H(z_{cosm})}, \quad (4.2)$$

(Carlberg et al. 1997) sendo σ a dispersão de velocidade do aglomerado e $H(z_{cosm})$ o valor da constante de Hubble para o *z_{cosm}*. O valor final que utilizamos refere-se a projeção da região esférica no plano 2D (Limber & Mathews 1960) a partir da média do *r₂₀₀* de um raio de luz saindo do centro de uma esfera até sua superfície. Assim como Patel et al. (2009a), utilizamos essa definição de raio virial para evitar a contaminação de regiões não-virializadas. Portanto, transformando-se em:

$$R_{200} = \frac{2}{\pi} r_{200}. \quad (4.3)$$

À seguir, apresentamos os resultados do método descrito acima. Na literatura, temos muitas definições para as subestruturas norte e sul, portanto, iremos atualizar essas análises para os grupos G83 e G84 (definiremos cada um à seguir) e para a estrutura total do aglomerado. Os resultados encontram-se compilados na tabela 4.1

³Técnica de reamostragem baseadas no cálculo de estimativas a partir de subamostras advindas de uma única amostra.

Estrutura	Ascensão Reta °	Declinação °	<i>Redshift</i>	Dispersão de Velocidade km s ⁻¹	Raio Virial Mpc
Aglomerado	28.1736	-13.9661	0.8387 ± 0.0005	1673 ± 86	1.64
Subestrutura Norte	28.1841	-13.9544	0.8390 ± 0.0013	768 ⁺⁹⁷ ₋₅₀	0.76
Subestrutura Sul	28.1662	-13.9743	0.8299 ± 0.0009	408 ⁺⁶⁷ ₋₅₀	0.40
G83	28.1556	-14.1038	0.8358 ± 0.0015	854 ± 190	0.84
G84	27.9854	-14.0722	0.8421 ± 0.0009	731 ± 153	0.72

Tabela 4.1: Resultados dos parâmetros dinâmicos do aglomerado e de cada subestrutura.

4.2.1 Estrutura total do aglomerado

Demarco et al. (2005) obtiveram os parâmetros dinâmicos do aglomerado através de uma amostra contendo apenas 102 galáxias localizadas na região central de RXJ0153. Como nós unimos 4 catálogos, nós lidaremos tanto com a descoberta de novos objetos na região central quanto com a adição no sistema de galáxias localizadas nas regiões mais externas do aglomerado. Portanto, nós recalcularemos esses parâmetros levando em consideração toda a estrutura.

Nós adotamos o estimador *biweight* e encontramos um *redshift* médio de $z_{RXJ0153}=0.8387 \pm 0.0005$. Dado o *redshift* cosmológico, fomos capazes de obter a distribuição de velocidades radiais que encontra-se na Figura 4.3.

Ela apresenta o histograma da distribuição de velocidades radiais das galáxias do aglomerado, em linha sólida vermelha. Os valores foram obtidos pela equação 4.1, com $v = 0$ relativo ao centro da distribuição de *redshift* encontrada. A linha sólida vermelha refere-se a todos os objetos do aglomerado, incluindo as subestruturas norte e sul, os grupos G83 e G84, e galáxias não ligadas a nenhuma região específica.

A linha sólida preta representa a distribuição de velocidades radiais para a subestrutura sul e a linha tracejada azul representa a distribuição para a subestrutura norte. Pelos *redshifts* adotados para as subestruturas norte e sul na subseção à seguir, nós obtemos uma diferença de velocidade radial entre o centro do aglomerado e das subestruturas em $\Delta v_{norte} \sim 50 \text{ km s}^{-1}$ e $\Delta v_{sul} \sim -1400 \text{ km s}^{-1}$.

A dispersão de velocidade para todo o sistema obtida foi $\sigma = 1673 \pm 83 \text{ Km s}^{-1}$. Utilizando as equações 4.2 e 4.3⁴, obtemos um raio virial de $R_{virial} = 1.64 \text{ Mpc}$. Na Figura 4.3, a linha tracejada preta refere-se a gaussiana correspondente à media e desvio padrão encontrados para todo o sistema.

4.2.2 Subestruturas Norte e Sul

Diversos trabalhos se encarregaram de analisar a estrutura multi-nuclear do aglomerado RX J0153. Demarco et al. (2005) caracterizou as subestruturas centrais a partir

⁴Segundo a cosmologia que adotamos, o valor do parâmetro de Hubble para o *redshift* do aglomerado é $H(z_{cosm}) = 112 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$

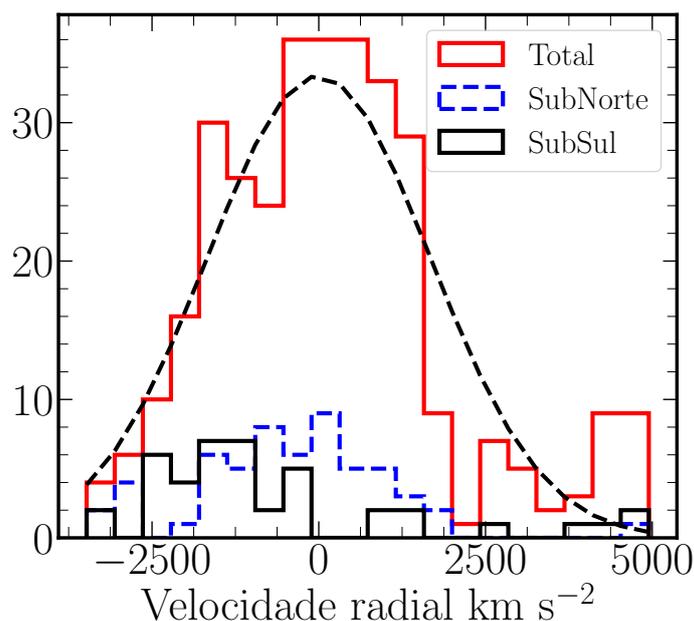


Figura 4.3: Distribuição de velocidades radiais do sistema total em linha sólida vermelha. A linha sólida preta indica a distribuição de velocidades radiais da subestrutura sul. A linha tracejada azul indica a distribuição da subestrutura norte. A linha tracejada preta representa a gaussiana que representa a distribuição de velocidades radiais de todo o sistema.

da imagem no raio X obtidas pelo telescópio espacial Chandra. As subestruturas norte e sul foram definidas como as regiões circulares que compreendiam a maior parte da distribuição de emissão de raio X devido a presença do gás intraglomerado.

Nós utilizamos os resultados obtidos por Patel et al. (2009b) para definir essas subestruturas. Nesse artigo, os autores calcularam os raios viriais a partir da dispersão de velocidades geradas por Girardi et al. (2005), ao analisar a distribuição de velocidade radial pelo método de kernel (Kaye’s mixture model) capaz de identificar multiestruturas em uma distribuição.

A ascensão reta e declinação adotadas também são referentes a Girardi et al. (2005) pela localização *biweight*. Por fim, o *redshift* médio adotado encontra-se em Demarco et al. (2005) a partir do estimador robusto 3σ clipping.

4.2.3 Grupos 83 e 84

Os grupos G83 e G84 foram inicialmente identificados por Tanaka et al. (2006) e originalmente chamados de F4 (G83) e F6 (G83) pois o estudo analisou 8 regiões pelo campo de visão do espectrógrafo FOCAS (F 1 a 8), componente no telescópio *Subaru*.

Da mesma maneira que identificamos todos os parâmetros para a estrutura total

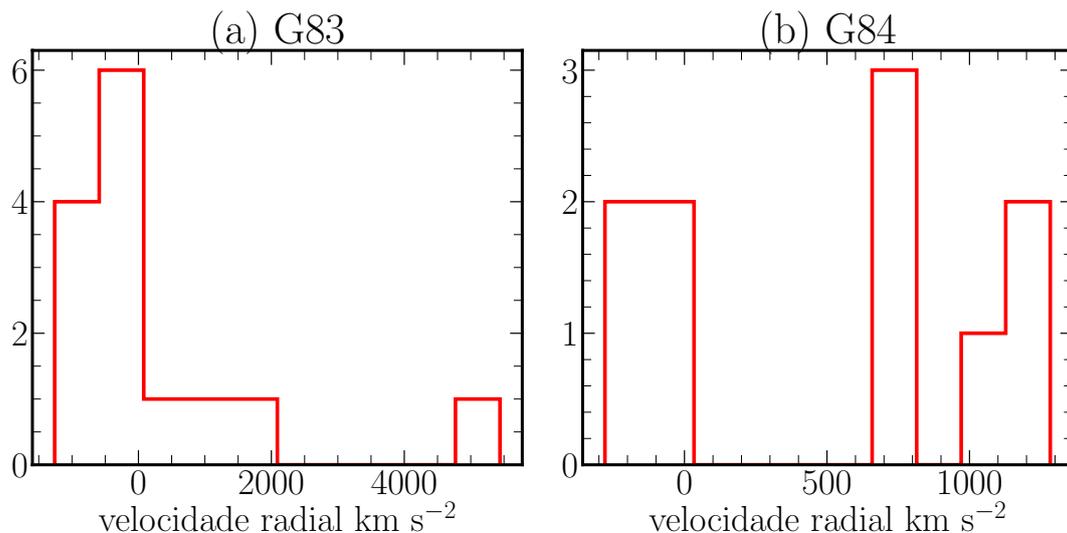


Figura 4.4: Distribuição da velocidade radial dos grupos G83 (a) e G84 (b).

do aglomerado, nós calculamos a posição espacial, *redshift* central, distribuição de velocidade e raio virial a partir da dispersão de velocidades para os grupos G83 e G84.

Para identificar os objetos pertencentes a cada um dos grupos, nós escolhemos as seguintes coordenadas como centro dos grupos: $(\alpha_{G83}, \delta_{G83}) = (28.16, -14.10)$ e $(\alpha_{G84}, \delta_{G84}) = (27.99, -14.06)$. Nós utilizamos como amostra de cada grupo os objetos distando até 1 Mpc desses centros. Dessa forma, calculamos os parâmetros dinâmicos⁵ e os resultados se encontram na tabela 4.1.

Na Figura 4.4, representamos as distribuições de velocidades radiais dos grupos G83 (a) e G84 (b). Observamos que ambos não aparentam ser uma estrutura virializada, pela falta de comportamento gaussiano. Por esse motivo, encontramos uma grande dispersão de velocidade associada aos grupos. Portanto, devemos ter cautela na hora de interpretar fisicamente esses resultados.

Nosso objetivo para os grupos é utilizar uma metodologia que defina uma região limite para que nas próximas seções, nós possamos analisar as propriedades físicas das galáxias que a eles pertencem.

Em especial, notamos que a distribuição de velocidades para o grupo G84 apresenta 3 picos: 1 com valores de velocidade negativos, e os outros dois para velocidades positivas, distando aproximadamente $v \sim 1000$ km s⁻¹. Esse comportamento pode indicar que, nessa região, duas aglomerações de galáxias estão se unindo para formar um grupo antes de adentrarem na região central do aglomerado.

⁵Para os *redshifts* dos grupos, os parâmetros de *Hubble* utilizados foram $H(t)_{G83} = 111.93$ km s⁻¹ Mpc⁻¹ e $H(t)_{G84} = 112.65$ km s⁻¹ Mpc⁻¹.

4.3 Classificação em função do ambiente

A relação de morfologia-densidade, inicialmente observada por Dressler (1980) no Universo local, caracteriza-se como a predominância de galáxias elípticas em ambiente mais densos. Após classificarmos as galáxias a partir da sua distribuição no diagrama cor-magnitude, e definirmos as regiões de maior densidade do aglomerado, nós investigaremos se essa relação é identificada em nossa amostra.

Na Figura 4.5a, nós exibimos a distribuição espacial dos objetos pertencentes ao aglomerado RXJ0153. As classificações dos objetos estão de acordo com a diferenciação baseada no diagrama cor-magnitude U - z vs z, da subseção 4.1.2 e identificados no canto superior direito da figura.

Os diamantes vermelhos caracterizam as galáxias passivas, os triângulos verdes caracterizam as galáxias em transição, e as estrelas azuis correspondem às galáxias ativas. Como já descrito, as galáxias localizadas nas lacunas do CCD (total de 19 objetos) não foram detectadas na imagem do VIMOS, portanto, não possuem magnitudes na banda U. Entretanto, elas possuem informações fotométricas das bandas óticas. Logo, nós as classificamos em galáxias ativas e passivas pelo diagrama cor-magnitude ótico. Para fim de ilustração, os pontos amarelos e roxos representam os objetos classificados como passivos e ativos pelas bandas óticas, respectivamente. A área em cinza claro representa a região onde está localizada a lacuna do CCD.

Para fim de melhor compreensão, nós dispomos por linhas tracejadas cinza, circunferências concêntricas ao centro do aglomerado⁶ em raios discretos de 1 a 6 Mpc⁷. Suas identificações de raio estão indicadas em cinza, à direita de cada circunferência.

As circunferências sólidas pretas referem-se às estruturas identificadas na seção anterior. A circunferência em linha preta sólida concêntrica àquelas em linhas tracejadas cinza, e localizada entre as circunferências de 1 e 2 Mpc é referente ao raio de 1.5 Mpc do aglomerado (valor próximo ao raio virial, $R_{virial} = 1.64$ Mpc). A circunferência em linha preta que representa o raio virial da subestrutura norte está contida na circunferência de raio 1.5 Mpc, com centro definido na seção anterior: $(\alpha_{subnorte}, \delta_{subnorte}) = (28.18^\circ, -13.95^\circ)$. A circunferência que representa o raio virial da subestrutura sul também está contida naquela com raio 1.5 Mpc e com centro definido na seção anterior $((\alpha_{subsul}, \delta_{subsul}) = (28.16^\circ, -13.97^\circ))$.

As circunferências restantes delimitadas por linhas sólidas pretas representam os grupos G83 e G84. Cada região está nominalmente indicada na Figura 4.5a, e centram nas posições $(\alpha_{G83}, \delta_{G83}) = (28.15^\circ, -14.10^\circ)$ e $(\alpha_{G84}, \delta_{G84}) = (27.98^\circ, -14.07^\circ)$. Além das subestruturas, nós destacamos duas regiões compreendidas pelos retângulos tracejados em cinza. Seus centros são nas coordenadas: $(\alpha_{R1}, \delta_{R1})$

⁶Centro do aglomerado: $(\alpha_{RXJ0153}, \delta_{RXJ0153}) = (28.17^\circ, -13.96^\circ)$

⁷Raios projetados para o *redshift* médio do aglomerado, $z_{RXJ0153} = 0.8387$

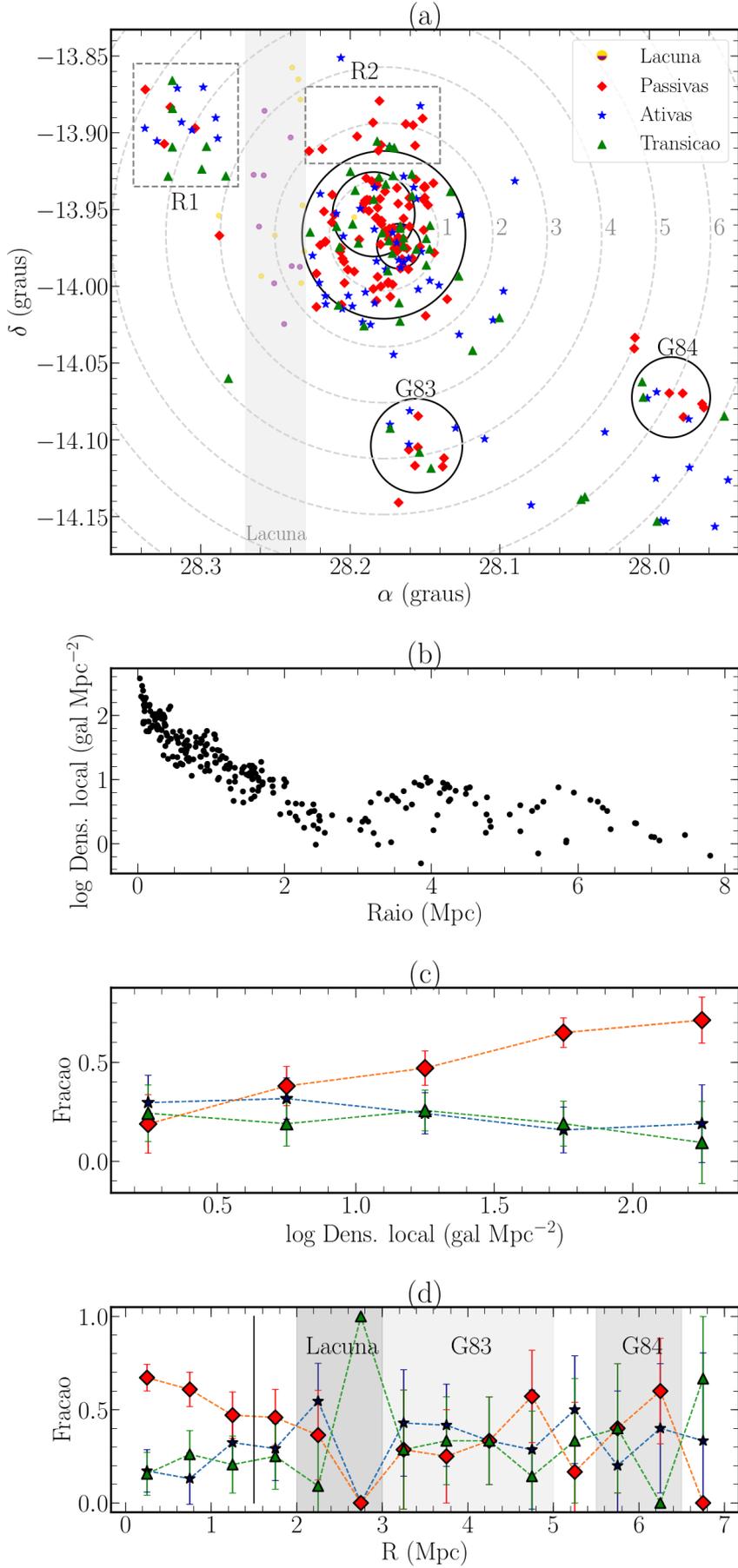


Figura 4.5: Em (a), (c) e (d), os diamantes vermelhos representam as galáxias passivas, os triângulos verde as galáxias em transição e as estrelas azuis representam as galáxias ativas. (a) Distribuição espacial das classificações. As circunferências tracejadas cinzas são concêntricas ao centro do aglomerado. Linhas sólidas representam as subestruturas e grupos; (b) Relação da densidade local comparada com o raio.; (c) Fração de galáxias em função da Densidade Local; (d) Fração de galáxias em função do raio. As regiões cinzas representam os raios que englobam a lacuna do CCD e os grupos G83 e G84

$= (28.31^\circ, -13.89^\circ)$ e $(\alpha_{R2}, \delta_{R2}) = (28.18^\circ, -13.89^\circ)$. Essas regiões compreendem as galáxias localizadas nas regiões filamentosares do aglomerado, e que estão em processo de decaimento para a região central.

Examinando a Figura 4.5a, é possível visualmente notar localizações preferenciais entre as distintas classificações. As galáxias passivas estão concentradas principalmente nas regiões centrais (internas a $r < 1.5$ Mpc), regiões das subestruturas norte e sul e nas regiões dos grupos G83 e G84. As galáxias transientes ocupam em proporções similares as regiões centrais e mais externas ao aglomerado. As galáxias ativas estão presentes nas regiões centrais mas dominam as regiões mais distantes ao centro do aglomerado e de menores densidades. Analisaremos quantitativamente as frações de objetos, à seguir, a fim de confirmar nossas verificações.

A subestrutura norte é composta por um total de 45 objetos, sendo que 71.11% são galáxias passivas (32 objetos), 17.77% são galáxias em transição (8 objetos) e 11.11% são classificadas como galáxias ativas (5 objetos). A subestrutura sul possui um menor número de galáxias, totalizando em 37 objetos. 59.45% são compostas de galáxias passivas (22 objetos), 18.91% são galáxias em processo de transição (7 objetos) e 21.62% são galáxias ativas (8 objetos).

Notamos pela Figura 4.5a que os grupos G83 e G84 estão localizados a aproximadamente 4 e 6 Mpc da região central do aglomerado. O grupo G83 é composto por 13 objetos, sendo que em maioria são galáxias passivas (6 objetos), seguidos de 3 galáxias em transição e 4 galáxias ativas. O grupo G84 possui uma quantidade total de 9 objetos. Segundo as classificações, 4 galáxias são passivas, 2 galáxias são transientes e 3 galáxias são ativas.

As duas regiões compreendidas pelos retângulos de linhas tracejadas cinzas possuem, entre si, comportamentos de frações distintas entre os diferentes tipos de objetos. A região localizada em 3 e 5 Mpc na Figura 4.5 (centro do retângulo $(\alpha_{R1}, \delta_{R1}) = (28.31^\circ, -13.89^\circ)$), ao contrário dos grupos G83 e G84, possuem o menor número de galáxias passivas, relativo ao número total de objetos do retângulo. Das 19 galáxias componentes, apenas 4 são passivas. Em proporções similares, nessa área filamentar nós contamos 7 galáxias em transição e 8 galáxias ativas.

