UNIVERSIDADE ESTADUAL DE SANTA CRUZ - BA
Programa de Pós-Graduação em Física - PROFÍSICA

RELAÇÃO ENTRE A FRAÇÃO DE MATÉRIA ESCURA E A MASSA DO BURACO NEGRO CENTRAL EM GALÁXIAS EARLY-TYPE

Beatriz Goulart Amarante

Ilhéus-BA
04/09/2024

Beatriz Goulart Amarante

Relação entre fração de matéria escura e massa do buraco negro central em galáxias early-type

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física da UESC, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Física.

Universidade Estadual de Santa Cruz – UESC

Departamento de Ciências Exatas

Programa de Pós-Graduação em Física

Orientador: André Luís B. Ribeiro

Ilhéus-BA

04 de setembro de 2024

Beatriz Goulart Amarante
Relação entre fração de matéria escura e massa do buraco negro central em galáxias early-type/ Beatriz Goulart Amarante. – Ilhéus-BA, 28 de agosto de 2024-
119 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: André Luís B. Ribeiro

Dissertação de Mestrado – **Universidade Estadual de Santa Cruz – UESC**
Departamento de Ciências Exatas
Programa de Pós-Graduação em Física, 28 de agosto de 2024.

1. Galáxias. 2. Matéria Escura. I. Orientador: André Ribeiro II. Universidade Estadual de Santa Cruz. III. Programa de Pós-graduação em Física. IV. Título: Relação entre fração de matéria escura e massa do buraco negro central em galáxias early-type

CDU 02:141:005.7

BEATRIZ GOULART AMARANTE

RELAÇÃO ENTRE A FRAÇÃO DE MATÉRIA ESCURA E A MASSA DO BURACO NEGRO CENTRAL EM GALÁXIAS EARLY-TYPE

Ilhéus-BA, 04 de setembro de 2024

Prof. Dr. André Luís Batista Ribeiro
UESC - Universidade Estadual de Santa Cruz
Orientador

Prof. Dr. Henri Michel Pierre Plana
UESC - Universidade Estadual de Santa Cruz
Examinador Interno

Prof. Dr. Ricardo Lourenço Correia Ogando
ON – Observatório Nacional
Examinador Externo

Ilhéus-BA
2024

Para Catarina e Lucas

Agradecimentos

À Universidade Estadual de Santa Cruz por conceder a infraestrutura para o desenvolvimento da pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Física (PROFISICA) pela oportunidade de participar desse mestrado.

Ao Programa de Bolsas da Universidade Estadual de Santa Cruz (PROBOL) pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Prof. Dr. André Ribeiro pela confiança e pelo trabalho digno que fizemos.

À minha irmã Elizabeth por ser insuportavelmente incentivadora.

Ao Filipe pelos momentos de distração, diversão e amor.

Ao meu pai Gesil, meu colega de profissão.

À minha mãe por manter meus pés no chão.

"Os bons vi sempre passar
No mundo graves tormentos;
E para mais me espantar,
Os maus vi sempre nadar
Em mar de contentamentos.
Cuidando alcançar assim
O bem tão mal ordenado,
Fui mau, mas fui castigado.
Assim que, só para mim,
Anda o mundo concertado. "
(Luís de Camões)

Resumo

Galáxias possuem em sua composição uma grande quantidade de matéria escura e abrigam em seu centro buracos negros supermassivos. As galáxias *early-type* formam uma classe aproximadamente uniforme de objetos que são usualmente vermelhos, velhos, com pequenas quantidades de gás frio, e baixas taxas de formação estelar, sendo os sistemas galácticos mais massivos do Universo, representando o estágio final da evolução das galáxias. Como tal, transportam o registro fóssil do acúmulo de matéria estelar e escura ao longo do tempo e, por serem brilhantes e massivas, podem ser estudadas em detalhe desde baixos a altos *redshifts*. Tais caracteristicas tornam estas galáxias adequadas para esta pesquisa, cujo objetivo é estudar os problemas relacionados aos mecanismos de crescimento dos buracos negros, e à distribuição e natureza da matéria escura, a fim de melhor entender como os bárions interagem, influenciam e são influenciados tanto pela distribuição de matéria escura, como pela presença do buraco negro central em galáxias. Neste trabalho são calculadas a massa dinâmica, a massa do buraco negro central e a fração de materia escura, as quais são utilizadas na investigação das variações do conteúdo de matéria escura de ETGs, definidas em subamostras de acordo com o último surto de formação estelar, estimado pelo parâmetro D4000, classificação no diagrama WHAN, e relação com o ambiente, quantificado por Σ_5. Além do estudo de como algumas propriedades relacionadas ao crescimento dessas galáxias (raio efetivo, massa estelar, razão bojo-total, dispersão de velocidades) se comportam em função da fração de matéria escura e da massa do buraco negro central. Os resultados obtidos não indicam dependência com o ambiente, mas mostram diferenças significativas em relação à massa do buraco negro e da fração de matéria escura entre galáxias com $D4000 < 1.6$ e $D4000 \geq 1.6$, assim como diferenças significativas entre as subamostras definidas no diagrama WHAN, sugerindo estágios evolutivos de acordo com a massa do buraco negro, o regime de *feedback* ocorrendo na galáxia hospedeira, e da possivel contribuição de contrações adiabáticas.

Palavras-chaves: ETG; matéria escura; buraco negro; evolução, Diagram WHAN.

Abstract

Galaxies have a large amount of dark matter in their composition and harbor supermassive black holes in their centers. *early-type* galaxies (ETG) form an approximately uniform class of objects that are usually red, old, with small amounts of cold gas, and low rates of star formation, being the most massive galactic systems in the Universe, representing the final stage of the evolution of galaxies. As such, they carry the fossil record of stellar and dark matter accumulation over time and, because of their massiveness and brightness, they can be studied in detail from low to high *redshifts*. Such characteristics make these galaxies an excellent sample for this research, whose objective is to study galaxies formation and evolution problems, the black holes growth mechanisms , and the dark matter nature and distribution, in order to better understand how Baryons interact, influence and are influenced by both the dark matter distribution and the presence of central black hole in galaxies. In this work we calculate the dynamic mass (M_{dyn}), the central black hole mass (M_{BH}) and the of dark matter fraction (f_{DM}), which are used to investigate variations in the dark matter content of ETGs, defined in subsamples according to the last star formation burst, estimated by the D4000 parameter, classification in the WHAN Diagram, and relationship with the environment, quantified by Σ_5. Besides the study of how, some properties related to the growth of these galaxies (effective radius, stellar mass, bulge-to-total ratio, velocity dispersion) behave with the dark matter fraction and the central black hole mass. The results obtained do not indicate dependence on the environment, but they do show significant differences in the behavior of the black hole mass and the dark matter fraction between galaxies with $D4000 < 1.6$ and $D4000 \geq 1.6$, as well as significant differences between the subsamples defined with the WHAN Diagram, suggesting evolutionary stages according to the black hole mass, the *feedback* regime occurring in the host galaxy, and the possible contribution of adiabatic contractions.

Keywords: ETG; dark matter; black hole; evolution; WHAN Diagram.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Galáxias *Early Type* 6
Figura 2 – Galáxias *Late type* 7
Figura 3 – Diagrama de Hubble 7
Figura 4 – Formação de galáxias: Cenários hierárquico e monolítico. 8
Figura 5 – *Downsizing* em formação de galáxias. 9
Figura 6 – Problema cúspide versus core. 10
Figura 7 – Composição do Buraco Negro de Schwarzchild 11
Figura 8 – Estrutura do Buraco Negro 13
Figura 9 – Simulação da fusão de dois buracos negros. 15
Figura 10 – Estágios da fusão de buracos negros. 17
Figura 11 – Concepção artística do disco de acreção em torno da galáxia III Zw 002. 18
Figura 12 – Histograma da distribuição de M_{dyn} para a amostra completa deste trabalho. 30
Figura 13 – Histograma da distribuição de f_{DM}^{eff} para a amostra completa. 32
Figura 14 – Massa SMBH vs. a combinação linear das seis propriedades de galáxias 34
Figura 15 – Histograma da distribuição de M_{BH}. 35
Figura 16 – Histograma das distribuições de M_{dyn}, f_{DM}^{eff} e M_{BH} de acordo com D4000. 36
Figura 17 – Distribuição dos objetos nas regiões do Diagrama WHAN. 38
Figura 18 – Histograma das distribuições de M_{dyn}, f_{DM}^{eff} e M_{BH} de acordo com WHAN. 39
Figura 19 – Histograma das propriedades das galáxias ETG para a amostra geral. . 40
Figura 20 – Histograma das propriedades das galáxias ETG de acordo com D4000. 41
Figura 21 – Histograma das propriedades das galáxias ETG considerando WHAN. . 42
Figura 22 – Histogramas da distribuição de Σ_5. 45
Figura 23 – Histogramas da f_{DM}^{eff} e M_{BH} considerando D4000. 50
Figura 24 – Fração de matéria escura em função das propriedades das galáxias para a amostra geral. 52
Figura 25 – Fração de matéria escura em função das propriedades das galáxias com $(\Sigma_5) < 0.17$ 53
Figura 26 – Fração de matéria escura em função das propriedades das galáxias com $(\Sigma_5) > 1.85$. 54
Figura 27 – Fração efetiva de matéria escura em função das propriedades das galáxias considerando D4000. 56
Figura 28 – Fração efevetiva de matéria escura em função das propriedades das galáxias considerando D4000 com $(\Sigma_5) < 0.17$. 58
Figura 29 – Legenda: Fração efetiva de matéria escura em função das propriedades das galáxias considerando D4000 com $(\Sigma_5) > 1.85$. 59

Figura 30 – Fração elefetiva de matéria escura em função das propriedades das galáxias considerando o Diagrama WHAN. 61
Figura 31 – Fração efetiva de matéria escura em função das propriedades das galáxias considerando o Diagrama WHAN para $\Sigma_5 < 0.17$. 63
Figura 32 – Fração efetiva de matéria escura em função das propriedades das galáxias considerando o Diagrama WHAN para $(\Sigma_5) > 1.85$. 64
Figura 33 – Massa do buraco negro em função das propriedades das galáxias. . . . 65
Figura 34 – Massa do Buraco Negro Central em função das propriedades das galáxias com $(\Sigma_5) < 0,17$. 67
Figura 35 – Massa do Buraco Negro Central em função das propriedades das galáxias com $(\Sigma_5) > 1.85$. 68
Figura 36 – Massa do Buraco Negro em função das propriedades das galáxias considerando D4000. 69
Figura 37 – Massa do Buraco Negro em função das propriedades das galáxias considerando D4000 com $\Sigma_5 < 0,17$. 71
Figura 38 – Massa do Buraco Negro em função das propriedades das galáxias considerando D4000 com $\Sigma_5 > 1,85$. 72
Figura 39 – Massa do Buraco Negro em função das propriedades das galáxias considerando o Diagrama WHAN. 73
Figura 40 – Massa do Buraco Negro em função das propriedades das galáxias considerando o Diagrama WHAN para $\Sigma_5 < 0.17$. 75
Figura 41 – Massa do Buraco Negro em função das propriedades das galáxias considerando o Diagrama WHAN para $\Sigma_5 > 1.85$. 76
Figura 42 – Fração de matéria escura em função do raio efetivo. 77
Figura 43 – Gráficos de densidade da fração de matéria escura em função da massa do buraco negro considerando D4000. 79
Figura 44 – Gráficos de densidade da fração de matéria escura (f_{DM}^{eff}) em função da massa do buraco negro (M_{BH}) considerando o Diagrama WHAN. . . . 80
Figura 45 – Fração de matéria escura efetiva e massa específica do buraco negro em função da densidade de massa estelar dentro do raio efetivo. 85
Figura 46 – Massa estelar e massa dinâmica dentro do raio efetivo em função de R_e considerando D4000. 86
Figura 47 – Massa estelar e massa dinâmica dentro do raio efetivo em função de R_e considerando D4000. 87
Figura 48 – Massa específica do buraco negro em função da fração de matéria escura para as subamostras definidas no diagrama WHAN. 89
Figura 49 – Correlação entre a massa do bruaco negro e a massa do bojo 114
Figura 50 – Distribuição de D4000. 116
Figura 51 – Diagrama WHAN 117

Lista de tabelas

Tabela 1 – Comparação das subamostras de acordo com o Indice D4000. 55
Tabela 2 – Comparação das subamostras de acordo com o Diagrama WHAN. . . . 60
Tabela 3 – Resultados do Teste KDE 81

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGN	*Active Galactic Nucleus*
ACS	*Advanced Camera for Survey*
A	Área circular
cm	Centímetro
CCD	*Charge-coupled Device*
K	Coeficiente virial
k_U	Constante
k_T	Constante
G	Constante Gravitacional
X_1 e $X_2, ...$	Coordenadas espaciais
Y_1 e $Y_2, ...$	Coordenadas espaciais
DM	*Dark matter*
DR7	*Data Release 7*
DR15	*Data Release 15*
ρ	Densidade
ρ_M	Densidade do Buraco Negro
ρ_m	Densidade de um corpo
σ_e	Dispersão de velocidade
$\sum_{DM}$	Densidade superficial efetiva da matéria escura
$\sum_5$	Densidade local
$\sum_e$	Densidade superficial efetiva de massa estelar
σ_{fiber}	Dispersão de velocidade estimada no SDSS

d_5	Distância projetada
f_1 e f_2	Distribuições de densidade
ETG	*Early Type Galaxy*
T	Energia Cinética
U	Energia Potêncial
ϵ	Eficiência radiativa
K_T	Espalhamento de Thomson
K_{ff}	Espalhamento de Bremsstrahlung
$K(n)$	Fator de escala
f_{DM}	Fração de matéria escura
f_{DM}^{eff}	Fração efetiva de matéria escura
Ke	Função de Kernel
GW	*Gravitational Waves*
Gyr	Gigayear
GZ2	Galaxy Zoo 2
g	Grama
n	Índice de Sérsic
ΛCDM	*Lambda-Cold Dark Matter*
W_{H_α}	Largura equivalente de H_α
$W_{N_{II}}$	Largura equivalente de N_{II}
L_{Edd}	Luminodidade de Eddington
L_{5100}	Luminosidade no contínuo no referencial de repouso em 5100Å
LTG	Late Type Galaxy
L	Luminoisdade da fonte
m_r	Magnitude aparente na banda 'r'
M_r	Magnitude absoluta na banda 'r'

M_g	Magnitude absoluta na banda 'g'
M_b	Massa bariônica
M_{dyn}	Massa dinâmica
ME	Matéria escura
M	Massa
$M_\odot$	Massa solar
M_*	Massa estelar
M_{tot}	Massa total da galáxia
M_{BH}	Massa do Buraco Negro (*Black hole*)
M_{bojo}	Massa do bojo da galáxia
m_p	Massa do proton
Mpc	Megaparsec
H_l	Matriz de largura de banda
NFW	Navarro, Frenk e White
k	Opacidade
η	Parâmetro
γ_{DM}	Perfil de densidade da matéria escura
γ_*	Perfil de densidade da matéria estelar
γ_T	Perfil de densidade da matéria escura
I(r)	Perfil de luz da galáxia
p	Pressão
$\vec{F}_{rad}$	Pressão de Radiação
PSF	*Point Spread Function*
Φ	Potencial Gravitacional
P_{bulge}	Probabilidade de bojo
P_{disk}	Probabilidade de disco

P_{S0}	Probabilidade de ser lenticular
km	Quilômetro
kpc	Quiloparsec
r_h	Raio característico
r_s	Raio de escala
R_S	Raio de Schwarzchild
R_e	Raio efetivo
r_{fiber}	Raio das fibras do SDSS
B/T	Razão bojo/disco
CNN	Redes Neurais Convolucionais
z	*Redshift*
s	Segundo
SIDM	*Self-interacting Dark Matter*
σ_T	Seção de choque
SDSS	*Sloan Digital Sky Survey*
SLACS	*Sloan Lens ACS Survey*
SF	*Star forming*
AGN S	*Strong Active Galactic Nucleus*
AL2S	*Strong Lens Legacy Survey*
SMBH	*Supermassive Black Hole*
$\dot{\mathrm{M}}$	Taxa de acreção da massa
T	Temperatura
t_{Edd}	Tempo de Eddington
t_{dyn}	Tempo dinâmico
c	Velocidade da Luz
AGN W	*Weak Active Galactic Nucleus*
z_s	*Z-score*

Sumário

Introdução 1

1 GALÁXIAS, BURACOS NEGROS E MATÉRIA ESCURA 5

1.1 Galáxias 5

1.1.1 **Classificação Morfológica** 6

1.1.1.1 **Galáxias *early-type*** 8

1.2 Buracos Negros 11

1.2.1 Da teoria à observação 11

1.2.2 Estrutura dos Buracos Negros 12

1.2.3 **Classificação** 13

1.2.4 **Modelos de Crescimento** 14

1.2.4.1 **Fusão** 15

1.2.4.2 **Acreção** 17

1.3 Matéria Escura 20

1.3.1 Matéria Escura e Buracos Negros 24

2 DADOS E MÉTODOS 27

2.1 Dados 27

2.2 Métodos 28

2.2.1 Massa dinâmica 28

2.2.2 Fração de matéria escura 31

2.2.3 Massa do Buraco Negro 32

2.2.4 Definição de subamostras 35

2.2.4.1 D4000 35

2.2.4.2 Diagrama WHAN 37

2.2.5 Propriedades das galáxias ETG 39

2.2.6 Densidade Local 43

2.3 Ferramentas Estatísticas 45

2.3.1 Testes de comparação de duas amostras 45

3 RESULTADOS 49

3.1 Distribuições da Fração de Matéria Escura Efetiva e a Massa do Buraco Negro nas subamostras definidas por D4000 49

3.2 Relações envolvendo a Fração Efetiva de Matéria Escura 50

3.2.1 Dependência da Fração Efetiva de Matéria Escura com D_{4000} 54

3.2.2 Dependência da Fração Efetiva de Matéria Escura com regiões no diagrama WHAN . . . 59
3.3 Relações envolvendo a Massa do Buraco Negro Central . . . 64
3.3.1 Dependência da Massa do Buraco Negro com D_{4000} . . . 68
3.3.2 Dependência da Massa do Buraco Negro com regiões no Diagrama WHAN 72
3.4 Comparação com a análise dinâmica de NGC 1407 . . . 77
3.5 Fração Efetiva de Matéria Escura e Massa do Buraco Negro considerando D4000 e as regiões no Diagrama WHAN . . . 79
3.6 Discussão . . . 83
3.7 Conclusões . . . 91
3.8 Perspectivas . . . 92

REFERÊNCIAS . . . 93

APÊNDICES 111

APÊNDICE A – . . . 113
A.1 Relações de escala . . . 113
A.2 O Parâmetro T-Type . . . 114
A.3 Índice D4000 . . . 115
A.4 Diagrama WHAN . . . 116
A.5 Teste KDE . . . 118

Introdução

Entender a distribuição e a composição da matéria nas diversas estruturas observadas no Universo é um tema central da Astrofísica Extragaláctica. A massa, que é uma propriedade intrínseca da matéria, constitui um parâmetro físico fundamental nos estudos de formação e evolução dessas estruturas. As galáxias, em particular, são consideradas as unidades estruturais básicas do Universo, e sua distribuição de massas em todas as escalas permite uma comparação das funções de massa previstas para a matéria bariônica e não-bariônica no Universo, contribuindo para a concepção, análise e restrição de modelos de formação de estruturas em diferentes cenários cosmológicos (READ; TRENTHAM, 2005; LUCIA et al., 2006; PILLEPICH et al., 2018).

As galáxias geralmente são dominadas por bárions nas partes internas e por matéria escura nas periferias, e sua composição é uma combinação de gás, poeira, estrelas, matéria escura e buracos negros (COURTEAU et al., 2014). Suas massas são fortemente relacionadas à cor, taxa de formação estelar e estrutura interna (BALDRY et al., 2004; PENG et al., 2010), podendo também depender da densidade local, implicando numa relação entre a distribuição de massa e o ambiente e, consequentemente, a todos os processos físicos externos que podem influenciar a sua evolução (TASCA et al., 2009; CUCCIATI et al., 2010). Um exemplo desta relação é o fenômeno de segregação de massa, isto é, a tendência de que as galáxias mais massivas se encontrem em maior quantidade nas regiões centrais de aglomerados de galáxias (KIM et al., 2020).

