

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE FÍSICA
DEPARTAMENTO DE ASTRONOMIA

**GALÁXIAS *POST-STARBURST* EM
GRUPOS E AGLOMERADOS
EM $0.05 \leq z \leq 0.1$**

Rodolfo Brumel Cardoso Spindler

Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil

2021

Rodolfo Brumel Cardoso Spindler

**GALÁXIAS *POST-STARBURST* EM GRUPOS E
AGLOMERADOS EM $0.05 \leq z \leq 0.1$**

Monografia apresentada ao curso Bacharelado em Física com ênfase em Astrofísica do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Física.

Orientadora: Marina Trevisan

Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil

2021

Rodolfo Brumel Cardoso Spindler

**GALÁXIAS *POST-STARBURST* EM GRUPOS E
AGLOMERADOS EM $0.05 \leq z \leq 0.1$**

Monografia apresentada ao curso Bacharelado em Física com ênfase em Astrofísica do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Física.

Marina Trevisan
UFRGS

Allan Schnorr Müller
UFRGS

Cristina Furlanetto
UFRGS

Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil

2021

“Olhe para o Universo. Ele não se importa [...]. Todo o mal e todo o bem são irrelevantes perante a Natureza.”

— **Vernor Vinge.** *A fire upon the deep*, 1993.

Dedico aos meus avós. Ao meu vô Valfredo (1936-2016), que, apesar de ter tido uma educação seminarista, sempre valorizou, incentivou, e proporcionou o estudo, sendo uma referência intelectual. E à minha vó Sueli (1935-2021), que foi minha segunda mãe, e eu seu oitavo filho, como ela sempre dizia.

Agradecimentos

Aos gigantes da ficção-científica — em especial a Isaac Asimov — que acenderam a fagulha da curiosidade sobre as possibilidades da Natureza em minha tão jovem mente, à época. Isso, indubitavelmente, foi o começo de tudo.

Aos divulgadores científicos — em especial a Michio Kaku, Brian Greene, Kip Thorne e Stephen Hawking — pela poderosa inspiração. Sem ela eu não teria tido a coragem de iniciar mais uma graduação.

Aos colossos da física — em especial a Isaac Newton e Albert Einstein — pelos exemplos sobre-humanos. Pois, sem eles, eu não seria tão fascinado por tentar entender como a Natureza funciona.

À minha família — especialmente à minha mãe e ao meu pai — que, apesar de não compartilharem minha fascinação pela Natureza, nunca negaram qualquer suporte.

À minha orientadora dessa monografia e de Iniciação Científica (IC), Marina Trevisan, tanto quanto ao meu coorientador de IC, Allan Schnorr Müller, pela forma brilhante e arrojada que me guiaram durante os anos de IC.

Ao corpo docente do Instituto de Física da UFRGS — especialmente do Departamento de Astronomia — pela forma que compartilharam parte de seu vasto conhecimento, e pela forma que pregaram a excelência como pilar supremo da ciência.

A todos colegas com quem compartilhei os sofrimentos dessa graduação. Em especial aos colegas de IC.

Por fim, às agências e aos programas de fomento à pesquisa científica. Em especial ao CNPq, pelo financiamento de minha IC.

Resumo

Galáxias *post-starburst* (PSBs) são uma classe rara de objetos com propriedades espectrais atípicas, como fortes linhas de absorção de Balmer e pouca ou nenhuma atividade de formação estelar. Estudos mostram que essas características espectrais só podem ser reproduzidas por modelos de surto seguido por rápida supressão de formação estelar. No entanto, ainda não está claro o que causa esses eventos e qual é o papel desempenhado pelo ambiente na origem das PSBs. Para investigar isso, analisamos as propriedades de PSBs de campo, centrais e satélites em grupos e aglomerados, da base de dados do levantamento astronômico *Sloan Digital Sky Survey - Data Release 12* (SDSS-DR12) em $0.05 \leq z \leq 0.1$.

Encontramos que, independentemente do ambiente em que residem, nossas PSBs tendem a ter idades similares às das galáxias de controle (CGs) *star-forming*, e metalicidades similares às das CGs não-*star-forming*. Além disso, 85.4% das nossas PSBs possuem morfologias *early-type* (i.e., *T-types* negativos). Porém, 77.8% delas têm probabilidades acima de 50% de serem galáxias S0 em vez de elípticas. Portanto, esses resultados sugerem que uma pequena fração das nossas PSBs são galáxias elípticas que foram rejuvenescidas por acreção de gás, possivelmente via fusões ricas em gás (FRGs).

Quando comparadas às galáxias de controle, nossas PSBs são mais frequentemente galáxias centrais em grupos que galáxias satélites e de campo (30.9% das PSBs, e 15.2% das CGs, são galáxias centrais em grupos). Além disso, nossas PSBs centrais em grupos são mais compactas que as CGs centrais em grupos, 93.5% delas têm morfologias *early-type*, e 85.4% têm probabilidades acima de 50% de serem S0s. Esses resultados estão em concordância com o cenário em que FRGs são importantes na formação de galáxias PSB, pois fusões ocorrem mais frequentemente nas regiões centrais de grupos. Além disso, é esperado que uma galáxia se torne mais compacta após uma FRG graças ao aumento de atividade de formação estelar na sua região central, e já foi proposto que morfologias S0 podem indicar uma assinatura de FRGs.

Encontramos diferenças menos significativas quando comparamos as PSBs satélites em grupos e aglomerados entre si (i.e., as em grupos comparadas as em aglomerados), e com

suas galáxias de controle. Portanto, nossos resultados são inconclusivos no caso das PSBs satélites em grupos e aglomerados.

Podemos resumir nossos resultados como sendo compatíveis com o cenário de FRGs dissipativas sendo um importante mecanismo responsável pela origem de PSBs centrais em grupos. No entanto, outros processos podem estar levando à formação de galáxias PSB satélites em regiões não centrais de grupos e aglomerados, onde fusões são menos prováveis de ocorrer.

Palavras-chave: Galáxias: evolução - Galáxias: interações - Galáxias: surto de formação estelar - Galáxias: supressão de formação estelar

Abstract

Post-starburst (PSB) galaxies are a rare class of objects with atypical spectral properties, such as strong Balmer absorption lines and little or none star-formation activity. Studies show that those spectral characteristics can only be reproduced by models of a starburst followed by a rapid quenching. However, it is not yet clear what triggers those events and what is the role played by the environment on the origin of PSBs. To investigate that, we analyse the properties of field, central and satellite PSBs in groups and clusters, from the Sloan Digital Sky Server - Data Release 12 (SDSS-DR12) data base at $0.05 \leq z \leq 0.1$.

We find that, independently of the environment in which they reside, our PSBs tend to have similar ages to the star-forming control galaxies (CGs), and similar metallicities to the non-star-forming CGs. Beyond that, 85.4% of our PSBs have early-type morphologies (i.e., negative T-types). However, 77.8 of them have more than 50% probabilities of being S0 galaxies. Therefore, these results suggest that a low fraction of our PSBs are elliptical galaxies that were rejuvenated by gas accretion, possibly via wet mergers.

When compared to the control galaxies, our PSBs are more frequently central galaxies in groups than satellite and field galaxies (30.9% of PSBs and 15.2% of CGs are central galaxies in groups). Furthermore, central PSBs are more compact than the central CGs in groups, 93.5% of them have early-type morphologies, and 85.4% of them have more than 50% probabilities of being S0s. These results are in agreement with the scenario of wet-merger events as being important in the formation of PSBs, as mergers occur more frequently in the central regions of groups. Besides, it is expected of a galaxy to become more compact after a wet merger thanks to the increased star-formation activity at its central region, and it has already been proposed that S0 morphologies may indicate a wet-merger signature.

We find less significant differences when comparing the satellite PSBs in groups and clusters among themselves (i.e., the ones in groups compared to ones in clusters), and to their control galaxies. Hence, our results are inconclusive in the case of satellite PSBs in group and cluster environments.

We can summarize our results as being compatible with the scenario of dissipative wet-

merger events as being an important mechanism responsible for the origin of central PSBs in groups. However, other processes may be leading to the formation of satellite PSB galaxies in non-central regions of group and cluster environments, where mergers are less likely to occur.

Keywords: Galaxies: evolution - Galaxies: interactions - Galaxies: starburst - Galaxies: quenching

Siglas

AGN Active Galactic Nuclei.

BCG Brightest Cluster Galaxy.

CG Control Galaxy.

EW Equivalent Width.

FRG Fusão Rica em Gás.

GALEX GALaxy Evolution eXplorer.

GalMer Library of Galaxy Merger simulations.

HST Hubble Space Telescope.

IR InfraRed radiation.

ISM InterStellar Medium.

MaNGA Mapping Nearby Galaxies at APO.

MILES Medium-resolution Isaac Newton telescope Library of Empirical Spectra.

NSF Non-Star-Forming.

PSB Post-StarBurst.

PSM Propensity Score Matching.

SDSS Sloan Digital Sky Survey.

SED Spectral Energy Distribution.

SF Star-Forming.

SFH Star Formation History.

SFR Star Formation Rate.

sSFR specific Star Formation Rate.

UV UltraViolet radiation.

WISE Wide-field Infrared Survey Explorer.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	2
2	METODOLOGIA	6
	2.1 Seleção das amostras	6
	2.1.1 Ambiente global: grupos e aglomerados	9
	2.2 Propriedades das populações estelares e morfologias	12
3	RESULTADOS	14
	3.1 Ambiente das PSBs	14
	3.1.1 Ambiente global	14
	3.1.1.1 Espaço de fases	15
	3.1.2 Ambiente local	17
	3.2 Morfologia	19
	3.2.1 Raios efetivos	19
	3.2.2 Classificação morfológica	21
	3.3 Populações estelares	25
	3.3.1 Idades e metalicidades	25
	3.3.1.1 Idades	26
	3.3.1.2 Metalicidades	27
	3.3.2 Históricos de formação estelar	28
	3.3.2.1 Frações de massa formadas nos surtos de formação estelar	29
	3.4 Resumo	31
	3.4.1 Em qual ambiente estão as PSBs?	31
	3.4.2 Como PSBs se diferem de galáxias normais em ambientes similares?	31
	3.4.3 Propriedades de PSBs em diferentes ambientes	32
4	DISCUSSÃO	34
	4.1 PSBs são formadas a partir de FRGs?	34

4.2	Existem outros mecanismos responsáveis por formar PSBs em diferentes ambientes?	36
4.3	PSBs podem ser galáxias elípticas rejuvenescidas?	37
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS	39
	Referências	41

1 Introdução

“Duas coisas são infinitas: o Universo e a estupidez humana. E eu não tenho certeza sobre o Universo.”

— **Albert Einstein.**

Foi no meio do século XVIII que Immanuel Kant (1724-1804) e Thomas Wright (1711-1786) sugeriram pela primeira vez que a Via Láctea representa um sistema finito de estrelas. Nos próximos dois séculos de exploração científica, muitos contribuíram para o avanço, mas foi o trabalho de Edwin Hubble (1889-1953) que pavimentou o caminho para o estudo extragaláctico. Hubble (1926) classificou as galáxias em uma sequência morfológica, onde, embora Hubble não a tenha definido assim à época, vemos o caminho da evolução morfológica típica de uma galáxia *late-type* até uma *early-type* — i.e., de galáxias espirais (S) azuis, que ainda formam estrelas (*star-forming*), até galáxias elípticas (E) vermelhas, passivas ou quiescentes, que não formam mais estrelas (*não-star-forming*) — com a adição das galáxias com morfologias irregulares. No meio desse caminho estão as galáxias lenticulares (S0), com estruturas tipo-disco sem braços espirais e com bojos mais dominantes que os das galáxias espirais (e.g., Larson et al., 1980).

Essa bimodalidade entre galáxias jovens e velhas se estende além de propriedades morfológicas, incluindo propriedades de formação estelar, gás, cinemática, diferenças em faixas de massa estelar e magnitude absoluta (French, 2021). Em um diagrama cor-magnitude essa bimodalidade está bem definida em duas regiões, a sequência vermelha (*red sequence*), onde ficam as galáxias elípticas, e a nuvem azul (*blue cloud*), onde ficam as galáxias espirais. A zona de transição entre essas regiões é chamada de vale verde (*green valley*; ver figura 1.1).

Foi proposto que galáxias em uma fase pós surto de formação estelar (galáxias *post-starburst*; PSBs daqui em diante) estão em um estágio transicional entre a *blue cloud* e a *red sequence* (e.g., Caldwell et al., 1996; Zabludoff et al., 1996; Pattarakijwanich et al.,

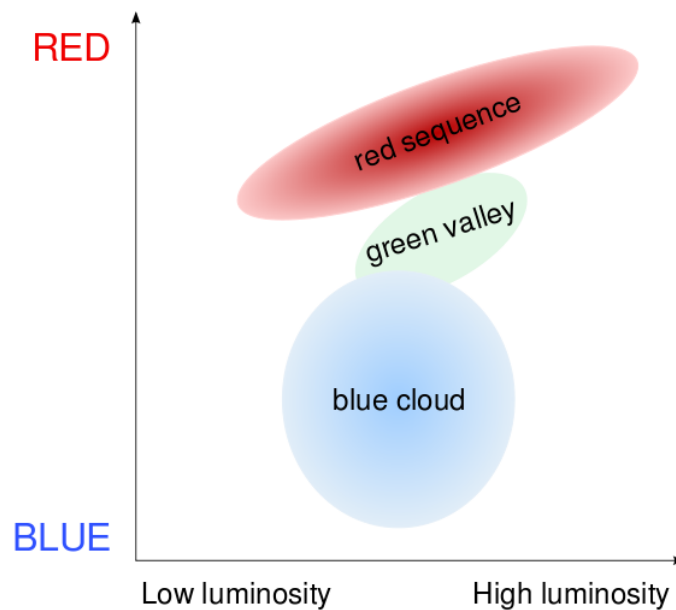


Figura 1.1 – Ilustração de um diagrama cor-magnitude, onde pode-se ver as regiões: *blue cloud*, *green valley* e *red sequence*. Crédito: Joshua Schroeder.

2016; Paccagnella et al., 2017) e, portanto, devem estar relacionadas à região transicional *green valley*. É comum assumir que essa transição natural se dá da *blue cloud*, composta por galáxias espirais, para a *red sequence*, composta por galáxias elípticas, mas as PSBs também podem ser galáxias da *red sequence* que foram rejuvenescidas (e.g., Abramson et al., 2013; Dressler et al., 2013). Ambos cenários levariam as PSBs ao *green valley*. Nos dois casos acontece um surto de formação estelar (*starburst*) seguido de uma rápida supressão de formação estelar (*quenching* rápido).

As PSBs foram identificadas pela primeira vez por Dressler & Gunn (1982), e desde lá vêm sendo estudadas através de modelagens espectroscópicas (e.g., Couch & Sharples, 1987; Abraham et al., 1996; Poggianti et al., 2004; Lotz et al., 2021).

Há evidências de que PSBs tiveram um grande *starburst* cerca de 1 Gyr antes de serem observadas e um *quenching* rápido, apresentando pouca ou nenhuma atividade de formação estelar em andamento (Couch & Sharples, 1987). Um resultado disso é que a população estelar nessas galáxias é velha o suficiente para as estrelas massivas, e de vidas curtas, tipo-O e tipo-B já terem morrido. Ou seja, elas não apresentam linhas de

emissão nebulares¹, que são os indicadores de atividade de formação estelar nos espectros integrados de galáxias. Ao mesmo tempo são jovens o suficiente para suas estrelas tipo-A dominarem o espectro óptico (fortes linhas de absorção de Balmer). A interpretação de que espectros dominados por estrelas tipo-A seriam originados por uma fase *post-starburst* (e.g., Dressler & Gunn, 1983; Couch & Sharples, 1987) veio da conexão entre morfologias perturbadas e o estudo de interações e fusões galáxia-galáxia (Toomre & Toomre, 1972) e os avanços no entendimento sobre síntese de populações estelares (e.g., Tinsley, 1968 Larson & Tinsley, 1978; Tinsley, 1979; Tinsley, 1980). Na literatura, PSBs também são chamadas de galáxias E+A e K+A. Esses termos são intercambiáveis e se referem a assinaturas espectrais das PSBs, que apresentam uma combinação de populações estelares jovens, estrelas tipo-A, e velhas, elípticas ou estrelas tipo-K, (French, 2021).