Esse comportamento é contrário ao apresentado pelo retângulo localizado acima da região central do aglomerado (com centro em $(\alpha_{R2}, \delta_{R2}) = (28.18^\circ, -13.89^\circ)$), distando em aproximadamente 2 Mpc da região central. Das 17 galáxias contidas, 11 são passivas, 3 são transientes e 3 são galáxias ativas.

Das 241 galáxias analisadas neste gráfico da Figura 4.5a (excluindo galáxias das lacunas), nós observamos que a maioria dos objetos são galáxias passivas, totalizando 121 membros. Caso investiguemos se esses objetos ocupam alguma região de preferência, nós contamos com 87 das galáxias passivas (71.9%) estão localizados em um raio menor que 1.5 Mpc (linha sólida preta). De maneira similar, de todos

Região	Passivas	Ativas	Transientes	Total
Norte	32 (71.11%)	5 (11.11%)	8 (17.77%)	45
Sul	22 (59.46%)	8 (21.62%)	7 (18.92%)	37
G83	6 (46.15%)	4 (30.77%)	3 (23.08%)	13
G84	4 (44.44%)	3 (33.33%)	2 (22.22%)	9
R1	5 (23.81%)	8 (42.10%)	7 (36.84%)	19
R2	11 (64.70%)	3 (17.64%)	3 (17.64%)	17
$r < 1.5$ Mpc	87 (60.41%)	28 (19.44%)	29 (20.14%)	97
$r > 1.5$ Mpc	34 (35.05%)	33 (39.15%)	25 (25.77%)	144
$r < 1.5$ Mpc	87 (71.90%)	28 (42.42%)	29 (53.70%)	–
$r > 1.5$ Mpc	34 (28.10%)	38 (57.57%)	25 (46.29%)	–
Total	121	66	54	241

Tabela 4.2: Frações de objetos de acordo com presença em uma região. As 8 primeiras linhas referem-se a proporção de objetos de uma determinada classificação localizada em uma região em relação a todos os objetos dessa região. as proporções com base nos objetos pertencentes a sua respectiva região. As duas últimas representam as frações para uma classificação em relação ao número total de objetos daquela classificação.

os objetos localizados em $r < 1.5$ Mpc, 60% são galáxias passivas.

As galáxias ativas representam a segunda população mais rica de nosso aglomerado. Elas totalizam 66 objetos e possuem um comportamento em localização contrário ao das galáxias passivas. 38 galáxias ativas estão dispostas em regiões externas à 1.5 Mpc (57.57%). Caso levemos em consideração a quantidade de galáxias ativas comparado ao número de objetos localizados em $r > 1.5$ Mpc, constatamos uma proporção de 39.15% de ativas, sendo maioria.

As galáxias transientes populam o todo o sistema com um total de 54 objetos. Desses, 29 estão contidos na região central do aglomerado ($r < 1.5$ Mpc). Apesar de esse valor representar uma proporção de 53%, notamos que existe uma população expressiva de galáxias em transição localizadas nas regiões mais externas ao centro do aglomerado. De todas as galáxias localizadas em $r < 1.5$ Mpc, a proporção de galáxias transientes e ativas são similares, sendo 20.14% e 19.44%, respectivamente. Para regiões mais externas, as galáxias transientes são minoria, compondo 25.77% dos objetos.

As quantidades e respectivas proporções apresentadas acima estão resumidas na tabela 4.2. As 8 primeiras linhas computam a fração de galáxias de uma determinada classificação (identificada pela 1ª linha) pertencente a uma determinada região (identificado na 1ª colunas) em relação ao número total de objetos dessa região. As duas últimas linhas indicam o número de objetos de uma determinada classificação (indicado pela 1ª linha) pertencentes a uma região (identificadas na 1ª coluna) em relação ao número total de objetos daquela classificação em todo o aglomerado.

Como próximo passo, nós vamos analisar a relação de morfologia-densidade, traduzida em uma fração de galáxias azuis (ativas), vermelhas (passivas) e transientes

em função da densidade numérica local e raio.

Inicialmente, definimos essas duas variáveis. Para cada objeto, determinamos o raio como a distância em *megaparsec* entre o objeto e o centro do aglomerado, definido no capítulo anterior. Portanto:

$$R = \theta \cdot D_{\theta}(z_{cosm}), \quad (4.4)$$

sendo θ a distância angular entre os centros em radianos e D_{θ} a distância angular cosmológica assumindo como *redshift* cosmológico o centro do aglomerado. Em nosso caso, nosso aglomerado é composto por um centro dividido em duas grandes aglomerações. Portanto, para cada objeto dentro de uma dessas duas subestruturas, nós definimos como raio a sua distância projetada até o centro da subestrutura. Na Figura 4.5a, percebemos que as regiões das subestruturas norte e sul se sobrepõem. Como correção, baseamo-nos na disposição da distribuição em raio X para truncar a separação entre as subestruturas.

Posteriormente, nós definimos a densidade superficial numérica local de galáxias⁸, de forma:

$$\Sigma = \frac{(n + 1)}{\pi D_7^2}, \quad (4.5)$$

sendo $n = 7$ e D_7 a distância em *megaparsec* do objeto até a 7^a galáxia mais próxima. A Figura 4.5b demonstra a correlação entre a densidade numérica local (em log) e a distância ao centro do aglomerado (também denominado raio). Nós podemos verificar que a relação entre esses dois parâmetros se manifesta decrescente até o raio de 3 Mpc. Até esse raio, portanto, quanto mais próximo ao centro do aglomerado (ou centro das subestruturas se a galáxia habitar uma dessas componentes), maior é a quantidade de galáxias vizinhas. Para um raio próximo ao centro ($r \sim 0$), observamos as maiores densidades locais, sendo o valor máximo apresentado 370 galáxias por Mpc^{-2} (\log Densidade Numérica = 2.57 [Mpc^{-2}]).

A partir de 3 Mpc, observamos que as densidades locais elevam-se próximas aos raios de 3 e 6 Mpc, atingindo o valor de aproximadamente 10 galáxias por Mpc^{-2} (\log Densidade local = 1 [Mpc^{-2}]). Esse fenômeno ocorre devido a presença dos grupos G83 e G84, distando em $r_{G83} = 3.81$ Mpc e $r_{G84} = 5.81$ Mpc ao centro do aglomerado.

A Figura 4.5c demonstra a relação entre a fração de galáxias passivas, ativas e transientes e a densidade local das galáxias, obtida pela equação 4.5. Assim como na Figura 4.5a, nós representamos os diamantes vermelhos como galáxias passivas, as estrelas azuis como galáxias ativas e os triângulos verdes como galáxias transientes.

Nós dividimos o intervalo de 0 a 2.5 do \log Densidade Local em 4 intervalos

⁸No texto, nós referiremos a densidade superficial numérica local como densidade local.

iguais de valor 0.5. Para cada partição, nós relacionamos com a fração de objetos, definido como o número de galáxias de um determinado tipo pelo número total de galáxias no intervalo em questão.

As galáxias passivas (diamantes vermelhos) apresentam uma relação crescente com a densidade local. À medida que analisamos intervalos mais densos, a fração de galáxias passivas torna-se maior. A menor proporção é observada no intervalo de densidade local $\log \text{Densidade Local} < 0.5 \text{ Mpc}^{-2}$, compondo aproximadamente 19% da população desse intervalo. Para esse intervalo, as galáxias passivas são minoria. Para densidades superiores a $\log \text{Densidade Local} = 0.5 \text{ Mpc}^{-2}$, a relação é crescente e as galáxias passivas tornam-se maioria. Para as regiões mais densas ($\log \text{Densidade Local} > 2.0 \text{ Mpc}^{-2}$), temos uma composição de 71.4% objetos desse tipo.

As galáxias ativas possuem um comportamento inverso. À medida que analisamos intervalos mais densos, a proporção de galáxias diminui. Elas são dominantes no intervalo menos denso ($\log \text{Densidade Local} < 0.5 \text{ Mpc}^{-2}$), compondo 29.7% dos objetos. Para o intervalo de $0.5 < \log \text{Densidade Local} < 1.0 \text{ Mpc}^{-2}$, elas atingem um pico de fração de 31.7% em relação a sua presença nos demais intervalos, porém as galáxias passivas já são dominantes compondo 38.09% dos objetos nesse intervalo. Para ambos os intervalos que estão contidos em $1.0 < \log \text{Densidade Local} < 2.0 \text{ Mpc}^{-2}$, as galáxias ativas possuem frações similares as galáxias transitentes, sendo 24.28% em $1.0 < \log \text{Densidade Local} < 1.5 \text{ Mpc}^{-2}$ e 15.85% em $1.5 < \log \text{Densidade Local} < 2.0 \text{ Mpc}^{-2}$. Para os ambientes mais densos ($\log \text{Densidade Local} > 2.0 \text{ Mpc}^{-2}$), as galáxias estão em baixas quantidades em proporção de 19.04% em comparação a população deste intervalo.

As galáxias transitentes manifestam uma proporção constante para os ambientes em $\log \text{Densidade Local} < 2.0 \text{ Mpc}^{-2}$, em $\sim 21\%$. Porém, é notável que para os ambientes mais densos ($\log \text{Densidade Local} > 2.0 \text{ Mpc}^{-2}$) as galáxias em transição são minoria, compondo 9% dos objetos. Portanto, as galáxias transitentes evitam regiões de altas densidades.

Devemos nos atentar entretanto que, apesar de que em regiões menos densas as galáxias passivas são minoria e as ativas são maioria, devemos ter cautela pois as barras de erros não nos permitem confirmar categoricamente essa afirmação.

Complementar a essa análise, relacionamos as frações de galáxias com a distância ao centro do aglomerado, pela Figura 4.5d. Nós calculamos as frações de galáxias passivas (diamantes vermelhos), galáxias ativas (estrelas azuis) e galáxias em transição (triângulos verdes) em um intervalo de 0 a 7 Mpc divididos em 14 intervalos de 0.5 Mpc de comprimento. As frações são definidas pelo número total de galáxias de uma determinada classificação, pelo número total de objetos no intervalo definido.

Na Figura 4.5d, a linha sólida preta indica a distância de 1.64 Mpc, definida como raio virial na seção anterior. Além disso, nós preenchemos em cinza escuro

a região entre $2 < R < 3$ Mpc pois ela compreende parte da região de laguna do CCD, onde não temos uma detecção de objetos substancial pela banda U. Além disso, destacamos em tons de cinza as regiões $3 < R < 5$ Mpc e $5.5 < R < 6.5$ Mpc que compreendem as galáxias localizadas nos grupos G83 e G84, respectivamente.

Iniciemos analisando a região de $R < 2$ Mpc. As galáxias passivas apresentam as maiores frações de objetos e possuem comportamento decrescente à medida que consideramos maiores raios. Para $R < 0.5$ Mpc, elas apresentam um pico compondo 67.18% das galáxias neste intervalo. Nessa mesma região, as galáxias ativas e transientes possuem proporções similares, $\sim 16\%$.

As galáxias ativas, apresentam uma queda em $r \sim 0.75$ Mpc (13% do total do intervalo), porém as frações aumentam com o aumento da distância ao centro até $r < 2$ Mpc. As galáxias em transição permanecem variando em valores próximos a 23% para o intervalo de $0.5 < r < 2$ Mpc.

Os intervalos de 3 a 4 Mpc compreendem 9 galáxias pertencentes ao grupo G83 (69% dos membros desse grupo) e 7 galáxias da região filamentar, delimitada pela caixa em linha tracejada cinza, com centro distando ~ 4 Mpc do aglomerado. Esses números podem ser conferidos na Figura 4.5a pela delimitações das circunferências cinzas tracejadas para os raios de 3 e 4 Mpc.

Para esse intervalo, temos a maior proporção de galáxias espirais ($\sim 42\%$ para ambos os pontos). Em $r \sim 3.25$ Mpc as galáxias passivas e transientes compõem igualmente 28.57% da população para esse intervalo e em $r \sim 3.75$, as galáxias passivas representam o tipo em minoria ($\sim 25\%$). Dado que, para $r < 2$ Mpc as galáxias passivas dominavam todos os intervalos de distância ao centro, percebemos que para maiores raios ocorreu (no intervalo de $2 < r < 3$ Mpc) a mudança de regime para a dominância de galáxias espirais.

Para o intervalo de $4 < r < 5$ Mpc, temos a contribuição de 4 galáxias pertencentes ao grupo G83 e 11 galáxias pertencentes à região filamentar descrita para o intervalo analisado anteriormente. Percebemos a predominância de galáxias passivas em detrimento das galáxias ativas e transientes.

Como destacado, a região de $5.5 < r < 6.5$ Mpc contém os objetos localizados no grupo G84. Confirmamos essa afirmação ao observar na Figura 4.5a que o “raio virial” do grupo está contido no anel de linha tracejada cinza cujo raio menor é igual a 5 Mpc e o raio maior é igual a 6 Mpc.

Para $r \sim 5.75$ Mpc, observamos que a proporção de galáxias passivas e transientes é similar, compondo 40% da população do intervalo. Para $r \sim 6.25$ Mpc, nós verificamos que não há galáxias em transição, mas uma predominância de galáxias passivas (60 %) e fração moderada de galáxias ativas (40%).

Porém, assim como destacamos para a Figura 4.5c, nós reinteramos que as barras de erro para raios superiores a 2 Mpc representam elevados valores de erros, portanto

devemos tratar com cautela.

Pela análise de todos os painéis da Figura 4.5, nós podemos concluir que os diferentes tipos morfológicos possuem região preferenciais de localização. As galáxias passivas localizam-se principalmente nas regiões centrais do aglomerado (como foi possível notar nas Figuras 4.5 a e d), regiões centrais dos grupos G83 e G84 e compõem em maioria as regiões de densidades altas e intermediárias (Figura 4.5c).

As galáxias ativas possuem relação inversa, predominando as regiões de menor densidade. Elas estão presentes na região central, porém sua proporção aumenta a medida que consideramos maiores distâncias ao centro do aglomerado.

As galáxias transientes localizam-se em proporções similares nas regiões centrais do aglomerado RXJ0153 e nas regiões mais externas ao aglomerado. Notamos que sua proporção também é similar para ambientes de densidade pouca ou moderada, mas que evitam as regiões mais densas do aglomerado.

O aglomerado RXJ0153 é uma estrutura jovem e composta de duas subestruturas centrais e dois grupos em processo de acreção. Dado a elevada fração de galáxias passivas em todas as regiões, nós concluímos que todas as aglomerações citadas já estão em processo de transformação avançado de suas galáxias de ativas em passivas. Nós notamos uma maior quantidade de objetos localizados na subestrutura norte e uma maior proporção de galáxias passivas nessa região. Portanto, concluímos que essa subestrutura é mais avançada do que a subestrutura sul.

4.4 Taxa de formação estelar específica em função do ambiente

Devido ao fato de que a morfologia de uma galáxia está fortemente correlacionada com sua taxa de formação estelar, a relação de morfologia-densidade pode ser compreendida como uma relação de taxa de formação estelar e densidade numérica local (densidade \propto SFR⁻¹).

Tal correlação é observada em aglomerados do Universo local, porém, ainda não existe um consenso de qual momento da história do Universo essa tendência se tornou evidente. Além disso, enquanto estudos limitados por massa apresentam uma correlação negativa entre a taxa de formação estelar e a densidade local para galáxias em $z \sim 1$ (Patel et al. 2009a, 2011), amostras limitadas por luminosidade demonstram uma tendência inversa para esse intervalo de *redshift* (Elbaz et al. 2007). Isso implicaria que as interações gravitacionais que ocorrem em aglomerados não seriam eficientes para gerar uma diminuição da formação de estrelas nas galáxias membro.

Estudemos como se comporta a taxa de formação estelar específica das galáxias

com a distância ao centro do aglomerado e a densidade local. Dessa maneira, colocaremos em perspectiva como um aglomerado localizado em $z \sim 0.8$ está inserido dentro das possibilidades propostas pela literatura.

A Figura 4.6a compreende a disposição espacial das galáxias membro do aglomerado destacando sua taxa de formação estelar específica (sSFR⁹ em escalas de cinza. Nós obtemos esse valor pela razão da taxa de formação estelar nos últimos 100 milhões de anos pela massa total da galáxia, ambos parâmetros de saída do ajuste de distribuição espectral descrito na seção 3.5. Nós atribuímos a sSFR mais negativa de nosso intervalo ($\log \text{sSFR} = 12.0 \text{ ano}^{-1}$) a cor preta e à sSFR de maior valor da nossa amostra ($\log \text{sSFR} = -9.0 \text{ ano}^{-1}$) a cor cinza clara.

As galáxias não detectadas na banda fotométrica U, por estarem localizadas nas lacunas do CCD, são representadas por circunferências pretas não preenchidas. Assim como na Figura 4.5a, nós introduzimos linhas sólidas correspondendo às subestruturas norte e sul, centradas respectivamente em $(\alpha_{\text{subnorte}}, \delta_{\text{subnorte}}) = (28.18^\circ, -13.95^\circ)$ e em $(\alpha_{\text{subsul}}, \delta_{\text{subsul}}) = (28.16^\circ, -13.97^\circ)$ e aos grupos G83 e G84, centrados em $(\alpha_{\text{G83}}, \delta_{\text{G83}}) = (28.15^\circ, -14.10^\circ)$ e $(\alpha_{\text{G84}}, \delta_{\text{G84}}) = (27.98^\circ, -14.07^\circ)$. Também está representado em linha sólida preta a circunferência que compreende o raio de 1.5 Mpc ao centro do aglomerado $(\alpha_{\text{RXJ0153}}, \delta_{\text{RXJ0153}}) = (28.17^\circ, -13.96^\circ)$.

Inspeccionando visualmente a distribuição espacial das galáxias do aglomerado juntamente de suas respectivas taxas de formação estelar específicas, percebemos que as galáxias com menores valores de sSFR (cores mais escuras, $\log \text{sSFR} < -10.5 \text{ ano}^{-1}$) concentram-se em regiões de maiores densidades, como em locais com distâncias inferiores a $R = 1.5 \text{ Mpc}$ (principalmente subestruturas norte e sul) e regiões centrais dos grupos G83 e G84.

Como observado na Figura 4.5a, existe uma concentração de galáxias passivas na caixa centrada em $(\alpha_{R2}, \delta_{R2}) = (28.18^\circ, -13.89^\circ)$, compondo 64.70% do total de objetos da área delimitada. Nós notamos que essa tendência também é acompanhada pela taxa de formação estelar específica, pois 14 das 19 (82%) galáxias componentes dessa região possuem $\log \text{sSFR} < -10.0 \text{ ano}^{-1}$.

A região também analisada em 4.5a contida na região de linha pontilhada na Figura 4.6a (centrada em $(\alpha_{R1}, \delta_{R1}) = (28.31^\circ, -13.89^\circ)$) contém um total de 19 galáxias compostas de 5 passivas, 8 ativas e 7 transientes. As galáxias passivas possuem todas baixas taxas de formação estelar específicas, $\log \text{sSFR} < -10.5 \text{ ano}^{-1}$. 7 das ativas possuem $\log \text{sSFR} > -9.6 \text{ ano}^{-1}$. Das 7 em transição, três possuem sSFR características de galáxias ativas ($\log \text{sSFR} > -10.0 \text{ ano}^{-1}$), e as 4 restantes possuem taxas características de passivas ($\log \text{sSFR} < -10.0 \text{ ano}^{-1}$).

⁹Utilizamos essa abreviação devido ao termo correspondente em inglês *specific star formation rate*. Relembremos que a taxa de formação estelar específica (sSFR(t)) é definida pela razão entre a taxa de formação estelar instantânea SFR e a massa estelar de uma galáxia. $\text{sSFR} = \frac{\text{SFR}}{M}$.