A presença dos buracos negros nesta lista de componentes é algo relativamente novo, visto que apenas observações e estudos recentes revelaram a existência desses objetos nos centros da maioria das galáxias. A massa do buraco negro correlaciona-se com a luminosidade, massa estelar e dispersão de velocidades estelar de sua galáxia hospedeira (RICHSTONE et al., 1998; DRESSLER, 1989; FERRARESE; MERRITT, 2000; KORMENDY; HO, 2013). A existência destas correlações (também chamadas de relações de escala) indica uma possível conexão entre a formação dos buracos negros e a evolução das galáxias (RICHSTONE et al., 1998; DING et al., 2020).

Apesar de extensivos estudos e conhecimento adquirido a respeito da correlação entre as diversas propriedades das galáxias e seus buracos negros centrais, assim como da formação das galaxias no interior de halos de matéria escura, a conexão entre o buraco negro central e a matéria escura tem sido menos explorada e compreendida. Segundo Volonteri, Natarajan e Gültekin (2011) existe uma relação necessária entre a massa dos buracos negros centrais e as propriedades do halo escuro das galáxias hospedeiras, no contexto da formação hierárquica de estruturas na cosmologia ΛCDM, uma vez que neste

cenário, tanto estruturas bariônicas como buracos negros formam-se e evoluem em halos de matéria escura fria (SPRINGEL et al., 2005; LUCIA et al., 2006).

Contudo, diferentemente dos bárions, a acreção da matéria escura em buracos negros não produz radiação eletromagnética e, portanto, não contribui para a luminosidade do objeto, embora alguns fótons energéticos possam ser produzidos, seja por aniquilação ou decaimento, dependendo da natureza da matéria escura (BARTLETT et al., 2022). Além disso, as partículas de matéria escura constituem um fluido acolisional e, consequentemente, o processo de acreção deve ser menos eficiente do que o esperado para um fluido dissipativo. Mesmo assim, existem cenários em que a matéria escura pode contribuir significativamente para a acreção total de massa sobre o buraco negro (BALBERG; SHAPIRO, 2002; MACMILLAN; HENRIKSEN, 2002; PEIRANI; PACHECO, 2008).

Um ponto a ser melhor compreendido é de que maneira a distribuição e a própria constituição da matéria escura de uma galáxia afetam o crescimento e a coevolução do seu buraco negro supermassivo central. É importante notar que nos modelos hierárquicos de formação de estruturas, a matéria se organiza em halos gravitacionalmente ligados, que são formados através de fusões de halos menores e por acréscimo de massa ao longo de uma estrutura filamentar que se estende em grandes escalas (VOGELSBERGER et al., 2020). Nesse cenário, as galáxias se formam dentro de halos de matéria escura através do resfriamento e colapso de bárions em seus centros. Simulações hidrodinâmicas de gás quente em halos indicam que à medida que esse processo ocorre, a física bariônica afeta a forma do perfil de densidade da matéria escura. À medida que os bárions esfriam e caem em direção ao centro, eles começam a dominar a massa no interior do halo. A matéria escura é afetada pela mudança no potencial gravitacional e é também atraída para o centro, acentuando o perfil central de sua distribuição (BOSE et al., 2019).

A resposta da matéria escura ao resfriamento dos bárions é tratada como uma contração adiabática, através do modelo introduzido e testado numericamente por Blumenthal et al. (1986). O efeito desta contração e da distribuição de matéria escura é relevante para estudar o *feedback* entre a formação estelar e os centros dos halos de matéria escura (GNEDIN; ZHAO, 2002).

Nesta perspectiva, o presente estudo busca investigar a relação entre a fração de matéria escura (f_{DM}) e as propriedades observadas de galáxias *early-type* (ETG), que são objetos vermelhos e pobres em gás, predominantemente elípticos e lenticulares, assim como com o ambiente onde elas se encontram, e se possuem núcleos ativos, com o objetivo de entender a relação entre os bárions e a matéria escura destas galáxias, em particular a história de coevolução destes objetos com seus buracos negros centrais (*black hole* - BH) e com a matéria escura (*dark matter* - DM). Para isto, serão utilizadas relações de escalas das ETGs observadas em baixos *redshifts*.

No próximo capítulo, será apresentada uma revisão bibliografica abrangendo con-

ceitos e definições relevantes para o desenvolvimento deste trabalho.

1 Galáxias, Buracos Negros e Matéria Escura

Neste Capítulo, serão introduzidos e revisados alguns conceitos que são de fundamental importância para o desenvolvimento deste trabalho. Será feita uma breve revisão sobre galáxias, dando ênfase às ETGs (*early-type galaxies*), em seguida, uma descrição geral de buracos negros, com ênfase em buracos negros supermassivos e seus modos de crescimento, e por fim, uma revisão sobre o conceito de matéria escura, explorando possíveis conexões entre esta componente, os bárions e os buracos negros centrais das galáxias.

1.1 Galáxias

A palavra galáxia, de acordo com o Dicionário Merriam-Webster (2024), vem originalmente do grego *galaxias kyklos*, que significa "círculo leitoso", e foi possivelmente utilizada pela primeira vez pelo escritor inglês Geoffrey Chaucer, no poema *The House of Fame*, escrito em algum momento antes de 1385. Fisicamente, as galáxias são sistemas complexos ligados pela gravidade, servindo de evidência da expansão cósmica e da formação e distribuição de estruturas no universo (ZAFARRIS, 2020). A formação das primeiras galáxias marca uma importante transição na evolução da estrutura do Universo, sobretudo no que se refere ao gás.

Inicialmente, o gás – na sua maioria, hidrogênio – recombinou-se em $z \approx 1100$ (aproximadamente 400.000 anos após o Big Bang). Isto ocorreu devido ao resfriamento do universo causado pela expansão. Com o resfriamento, a taxa de combinação de um elétron com um próton para formar o átomo neutro de hidrogênio tornou-se mais alta do que a taxa de ionização do hidrogênio. Após a recombinação, neste meio neutro, os fótons que se propagavam no Universo eram apenas aqueles da radiação cósmica de fundo (KOLB; TURNER, 1990).

Após o surgimento das primeiras estrelas, a síntese nuclear nos interiores estelares produziu grande quantidade de fótons ionizantes (radiação UV e raios-X). O universo neutro paulatinamente voltou a ser um plasma. No cenário cosmológico padrão este fenômeno ocorreu entre 150 milhões e um bilhão de anos após o Big Bang, ou, em desvios para o vermelho, na faixa de $z = 6$ até $z = 20$, aproximadamente (LOEB; PEEBLES, 2003), um período conhecido como a "Era da Reionização"(ZAROUBI, 2012).

Contudo, o entendimento de como as componentes materiais interagiam nessa época do Universo não são conhecidos em detalhes. Observações recentes de galáxias em altos redshifts, feitas com o telescópio espacial James Webb, podem ajudar nesta tarefa

(KASHINO et al., 2023). Entretanto, a relação entre bárions, matéria escura e buracos negros evoluiu no tempo, chegando ao Universo Local, onde pode-se estudar e relacionar processos em galáxias em baixos *redshifts* com suas progenitoras no Universo distante.

Segundo o atual paradigma, as galáxias são compostas por matéria escura, cuja presença é muito maior do que a visível, contribuindo com mais de 85% da matéria total, e matéria ordinária ou matéria bariônica, que é composta majoritariamente por hidrogênio e hélio, sendo representada na forma de estrelas, gás, poeira e planetas. Além da presença de um buraco negro em seu centro (BROMM; YOSHIDA, 2011).

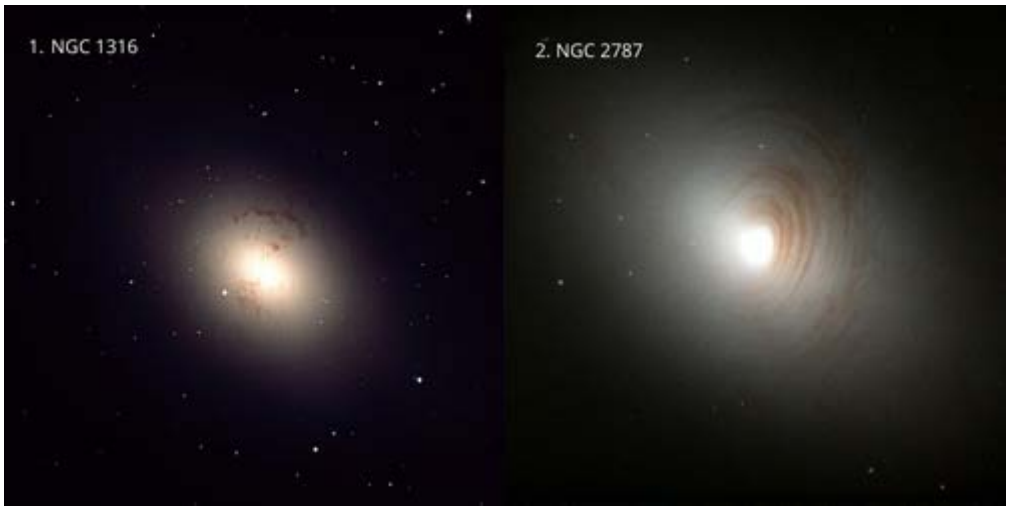
1.1.1 Classificação Morfológica

As galáxias podem ser classificadas de acordo com certas propriedades, tais como morfologia (Hubble, 1936), características espectrais (MORGAN; MAYALL, 1957) cores (VAUCOULEURS, 1974), grau de rotação (CAPPELLARI et al., 2007), etc. Mas, de modo geral, elas podem ser divididas em dois grandes grupos.

Galáxias *early-type*

As galáxias *early-type* (ETG) são geralmente descritas como vermelhas, passivas e/ou *retired*, quase sem gás e poeira e com pouca formação estelar, estando subdivididas em elípticas e lenticulares. Existem evidências de que uma fração significativa das ETGs pode experimentar um nível mais alto de formação estelar do que o esperado, possivelmente causada pela acreção de gás introduzido em fusões menores. Exemplos de galáxias *early type* podem ser vistas na Figura 1.

Figura 1 – Galáxias *Early Type*



Legenda: 1. Galáxia Elíptica NGC 1316; 2. Galáxia Lenticular NGC 2787; Fonte: 1.ESO (2000); 2. NASA/ESA e Team (2002).

Galáxias *late-type*

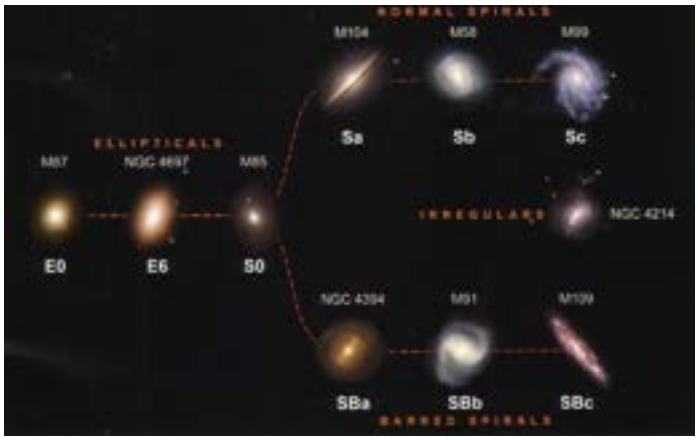
As galáxias *late-type* (LTG) são geralmente descritas como azuis, jovens, com quantidade significativa de gás e poeira, com intensa formação estelar, sendo subdivididas em irregulares, que não possuem forma definida, e espirais que possuem disco e estrutura de braços espiralados, com diferentes tamanhos de bojo, podendo ser normais ou barradas. Exemplos de galáxias *late type* podem ser vistas na Figura 2.

Figura 2 – Galáxias *Late type*

Legenda: 1. Galáxia Irregular NGC 4214; 2. Galáxia Espiral NGC 1398. Fonte: 1. NASA e Collaboration (2011); 2. Hanson (2023).

É importante salientar que não são apenas as propriedades citadas anteriormente que são levadas em consideração para categorizar e catalogar galáxias, existindo diversos procedimentos de classificação desses objetos (SANDAGE, 2005; BUTA, 2013; SHARMA; BARAL, 2018). O sistema de classificação mais conhecido é justamente aquele proposto por Hubble (1934), baseado na morfologia das galáxias, e representado na Figura 3.

Figura 3 – Diagrama de Hubble



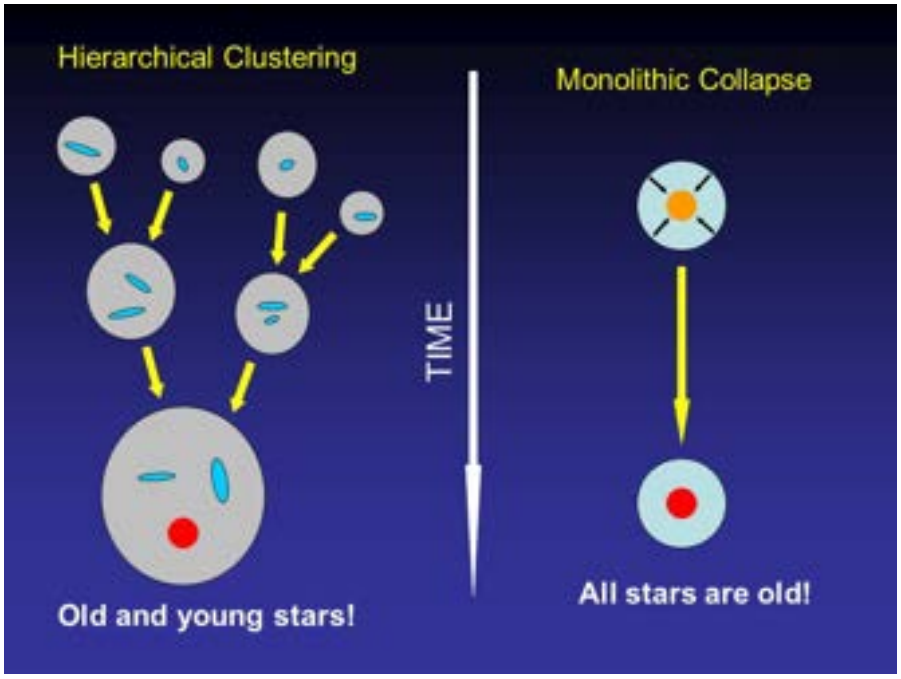
Fonte: SpaceToday (2010).

O famoso diagrama da forquilha conta com um eixo para as galáxias elípticas, com diferentes elipticidades, as lenticulares no centro, e então dois ramos para as espirais, conforme sejam barradas ou não. As irregulares usualmente são introduzidas à direita das galáxias espirais. No presente trabalho, serão estudadas galáxias *early-type* e, portanto, será apresentado a seguir uma breve descrição do processo de formação e evolução desses objetos.

1.1.1.1 Galáxias *early-type*

Um tema muito estudado em Astrofísica Extragaláctica é o problema da formação e evolução de ETGs. Inicialmente, acreditava-se que tais objetos correspondiam a sistemas estelares em equilíbrio virial que se formaram a partir de um colapso "monolítico", que propõe que as galáxias se formaram e evoluíram isoladamente pelo colapso de grandes nuvens de gás (LARSON, 1974). Contudo, este cenário foi gradativamente desafiado e substituido pelo paradigma CDM (e depois ΛCDM) para formação das estruturas, no qual as galáxias crescem hierarquicamente por meio de uma sequência de fusões e eventos de acreção (WHITE; REES, 1978; PADMANABHAN, 1993), como pode ser visto na Figura 4.

Figura 4 – Formação de galáxias: Cenários hierárquico e monolítico.

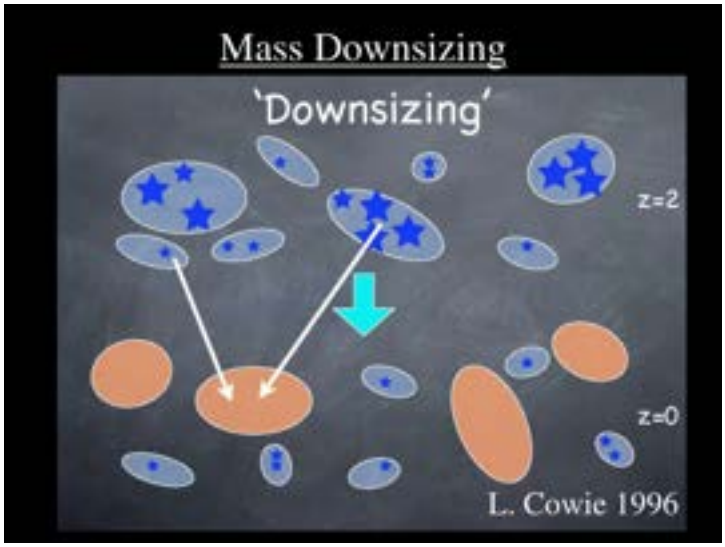


Fonte: Ricardo (2006).

Compreender como as galáxias se formaram e acumularam suas massas ao longo do tempo cósmico é uma questão importante e não completamente resolvida. Muitos estudos concentram a atenção justamente na sua população, uma vez que essas galáxias contêm a maior parte da massa estelar e são as galáxias mais massivas no Universo Local (BALDRY

et al., 2004; FUKUGITA; HOGAN; PEEBLES, 1998). Por estas razão, considera-se que estas galáxias são de fundamental importância para traçar a história da formação de massa estelar e para explicar os processos físicos que promovem a evolução das galáxias. Uma questão chave no estudo da formação de galáxias é o "downsizing", exposto na Figura 5, que em termos gerais diz respeito à anticorrelação entre a massa estelar de uma galáxia e a época de formação das estrelas nela contida (COWIE et al., 1996; NEISTEIN; BOSCH; DEKEL, 2006). Ou seja, neste cenário, quanto mais massiva é uma galáxia, mais precoce foi o auge de sua taxa de formação estelar.

Figura 5 – *Downsizing* em formação de galáxias.



Fonte:Patrick (2006).

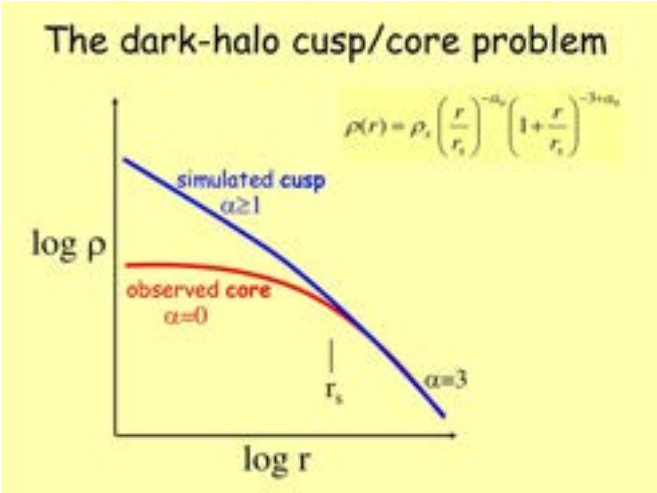
No cenário cosmológico padrão (ΛCDM), os halos de matéria escura são construídos hierarquicamente de baixo para cima (*bottom-up*), com estruturas maiores se formando a partir da fusão das menores. Isto é um desenvolvimento natural para a evolução de halos individuais, uma vez que são construídos pela atração gravitacional gradual de halos progenitores menores que colapsaram e virializaram anteriormente. O agrupamento ascendente também pode ser inferido estatisticamente a partir do espectro de potência das flutuações de densidade iniciais, o que indica que a distribuição de massa dos sistemas em colapso muda com o tempo, de pequenas para grandes massas (PEEBLES, 1993).

Estes aspectos hierárquicos do processo de agrupamento levaram à noção enganosa de que se espera que grandes halos se formem necessariamente mais tarde do que pequenos halos, sem distinção entre o colapso dinâmico destes halos e a época de formação das estrelas dentro deles. O *downsizing* observado é, portanto, frequentemente referido na literatura como "anti-hierárquico", sendo um grande desafio para o modelo padrão da formação de estruturas (COWIE et al., 1996; FONTANOT et al., 2009).

Outro aspecto importante do modelo hierárquico é a forma com que o halo escuro responde à condensação de bárions em estrelas. Se a galáxia é formada por uma série de

fusões, espera-se que a matéria bariônica e escura se combinem tal que a massa gravitante total siga aproximadamente o perfil NFW (NAVARRO; FRENK; WHITE, 1997; LOEB; PEEBLES, 2003). Contudo, várias questões relacionadas com a estrutura da matéria escura ainda estão em debate. Por exemplo, se os halos de matéria escura são cúspides ou com núcleo (*core*), veja a Figura 6.

Figura 6 – Problema cúspide versus core.



Fonte: Bryant (2005).