Existem alguns cenários propostos para explicar a formação de PSBs em ambientes diferentes. Um deles foi proposto para justificar a presença de PSBs em ambientes menos densos (e.g., grupos de galáxias). O proposto foi que essas PSBs devem estar associadas com interações e fusões entre galáxias ou *feedback* de núcleos galácticos ativos (AGNs; e.g., Zabludoff et al., 1996; Blake et al., 2004; Goto, 2005). As altas taxas de formação estelar (SFRs) que acontecem nos *starbursts* requerem grandes quantidades de gás (i.e., combustível para a formação de estrelas) acumuladas em regiões pequenas durante curtos intervalos de tempo. A maneira mais eficiente de produzir esse cenário é através de fusões ricas em gás (FRGs), pois as forças de maré produzidas por uma FRG removem o momento angular do gás mais eficientemente que das estrelas, canalizando o gás à regiões centrais e disparando o *starburst* e a atividade de AGN. Em um curto tempo depois a galáxia deixa de formar estrelas, pois: acabou o combustível (i.e., gás); o gás foi aquecido demais por supernovas ou *feedback* de AGN e não consegue mais colapsar; ou o gás foi expelido pelos mesmos processos. De qualquer maneira, essas galáxias passam por uma fase de *starburst* que é suprimida rapidamente (i.e., *quenching* rápido). Nessas condições, as morfologias das galáxias devem apresentar perturbações (e.g., Zabludoff et al., 1996; Blake et al., 2004; Goto, 2005; Yesuf et al., 2014). Esse cenário é suportado por estudos que mostram que as características espectrais das PSBs só podem ser reproduzidas por modelos de um *starburst* seguido por um *quenching* rápido (e.g., Wild et al., 2007, von der

¹ Essas estrelas massivas emitem radiação ionizante, por isso estão relacionadas à linhas de emissão nebulares.

Linden et al., 2010). Independentemente, também foi proposto que *quenchings* rápidos são disparados por eventos violentos (e.g., FRGs; Belli et al., 2019). Todavia, a evolução com o *redshift* da densidade numérica das PSBs (Wild et al., 2009) não é compatível com a da taxa de FRGs (de Ravel et al., 2009).

Um outro cenário foi proposto para justificar a presença de PSBs em ambientes mais densos (e.g., aglomerados de galáxias), onde foram observadas pela primeira vez por Dressler & Gunn (1982), e onde fusões são raras devido às altas dispersões de velocidades das galáxias (e.g., Gunn & Gott, 1972; Dressler et al., 2013). O mecanismo sugerido para produzir PSBs nesses ambientes foi o *ram-pressure stripping* (termo introduzido por Gunn & Gott, 1972), onde galáxias *star-forming* ricas em gás caem no poço gravitacional do aglomerado e seu gás é removido pela interação com o gás do meio intra-aglomerado, suprimindo sua formação estelar subitamente (e.g., Dressler & Gunn, 1982; Couch & Sharples, 1987; Poggianti et al., 2009; Paccagnella et al., 2017).

Porém, ainda não está claro o que causa os *starbursts* e os *quenchings* rápidos, e qual é o papel desempenhado pelo ambiente na origem das PSBs. Para investigar isso, analisaremos as propriedades de PSBs de campo, centrais e satélites em grupos e aglomerados abordando duas questões: PSBs são formadas a partir de FRGs? Ou existem outros mecanismos responsáveis por formar PSBs em diferentes ambientes?

2 Metodologia

“As pessoas pensam na educação como algo que podem terminar.”

— Isaac Asimov.

Nesse capítulo mostraremos como foram selecionadas as amostras de PSBs e de galáxias de controle. Mostraremos também os métodos adotados para as distinções entre galáxias *star-forming* e não-*star-forming*; grupos e aglomerados; e galáxias centrais, satélites e de campo. Além de propriedades de populações estelares e morfologias.

2.1 Seleção das amostras

As galáxias foram selecionadas do levantamento astronômico *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS), *Data Release 12* (SDSS-DR12; Alam et al., 2015) em $0.05 \leq z \leq 0.1$ (esse intervalo de *redshifts* foi escolhido para minimizar o efeito da abertura da fibra do SDSS), e com $M_r \leq -20.4$ (esse valor foi escolhido para se ter uma amostra completa), onde M_r é a magnitude absoluta *k*-corrigida na banda-*r*.

As PSBs foram selecionadas a partir de larguras equivalentes (EW) de $H\alpha$, e de medidas Lick¹ $H\delta_A$ (Worthey et al., 1994; Worthey & Ottaviani, 1997):

- $EW(H\alpha) \leq 1\text{\AA}$: pouca ou nenhuma atividade de formação estelar.
- $Lick\ H\delta_A \geq 1.5\text{\AA}$: assinatura típica de estrelas tipo-A.

Estas são medidas apresentadas em Brinchmann et al. (2004), disponíveis na base de dados do SDSS. Esses critérios de seleção são ilustrados na figura 2.1, onde as PSBs ficam no canto inferior direito, separadas das galáxias de controle.

¹ O sistema Lick (Burstein et al., 1984; Faber et al., 1985) define índices de linha de absorção em resolução média ($\sim 8\text{\AA}$; *Lick Observatory*) que podem ser usados, por meio da comparação com modelos de população estelar, para derivar idades e metalicidade de sistemas estelares (Thomas et al., 2003).

As amostras de galáxias de controle (CGs) foram construídas utilizando a técnica de *Propensity Score Matching* (PSM; introduzida por Rosenbaum & Rubin, 1983) para serem vinte vezes as amostras de PSBs (essa quantidade é arbitrária, mas vinte é um número razoável para se ter comparações estatisticamente válidas). Usamos massas estelares (ver figura 2.3) e taxas de formação estelar específicas (sSFRs, ver figura 2.4) como requisitos de pareamento. Ou seja, para cada PSB da amostra, vinte CGs com massas estelares e sSFRs similares foram selecionadas utilizando PSM (isso fica ilustrado na figura 2.2).

As figuras 2.3 e 2.4 mostram as distribuições de massas estelares e sSFRs das nossas galáxias, respectivamente. Cada tipo de PSB tem distribuições de massas estelares e sSFRs muito similares às das suas CGs, como pretendido ao utilizar esses parâmetros como requisitos de pareamento na PSM. Nessas figuras (e em todas que mostram distribuições normalizadas) vemos histogramas normalizados das distribuições e curvas sólidas que representam suavizações por kernel Gaussiano com desvios padrão (σ) calculados pela Regra de Scott² (Scott, 1992). Os valores- p mostrados são resultados de testes biamostrais de Kolmogorov-Smirnov (testes KS daqui em diante; Kolmogorov, 1933; Smirnov, 1939). Nas tabelas de resultados (capítulo 3) mostramos valores- p de testes exatos de Fisher (Fisher, 1922). Nesse trabalho, valores- $p < 0.05$ são considerados significativos.

Na figura 2.1, as CGs selecionadas ficam fora da região delimitada por: $EW(H\alpha) < 2\text{\AA}$ e $Lick\ H\delta_A > 1\text{\AA}$. Na mesma figura é possível notar uma zona de segurança no entorno da região ocupada pelas PSBs, de onde não foram selecionadas CGs. Utilizamos massas estelares e SFRs do catálogo GALEX–SDSS–WISE *Legacy Catalog 2* (GSWLC-2³; Salim et al., 2018, uma atualização do catálogo GSWLC-1 de Salim et al., 2016) Os dados do SDSS são limitados pelo diâmetro da fibra (3 segundos de arco). Isso significa que são dominados pelas partes centrais das galáxias. Esse fato gera um problema na identificação da galáxia ser *star-forming*, já que se tem apenas informação das suas regiões centrais. Por esse motivo utilizamos os dados de SFRs do catálogo principal de Salim et al. (2018), GSWLC-X2, assim como as massas estelares, pois esse catálogo tem informações melhores de SFRs, já que usa ajuste da SED (distribuição es-

² Regra de Scott: $\sigma = hn^{1/3}/3.49$, onde σ é o desvio padrão da amostra, h é a largura do bin, e n é o número de elementos da amostra.

³ Disponível em www.salims.pages.iu.edu/gswlc/.

pectral de energia) com medidas de UV⁴+óptico+mid-IR⁵. Nossas galáxias *star-forming* (SF) e não-*star-forming* (NSF) são separadas em $\log(sSFR/\text{yr}^{-1}) = -11$ (Salim et al., 2018). Nossas galáxias SF têm $\log(sSFR/\text{yr}^{-1}) > -11$, enquanto nossas galáxias NSF têm $\log(sSFR/\text{yr}^{-1}) \leq -11$ (essa separação fica ilustrada na figura 2.2). Na figura 2.3 se pode verificar que as galáxias SF e NSF têm faixas de massas estelares distintas, onde as galáxias NSF têm massas estelares superiores, em média.

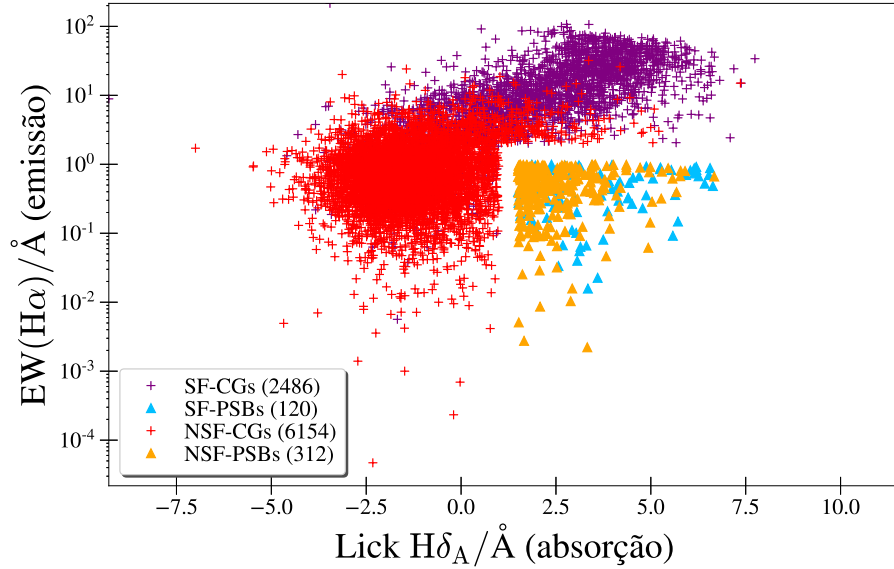


Figura 2.1 – Larguras equivalentes de $H\alpha$ como função de medidas de Lick $H\delta_A$ para as amostras de PSBs e CGs centrais e satélites em grupos e aglomerados, ilustrando os critérios de seleção. As cruces roxas representam as SF-CGs, os triângulos azuis as SF-PSBs, as cruces vermelhas as NSF-CGs, e os triângulos laranjas as NSF-PSBs.

⁴ Ultravioleta.

⁵ Infravermelho.

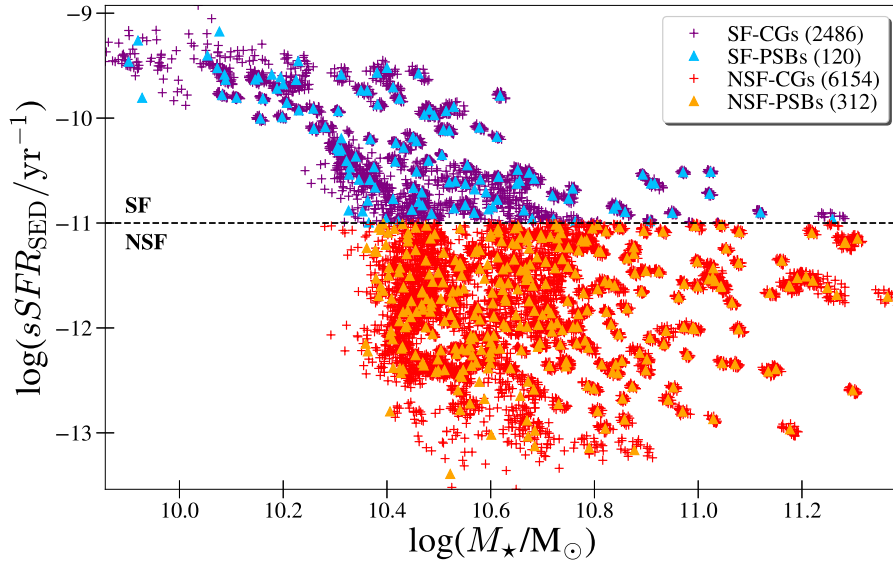


Figura 2.2 – Taxas de formação estelar específicas como função das massas estelares para as amostras de PSBs e CGs centrais e satélites em grupos e aglomerados, ilustrando a divisão em zonas *star-forming* (SF) e não-*star-forming* (NSF) em $\log(sSFR/\text{yr}^{-1}) = -11$. As cruzeiras roxas representam as SF-CGs, os triângulos azuis as SF-PSBs, as cruzeiras vermelhas as NSF-CGs, e os triângulos laranjas as NSF-PSBs.

2.1.1 Ambiente global: grupos e aglomerados

Grupos e aglomerados de galáxias são as maiores estruturas gravitacionalmente ligadas conhecidas até hoje (Voit, 2005). Aglomerados são maiores que grupos, mas não há uma linha divisória bem definida entre eles. Na literatura, grupos e aglomerados são separados de diversas maneiras, uma delas é pelas massas, onde os aglomerados são mais massivos. À cada massa de halo — i.e., massa do halo do grupo ou aglomerado ao qual as galáxias estão ligadas gravitacionalmente — de uma versão atualizada⁶ do catálogo de grupos de Yang et al. (2007), foram atribuídas galáxias conforme a metodologia apresentada em Trevisan et al. (2017b). Separamos grupos de aglomerados no limite $\log(M_{\text{halo}}/M_{\odot}) = 14$, pois esse é um valor típico adotado na literatura (e.g., Paul et al., 2017). Nossos grupos têm, então, $12.3^7 \leq \log(M_{\text{halo}}/M_{\odot}) \leq 14$, enquanto nossos aglomerados têm $\log(M_{\text{halo}}/M_{\odot}) > 14$.

Adotamos a posição da galáxia mais brilhante (BCG) como centro do grupo ou aglomerado, e dividimos as galáxias entre centrais e satélites. As galáxias de campo não fazem parte de uma estrutura maior, um grupo ou aglomerado de galáxias. Ou melhor, são

⁶ Disponível em www.astro.umass.edu/~xhyang/Group.html.

⁷ Seguindo Trevisan et al. (2017b), foi adotado o limite $\log(M_{\text{halo}}/M_{\odot}) > 12.3$ no procedimento de atribuição de galáxias aos halos.

galáxias que estão muito longe das BCGs para serem consideradas ligadas gravitacionalmente ao grupo ou aglomerado. Separamos galáxias centrais, satélites e de campo através da velocidade relativa ao centro do grupo ou aglomerado em unidades de velocidade virial do grupo ou aglomerado, $\Delta v/v_{\text{vir}}$, e da distância projetada ao centro do grupo ou aglomerado em unidades de raio virial⁸ do grupo ou aglomerado, R/r_{vir} , convertidas⁹ da mesma versão atualizada do catálogo de grupos de Yang et al. (2007). Galáxias centrais têm $\Delta v/v_{\text{vir}} = 0$ e $R/r_{\text{vir}} = 0$; nossas galáxias satélites têm $0 < \Delta v/v_{\text{vir}} \leq 3$ e $0 < R/r_{\text{vir}} \leq 3$; e nossas galáxias de campo estão nos arredores de grupos e aglomerados com $\Delta v/v_{\text{vir}} > 3$ e $R/r_{\text{vir}} > 3$.