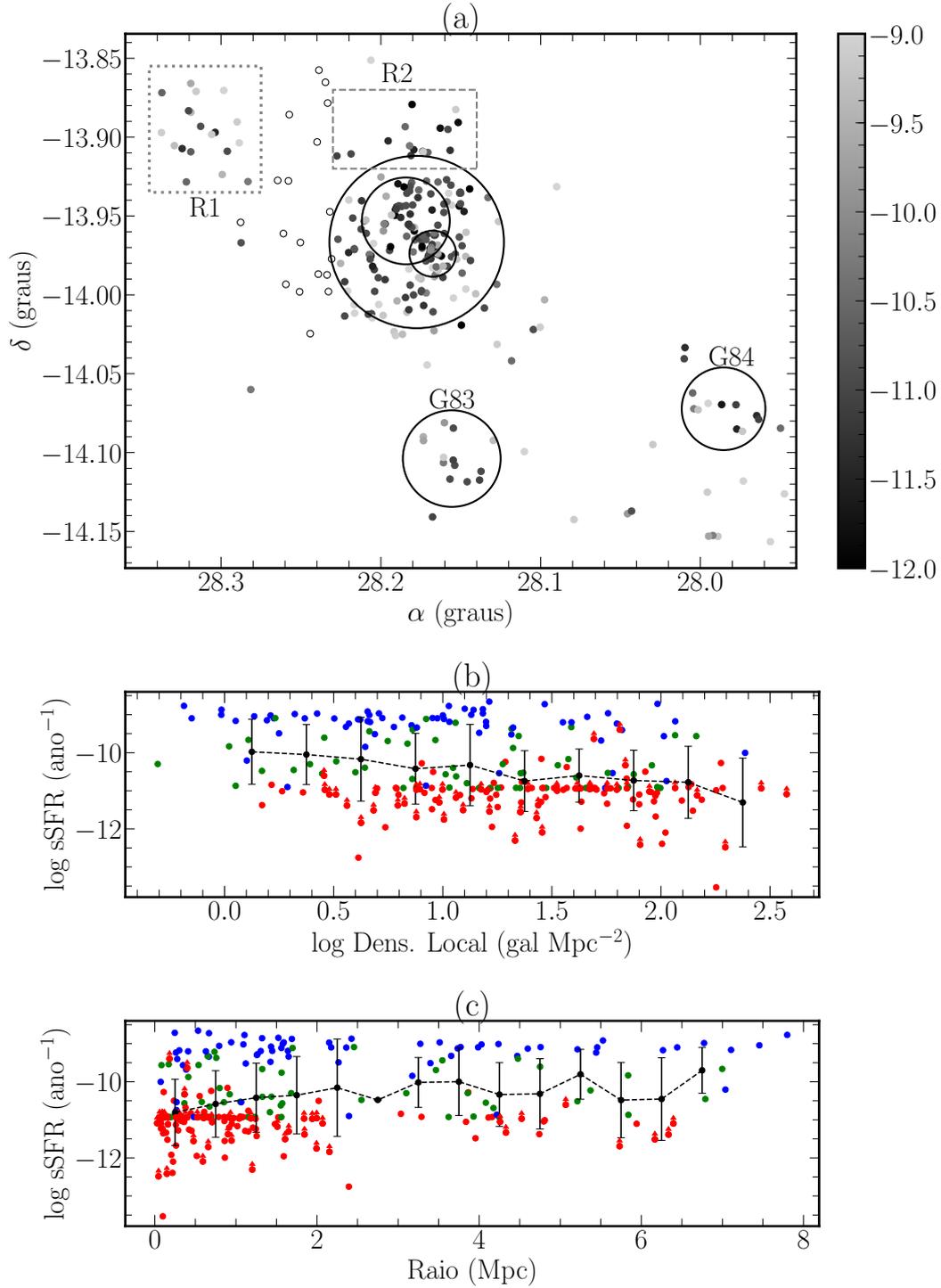


Figura 4.6: (a) Distribuição espacial das galáxias destacadas de acordo com a taxa de formação estelar. As galáxias são destacadas pela taxa de formação estelar específica em escalas de cinza. ; (b) Média da taxa de formação estelar em intervalos de densidade local; (c) Média da taxa de formação estelar em anéis de raio 0.25 Mpc. Em (b) e (c) os pontos vermelhos representam galáxias passivas, os pontos verdes representam as galáxias transientes e pontos azuis representam galáxias ativas. Os pontos pretos representam a medianas das taxas de formação para o intervalo considerado.

Para a região central do aglomerado, $R < 1.5$ Mpc, dos 141 objetos, 121 galáxias (77.24% de 141) possuem $\log \text{sSFR} < -10.0 \text{ ano}^{-1}$, ou seja, baixas taxas. Sob mesma análise, os grupos G83 e G84 apresentam 61.5% e 77.24% objetos com $\log \text{sSFR} < -10.0 \text{ ano}^{-1}$, respectivamente.

Para quantificar essa análise visual e o observar o comportamento da sSFR com o ambiente, dispomos na Figura 4.6b a relação entre a taxa de formação estelar específica e a densidade numérica local. Nós representamos as cores dos pontos de acordo com a classificação obtida pelo diagrama cor-magnitude ótico-ultravioleta, na seção 4.1.2. As galáxias passivas são pontos vermelhos, as galáxias em transição são pontos verdes e as galáxias ativas são pontos azuis.

Nós dividimos a amostra em um intervalo de $0.0 < \log \text{Densidade Local} < 2.5 \text{ Mpc}^{-2}$ em 10 intervalos de comprimento 0.25. Para cada divisão, nós calculamos a média da taxa de formação estelar específica das galáxias pertencentes a um intervalo específico. O resultado está na Figura 4.6b como pontos pretos e barras de erros conforme os desvios padrões encontrados na distribuição de cada intervalo.

Nós observamos que as galáxias ativas (pontos azuis), ocupam regiões de sSFR para todas as densidade ocupadas próximos a $\log \text{sSFR} \sim -9.0 \text{ ano}^{-1}$. As galáxias ativas se estendem de $\log \text{Densidade Local} \sim -0.2 \text{ Mpc}^{-2}$ até $\log \text{Densidade Local} (\text{Mpc}^{-2}) \sim 2.1$, salvo uma galáxia em $\log \text{Densidade Local} \sim 2.4 \text{ Mpc}^{-2}$.

As galáxias passivas (pontos vermelhos) ocupam as regiões de menores sSFR ($\log \text{sSFR} \lesssim -11 \text{ ano}^{-1}$), em maioria, chegando a taxas de $\log \text{sSFR} \sim -13.5 \text{ ano}^{-1}$. Esses objetos ocupam regiões de maiores densidades, abrangendo um intervalo de 0 a 2.6. Já as galáxias em transição ocupam regiões de taxas de formação estelar específicas intermediárias entre os valores -9.5 a -11. Estão presentes nos intervalos de densidade menores que 2.2.

Como dito anteriormente, nós calculamos as médias da taxa de formação estelar específica para os intervalos de 0.25 na distribuição de objetos. Como resultado, nós notamos que a sSFR decresce à medida que as galáxias ocupam regiões mais densas. Para $\log \text{Densidade Local} > 1.25 \text{ Mpc}^{-2}$, a média de sSFR se aproxima do regime de galáxias passivas que concentram-se no entorno de $\log \text{sSFR} \sim -11 \text{ ano}^{-1}$. Para intervalos de menores densidade, a média cresce e ocupa para $\log \text{Densidade Local} < 1.25 \text{ Mpc}^{-2}$ valores típicos de galáxias em transição.

De maneira complementar, analisemos a relação entre a taxa de formação estelar específica com o raio, ou seja, a distância projetada ao centro do aglomerado RXJ0153. Assim como na Figura 4.5c, nós dividimos as galáxias em partições de 0.5 Mpc, no intervalo de 0 a 7 Mpc. Para cada fatia de distância, nós calculamos a média da taxa de formação estelar específica para os objetos contidos no intervalo considerado.

Como verificamos em 4.6a, as galáxias ativas apresentam majoritariamente taxas

de formação estelar específicas próximas ao $\log \text{sSFR} = -9.0 \text{ ano}^{-1}$. Esse comportamento é constante para todos os raios do intervalo de 0 a 7 Mpc. As galáxias passivas apresentam as menores sSFRs, concentrando-se principalmente em raios inferiores a $R \sim 2$ Mpc. Porém, as menores taxas ($\log \text{sSFR} < -11.5 \text{ ano}^{-1}$) são apenas observadas em objetos em raios inferiores a 2 Mpc. Não observamos esse comportamento para galáxias nas regiões dos grupos G83 e G84. As galáxias em transição estão distribuídas em todo o intervalo de $R < 7$ Mpc, com taxas de formação estelar específicas em intervalos intermediários aos típicos apresentados pelas galáxias ativas e passivas.

Pelas médias da sSFR nos 10 intervalos de 0.5 Mpc de comprimento, nós observamos um comportamento crescente da sSFR da amostra com o aumento do raio. O menor valor apresentado ocorre para o intervalo $r < 0.5$ Mpc, sendo $\log \text{sSFR} = -10.80 \text{ ano}^{-1}$, próximo ao apresentado em média por galáxias passivas. À medida que consideramos intervalos mais distantes ao centro, verificamos um crescimento do valor de média, até o raio de $r \sim 2.5$ Mpc, com incremento de $\Delta \log \text{sSFR} \sim 0.16 \text{ ano}^{-1}$.

A média referente ao raio de $2.5 < R < 3.0$ Mpc é imprecisa, dado que nela está contido a região de lacuna do CCD. Para intervalos de raio superiores a $R \sim 3.0$ Mpc, percebemos que a média de sSFR permanece assumindo valores maiores, a menos para as regiões $4 < R < 5$ Mpc e $5.5 < R < 6.5$ Mpc. Isso ocorre devido a aglomeração de objetos passivos próximos a $\log \text{sSFR} = -11.25 \text{ ano}^{-1}$ que pertencem aos grupos G83 e G84.

Portanto, pela análise dos painéis da Figura 4.6, nós concluímos que as galáxias com menores taxas de formação estelar específicas estão localizadas nas regiões de maior densidade e menor distância as estruturas estudadas, como as subestruturas e os grupos G83 e G84. As regiões filamentosas, além de apresentarem ou alta fração de galáxias passivas ou alta fração de galáxias em transição, possuem intervalos de taxas que indicam que as transformações também estão ocorrendo nessas regiões.

Essas afirmações inicialmente aferidas por análise visual podem ser comprovados pela relação de sSFR com a densidade numérica local de galáxias e a distância ao centro do aglomerado. As médias da taxa de formação estelar específica aumentam a medida que adentramos regiões menos densas ou mais distantes ao centro do aglomerado, salvo os raios de localização dos grupos G83 e G84.

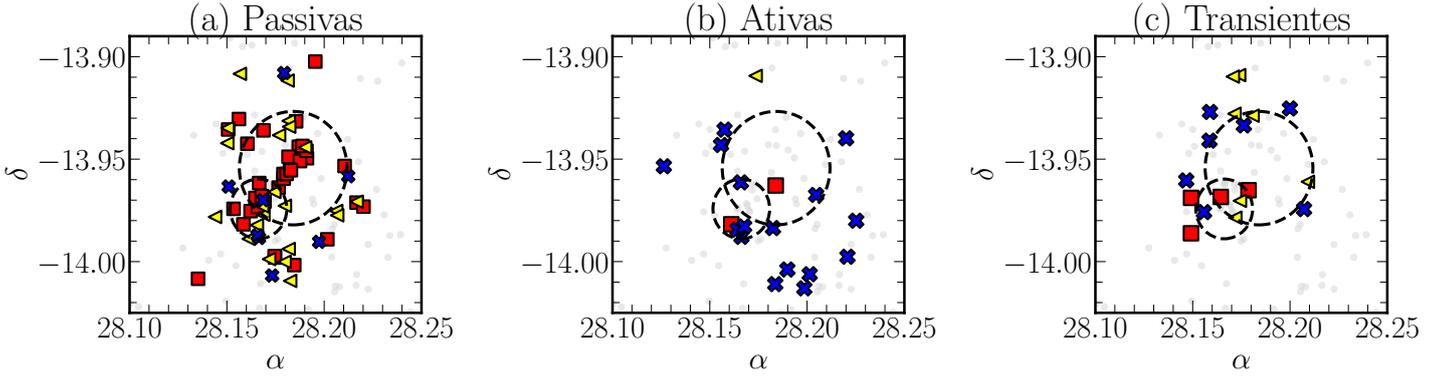


Figura 4.7: Distribuição espacial das morfologias de galáxias passivas(a), ativas (b) e em transição(c). Os pontos cinzas representam os membros que não possuem morfologia ou não pertencem a classificação. As circunferências em linhas tracejadas pretas maior e menor tracejados representam as subestruturas norte e sul, respectivamente. Os quadrados vermelhos são galáxias elípticas, os triângulos amarelos são lenticulares e cruces azuis são galáxias espirais.

4.5 Estudo das populações

4.5.1 Morfologia

Entre 241 galáxias (dado o corte de $z < 22.5$ mag) classificadas pelo diagrama cor-magnitude $U - z$ vs z na seção 2.3, 102 galáxias possuem morfologias visuais derivadas das imagens do ótico do *Hubble* (Postman et al. 2005). Como discutido no Capítulo 2, as galáxias são classificadas por Postman et al. (2005) em galáxias elípticas (tipo $T \leq -3$), lenticulares ($-2 \leq$ tipo $T \leq 0$) e galáxias espirais (tipo $T \geq 1$) a partir da imagem na banda i_{775} do telescópio espacial *Hubble*.

Pela literatura, esperamos que galáxias elípticas e lenticulares possuam pouca ou nenhuma formação estelar recente e uma população estelar antiga (alguns bilhões de anos), portanto, esperamos que esses objetos ocupem regiões no diagrama cor-magnitude típicos de galáxias passivas. As galáxias espirais e irregulares possuem a presença de gás e conseqüente formação estelar recente. Portanto, esperamos que componham principalmente a população de galáxias ativas.

Postman et al. (2005) classificou os objetos localizados em distâncias ao centro de RXJ0153 inferior a 2 Mpc. O campo de visão está representado na Figura 2.4 e confirma que as classificações referem-se apenas a região central do aglomerado.

Portanto, estudemos a ocorrência de diferentes classificações morfológicas dentro de nossa classificação fotométrica entre galáxias ativas, passivas e em transição. A Figura 4.7 apresenta a distribuição espacial de galáxias passivas (a), ativas (b) e transientes (c) de nosso aglomerado, destacando as galáxias que possuem morfologias

confirmadas.

Os quadrados vermelhos representam as galáxias elípticas, os triângulos amarelos representam as galáxias lenticulares e as cruces azuis representam as galáxias espirais. Os pontos cinza representam as galáxias que não foram classificadas por Postman et al. (2005), pois não são parte do catálogo original de Demarco et al. (2010).

Iniciamos observando a Figura 4.7a. Dentre a população de galáxias passivas, temos um total de 65 galáxias classificadas. A maioria é formada por elípticas, totalizando 35 objetos. Dessa subpopulação, 29 ocupam as regiões internas das subestruturas norte e sul, delimitadas pelas circunferências tracejadas pretas. As galáxias lenticulares passivas são compostas de 22 objetos, concentrados tanto nas subestruturas norte e sul (9 objetos) quanto nas regiões nos entornos dos raios viriais (13 objetos). Em minoria, as galáxias passivas também são compostas de galáxias espirais totalizando 7 objetos. Apenas 2 desses objetos estão localizados na subestrutura sul, os demais se encontram nas regiões externas.

Na Figura 4.7b, analisemos as galáxias ativas e suas respectivas 19 classificações disponíveis. Em maioria, as galáxias ativas são compostas de 16 galáxias espirais. Salvo 5 objetos, esse tipo morfológico não encontra-se concentrado nas regiões mais densas observadas (subestruturas norte e sul, delimitadas pelas linhas tracejadas pretas). Observamos duas galáxias elípticas, localizadas uma em cada subestrutura. Apenas notamos uma galáxia lenticular que se localiza fora das regiões de menor distância ao centro, em $(\alpha, \delta) \sim (28.175, -13.91)$.

Por fim, analisemos a Figura 4.7c composta de 18 galáxias em transição e classificadas morfológicamente. Em minoria, observamos 4 galáxias elípticas que encontram-se dentro ou nas imediações do raio virial da subestrutura Sul. Notamos que as galáxias espirais e lenticulares estão em mesma quantidade (7 objetos para cada tipo), e salvo a região da subestrutura sul, esses objetos permeiam as proximidades dos raios viriais das duas subestruturas. Resumimos todas as quantidades apresentadas na tabela 4.3.

Portanto, concluímos que as galáxias espirais são caracterizadas principalmente por seu comportamento ativo e preferencialmente se localizam em regiões de menor densidade e de maior distância ao centro do aglomerado. As galáxias elípticas e lenticulares apresentam comportamento, em maioria, passivo e estão concentradas nas regiões de maior densidade, principalmente dentro das subestruturas norte e sul. As galáxias em transição são compostas principalmente em galáxias espirais e lenticulares e se distribuem nas imediações dos raios viriais das subestruturas.

	Elíptica	Lenticular	Espiral	Total
Passiva	35	22	8	65
Ativa	2	1	16	19
Transiente	4	7	7	18
Total	41	30	31	

Tabela 4.3: Tabela de indica a quantidade de tipos morfológicos classificados por Postman et al. (2005) para as galáxias centrais do aglomerado RXJ0153 para cada classificação (passiva, ativa e transiente) obtida neste trabalho pelo diagrama de cor-magnitude.

4.5.2 Cor em função do ambiente

À seguir, nós analisaremos o comportamento do excesso de cor $\Delta(U - z)$ com a densidade local e a distância ao centro do aglomerado RXJ0153. O excesso de cor pode ser definido como a diferença entre a cor $U - z$ de um objeto e a cor na sequência vermelha em uma magnitude fixa. Essa relação linear foi definida na seção 4.1.2 ao classificar as galáxias de nossa amostra em passivas, ativas e em transição pelo diagrama cor-magnitude (linha sólida preta na figura cor-magnitude 4.2b).

Na Figura 4.8, nós observamos a relação entre o excesso de cor das galáxias com a densidade local (painel (a)) e o raio (distância ao centro do aglomerado, painel (b)). Os círculos representam as galáxias de nossa amostra de acordo com a sua classificação no diagrama cor-magnitude. As galáxias passivas correspondem aos círculos vermelhos, as galáxias transientes aos círculos verdes e as galáxias ativas aos círculos azuis.

Além disso, destacamos em diferentes símbolos as galáxias classificadas morfológicamente como elípticas (quadrados vermelhos), lenticulares (triângulos amarelos) e espirais (cruzes azuis). Em ambos os painéis, a linha sólida preta corresponde à sequência vermelha. As demais linhas sólidas indicam ajustes lineares para as galáxias passivas (linha sólida vermelha), galáxias ativas (linha sólida azul) e galáxias em transição (linha sólida verde), realizado pelo estimador *biweight*.

Analisemos o comportamento do excesso de cor com a densidade local, pela Figura 4.8a. Podemos observar que, as galáxias passivas apresentam as menores diferenças absolutas entre cores $U - z$ dos objetos e a sequência vermelha. Ocupam majoritariamente excessos de cor maiores que $\Delta(U - z) \gtrsim -1$ mag. As galáxias transientes possuem valores de excessos de cor intermediários, dentro do intervalo $-2.5 \lesssim \Delta(U - z) \lesssim -1$. As galáxias ativas possui as maiores diferenças em valor absoluto de cores em comparação com a sequência vermelha, ocupando as regiões do gráfico de $\Delta(U - z) \lesssim -2.5$ mag.

Para essa classificações, nós realizamos ajustes lineares cujos resultados são:

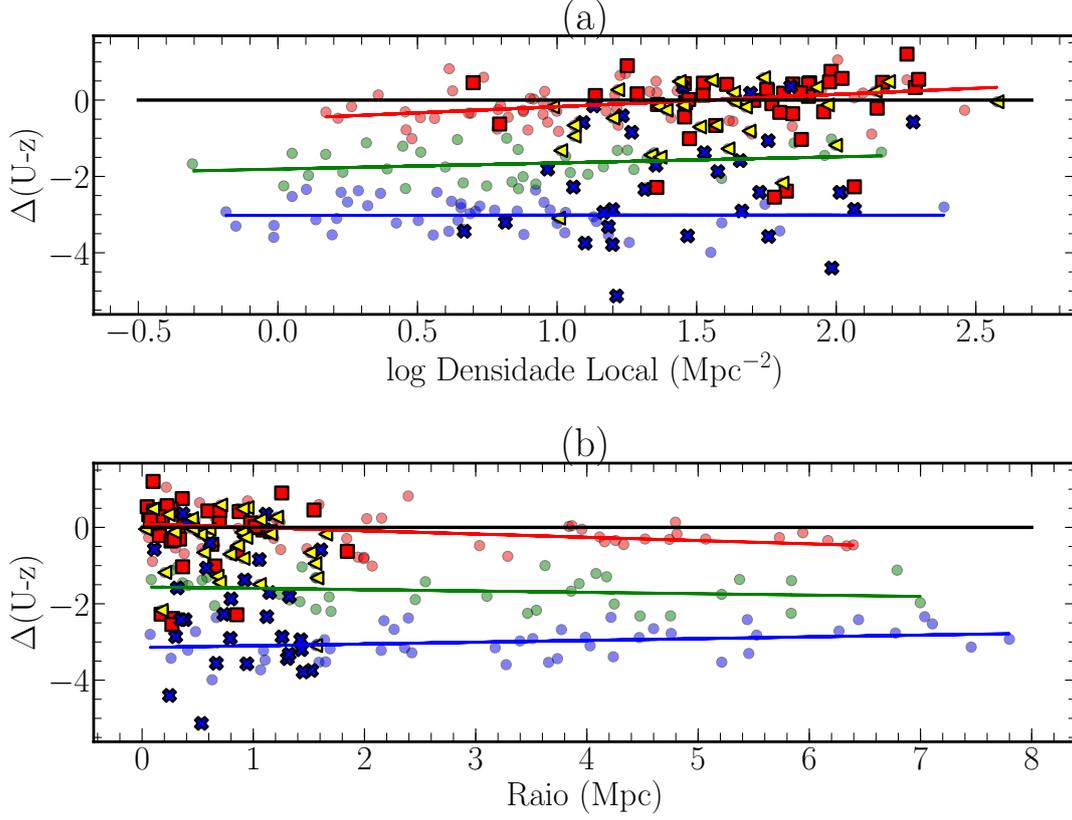


Figura 4.8: Excesso de cor em função da densidade local (a) e do raio (b), definido como a diferença entre a cor de um objeto e o valor da sequência vermelha naquela magnitude. Os círculos claros são as galáxias de nossa amostra, com a cor de acordo com a utilizada até então. Destacamos as morfologias com as mesmas cores e formatos utilizados até então.

$$\Delta(U - z)_{\text{pass}} = (0.32 \pm 0.11) \log DL + (-0.50 \pm 0.08) \quad (4.6)$$

$$\Delta(U - z)_{\text{transientes}} = (0.16 \pm 0.13) \log DL + (-1.81 \pm 0.11) \quad (4.7)$$

$$\Delta(U - z)_{\text{ativas}} = (0.00 \pm 0.11) \log DL + (-3.02 \pm 0.10) \quad (4.8)$$

Portanto, para as galáxias passivas e em transição, nós observamos que o excesso de cor se torna mais positivo à medida que consideramos regiões mais densas. As galáxias tornam-se mais avermelhadas à medida que analisamos maiores densidades locais. Apesar de apresentar uma correlação positiva, o coeficiente angular da relação para as galáxias ativas é próximo a zero, indicando-nos que não existe uma correlação com o ambiente.