Simulações de N-corpos mostram que o modelo ΛCDM prevê que halos de matéria escura tenham, nas partes internas, perfis de densidade íngremes chamados cúspides, que são curvas bem descritas pelo perfil NFW. Este perfil tem sido associado também ao gás frio em discos que perdem seu momento angular durante um processo de fusão (BARNES; HERNQUIST, 1991) e se estabelece no centro do objeto remanescente, esferoidal, onde desencadeia surtos de formação estelar, aumentando assim o perfil de luz em seu centro (HOPKINS et al., 2008).

Por outro lado, as ETGs com *core*, são provavelmente o produto de um evento de fusão não-dissipativo entre duas galáxias que hospedam buracos negros supermassivos (*Supermassive Black Holes* - SMBH) em seus centros (MILOSAVLJEVIĆ; MERRITT, 2001; KHOCHFAR; BURKERT, 2005; HOPKINS et al., 2009). Observações de galáxias anãs esferoidais também exibem perfis contendo núcleos rasos que podem indicar partículas quentes de matéria escura ou matéria escura auto-interagente (*Self-interacting dark matter* - SIDM) (MOORE et al., 1999; BATTAGLIA et al., 2008; WALKER; PENARRUBIA, 2011). Esta questão permanece indeterminada e requer estudos adicionais (ZHU et al., 2016).

A relevância deste problema é importante no contexto do presente trabalho, que envolve estimativas da fração central de matéria escuras em galáxias ETG. Um ponto adicional, e também importante para esta questão *core*/cúspide é a presença de buracos

negros centrais nas galáxias.

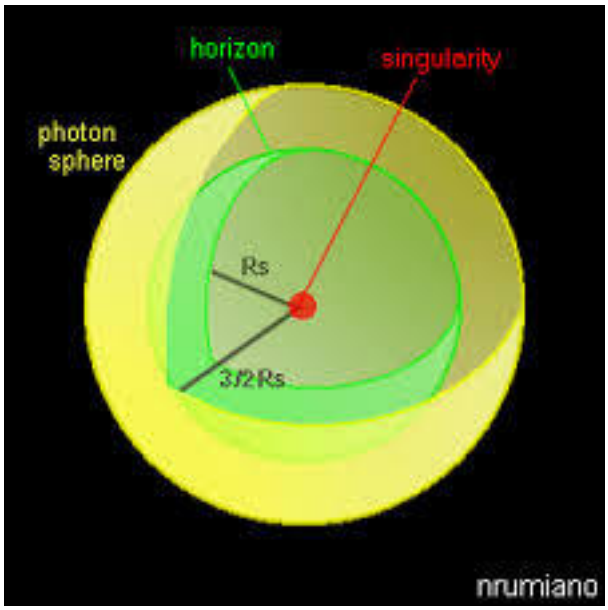
1.2 Buracos Negros

Associados às galáxias, e localizados em seus centros, estão os buracos negros. Especulações sobre a existência de objetos como os buracos negros datam do final do século XVIII. O filósofo naturalista, clérigo e geólogo inglês John Michell em 1783 e o matemático, astrônomo e físico francês Pierre-Simon Laplace em 1796 teorizaram sobre objetos extremamente compactos, cujas velocidades de escape em sua superfície poderiam exceder a velocidade da luz (MEZCUA, 2021).

1.2.1 Da teoria à observação

A ideia concreta de um objeto como o buraco negro só foi realmente proposta em 1916 por Karl Schwarzchild, como uma maneira de resolver as equações de Einstein no contexto da então recente teoria da relatividade geral de Albert Einstein (EINSTEIN et al., 1916; SCHWARZSCHILD, 1916). A solução encontrada por Schwarzchild descreve um campo gravitacional fora de uma massa esférica sem carga elétrica e sem rotação, como pode ser visto de maneira simplificada na Figura 7.

Figura 7 – Composição do Buraco Negro de Schwarzchild



Fonte: Bergmann (2009).

Outras duas soluções importantes foram encontradas posteriormente, uma delas por Roy Kerr em 1963, na qual o buraco negro tem movimento angular e a outra por Ezra Newman, em 1965, onde o buraco negro tem rotação, mas também está eletricamente carregado (KERR, 1963; NEWMAN et al., 1965).

No entanto, a expressão *Buraco Negro* só foi utilizada pela primeira vez em 1967 pelo físico teórico John A. Wheeler. Antes disso, os físicos que estudavam esses objetos, considerados bizarros na época, os chamavam de "estrelas congeladas". É importante salientar que apesar de ter desempenhado um papel histórico na relatividade geral, através da solução de Schwarzschild, mais de 50-60 anos se passaram até que os buracos negros fossem aceitos como algo que não fosse apenas uma curiosidade matemática (TYSON; GOLDSMITH, 2015).

A primeira evidência observacional de um buraco negro só veio entre os anos de 1964 e 1971, a partir de um sistema binário chamado Cygnus X-1. Ele produz alguns dos raios-X mais brilhantes do Universo e se tornou a primeira fonte aceita oficialmente como um sério candidato a buraco negro (MURDIN; WEBSTER, 1971). Mais tarde, investigações de Stephen Hawking, Roger Penrose e Hermann Bondi (HAWKING; PENROSE, 1970) levaram ao desenvolvimento teórico que permitiu décadas depois a detecção de ondas gravitacionais pela equipe do *Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory* (LIGO) Abbott et al. (2016)) – e a produção da primeira imagem do objeto M87*, um buraco negro supermassivo situado na região central da galáxia Messier 87 (AKIYAMA et al., 2019).

1.2.2 Estrutura dos Buracos Negros

Quanto à sua estrutura, buracos negros são compostos pelo horizonte de eventos, que é a superfície ou fronteira teórica ao redor do buraco negro a partir da qual a gravidade é tão forte que nada pode escapar, a singularidade, que é o ponto em seu centro onde toda a matéria foi esmagada num espaço infinitamente pequeno e denso, e o raio de Schwarzschild (R_S), raio que delimita o horizonte de eventos (BAILYN, 2014):

$$R_S = \frac{2GM}{c^2}. \tag{1.1}$$

onde G é a constante gravitacional, M é a massa do buraco negro e c é a velocidade da luz. Pode-se ainda determinar o raio de Roche (R_R) de um buraco negro de massa M e densidade ρ_M, com o volume sendo o de uma esfera de raio R_S (BERGMANN, 2009):

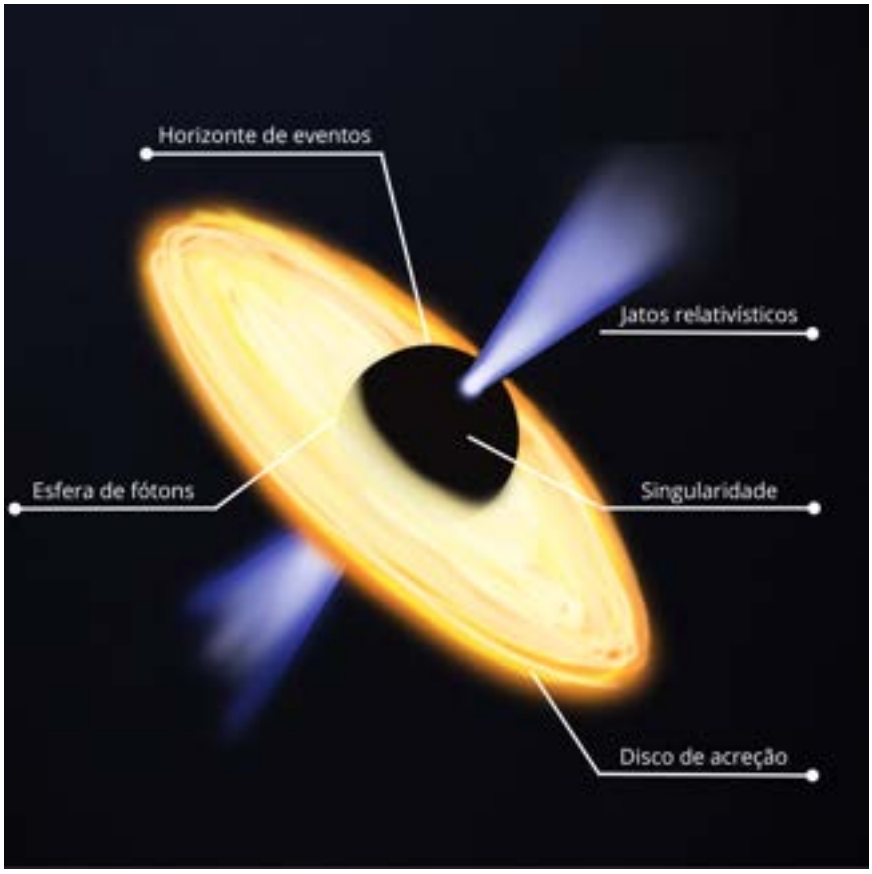
$$R_R = 2.45 R_S \left(\frac{\rho_M}{\rho_m}\right)^{1/3}, \tag{1.2}$$

Este raio diz respeito à distância limite para um corpo de densidade ρ_m se aproximar do buraco negro sem ser destruído pelas forças de maré. Existe ainda a ergosfera, região do espaço-tempo imediatamente externa ao horizonte de eventos dos buracos negros em rotação; ela apresenta um formato achatado que coincide com o horizonte de eventos nas regiões polares.

Por fim, há, em torno do buraco negro um disco chamado de disco de acreção, composto por matéria, isto é, poeira e gás ionizado ou plasma, formado majoritariamente

por núcleos de hidrogênio e elétrons. A viscosidade deste gás permite que o momento angular seja transferido para fora e que a matéria no disco vá aos poucos se movendo em direção ao centro (MEZCUA, 2021; ARGÜELLES et al., 2023) - vide Seção 1.2.4. Jatos relativísticos são produzidos, correspondendo a feixes de energia extraídos de campos magnéticos ao redor do disco de acreção. Além disso, esses discos são muito compactos, tendo dimensões que variam de alguns milisegundos-luz a dias-luz, o que impossibilita a sua observação direta (BERGMANN FAUSTO K. B. BARBOSA; ALVES, 2017). Algumas destas componentes podem ser vistas na Figura 8.

Figura 8 – Estrutura do Buraco Negro



Fonte: Autoria própria, 2024.

1.2.3 Classificação

Os buracos negros podem ser classificados através de suas massas, visto que elas são uma das características mais importantes para o seu estudo. Eles podem ser estelares, supermassivos e intermediários. Os buracos negros estelares podem ter a massa variando entre $3M_\odot$ e $100M_\odot$. Estes objetos são formados depois que a pressão de uma estrela massiva ($> 15M_\odot$) não consegue mais suportar o colapso gravitacional, após ter queimado todo o seu combustível (MEZCUA, 2021).

Pode-se citar ainda os buracos negros primordiais, que se formaram nos momentos iniciais do próprio Universo, existindo a possibilidade de que tenham massas bastante variáveis, o que segundo alguns autores colocam-nos como candidatos à matéria escura (CARR; HAWKING, 1974; GARCÍA-BELLIDO, 2020). Finalmente, podem ainda exsitir miniburacos negros, hipotéticos, cujo limite inferior seria a massa de Planck, ou seja, cerca de 2×10^{-8} kg e nos quais os efeitos da mecânica quântica seriam essenciais para a sua descrição (CARR; GIDDINGS, 2005).

Os buracos negros intermediários possuem massa aproximadamente entre $10^2 M_\odot$ e $10^6 M_\odot$. Acredita-se que eles se formem precocemente, como "sementes", e que cresceram e se tornaram os buracos negros supermassivos que habitam a maioria das galáxias. Tais sementes teriam se formado em $z > 10$ a partir da morte de estrelas de População III, objetos com massa de $\sim 60 M_\odot$ (GREENE; STRADER; HO, 2020). Finalmente, os buracos negros supermassivos, podem ter massas iguais ou maiores que $10^6 M_\odot$. Acredita-se que tais objetos existam devido ao crescimento dos buracos negros estelares e intermediários, ou por conta de fusões com outros buracos negros (LATIF; FERRARA, 2016).

Neste trabalho, o foco são os buracos negros supermassivos (SMBH) que, mesmo antes de serem detectados gravitacionalmente, tiveram sua presença inferida pelas enormes quantidades de energia que emanam dos núcleos de galáxias ativas (*Active Galactic Nucleus* - AGN). Nesses objetos, a potência luminosa excede a potência combinada de todas as estrelas da galáxia, o que indica a presença de uma fonte de energia não estelar. Ocorre que os buracos negros são uma eficiente “máquina” de converter energia, explicando as AGNs, através da transformação da energia potencial gravitacional da matéria que cai dentro dele, em luminosidade e energia cinética de jatos e ventos produzidos num disco de acreção (BERGMANN, 2009; BERGMANN, 2023).

Além disso, existe um grande número de relações de escala que mostram que as massas dos buracos negros, assim como a fração de matéria escura, estão relacionadas a algumas características da galáxia hospedeira, tais como luminosidade, massa estelar ou dinâmica, raio efetivo, razão bojo-disco, índice de Sérsic, energia cinética ou dispersão de velocidades (FEOLI, 2014), as quais serão de extrema importancia neste trabalho. Mais detalhes sobre algumas destas relações podem ser vistos no Apêndice A.1.

1.2.4 Modelos de Crescimento

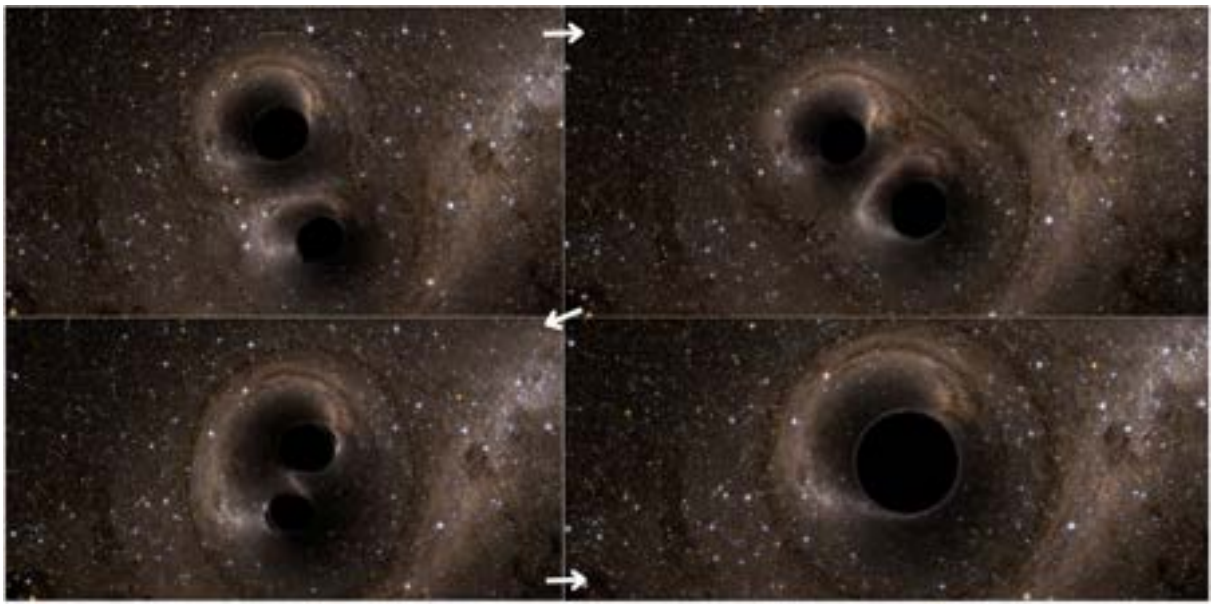
Um outro fator importante para o estudo dos buracos negros é o seu crescimento. O entendimento atual é que os buracos negros devem crescer através de processos de fusão e/ou acreção, descritos brevemente a seguir.

1.2.4.1 Fusão

Diversos estudos indicam que as fusões entre galáxias estão entre as grandes responsáveis pela evolução desses objetos e por muitos efeitos secundários sobre suas propriedades. Isto é, elas estão entre os principais impulsionadores da transformação de galáxias de disco em elípticas massivas, desencadeiam surtos de formação estelar, alteram a distribuição e a cinemática das estrelas, e ainda contribuem para o crescimento de buracos negros supermassivos em centros galácticos, além de serem responsáveis por 10% do crescimento estelar cósmico (MARTIN et al., 2018).

Após a fusão de duas galáxias, seus buracos negros massivos centrais são arrastados em direção ao centro da galáxia remanescente sob a ação da fricção dinâmica causada por estrelas de fundo e gás, formando um sistema binário de buracos negros (trata-se de um sistema gravitacional vinculado em uma escala típica de um parsec). A evolução destes sistemas binários, depende da razão de massa entre os componentes do sistema assim como do tipo da galáxia hospedeira (SHANKAR, 2009). A Figura 9 mostra uma simulação da fusão de dois buracos negros [1].

Figura 9 – Simulação da fusão de dois buracos negros.



Fonte: SXSLensing (2016).

[1] Simulação Mostra Como Seria A Fusão De Buracos Negros Supermassivos - Space Today TV <https://www.youtube.com/watch?v=1eXsYl07roc)>

Segundo Romano (2023), as fusões maiores (razão de massa 3:1) podem ter início no final da Época de Reionização, sugerindo uma presença significativa de galáxias interagentes em tempos precoces. Isto está em acordo com o trabalho de Kaviraj et al. (2009), que mostra que as cores ópticas da população *early-type* são predominantemente vermelhas, o que indica que grande parte do volume de massa estelar nestes sistemas se deu em altos *redshifts* e que pelo menos 30% das *early-type* mostram sinais ambíguos de taxa de formação estelar, com apenas 1-3% da fração da massa estelar se formando no último bilhão de anos, via fusões pequenas, com razão de massas de 1:4 e 1:6 (PEARSON et al., 2019; HUŠKO; LACEY; BAUGH, 2022).

Ademais, a correlação entre a massa do buraco negro (M_{BH}) e a massa do bojo (M_B) também pode ser fruto de fusões de galáxias, isto é, simulações mostram que estas fusões são eficientes na criação de bojos (CROTON, 2006). Todavia, existem também indícios de uma ampla correlação através da população geral de galáxias, não limitadas àquelas com bojos. Ou seja, há uma relação entre a M_{BH} e a massa estelar total (M_*) ou a massa do halo da galáxia hospedeira. Consequentemente, a correlação com a M_B provavelmente é apenas um subconjunto da tendência geral, uma vez que galáxias *early-type* são dominadas por bojo, e consequentemente sua massa total é basicamente a massa do bojo (STORCHI-BERGMANN; SCHNORR-MÜLLER, 2019).

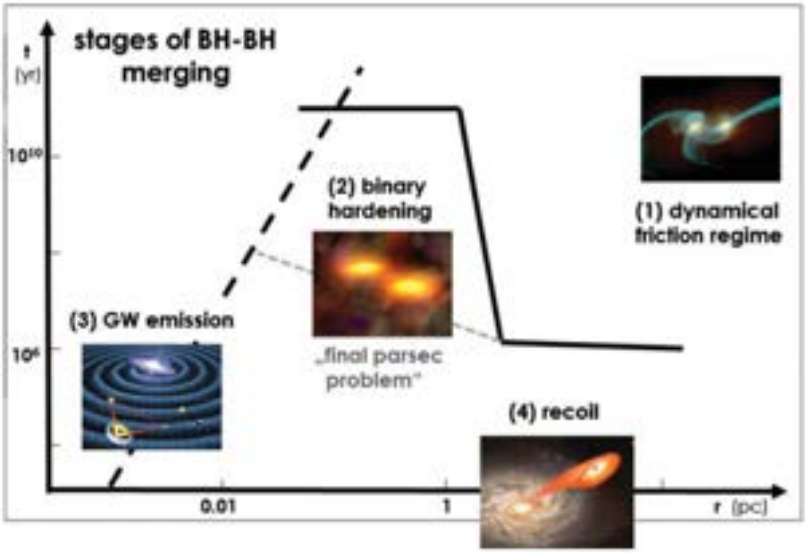
Contudo, tal relação é difícil de explicar apenas com fusões maiores, uma vez que a maior parte do material contido nos discos galácticos provavelmente foi formada através de processos seculares ou, no caso do bojo, a partir de outros processos como instabilidades do disco. Estudos recentes mostram que fusões menores podem aumentar a formação estelar e as taxas de acreção nuclear e, assim, produzir crescimento dos buracos negros, deixando o disco intacto (MARTIN et al., 2018).

A partir de simulações hidrodinâmicas, Martin et al. (2018) observaram ainda que 65% do crescimento de buracos negros em galáxias massivas atuais aconteceram via processos seculares, e que os outros 35% são atribuídos a fusões (maiores e menores). Isto é, a maioria das galáxias sem bojo, com buracos negros normais, não aparentam ter sofrido fusões maiores desde $z = 1$. Apenas 35% da massa dos BHs em galáxias mais massivas que $10^{9.5} M_\odot$ no universo atual se devem a fusões, 22% se devem a fusões maiores e 13% se devem a fusões menores.