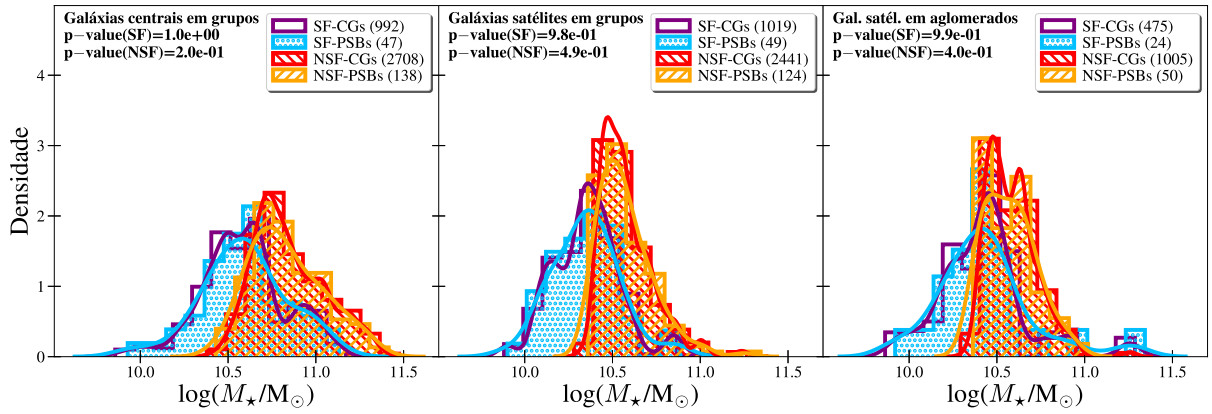


Figura 2.3 – Distribuições normalizadas de massas estelares das galáxias centrais em grupos (painel da esquerda), satélites em grupos (painel central), e satélites em aglomerados (painel da direita). Cada tipo de PSB tem uma distribuição de massas estelares muito similar às das suas CGs, como pretendido ao utilizar esse parâmetro como requisito de pareamento na PSM. Os histogramas roxos representam as SF-CGs, os azuis as SF-PSBs, os vermelhos as NSF-CGs, e os laranjas as NSF-PSBs. As curvas sólidas representam suavizações por kernel Gaussiano com desvio padrão calculado pela Regra de Scott. Mostramos os valores- p de testes KS.

⁸ R_{100} , raio da esfera cuja densidade de matéria é cem vezes a densidade crítica do Universo.

⁹ Os valores de R_{200} do catálogo foram convertidos para valores de R_{100} conforme metodologia descrita em Trevisan et al. (2017a).

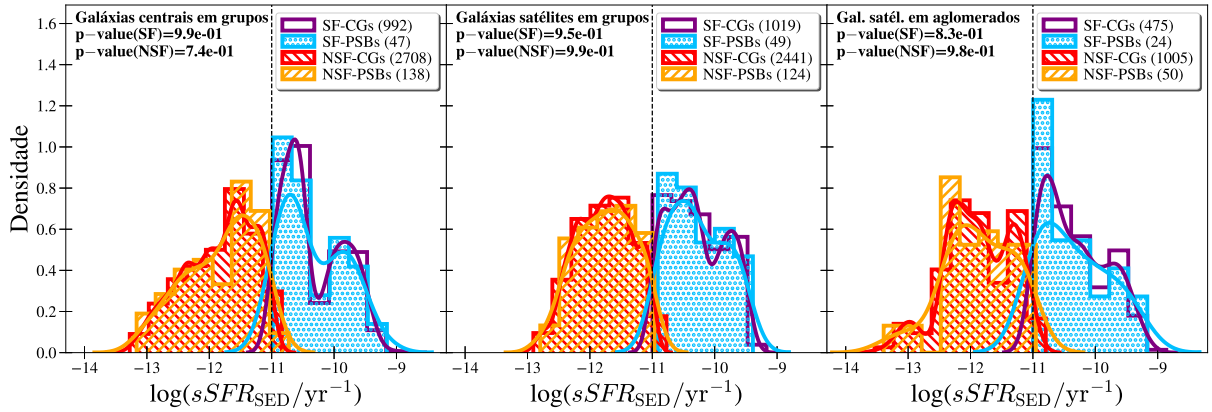


Figura 2.4 – Distribuições normalizadas de sSFRs das galáxias centrais em grupos (painel da esquerda), satélites em grupos (painel central), e satélites em aglomerados (painel da direita). Cada tipo de PSB tem uma distribuição de sSFRs muito similar às das suas CGs, como pretendido ao utilizar esse parâmetro como requisito de pareamento na PSM. Os histogramas roxos representam as SF-CGs, os azuis as SF-PSBs, os vermelhos as NSF-CGs, e os laranjas as NSF-PSBs. As curvas sólidas representam suavizações por kernel Gaussiano com desvio padrão calculado pela Regra de Scott. Mostramos os valores- p de testes KS.

Finalmente, acabamos com dois conjuntos de amostras. O primeiro conjunto, o qual usamos para todas as análises, exceto para a análise do ambiente global das PSBs (ver seção 3.1.1). Esse conjunto foi construído com CGs em ambientes similares às PSBs selecionadas. Ou seja, por exemplo, para cada PSB central em grupo selecionada, foram selecionadas vinte CGs centrais em grupos com massas estelares e sSFRs similares à da PSB por PSM. De forma análoga foram construídas as amostras de CGs para as PSBs satélite em grupos e aglomerados. As quantidades de galáxias desse primeiro conjunto podem ser vistas na tabela 2.1.

Ambiente		Grupos		Aglomerados	Σ
Galáxias		Centrais	Satélites	Satélites	
SF	PSB	47	49	24	120
	CG	992	1019	475	2486
NSF	PSB	138	124	50	312
	CG	2708	2441	1005	6154
SF+NSF	PSB	185	173	74	432
	CG	3700	3460	1480	8640

Tabela 2.1 – Quantidades de PSBs e CGs selecionadas no primeiro conjunto de amostras, utilizado em todas as análises, exceto para a análise do ambiente global das PSBs (ver seção 3.1.1). Para cada PSB foram selecionadas vinte CGs do mesmo tipo com massas estelares e sSFRs similares por PSM.

O segundo conjunto foi utilizado apenas para analisar o ambiente global das PSBs (ver seção 3.1.1). Esse conjunto foi construído sem restrição quanto ao ambiente, e galáxias de campo foram permitidas. Ou seja, para cada PSB selecionada — de qualquer tipo (i.e., galáxia central, satélite ou de campo) e atribuída a qualquer ambiente (i.e., grupo ou aglomerado) — foram selecionadas vinte CGs de qualquer tipo e atribuídas a qualquer ambiente com massas estelares e sSFRs similares à da PSB por PSM. Esse conjunto foi construído dessa maneira justamente para investigar se as PSBs estão mais frequentemente em grupos ou aglomerados; e se são mais frequentemente centrais, satélites ou de campo quando comparadas às CGs. As quantidades de galáxias desse conjunto podem ser vistas na tabela 2.2.

Ambiente		Grupos		Aglomerados		Campo	Σ
Galáxias		Centrais	Satélites	Centrais	Satélites		
SF	PSB	47	49	0	24	63	183
	CG	342	1284	1	435	1597	3659
NSF	PSB	138	124	1	50	103	416
	CG	1481	2991	13	1446	2390	8321
SF+NSF	PSB	185	173	1	74	166	599
	CG	1823	4275	14	1881	3987	11980

Tabela 2.2 – Quantidades de PSBs e CGs selecionadas no segundo conjunto de amostras, utilizado apenas para a análise do ambiente global das PSBs (ver seção 3.1.1). Para cada PSB (de qualquer tipo em qualquer ambiente) foram selecionadas vinte CGs (de qualquer tipo em qualquer ambiente) com massas estelares e sSFRs similares por PSM.

2.2 Propriedades das populações estelares e morfologias

Utilizamos idades, metalicidades e históricos de formação estelar (SFHs) inferidos a partir de técnicas de síntese de populações estelares usando espectros do SDSS e o código STARLIGHT (Cid Fernandes et al., 2005) com modelos espectrais *solar-scaled* (baseados puramente em espectros observacionais, sem espectros sintéticos, e em abundâncias químicas de estrelas da vizinhança solar; Vazdekis et al., 2015) da biblioteca de espectros MILES (Sánchez-Blázquez et al., 2006). Foram utilizadas bases discretas de idades e metalicidades $[M/H] = \log(Z_{\star}/Z_{\odot})$ (com $Z_{\odot} = 0.019$). Para as idades foram utilizados quinze valores discretos em unidades de Gyr (0.03, 0.05, 0.08, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.8, 1.25, 2, 3,

5, 7.5, 12, e 13.5). Para as metalicidades foram utilizados seis valores discretos de $[M/H]$ (-1.28, -0.66, -0.35, 0.06, 0.26, e 0.40).

Para medidas de tamanho, utilizamos raios efetivos para SDSS de Simard et al. (2011), especificamente os semi-eixos maiores na banda- r , R_{hlr} , da tabela 2 do referido artigo, pois têm decomposição de bojo+disco e fotometria atualizada para galáxias no SDSS. Também utilizamos informações do catálogo morfológico para SDSS melhorado através de *deep learning* de Domínguez Sánchez et al. (2018), especificamente:

- P_{merger} : probabilidade da galáxia apresentar uma assinatura morfológica de fusão. Utilizado para a análise do ambiente local das PSBs (ver seção 3.1.2).
- $T\text{-type}$: índice da morfologia da galáxia relacionado à sequência de Hubble (introduzidos pela classificação de de Vaucouleurs, 1974).
- P_{S0} : probabilidade da galáxia ser S0 em vez de elíptica.

Os dois últimos são utilizados na análise da classificação morfológica das PSBs e CGs (ver seção 3.2.2).

3 Resultados

“A mente, uma vez expandida por uma nova ideia, nunca retorna às suas dimensões originais.”

— **Ralph Waldo Emerson.**

Nesse capítulo mostraremos os resultados de nossas análises das propriedades das PSBs centrais e satélites em grupos e aglomerados, e de campo quando comparadas às suas galáxias de controle e entre si. Em resumo, nossos resultados abrangem os ambientes globais e locais, as morfologias, e as populações estelares das nossas PSBs e galáxias de controle.

3.1 Ambiente das PSBs

3.1.1 Ambiente global

Efeitos ambientais afetam diferentemente galáxias centrais e satélites (e.g., Wang et al., 2018), portanto, usando o segundo conjunto de amostras checamos, na tabela 3.1, as frequências de PSBs e CGs como galáxias centrais e satélites atribuídas a grupos e aglomerados, e como galáxias de campo. As galáxias de campo estão nos arredores dos grupos e aglomerados a distâncias $R/r_{\text{vir}} > 3$ com $\Delta v/v_{\text{vir}} > 3$.

As frequências das nossas PSBs como galáxias centrais, satélites e de campo revelam que, quando comparadas às frequências das suas CGs, nossas PSBs são mais frequentemente galáxias centrais em grupos que galáxias satélites e de campo, pois nossas PSBs têm frequência de 30.9% como galáxias centrais em grupos, enquanto nossas CGs têm frequência de 15.2% como galáxias centrais em grupos ($p \approx 10^{-21}$). Portanto, podemos dizer que, em grupos, verificamos uma superabundância de PSBs centrais somada a uma subabundância de PSBs satélites quando comparadas às abundâncias de suas CGs ($p < 0.05$). Também verificamos subabundâncias significativas ($p < 0.05$) de PSBs

satélites em aglomerados e de campo em relação às suas CGs. Nada podemos concluir sobre as PSBs centrais em aglomerados ($p = 0.52$).

Ambiente		Grupos				Aglomerados				Campo	
Galáxias		Centrais		Satélites		Centrais		Satélites			
SF	PSB	47	25.7%	49	26.8%	0	0.0%	24	13.1%	63	34.4%
	CG	342	9.3%	1284	35.1%	1	0.0%	435	11.9%	1597	43.6%
	valor- p	4.9E-10		2.1E-02		1.0E+00		6.4E-01		1.4E-02	
NSF	PSB	138	33.2%	124	29.8%	1	0.2%	50	12.0%	103	24.8%
	CG	1481	17.8%	2991	35.9%	13	0.2%	1446	17.4%	2390	28.7%
	valor- p	3.1E-13		1.2E-02		5.0E-01		4.1E-03		8.5E-02	
SF+NSF	PSB	185	30.9%	173	28.9%	1	0.2%	74	12.4%	166	27.7%
	CG	1823	15.2%	4275	35.7%	14	0.1%	1881	15.7%	3987	33.3%
	valor- p	9.9E-21		6.3E-04		5.2E-01		2.8E-02		4.4E-03	

Tabela 3.1 – Frequências das nossas PSBs e CGs como galáxias centrais e satélites atribuídas a grupos e aglomerados, e como galáxias de campo. Mostramos os valores- p de testes exatos de Fisher.

3.1.1.1 Espaço de fases

Apenas para as galáxias satélites do primeiro conjunto de amostras, comparamos as propriedades $\Delta v/v_{\text{vir}}$ e R/r_{vir} . Tanto na figura 3.1, quanto na figura 3.2, não verificamos diferenças estatisticamente significativas nas propriedades $\Delta v/v_{\text{vir}}$ e R/r_{vir} , respectivamente, das nossas PSBs comparadas às suas CGs ($p > 0.05$).

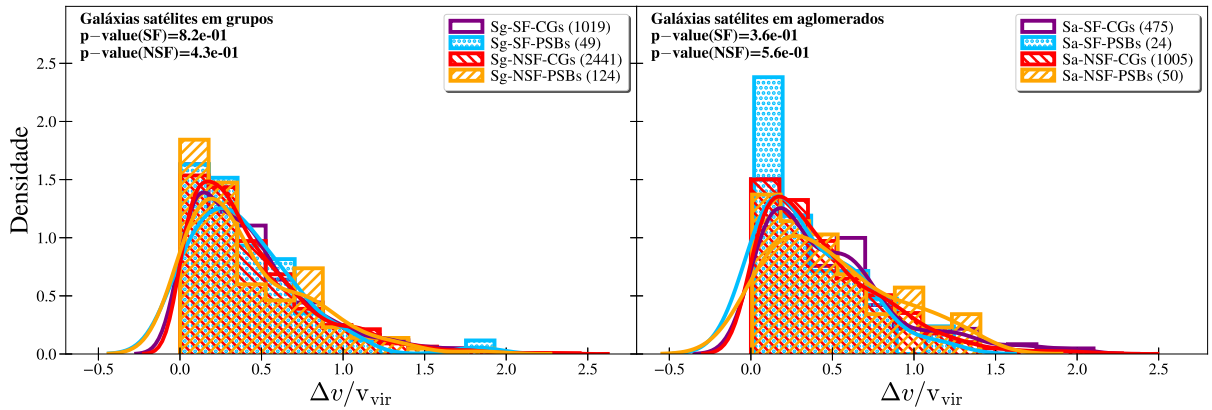


Figura 3.1 – Distribuições normalizadas de $\Delta v/v_{\text{vir}}$ das galáxias satélites em grupos (painel da esquerda) e satélites em aglomerados (painel da direita). Os histogramas roxos representam as SF-CGs, os azuis as SF-PSBs, os vermelhos as NSF-CGs, e os laranjas as NSF-PSBs. As curvas sólidas representam suas vizuações por kernel Gaussiano com desvio padrão calculado pela Regra de Scott. Mostramos os valores- p de testes KS.

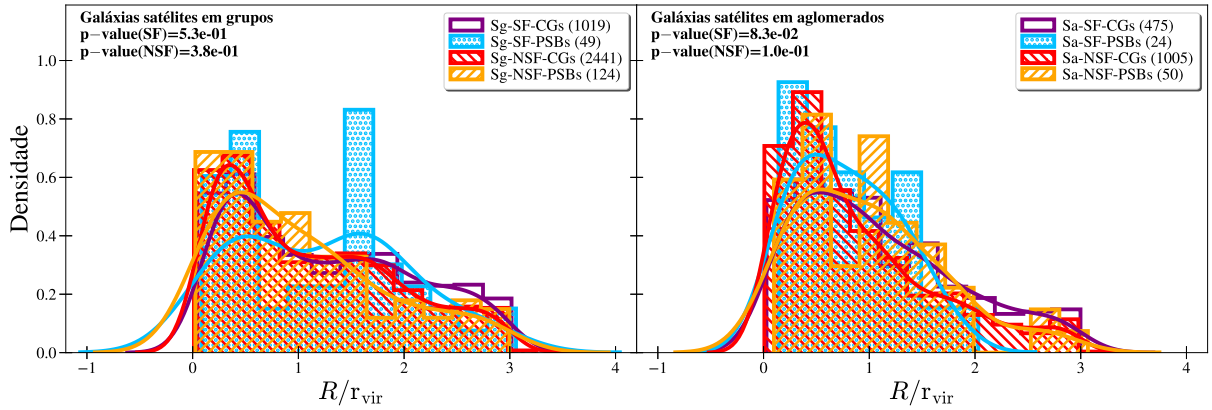


Figura 3.2 – Distribuições normalizadas de R/r_{vir} das galáxias satélites em grupos (painel da esquerda) e satélites em aglomerados (painel da direita). Os histogramas roxos representam as SF-CGs, os azuis as SF-PSBs, os vermelhos as NSF-CGs, e os laranjas as NSF-PSBs. As curvas sólidas representam suavizações por kernel Gaussiano com desvio padrão calculado pela Regra de Scott. Mostramos os valores- p de testes KS.