Ainda na Figura 4.8a, estudemos a distribuição das propriedades das galáxias com morfologia conhecida. As galáxias elípticas (quadrados vermelhos) possuem

excessos de cor coerentes aos das galáxias passivas. Notamos apenas quatro galáxias elípticas que são notoriamente mais azuladas do que a população total ($\Delta(U - z) \sim -2.4$ mag), localizadas em densidades de $1.3 < \log$ Densidade Local < 2.1 Mpc $^{-2}$ (galáxias transientes que podemos observar na figura 4.7c).

As galáxias lenticulares também concentram-se em intervalos de $\Delta(U - z)$ próximas à sequência vermelha ($\Delta(U - z) \gtrsim 1$ mag). Porém, notamos um maior espalhamento em comparação as galáxias passivas. Enquanto as elípticas tem média (*biweight*) em 0.15 mag e espalhamento $\sigma_{elip} = 0.55$ mag, as galáxias lenticulares possuem média mais azuladas -0.3 mag com espalhamento $\sigma_{lenticular} = 0.79$ mag.

De 30 galáxias lenticulares representadas, 7 são classificadas como galáxias transientes. Se analisarmos sua distribuição na Figura 4.8a, verificamos que 6 desses objetos ($1.0 < \log$ Densidade Local < 2.0 Mpc $^{-2}$, $\Delta(U - z) \sim -1.5$ mag) estão localizados acima da linha sólida verde, que ajusta linearmente a amostra de galáxias em transição. A galáxia lenticular transiente que não segue essa regra encontra-se em \log Densidade Local ~ 1.8 Mpc $^{-2}$ e $\Delta(U - z) \sim -2.5$ mag.

As galáxias espirais ocupam densidades locais menores que \log Densidade Local = 2.1 Mpc $^{-2}$. Apenas um objeto foge essa regra (\log Densidade Local ~ 2.25) Mpc $^{-2}$, porém, ela recebe classificação de passiva. Além disso, elas possuem um maior espalhamento, com média em -2.18 e espalhamento $\sigma_{esp} = 1.5$ mag. Porém, das 31 espirais, 16 são classificadas como galáxias ativas. Existem 7 galáxias em região de transição, localizadas em $0.8 < \log$ Densidade Local < 1.8 Mpc $^{-2}$. 5 dessas subamostra localizam-se abaixo da linha de ajuste linear em linha sólida verde, que representa o ajuste para galáxias em transição.

De maneira complementar, na Figura 4.8b analisemos a distribuição $\Delta(U - z)$ com a distância ao centro do aglomerado. Os símbolos representam a morfológica de elípticas (quadrados vermelhos), lenticulares (triângulos amarelos) e espirais (cruzes azuis), assim como a Figura 4.8a.

Nós realizamos ajustes lineares para as populações das galáxias ativas (pontos vermelhos), galáxias transientes (pontos verdes) e galáxias passivas (pontos azuis) representadas por linhas vermelhas, verdes e azuis, respectivamente. Os resultados dos ajustes mostramos abaixo:

$$\Delta(U - z)_{passivas} = (-0.09 \pm 0.06)R + (0.08 \pm 0.03) \quad (4.9)$$

$$\Delta(U - z)_{transientes} = (-0.03 \pm 0.10)R + (-1.56 \pm 0.03) \quad (4.10)$$

$$\Delta(U - z)_{ativas} = (0.05 \pm 0.09)R + (-3.14 \pm 0.03) \quad (4.11)$$

Para as galáxias passivas, observamos um comportamento decrescente entre o excesso de cor e a distância ao centro do aglomerado. A galáxias localizadas nos grupos G83 e G84 ($r > 4$ Mpc) possuem cores mais azuis em geral que a sequência

azul.

A relação de galáxias transientes mostra uma relação decrescente com o raio porém aproximadamente plana. Porém, dado os pequenos coeficientes angulares, não observamos uma forte correlação entre o excesso de cor de galáxias passivas, ativas ou em transição com o ambiente.

4.5.3 Histórico de formação estelar

Nesta subseção, analisemos os parâmetros referentes ao histórico de formação estelar. Nós correlacionaremos as idades das populações estelares, o tempo de decaimento do histórico de formação estelar exponencial (τ), a taxa de formação estelar específica e a massa com a densidade numérica local (definida na equação 4.5) e a distância ao centro do aglomerado. Nós obtemos essas propriedades pelo ajuste da distribuição de energia espectral descrita na seção 3.5.

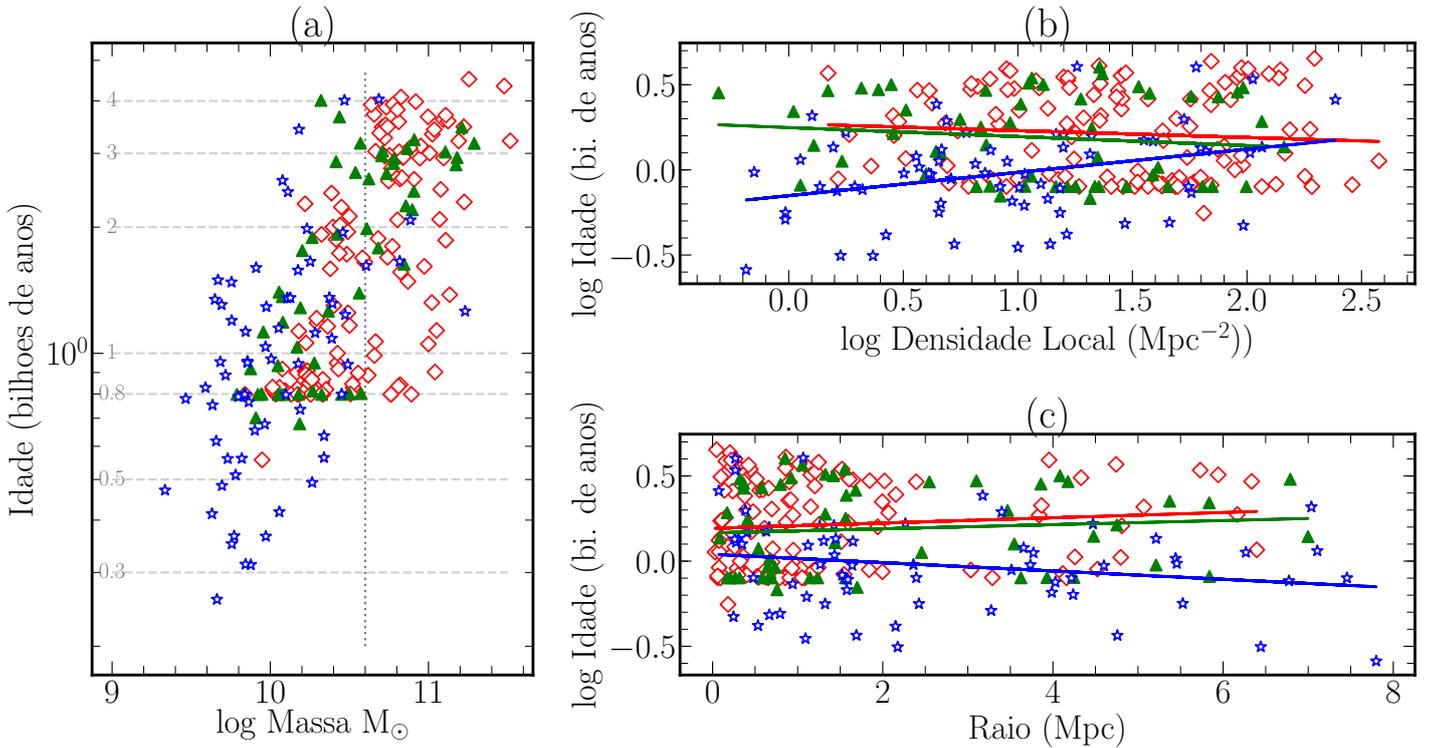


Figura 4.9: Relação entre a idade das populações estelares com a massa (painel a), a densidade numérica local (painel b) e a distância ao centro do aglomerado (painel c). Para todos os gráficos, os diamante vermelhos representam as galáxias passivas, os triângulos verdes as galáxias transientes e as estrelas azuis as galáxias ativas. As linhas sólidas representam os ajustes lineares para as galáxias passivas (linhas vermelhas), transientes (linhas verdes) e ativas (linhas azuis).

Iniciemos pela Figura 4.9 investigando o comportamento da idade das populações

estelares das galáxias em função da sua massa (painel (a)), densidade local (painel (b)) e distância ao centro do aglomerado (painel (c)). Para todos os gráficos, identificamos as galáxias passivas como diamantes vermelhos, as galáxias em transição como triângulos verdes e galáxias ativas como estrelas azuis.

Pela Figura 4.9a, observamos distintos comportamentos entre idade e massas dos diferentes tipos de galáxias de nosso aglomerado. Temos como erro típico para a idade de aproximadamente 30%. Globalmente, percebemos uma tendência positiva, de forma que as galáxias mais massivas possuem as idades de populações estelares mais antigas.

As galáxias passivas (diamantes vermelhos) abrangem um intervalo de idade de 0.8 a 4.5 bilhões de anos. Apesar do comportamento crescente entre a idade e massa, nós notamos duas regiões de concentrações de galáxias passivas na Figura 4.9a. Para galáxias menos massivas ($\log \text{Massa} < 10.6 M_{\odot}$, linha pontilhada cinza), existe uma concentração de galáxias com idades em 0.8 bilhão de anos estendendo-se a 1.5 bilhão de anos e outra concentração localizada no intervalo de 1.8 a 2.5 bilhões de anos. As galáxias mais massivas ($\log \text{Massa} > 10.6 M_{\odot}$, linha pontilhada cinza na Figura 4.9a) compõem 65 das galáxias passivas (53.17% de um total de 121 objetos). 41 (63% das 65 passivas mais massivas) objetos estão concentrados em idades superiores a 2.5 bilhões de anos. As 24 galáxias restantes distribuem-se em idades inferiores, até uma idade mínima de 0.8 bilhão de ano.

As galáxias em transição (triângulos verdes) apresentam comportamento similar ao das galáxias passivas. Elas abrangem idades de 0.8 a 4 bilhões de anos. Se considerarmos novamente dois regimes de massas, observamos comportamentos distintos entre as transientes. Para menores massas ($\log \text{Massa} < 10.6 M_{\odot}$), notamos uma acúmulo de objetos na região de 0.8 bilhão de ano, com apenas dois objetos transientes com idades inferiores (~ 0.7 bilhão de ano). Para o mesmo intervalo também observamos 10 objetos com idades superiores a 0.8 bilhão de ano, chegando a aproximadamente 2 bilhões de anos. Considerando objetos mais massivos ($\log \text{Massa} > 10.6 M_{\odot}$), nós observamos que em maioria ocupam idades superiores a 2 bilhões de anos.

As galáxias ativas apresentam uma distribuição discrepante em relação aos das galáxias passivas e transientes. Elas abrangem intervalos de 0.27 até 4 bilhões de anos. Considerando novamente o intervalo de $\log \text{Massa} < 10.6 M_{\odot}$, percebemos que a maioria (61 de 66 galáxias ativas) ocupam principalmente idades inferiores a 2 bilhões de anos. Para objetos mais massivos que esse intervalo, existem apenas 4 objetos, possuindo idades superiores a 1.3 bilhões de anos.

Na Figura 4.9b, nós continuamos a análise relacionando a idade com a densidade local das galáxias. Além dos símbolos já mencionados, nós ajustamos relações lineares entre os diferentes tipos de galáxias, representados em linhas sólidas. A linha

sólida vermelha representa as galáxias passivas, a linha sólida verde representa as galáxias transientes e a linha sólida azul representa as galáxias ativas.

Como observamos na Figura 4.9a, as galáxias passivas abrangem idades de 0.8 a 4 bilhões de anos ($-0.0097 < \log \text{Idade} < 0.6$ bilhões de anos). Elas se dispõem em densidades de $0.1 < \log \text{Densidade Local} < 2.6 \text{ Mpc}^{-2}$. Dentro desse intervalo, notamos que as duas concentrações de idade (~ 0.8 bilhão de anos e ~ 3.5 bilhões de anos) são distribuídas em todas as densidades ocupadas por esse tipo de galáxia.

Considerando as galáxias em transição, observamos que elas não ocupam densidade locais superiores a $\log \text{Densidade Local} = 2.2 \text{ Mpc}^{-2}$. Mas, para todos os intervalos de densidade local que se dispõem, elas ocupam homogeneamente as idades discutidas na Figura anterior (0.8 a 4 bilhões de anos).

O comportamento mais distinto entre as populações é o relacionado as galáxias ativas. Elas ocupam densidades locais entre $-0.2 < \log \text{Densidade local} < 2.2 \text{ Mpc}^{-2}$, com apenas uma ocupando um ambiente mais denso em $\log \text{Densidade local} \sim 2.4 \text{ Mpc}^{-2}$. Para esses objetos, notamos um crescimento da idade com o aumento da densidade.

As linhas sólidas nos indicam os ajustes lineares realizados pelo estimador *biweight* em cada população. Nós identificamos abaixo o resultado dos ajustes:

$$\log \text{Idade}_{\text{passivas}} = (-0.04 \pm 0.05) \log \text{DL} + (0.27 \pm 0.07) \quad (4.12)$$

$$\log \text{Idade}_{\text{transientes}} = (-0.05 \pm 0.06) \log \text{DL} + (0.25 \pm 0.08) \quad (4.13)$$

$$\log \text{Idade}_{\text{ativas}} = (0.14 \pm 0.05) \log \text{DL} + (-0.15 \pm 0.06). \quad (4.14)$$

Portanto, concluímos que as galáxias passivas e transientes apresentam um comportamento decrescente com a densidade de um ambiente e as galáxias ativas aumentam sua idade à medida que analisamos ambientes mais densos. Porém, devemos considerar que os coeficientes angulares dos ajustes para galáxias passivas e transientes são aproximadamente próximos a zero. Portanto, apesar de apresentar uma correlação negativa, não observamos uma forte dependência entre esses tipos de galáxias com a densidade local.

Na Figura 4.9c, finalizamos relacionamos a idade das populações estelares das galáxias com a distância ao centro do aglomerado. Assim como observamos na Figura 4.9b, as galáxias passivas organizam-se homogeneamente em idades de 0.8 a 4.5 bilhões de anos dentre todos os intervalos de distância por elas ocupados (0 a 7 Mpc). O mesmo comportamento é visto para as galáxias em transição. Já para as galáxias ativas, as galáxias mais velhas ($\log \text{Idade} > 0.4$ bilhões de anos) estão localizadas em distâncias inferiores a 1 Mpc. O resultado dos ajustes lineares encontram-se abaixo.

$$\log \text{Idade}_{\text{passivas}} = (0.02 \pm 0.02)R + (0.19 \pm 0.03) \quad (4.15)$$

$$\log \text{Idade}_{\text{transientes}} = (0.01 \pm 0.02)R + (0.17 \pm 0.05) \quad (4.16)$$

$$\log \text{Idade}_{\text{ativas}} = (-0.02 \pm 0.02)R + (0.04 \pm 0.05) \quad (4.17)$$

Observamos na Figura 4.5b que a densidade local e raio se correlacionam de maneira inversa. Isso é verificado nas relações das equações anteriores. As galáxias passivas e ativas possuem um comportamento crescente de idade com a distância ao centro do aglomerado. De maneira inversa, as galáxias ativas concentram maiores idades em distâncias próximas ao centro do aglomerado RXJ0153. Porém, nós verificamos nas equações acima que os coeficientes angulares e respectivos erros indicam uma relação aproximadamente plana, de forma que a idade desses objetos não parecem se correlacionar com o raio.

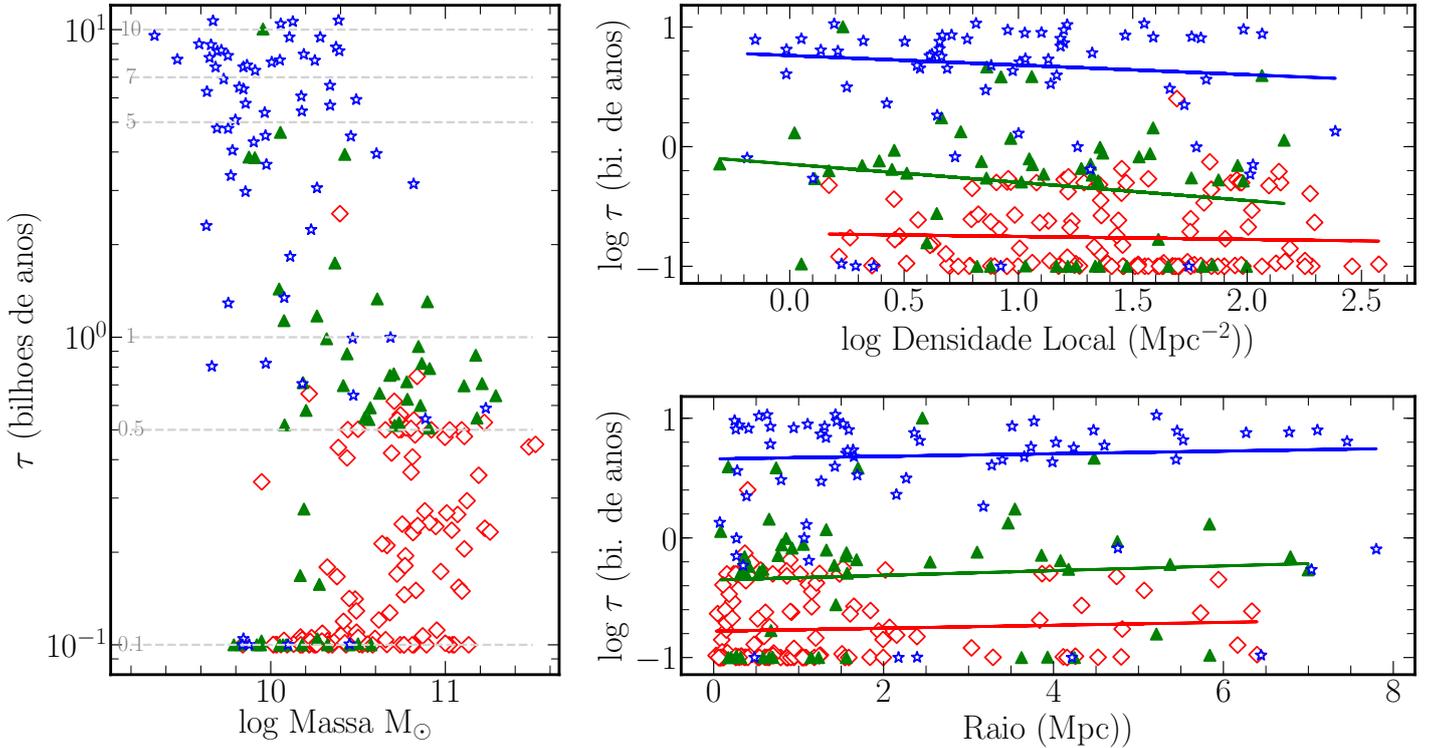


Figura 4.10: Relação entre o tempo de decaimento τ para um histórico de formação estelar *delayed* com a massa (painel a), a densidade numérica local (painel b) e a distância ao centro do aglomerado (painel c). Para todos os gráficos, os diamante vermelhos representam as galáxias passivas, os triângulos verdes as galáxias transientes e as estrelas azuis as galáxias ativas. As linhas sólidas representam os ajustes lineares para as galáxias passivas (linhas vermelhas), transientes (linhas verdes) e ativas (linhas azuis).