Independente dos muitos detalhes envolvidos na fusão de galáxias contendo buracos negros, simulações numéricas permitem descrever o processo de fusão em alguns estágios simples, como pode ser visto na Figura 10.

Mais detalhadameiinte, (1) são os estágios iniciais da fusão de galáxias, controlados pela fricção dinâmica; (2) ao se aproximarem, na ordem de parsecs, os dois SMBHs formam um par vinculado. A redução adicional de sua órbita então depende da eficiência das interações com gases e estrelas no transporte de energia e momento angular; (3) na

Figura 10 – Estágios da fusão de buracos negros.



Fonte: Komossa, Baker e Liu (2015).

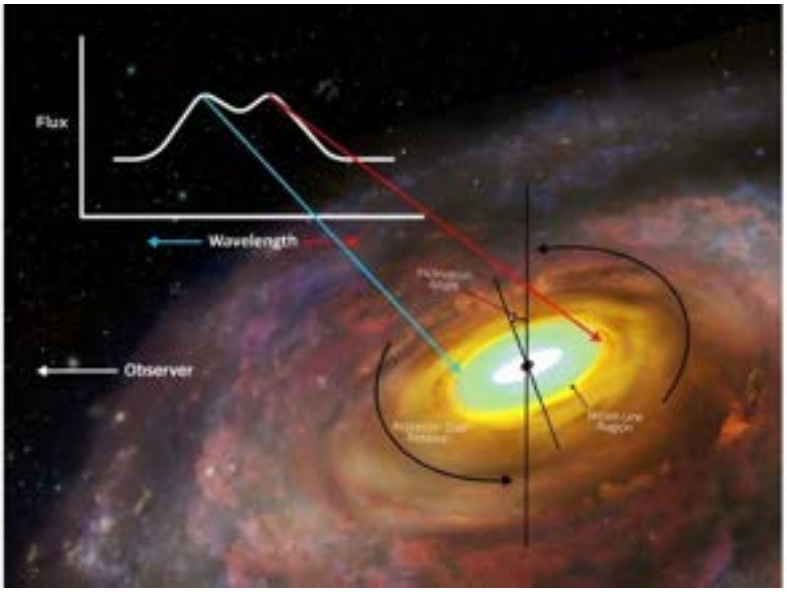
aproximação bem abaixo de um parsec, a emissão de ondas gravitacionais torna-se eficiente, levando a mais retração e à coalescência final; (4) dependendo da configuração orbital, incluindo massas e spins do par, após a coalescência o SMBH único recém-formado pode então recuar com uma velocidade alta (∼5.000 km/s), sendo possivelmente ejetado do sistema no caso de galáxias anãs (KOMOSSA; BAKER; LIU, 2015).

1.2.4.2 Acreção

Em torno dos buracos negros formam-se discos de acreção (vide Figura 8), compostos por gás e poeira, que alimentam o buraco negro e emitem grandes quantidades de energia ao longo de todo o espectro eletromagnético – desde raios-γ e raios-X de altas energias, passando pela luz visível, até chegar ao infravermelho e ondas de rádio. Esses discos são inicialmente autogravitantes e, conforme o buraco negro central cresce, ele domina a dinâmica das regiões internas enquanto as partes externas ainda são dominadas pelo próprio disco.

Esses discos de acreção não podem ser observados diretamente (através de imagens), devido às suas distâncias extremas e tamanhos relativamente pequenos. Por conta disso, os astrônomos usam os espectros de luz emitidos de dentro do disco para caracterizar seu tamanho e comportamento. Apenas recentemente foi possível caracterizar precisamente seu tamanho através da observação de duas linhas de emissão no infravermelho próximo na galáxias III Zw 02, situada em z = 0.089 (SANTOS et al., 2023), como visto na Figura 11.

Figura 11 – Concepção artística do disco de acreção em torno da galáxia III Zw 002.



Fonte: NOIRLab/NSF/AURA/P.Marenfeld (2023).

Como explicado no inicio da seção, um disco de acreção se forma quando o material orbitando o campo gravitacional do buraco negro perde energia e momento angular à medida que espirala lentamente para o centro. Essa perda de energia e momento angular se dá através da colisão de nuvens de gás e poeira sendo atraídas para o buraco negro. A acreção de partículas acolisionais também ocorre mas em geral é menos importante e a descrição geral do mecanismo de acreção é baseada no gás que é atraído para o BH. Para acreção de gás há uma luminosidade máxima à qual o ambiente de um buraco negro de massa M_{BH} pode irradiar e ainda acumular gás, chamada "limite de Eddington"ou luminosidade L_{Edd}. Este limite é obtido definindo-se a pressão de radiação (para fora) igual à força gravitacional (para dentro). Se o potencial gravitacional é Φ, a pressão é p e a densidade ρ, tem-se

$$\nabla\Phi = -\frac{\nabla p}{\rho} = \frac{\kappa}{c}\vec{F}_{rad} \tag{1.3}$$

onde na última igualdade se assume que a pressão é dominada pela pressão de radiação ($\vec{F}_{rad}$) e κ é a opacidade. Existem duas principais fontes de opacidade para as densidades e temperaturas típicas do disco: espalhamento Thomson de elétrons (κ_T) e *bremsstrahlung* (κ_{ff}), tal que $\kappa = \kappa_T + \kappa_{ff}$ com

$$\kappa_T = \frac{\sigma_T}{m_p} = 0.4 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1} \tag{1.4}$$

$$\kappa_{ff} \approx 8 \times 10^{22} \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1} \left(\frac{\rho}{\text{g cm}^{-3}}\right) \left(\frac{T}{K}\right)^{-7/2} \tag{1.5}$$

onde σ_T é a seção de choque do espalhamento Thomson e m_p é a massa do próton. A luminosidade da fonte delimitada por uma superfície S é dada por

$$L = \int_S \vec{F}_{rad} \cdot d\vec{S} = \frac{c}{\kappa} \int_S \nabla\Phi \cdot d\vec{S}. \tag{1.6}$$

Usando o teorema de Gauss e a equação de Poisson $\nabla^2\Phi = 4\pi G\rho$, tem-se

$$L_{Edd} = \frac{c}{\kappa} \int_V \nabla^2\Phi \; dV = \frac{4\pi Gc}{\kappa} \int_V \rho \; dV = \frac{4\pi GMc}{\kappa} \tag{1.7}$$

e finalmente

$$L_{Edd} = 1.3 \times 10^{44} \left(\frac{M_{BH}}{10^6 \; M_\odot} \right) \text{ erg s}^{-1}. \tag{1.8}$$

Isto define a luminosidade máxima de uma fonte em equilíbrio hidrostático. Já a luminosidade total do gás sendo acretado pode ser escrita em termos da eficiência radiativa ϵ vezes a taxa de acreção de massa, $\dot{M}$, ou seja,

$$L = \epsilon \dot{M} c^2, \tag{1.9}$$

sendo ao mesmo tempo a variação da massa do buraco negro é dada por

$$\dot{M}_{BH} = (1 - \epsilon)\dot{M} \tag{1.10}$$

e portanto, a equação que governa o crescimento do BH via acreção dada por

$$\dot{M}_{BH} = \frac{M_{BH}}{t_{Edd}} \tag{1.11}$$

onde o tempo de Eddington, t_{Edd} é definido como

$$t_{Edd} = 4 \times 10^7 \left[\frac{\epsilon/(1-\epsilon)}{0.1} \right] \left(\frac{L}{L_{Edd}} \right)^{-1} \text{ anos.} \tag{1.12}$$

Nota-se portanto, que enquanto houver combustível, a massa do buraco negro cresce exponencialmente no tempo

$$M_{BH} \propto \exp\left(\frac{t}{t_{Edd}} \right). \tag{1.13}$$

Esta expressão permite estimar se uma dada semente de buraco negro é viável para explicar a população de quasares em $z \geq 6$, ou seja, formados em menos que $\sim$1 Gyr após o Big Bang. Usando a Equação 1.13 para uma estrela de População III com 100 $M_\odot$

correspondendo a uma semente de buraco negro, vê-se que esta de fato poderia crescer em menos de 1 bilhão de anos até a massa $10^9\ M_\odot$ para $\epsilon = 0.1$ e $L = L_{Edd}$.

Contudo, diversos estudos mostram que mesmo na presença de grandes reservatórios de gás, a acreção contínua no limite de Eddington é difícil de ser sustentada, já que o efeitos de *feedback* podem afetar significativamente os fluxos de gás e impedir a eficiência crescimento do buraco negro (ALVAREZ; WISE; ABEL, 2009; DUBOIS et al., 2013). Isto não apenas reforça a importância de fusões como um mecanismo complementar de crescimento do buraco negro, como dá margem ao surgimento de vários modelos que buscam explicar o crescimento rápido de buracos negros em altos *redshifts*, como os cenários onde ocorrem regimes de acreção super-Eddington durante alguns momentos da evolução do buraco negro, ou a formação de sementes muito massivas em modelos de colapso direto dos primeiros halos, e vários outros modelos (WISE et al., 2019; MASSONNEAU et al., 2023).

Um aspecto menos discutido até aqui é a contribuição direta da matéria escura para o crescimento do buraco negro. Em geral, admite-se que um fluido acolisional será conduzido ao buraco negro de maneira menos eficiente (SHAPIRO et al., 1983), mas esta é uma questão ainda em debate na literatura (PEIRANI; PACHECO, 2008; FERRER; ROSA; WILL, 2017). Na próximas seção, será introduzido o conceito de matéria escura, sua relação com os bárions, e possíveis efeitos sobre a formação de buracos negros supermassivos.

1.3 Matéria Escura

A presença de matéria escura em galáxias tornou-se parte do paradigma da cosmologia e da formação de galáxias. O problema da "massa faltante" foi identificado pela primeira vez em 1933, ao se medir as velocidades das galáxias em aglomerados e aplicar o Teorema do Virial para determinar a massa destes sistemas, e comparar o resultado com a estimativa da massa baseada na luminosidade das galáxias. A questão foi analisada detalhadamente pelo astrofísico búlgaro-suíço-americano Fritz Zwicky, na década de 1930 (ZWICKY et al., 1933; ZWICKY, 1937). Mais tarde, o problema da matéria escura reapareceu durante os anos 1970, quando Vera Rubin, uma astrofísica do Carnegie Institution de Washington, também descobriu uma "massa ausente" anomalamente situada nas partes mais externas das galáxias espirais (RUBIN, 1983, por exemplo). Outras revisões históricas sobre a matéria escura podem ser encontradas em Rubin (2004) e (TYSON; GOLDSMITH, 2015).

Embora observações cosmológicas restrinjam a quantidade de matéria escura no Universo e indiquem que ela deve ser fria, não se sabe muito mais sobre sua natureza. O modelo padrão de física de partículas (*standard model* - SM) não tem nenhuma partícula candidata à matéria escura. Os modelos de partículas de matéria escura pressupõem que

a matéria escura seja composta por algum tipo desconhecido de partícula ainda a ser descoberta. Além disso, geralmente supõe-se que as partículas de matéria escura interajam com as partículas do modelo padrão com força suficiente para que, em algum momento, elas tenham estado em equilíbrio térmico com o SM.

Essas partículas seriam então relíquias térmicas do universo primordial, e o fato de que estiveram em equilíbrio com partículas do SM leva a uma possível ligação entre a densidade de DM e a história térmica conhecida do Universo (WEINBERG, 2008). Devido à expansão do Universo, as taxas de interação em algum momento se tornaram muito pequenas para manter o equilíbrio. Uma vez que não haja mais qualquer interconversão de partículas DM e partículas SM, a densidade comóvel de matéria escura é fixada em um valor assintótico que deve então corresponder à densidade observada em tempos subsequentes.

Uma relíquia térmica "quente"se desacopla quando ainda é relativística. Então é particularmente simples calcular sua densidade final. A densidade de matéria escura e a densidade de fótons terão uma temperatura comum T no desacoplamento, e ambas variam com T^3. Isto implica na razão n_{DM}/n_γ dada por

$$\frac{n_{DM}}{n_\gamma} = \frac{g_{DM}}{2}\left(\frac{43/4}{g_{eff,dec}}\right)\left(\frac{4}{11}\right) \tag{1.14}$$

como pode ser visto, por exemplo, em Bode, Ostriker e Turok (2001). O primeiro fator é simplesmente a razão entre os graus de liberdade de spin da matéria escura e dos fótons. Os outros dois fatores que aparecem nesta expressão estão relacionados à conservação da entropia e ao aumento do número de fótons (KOLB; TURNER, 1990).

Contudo, no cenário hierárquico de formação de estruturas, a matéria escura é definida como sendo uma relíquia "fria", ou seja, como uma componente que se desacopla do banho térmico do SM com velocidades não-relativísticas. O cálculo da densidade de relíquias frias não é tão simples e depende dos detalhes de suas interações com o SM (BERTONE; HOOPER; SILK, 2005). Isso ocorre porque partículas não-relativísticas em equilíbrio térmico têm suas abundâncias suprimidas exponencialmente por um fator de Boltzmann, $n \propto e^{-m/T}$ (KOLB; TURNER, 1990). Ou seja, a densidade da relíquia é sensível à temperatura de desacoplamento, que é definida pelas interações da DM. Se $\langle\sigma v\rangle$ é a média térmica da seção de choque no processo DM+DM $\rightarrow$ SM+SM, pode-se mostrar que

$$\Omega_{DM}h^2 = \frac{\rho_{DM,0}}{\rho_{crit,0}} = \frac{3\times 10^{-27} cm^3\ s^{-1}}{\langle\sigma v\rangle} \tag{1.15}$$

(Bode; Ostriker; Turok, 2001), tal que os modelos de matéria escura devem predizer valores de $\langle\sigma v\rangle$ compatíveis com o valor observado $\Omega_{DM}h^2 \approx 0.15$, sendo $h = H_0/(100\ \text{km/s/Mpc})$ (COLLABORATION et al., 2020).

Atualmente, sabe-se que a fração de matéria escura presente em galáxias depende não só da distribuição espacial da massa bariônica mas também de suas propriedades físicas (dispersão da velocidades, tamanho e luminosidade da galáxia) que podem alterar a distribuição de matéria escura (LOVELL et al., 2018; NIGOCHE-NETRO et al., 2019). Simulações mostram uma correlação entre tamanho e tipo morfológico das galáxias - galáxias mais compactas com massa estelar fixa têm 20% de fração de matéria escura a menos do que galáxias consideradas medianas, ou seja, galáxias elípticas são normalmente menores que galáxias com disco (S0/SA0/SB0) com o mesmo tamanho estelar, consequentemente, as elípticas possuem uma fração de matéria escura menor, indicando uma história de crescimento mais antiga via fusões e acreção de satélites e uma expansão menor do halo devido ao *feedback* em galáxias elípticas (LOVELL et al., 2018; HARRIS et al., 2020).

Recentemente, descobriu-se que as ETGs possuem perfis de densidade quase-isotérmicos que se estendem a vários raios efetivos (XU et al., 2017; BELLSTEDT et al., 2018; LYSKOVA; CHURAZOV; NAAB, 2018). Este é um resultado importante, pois quando se trata das componentes de matéria escura e estelar separadamente, não se espera que nenhuma delas tenha perfil de densidade de tipo isotérmico, ou próximo de isotérmico, com $\rho_T \propto r^{-\gamma_T}$, e $\gamma_T \approx 2.3$ (LI et al., 2024).[2] Isto sugere que o perfil de densidade total das ETGs é provavelmente resultado da interação e "conspiração" entre os perfis das componentes de matéria escura e estelar durante o processo de formação e evolução das galáxias.

Definindo a inclinação do perfil de densidade da matéria escura por γ_{DM}, e no caso da matéria estelar por γ_*, então pode-se presumir que $\gamma_* \leq \gamma_T \leq \gamma_{DM}$ quando a fração de matéria escura varia entre 0 e 1. Portanto, γ_T depende diretamente da fração de matéria escura (f_{DM}), na região central das galáxias.

Simulações numéricas de halos de matéria escura na cosmologia ΛCDM produzem halos com perfil NFW

$$\rho_{DM} \propto \left(\frac{r}{r_s}\right)^{-1} \left[1 + \left(\frac{r}{r_s}\right)^2\right]^{-1} \tag{1.16}$$

onde r_s é um raio de escala (NAVARRO; FRENK; WHITE, 1997). Contudo, como mencionado anteriormente, o colapso dos bárions pode tornar a distribuição de matéria escura mais concentrada, via contração adiabática, ou menos concentrada, através de processos de *feedback*, como explosões de supernovas e ocorrência de jatos. Portanto, o conhecimento da quantidade e da distribuição de matéria escura no centro dos halos é de fundamental importância para se estudar a natureza da matéria escura, sua relação com os bárions e os modelos de formação de estruturas.

[2] O perfil de uma esfera isotérmica singular tem *slope* $\gamma = 2$.

Até o momento, não existe consenso em relação aos valores de f_{DM}. Vários estudos indicam baixas frações de matéria escura nas regiões centrais das ETGs. Em Cappellari et al. (2013) estimou-se f_{DM} em torno de 13% dentro do raio efetivo (R_e) das ETGs usando 260 galáxias do levantamento ATLAS 3D. Sonnenfeld et al. (2015) encontraram que os halos de matéria escura são consistentes com um perfil NFW com $f_{DM} = 33\%$ dentro de R_e, usando 78 galáxias dos levantamentos *Strong Lensing Legacy Survey* (SL2S) e Sloan Lens ACS Survey (SLACS). Estes resultados não são consistentes entre si, e estão em maior desacordo com resultados de simulações numéricas.

Em Xu et al. (2017), através de simulações do banco de dados Illustris, identificou-se que a componente bariônica é capaz de fazer com que a inclinação interna da distribuição de matéria escura seja notavelmente mais íngreme do que a previsão de NFW, e que a fração central de matéria escura seja significativamente maior do que aquelas inferidas a partir de observações e estudos de dinâmica estelar, alcançando valores entre 30% e 80%.

Resultados semelhantes aparecem no trabalho de Lovell et al. (2018), onde simulações numéricas do banco de dados do IllustrisTNG mostraram que as ETGs simuladas obtêm frações relativamente altas de matéria escura, $f_{DM} > 50\%$, em todos os intervalos de massa estudados. Esta contradição entre estudos baseados em simulações e dinâmica estelar pode indicar alguma inconsistência nos modelos de formação de estruturas e/ou sobre o entendimento da natureza da matéria escura. Por outro lado, também pode indicar excessos artificiais do efeito de contração adiabática nas simulações, como sugerem Li et al. (2024).

De fato, dois fatores importantes podem afetar modelos de contração adiabática. O primeiro deles é a sensibilidade do cálculo das massas estelares à função de massa inicial, como demonstrado por Kauffmann et al. (2003). E o segundo, vem do fato de o processo de contração adiabática acontecer enquanto a componente bariônica ainda está em forma gasosa, e a medição ser feita em galáxias que converteram quase todo o gás em estrelas. Além disso, durante a evolução dessas galáxias ocorrem várias fusões (maiores ou menores) cujo efeito final será o de aumentar a massa e diminuir a concentração do halo, como observado por Schulz, Mandelbaum e Padmanabhan (2010).

É importante ressaltar que as incertezas acerca da contração adiabática (e da interação entre matéria escura e bárions de modo geral) não a invalidam como hipótese, apenas apontam para as dificuldades que devem ser enfrentadas no sentido de restringir modelos viáveis.

1.3.1 Matéria Escura e Buracos Negros

Após a exposição feita nas seções 1.2 e 1.3, pode-se assumir que tanto o buraco negro quanto o halo de matéria escura causam um impacto gravitacional significativo na distribuição e processos físicos da matéria bariônica. Como dito anteriormente, os buracos negros podem desempenhar um papel essencial na formação de galáxias, influenciando a quantidade de gás que pode acumular-se à sua volta durante a formação estelar (ARGÜELLES et al., 2023).

Portanto, além do colapso dos bárions, da formação estelar, do efeito das fusões, deve-se considerar que buracos negros supermassivos crescem no centro das galáxias, e este crescimento pode ter um efeito sobre a distribuição central de matéria escura. À medida que o buraco negro cresce e atrai mais matéria escura, o perfil de densidade torna-se mais acentuado. Uma análise newtoniana, com tratamento *ad hoc* de captura de partículas pelo buraco negro, mostra que um aumento na densidade da matéria escura é gerado próximo ao centro galáctico (GONDOLO; SILK, 1999).