Ao comparar PSBs entre si em diferentes ambientes, na figura 3.3, também não verificamos diferenças estatisticamente significativas na propriedade $\Delta v/v_{\text{vir}}$ das nossas PSBs satélites em grupos comparadas às nossas PSBs satélites em aglomerados ($p > 0.05$).

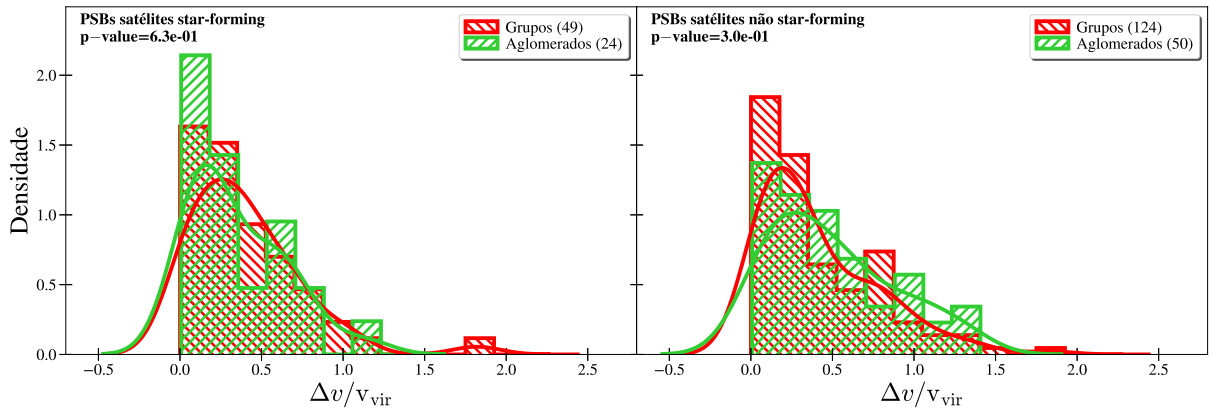


Figura 3.3 – Distribuições normalizadas de $\Delta v/v_{\text{vir}}$ das SF-PSBs satélites (painel da esquerda) e NSF-PSBs satélites (painel da direita). Os histogramas vermelhos representam as PSBs satélites em grupos e os verdes as PSBs satélites em aglomerados. As curvas sólidas representam suavizações por kernel Gaussiano com desvio padrão calculado pela Regra de Scott. Mostramos os valores- p de testes KS.

Na figura 3.4 podemos, no painel da esquerda, verificar uma diferença marginalmente significativa na propriedade R/r_{vir} das nossas SF-PSBs satélites em grupos comparadas às em aglomerados, onde as em grupos têm uma distribuição mais distante dos centros

($p = 0.003$), em média. Não verificamos diferença significativa no caso das NSF-PSBs ($p = 0.85$), no painel da direita.

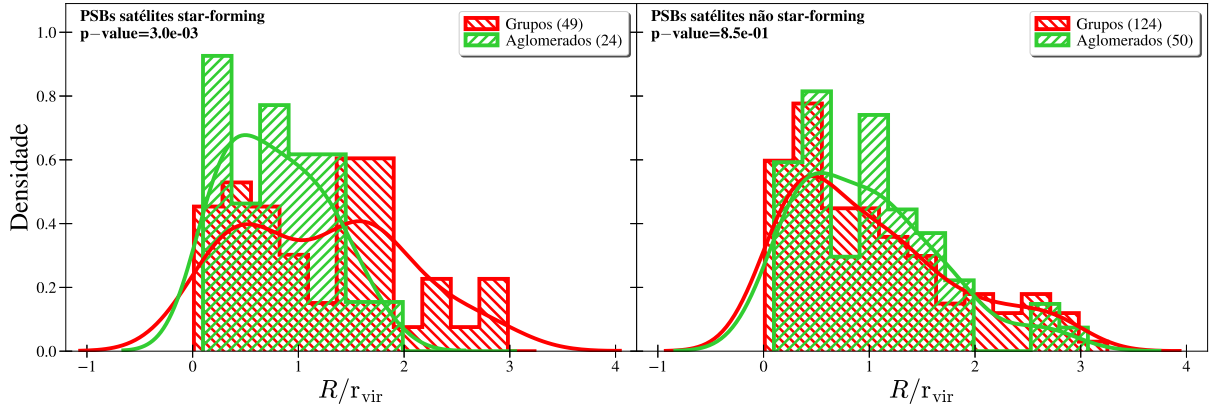


Figura 3.4 – Distribuições normalizadas de R/r_{vir} das SF-PSBs satélites (painel da esquerda) e NSF-PSBs satélites (painel da direita). Os histogramas vermelhos representam as PSBs satélites em grupos e os verdes as PSBs satélites em aglomerados. As curvas sólidas representam suavizações por kernel Gaussiano com desvio padrão calculado pela Regra de Scott. Mostramos os valores- p de testes KS.

3.1.2 Ambiente local

Usando o primeiro conjunto de amostras checamos as probabilidades P_{merger} — probabilidade da galáxia apresentar uma assinatura morfológica de fusão — do catálogo morfológico para SDSS de Domínguez Sánchez et al. (2018). Porém, conforme próprios autores, essa probabilidade parece mais um indicador de galáxias em agrupamentos ou pares projetados de galáxias que de galáxias interagentes. Ainda assim, pode ser utilizado como um indicador da vizinhança local das galáxias, mesmo que projetada.

Na figura 3.5 verificamos diferenças estatisticamente significativas nas probabilidades P_{merger} das nossas PSBs comparadas às suas CGs, como indicado pelos valores- p dos testes KS mostrados nas figuras, exceto para a comparação entre NSF-PSBs satélites em aglomerados e suas CGs ($p = 0.7$). Em geral, as PSBs têm probabilidades P_{merger} maiores que as das suas CGs. No entanto, essa diferença é mais evidente na comparação entre as NSF-PSBs centrais em grupos e suas CGs ($p \approx 10^{-8}$).

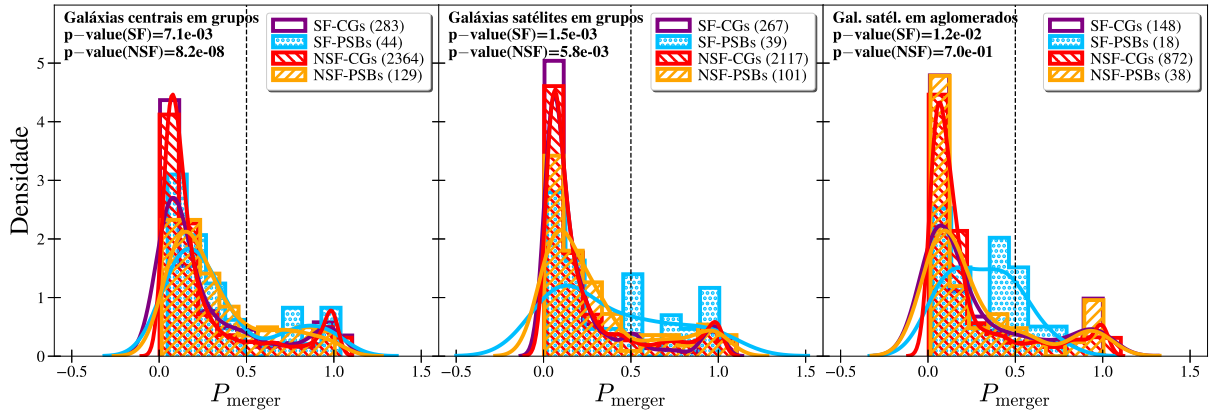


Figura 3.5 – Distribuições normalizadas de P_{merger} das galáxias centrais em grupos (painel da esquerda), satélites em grupos (painel central), e satélites em aglomerados (painel da direita). Os histogramas roxos representam as SF-CGs, os azuis as SF-PSBs, os vermelhos as NSF-CGs, e os laranjas as NSF-PSBs. As curvas sólidas representam suavizações por kernel Gaussiano com desvio padrão calculado pela Regra de Scott. Mostramos os valores- p de testes KS.

Ao comparar PSBs entre si em diferentes ambientes, na figura 3.6, podemos, no painel da direita, verificar uma diferença estatisticamente significativa de probabilidades P_{merger} das nossas NSF-PSBs centrais em grupos comparadas às satélites em grupos e aglomerados ($p < 0.05$).

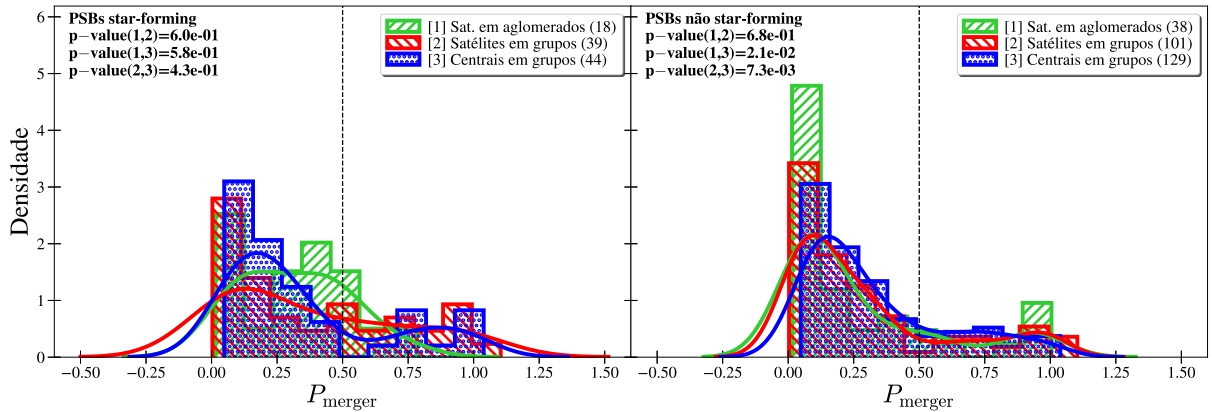


Figura 3.6 – Distribuições normalizadas de P_{merger} das SF-PSBs (painel da esquerda) e das NSF-PSBs (painel da direita). Os histogramas verdes representam as PSBs satélites em aglomerados, os vermelhos as PSBs satélites em grupos, e os azuis as PSBs centrais em grupos. As curvas sólidas representam suavizações por kernel Gaussiano com desvio padrão calculado pela Regra de Scott. Mostramos os valores- p de testes KS.

3.2 Morfologia

3.2.1 Raios efetivos

Processos físicos distintos — i.e., *ram-pressure stripping* (Gunn & Gott, 1972) e interações gravitacionais (Toomre & Toomre, 1972) — deixam diferentes assinaturas no tamanho e na morfologia das PSBs (e.g., van den Bosch et al., 2008). Portanto, usando o primeiro conjunto de amostras e raios efetivos para SDSS de Simard et al. (2011), mostramos os tamanhos — raios efetivos — em função das massas estelares das nossas galáxias na figura 3.7, onde a linha tracejada preta representa a relação massa-tamanho para galáxias passivas em $0 \leq z \leq 0.5$ — i.e., $\log(R_{\text{hlr}}/\text{kpc}) = 0.60 + 0.75(\log(M_{\star}/M_{\odot}) - 10.69897)$ — definida por van der Wel et al. (2014).

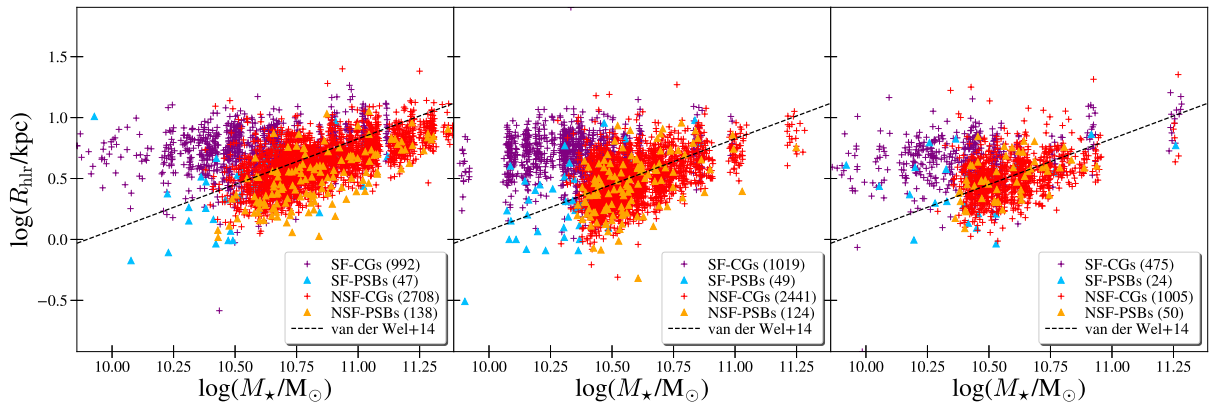


Figura 3.7 – Raios efetivos como função das massas estelares, para as galáxias centrais em grupos (painel da esquerda), satélites em grupos (painel central), e satélites em aglomerados (painel da direita). As cruces roxas representam as SF-CGs, os triângulos azuis as SF-PSBs, as cruces vermelhas as NSF-CGs, e os triângulos laranjas as NSF-PSBs. A linha tracejada preta representa a relação massa-tamanho para galáxias passivas em $0 \leq z \leq 0.5$ definida por van der Wel et al. (2014).

Normalizamos, então, os raios efetivos à essa relação massa-tamanho e chamamos esses valores normalizados de $\Delta\log(R_{\text{hlr}})$. É importante ressaltar que, como a normalização é feita utilizando relação de massa-tamanho de galáxias passivas, os resultados para as SF-CGs devem ser interpretados com ressalvas.

Na figura 3.8 verificamos excessos estatisticamente significativos de PSBs compactas em grupos comparadas às suas CGs. Ou seja, os valores de $\Delta\log(R_{\text{hlr}})$ são menores que os das suas respectivas CGs. Esse excesso é marginalmente significativo ($p = 0.016$) no

caso das NSF-PSBs satélites em grupos, mas muito significativo ($p < 10^{-10}$) no caso das PSBs centrais em grupos comparadas às suas CGs, onde a distribuição é muito inferior, em média.

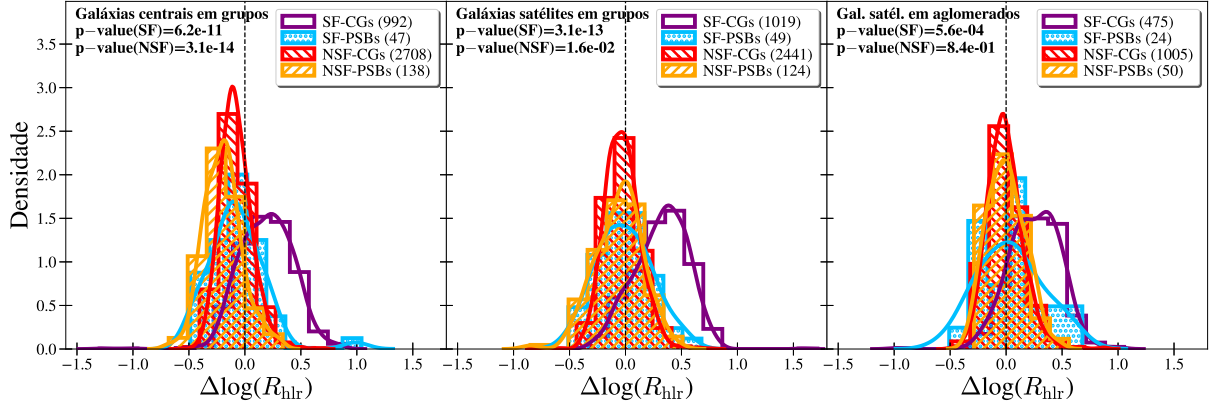


Figura 3.8 – Distribuições normalizadas de $\Delta\log(R_{\text{hhr}})$ das galáxias centrais em grupos (painel da esquerda), satélites em grupos (painel central), e satélites em aglomerados (painel da direita). Os histogramas roxos representam as SF-CGs, os azuis as SF-PSBs, os vermelhos as NSF-CGs, e os laranjas as NSF-PSBs. As curvas sólidas representam suavizações por kernel Gaussiano com desvio padrão calculado pela Regra de Scott. Mostramos os valores- p de testes KS.