Como próximo passo, nós analisamos na Figura 4.10 a distribuição do tempo de decaimento τ para um histórico de formação estelar *delayed* em função da massa, densidade local e raio ao centro das galáxias membro do aglomerado RXJ0153.

No painel (a), nós relacionamos o τ com a massa das galáxias. As galáxias ativas (estrelas azuis) apresentam em geral os maiores tempos de decaimento τ . A maior parte da população de ativas (47 das 66 totais) localizam-se na Figura 4.10a no intervalo de 3 a 10 bilhões de anos e em baixas massas ($\log \text{Massa} < 10.6 M_{\odot}$). Observamos populações de galáxias ativas (11 objetos) com τ focado em 0.5 a 2 bilhões de anos e distribuídas em regiões de baixa e alta massa. Para massas menores que 10.6 nós observamos também uma população de ativas (5 objetos) com $\tau \sim 0.1$ bilhão de anos.

As galáxias passivas apresentam em maioria um tempo de decaimento τ menor do que 0.7 bilhão de anos. Nós notamos que para galáxias com massas menores que 10.4, elas se concentram em $\tau \sim 0.1$ bilhão de anos. Para galáxias com massas superiores a 10.4, nós verificamos uma maior distribuição de tempos efetivos, variando de 0.1 a 0.7 bilhão de anos.

Por fim, as galáxias transientes estão concentradas em maioria dentro do intervalo de $0.5 < \tau < 1.3$ bilhão de anos. Porém, observamos uma grande variedade de tempos de decaimento para massas menores que 10.4. Nós observamos objetos concentrados em aproximadamente $\tau \sim 0.1$ bilhão de anos até intervalo de 10 bilhões de anos.

À seguir, analisemos pela Figura 4.10b o comportamento do tempo de decaimento τ dos diferentes tipos de galáxias com a densidade numérica local. Nós percebemos que para todas as densidades locais ($-0.2 < \log \text{Densidade Local} < 2.2 \text{ Mpc}^{-2}$), as galáxias ativas possuem tempos de decaimento próximos a $\log \tau \sim 0.8$ bilhões de anos. Objetos com menores tempos de decaimento $\log \tau < 0.4$ bilhões de anos estão presentes em todos os intervalos de distância ocupados pelas galáxias ativas.

Para todo intervalo de densidade ocupado pelas galáxias transientes, nós observamos uma concentração de galáxias próximas a $\log \tau \sim 0.9$ bilhões de anos, como descrevemos na Figura anterior. Além disso, notamos que para o intervalo de $0.8 < \log \text{Densidade Local} < 2.0 \text{ Mpc}^{-2}$ há uma concentração de galáxias em $\log \tau \sim -1$ bilhões de anos. Por fim, as galáxias passivas, durante todo o seu intervalo de ocupação de densidade local (0.1 a 2.6), distribui-se homogeneamente sobre os intervalos de tempo de decaimento conferidos na Figura anterior.

Novamente, nós ajustamos relações lineares a partir do estimador *biweight*, representado pelas linhas sólidas pelos seguintes ajustes:

$$\log \tau_{\text{passivas}} = (-0.02 \pm 0.05) \log \text{DL} + (-0.73 \pm 0.08) \quad (4.18)$$

$$\log \tau_{\text{transientes}} = (-0.15 \pm 0.13) \log \text{DL} + (-0.15 \pm 0.16) \quad (4.19)$$

$$\log \tau_{\text{ativas}} = (-0.08 \pm 0.07) \log \text{DL} + (0.76 \pm 0.08) \quad (4.20)$$

Portanto, concluímos que todos os tipos de galáxias estudados possuem um comportamento decrescente com o aumento da densidade local. As galáxias transientes apresentam a maior variação de τ com a densidade local. As galáxias passivas e ativas possuem coeficientes menores, tornando a correlação aproximadamente plana.

Por fim, analisamos a variação do τ com a distância ao centro do aglomerado, pela Figura 4.10c. As galáxias ativas, para todo o intervalo de raio 0 a 8 Mpc, estão dispostas principalmente nas proximidades do valor $\log \tau = 0.9$ bilhões de anos. Para um raio $R < 1$ Mpc, nós observamos a presença de 7 galáxias com menores valores de τ ($-0.4 < \log \tau < 0.2$ bilhões de anos) e uma galáxia com $\log \tau \sim -1$ bilhões de anos.

As galáxias passivas se distribuem uniformemente no intervalo de $\log \tau$ de -1 a -0.2 bilhões de anos para todos os raios nos quais elas estão inseridas. As galáxias em transição abrangem todos os intervalos até 7 Mpc e, majoritariamente, está localizada em $\log \tau \sim -0.1$ bilhões de anos. Percebemos uma concentração de galáxias transientes em $\tau \sim -1$, para uma distância ao centro inferior a 1.6 Mpc.

Como auxílio, nós apresentamos o resultado dos ajustes lineares:

$$\log \tau_{\text{passivas}} = (0.01 \pm 0.02) R + (-0.78 \pm 0.04) \quad (4.21)$$

$$\log \tau_{\text{transientes}} = (0.02 \pm 0.04) R + (-0.35 \pm 0.11) \quad (4.22)$$

$$\log \tau_{\text{ativas}} = (0.01 \pm 0.02) R + (0.65 \pm 0.07) \quad (4.23)$$

Portanto, nós concluímos para todos os tipos um comportamento crescente do τ com o aumento do raio. Porém, observamos que as relações possuem coeficientes angulares pequenos, tornando aproximadamente planos.

Pelas Figuras 4.9 e 4.10, nós percebemos que os objetos mais massivos de galáxias passivas ($\log \text{Massa} > 10.6 M_{\odot}$) se distribuem em duas populações para a idade e τ . Dessa forma, analisemos a Figura 4.11 que relaciona a idade da população estelar das galáxias em comparação com o tempo de decaimento τ .

Assinalamos as galáxias passivas menos massivas ($\log \text{Massa} < 10.6 M_{\odot}$) por pontos pretos e as galáxias transientes mais massivas por triângulos verdes contendo um círculo branco no seu centro. As galáxias passivas mais massivas ($\log \text{Massa} > 10.6 M_{\odot}$) estão destacadas em diamantes vermelhos, as galáxias transientes menos massivas por triângulos verdes apenas e as galáxias azuis como estrelas azuis.

Nós confirmamos o observado nas Figura 4.9a e 4.10a que concluiu que galáxias ativas possuem, em geral, largos tempos de decaimento $\tau > 3$ bilhões de anos e as menores idades de populações estelares (em maioria, idade < 2 bilhões de anos).

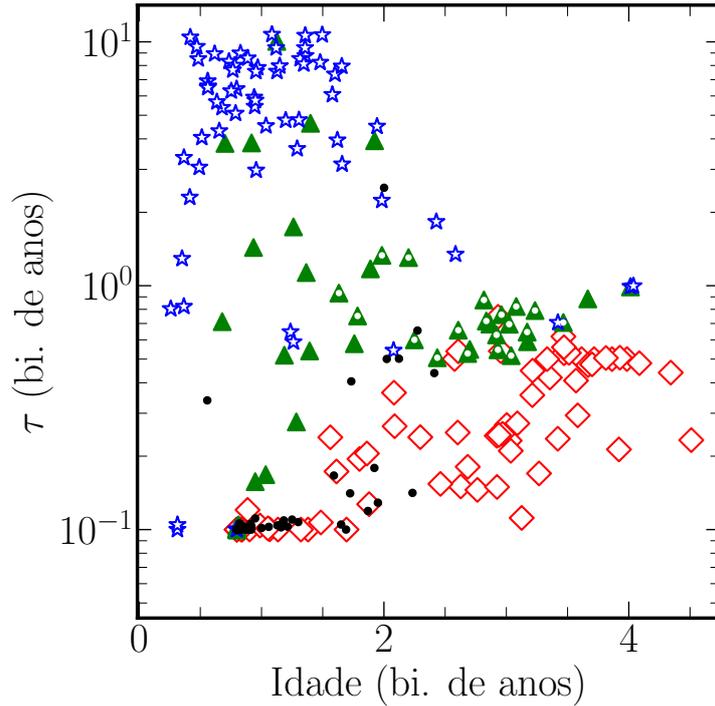


Figura 4.11: Relação entre a idade das populações estelares e tempo de decaimento τ das galáxias do aglomerado RXJ0153. As galáxias passivas são representadas pelos diamantes vermelhos, as galáxias transientes menos massivas ($\log \text{Massa} < 10.6 M_{\odot}$) pelos triângulos verdes e as galáxias ativas pelas estrelas azuis. Os pontos pretos marcam as galáxias passivas com massas superiores a $10.6 M_{\odot}$. As galáxias representadas por triângulos verdes e centro com ponto branco representam as galáxias transientes mais massivas ($\log \text{Massa} > 10.6 M_{\odot}$).

As galáxias em transição mais massivas (triângulos verdes com círculos centrais brancos) ocupam principalmente os tempos de decaimento entre $0.5 < \tau < 1.5$ bilhões de anos para um intervalo de idade de 1.5 a 3.5 bilhões de anos. Já para as galáxias transientes menos massivas (triângulos verdes apenas), observamos que existe uma concentração de galáxias localizadas em $\tau \sim 0.1$ bilhão de anos e com idade de 0.8 bilhão de anos (devido a sobreposição, não observamos esses 14 objetos). Além disso, existe um conjunto de objetos com idades inferiores a 2 bilhões de anos com τ variando entre 0.2 a 5 bilhões de anos.

As galáxias passivas apresentam um comportamento crescente da idade com o τ . Nós observamos que as galáxias passivas menos massivas ($\log \text{Massa} < 10.6 M_{\odot}$, pontos pretos) concentram-se principalmente com idades inferiores a 2 bilhões de anos e curto tempo de decaimento de $\tau \sim 0.1$ bilhão de ano. Já para galáxias passivas mais massivas ($\log \text{Massa} > 10.6 M_{\odot}$, diamantes vermelhos), nós observamos um comportamento crescente entre objetos. As galáxias passivas mais jovens se concen-

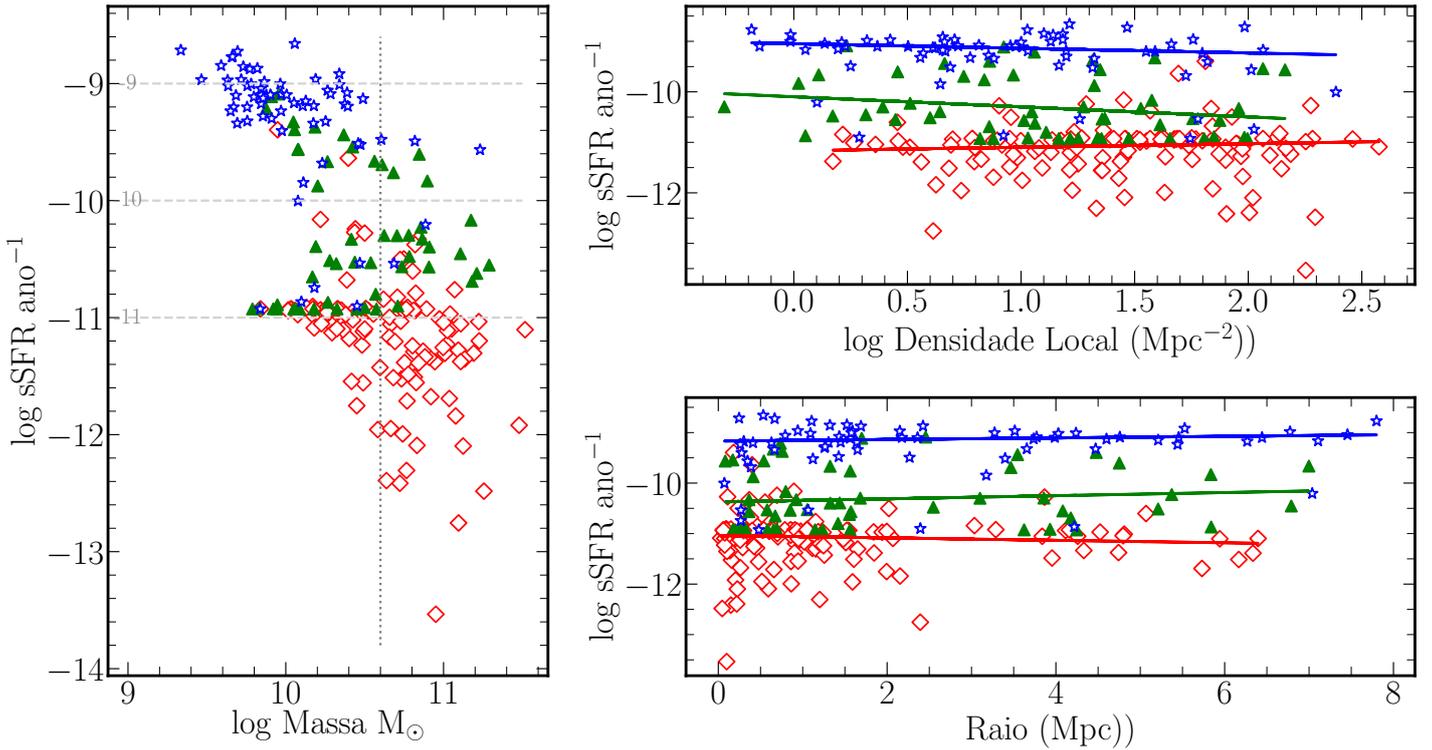


Figura 4.12: Relação entre a taxa de formação estelar específica (sSFR) com a massa (painel a), a densidade numérica local (painel b) e a distância ao centro do aglomerado (painel c). Para todos os gráficos, os diamante vermelhos representam as galáxias passivas, os triângulos verdes as galáxias transitentes e as estrelas azuis as galáxias ativas. As linhas sólidas representam os ajustes lineares para as galáxias passivas (linhas vermelhas), transitentes (linhas verdes) e ativas (linhas azuis).

tram em idades inferiores a 2 bilhões de anos e curtos tempos de decaimento $\tau \sim 0.1$ bilhão de anos. Vemos objetos intermediários com idades entre 2 e 3 bilhões de anos e tempos de decaimento entre 0.1 e 0.35 bilhões de anos. Os objetos mais antigos possuem idade superiores a 3 bilhões de anos e tempos de decaimentos próximos a $\tau \sim 0.5$ bilhão de anos. Portanto, concluímos que o tempo de decaimento τ com a evolução do aglomerado foi diminuindo para esses objetos.

À seguir, nós investigaremos a Figura 4.12 que representa a taxa de formação estelar específica em relação a massa das galáxias (a), a densidade numérica local (b) e a distância ao centro do aglomerado (c). Nós realizamos uma análise similar a na seção 4.4 quando inspecionamos as Figuras 4.6b e 4.6c e identificamos a relação da taxa de formação estelar específica com a densidade local e distância ao centro para toda a população. Agora, nós analisaremos separadamente o comportamento de cada tipo de galáxia.

Na Figura 4.12a, iniciemos correlacionando a taxa de formação estelar específica

com a massa das galáxias do aglomerado. As galáxias ativas (estrelas azuis) possuem as maiores taxas de formação estelar específicas (próximo a $\log \text{sSFR} \sim -9.2 \text{ ano}^{-1}$) e maior parte dos objetos se encontra concentrado em massas menores a $\log \text{Massa} = 10.6 M_{\odot}$ (linha pontilhada cinza). Porém nós verificamos que existem objetos ativos com sSFR em valores intermediários ($-11.0 < \log \text{sSFR} < -9.6 \text{ ano}^{-1}$) e similares a de galáxias passivas ($\sim \text{sSFR} \sim -11.0 \text{ ano}^{-1}$). Para massas superiores a $\log \text{Massa} = 10.6 M_{\odot}$, nós observamos que existem poucos objetos (4 galáxias) que possuem valores de taxas de formação estelar específicas com valores intermediários ($-11.0 < \log \text{sSFR} < -9.6 \text{ ano}^{-1}$).

Para galáxias passivas (diamantes vermelhos), nós observamos que a maior parte dos objetos se encontra com $\log \text{sSFR} \sim -11 \text{ ano}^{-1}$. A partir de massas de $\log \text{Massa} = 10 M_{\odot}$, nós observamos uma cauda de galáxias caracterizadas por menores valores de taxa de formação estelar específicas (no intervalo $-13.4 < \log \text{sSFR} < -11.0 \text{ ano}^{-1}$). Porém, percebemos que existe um população de objetos passivos com massas no intervalo de $10.2 < \log \text{Massa} < 11.0 M_{\odot}$ que possuem taxas de formação estelar específicas intermediárias, similares às apresentadas pelas galáxias em transição ($-10.8 < \log \text{sSFR} < -9.6 \text{ ano}^{-1}$).

As galáxias transientes (triângulos verdes) apresentam valores de taxas de formação estelar específico intermediários. Enquanto as galáxias passivas compreendem-se em maioria no intervalo de $\log \text{sSFR} < -11.2 \text{ ano}^{-1}$ e as galáxias ativas em intervalos de $\log \text{sSFR} > -9.4 \text{ ano}^{-1}$, as galáxias em transição possuem valores intermediários aos limites dos intervalos das outras classificações. Observamos esse comportamento para o intervalo de massa 10.0 a 11.2 . Porém, existem objetos com taxas de formação estelar específica similares a de galáxias passivas ($\log \text{sSFR} \sim -11.0 \text{ ano}^{-1}$).

Seguimos analisando pela Figura 4.12b o comportamento da sSFR das galáxias do aglomerado RXJ0153 em relação a suas respectivas densidades locais. Como descrevemos na seção 4.4, a taxa de formação estelar específica diminui à medida que adentramos ambientes mais densos.

Para as galáxias ativas, em todo o intervalo ocupado por esse tipo de galáxia, elas concentram-se em taxas de formação estelar específica próximas a -9.0, sem uma variação com a densidade. As galáxias passivas também se distribuem uniformemente pelo intervalo de densidade entre 0.1 a 2.6 , por taxas de $\log \text{sSFR} < -11.2 \text{ ano}^{-1}$. Para taxas de formação estelar específica superiores, identificamos galáxias passivas a partir de $\log \text{Densidade Local} > 0.8 \text{ Mpc}^{-2}$.

As galáxias transientes também se distribuem homoganeamente pelo intervalo de sSFR previamente discutido na Figura 4.12a por todas as densidades locais abrangidas por elas. Porém notamos que as galáxias com menores valores de sSFR ($\log \text{sSFR} \sim -11.0 \text{ ano}^{-1}$) estão presentes em ambientes mais densos que $\log \text{Densidade Local} = 0.8 \text{ Mpc}^{-2}$.

Apresentamos abaixo, o resultado do ajuste linear por estimador *biweight* representados na Figura 4.12b como linhas sólidas:

$$\log \text{sSFR}_{\text{passivas}} = (0.07 \pm 0.05) \log \text{DL} + (-11.17 \pm 0.08) \quad (4.24)$$

$$\log \text{sSFR}_{\text{transientes}} = (-0.20 \pm 0.14) \log \text{DL} + (-10.10 \pm 0.18) \quad (4.25)$$

$$\log \text{sSFR}_{\text{ativas}} = (-0.09 \pm 0.05) \log \text{DL} + (-9.05 \pm 0.06) \quad (4.26)$$

Pela análise da Figura 4.12b e das equações anteriores, nós não verificamos uma dependência entre a taxa de formação estelar específica e a densidade local para galáxias passivas e ativas. A maior variação se dá para galáxias em transição, apesar de que o erro não descarta a possibilidade de uma correlação plana.

A Figura 4.12c correlaciona a taxa de formação estelar específica das galáxias do aglomerado com a distância ao centro do aglomerado. Manifestamos à seguir o resultado do ajuste linear para cada objeto:

$$\log \text{sSFR}_{\text{passivas}} = (-0.02 \pm 0.02) R + (-11.04 \pm 0.04) \quad (4.27)$$

$$\log \text{sSFR}_{\text{transientes}} = (0.03 \pm 0.04) R + (-10.37 \pm 0.12) \quad (4.28)$$

$$\log \text{sSFR}_{\text{ativas}} = (0.02 \pm 0.01) R + (-9.17 \pm 0.05) \quad (4.29)$$

Podemos concluir que as galáxias possuem uma fraca correlação com a distância ao centro do aglomerado.

Até este ponto, nós investigamos a distribuição da idade, tempo de decaimento e taxa de formação estelar específica das galáxias do aglomerado em função dos parâmetros ambientais (densidade local e raio) e da massa de cada galáxia. Para finalizar esta seção, nós iremos fechar a análise examinando a distribuição de massas para os diferentes tipos de galáxias e observar sua localização espacial no sistema.

Para isso verifiquemos a Figura 4.13. O painel (a) mostra a distribuição de massa das galáxias passivas, transientes e ativas. A linha sólida representa a distribuição de galáxias passivas, a linha tracejada azul representa a distribuição de galáxias ativas e o histograma hachurada em verde representa a distribuição de galáxias transientes.