Um cálculo totalmente relativístico para o caso de um buraco negro esférico foi desenvolvido por Sadeghian, Ferrer e Will (2013), concluindo-se que o estudo newtoniano subestima a densidade da matéria escura muito perto do buraco negro: o pico atinge densidades significativamente mais altas e se estende até perto do horizonte de eventos. O caso relativístico com rotação do buraco negro também implica em aumento da densidade central de matéria escura (FERRER; ROSA; WILL, 2017). Como demonstrado por Peebles (1972), o crescimento do buraco negro pode converter em cúspide até mesmo um perfil do tipo "caroço", com densidade central finita.

Conforme apresentado na Seção 1.2.4, um dos fatores que promovem o crescimento de BHs no centros de galáxias é a acreção de gás e estrelas. Um buraco negro supermassivo central domina dinamicamente a população estelar circundante dentro de um raio característico ou de influência (r_h),

$$r_h = \frac{GM_{BH}}{\sigma^2}, \tag{1.17}$$

onde G é a constante gravitacional, M_{BH} é a massa do buraco negro e σ é a dispersão de velocidades das estrelas. A escala de tempo “mais curta” para o crescimento de um buraco negro é a escala de tempo de Eddington, vide Equação 1.12. Usualmente, $\epsilon = 0.1$, e $t_{\rm Edd} = 3.7 \times 10^7$ anos. Ao mesmo tempo, o tempo dinâmico dentro de r_h é $t_{dyn} = r_h/\sigma$. Se a correlação observada entre a dispersão de velocidades e a massa do buraco negro for válida, $M_{BH} \propto \sigma^4$ (FERRARESE; MERRITT, 2000; TREMAINE et al., 2002), então $r_h \propto \sigma^2$ e $t_{dyn} \propto \sigma$ ou $t_{dyn} \propto M_{BH}^{1/4}$. Ou seja, mesmo para buracos negros supermassivos ($10^6 - 10^{10}\ M_\odot$) o tempo dinâmico dentro do raio de influência será muito menor que a escala de tempo de acreção, e portanto o crescimento do buraco negro é considerado “adiabático”, de modo que a função de distribuição da componente bariônica não se altera

durante o processo.

Como demonstrado por Peebles (1972), o crescimento adiabático em um core isotérmico induz uma cúspide de densidade $\rho \propto r^{-3/2}$, ou ligeiramente mais íngreme para o caso de um core não-isotérmico (QUINLAN; HERNQUIST; SIGURDSSON, 1994). De acordo com esses modelos, a inclinação da cúspide é determinada pela relação entre a massa do BH e a massa do core inicial. As cúspides mais íngremes resultariam de razões de massa maiores. Isto contrasta com as expectativas dos modelos de crescimento de BHs via fusões, onde BHs mais massivos se correlacionariam com o enfraquecimento das cúspides.

Portanto, nota-se que o modo de crescimento do buraco negro central também é um fator que pode afetar a distribuição de matéria escura no centro dos halos. Assim, ao estimar a quantidade de f_{DM} dentro de um certo raio, é possível discriminar o mecanismo mais importante para o assentamento da parte central do halo escuro, o que auxilia nas predições de fenômenos de aniquilação e decaimento das partículas de matéria escura, e seu grau de auto-interação.

Estimar a M_{BH} e a f_{DM} em galáxias ETGs assim como a relação entre estas quantidades em função de parâmetros que descrevem a evolução das galáxias e o nível de atividade em seus núcleos, além de parâmetros ambientais, são os objetivos desta dissertação. Na próxima seção será feita a descrição dos dados e a metodologia empregada neste trabalho.

2 Dados e Métodos

2.1 Dados

A amostra inicial é composta por 337133 objetos do *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS), mais especificamente do sétimo *data release* (DR7) [1]. O SDSS é o mais ambicioso levantamento astronômico em andamento na atualidade. Ele foi iniciado em 2000 e visa mapear uma área corresponde a 1/4 do céu, catalogando mais de 100 milhões de objetos. O SDSS utiliza um telescópio com um espelho primário de 2.5 metros de diâmetro, com uma câmera com dispositivo de carga acoplada (CCD) e um par de espectrógrafos acoplados a ele. Ele está localizado no *Apache Point Observatory*, no Novo México, nos Estados Unidos.

Foram selecionadas galáxias early-type, situadas em $0.03 < z < 0.1$, com magnitudes absolutas $M_r \leq -20.5$, implicando numa amostra completa em volume para o limite do levantamento espectroscópico do SDSS, $m_r = 17.77$ (STRAUSS et al., 2002). As massas estelares (M_*) se encontram no intervalo $10.2 < log(M_*/M_\odot) < 11.9$, e foram obtidas da tabela galSpecExtra (KAUFFMANN et al., 2004), correspondente ao parâmetro lgm_tot_p50. As massas estelares foram estimadas usando modelos de síntese populacional de Bruzual e Charlot (2003) com função de massa inicial de Kroupa (2001).

A morfologia destas galáxias foi definida utilizando-se do estudo de Sánchez et al. (2018), que fornece tipos morfológicos de T (*T-Type* - vide Apêndice A.2) para $\sim$ 670.000 galáxias do SDSS, treinando Redes Neurais Convolucionais (CNNs) a partir de informações do projeto Galaxy Zoo 2 (LINTOTT et al., 2008; WILLETT et al., 2013, GZ2) e do catálogo de classificações visuais fornecidas por Nair e Abraham (2010), onde são estimadas as probabilidades de galáxias terem bojo ou disco como estruturas dominantes (P_{bulge} e P_{disk}, respecticvamente) e probabilidade de serem lenticulares (P_{S0}). Foram definidas como ETGs os objetos com T < 0 (BARCHI et al., 2020; BRAMBILA et al., 2023), e $P_{bulge} > 0.6$ e $P_{disk} < 0.8$ ou $P_{S0} > 0.6$ ou $P_{disk} < 0.8$ (SÁNCHEZ et al., 2018; BRAMBILA et al., 2023).

Esta definição de ETGs confere maior importância à predominância de uma componente esferoidal nos objetos do que à taxa de formação estelar que eles possuem. Visto que não se deseja excluir da amostra as ETGs azuis, uma vez que tais objetos podem corresponder a ETGs normais que experimentaram fusões menores recentemente com algum sistema rico em gás (GEORGE, 2017). Considerando as relações anteriores, a amostra final utlizada neste trabalho contabiliza 7821 galáxias *early-type*.

[1] Para mais detalhes sobre o SDSS DR7, acesse: <https://classic.sdss.org/dr7/>.

2.2 Métodos

2.2.1 Massa dinâmica

A primeira etapa do trabalho consiste no cálculo da massa dinâmica ou virial das galáxias (M_{dyn}), da fração de matéria escura (f_{DM}) e da massa do buraco negro central (M_{BH}). O teorema do virial é dado pela relação

$$2T + U = 0 \tag{2.1}$$

onde T é a energia cinética, e U é a energia potencial do sistema. A energia potencial de um sistema autogravitante é a energia de ligação gravitacional

$$U = -\frac{k_U G M_{dyn}}{r} \tag{2.2}$$

na qual G é a constante gravitacional, M_{dyn} é a massa dinâmica dentro do raio r, e k_U é uma constante que depende da distribuição de massa do sistema. A energia cinética é dada por

$$T = \frac{1}{2} M_{dyn} V^2 = k_T M_{dyn} \sigma^2 \tag{2.3}$$

onde V^2 é a velocidade quadrática da componente estelar do sistema, k_T é uma constante que relaciona a dispersão de velocidades (σ) e a V. Esta constante depende tanto da distribuição de massa como da distribuição de velocidades do sistema (CIOTTI, 1991). Combinando as equações acima, obtém-se

$$M_{dyn} = K \frac{\sigma^2 r}{G} \tag{2.4}$$

onde a nova constante K também conhecida como coeficiente virial, incorpora as dependências das energias potencial e cinética com as distribuições de massa e velocidade do sistema. Em geral, para um dado perfil de densidade, K pode ser obtida por integração numérica, econtrando famílias de soluções em função do índice de Sérsic (CIOTTI, 1991; GRAHAM; COLLESS, 1997; MAZURE; CAPELATO, 2002).

Neste trabalho, a M_{dyn} foi obtida seguindo Nigoche-Netro et al. (2019) e Ribeiro et al. (2023), estimada a partir do raio efetivo da galáxia (R_e), da dispersão central de velocidades (σ) e de um fator de escala $K(n)$. Logo, a equação 2.4 fica

$$M_{dyn} = \frac{K(n) R_e \sigma^2}{G}. \tag{2.5}$$

Neste caso, o fator de escala $K(n)$ depende do índice de Sérsic (n) como descrito por Cappellari et al. (2009):

$$K(n) = 8.87 - 0.831n + 0.0241n^2 \tag{2.6}$$

com índices de Sérsic obtidos do catálogo de Simard et al. (2011). O índice de Sérsic é o parâmetro que controla o perfil de luz da galáxia:

$$I(r) = I_e \exp\left\{-b_n\left[\left(\frac{r}{R_e}\right)^{(1/n)} - 1\right]\right\} \tag{2.7}$$

onde I_e é a intensidade em $r = R_e$ e b_n é definido tal que R_e contenha metade da luminosidade total.

Rigorosamente, esta massa dinâmica corresponde à massa total dentro do raio efetivo, assumindo que a distribuição de massa total (luminosa e escura) (M_{tot}) é bem descrita por uma componente isotérmica com dispersão de velocidades σ. Ou seja,

$$M_{dyn} = M_{tot}(< R_e) = \frac{K(n)R_e\sigma^2}{G}, \tag{2.8}$$

onde a dispersão central de velocidades é obtida com a equação de Cappellari et al. (2009):

$$\sigma = \sigma_{fiber}\left(\frac{8r_{fiber}}{R_e}\right)^{0.066} \tag{2.9}$$

onde σ_{fiber} é a dispersão da velocidades estimada no SDSS, R_e é o raio efetivo em segundos de arco, e r_{fiber} é o raio das fibras do SDSS, 1.5″ (STRAUSS et al., 2002).

As estimativas de dispersão de velocidade do SDSS são obtidas ajustando-se o espectro no referencial de repouso no intervalo de comprimento de onda de 4000-7000 Å e, em seguida, calculando-se a média das estimativas fornecidas pelos métodos de "ajuste de Fourier"e "ajuste direto". O erro no valor final da dispersão da velocidades é determinado somando-se em quadratura os erros nas duas estimativas. O erro típico em $\log\sigma$ está entre 0.02 dex e 0.06 dex, dependendo da relação S/N dos espectros. É importante notar que as estimativas de σ são limitadas pela dispersão e resolução instrumental. A dispersão instrumental do espectrógrafo do SDSS é de 69 km/s por pixel, e a resolução é de aproximadamente 90 km/s. Para mais detalhes, veja https://skyserver.sdss.org/dr7/en/help/docs/.

Para este trabalho utilizou-se apenas ETGs com $100 < \sigma < 420$ km/s, uma vez que valores abaixo de 100 km/s não são confiáveis, dada a resolução instrumental de 90 km/s (BERNARDI et al., 2003), e 420km/s é o valor máximo de dispersão de velocidades utilizado no espectros de modelo convoluídos no SDSS (YOON; PARK, 2020). Os raios efetivos são calculados através de

$$R_e = a_{deV}\sqrt{b/a} \tag{2.10}$$

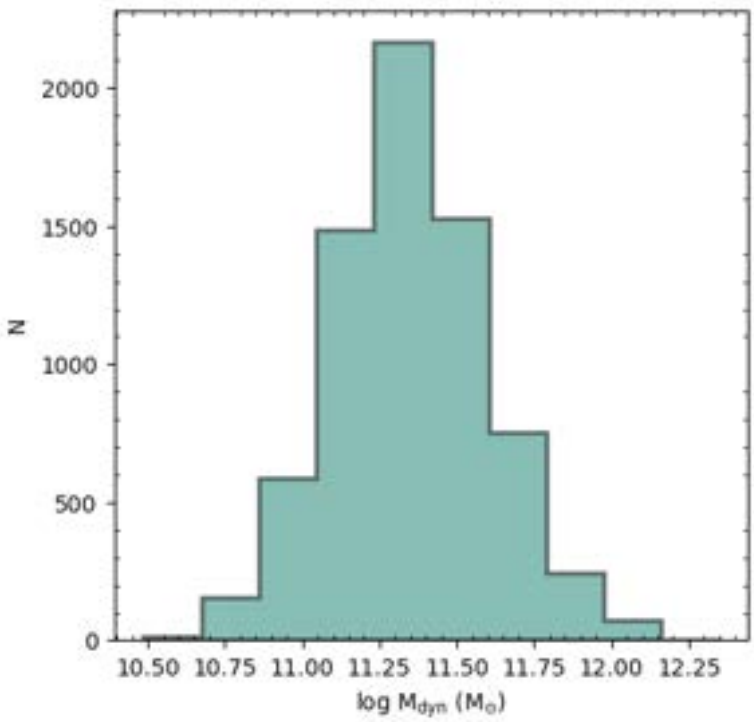
onde a_{deV} e b/a são o semi-eixo maior e a razão de eixos do ajuste do perfil de de Vaucouleurs, respectivamente. Foram usadas apenas ETGs com $b/a > 0.3$ para evitar objetos vistos de perfil. Estes parâmetros são retirados dos catálogos PhotObjAll e SpecObjAll do SDSS DR15 [2] (AGUADO et al., 2019).

Ao mesmo tempo, sob a hipótese de que a distribuição de luz das galáxias traça bem a distribuição de massa estelar, e usando a aproximação de que metade da luz total da galáxia está dentro de um disco de raio R_e, estimou-se o valor da massa estelar (M_*) dentro do raio efetivo, obtendo

$$M_*(< R_e) = M_*/2. \tag{2.11}$$

Logo, utilizando a equação 2.4 para estimar a massa dinâmica, obteve-se uma amostra com massa dinâmica variando entre $log10.5M_{dyn}$ e $log12.3M_{dyn}$, como pode ser visto na figura 12 abaixo.

Figura 12 – Histograma da distribuição de M_{dyn} para a amostra completa deste trabalho.



Fonte: Autoria própria, 2024.

[2] Para mais detalhes sobre os catálogos no SDSS DR15, acesse: <https://skyserver.sdss.org/dr15/en/help/docs/tabledesc.aspx>.

2.2.2 Fração de matéria escura

As relações obtidas anteriormente permitem então definir a fração de matéria escura (f_{DM}), dentro de R_e, da seguinte forma

$$f_{DM}(< R_e) = 1 - \left[\frac{M_\star(< R_e)}{M_{tot}(< R_e)}\right], \tag{2.12}$$

a partir da diferença relativa entre M_{tot} e $M_\star$ dentro de R_e (GRILLO, 2010; NIGOCHE-NETRO et al., 2019). De modo semelhante, pode-se também definir uma densidade superficial central de matéria escura:

$$\Sigma_{DM,R_e} = [M_{tot}(< R_e) - M_\star(< R_e)]/\pi R_e^2, \tag{2.13}$$

e a densidade superficial efetiva de massa estelar como

$$\Sigma_e = 0.5 M_\star/\pi R_e^2. \tag{2.14}$$

A definição de fração de matéria escura não corresponde exatamente ao valor que seria obtido se considerado no numerador da razão de massas presente na Equação 2.12 toda a massa bariônica: $M_b(< R_e) = M_{gas}(< R_e) + M_\star(< R_e)$. Embora não se espere uma fração de gás frio significativa em ETGs, esta componente tem sido observada nesses objetos por vários autores (SERRA et al., 2012; LAGOS et al., 2014). Ao mesmo tempo, é provável que elas contenham gás quente emissor de raios-X (HARRIS et al., 2020). Isto significa que a matéria bariônica pode estar sendo subestimada ao aproximá-la pela massa estelar.

Outro aspecto a se considerar é que a estimativa virial expressa na Equação 2.8 não considera possíveis anisotropias nas órbitas das estrelas. O estudo de Alabi et al. (2017) mostra que é possível tanto superestimar como subestimar M_{tot} dependendo do grau de anisotropia e da massa estelar das galáxias.

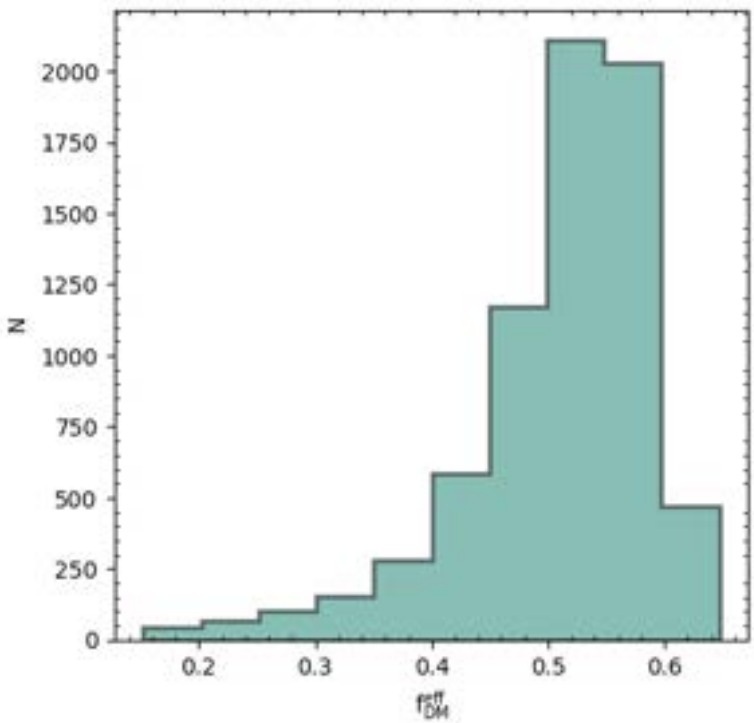
Ademais, existem divergências sobre a fração central de matéria escura em ETGs mesmo entre diferentes conjuntos de simulações (EAGLE, Illustris, Illustris TNG), indicando que processos que controlam a formação estelar e a redistribuição de matéria escura podem desempenhar um papel importante e ainda não totalmente compreendido nas ETGs (MUKHERJEE et al., 2022). Por conseguinte, neste trabalho adotou-se uma fração de matéria escura efetiva (f_{DM}^{eff}), definida como

$$f_{DM}^{eff} = \eta f_{DM}, \tag{2.15}$$

onde o parâmetro η é introduzido para levar em conta a falta de informação e possíveis erros contidos na estimativa de f_{DM}. O valor $\eta = 0.7$ foi escolhido de tal forma que $\sim$95%

das ETGs tenham $0.15 < f_{DM}^{eff} < 0.65$, dentro de R_e, em concordância com o trabalho de Treu e Koopmans (2004, TK04), um estudo escolhido como referência por indicar um amplo intervalo de f_{DM}, variando entre 0.15 e 0.65 dentro de R_e para modelos isotrópicos. A distribuição resultante para nossa amostra é mostrada na Figura 13, onde as linhas tracejadas verticais indicam os limites de TK04. A fração central de matéria escura tem mediana $\langle f_{DM}^{eff} \rangle \approx 0.51 \pm 0.10$.

Figura 13 – Histograma da distribuição de f_{DM}^{eff} para a amostra completa.



Legenda: Histograma da distribuição de f_{DM}^{eff} para a amostra deste trabalho, usando $\eta = 0.7$. As linhas tracejadas verticais indicam os limites de TK04.
Fonte: Autoria própria, 2024.

2.2.3 Massa do Buraco Negro

Definidas a massa dinâmica e a fração efetiva de matéria escura, o último componente a ser calculado é a massa do buraco negro (M_{BH}), uma vez que este trabalho tem como um dos objetivos comparar a fração de matéria escura entre as diferentes amostras que serão definidas na próxima seção, assim como explorar a possibilidade de que f_{DM} se relacione com a massa do buraco negro central das galáxias. Usualmente, M_{BH} é estimada indiretamente utilizando-se a relação linear dada por (FERRARESE; MERRITT, 2000; TREMAINE et al., 2002; MARSDEN et al., 2020),

$$\log\left(\frac{M_{BH}}{M_\odot}\right) = \alpha + \beta \log\left(\frac{\sigma}{200\ km\ s^{-1}}\right). \tag{2.16}$$

As fortes relações de escala entre as propriedades da galáxia hospedeira (como massa estelar, massa do bojo, luminosidade, dispersão de velocidades, raio efetivo, etc.) e a massa de seu buraco negro supermassivo apontam para uma estreita co-evolução entre buracos negros e suas galáxias hospedeiras. Em particular, a relação $M_{BH} - \sigma$ atraiu a atenção da comunidade astronômica desde a sua descoberta (FERRARESE; MERRITT, 2000), pois acredita-se que esteja intimamente ligada ao poço de potencial gravitacional da galáxia, e pode estar relacionada ao processo de *feedback* de núcleos ativos. Outro aspecto importante é o pequeno espalhamento intrínseco desta relação (SAGLIA et al., 2016; BOSCH, 2016) e o fato de que ela evolui muito fracamente com o *redshift*. Isto sugere que a relação poderia em princípio ser usada para estimar a massa de buracos negros centrais sem a necessidade de medidas diretas de sua massa dinâmica, propriciando estudos estatísticos envolvendo propriedades de galáxias hospedeiras e seus buracos negros.