Ao comparar PSBs entre si em diferentes ambientes, na figura 3.9, podemos, no painel da direita, verificar uma inferioridade muito significativa ($p < 10^{-8}$) de valores $\Delta\log(R_{\text{hhr}})$ das nossas NSF-PSBs centrais em grupos comparadas às NSF-PSBs satélites em grupos e aglomerados. Ou seja, as NSF-PSBs centrais em grupos são muito mais compactas, em média, que as NSF-PSBs satélites em grupos e aglomerados.

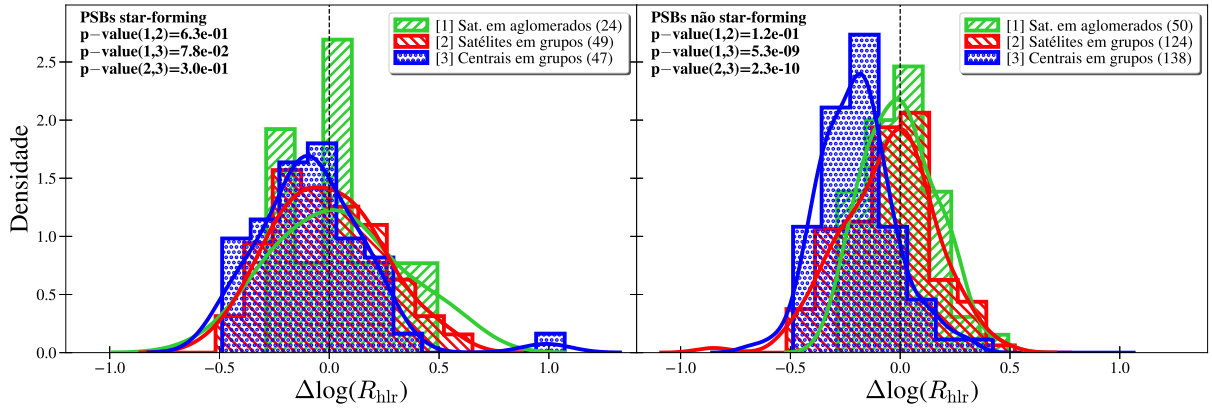


Figura 3.9 – Distribuições normalizadas de $\Delta\log(R_{\text{hlr}})$ das SF-PSBs (painel da esquerda) e das NSF-PSBs (painel da direita). Os histogramas verdes representam as PSBs satélites em aglomerados, os vermelhos as PSBs satélites em grupos, e os azuis as PSBs centrais em grupos. As curvas sólidas representam suavizações por kernel Gaussiano com desvio padrão calculado pela Regra de Scott. Mostramos os valores- p de testes KS.

3.2.2 Classificação morfológica

Seguindo com o primeiro conjunto de amostras, checamos os índices T -type — índice da morfologia da galáxia relacionado à sequência de Hubble — do catálogo morfológico para SDSS de Domínguez Sánchez et al. (2018). Na tabela 3.2 verificamos as razões de número de galáxias com T -types negativos (i.e., morfologias *early-type*) sobre número total de galáxias para PSBs e CGs centrais e satélites em grupos e satélites em aglomerados.

Nessa tabela verificamos que nossas PSBs têm 85.4% de galáxias com T -types negativos, enquanto as CGs têm 70.0% ($p \approx 10^{-13}$). Nossas PSBs centrais em grupos têm as maiores frações de galáxias com T -types negativos entre PSBs, 93.5%, enquanto as CGs centrais em grupos têm 71.5% de galáxias com T -types negativos ($p \approx 10^{-13}$).

Ambiente		Grupos						Aglomerados			Σ		
		Centrais			Satélites			Satélites					
Galáxias		Todas	T-type<0	Fração	Todas	T-type<0	Fração	Todas	T-type<0	Fração	Todas	T-type<0	Fração
SF	PSB	47	44	93.6%	49	39	79.6%	24	18	75.0%	120	101	84.2%
	CG	992	283	28.5%	1019	267	26.2%	475	148	31.2%	2486	698	28.1%
	valor- p	6.0E-20			5.1E-14			2.2E-05			1.66E-35		
NSF	PSB	138	129	93.5%	124	101	81.5%	50	38	76.0%	312	268	85.9%
	CG	2708	2364	87.3%	2441	2117	86.7%	1005	872	86.8%	6154	5353	87.0%
	valor- p	3.3E-02			1.1E-01			5.4E-02			5.48E-01		
SF+NSF	PSB	185	173	93.5%	173	140	80.9%	74	56	75.7%	432	369	85.4%
	CG	3700	2647	71.5%	3460	2384	68.9%	1480	1020	68.9%	8640	6051	70.0%
	valor- p	3.0E-13			6.7E-04			2.5E-01			4.7E-13		

Tabela 3.2 – Frações de galáxias com T -types negativos sobre todas as galáxias como galáxias centrais e satélites em grupos e satélites em aglomerados. Mostramos os valores- p de testes exatos de Fisher.

Na figura 3.10 verificamos que, somente as comparações entre PSBs e CGs centrais em grupos, no painel da esquerda, nos dão $p < 0.05$ para galáxias SF, tanto quanto para galáxias NSF, embora marginalmente inferior no caso das galáxias NSF ($p = 0.015$).

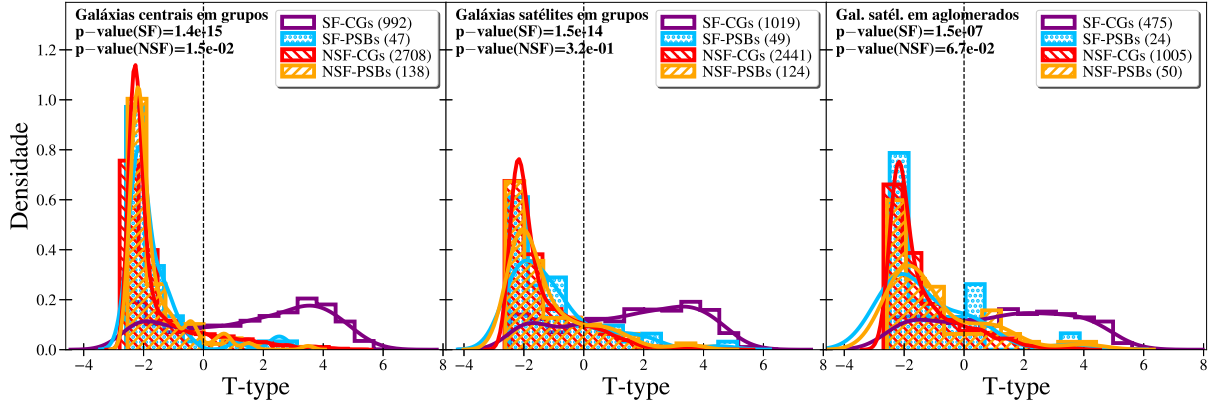


Figura 3.10 – Distribuições normalizadas de T -types das galáxias centrais em grupos (painel da esquerda), satélites em grupos (painel central), e satélites em aglomerados (painel da direita). Os histogramas roxos representam as SF-CGs, os azuis as SF-PSBs, os vermelhos as NSF-CGs, e os laranjas as NSF-PSBs. As curvas sólidas representam suavizações por kernel Gaussiano com desvio padrão calculado pela Regra de Scott. Mostramos os valores- p de testes KS.

Ao comparar PSBs entre si em diferentes ambientes, na figura 3.11, podemos verificar menores valores de T -types de PSBs centrais em grupos comparados com os das PSBs satélites. Ou seja, as PSBs centrais em grupos têm, em média, morfologias *early-type* com mais frequência que as PSBs satélites em grupos e aglomerados ($p < 0.05$). Exceto na comparação entre SF-PSBs centrais em grupos e satélites em aglomerados ($p = 0.22$), no painel da esquerda.

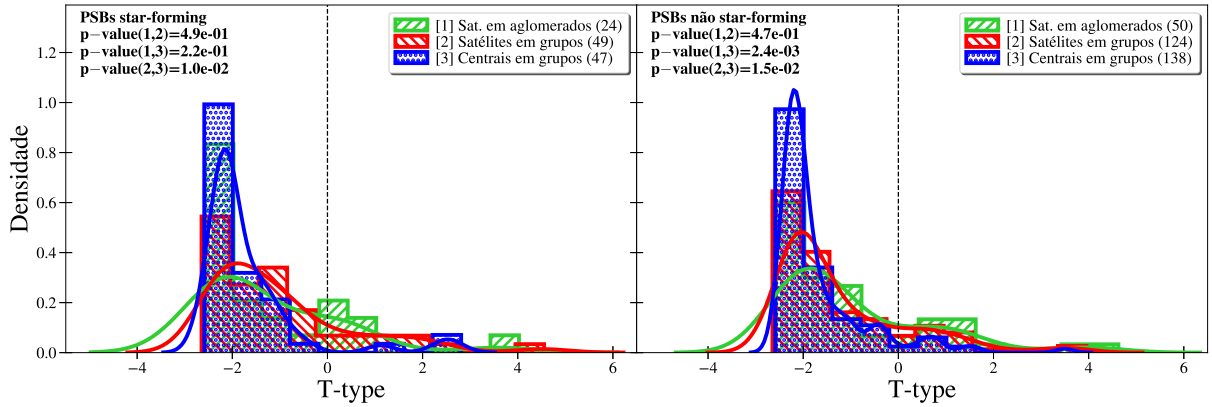


Figura 3.11 – Distribuições normalizadas de T -types das SF-PSBs (painel da esquerda) e das NSF-PSBs (painel da direita). Os histogramas verdes representam as PSBs satélites em aglomerados, os vermelhos as PSBs satélites em grupos, e os azuis as PSBs centrais em grupos. As curvas sólidas representam suavizações por kernel Gaussiano com desvio padrão calculado pela Regra de Scott. Mostramos os valores- p de testes KS.

Agora checamos as probabilidades P_{S_0} — probabilidade da galáxia ser S_0 em vez de elíptica — também do catálogo morfológico para SDSS de Domínguez Sánchez et al. (2018), apenas para galáxias com T -types negativos, conforme recomendado pelos autores. Na tabela 3.3 checamos as razões de número de galáxias com T -types negativos e probabilidades P_{S_0} acima de 50% sobre número total de galáxias para PSBs e CGs centrais e satélites em grupos e satélites em aglomerados.

Nessa tabela verificamos que nossas PSBs têm 77.8% de galáxias com T -types negativos e probabilidades P_{S_0} acima de 50%, enquanto as CGs têm 54.3% ($p \approx 10^{-23}$). Nossas PSBs centrais em grupos têm as maiores frações de galáxias com T -types negativos e probabilidades P_{S_0} acima de 50% entre PSBs, 85.4%, enquanto as CGs centrais em grupos têm as menores entre CGs, 47.5% ($p \approx 10^{-25}$).

Ambiente		Grupos						Aglomerados			Σ		
		Centrais			Satélites			Satélites					
Galáxias		Todas	T-type<0 + $P_{S0} > 0.5$	Fração	Todas	T-type<0 + $P_{S0} > 0.5$	Fração	Todas	T-type<0 + $P_{S0} > 0.5$	Fração	Todas	T-type<0 + $P_{S0} > 0.5$	Fração
SF	PSB	47	42	89.4%	49	37	75.5%	24	17	70.8%	120	96	80.0%
	CG	992	249	25.1%	1019	247	24.2%	475	134	28.2%	2486	630	25.3%
	valor- p	2.4E-19			3.2E-13			3.2E-05			4.74E-34		
NSF	PSB	138	116	84.1%	124	90	72.6%	50	34	68.0%	312	240	76.9%
	CG	2708	1510	55.8%	2441	1814	74.3%	1005	736	73.2%	6154	4060	66.0%
	valor- p	6.3E-12			6.7E-01			4.2E-01			4.66E-05		
SF+NSF	PSB	185	158	85.4%	173	127	73.4%	74	51	68.9%	432	336	77.8%
	CG	3700	1759	47.5%	3460	2061	59.6%	1480	870	58.8%	8640	4690	54.3%
	valor- p	1.5E-25			2.4E-04			9.0E-02			4.5E-23		

Tabela 3.3 – Frações de galáxias com T -types negativos e probabilidades P_{S0} maiores que 50% sobre todas as galáxias como galáxias centrais e satélites em grupos e satélites em aglomerados. Mostramos os valores- p de testes exatos de Fisher.

Na figura 3.12 verificamos que, somente as comparações entre PSBs e CGs centrais em grupos, no painel da esquerda, nos dão $p < 0.05$ para galáxias SF, tanto quanto para galáxias NSF, embora marginalmente inferior no caso das galáxias SF ($p = 0.01$). No caso das galáxias NSF centrais em grupos, no painel da esquerda, a diferença entre PSBs e CGs é a única estatisticamente significativa ($p \approx 10^{-8}$). Mas na verdade parece que são as nossas NSF-CGs centrais em grupos que têm menores probabilidades P_{S0} , em média, que suas contrapartidas satélites em grupos e aglomerados.

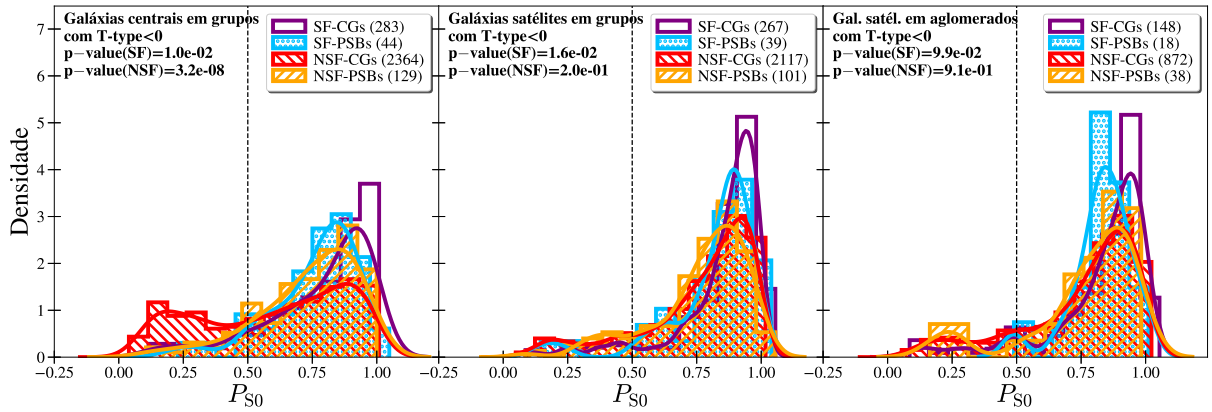


Figura 3.12 – Distribuições normalizadas de P_{S0} das galáxias centrais em grupos (painel da esquerda), satélites em grupos (painel central), e satélites em aglomerados (painel da direita). Os histogramas roxos representam as SF-CGs, os azuis as SF-PSBs, os vermelhos as NSF-CGs, e os laranjas as NSF-PSBs. As curvas sólidas representam suavizações por kernel Gaussiano com desvio padrão calculado pela Regra de Scott. Mostramos os valores- p de testes KS.

Ao comparar PSBs entre si em diferentes ambientes, na figura 3.13, podemos, no painel da esquerda, verificar uma inferioridade de probabilidades P_{S0} das nossas SF-PSBs

centrais em grupos comparadas às NSF-PSBs satélites em grupos. Esse é o único caso com $p < 0.05$ nessa figura.