As galáxias ativas (linha tracejada azul) são principalmente caracterizadas por galáxias de baixa massa. O pico de frequência se localiza no intervalo de menor massa ($\log \text{Massa} < 10.0 M_{\odot}$) e o número de objetos decresce para maiores massas. As galáxias em transição (histograma hachurada verde) abrange um largo intervalo de massas. Observamos um pico de massa para o intervalo $9.8 < \log \text{Massa} < 10.2 M_{\odot}$ e frequência constante para galáxias com massas superiores até $\log \text{Massa} = -11.0 M_{\odot}$. Para massas superiores a esse limite, observamos que galáxias em transição possuem poucos objetos em comparação ao número de galáxias passivas. Nós notamos que as

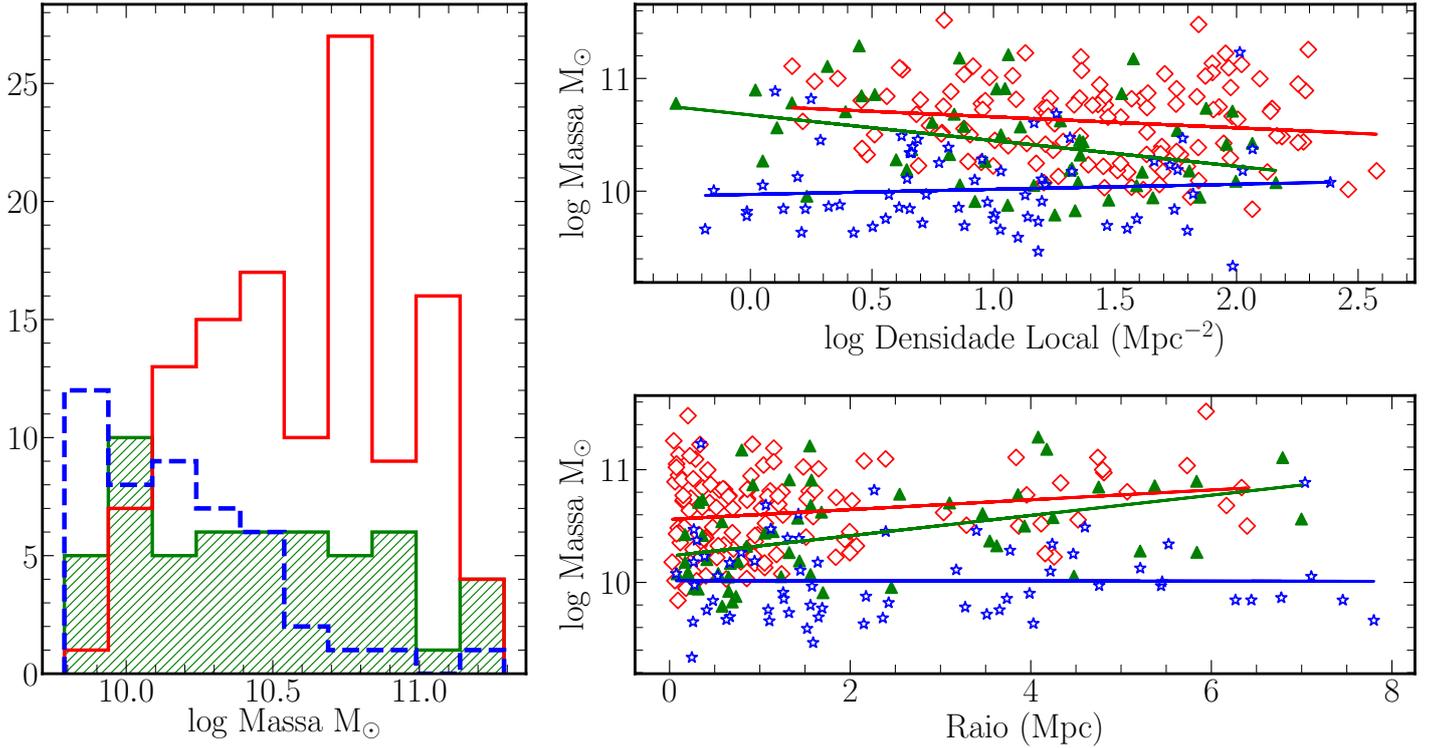


Figura 4.13: (a) Distribuição de massa para as galáxias do aglomerado RXJ0153. A linha sólida vermelha representa a distribuição das galáxias passivas, a linha tracejada azul representa a distribuição de galáxias ativas e o histograma hachurado em verde representa a distribuição de massa para galáxias transientes. O painel (b) relaciona a massa das galáxias com suas respectivas densidades numéricas locais. O painel (c) correlaciona a massa com a distância ao centro do aglomerado. Para os painéis (b) e (c): os diamante vermelhos representam as galáxias passivas, os triângulos verdes as galáxias transientes e as estrelas azuis as galáxias ativas. As linhas sólidas representam os ajustes lineares para as galáxias passivas (linhas vermelhas), transientes (linhas verdes) e ativas (linhas azuis).

galáxias passivas (linhas sólidas vermelhas) são objetos dominantes para intervalos de altas massas.

Como próximo passo, analisaremos pela Figura 4.13b a distribuição das massas das galáxias passivas (diamantes vermelhos), transientes (triângulos verdes) e ativas (estrelas azuis) com respeito a densidade numérica local de galáxias. Assim como nas Figuras anteriores desta seção, nós ajustamos relações lineares pelo estimador *biweight*, por linhas sólidas vermelhas, verdes e azuis que representam respectivamente as galáxias passivas, transientes e ativas. Dispomos os resultados abaixo:

$$\log \text{Massa}_{\text{passivas}} = (-0.10 \pm 0.06) \log \text{DL} + (10.76 \pm 0.10) \quad (4.30)$$

$$\log \text{Massa}_{\text{transientes}} = (-0.23 \pm 0.09) \log \text{DL} + (10.68 \pm 0.12) \quad (4.31)$$

$$\log \text{Massa}_{\text{ativas}} = (0.04 \pm 0.07) \log \text{DL} + (9.97 \pm 0.08) \quad (4.32)$$

Assim como observamos na Figura 4.13a, as galáxias passivas (diamantes vermelhos) ocupam os maiores intervalos de massa do sistema, com massa média em $\log \text{Massa} = 10.62 M_{\odot}$. Para densidades locais superiores a 1, notamos que elas ocupam regiões de baixas e altas massas, porém, para densidade locais inferiores, notamos que as galáxias passivas ocupam regiões das maiores massas do sistema apenas.

As galáxias ativas (estrelas azuis) ocupam as regiões menos massivas, com média em $\log \text{Massa} = 10.03 M_{\odot}$. Elas se distribuem em massa homogeneamente para todas as densidade locais por elas ocupadas. Para densidades inferiores a $\log \text{Densidade local} = 0.5 M_{\odot}$, torna-se nítida a separação entre essas galáxias e as galáxias passivas e transientes, que ocupam regimes mais massivos. Para esse intervalo de densidade, $\log \text{Massa} = 10.4 M_{\odot}$ se mostra um bom limite de regime para localização de galáxias ativas (menores massas) e transientes e passivas (maiores massas).

As galáxias transientes ocupam maiores massas ($\log \text{Massa} > 10.2 M_{\odot}$) em regiões menos densas ($\log \text{Densidade local} < 1.0 M_{\odot}$), e menores massas em regiões mais densas. Pelo resultado do ajuste, nós percebemos que as galáxias passivas possuem um comportamento negativo e as galáxias ativas possuem um comportamento positivo com a densidade. Porém, elas possuem coeficientes angulares próximos a 0.

As galáxias em transição possuem claro comportamento decrescente, significando que à medida que entramos em regiões mais densas, as galáxias em transição se manifestam menos massivas.

Por fim, nós analisamos pela Figura 4.13c a massa das galáxias membro do aglomerado em comparação com a distância ao centro do aglomerado. Nós apresentamos abaixo as equações que indicam o ajuste linear para cada tipo de objeto:

$$\log \text{Massa}_{\text{passivas}} = (0.04 \pm 0.02)R + (10.56 \pm 0.04) \quad (4.33)$$

$$\log \text{Massa}_{\text{transientes}} = (0.09 \pm 0.03)R + (10.23 \pm 0.08) \quad (4.34)$$

$$\log \text{Massa}_{\text{ativas}} = (-0.00 \pm 0.02)R + (10.01 \pm 0.07) \quad (4.35)$$

Pela Figura 4.13c, nós observamos que em regiões mais próximas ao centro que $R = 2 \text{ Mpc}$, as galáxias passivas (diamantes vermelhos) ocupam todo o intervalo de massa (9.8 a 11.5) descrito na Figura 4.13a. Ou seja, existem objetos passivos de alta e baixa massa. Para distância superiores, as galáxias passivas, que são pertencentes aos grupos G83 e G84, são caracterizadas objetos mais massivos ($\log \text{Massa} > 10.4 M_{\odot}$).

As galáxias ativas ocupam os menores intervalos de massa da população. Para todo o intervalo de raio (0 a 7 Mpc), elas se distribuem majoritariamente no intervalo $\log \text{Massa}$ de 9.3 a 10.5 M_{\odot} . Destacamos que apenas um objeto ativo se mostra

massivo ($\log \text{Massa} \sim 10.2 M_{\odot}$) em $R \sim 0.4 \text{ Mpc}$.

As galáxias transientes ocupam, para intervalos superiores a $R = 2 \text{ Mpc}$, intervalos de massa similares aos das galáxias passivas (10.2 a 11.4). Para distâncias inferiores a 2 Mpc , observamos que as galáxias em transição ocupam intervalos de massa de 9.8 a 11.2, exceto para regiões mais próximas que $R = 0.6 \text{ Mpc}$, onde ocupam apenas objetos transientes com massas inferiores a 10.8.

A partir da distribuição e dos ajustes lineares, concluímos que as galáxias ativas, por apresentarem um ajuste aproximadamente plano, não possuem correlação de sua massa com o ambiente. As galáxias passivas aparentam um comportamento crescente, porém seu coeficiente angular e erro associado indicam uma relação aproximadamente plana. As galáxias transientes são as que apresentam a maior variação indicando que para distâncias mais próximas, a população é composta por massas intermediárias a baixas.

Após toda a análise da idade, tempo de decaimento, taxa de formação estelar específica e massa, nós iremos resumir os principais resultados. As galáxias passivas são formados por objetos de massa intermediária a alta. Além disso, eles apresentam os menores tempos de decaimento e menores taxas de formação estelar específica, compondo os objetos de idades intermediárias a velhas. Esse tipo de galáxia apresenta fracas correlações com o ambiente, sendo aproximadamente constante para todos os parâmetros com relação a densidade numérica e distância ao centro do aglomerado.

As galáxias ativas são formadas pelos objetos menos massivos do aglomerado, com menores idades de populações estelares, longos tempos de decaimento para um histórico de formação estelar exponencial *delayed* e as maiores taxas de formação estelar específica. Esse tipo de objeto se correlaciona fracamente com a massa, sSFR, τ em relação a densidade local e raio, porém, notamos que as maiores idades atingidas estão associadas a ambientes mais densos e próximos da região central do aglomerado.

Por fim, concluímos que as galáxias transientes são compostas por objetos de massas intermediárias e altas, com idades similares as de galáxias passivas. Apresentam taxas de formação estelar específicas intermediárias e notamos uma correlação negativa com o ambiente.

4.6 Diagrama espaço de fase

Finalizamos nossa análise examinando a disposição de objetos no diagrama espaço de fase. À medida que uma galáxia é acreta e cai em direção ao poço gravitacional do aglomerado, ela ocupa posições preferenciais em um gráfico contendo a velocidade radial (componente de velocidade de uma galáxia na direção da linha de visada) e

raio projetado em relação ao centro do aglomerado (Rhee et al. 2017).

Gill et al. (2005) e Mahajan et al. (2011), utilizando simulações de formação e evolução de aglomerados, rastream o comportamento dinâmico dos objetos e notaram três diferentes populações de galáxias. As galáxias em decaimento são aquelas que foram recentemente ligadas e estão em processo de aceleração em direção ao seu centro causado pelo poço gravitacional do aglomerado. Devido a esse movimento, elas assumem altas velocidades e altos raios ($r > R_{virial}$). A população de galáxias *backsplash* é caracterizada por galáxias que estão em distâncias maiores que o raio virial do aglomerado, mas que em algum momento já estiveram no interior pelo menos uma vez. Por fim, as galáxias virializadas são aquelas que já finalizaram o processo de decaimento e sucessivas passagens pelo núcleo do aglomerado. Elas assumem altas velocidades e pequenas distâncias da região central ($r < R_{virial}$).

Devido ao efeito de projeção pela nossa compreensão bidimensional do sistema, isolar essas populações torna-se uma tarefa difícil. Neste trabalho, utilizaremos os perfis cáusticos ($R/R_{virial} \cdot v/\sigma = \text{constante}$) definidos por Noble et al. (2013) para separar as regiões de maior probabilidade de encontrar as diferentes populações. Os perfis são definidos com base na simulação de 30 galáxias em $z = 0.21$ pelo *Millenium* (Haines et al. 2012). A classificação foi definida da seguinte forma:

- $R/R_{vir} \cdot v/\sigma \leq 0.1$ - galáxias virializadas (região A, figura 4.14).
- $0.1 < R/R_{vir} \cdot v/\sigma \leq 0.4$ - composição de galáxias virializadas, *backsplash* e em decaimento. Essa é a região de maior probabilidade de se encontrar *backsplash* (região B, figura 4.14).
- $0.4 < R/R_{vir} \cdot v/\sigma \leq 2$ - galáxias em decaimento (região C, figura 4.14).
- $R/R_{vir} \cdot v/\sigma > 2$ - galáxias que não estão ligadas gravitacionalmente ao aglomerado (região D, figura 4.14).

A Figura 4.14 representa o diagrama de espaço de fase, relacionando a distância ao centro do aglomerado R com velocidade radial dos objetos, definida como a componente do movimento na direção da linha de visada. Nós apresentamos os parâmetros de distância e velocidade relativa ao raio virial e dispersão de velocidade do aglomerado, respectivamente.

Para todos os painéis da Figura 4.14 ((a) a (d)), nós dispomos em linhas tracejadas pretas verticais a localização do raio virial do aglomerado ou o raio virial das subestruturas norte e sul no caso da Figura 4.14c. Além disso, as linhas sólidas pretas configuram os perfis cáusticos que separam as galáxias virializadas, *backsplash* e em decaimento. As linhas mais internas de cada gráfico representam a configuração $R/R_{vir} \cdot v/\sigma = \pm 0.1$, as duas linhas mais externas representam a configuração

$R/R_{vir} \cdot v/\sigma = \pm 2$ e as duas linhas intermediárias as citadas representam $R/R_{vir} \cdot v/\sigma = \pm 0.4$.

Os painéis (a), (b) e (c) representam os objetos classificados como passivos e ativos indicados pelos círculos vermelhos e azuis, respectivamente. As galáxias em transição são apenas exibidas em (c), pelos círculos verdes. Para o painel (d), nós analisaremos exclusivamente as galáxias em transição pelos círculos verdes. Os demais símbolos desse painel fazem menção às galáxias classificados morfologicamente pelas imagens do *Hubble*. As galáxias elípticas são configuradas como os quadrados vermelhos, as galáxias lenticulares como os triângulos amarelos e as galáxias espirais como as cruzes azuis.

Iniciemos analisando os diagramas de fase para as Figuras 4.14a e 4.14b. Nosso objetivo é analisar a disposição das galáxias passivas e ativas e a distribuição dinâmica das galáxias de cada grupo e subestrutura. Como temos um total de 6 diferentes estruturas do aglomerado RXJ0153 para investigação, nós dividimos os elementos em dois painéis.

Na Figura 4.14a, nós destacamos em quadrados as galáxias da subestrutura norte, em circunferências as galáxias do grupo G83, e em cruzes marcamos as galáxias pertencentes ao grupo G84. Na Figura 4.14b, nós destacamos em losangos os membros da subestrutura sul, em pentágonos as galáxias da região filamentar centrada em $(\alpha_{R1}, \delta_{R1}) = (28.31^\circ, -13.89^\circ)$ na Figura 4.5a (chamemos de região R1) e como estrelas as galáxias das redondezas definidas em um retângulo na Figura 4.5a centrada em $(\alpha_{R2}, \delta_{R2}) = (28.18^\circ, -13.89^\circ)$ (chamemos de região R2).

As galáxias da subestrutura norte (quadrados na Figura 4.14a), como já discutimos, são compostas por 71% galáxias passivas e 11% galáxias ativas. O seu *redshift* central ($z_{subnorte} = 0.8390 \pm 0.0013$) dista em $\Delta v = 50 \text{ km s}^{-1}$ do *redshift* central do aglomerado ($z_{RXJ0153} = 0.8387 \pm 0.0005$). Nós notamos que as galáxias da subestrutura norte localizam-se principalmente nas regiões de virialização (região A) e de mistura de populações (região B). Porém, lembremos que, a velocidade radial utilizada nas Figuras 4.14a e 4.14b é medida em relação ao *redshift* central do aglomerado e não ao da subestrutura.

Portanto, na Figura 4.14c, nós representamos as galáxias da subestrutura norte em quadrados, mas com velocidade radial e raio respectivamente relativo à dispersão de velocidade e centro da subestrutura norte. Neste caso, nós conferimos que 8 galáxias estão na região de virialização, 8 ocupam a região de populações mistas e 25 estão em fase de decaimento. As regiões de virialização são compostas exclusivamente por passivas.

Retornando à Figura 4.14a, analisemos os grupos G83 e G84. O grupo 83 (destacados como circunferências) compõem 13 galáxias localizadas entre 2 e 3 Mpc. A maioria dessas galáxias (11 objetos) possuem velocidades radiais negativas, in-

dicando que estão caindo em direção ao aglomerado e vindo em nossa direção. 7 galáxias encontram-se na região de decaimento ($0.1 < R/R_{vir} \cdot v/\sigma \leq 0.4$, região C) para o centro do aglomerado RXJ0153, dentro de $|v| \pm \sigma$. 3 galáxias pertencentes ao grupo G83 estão na região de objetos não ligadas ($r \sim 2.3$ Mpc). Para o grupo G84 (cruzes pretas), notamos que 3 objetos encontram-se localizados na região de decaimento, em $v \sim 0.3\sigma$ (região C). As 6 galáxias restantes estão concentradas no intervalo de $0.5\sigma < v < 1.5\sigma$ km s⁻¹. Segundo os perfis cáusticos, esse objetos encontram em não ligamento ao aglomerado central (região D). Porém, devemos lembrar que o diagrama relaciona a distância e a velocidade radial em relação ao centro do aglomerado. Portanto, como não levamos em consideração o ligamento entre essas galáxias, não podemos concluir que esse grupo não está em processo de acreção.

Seguimos analisando as galáxias da subestrutura sul representada por losangos na Figura 4.14b. Assim como a subestrutura norte, essa subestrutura localiza-se primariamente nas regiões de virialização e de mistura de diferentes populações. Como vimos anteriormente, o centro dessa estrutura distancia-se do *redshift* central em $\Delta v \sim -1400$ km s⁻². Novamente, temos o auxílio da Figura 4.14c para analisar a dinâmica a partir de seu raio virial e dispersão de velocidade. Assim como no painel (b), as galáxias são destacadas pelos losangos. Nós observamos que apenas 5 galáxias encontram-se na região de virialização, 8 na região de mistura de populações, 11 nas regiões de decaimento. Apesar de não representadas na Figura, totalizamos 25 galáxias que estão foram da região de ligamento. Isso significa que possivelmente, essas galáxias pertencem ao aglomerado e não a essa subestrutura.

As galáxias pertencentes ao grupo R1 são representadas na Figura 4.14b como estrelas. Esses objetos ocupam uma localização entre 2 a 3 raios viriais. Com exceção de um objeto localizado em $v \sim 2.5\sigma$, as galáxias desse grupo encontram-se na região de decaimento (região C) do aglomerado abrangindo uma velocidade radial de -1 a 1 σ .

As galáxias membro do grupo R2 são representadas por pentágonos e distribuições espacialmente entre 0.7 e 1.5 Mpc. Nenhum dos objetos estão localizado na região virializada (região A), enquanto que 5 estão localizados na zona de mistura e 11 na zona de decaimento (região C). Existe um objeto localizado em $r \sim 0.8 R_{vir}$ e $v \sim 2.7\sigma$. Como está localizado na região de não ligamento, podemos concluir que esse objeto não pertence a essa região.

Após investigarmos a dinâmica dos grupos, concentremo-nos na análise dos tipos classificados. Das galáxias dispostas nos painéis (a) e (b), 121 objetos são galáxias passivas e 66 são galáxias ativas. Do total de 241 galáxias (incluindo transientes), 55 (22%) estão localizados na região de virialização. Dentre esses objetos, 33 (60% de 55) são passivas e 12 (21%) são ativas.

Na população mista de galáxias (compostos por objetos virializados e por aqueles que já passaram pelo menos uma vez pela região de núcleo), contamos com 68 galáxias sendo 38 passivas (55%) e 14 ativas (20%). As galáxias em decaimento constituem a maior parte dos objetos, compostos por 95 galáxias (39% de 241 totais). Em termos de classificação, 43 (45%) são galáxias passivas e 29 (30%) são galáxias ativas. As regiões de não ligamento são os únicos lugares que as galáxias ativas são maioria. De 25 objetos, 11 são galáxias ativas e 7 são passivas.