Contudo, nota-se que a obtenção da massa do buraco negro usando a dispersão de velocidades central das galáxias estabelece uma correlação entre esta e a massa dinâmica ou a fração de matéria escura, uma vez que estas quantidades são também estimadas a partir de σ. Ou seja, o estudo da relação entre f_{DM} e M_{BH} adquire um viés de construção. Para contornar este problema, será utilizada a massa do buraco negro estimada pela combinação de várias de propriedades fotométricas de suas galáxias hospedeiras, seguindo o trabalho de He, Guo e Shao (2022).

Estes autores aplicam a técnica de aprendizado de máquina sobre uma amostra de treinamento composta por 14584 galáxias em $z < 0.35$, com massas de buraco negro estimadas através de mapeamento de reverberação, onde uma correlação entre o raio da região da linha larga e a luminosidade do contínuo pode ser derivada (BENTZ et al., 2009; ALVAREZ et al., 2020) e a massa do buraco negro obtida de acordo com

$$\log M_{\rm BH} = \log\left[\left(\frac{\rm FWHM(H\beta)}{1000\ {\rm km\ s^{-1}}}\right)^2\left(\frac{L_{5100}}{10^{44}\ {\rm erg\ s^{-1}}}\right)^{0.533}\right] + 6.91 \tag{2.17}$$

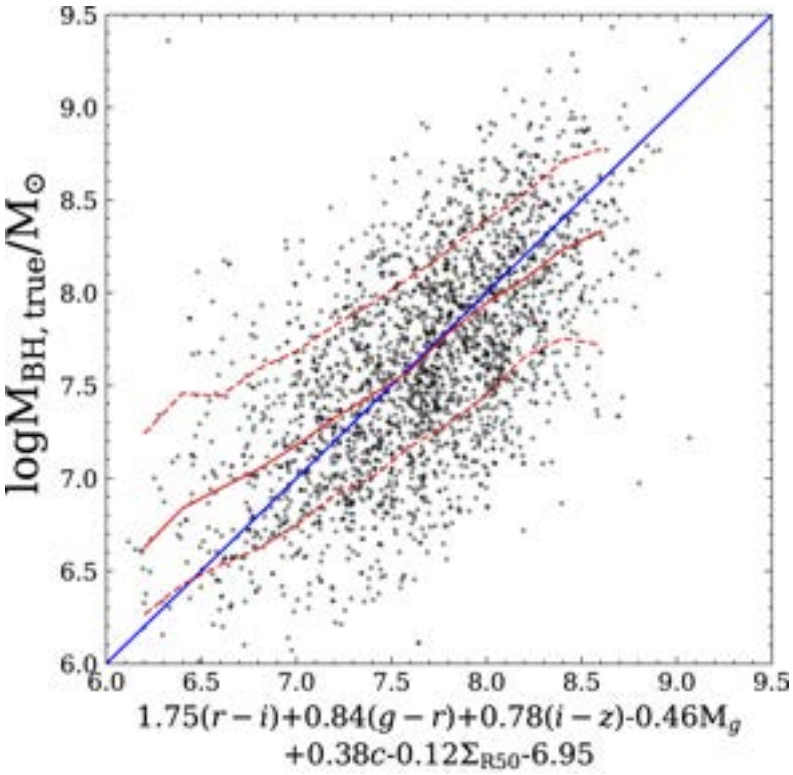
onde L_{5100} é a luminosidade do contínuo no referencial de repouso em 5100Å (LIU et al., 2019). A partir das massas de buraco negro assim calculadas, He, Guo e Shao (2022) utilizaram a regressão linear LASSO[3] para recuperar a massa estimada por Liu et al. (2019). A aplicação deste procedimento leva a

$$\begin{aligned}\log M_{\rm BH,pred}/M_\odot = \; & 1.75(r-i) + 0.84(g-r) \\ & + 0.78(i-z) - 0.46 M_g \\ & + 0.38c - 0.12\Sigma_{\rm R50} - 6.95\end{aligned} \tag{2.18}$$

[3] Método de regressão penalizado, usado frequentemente em aprendizagem de máquina para selecionar um subconjunto de variáveis. LASSO é um acrônimo para "Least Absolute Selection and Shrinkage Operator".

onde são usadas as cores $(r - i)$, $(g - r)$ e $(i - z)$, a magnitude absoluta na banda g, o índice de concentração (c), e o brilho superficial (Σ_{R50}) dentro de R_{50}. O resultado disto pode ser visto na Figura 14.

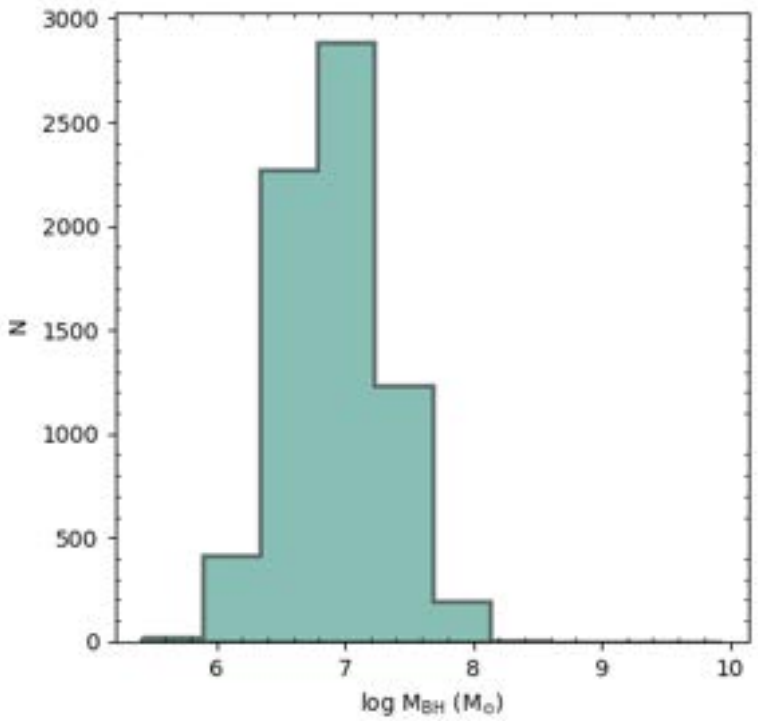
Figura 14 – Massa SMBH vs. a combinação linear das seis propriedades de galáxias



Legenda: Massa do buraco negro supermiassivo (SMBH) vs. a combinação linear das seis propriedades de galáxias selecionadas pelo aprendizado de máquina para todas as amostras no catálogo de Liu et al. (2019). A curva sólida vermelha e as curvas tracejadas mostram o valor mediano e a dispersão 1σ. Fonte: (HE; GUO; SHAO, 2022).

Os autores encontram espalhamento na relação entre a massa do SMBH e a relação de propriedades combinadas das galáxias de 0.48 dex (1σ), sendo menor portanto que o espalhamento na relação massa do SMBH versus massa estelar das galáxias, usualmente ~ 0.6 (MOUNTRICHAS, 2023). Logo, para este trabalho adotou-se a Equação 2.18 para estimar a massa dos buracos negros das galáxias da amostra, obtendo a distribuição apresentada na Figura 15.

Figura 15 – Histograma da distribuição de M_{BH}.



Legenda: Histograma da distribuição de M_{BH} obtida a partir de propriedades fotométricas, de acordo com a equação 2.18. Fonte: Autoria própria, 2024.

2.2.4 Definição de subamostras

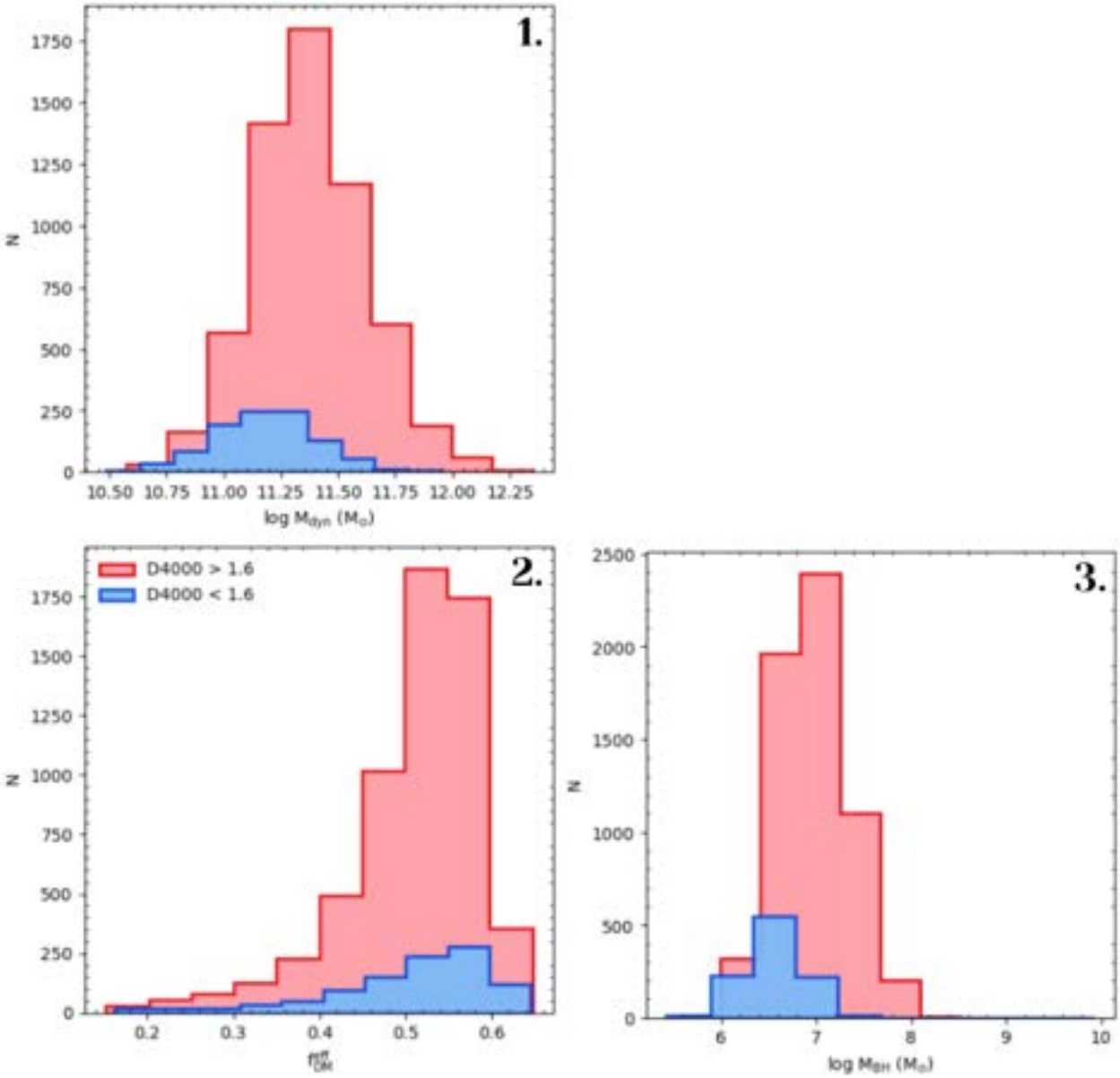
As relações entre fração de matéria escura, massa do buraco negro central, massa estelar e massa dinâmica serão investigadas a partir de comparações entre amostras de galáxias, contidas em diferentes subconjuntos de dados definidos a partir de algumas variáveis de interesse.

2.2.4.1 D4000

A primeira destas variáveis é o índice D4000, cuja descrição geral pode ser vista no Apêndice A.3. Este índice aumenta em função da idade da população estelar (KAUFFMANN et al., 2003; ZAHID et al., 2016). Portanto, é usado como um *proxy* para a idade da população estelar. O uso desta variável para definir subamostras neste trabalho baseia-se no estudo seminal de Napolitano, Romanowsky e Tortora (2010) sobre a fração de matéria escura na região central das ETGs, que tem como um dos resultados a forte indicação de que, para uma massa fixa, galáxias com conteúdo estelar mais jovem possuem em média fração de matéria escura mais alta. O resultado indica ainda que a f_{DM} se correlaciona mais fortemente com a idade das galáxias do que com sua massa. Sugerindo um estudo separando ETGs com populações estelares mais jovens e mais velhas.

Uma característica importante relacionada ao D4000 é a sua distribuição bimodal (KAUFFMANN et al., 2003; GELLER et al., 2014), o que contribui para a seleção de galáxias quiescentes contendo populações estelares mais antigas (BRINCHMANN et al., 2004). O valor de D4000 igual a 1.6 geralmente corresponde a uma população estelar com média de idade 1 Gyr e, portanto, este valor tem sido usado como um critério para separar galáxias com formação estelar e galáxias quiescentes (KAUFFMANN et al., 2003; HAINES et al., 2017). Na Figura 16 vê-se as distribuições da massa estelar, da fração efetiva de matéria escura e da massa do buraco negro para estas duas subamostras.

Figura 16 – Histograma das distribuições de M_{dyn}, f_{DM}^{eff} e M_{BH} de acordo com D4000.



Legenda: Histograma das distribuições de: 1. Massa dinâmica (M_{dyn}); 2. Fração efetiva de Matéria Escura (f_{DM}^{eff}) e 3. Massa do buraco negro (M_{BH}) de acordo com D4000, com a subamostra 'velha' (vermelho) e 'jovem' (azul). Fonte: Autoria própria, 2024.

Esta divisão por D4000 leva a duas subamostras que serão chamadas de "velha"(D4000 $>$ 1.6) com 6372 objetos, equivalendo a 81,48% da amostra geral; e "jovem"(D4000 $\leq$ 1.6), com 1449 objetos, equivalendo a 18,52% da amostra geral. Na Figura 16 vê-se as distribuições em massa estelar para estas duas amostras. Nota-se que a amostra "velha"possui objetos mais massivos enquanto a amostra "jovem"é dominada por objetos com massas menores que $\sim 10^{10.5}$ $M_{\odot}$. Este é um ponto relevante, dado que a massa estelar é importante condutor da evolução das galáxias. Comparações que levem isto em conta serão feitos no intervalo de massa $10^{10.2} < M_{\star} < 10^{10.6}$ $M_{\odot}$.

2.2.4.2 Diagrama WHAN

Outra definição de subamostras segue a classificação de objetos no diagrama WHAN, descrito no Apêndice A.4, utilizando-se da categorização proposta por Fernandes et al. (2011b), onde:

- Galáxias com formação estelar:

$$\log\left(\frac{N_{II}}{H_{\alpha}}\right) < -0.4 \;\; e \;\; W_{H_{\alpha}} > 3\text{Å} \tag{2.19}$$

- AGN forte ou galáxias Seyfert:

$$\log\left(\frac{N_{II}}{H_{\alpha}}\right) > -0.4 \;\; e \;\; W_{H_{\alpha}} > 6\text{Å} \tag{2.20}$$

- AGN fraca:

$$\log\left(\frac{N_{II}}{H_{\alpha}}\right) > -0.4 \;\; e \;\; 3\text{Å} < W_{H_{\alpha}} < 6\text{Å} \tag{2.21}$$

- Galáxias *retired* (AGN falsas):

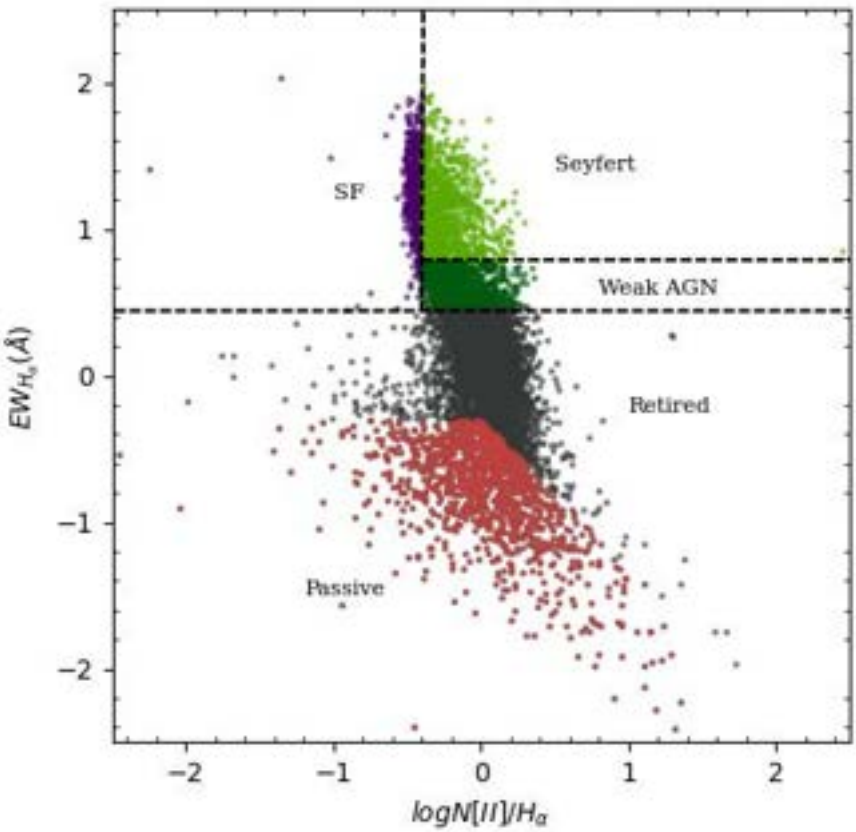
$$W_{H_{\alpha}} < 3\text{Å} \tag{2.22}$$

- Galáxias passivas:

$$W_{H_{\alpha}} < 0.5\text{Å} \; e \; W_{N_{II}} < 0.5\text{Å} \tag{2.23}$$

O resultado desta classificação pode ser visto na Figura 17, onde é possível observar a divisão das ETGs da amostra em 428 objetos com formação estelar (SF), 1014 AGNs fortes ou Seyferts, 825 AGNs fracas (W AGN), 4001 *retired* (aposentadas), e 1732 *passives* (passivas), equivalendo a 5,36%, 12,68%, 10,31%, 21,65% e 50% da amostra geral, respectivamente. Como o esperado para uma amostra de ETGs, os objetos dominantes são as retired e as passivas que, reunidas, contabilizam aproximadamente 72% da amostra.

Figura 17 – Distribuição dos objetos nas regiões do Diagrama WHAN.