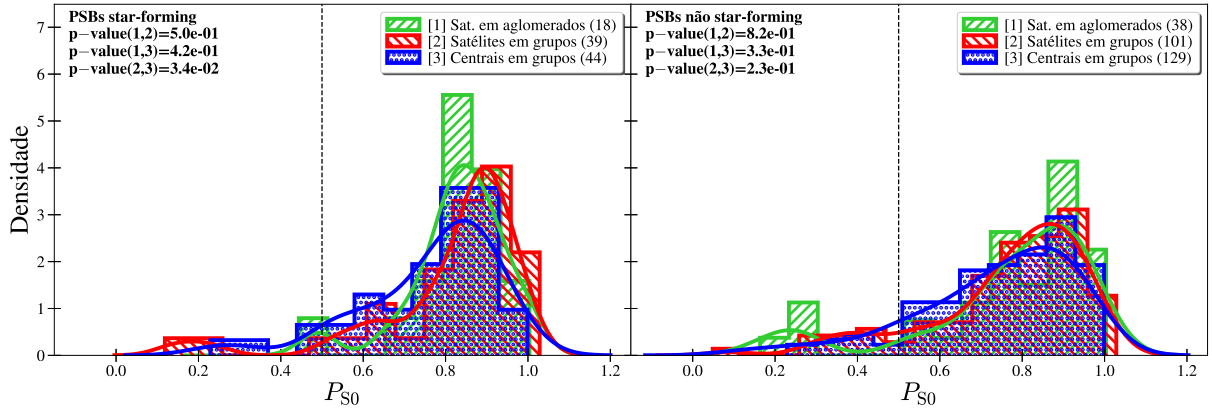


Figura 3.13 – Distribuições normalizadas de P_{S0} das SF-PSBs (painel da esquerda) e das NSF-PSBs (painel da direita). Os histogramas verdes representam as PSBs satélites em aglomerados, os vermelhos as PSBs satélites em grupos, e os azuis as PSBs centrais em grupos. As curvas sólidas representam suavizações por kernel Gaussiano com desvio padrão calculado pela Regra de Scott. Mostramos os valores- p de testes KS.

3.3 Populações estelares

3.3.1 Idades e metalicidades

Do mesmo primeiro conjunto de amostras checamos as idades e metalicidades $[M/H]$ (pesadas por luz) das nossas galáxias. A partir da figura 3.14 verificamos que nossas PSBs estão fora do provável caminho que nossas SF-CGs percorreriam até se tornarem NSF-CGs. Ou seja, nossas PSBs têm idades similares às das SF-CGs, e bem inferiores às das NSF-CGs, enquanto têm metalicidades similares às das NSF-CGs, e bem superiores às das SF-CGs.

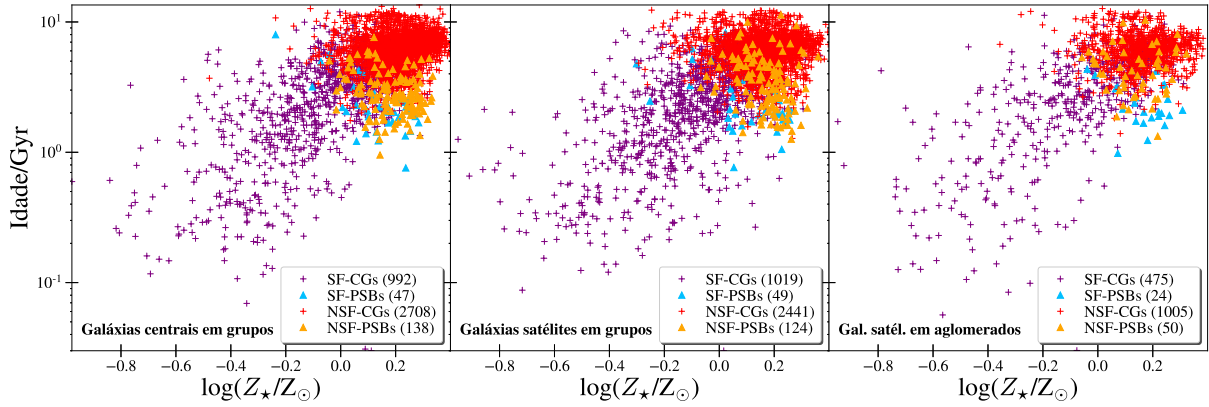


Figura 3.14 – Idades como função das metalicidades, ambas pesadas por luz, para as galáxias centrais em grupos (painel da esquerda), satélites em grupos (painel central), e satélites em aglomerados (painel da direita). As cruces roxas representam as SF-CGs, os triângulos azuis as SF-PSBs, as cruces vermelhas as NSF-CGs, e os triângulos laranjas as NSF-PSBs.

3.3.1.1 Idades

Na figura 3.15 verificamos em todos os painéis que nossas PSBs têm idades similares às das SF-CGs ($p < 0.05$), e muito inferiores às das NSF-CGs ($p < 10^{-8}$).

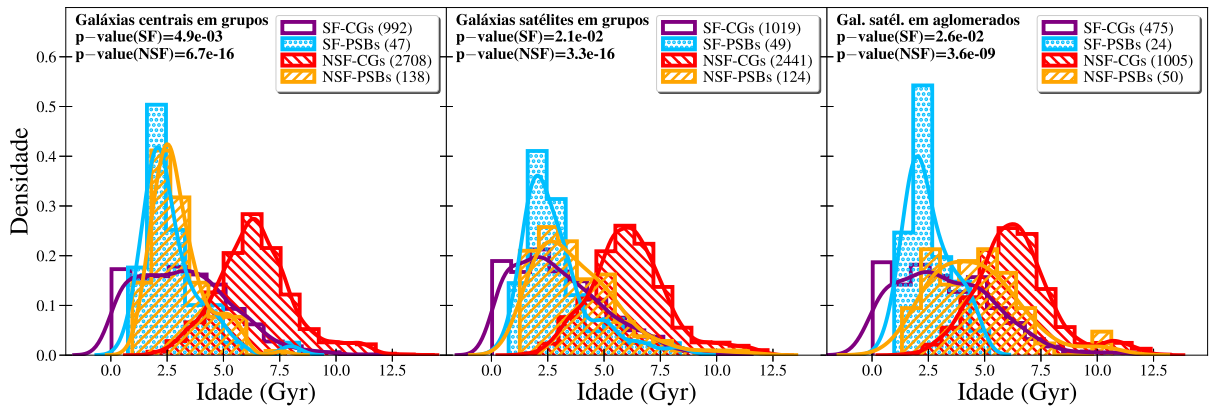


Figura 3.15 – Distribuições normalizadas de idades pesadas por luz das galáxias centrais em grupos (painel da esquerda), satélites em grupos (painel central), e satélites em aglomerados (painel da direita). Os histogramas roxos representam as SF-CGs, os azuis as SF-PSBs, os vermelhos as NSF-CGs, e os laranjas as NSF-PSBs. As curvas sólidas representam suavizações por kernel Gaussiano com desvio padrão calculado pela Regra de Scott. Mostramos os valores- p de testes KS.

Ao comparar PSBs entre si em diferentes ambientes, na figura 3.16, podemos, no painel da direita, verificar uma inferioridade de idades das nossas NSF-PSBs centrais em grupos comparadas às NSF-PSBs satélites em grupos e aglomerados ($p < 0.005$). As NSF-PSBs

satélites em grupos também apresentam idades menores que as das suas contrapartidas em aglomerados ($p = 0.008$).

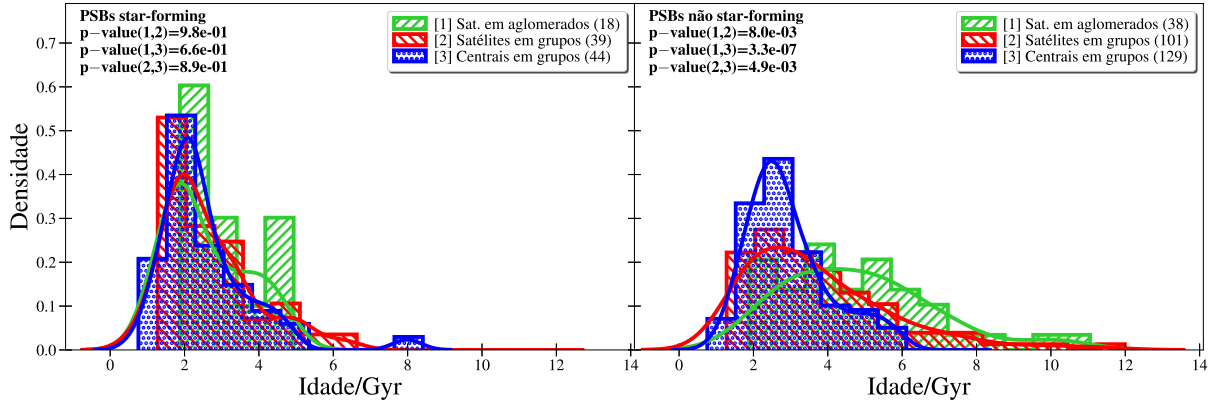


Figura 3.16 – Distribuições normalizadas de idades pesadas por luz das SF-PSBs (painel da esquerda) e das NSF-PSBs (painel da direita). Os histogramas verdes representam as PSBs satélites em aglomerados, os vermelhos as PSBs satélites em grupos, e os azuis as PSBs centrais em grupos. As curvas sólidas representam suavizações por kernel Gaussiano com desvio padrão calculado pela Regra de Scott. Mostramos os valores- p de testes KS.

3.3.1.2 Metalicidades

Na figura 3.17 verificamos em todos os painéis que nossas PSBs têm metalicidades similares às das NSF-CGs (exceto no painel central, com $p = 0.28$), e muito superiores às das SF-CGs ($p < 10^{-8}$).

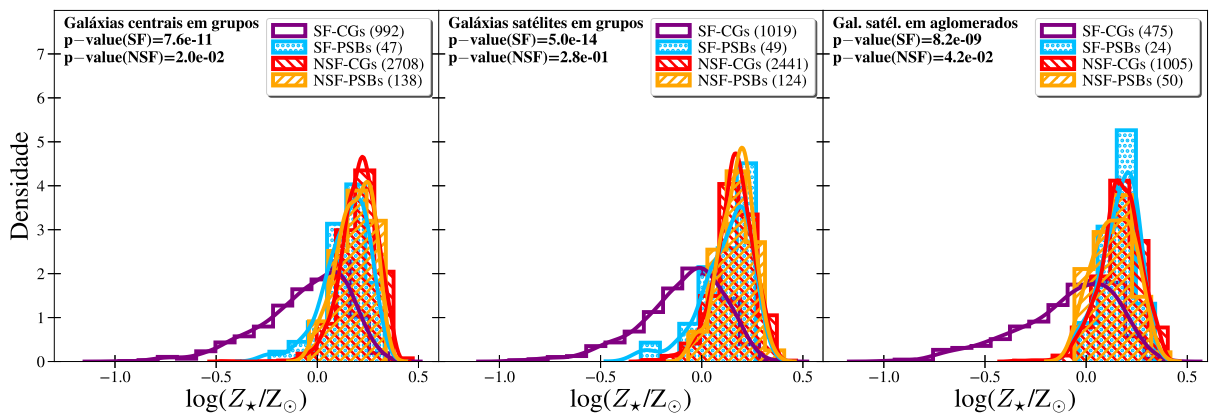


Figura 3.17 – Distribuições normalizadas de metalicidades pesadas por luz das galáxias centrais em grupos (painel da esquerda), satélites em grupos (painel central), e satélites em aglomerados (painel da direita). Os histogramas roxos representam as SF-CGs, os azuis as SF-PSBs, os vermelhos as NSF-CGs, e os laranjas as NSF-PSBs. As curvas sólidas representam suavizações por kernel Gaussiano com desvio padrão calculado pela Regra de Scott. Mostramos os valores- p de testes KS.

Ao comparar PSBs entre si em diferentes ambientes, na figura 3.18, podemos, no painel da direita, verificar uma inferioridade de metalicidades das nossas NSF-PSBs satélites em aglomerados comparadas às demais NSF-PSBs ($p < 0.005$).

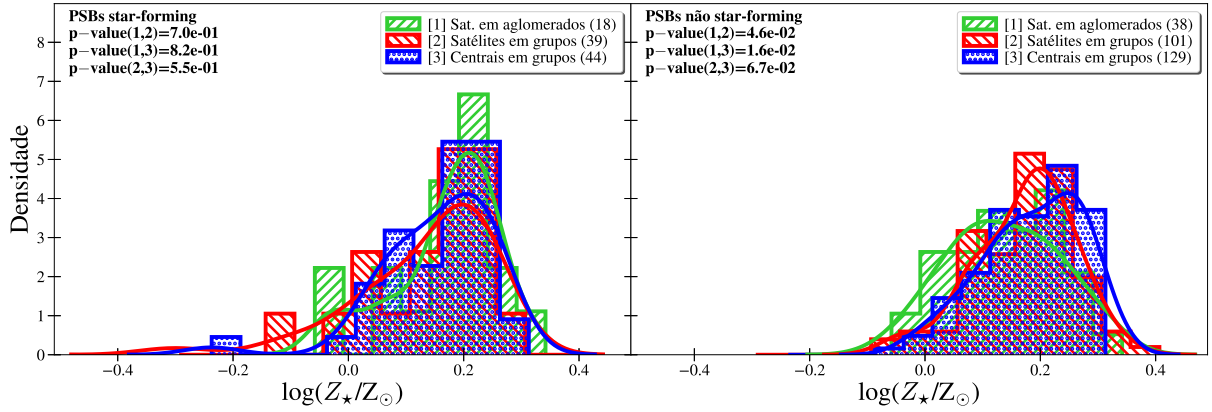


Figura 3.18 – Distribuições normalizadas de metalicidades pesadas por luz das SF-PSBs (painel da esquerda) e das NSF-PSBs (painel da direita). Os histogramas verdes representam as PSBs satélites em aglomerados, os vermelhos as PSBs satélites em grupos, e os azuis as PSBs centrais em grupos. As curvas sólidas representam suavizações por kernel Gaussiano com desvio padrão calculado pela Regra de Scott. Mostramos os valores- p de testes KS.

3.3.2 Históricos de formação estelar

Agora checamos os SFHs para o primeiro conjunto de amostras. Das figuras 3.19 e 3.20 estimamos que, em média, nossas PSBs passaram por *starbursts* entre 0.8 e 3 Gyr atrás. As nossas SF-CGs também parecem ter passado por aumentos de formação estelar na mesma época, porém menos intensos e mais prolongados, em média.

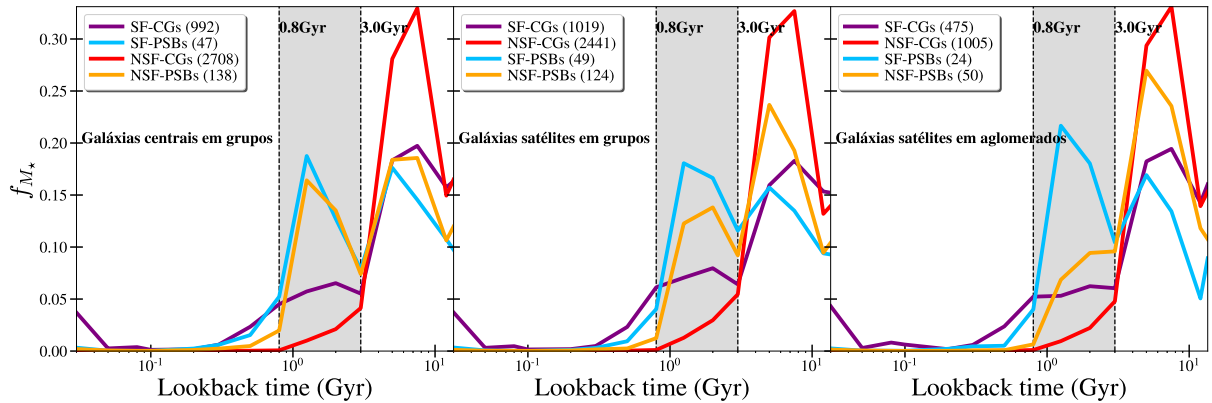


Figura 3.19 – SFHs integrados das galáxias. A área hachurada entre as linhas verticais tracejadas evidencia o *starburst* entre 0.8 e 3 Gyr. As linhas roxas representam as SF-CGs, as azuis as SF-PSBs, as vermelhas as NSF-CGs, e as laranjas as NSF-PSBs.