Finalizando, analisaremos separadamente o comportamento das galáxias transitentes na Figura 4.14d em círculos verdes. Das 241 galáxias analisadas, 54 são objetos em transição. Na região central, temos representado 17 galáxias com morfologias visuais disponíveis.

A maior parte dos objetos em transição está localizado na região de decaimento ($0.1 < R/R_{vir} \cdot v/\sigma \leq 0.4$): de 54 galáxias, 23 (42.%) estão em processo de queda em direção ao centro do aglomerado. 10 galáxias encontram-se na região de virialização enquanto 16 são galáxias localizadas na região de mistura de populações. Para esse tipo de galáxia, existem 4 elípticas (quadrados vermelhos), 7 lenticulares (triângulos amarelos) e 8 galáxias espirais (cruzes azuis).

Após análise, condensemos os principais resultados. As galáxias passivas dominam em frações todas as diferentes regiões definidas, com exceção da região de não ligamento. Unido ao fato de que a maior parte das galáxias em transição estão na região de decaimento, podemos concluir que as transformações de galáxias passivas e ativas já ocorrem desde os momentos iniciais de caimento para a região central, mesmo que estejam a grandes distâncias da região central.

As subestruturas norte e sul, em relação ao centro do aglomerado, estão nas regiões de virialização e de mistura de populações. Porém, quando analisamos as galáxias a partir dos parâmetros de raio virial e dispersão de velocidade de suas respectivas subestruturas, observamos que a distribuição de objetos é mais complexa e que os grupos não cessaram seu processo de virialização.

O grupo G83 encontra-se em região de decaimento enquanto as galáxias do grupo G84 se dispõem majoritariamente na área de não ligamento. Devemos ressaltar que a análise do diagrama de fase é individual para cada galáxia, não levando em consideração se o objeto está ligado a alguma subestrutura. Portanto, nossa análise não é suficiente para descartar a hipótese que o grupo G84 não está em processo de acreção.

A região R1 (estrelas) confirmam que essas galáxias estão em processo de decaimento em direção ao centro do aglomerado. A região R2 (pentágonos) é formada majoritariamente por galáxias passivas que estão em região de decaimento. Apenas alguns objetos estão na região ocupada por misturas de populações, que incluem também galáxias que estão em decaimento. Portanto, concluímos que esses objetos

possuem baixa probabilidade de terem adentrarem as regiões centrais do aglomerado em algum momento anterior e portanto sofreram algum processo eficiente de ces

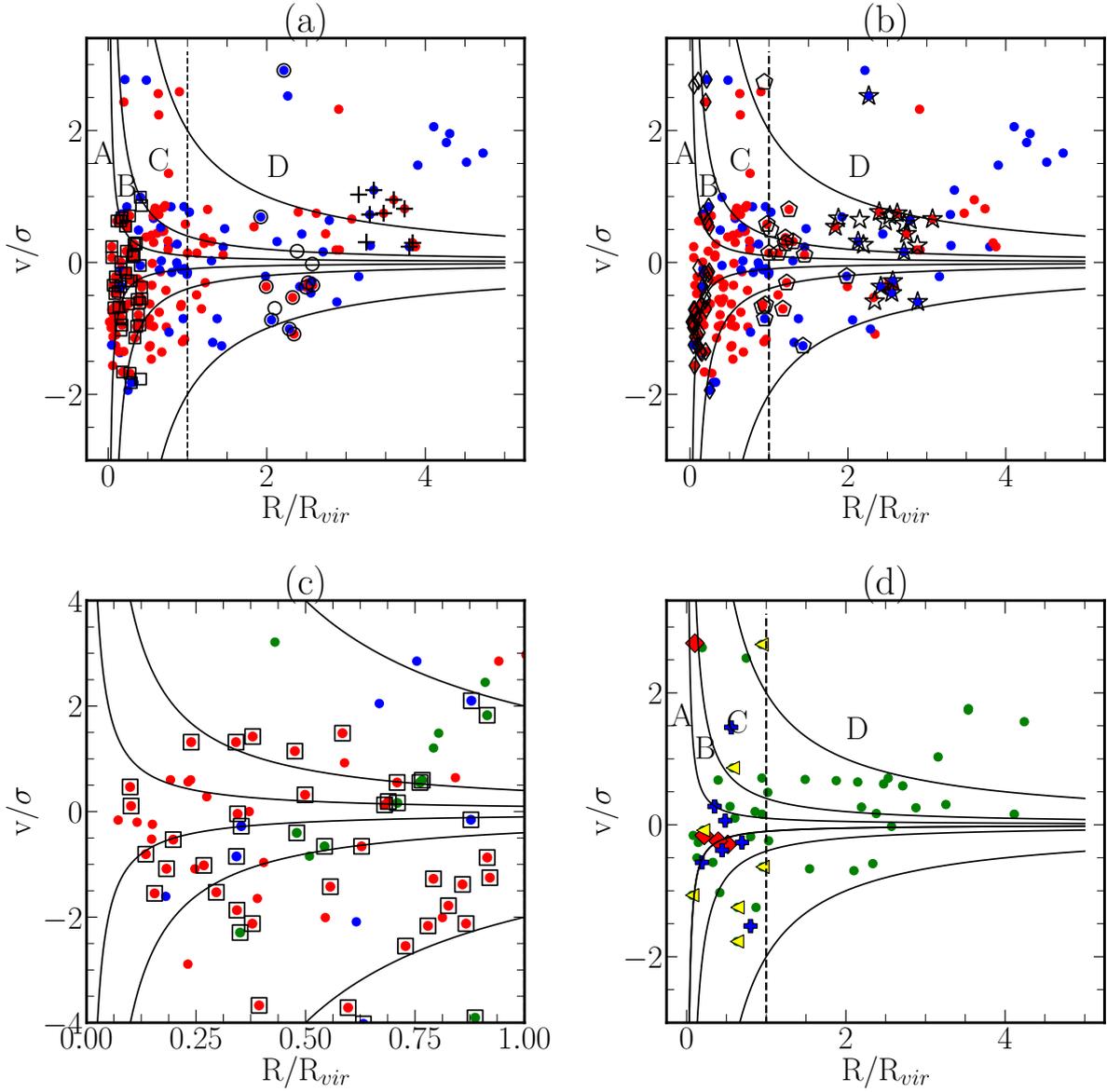


Figura 4.14: (a) e (b) Diagrama espaço de fase para as galáxias ativas e passivas, representadas pelos pontos azuis e vermelhos, respectivamente. Os quadrados representam as galáxias pertencentes à subestrutura norte, as circunferências representam as galáxias pertencentes ao grupo G83 e as cruces marcam os objetos pertencentes ao grupo G84. Os losangos representam as galáxias pertencentes à subestrutura sul, as circunferências representam as galáxias pertencentes ao grupo R1 e as cruces marcam os objetos pertencentes ao grupo R2. (c) Diagrama espaço de fase para as galáxias da subestrutura norte pelos quadrados e sul pelos losangos. Os pontos vermelhos, azuis e verdes representam as galáxias passivas, ativas e transientes, respectivamente. Diferentemente de (a) e (b), os valores de raio virial e dispersão de velocidade são definidos pelos valores das subestruturas. (d) Diagrama espaço de fase para as galáxias transientes em pontos verdes. Destacamos as galáxias classificadas morfologicamente pelas imagens do *Hubble*: elípticas como quadrados vermelhos, lenticulares como triângulos amarelos e espirais como cruces azuis. Para todos os painéis: As linhas sólidas representam perfis cáusticos: $0.1 < R/R_{vir} \cdot v/\sigma$: galáxias virializadas; $0.1 < R/R_{vir} \cdot v/\sigma < 0.4$: galáxias virializadas e *backsplash*; $0.4 < R/R_{vir} \cdot v/\sigma < 2$: galáxias em decaimento; $R/R_{vir} \cdot v/\sigma < 2$: galáxias não ligadas ao aglomerado. A linha tracejada indica o raio virial.

Capítulo 5

Discussão

5.1 Aglomerado dinamicamente jovem

Os trabalhos cujo objetivo visavam o estudo do estado dinâmico do aglomerado focaram-se em sua região central. Neste projeto, nós consideramos toda a estrutura ($R < 8$ Mpc) de forma a atualizar esses parâmetros e obter informações sobre a dinâmica dos grupos G83 e G84.

O sistema total possui um *redshift* de $z_{medio} = 0.8387 \pm 0.0005$, localizado entre os valores das subestruturas norte e sul. Esse valor concorda com os demais trabalhos para a região central e por diferentes estatísticas. Demarco et al. (2005) obteve $z = 0.8376 \pm 0.0001$ utilizando o método de *3 σ clipped* e Girardi et al. (2005) obteve $z = 0.8357 \pm 0.005$, pelo estimador de localização *biweight*.

A dispersão de velocidades obtida pela estatística *biweight* foi $\sigma = 1673 \pm 85$ km s⁻¹. O valor concorda com o obtido por Demarco et al. (2005) para objetos da região central ($\sigma = 1632 \pm 115$ km s⁻¹). Girardi et al. (2005) utilizaram a mesma amostra de Demarco et al. (2005) mas com um método de seleção de objetos mais restritivo. Pelo método *biweight*, obtiveram 1322_{-61}^{+76} km s⁻¹, valor inferior ao nossos resultados.

Como pontuado por Demarco et al. (2005), uma velocidade de dispersão de ~ 1600 km s⁻¹, corresponde a uma temperatura de raio X de $T_X = 16$ keV, considerando o sistema em equilíbrio termodinâmico. Della Ceca et al. (2000) encontraram para o aglomerado $T_X = 6.46_{-1.19}^{+1.74}$ keV. Portanto, confirmamos que o aglomerado não encontra-se em equilíbrio virial. Logo, a medida de massa pelo teorema do virial sobrestimaria a real massa do aglomerado.

Alinhado a esses resultados, a distribuição de velocidades radiais (figura 4.3) apresentam características assimétricas, fugindo de uma distribuição gaussiana, causadas pelas duas subestruturas centrais e objetos localizados em $v > 2000$ km · s⁻¹. Girardi et al. (2005) concluiu, por método robusto, que a distribuição de velocidades

da região central possui maior probabilidade de ser composta por 3 subestruturas. Duas se referem as consideradas neste trabalho, norte e sul. A terceira localiza-se a leste (figura 1, Demarco) em ~ 1 Mpc do centro do aglomerado. Pelo seu pequeno tamanho angular ($0.48'$), não consideramos em nossas análises.

Além das subestruturas centrais, nós definimos os parâmetros dinâmicos dos grupos G83 (F4 de T06) e G84 (F6 de T06). Os *redshifts* centrais dos grupos encontram-se de acordo com os medidos por Tanaka et al. (2006). A dispersão de velocidades foi medida pelo método *biweight*. Em especial, para o grupo G84, notamos dois picos afastados por $\Delta v \sim 1000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Levantamos a hipótese de que esse grupo é composto de duas aglomerações em processo de união ao mesmo tempo que são acretadas para a estrutura central.

Os valores de dispersão são no mínimo 1.5 vezes maiores dos encontrados por Tanaka et al. (2006). Isso acontece pela baixa quantidade de objetos. Portanto, temos cautela em interpretar esses valores fisicamente como velocidades típicas e possível cálculo de massa para os grupos.

Por fim, notamos no diagrama de espaço de fase na figura 4.14 que o grupo G84 encontra-se fora da região de ligação gravitacional com o aglomerado central. Porém, os valores de raio e velocidade radial utilizados para cada objeto não levaram em consideração as suas respectivas vizinhanças. Portanto, não podemos descartar que a estrutura G84 não será acretada pela estrutura central em tempos posteriores.

5.2 Morfologia-Densidade e SFR-Densidade

A relação de morfologia-densidade inicialmente observada por Dressler (1980) no Universo Local pode ser traduzida em uma relação de cor-densidade.

No Universo Local, as galáxias mais avermelhadas e com baixas taxas de formação estelar encontram-se preferencialmente em regiões mais densas. Nós concluímos, pelo comportamento da relação de cor-densidade e taxa de formação estelar e densidade para os objetos de nossa amostra, que já é possível observar tais relações em $z \sim 0.8$. Portanto, em um aglomerado complexo, localizado aproximadamente no momento em que o Universo tinha metade de sua idade, é possível observar que o ambiente possui uma importante contribuição em induzir o processo de quiescência de galáxias que adentram em regiões densas.

Em nossa amostra, a transição de galáxias é observada em todos os ambientes. Porém, esse tipo de galáxias está em baixa quantidade em ambiente mais densos. Portanto, concluímos que o processo de transição não é restrito a regiões centrais do aglomerado, possivelmente por diferentes processos de interações em cada ambiente, mas, nas regiões mais densas o processo parece ser finalizado.

Na figura 4.8, tivemos uma intuição da relação de morfologia-densidade clássica.

As galáxias elípticas e lenticulares estão concentradas nas regiões centrais e as espirais espalham-se para maiores raios. Postman et al. (2005) confirmou que a relação morfologia-densidade já é visível em $z \sim 1$, em acordo com nossos resultados.

Nossos resultados concordam com o trabalho de Patel et al. (2009b) e demais estudos com amostras limitadas por massa. Patel et al. (2009b) estudaram o aglomerado RXJ0153 e regiões de menores densidade dentro de um raio de 8 Mpc ao centro do aglomerado. Ambos concordamos que a fração de cor em função de raio é decrescente para galáxias vermelhas. Além disso, o aumento da fração de galáxias passivas nas regiões de $r \sim 4$ Mpc e $r \sim 6$ Mpc concordam com a presença de grupos. Porém, eles observam valores superiores de fração de galáxias vermelhas para todos os raios e intervalos de densidades. Para os menores raio $r \sim 0$, o número de vermelhas é 93%, enquanto em nossas análises é de em torno de 70%.

Para a relação com a densidade local, Patel et al. (2009b) encontrou que as regiões mais densas comportam mais de 95% de galáxias vermelhas, enquanto neste intervalo medimos 70%. Além disso, a mudança de regime de dominância entre azuis e vermelhas aparentam ocorrer em densidades diferentes. Para Patel et al. (2009b) não há uma inversão de regime enquanto nós observamos que as galáxias azuis começam a ser dominantes em densidades menores que 0.5 (figura 4.5). A possibilidade é que nós estamos utilizando uma amostra limitada por luminosidade enquanto esses estudos limitam-se por massa. Além disso, nós temos 3 classificações, diferentemente de Patel et al. (2009b), que utilizou classificação binária.

Dado que os processos físicos em ambientes densos levam a transformação de galáxias azuis (ativas) para vermelhas (quiescentes), nós constatamos que, as duas subestruturas centrais já encontram-se em processo de evolução avançada, sendo a norte mais desenvolvida que a sul (dada as frações superiores de galáxias vermelhas, perceptível na tabela 2.5). Blakeslee et al. (2006) observou o mesmo resultado ao averiguar uma maior proporção de galáxias elípticas na subestrutura norte em comparação com a sul, mesmo que tenha lidado com uma menor quantidade de dados.

Atrelado as maiores subestruturas, as frações de galáxias passivas nos grupos G83 e G84 nos permite inferir que os efeitos ambientais também são perceptíveis em ambientes de densidades intermediárias. Portanto, a formação da sequência vermelha e da relação de morfologia-densidade não ocorrem apenas após a virialização das estruturas centrais e acreção dos grupos.

Cada estrutura contribui com um pre-processamento de suas componentes, fenômeno assim denominada pela literatura, caracterizado por uma diminuição das taxas de formação estelar em cada ambiente em momento anterior a acreção final (Just et al. 2015).

Essa propriedade deve ser incluída em modelos teóricos sobre a evolução de

galáxias que se restringem apenas aos efeitos sofridos pela passagem na região central do aglomerado. Neste caso, os efeitos dominantes no pré-processamento seriam a pressão de arrasto (Gunn & Gott 1972) e fusão de galáxias (Toomre & Toomre 1972).

Os eventos ambientais causam a diminuição de objetos ativos, como observamos acima. Além da diminuição das frações de galáxias ativas com o aumento da densidade local, fomos capazes de notar a mesma tendência para a taxa de formação estelar específica.

Patel et al. (2009a) e posteriormente Patel et al. (2011) estudaram no mesmo campo de visão do aglomerado ($R < 8$ Mpc) a relação da taxa de formação estelar específica em função do raio e densidade local em uma amostra dentro do intervalo $\log \text{Massa } M_{\odot} > 10.6$. Para três distintos indicadores de formação estelar (entre eles o ajuste da distribuição espectral de energia), foi-se notada uma relação decrescente da sSFR com o aumento da densidade e diminuição do raio. Outros estudos limitados por massa também confirmam a tendência, como Holden et al. (2007) e van der Wel et al. (2007).

É interessante notar que há uma concordância em nossos resultados, mesmo que a completeza tenha sido definida diferentemente. Esta é uma questão em aberto devido a discrepância entre estudos que limitam a amostra por massa e luminosidade.

Como exemplo, em uma amostra de galáxias em $0.8 < z < 1.2$ do GOODS (Great Observatories Origins Deep Survey), Elbaz et al. (2007) estudou a correlação entre a taxa de formação estelar e densidade local, encontrando uma correlação inversa para o intervalo de $\Sigma \sim 0.5 - 4 \text{ Mpc}^{-2}$ (figura 8, Elbaz et al. (2007)). O mesmo resultado foi identificado por Cooper et al. (2007) ao analisar galáxias em $z \sim 1$ e $z \sim 0.1$, pelo SDSS. Neste caso, apesar da taxa de formação estelar específica obter mesmo comportamento que P11, a taxa de formação estelar é inversa como em Elbaz et al. (2007).

Os resultados evidenciam a diferença entre o uso de uma população limitada pela luminosidade e pela massa. Uma possível explicação é que as amostras limitadas por uma magnitude ótica ou ultravioleta podem eliminar galáxias passivas de baixas massas e incluir ativas de menores massas, que são intrinsecamente mais brilhantes que as menos massivas passivas.

Portanto, uma boa escolha de amostra por limite de massa é aquela que inclui a galáxia passiva de menor massa, sendo no nosso caso $\log \text{Massa } M_{\odot} = 10.0$. Apesar de não demonstrado, caso aplicássemos tal limite nós continuaríamos observando a presença de uma relação crescente entre a fração de cor vermelha e decrescente da taxa de formação estelar (tanto para a instantânea quanto para a específica) com o raio e densidade local.

Independentemente, nosso limite por luminosidade concorda com os resultados

dos estudos limitados por massa. Como pontuado por P11, nossos trabalhos abrangem ambientes mais densos por Elbaz et al. (2007) e Cooper et al. (2007), enquanto estes estão representados em nossas amostras pelos 3 intervalos menos densos.

5.3 Populações e efeitos ambientais

No capítulo anterior, nós fomos capazes de obter o comportamento das diferentes classificações de galáxias. Para isso, nós classificamos os objetos de acordo com sua posição no diagrama cor-magnitude envolvendo os filtros U e z (figura 4.2b). A utilização do filtro U nas nossas observações do VIMOS/VLT foi contribuição original para a composição de dados neste trabalho.

Atrelado à presença da relação de morfologia-densidade e taxa de formação estelar-densidade, nós observamos que o diagrama cor-magnitude no ótico já indica a presença de uma sequência vermelha. Essa mesma relação já foi observada para o aglomerado RXJ0153 por Blakeslee et al. (2006), Patel et al. (2009b) e Demarco et al. (2010). Notamos que ela é composta majoritariamente de galáxias elípticas e lenticulares, porém, como pontuado no capítulo 3, existe uma degenerescência entre o histórico de formação estelar e a idade das galáxias.

Caso aplicássemos o mesmo método utilizando a cor $V - z$ e magnitude z (figura 4.1) para separar as galáxias entre passivas, transientes e ativas, notaríamos que 55 objetos seriam classificados como objetos de transição pela cor $V - z$ contra 54 pelo $U - z$.

Entretanto, apenas 37 concordam em classificação. Entre os discrepantes, 14 objetos classificados como em transição pela cor $U - z$ seriam classificados como vermelhos e 3 como azuis pela cor $V - z$. Portanto, estaríamos excluindo objetos que apresentam cores de transição por um bom traçador de formação estelar recente.

Seguindo os estudos sobre propriedades dos diferentes tipos de galáxias de nossa amostra, concluímos, pela análise da distribuição espacial de galáxias com morfologia na seção 4.5.1, que as galáxias passivas são formadas em maioria por galáxias elípticas e lenticulares, localizadas nas regiões centrais das subestruturas norte e sul, indicando-nos novamente a predominância dessas morfologias nas regiões de maiores densidades. Não existe uma correlação de excesso de cor para esses objetos, porém notamos que dominam as regiões de maiores densidades (figura 4.8). Esse resultado concorda com a análise de cor-densidade realizada na seção anterior.

Pela análise dos parâmetros gerados pelo ajuste de distribuição espectral de energia, nós concluímos que as galáxias passivas compõem as galáxias mais massivas do aglomerado, com as menores taxas de formação estelar específica e menores tempos de decaimento τ . Esse comportamento é amplamente confirmado pela literatura (Demarco et al. 2010; Kennicutt & Evans 2012; Schiminovich et al. 2007).