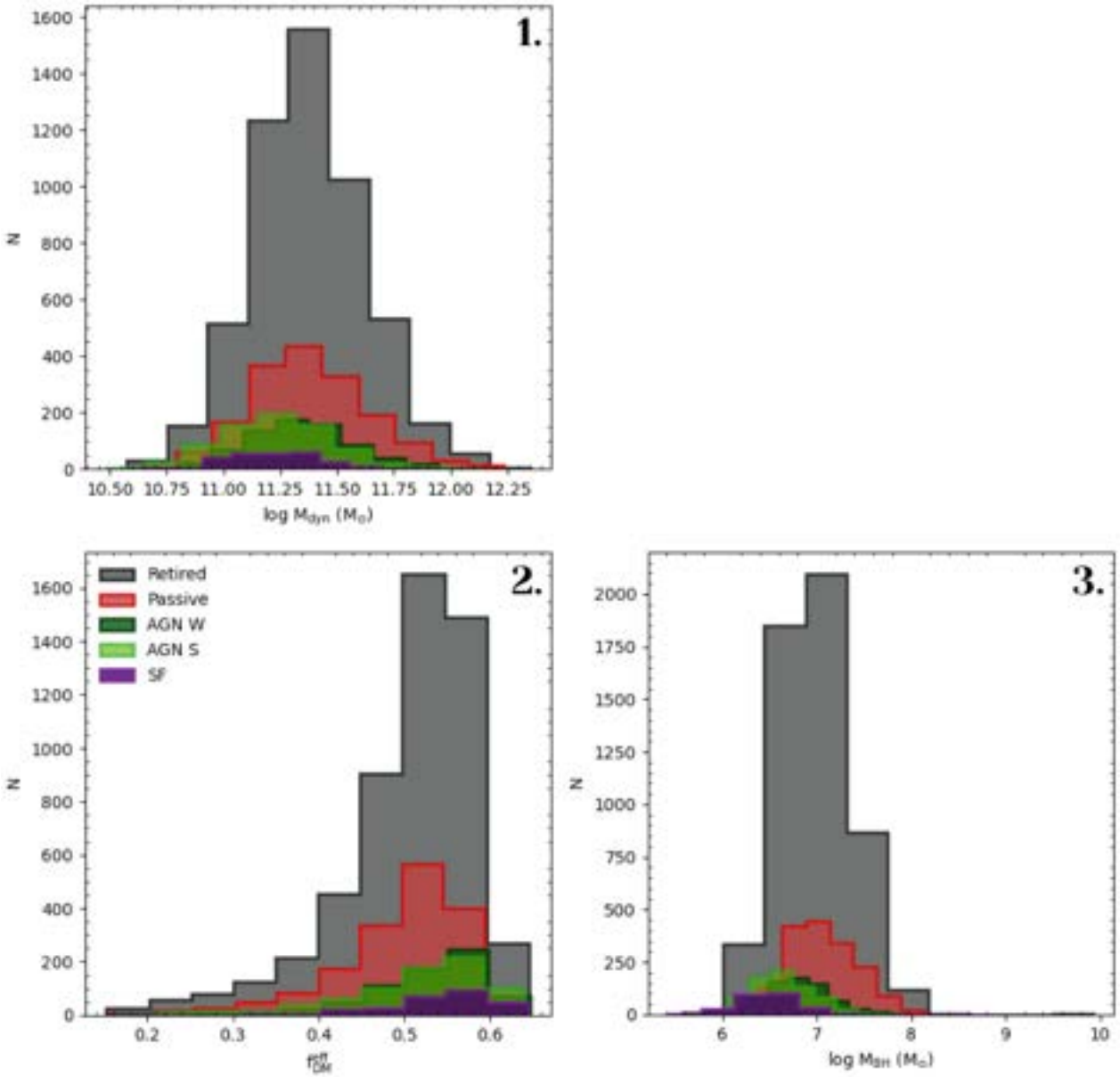


Legenda: As galáxias com formação estelar (SF) estão em roxo; as galáxias com núcleo ativo fortes (Seyfert) estão em verde claro; as galáxias com núcleo ativo fracas em cinza as AGNs fracas (Weak AGN) estão em verde escuro; As galáxias *Retired* (aposentadas) estão em preto; e as galáxias Passive (passivas) estão em vermelho. Fonte: autoria própria, 2024.

A razão para se definir estas categorias baseia-se no fato de que tanto a formação estelar como a "alimentação"de buracos negros centrais dependem da quantidade de gás frio disponível nas galáxias, na taxa de formação estelar e nos efeitos de *feedback* estelares (supernovas) e/ou dos buracos negros centrais (MARSDEN et al., 2020). Isto indica que diferentes regimes de taxa de formação estelar e atividade de núcleos ativos podem permitir um maior entendimento dos processos que controlam tanto a massa dos buracos negros como a fração de matéria escura central.

Assim como feito para a divisão com D4000, a Figura 18 mostra as distribuições da massa estelar, fração efetiva de matéria escura e massa do buraco negro para as subamostras feitas a partir de WHAN. Nota-se que para a f_{DM}^{eff} as subamostras apresentam uma distribuição parecida, com maior concentração a partir de 0,5. Enquanto que a distribuição da M_{BH} apresenta uma variação mais evidente. Por fim, a M_{dyn} apesar de mais seguimentada mostra um aumento de massa das galáxias SF para as passivas e aposentadas.

Figura 18 – Histograma das distribuições de M_{dyn}, f_{DM}^{eff} e M_{BH} de acordo com WHAN.



Legenda: Histograma das distribuições de: 1. Massa dinâmica (M_{dyn}); 2. Fração efetiva de Matéria Escura (f_{DM}^{eff}) e 3. Massa do buraco negro (M_{BH}) de acordo com o diagrama WHAN, com as galáxias SF em roxo, AGN S em verde claro, AGN W em verde escuro, passivas em vermelho e *retired* em preto. Fonte: Autoria própria, 2024.

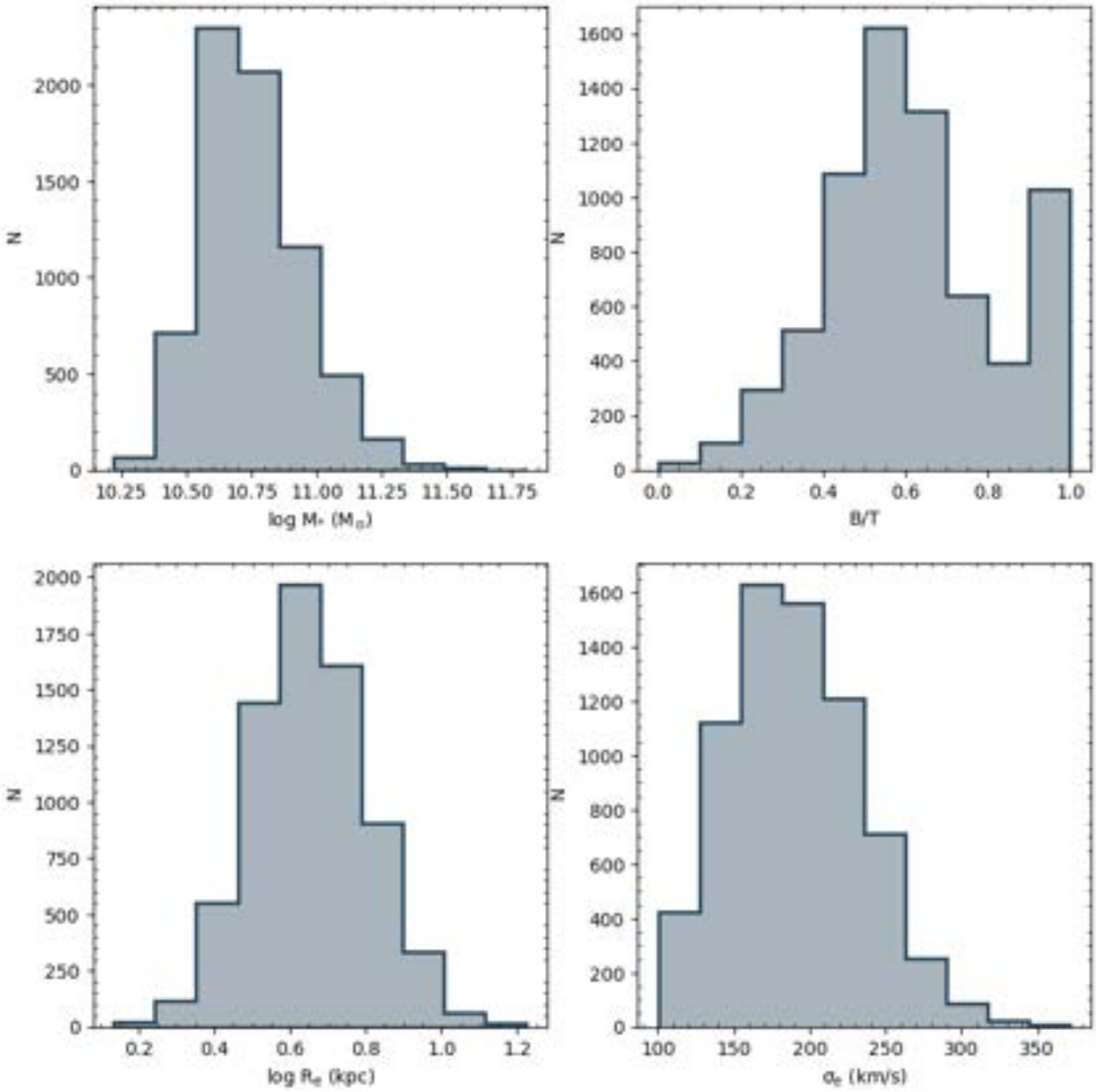
2.2.5 Propriedades das galáxias ETG

Além das das relações entre fração de matéria escura e a massa do buraco negro central, serão investigadas também as relações entre cada umas dessas componentes com algumas propriedades da galáxia hospederia, sendo elas a massa estelar (M), a razão de luminosidade bojo-total (B/T), o raio efetivo (R_e) e a dispersão de velocidades das estrelas (σ_e) neste raio. Isto porque, tais propriedades dinâmicas possuem um papel fundamental na formação e evolução das galáxias, elas são a forma mais direta de sondar o conteúdo de

materia escura (KORMENDY; HO, 2013). Mais detalhes sobre estas relações de escala pode ser no Apêndice A.1.

Dito isso, a figura 19 mostra a distribuição destas propriedades para a amostra completa de 7821 galáxias.

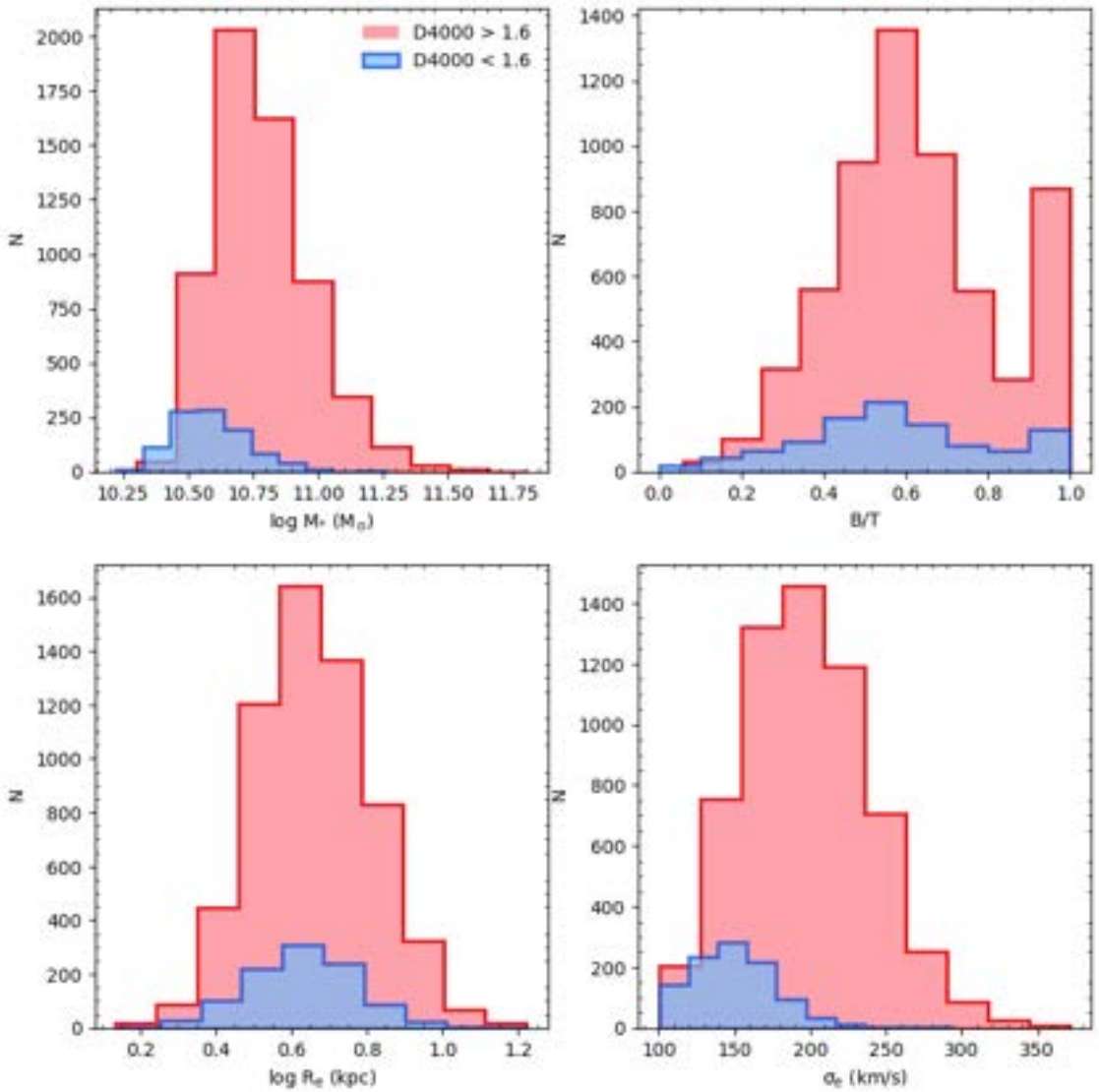
Figura 19 – Histograma das propriedades das galáxias ETG para a amostra geral.



Legenda: Histograma da massa estelar (M_*), razão de luminosidade bojo-total (B/T), raio efetivo (R_e) e dispersão de velocidades (σ_e) para a amostra completa. Fonte: Autoria própria, 2024.

Uma vez que houve a subdivisão considerando um indicador de formação estelar, a figura 20 abaixo mostra as mesmas propriedades da figura anterior, porém, considerando a subdivisão com D4000.

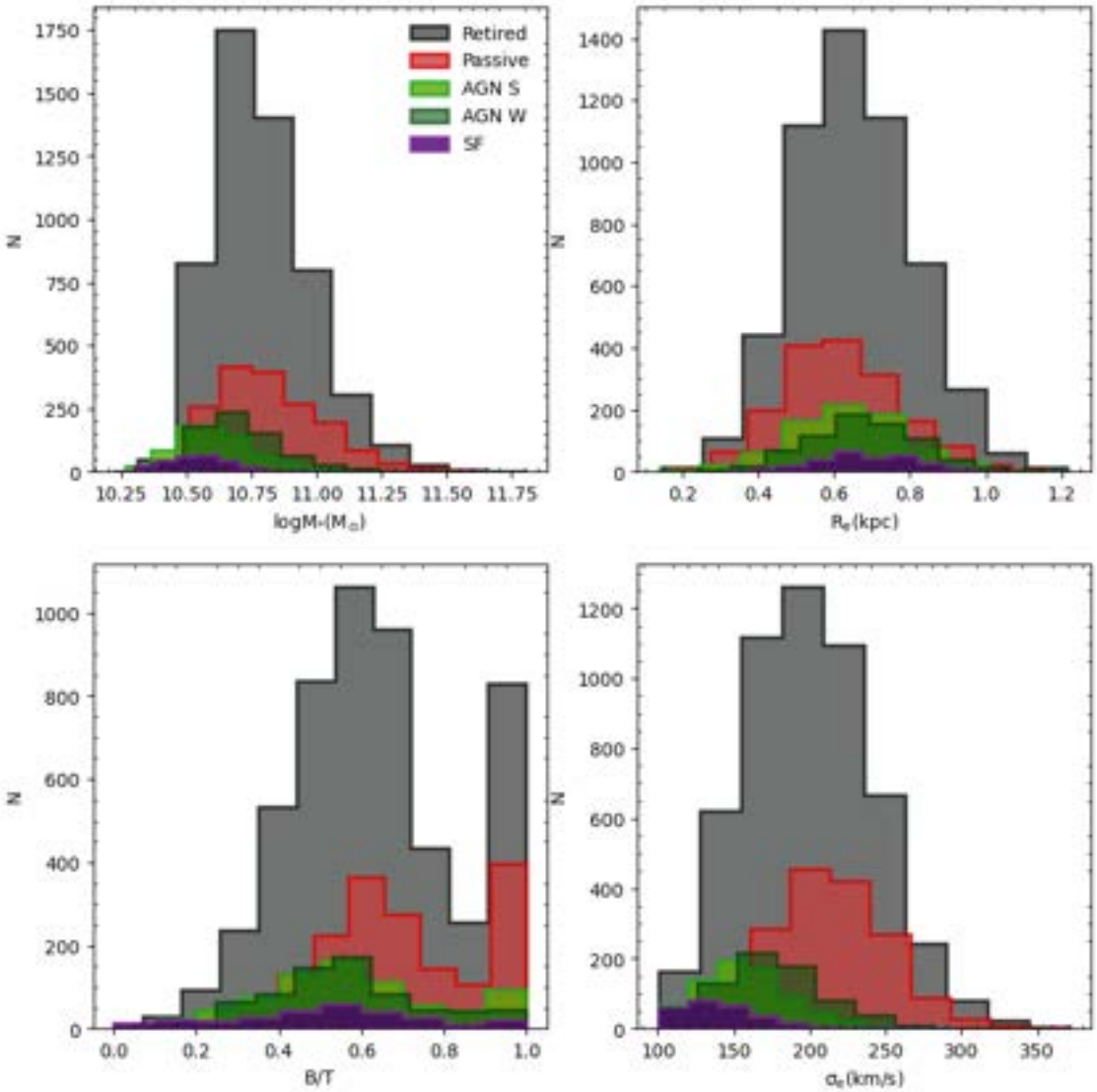
Figura 20 – Histograma das propriedades das galáxias ETG de acordo com D4000.



Legenda: Histograma da massa estelar (M_*), razão de luminosidade bojo-total (B/T), raio efetivo (R_e) e dispersão de velocidades (σ_e) de acordo com D4000, com a subamostra 'velha' (vermelho) e 'jovem' (azul). Fonte: Autoria própria, 2024.

É possível perceber que as galáxias com D4000 $<$ 1,6 apresentam valores menores de massa esterlar e dispersão de velocidade do que as galáxias com D4000 $>$ 1,6, enquanto que o intervalo de distribuição para B/T e raio efetivo são similares, apesar da amostra de "azuis"ser consideravelmente menor. Por fim, a figura 21 mostra as mesmas propriedades anteriores, porém, considerando a subdivisão realizada com o diagrama WHAN.

Figura 21 – Histograma das propriedades das galáxias ETG considerando WHAN.



Legenda: Histograma da massa estelar (M_*), razão de luminosidade bojo-total (B/T), raio efetivo (R_e) e dispersão de velocidades (σ_e) de acordo com o diagrama WHAN, com as galáxias SF em roxo, AGN S em verde claro, AGN W em verde escuro, passivas em vermelho e *retired* em preto. Fonte: Autoria própria, 2024.

Nota-se que para a massa estelar e dispersão de velocidade, as amostras apresentam intervalos diferentes, isto é, há um aumento gradativo do intervalo de massa e de velocidade, a partir das SF até as galáxias aposentadas, apesar das AGNs mostrarem distribuições parecidas. O mesmo não pode ser dito para as distribuições envolvendo o raio efetivo e B/T.

2.2.6 Densidade Local

As amostras definidas nas seções 2.2.4.1 e 2.2.4.2 serão consideradas também em função do ambiente, aqui estimado de acordo com a densidade local de galáxias. Sabe-se que as galáxias residem em ambientes que abrangem um amplo intervalo de densidades de galáxias. A densidade do ambiente pode desempenhar um papel importante na determinação de muitas propriedades das galáxias, como taxa de formação estelar, conteúdo de gás e morfologia (VULCANI et al., 2013). A densidade galáctica pode ser obtida a partir da área circular A que, em projeção no céu, envolve as N galáxias mais próximas de um dado objeto, isto é,

$$\Sigma_N = \frac{N}{A} \tag{2.24}$$

em unidades de galáxias por Mpc^2.

Inúmeros trabalhos mostram que a massa é um parâmetro crucial para o processo de evolução das galáxias. Segundo Kauffmann et al. (2004), a massa estelar das galáxias aumenta em função da densidade. Isto é, para massas estelares acima de 3×10^{10} $M_\odot$, a distribuição de tamanho e concentração, em intervalos fixos de massa estelar, independe da densidade local, enquanto que galáxias com massa estelar menores que 3×10^{10} $M_\odot$ tendem a ser ligeiramente mais concentradas e mais compactas nas regiões mais densas. Já Vulcani et al. (2013) relata que quanto menor a densidade, maior é (proporcionalmente) o número de galáxias de baixa massa, indicando que as galáxias de baixa massa são mais comuns em regiões 'mais esparsas', enquanto isso, em regiões de maior densidade, as galáxias são proporcionalmente mais massivas, indicando que a forma da função de massa muda com a densidade local.

Diversos mecanismos relacionados com o ambiente podem afetar a evolução das galáxias. O gás frio, combustível da formação estelar, poderia fluir em galáxias através de filamentos cósmicos (KEREŠ et al., 2005; DEKEL et al., 2009); por outro lado, interações frequentes de marés em regiões mais densas poderiam esgotar efetivamente o gás frio (FAROUKI; SHAPIRO, 1981; MOORE; LAKE; KATZ, 1998); assim como a forte pressão de arraste em aglomerados pode remover o gás frio das galáxias e suprimir a formação estelar subsequente (GUNN; III, 1972; EBELING; STEPHENSON; EDGE, 2014; POGGIANTI et al., 2016); e ainda fusões, que podem mudar fundamentalmente a morfologia e distribuição de luz das galáxias (HOPKINS et al., 2006; LIN et al., 2010).