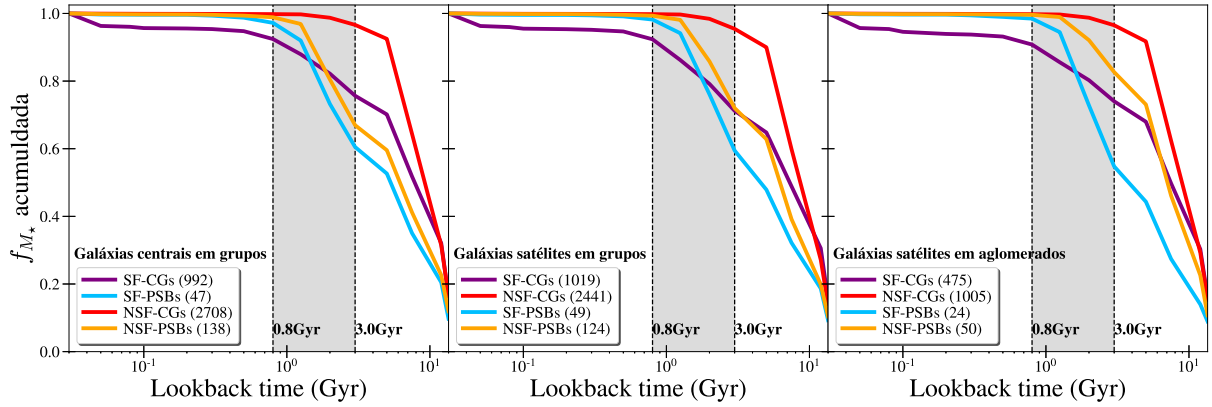


Figura 3.20 – SFHs integrados acumulados das galáxias. A área hachurada entre as linhas verticais tracejadas evidencia o *starburst* entre 0.8 e 3 Gyr. As linhas roxas representam as SF-CGs, as azuis as SF-PSBs, as vermelhas as NSF-CGs, e as laranjas as NSF-PSBs.

3.3.2.1 Frações de massa formadas nos surtos de formação estelar

Na tabela 3.4 mostramos as médias de frações de massa formadas nos surtos de formação estelar ($f_{M_{\star}-SB}$, entre 0.8 e 3 Gyr atrás) para PSBs e CGs centrais e satélites em grupos e satélites em aglomerados. Em média, 30.9% da massa estelar das nossas PSBs foi formada durante o *starburst*, enquanto nossas CGs tiveram apenas 8.0% no mesmo período, em média. Os valores $f_{M_{\star}-SB}$ das nossas PSBs centrais em grupos são os maiores entre PSBs (33.3%), enquanto os das CGs centrais em grupos são os menores entre CGs (6.9%).

Ambiente		Grupos		Aglomerados	Média
		Centrais	Satélites	Satélites	
SF	PSB	36.9%	38.9%	43.8%	39.1%
	CG	16.9%	21.3%	17.0%	18.7%
NSF	PSB	32.0%	27.4%	17.0%	27.8%
	CG	3.2%	4.4%	3.3%	3.7%
SF+NSF	PSB	33.3%	30.6%	25.7%	30.9%
	CG	6.9%	9.4%	7.7%	8.0%

Tabela 3.4 – Médias de $f_{M_{\star}-SB}$ das nossas galáxias centrais e satélites em grupos e satélites em aglomerados.

Na figura 3.21 verificamos em todos os painéis que nossas PSBs maiores valores $f_{M_{\star}-SB}$, em média, que suas respectivas CGs ($p < 10^{-7}$).

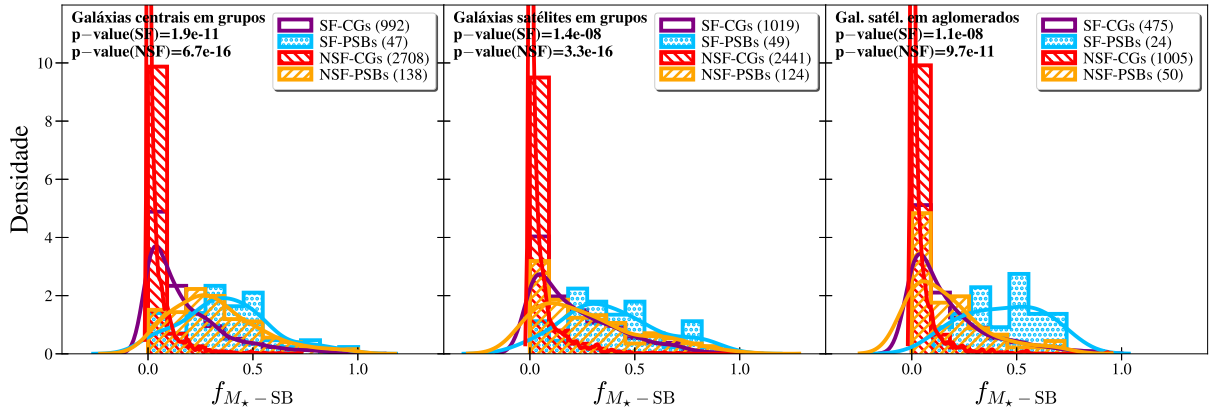


Figura 3.21 – Distribuições normalizadas de f_{M_*-SB} das galáxias centrais em grupos (painel da esquerda), satélites em grupos (painel central), e satélites em aglomerados (painel da direita). Os histogramas roxos representam as SF-CGs, os azuis as SF-PSBs, os vermelhos as NSF-CGs, e os laranjas as NSF-PSBs. As curvas sólidas representam suavizações por kernel Gaussiano com desvio padrão calculado pela Regra de Scott. Mostramos os valores- p de testes KS.

Ao comparar PSBs entre si em diferentes ambientes, na figura 3.22, podemos, no painel da direita, verificar uma superioridade de f_{M_*-SB} das nossas NSF-PSBs centrais em grupos comparadas às NSF-PSBs satélites em grupos e aglomerados ($p < 0.05$).

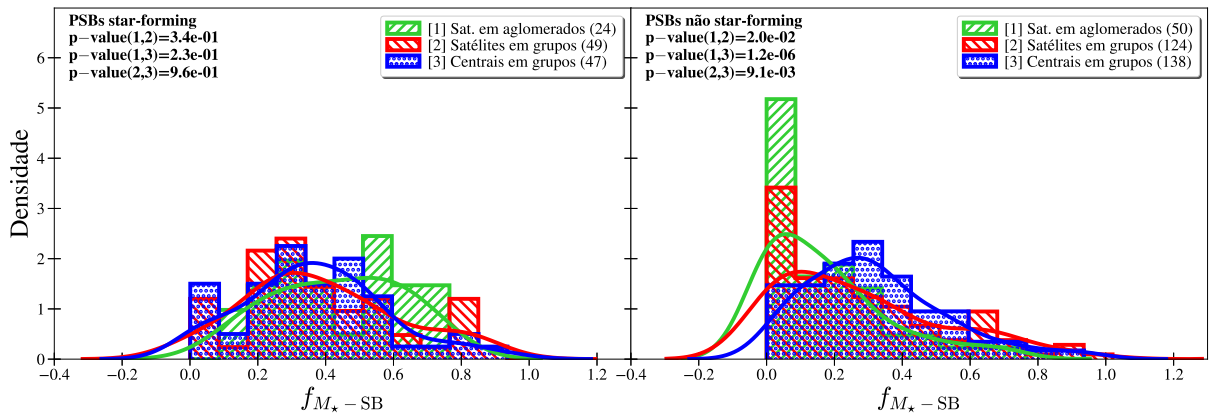


Figura 3.22 – Distribuições normalizadas de f_{M_*-SB} das SF-PSBs (painel da esquerda) e das NSF-PSBs (painel da direita). Os histogramas verdes representam as PSBs satélites em aglomerados, os vermelhos as PSBs satélites em grupos, e os azuis as PSBs centrais em grupos. As curvas sólidas representam suavizações por kernel Gaussiano com desvio padrão calculado pela Regra de Scott. Mostramos os valores- p de testes KS.

3.4 Resumo

3.4.1 Em qual ambiente estão as PSBs?

Em comparação com as galáxias de controle, nossas PSBs são mais frequentemente galáxias centrais em grupos que galáxias satélites e de campo; 30.9% delas são galáxias centrais em grupos, enquanto apenas 15.2% das CGs são galáxias centrais em grupos (tabela 3.1).

3.4.2 Como PSBs se diferem de galáxias normais em ambientes similares?

Nossas PSBs satélites em grupos e aglomerados não apresentam diferenças de $\Delta v/v_{\text{vir}}$ e R/r_{vir} em relação às suas galáxias de controle (figuras 3.1 e 3.2).

Nossas PSBs têm probabilidades P_{merger} maiores que suas CGs, com exceção das NSF-PSBs satélites em aglomerados (figura 3.5). Ou seja, nossas PSBs têm maiores probabilidades de estarem em agrupamentos ou pares projetados de galáxias que suas CGs, com exceção das NSF-PSBs satélites em aglomerados.

Nossas PSBs têm menores valores $\Delta \log(R_{\text{hlr}})$ que suas galáxias de controle (figura 3.8). Ou seja, nossas PSBs são mais compactas que as suas CGs, com exceção das NSF-PSBs satélites em aglomerados.

Um grande número das nossas PSBs (85.4%) tem morfologia *early-type* (i.e., *T-types* negativos), enquanto apenas 70.0% das nossas CGs apresentam morfologias *early-type*. A maioria das nossas PSBs (77.8%) tem *T-types* negativos e probabilidades P_{S0} maiores que 50% (i.e., probabilidade da galáxia ser S0 em vez de elíptica), enquanto apenas 54.3% das nossas CGs apresentam essas características (tabela 3.3 e figura 3.12). Ou seja, nossas PSBs têm probabilidades P_{S0} maiores que suas galáxias de controle, em média.

Nossas PSBs têm idades similares às das SF-CGs e, portanto, muito inferiores às das NSF-CGs. Elas também têm metalicidades similares às das NSF-CGs e, portanto, muito superiores às das SF-CGs (figuras 3.14 e 3.15 e 3.17). Ou seja, nossas PSBs têm características híbridas, com idades de galáxias *star-forming* e metalicidades de galáxias

não-*star-forming*.

Estimamos que, em média, nossas PSBs passaram por *starbursts* entre 0.8 e 3 Gyr atrás. Nossas SF-CGs também parecem ter passado por aumentos de formação estelar nesse período, em média, porém menos intensos e mais prolongados (figuras 3.19 e 3.20).

Nossas PSBs tiveram, em média, $f_{M_{\star-SB}}$ superiores às das galáxias de controle, 30.9% e 8.0%, respectivamente (tabela 3.4 e figura 3.21).

3.4.3 Propriedades de PSBs em diferentes ambientes

Nossas PSBs satélites em grupos e aglomerados não apresentam diferenças significativas entre si na propriedade $\Delta v/v_{vir}$ (figura 3.3). Nossas SF-PSBs satélites em grupos têm valores maiores de R/r_{vir} que as em aglomerados, em média (painel da esquerda da figura 3.4). Ou seja, estão mais distantes dos centros do que as em aglomerados, em média.

Nossas NSF-PSBs centrais em grupos têm probabilidades P_{merger} marginalmente maiores que as das NSF-PSBs satélites (figura 3.6, painel da direita). Ou seja, nossas NSF-PSBs centrais em grupos têm maiores probabilidades de estarem em agrupamentos ou pares projetados de galáxias que as NSF-PSBs satélites em grupos e aglomerados.

Nossas NSF-PSBs têm valores $\Delta \log(R_{hlr})$ muito inferiores aos das NSF-PSBs satélites em grupos e aglomerados (figura 3.9, painel da direita). Ou seja, nossas NSF-PSBs centrais em grupos são muito mais compactas que as NSF-PSBs satélites em grupos e aglomerados.

Nossas PSBs centrais em grupos têm os menores T -types entre as PSBs, em média. Ou seja, menores que os das PSBs satélites (figura 3.11). No entanto, não vemos diferenças muito significativas das probabilidades P_{S0} entre as PSBs (figura 3.13).

Nossas NSF-PSBs centrais em grupos têm idades inferiores às das NSF-PSBs satélites em grupos e aglomerados (figura 3.16, painel da direita). Elas têm metalicidades superiores às das NSF-PSBs satélites em grupos e aglomerados (figura 3.18, painel da direita). Ou seja, nossas NSF-PSBs centrais em grupos são as mais jovens e mais enriquecidas de metais entre as NSF-PSBs.

Entre nossas PSBs, as centrais em grupos tiveram, em média, $f_{M_{\star}\text{-SB}}$ superiores às das satélites em grupos e aglomerados, 33.3% contra 30.6% e 25.7%, respectivamente (tabela 3.4 e figura 3.22).

4 Discussão

“O maior inimigo do conhecimento não é a ignorância, é a ilusão de conhecimento.”

— **Stephen Hawking.**

Nesse capítulo discutiremos os resultados tentando responder às perguntas da introdução.

4.1 PSBs são formadas a partir de FRGs?

Nossos resultados apontam para o cenário de FRGs no caso das nossas PSBs centrais em grupos, pois, primeiramente, quando comparadas às galáxias de controle, nossas PSBs são mais frequentemente galáxias centrais em grupos que galáxias satélites ou de campo (30.9% delas são galáxias centrais em grupos contra apenas 15.2% das CGs; tabela 3.1). Esse resultado está em acordo com o cenário em que fusões são importantes na formação de PSBs, pois fusões ocorrem mais frequentemente nas regiões centrais de grupos.

Nossas PSBs centrais em grupos também apresentam maiores probabilidades P_{merger} comparadas às suas CGs (figura 3.5), o que indica que elas estão mais frequentemente em pares ou agrupamentos de galáxias que suas CGs. Ou seja, estão em ambientes mais densos que as galáxias de controle; esses ambientes mais densos são propícios para a ocorrência de fusões.

Nossas PSBs centrais em grupos são mais compactas quando comparadas às galáxias de controle e às PSBs satélites (figuras 3.8 e 3.9). Esse resultado também é compatível com o cenário de fusões, pois é esperado que uma galáxia pareça mais compacta após uma FRG, como resultado do aumento de atividade de formação estelar na sua região central, visto que seu tamanho é medido pela sua luminosidade. Resultados de simulações mostram que o surto de formação estelar é mais intenso no centro do sistema devido à perda de momento angular do gás e sua canalização para a região central em uma FRG

(e.g., Negroponte & White, 1983; Noguchi, 1988; Mihos & Hernquist, 1996).

Nossas PSBs centrais em grupos têm 93.5% de galáxias com morfologias *early-type* contra 71.5% de suas CGs (tabela 3.2). Elas têm 85.4% de galáxias com mais de 50% de probabilidade de serem S0s contra apenas 47.5% das suas CGs (tabela 3.3); e já foi proposto que morfologias S0 podem indicar assinatura de FRGs (e.g., Blanton & Moustakas, 2009). As S0s estão em um estágio intermediário entre as espirais e as elípticas. Elas são galáxias tipo-disco, mas com perfis de luz mais suaves, mais concentradas e com baixas sSFRs (Caldwell et al., 1993). Suas estruturas tipo-disco não apresentam braços, e seus bojos são mais dominantes que os das espirais. Há evidências de que PSBs têm morfologias intermediárias entre morfologias dominadas por discos e por bojos (Sazonova et al., 2021). Conseqüentemente, na transição de espirais (i.e., *star-forming*) para S0s, elas precisam aumentar o bojo e perder os braços. O crescimento do bojo pode ser explicado pela atividade de formação estelar intensa na região central, enquanto a perda dos braços pode ser explicada pela exaustão do gás nessa região. Como falado anteriormente, as FRGs são eficientes em fazer com que o gás vá rapidamente para o centro, desencadeando um surto de formação estelar nessa região.