Nós notamos que a idade, τ e sSFR de galáxias passivas não se correlacionam com o ambiente (densidade local e distância ao centro do aglomerado). Atrélado ao fato de que observamos no diagrama espaço de fase frações substanciais de passivas não apenas nas regiões ocupadas por galáxias virializadas mas também em regiões de decaimento, concluímos que os processos que ocorrem durante o decaimento dessas galáxias em direção ao poço potencial são eficientes em cessar a formação estelar dos objetos.

Nós observamos duas populações de galáxias passivas a partir da análise da idade e tempo de decaimento τ dos objetos (figura 4.11). Esses parâmetros se correlacionam positivamente (figura 4.11). Portanto, nós observamos uma população de galáxias mais massivas ($\log \text{Massa } M_{\odot} > 10.6$) que formou seu conteúdo principal de estrelas entre 2 e 4 bilhões de anos e tempos efetivos τ entre 0.25 e 0.5 bilhões de anos. Portanto, essa população iniciou sua formação em $1.5 < z < 3$, época de estruturação dos protoaglomerados (Overzier 2016).

Além dessa população, observamos uma população formada por galáxias passivas em todo o intervalo de massas que apresentam menores idades (idade < 1.5 bilhões de anos) e curtos tempos de decaimento $\tau < 0.25$ bilhões de anos. Logo, nossa amostra concorda com o cenário de Poggianti et al. (2006) de que as galáxias passivas são formadas por duas populações, sendo uma coeval ao aglomerado e outra resultado da cessação de formação estelar devido ao ambiente em tempos posteriores.

As galáxias ativas apresentam-se como as populações menos massivas, idades mais jovens, maiores taxas de formação estelar específicas e maiores tempos de decaimento τ . Assim como observado para as galáxias passivas, esse comportamento também é amplamente reproduzido pela literatura. Não observamos correlações com o ambiente entre os parâmetros estudados. Apesar disso, pela distribuição espacial observamos que tais objetos localizam-se em ambientes pouco densos, sofrendo pouco efeito ambiental.

A análise de galáxias em transição indica a presença de duas populações, separadas pela massa. Nós observamos uma correlação negativa entre a massa de galáxias transientes e a densidade local (e conseqüentemente positiva com a distância ao centro do aglomerado). Atrélado a presença de galáxias passivas massivas em regiões próximas ao centro do aglomerado, nós concluímos que nas regiões mais densas, as galáxias mais massivas já se transformaram em galáxias passivas. Para esta região, as transformações estão ocorrendo em galáxias de massa intermediária a baixa ($\log \text{Massa } M_{\odot} < 10.6$). Esse resultado correlaciona-se ao obtido por Demarco et al. (2010) que, ao estudar a sequência vermelha das galáxias centrais do aglomerado RXJ0153, identificaram uma segregação de massa em direção as regiões mais densas. As galáxias mais brilhantes da sequência vermelha concentram-se nos núcleos das subestruturas e as menos brilhantes da sequência vermelha espalham-se nas

imediações ($R \sim 1$ Mpc).

As galáxias transientes massivas estão sofrendo transformações nas regiões de grupos e decaimento (diagrama espaço de fase, figura 4.14). Dadas as frações nessas regiões, novamente percebemos que as galáxias sofrem um pre-processamento nas regiões de grupo. Portanto, os efeitos ambientais já são visíveis antes mesmo das galáxias adentrarem no núcleo do aglomerado devido a esse pre-processamento ou a processos físicos que afetam as galáxias isoladas em decaimento. As galáxias transientes mais massivas possuem idades entre 2 a 3.5 bilhões de anos e tempo de decaimento entre 0.4 a 1 bilhões de anos.

As galáxias transientes menos massivas ($\log \text{Massa } M_{\odot} < 10.6$) são formadas em parte por 14 objetos com idade igual a 800 milhões de anos e $\tau = 0.1$ bilhão de anos. A taxa de formação estelar específica em média é de -11 , similar a de galáxias passivas com mesma massa (figura 4.12a). Como esses objetos estão localizados em $R < 1$ Mpc, concluímos que estão em ação processos que causam uma rápida cessação como o caso da pressão de arrasto (escala de tempo de cessação próxima a 10^7 anos), transformando galáxias ativas em passivas logo nas primeiras passagens pelo centro da estrutura. Blakeslee et al. (2006), ao analisar o excesso de cor com a densidade local para as galáxias da região central com morfologia, observaram a falta de galáxias espirais nas regiões mais densas, mostrando-nos uma rápida transformação em escalas menores que 1 bilhão de ano. Esse fenômeno concorda com nossos resultados.

Nós também observamos um conjunto de galáxias transientes com baixas massas ($\log \text{Massa } M_{\odot} < 10.6$), mas com idades inferiores a 2 bilhões de anos e escala de tempo de decaimento de 0.5 a 4 bilhões de anos. Caso esses objetos estejam em sua primeira entrada em direção ao centro do aglomerado, seu histórico de formação estelar é coerente com o efeito do processo de estrangulamento cujo tempo efetivo de cessação é de 4 bilhões (Peng et al. 2015) de anos e acontece principalmente em distâncias superiores a 1 Mpc.

Por fim, nós observamos no diagrama espaço de fase que as galáxias em transição não estavam restritas às regiões de decaimento, mas também encontram-se nas regiões de misturas de população e de virialização. Entre as galáxias transientes, nós temos a disposição 19 galáxias compostas de 4 elípticas, 8 espirais e 7 lenticulares. Esses objetos foram observados na figura 4.7c circundando as subestruturas norte e sul. As galáxias ativas com morfologia se dispunham mais distantes ao raio virial enquanto as passivas com morfologia estavam concentradas nas regiões centrais do aglomerado. Portanto, esse cenário concorda com a hipótese anterior de que as galáxias rapidamente são transformadas em passivas ao entrar nas regiões centrais do aglomerado (ou subestruturas) e que as principais mudanças morfológicas observadas são na transformação de galáxias espirais em lenticulares (Butcher & Oemler

1984; Cerulo et al. 2017; Postman et al. 2005).

Capítulo 6

Conclusões

Neste trabalho, investigamos se os efeitos ambientais presentes em ambientes densos já são evidentes em um aglomerado jovem e não virializado. O aglomerado RXJ0152.3-1357 é um objeto bem estudado pela literatura e apresenta estrutura complexa, composta de duas subestruturas centrais, dois grupos em processo de acreção e galáxias localizadas em regiões filamentosas caindo em direção a estrutura central.

Os dados foram obtidos pela união de 4 catálogos distintos, focados em diferentes partes de RXJ0153. Como resultados, trabalhamos em um grande campo, com objetos distando em até 8 Mpc do centro do aglomerado.

Utilizamos as magnitudes NUV, U, V, R, *i*, *z*, J e Ks de forma a obter informações sobre o intervalo emitido desde o ultravioleta distante até o infravermelho próximo. Nós reiteramos que o diferencial de nosso projeto encontra-se na inclusão das imagens da banda U do VIMOS/VLT e NUV pelo telescópio GALEX, permitindo-nos obter informações sobre a formação estelar recente de cada galáxia. Nenhum outro estudo do aglomerado utilizou dados sensíveis a faixa de ultravioleta próximo e distante emitido. Além disso, dispomos do *redshift* dos objetos e morfologias das regiões centrais. À seguir, listamos os resultados encontrados:

- Fomos capazes de realizar uma classificação entre as galáxias do aglomerado e quebrar a degenerescência do histórico de formação estelar e a idade. Das 241 galáxias estudadas com $z < 22.5$ mag, constatamos que 50% das galáxias são passivas.
- O estudo dinâmico revela que o aglomerado é complexo, não relaxado, e está em processo de fusão para se tornar um sistema virializado no Universo recente. Nossos parâmetros dinâmicos concordam com os encontrados pela literatura.
- O grupo G83 possui uma grande probabilidade de ser acretado em tempos posteriores. É necessário realizar uma análise mais detalhada para o grupo

G84 pois ele se encontra fora da região de ligação no diagrama de espaço de fase.

- Conseguimos identificar uma correlação entre a cor-densidade (morfologia-densidade) e taxa de formação estelar-densidade. Isso demonstra que os efeitos ambientais que transformam galáxias ativas em passivas já são evidentes em $z \sim 0.8$.
- As subestruturas e grupos apresentam o domínio de galáxias passivas em suas regiões internas, sendo a subestrutura norte a mais evoluída. Nossos resultados concordam com um cenário de preprocessamento.
- Existe na literatura uma diferença de correlação entre a taxa de formação estelar com a densidade para amostras limitadas por massa e luminosidade. Em nosso estudo, embora nossa amostra seja limitada por luminosidade, nossos resultados concordam com os encontrados por amostras limitadas por massa.
- As morfologias e classificações concordam com a literatura, pois galáxias elípticas e lenticulares possuem baixas taxas de formação estelar e as galáxias espirais são classificadas como ativas. A maior parte das galáxias em transição são espirais e lenticulares, mostrando-nos indícios da transformação entre esses dois objetos. Porém, estamos lidando com uma pequena amostra.
- As galáxias passivas são compostas por duas populações: uma mais massiva que iniciou formação em $z \sim 3$ e outra composta por galáxias em todos os intervalos de massa formadas posteriormente, devido a cessação de formação estelar causado pelo ambiente. Esse cenário concorda com Poggianti et al. (2006) que afirma que galáxias passivas são formadas por uma população coeval e uma fruto da cessação estelar em galáxias ativas em tempos posteriores.
- As galáxias em transição evitam os ambientes com maiores densidades, indicando que a transformação de galáxias ativas para passivas nesses ambientes são rápidas.
- Nas regiões de maiores densidades, as galáxias mais massivas já se transformaram em passivas. As transformações ocorrem principalmente em galáxias transientes de menores massas. Para as regiões menos densas e mais afastadas do aglomerado, a transformação ocorre em galáxias transientes massivas. Além disso, as galáxias passivas do grupos são tão massivas quanto as galáxias localizadas nas regiões centrais do aglomerado.

Referências Bibliográficas

- Abell, G. O., Corwin, Jr., H. G., & Olowin, R. P. 1989, *ApJS*, 70, 1
- Andreon, S., Newman, A. B., Trinchieri, G., et al. 2014, *A&A*, 565, A120
- Appenzeller, I., Fricke, K., Fürtig, W., et al. 1998, *The Messenger*, 94, 1
- Balogh, M. L., Navarro, J. F., & Morris, S. L. 2000, *ApJ*, 540, 113
- Bautz, L. P. & Morgan, W. W. 1970, *ApJ*, 162, L149
- Bertin, E. & Arnouts, S. 1996, *A&AS*, 117, 393
- Blakeslee, J. P., Holden, B. P., Franx, M., et al. 2006, *ApJ*, 644, 30
- Bleem, L. E., Stalder, B., de Haan, T., et al. 2015, *ApJS*, 216, 27
- Boquien, M., Burgarella, D., Roehlly, Y., et al. 2019, *A&A*, 622, A103
- Bower, R. G., Morris, S. L., Bacon, R., et al. 2004, *MNRAS*, 351, 63
- Bruzual, G. & Charlot, S. 2003, *MNRAS*, 344, 1000
- Burgarella, D., Buat, V., & Iglesias-Páramo, J. 2005, *MNRAS*, 360, 1413
- Butcher, H. & Oemler, Jr., A. 1984, *ApJ*, 285, 426
- Calzetti, D., Armus, L., Bohlin, R. C., et al. 2000, *ApJ*, 533, 682
- Carlberg, R. G., Yee, H. K. C., & Ellingson, E. 1997, *ApJ*, 478, 462
- Casey, C. M. 2012, *MNRAS*, 425, 3094
- Cerulo, P., Couch, W. J., Lidman, C., et al. 2017, *MNRAS*, 472, 254
- Cerulo, P., Couch, W. J., Lidman, C., et al. 2016, *MNRAS*, 457, 2209
- Charlot, S. & Fall, S. M. 2000, *ApJ*, 539, 718
- Clampin, M., Sirianni, M., Hartig, G. F., et al. 2002, *Experimental Astronomy*, 14, 107

- Clausius, R. 1870, *Annalen der Physik*, 217, 124
- Coenda, V. & Muriel, H. 2014, in *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series*, Vol. 44, *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series*, 75–75
- Cooper, M. C., Newman, J. A., Coil, A. L., et al. 2007, *MNRAS*, 376, 1445
- Dale, D. A., Helou, G., Magdis, G. E., et al. 2014, *ApJ*, 784, 83
- de Haan, T., Benson, B. A., Bleem, L. E., et al. 2016, *ApJ*, 832, 95
- de Vaucouleurs, G., de Vaucouleurs, A., & Corwin, J. R. 1976, in *Second reference catalogue of bright galaxies*, Vol. 1976, p. Austin: University of Texas Press., Vol. 1976
- Della Ceca, R., Scaramella, R., Gioia, I. M., et al. 2000, *A&A*, 353, 498
- Demarco, R., Gobat, R., Rosati, P., et al. 2010, *ApJ*, 725, 1252
- Demarco, R., Rosati, P., Lidman, C., et al. 2005, *A&A*, 432, 381
- Draine, B. T., Aniano, G., Krause, O., et al. 2014, *ApJ*, 780, 172
- Draine, B. T. & Li, A. 2007, *ApJ*, 657, 810
- Dressler, A. 1980, *ApJ*, 236, 351
- Dressler, A., Bigelow, B., Hare, T., et al. 2011, *PASP*, 123, 288
- Dressler, A., Oemler, Jr., A., Couch, W. J., et al. 1997, *ApJ*, 490, 577
- Efron, B. & Stein, C. 1981, *The Annals of Statistics*, 9, 586
- Elbaz, D., Daddi, E., Le Borgne, D., et al. 2007, *A&A*, 468, 33
- Fabian, A. C. 1994, *ARA&A*, 32, 277
- Fioc, M. & Rocca-Volmerange, B. 2019, *A&A*, 623, A143
- Ford, H. C., Bartko, F., Bely, P. Y., et al. 1998, in *Proc. SPIE*, Vol. 3356, *Space Telescopes and Instruments V*, ed. P. Y. Bely & J. B. Breckinridge, 234–248
- Fouqué, P., Solanes, J. M., Sanchis, T., & Balkowski, C. 2001, *A&A*, 375, 770
- Gill, S. P. D., Knebe, A., & Gibson, B. K. 2005, *MNRAS*, 356, 1327
- Girardi, M., Demarco, R., Rosati, P., & Borgani, S. 2005, *A&A*, 442, 29

- Gunn, J. E. & Gott, III, J. R. 1972, *ApJ*, 176, 1
- Haines, C. P., Pereira, M. J., Sanderson, A. J. R., et al. 2012, *ApJ*, 754, 97
- Holden, B. P., Illingworth, G. D., Franx, M., et al. 2007, *ApJ*, 670, 190
- Jee, M. J., White, R. L., Benítez, N., et al. 2005, *ApJ*, 618, 46
- Jones, A. P., Köhler, M., Ysard, N., Bocchio, M., & Verstraete, L. 2017, *A&A*, 602, A46
- Kashikawa, N., Inata, M., Iye, M., et al. 2000, in *Proc. SPIE*, Vol. 4008, *Optical and IR Telescope Instrumentation and Detectors*, ed. M. Iye & A. F. Moorwood, 104–113
- Kennicutt, R. C. & Evans, N. J. 2012, *ARA&A*, 50, 531
- Kodama, T. & Arimoto, N. 1997, *A&A*, 320, 41
- Kron, R. G. 1980, *ApJS*, 43, 305
- Larson, R. B., Tinsley, B. M., & Caldwell, C. N. 1980, *ApJ*, 237, 692
- Limber, D. N. & Mathews, W. G. 1960, *ApJ*, 132, 286
- Lisker, T., Vijayaraghavan, R., Janz, J., et al. 2018, *ApJ*, 865, 40
- Llebaria, A., Magnelli, B., Pollo, A., et al. 2008, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 394, *Astronomical Data Analysis Software and Systems XVII*, ed. R. W. Argyle, P. S. Bunclark, & J. R. Lewis, 589
- Mahajan, S., Mamon, G. A., & Raychaudhury, S. 2011, *MNRAS*, 416, 2882
- Maraston, C. 2005, *MNRAS*, 362, 799
- Martin, D. C., Fanson, J., Schiminovich, D., et al. 2005, *ApJ*, 619, L1
- Maughan, B. J., Jones, L. R., Ebeling, H., et al. 2003, *ApJ*, 587, 589
- Miyazaki, S., Komiyama, Y., Sekiguchi, M., et al. 2002, *PASJ*, 54, 833
- Moore, B., Katz, N., Lake, G., Dressler, A., & Oemler, A. 1996, *Nature*, 379, 613
- Moorwood, A., Cuby, J.-G., Biereichel, P., et al. 1998, *The Messenger*, 94, 7
- Nelson, D., Pillepich, A., Genel, S., et al. 2015, *Astronomy and Computing*, 13, 12
- Noble, A. G., Webb, T. M. A., Muzzin, A., et al. 2013, *ApJ*, 768, 118

- Oke, J. B., Cohen, J. G., Carr, M., et al. 1995, *PASP*, 107, 375
- Overzier, R. A. 2016, *A&A Rev.*, 24, 14
- Patel, S. G., Holden, B. P., Kelson, D. D., Illingworth, G. D., & Franx, M. 2009a, *ApJ*, 705, L67
- Patel, S. G., Kelson, D. D., Holden, B. P., Franx, M., & Illingworth, G. D. 2011, *ApJ*, 735, 53
- Patel, S. G., Kelson, D. D., Holden, B. P., et al. 2009b, *ApJ*, 694, 1349
- Peng, C. Y., Ho, L. C., Impey, C. D., & Rix, H.-W. 2002, *AJ*, 124, 266
- Peng, Y., Maiolino, R., & Cochrane, R. 2015, *Nature*, 521, 192
- Perlman, E. S., Horner, D. J., Jones, L. R., et al. 2002, *ApJS*, 140, 265
- Persson, S. E., Murphy, D. C., Gunnels, S. M., et al. 2002, *The Astronomical Journal*, 124, 619
- Poggianti, B. M., von der Linden, A., De Lucia, G., et al. 2006, *ApJ*, 642, 188
- Postman, M., Franx, M., Cross, N. J. G., et al. 2005, *ApJ*, 623, 721
- Postman, M. & Geller, M. J. 1984, *ApJ*, 281, 95
- Rhee, J., Smith, R., Choi, H., et al. 2017, *ApJ*, 843, 128
- Romer, A. K., Nichol, R. C., Holden, B. P., et al. 2000, *ApJS*, 126, 209
- Rosati, P. 1997, in *Bulletin of the American Astronomical Society*, Vol. 29, American Astronomical Society Meeting Abstracts #189, 736
- Schaye, J., Crain, R. A., Bower, R. G., et al. 2015, *MNRAS*, 446, 521
- Schiminovich, D., Wyder, T. K., Martin, D. C., et al. 2007, *ApJS*, 173, 315
- Schlafly, E. & Finkbeiner, D. P. 2011, in *Bulletin of the American Astronomical Society*, Vol. 43, American Astronomical Society Meeting Abstracts #217, 434.42
- Sérsic, J. L. 1963, *Boletin de la Asociacion Argentina de Astronomia La Plata Argentina*, 6, 41
- Smith, G. P., Treu, T., Ellis, R. S., Moran, S. M., & Dressler, A. 2005, *ApJ*, 620, 78

- Spitler, L. R., Labbé, I., Glazebrook, K., et al. 2012, *ApJ*, 748, L21
- Springel, V. 2005, *MNRAS*, 364, 1105
- Stanford, S. A., Brodwin, M., Gonzalez, A. H., et al. 2012, *The Astrophysical Journal*, 753, 164
- Sunyaev, R. A. & Zeldovich, Y. B. 1970, *Ap&SS*, 7, 3
- Tanaka, M., Kodama, T., Arimoto, N., et al. 2005, *MNRAS*, 362, 268
- Tanaka, M., Kodama, T., Arimoto, N., & Tanaka, I. 2006, *MNRAS*, 365, 1392
- Tinker, J., Kravtsov, A. V., Klypin, A., et al. 2008, *ApJ*, 688, 709
- Toomre, A. & Toomre, J. 1972, *ApJ*, 178, 623
- van der Wel, A., Holden, B. P., Franx, M., et al. 2007, *ApJ*, 670, 206
- Vikhlinin, A., Kravtsov, A. V., Burenin, R. A., et al. 2009, *ApJ*, 692, 1060
- Wilson, J. C., Eikenberry, S. S., Henderson, C. P., et al. 2003, in *Proc. SPIE*, Vol. 4841, *Instrument Design and Performance for Optical/Infrared Ground-based Telescopes*, ed. M. Iye & A. F. M. Moorwood, 451–458
- Worthey, G. 1994, *ApJS*, 95, 107
- Zwicky, F., Herzog, E., Wild, P., Karpowicz, M., & Kowal, C. T. 1961, *Catalogue of galaxies and of clusters of galaxies*, Vol. I