Nossas PSBs centrais em grupos tiveram maiores frações de massa estelar formadas no *starburst* entre todas nossas PSBs, mesmo que marginalmente superiores (33.3%, em média; tabela 3.4). Elas também têm as idades mais baixas e as metalicidades mais altas, ambas ponderadas por luz, entre as PSBs (figuras 3.16 e 3.18). Ao passar por uma FRG, a idade da galáxia, principalmente a pesada por luminosidade, aumenta após o início do *starburst* disparado pela FRG, pois se formam estrelas jovens por toda a galáxia, principalmente na região central. Com isso, a metalicidade cresce através do enriquecimento de metais no ISM, causado principalmente pelas supernovas. Com o ISM enriquecido, as próximas gerações de populações estelares já nascem com metalicidades mais altas e assim por diante. Dessa maneira, se argumenta que a metalicidade da galáxia cresce gradativamente a partir do *starburst*. Logo, as idades inferiores e as metalicidades superiores podem sugerir que os eventos que causaram os *starbursts* foram mais violentos nos casos das nossas PSBs centrais em grupos (i.e., FRGs) que nos casos das PSBs satélites.

Em resumo, nossos resultados para as PSBs centrais em grupos estão em concordância com trabalhos anteriores que sugerem que PSBs são formadas a partir de fusões. Exis-

tem evidências de que ao menos 50% das PSBs têm morfologias perturbadas e foram provavelmente formadas como resultado de fusões (e.g., Blake et al., 2004; Yang et al., 2008; Pawlik et al., 2016). Sazonova et al. (2021) usou dados de alta resolução do HST e encontrou que cerca de 88% de sua amostra pode ter sido formada graças à fusões devido ao alto índice de morfologias perturbadas entre PSBs.

4.2 Existem outros mecanismos responsáveis por formar PSBs em diferentes ambientes?

Independentemente do ambiente em que residem e de serem galáxias centrais ou satélites, há uma indicação de que nossas PSBs estão mais frequentemente em locais com maiores densidades de galáxias que suas CGs (probabilidades P_{merger} maiores; figura 3.5).

Nossas PSBs têm maior fração de galáxias com morfologias *early-type* (i.e., *T-types* negativos) que suas CGs (85.4% contra 70.0%, respectivamente; tabela 3.2). Elas também têm maior fração de galáxias com probabilidades $P_{S0} > 0.5$ (i.e., probabilidades acima de 50% de serem galáxias S0) que suas CGs (77.8% contra 54.3%, respectivamente; tabela 3.3).

Nossas PSBs tendem a ter idades similares às das SF-CGs, e metalicidades similares às das NSF-CGs (figuras 3.15 e 3.17). Ou seja, nossas PSBs têm características híbridas, com idades de galáxias *star-forming* e metalicidades de galáxias não-*star-forming*.

Elas tiveram surtos de formação estelar similares entre 0.8 e 3 Gyr atrás (tabela 3.4). Isso é diferente do que ocorre no cenário proposto por Socolovsky et al. (2018), no qual as PSBs satélites são provavelmente produzidas por um truncamento rápido de suas regiões mais externas seguido de períodos mais estendidos de formação estelar. Nesse cenário, os mecanismos ambientais suprimem a formação estelar sem desencadear surtos significativos de formação estelar. Porém, esse cenário foi construído com galáxias em uma faixa diferente de *redshift* ($0.5 < z < 1$), onde podem haver processos evolutivos ocorrendo, além de utilizar critérios de seleção de PSBs diferentes. Portanto, processos diferentes podem estar formando PSBs nesses *redshifts*.

Enfim, independentemente do ambiente em que residem, nossas PSBs apresentam algumas características que apontam para o cenário de FRGs. Porém, como fusões são menos frequentes em regiões não centrais de grupos e aglomerados, outros mecanismos podem estar produzindo PSBs satélites nesses ambientes.

Encontramos diferenças menos significativas entre as propriedades das PSBs satélites quando comparadas entre si (i.e., as em grupos comparadas às em aglomerados) ou às galáxias de controle. Não verificamos diferenças estatisticamente significativas nas distribuições de $\Delta v/v_{\text{vir}}$ e R/r_{vir} das nossas PSBs satélites comparadas às suas CGs (figuras 3.1 e 3.2). Quando comparadas entre si, as PSBs satélites em grupos e aglomerados apresentam apenas uma diferença marginalmente significativa entre os valores R/r_{vir} das SF-PSBs satélites, onde as em grupos têm uma distribuição mais distante dos centros (figuras 3.3 e 3.4). Nossas PSBs satélites em aglomerados tiveram, em média, frações de massa formadas nos surtos de formação estelar marginalmente inferiores às das PSBs satélites em grupos, 25.7% e 30.6%, respectivamente (tabela 3.4).

Portanto, nossos resultados são inconclusivos no caso das PSBs satélites, e precisamos as investigar mais profundamente.

No entanto, trabalhos anteriores sugerem que elas podem estar sendo formadas por *feedback* de AGN, interações de galáxias ou FRGs menos violentas em ambientes menos densos (e.g., grupos menos massivos) onde as dispersões de velocidades das galáxias são baixas (e.g., Blake et al., 2004; Goto, 2005). Ou por *ram-pressure stripping* em ambientes mais densos (e.g., aglomerados ricos) onde as dispersões de velocidades das galáxias são altas (e.g., Dressler & Gunn, 1982; Couch & Sharples, 1987; Dressler & Gunn, 1992; Poggianti et al., 2009; Paccagnella et al., 2017). Ou em grupos massivos, onde o mecanismo ainda pode ser significativo (e.g., Poggianti et al., 2009).

4.3 PSBs podem ser galáxias elípticas rejuvenescidas?

No cenário proposto por Socolovsky et al. (2018), fica implícito que, em ambientes mais densos que o campo, PSBs são preferencialmente formadas a partir de galáxias

star-forming, simplesmente pela superabundância de PSBs somada à subabundância de galáxias *star-forming* nesses ambientes. Ou seja, há excesso de PSBs onde há deficit de galáxias *star-forming*, portanto, as primeiras devem evoluir a partir das segundas em $0.5 < z < 1$.

Porém, PSBs também pode ter sido galáxias elípticas que foram rejuvenescidas (e.g., Abramson et al., 2013 Dressler et al., 2013). Por exemplo, as altas metalicidades que encontramos para nossas PSBs podem ser, em parte, remanescentes das suas progenitoras elípticas (figura 3.17). Como não se espera que galáxias elípticas se transformem em S0s via fusões, as frações de PSBs com morfologias *early-type* (i.e., *T-types* negativos) e baixas probabilidades P_{S0} também podem indicar progenitoras elípticas para uma pequena fração das nossas PSBs (tabelas 3.2 e 3.3).

Esse cenário não exclui as fusões como um mecanismo importante na formação de sistemas PSB, pois o rejuvenescimento dessas galáxias elípticas pode ser disparado por acreção de gás graças à FRGs.

5 Considerações finais e perspectivas

“O Universo não tem obrigação de fazer sentido para você.”

— Neil deGrasse Tyson.

Podemos resumir nossos resultados como sendo compatíveis com o cenário em que FRGs dissipativas são um importante mecanismo responsável pela origem de PSBs centrais em grupos. No entanto, outros processos podem estar levando à formação de galáxias PSB satélites em regiões não centrais de grupos e aglomerados, onde fusões são menos prováveis de ocorrer.

Algumas ideias para o futuro:

- Como funciona a cinemática do gás e do conteúdo estelar de sistemas PSB? Isso é investigado para uma amostra de PSBs da base de dados do levantamento astronômico SDSS-MaNGA selecionada por Chen et al. (2019) em Burmeister et al. (em preparação).
- PSBs definitivamente apresentam assinaturas morfológicas de FRGs? Pretendemos buscar essas assinaturas utilizando o código MORFOMETRYKA de Ferrari et al. (2015).
- Como nossas PSBs se correlacionam com propriedades de fusões simuladas? Pretendemos investigar isso usando a base de dados¹ do GalMer (Chilingarian et al., 2010), uma biblioteca de fusões galáxia-galáxia simuladas.
- Como as propriedades de PSBs se correlacionam com seus ambientes locais? Até então focamos no ambiente global das PSBs, mas pretendemos investigar a densidade local de galáxias ao redor delas.

¹ Disponível em <http://galmer.obspm.fr/>.

- Com que frequências PSBs evoluem de galáxias espirais e galáxias elípticas rejuvenescidas? Ou seja, elas têm históricos de enriquecimento químico similares aos das SF-CGs ou NSF-CGs?

Pretendemos investigar essa evolução química seguindo os métodos adotados em Trevisan et al. (2012).

Referências

- Abraham R. G., van den Bergh S., Glazebrook K., Ellis R. S., Santiago B. X., Surma P., Griffiths R. E., 1996, *ApJS*, 107, 1
- Abramson L. E., Dressler A., Gladders M. D., Oemler Augustus J., Poggianti B. M., Monson A., Persson E., Vulcani B., 2013, *ApJ*, 777, 124
- Alam S., et al., 2015, *ApJS*, 219, 12
- Belli S., Newman A. B., Ellis R. S., 2019, *ApJ*, 874, 17
- Blake C., et al., 2004, *MNRAS*, 355, 713
- Blanton M. R., Moustakas J., 2009, *ARA&A*, 47, 159
- Brinchmann J., Charlot S., White S. D. M., Tremonti C., Kauffmann G., Heckman T., Brinkmann J., 2004, *MNRAS*, 351, 1151
- Burstein D., Faber S. M., Gaskell C. M., Krumm N., 1984, , 287, 586
- Caldwell N., Rose J. A., Sharples R. M., Ellis R. S., Bower R. G., 1993, *AJ*, 106, 473
- Caldwell N., Rose J. A., Franx M., Leonardi A. J., 1996, *AJ*, 111, 78
- Chen Y.-M., et al., 2019, *MNRAS*, 489, 5709
- Chilingarian I. V., Di Matteo P., Combes F., Melchior A. L., Semelin B., 2010, *A&A*, 518, A61
- Cid Fernandes R., Mateus A., Sodré L., Stasińska G., Gomes J. M., 2005, *MNRAS*, 358, 363
- Couch W. J., Sharples R. M., 1987, *MNRAS*, 229, 423
- Domínguez Sánchez H., Huertas-Company M., Bernardi M., Tuccillo D., Fischer J. L., 2018, *MNRAS*, 476, 3661
- Dressler A., Gunn J. E., 1982, *ApJ*, 263, 533

- Dressler A., Gunn J. E., 1983, ApJ, 270, 7
- Dressler A., Gunn J. E., 1992, ApJS, 78, 1
- Dressler A., Oemler Augustus J., Poggianti B. M., Gladders M. D., Abramson L., Vulcani B., 2013, ApJ, 770, 62
- Faber S. M., Friel E. D., Burstein D., Gaskell C. M., 1985, , 57, 711
- Ferrari F., de Carvalho R. R., Trevisan M., 2015, ApJ, 814, 55
- Fisher R. A., 1922, On the Interpretation of χ^2 from Contingency Tables, and the Calculation of P, doi:10.2307/2340521, <https://doi.org/10.2307/2340521>
- French K. D., 2021, PASP, 133, 072001
- Goto T., 2005, MNRAS, 359, 1415
- Gunn J. E., Gott J. Richard I., 1972, ApJ, 176, 1
- Hubble E. P., 1926, ApJ, 64, 321
- Kolmogorov A. N., 1933, Sulla determinazione empirica di una legge di distribuzione (On the empirical determination of a distribution law)
- Larson R. B., Tinsley B. M., 1978, ApJ, 219, 46
- Larson R. B., Tinsley B. M., Caldwell C. N., 1980, ApJ, 237, 692
- Lotz M., Dolag K., Remus R.-S., Burkert A., 2021, MNRAS, 506, 4516
- Mihos J. C., Hernquist L., 1996, ApJ, 464, 641
- Negroponte J., White S. D. M., 1983, MNRAS, 205, 1009
- Noguchi M., 1988, A&A, 203, 259
- Paccagnella A., et al., 2017, ApJ, 838, 148
- Pattarakijwanich P., Strauss M. A., Ho S., Ross N. P., 2016, ApJ, 833, 19
- Paul S., John R. S., Gupta P., Kumar H., 2017, MNRAS, 471, 2

- Pawlik M. M., Wild V., Walcher C. J., Johansson P. H., Villforth C., Rowlands K., Mendez-Abreu J., Hewlett T., 2016, *MNRAS*, 456, 3032
- Poggianti B. M., Bridges T. J., Komiyama Y., Yagi M., Carter D., Mobasher B., Okamura S., Kashikawa N., 2004, *ApJ*, 601, 197
- Poggianti B. M., et al., 2009, *ApJ*, 693, 112
- Rosenbaum P. R., Rubin D. B., 1983, *Biometrika*, 70, 41
- Salim S., et al., 2016, *ApJS*, 227, 2
- Salim S., Boquien M., Lee J. C., 2018, *ApJ*, 859, 11
- Sánchez-Blázquez P., et al., 2006, *MNRAS*, 371, 703
- Sazonova E., et al., 2021, *ApJ*, 919, 134
- Scott D. W., 1992, *Multivariate Density Estimation*
- Simard L., Mendel J. T., Patton D. R., Ellison S. L., McConnachie A. W., 2011, *ApJS*, 196, 11
- Smirnov N. V., 1939, Estimate of deviation between empirical distribution functions in two independent samples (Russian)
- Socolovsky M., Almaini O., Hatch N. A., Wild V., Maltby D. T., Hartley W. G., Simpson C., 2018, *MNRAS*, 476, 1242
- Thomas D., Maraston C., Bender R., 2003, *MNRAS*, 339, 897
- Tinsley B. M., 1968, *ApJ*, 151, 547
- Tinsley B. M., 1979, *ApJ*, 229, 1046
- Tinsley B. M., 1980, *Fundamentals of Cosmic Physics*, 5, 287
- Toomre A., Toomre J., 1972, *ApJ*, 178, 623
- Trevisan M., Ferreras I., de La Rosa I. G., La Barbera F., de Carvalho R. R., 2012, *ApJL*, 752, L27
- Trevisan M., Mamon G. A., Khosroshahi H. G., 2017a, *MNRAS*, 464, 4593

- Trevisan M., Mamon G. A., Stalder D. H., 2017b, *MNRAS*, 471, L47
- Vazdekis A., et al., 2015, *MNRAS*, 449, 1177
- Voit G. M., 2005, *Reviews of Modern Physics*, 77, 207
- Wang E., et al., 2018, *ApJ*, 860, 102
- Wild V., Kauffmann G., Heckman T., Charlot S., Lemson G., Brinchmann J., Reichard T., Pasquali A., 2007, *MNRAS*, 381, 543
- Wild V., Walcher C. J., Johansson P. H., Tresse L., Charlot S., Pollo A., Le Fèvre O., de Ravel L., 2009, *MNRAS*, 395, 144
- Worthey G., Ottaviani D. L., 1997, *ApJS*, 111, 377
- Worthey G., Faber S. M., Gonzalez J. J., Burstein D., 1994, *ApJS*, 94, 687
- Yang X., Mo H. J., van den Bosch F. C., Pasquali A., Li C., Barden M., 2007, *ApJ*, 671, 153
- Yang Y., Zabludoff A. I., Zaritsky D., Mihos J. C., 2008, *ApJ*, 688, 945
- Yesuf H. M., Faber S. M., Trump J. R., Koo D. C., Fang J. J., Liu F. S., Wild V., Hayward C. C., 2014, *ApJ*, 792, 84
- Zabludoff A. I., Zaritsky D., Lin H., Tucker D., Hashimoto Y., Shectman S. A., Oemler A., Kirshner R. P., 1996, *ApJ*, 466, 104
- de Ravel L., et al., 2009, *A&A*, 498, 379
- de Vaucouleurs G., 1974, in Shakeshaft J. R., ed., Vol. 58, *The Formation and Dynamics of Galaxies*. p. 1
- van den Bosch F. C., Pasquali A., Yang X., Mo H. J., Weinmann S., McIntosh D. H., Aquino D., 2008, *arXiv e-prints*, p. arXiv:0805.0002
- van der Wel A., et al., 2014, *ApJ*, 788, 28
- von der Linden A., Wild V., Kauffmann G., White S. D. M., Weinmann S., 2010, *MNRAS*, 404, 1231