Esses processos físicos também podem afetar a atividade do núcleo galáctico ativo (AGN), como o crescimento de buracos negros supermassivos (SMBHs), que também depende do fornecimento de gás frio (ALEXANDER; HICKOX, 2012; VITO et al., 2014; POGGIANTI et al., 2017). Isto sugere uma possível relação entre ambiente e o crescimento de SMBHs. Vários estudos abordam esta questão, encontrando, em geral, uma anti-

correlação entre a fração de AGNs e o ambiente, de modo que menos AGNs são encontrados em aglomerados em comparação com o campo (DRESSLER et al., 1999; KAUFFMANN et al., 2004; ALONSO et al., 2007). As discrepâncias entre os diferentes estudos são geralmente explicados pelo uso de diferentes amostras (em termos de luminosidade e massa e seleção de comprimento de onda) e definições de ambiente.

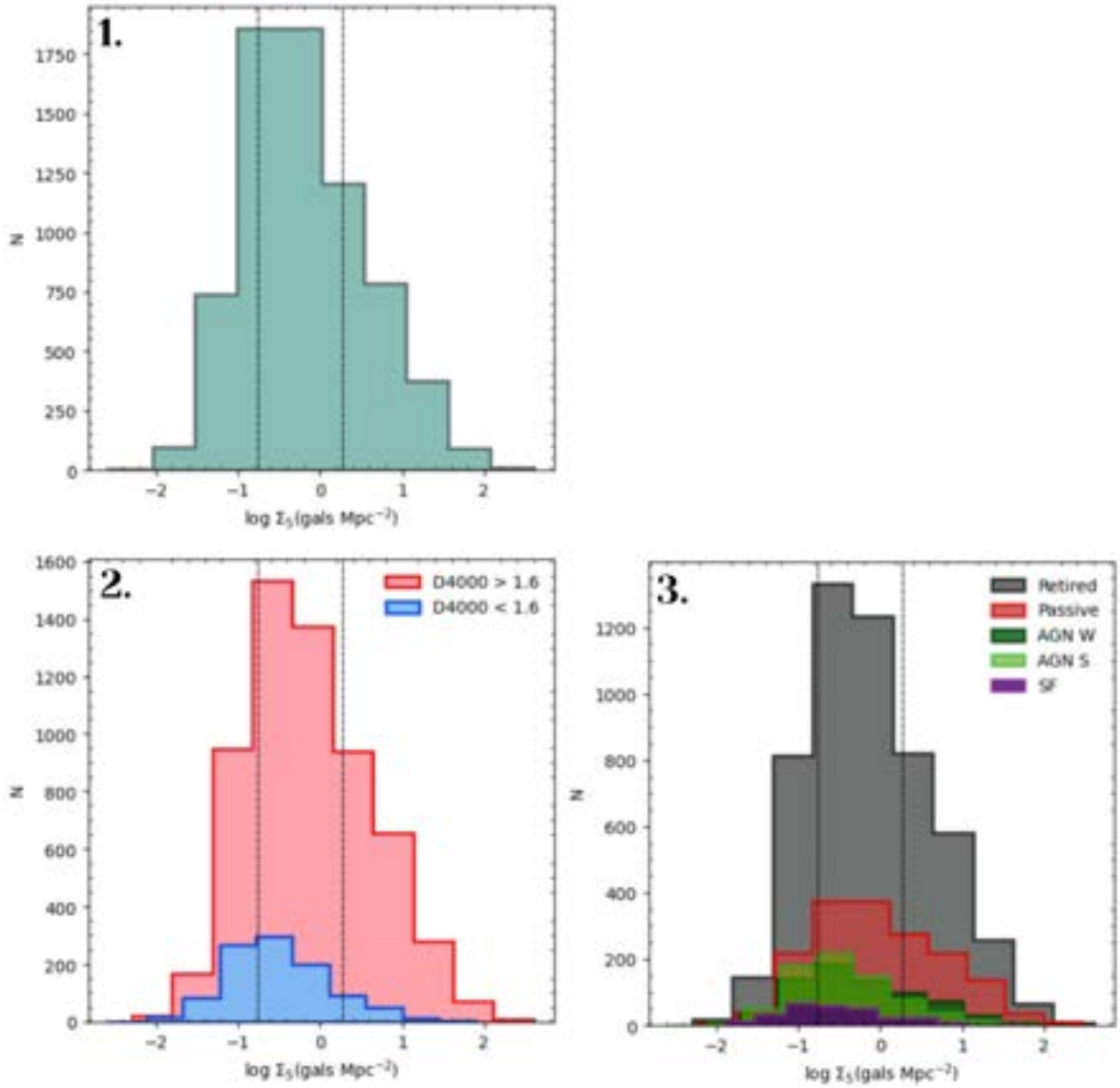
Neste trabalho será adotado o estimador de densidade de N galáxias em torno de um dado objeto. Esta escolha é motivada pelas conclusões de Muldrew et al. (2012), que encontram que os métodos do vizinho mais próximo são bastante efetivos no rastreamento do ambiente local. Optando-se por trabalhar com $N = 5$, pois é normalmente um valor menor que o número de galáxias existentes em aglomerados, além de ser uma estimativa comum na literatura (LOPES; RIBEIRO; REMBOLD, 2014).

As estimativas são feitas realizando as etapas descritas a seguir. Para cada galáxia nesta amostra, calculou-se a distância projetada, d_5, até a quinta galáxia mais próxima em torno dela. Impondo também à busca do vizinho uma diferença máxima de velocidade de 1000 km/s, e uma luminosidade máxima, aqui adotada como $M_* + 1.0$, onde M_* é a magnitude caracterísica da função de luminosidade para a banda r do SDSS, $M_{*,r} \approx -21.5$ (POPESSO et al., 2005). A densidade local 5 (Σ_5) é simplesmente dada por $5/\pi d_5^2$, onde d_5 é medido em Mpc, e portanto Σ_5 é calculada em unidades de galáxias/Mpc^2. Por fim, também é levado em consideração o problema de colisão de fibras do SDSS seguindo o procedimento descrito em Barbera et al. (2010). A expressão final para o estimador de densidade fica

$$\Sigma_5 = \frac{5}{\pi d_5^2}. \tag{2.25}$$

cuja distribuição resultante para os dados deste trabalho é apresentada na Figura 22.

Figura 22 – Histogramas da distribuição de Σ_5.



Legenda: Histograma da distribuição de Σ_5 para: 1. A amostra geral; 2. A mostra de acordo com D4000; 3. A amostra de acordo com o diagrama WHAN. As linhas verticais tracejadas indicam o primeiro e terceiro quartis da distribuição. Fonte: Autoria própria, 2024.

2.3 Ferramentas Estatísticas

2.3.1 Testes de comparação de duas amostras

As principais ferramentas estatísticas usadas neste trabalho são aquelas que permitem comparar duas amostras de dados. Entre os muitos testes disponíveis para este fim, foram escolhidos alguns amplamente conhecidos na literatura: teste-t (ou teste de Welch), teste de Kolmogorov-Smirnov (KS), o teste de permutação, o teste de Conover e o teste KDE. Dado o amplo uso destes testes, segue uma breve descrição de cada um deles.

Teste-t

O teste-t foi idealizado para comparar duas amostras, rejeitando ou não a hipótese nula de que as duas amostras são tiradas da mesma população quando a estatística de teste segue uma distribuição t de Student.

Teste de Kolmogorov-Smirnov

O teste KS é um teste não-paramétrico usado na comparação de duas amostras comparando as respectivas distribuições acumuladas, rejeitando ou não a hipótese nula de que ambas são tiradas da mesma população. A hipótese nula é rejeitada quando a estatística D de Kolmogorov-Smirnov excede um certo valor crítico.

Teste de Permutação

O teste de permutação (ou de aleatorização) é um procedimento em que se comparam valores de uma estatística observada para os dados no arranjo original com os valores desta estatística após a aleatorização das observações. A regra de decisão é baseada na proporção de vezes em que a estatística de teste com os dados aleatorizados é maior ou igual a estatística de teste com os dados do arranjo original. Utilizamos como estatística de teste a diferença absoluta entre as médias de cada amostra.

Teste de Conover

O Teste de Conover está implementado na função ConoverTest do pacote DescTools na linguagem R, e tem como objetivo realizar uma comparação múltipla entre os dados e verificar se a função de distribuição acumulada (FDA) de um conjunto não cruza a FDA de outro, a um nível de 90% de confiança. O teste de Conover faz comparações múltiplas entre pares de amostras com base na estatística de teste t Conover-Iman para as diferenças de soma de classificação:

$$\left|\bar{R}_i - \bar{R}_j\right| > t_{1-\alpha/2,n-k} \cdot \sqrt{s^2 \cdot \left[\frac{n-1-\hat{H}^*}{n-k}\right] \cdot \left[\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j}\right]} \tag{2.26}$$

fazendo uso da estatística do teste de Kruskal-Wallis (KW). O KW é um teste não-paramétrico utilizado na comparação de três ou mais amostras independentes. Ele nos indica se há diferença entre pelo menos dois deles. A aplicação do teste utiliza os valores numéricos transformados em postos e agrupados num só conjunto de dados. A comparação dos grupos é realizada por meio da média dos postos (posto médio). A estatística do teste KW é:

$$\hat{H}^* = \frac{\frac{12}{n\cdot(n+1)} \cdot \sum_{i=1}^{k} \frac{R_i^2}{n_i} - 3 \cdot (n+1)}{1 - \frac{\sum_{i=1}^{r}\left(t_i^3 - t_i\right)}{n^3 - n}} \tag{2.27}$$

onde s^2 é dado por

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \left[\sum R_i^2 - n \cdot \frac{(n+1)^2}{4} \right] \tag{2.28}$$

(CONOVER, 1999).

Uma descrição detalhada dos testes mencionados até aqui (e de outros) pode ser encontrada em Kanji (2006). A seguir, descrevemos o teste KDE, o único aplicado a duas variáveis simultaneamente neste trabalho.

Teste KDE

O teste KDE (Kernel Density Estimator) é um teste global não-paramétrico de comparação de duas amostras com dimensões entre 1 a 6, baseado no método de Duong, Goud e Schauer (2012), implementada na linguagem R, com a biblioteca ks ((DUONG; GOUD; SCHAUER, 2012)). Durante o teste, os dados são suavizados usando a função Kernel geral de Wand e Jones (1993) (cuja escolha não interfere na precisão do teste) e uma matriz de largura de banda otimizada em cada valor da tabela de dados. Depois da suavização, duas distribuições de densidade são criadas (f_1 e f_2), as quais são comparadas através de um teste de estatístico,

$$T = \int [f_1(x) - f_2(x)]^2 \, dx \tag{2.29}$$

mostra que T tem uma distribuição nula assintóticamente normal. O resultado é então avaliado considerando o nível de significância de 0,05. Quando o valor-p é menor que 0,05 as amostras possuem diferenças significativas, ou seja, as amostras são diferentes. E quando o valor-p é maior que 0,05, as amostras não possuem diferenças significativas, isto é, as amostras são similares.

Para maiores detalhes sobre este teste consulte o Apêndice A.5.

3 Resultados

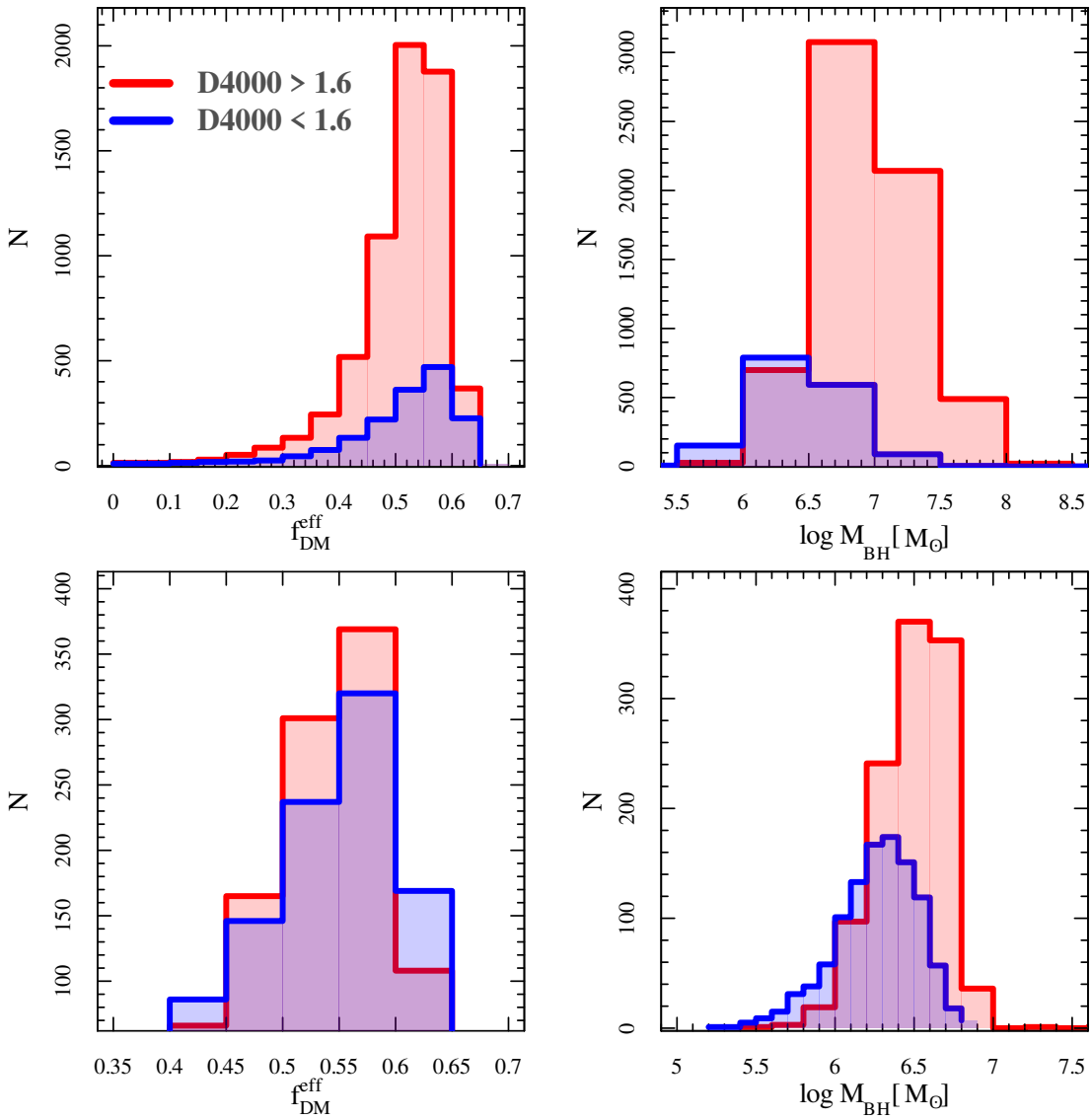
Neste capítulo, são apresentados os resultados das diversas comparações entre as subamostras definidas em termos do índice D4000, das regiões do diagrama WHAN, considerando também o ambiente descrito pelo indicador de densidade Σ_5 (Vide Capítulo 2). Tais comparações serão feitas a partir da descrição das relações existentes entre a fração de matéria escura e massa do buraco negro com propriedades das galáxias como raio efetivo, massa estelar, dispersão de velocidades central e razão de luminosidade bojo/total. Muitas outras propriedades poderiam ser incluídas nesta análise, mas este pequeno conjunto permite uma análise inicial dos dados direcionada ao crescimento das galáxias, seja em massa, raio ou distribuição de luz e matéria.

3.1 Distribuições da Fração de Matéria Escura Efetiva e a Massa do Buraco Negro nas subamostras definidas por D4000

Esta análise começa estudando a distribuição das quantidades definidas no capítulo anterior: f_{DM}^{eff} e M_{BH}. Com relação às subamostras associadas a D_{4000}, são exibidas as respectivas distribuições na Figura 23. Nos painéis superiores desta figura são apresentadas as subamostras considerando todo o intervalo de massa disponível ($10.2 \leq \log(M/M_{\odot}) \leq 11.8$). Testes de comparação de duas amostras (t-teste, Kolmogorov-Smirnov e permutação) indicam que não há diferença significativa, a 95% de confiança, entre f_{DM}^{eff} para objetos com valores maiores ou menores que $D_{4000} = 1.6$. Por outro lado, os mesmos testes estatísticos indicam que a massa do buraco negro é significativamente menor na subamostra com $D_{4000} < 1.6$, que possui $\log(M_{BH}/M_{\odot}) \simeq (6.44 \pm 0.36)$ em média, contra $\log(M_{BH}/M_{\odot}) \simeq (6.94 \pm 0.37)$ da amostra com $D_{4000} \geq 1.6$.

Viu-se na Seção 2.2.4 que as subamostras definidas em termos de D4000 apresentam diferentes intervalos de massa, o que pode enviesar as conclusões. Por esta razão, os testes estatísticos de comparação de duas amostras foram refeitos considerando apenas o intervalo de massa $10^{10.2} < M_{\star} < 10^{10.6}\ M_{\odot}$. As distribuições para este intervalo são apresentadas nos painéis inferiores da Figura 23. Os testes estatísticos reforçam o resultado anterior, ou seja, a fração de matéria escura não é afetada pela divisão em objetos com último surto de formação estelar ocorrido há mais ou menos 1 Gyr. Simultâneamente, a massa do buraco negro é menor para objetos com D4000 < 1.6, assim como quando todo o intervalo de massa disponível é considerado. Ou seja, esta diferença não parece ser devida às massas sistematicamente menores da amostra "jovem".

Figura 23 – Histogramas da f_{DM}^{eff} e M_{BH} considerando D4000.



Legenda: Histogramas da fração de matéria escura efetiva e da massa do buraco negro. Os painéis superiores correspondem a dados sem restrição em massa estelar. O painéis inferiores, correspondem aos histogramas com dados em $10^2 \leq M_* \leq 10^6$ $M_\odot$. Fonte: Autoria própria, 2024.

3.2 Relações envolvendo a Fração Efetiva de Matéria Escura

Serão agora exploradas possíveis diferenças nas relações de escala entre f_{DM}^{eff} e outras propriedades relevantes das galáxias. São elas a massa estelar ($M_\star$), a razão de luminosidade bojo-total (B/T), o raio efetivo (R_e) e a dispersão de velocidades das estrelas (σ_e) neste raio. Na Figura 24 são mostradas estas relações para a amostra completa, sem subdivisões de qualquer tipo. É importante salientar que os gráficos desta e das demais figuras presentes nas próximas subsessões foram elaborados utilizando a biblioteca *Seaborn*

da linguagem *Python*. [1] Além disso, um ajuste linear com um intervalo de confiança de 95% é incluído apenas para facilitar a interpretação das relações.

Nos painéis 2 e 4 da Figura 24 identificam-se duas relações lineares importantes: (i) a fração de matéria escura cresce com a dispersão de velocidades central – este resultado relaciona-se com a maneira com que a massa dinâmica e a própria f_{DM}^{eff} foram determinadas; e (ii) a fração de matéria escura decresce com a razão B/T – este resultado está asssociado ao fato de a razão B/T se correlacionar com o índice de concentração, $C = R_{90}/R_{50}$, portanto maiores B/T indicam objetos menos compactos e que possuem menores densidades estelares em R_e, levando a uma menor f_{DM}^{eff}.

Ainda na Figura 24, no painel 1, vê-se a relação entre a fração efetiva de matéria escura e a massa estelar das galáxias. Primeiramente, nota-se que a massa estelar possui uma relação não-linear com a fração efetiva de matéria escura e, ao mesmo tempo, as barras de erro são claramente maiores do que nas outras relações. Nota-se ainda que entre $10^{10.4}$ e $10^{10.7}$ $M_\odot$ há uma queda da fração efetiva de matéria escura com a massa estelar, enquanto há uma mudança de comportamento a partir de $10^{10.7}$ $M_\odot$, com um crescimento da fração efetiva de matéria escura com a massa estelar das galáxias. Este resultado pode ser entendido ao se recordar da Equação 2.12. A fração de matéria escura depende da massa estelar e da massa dinâmica calculadas dentro do raio efeitvo. O crescimento em massa estelar mais ou menos concentrado em R_e pode levar a diferenças na estimativa de f_{DM}^{eff}. O resultado até então apresentado, indica que até $10^{10.7}$ $M_\odot$, a massa estelar cresceu mais que a massa dinâmica dentro de R_e; ocorrendo uma inversão de comportamento para massas maiores.

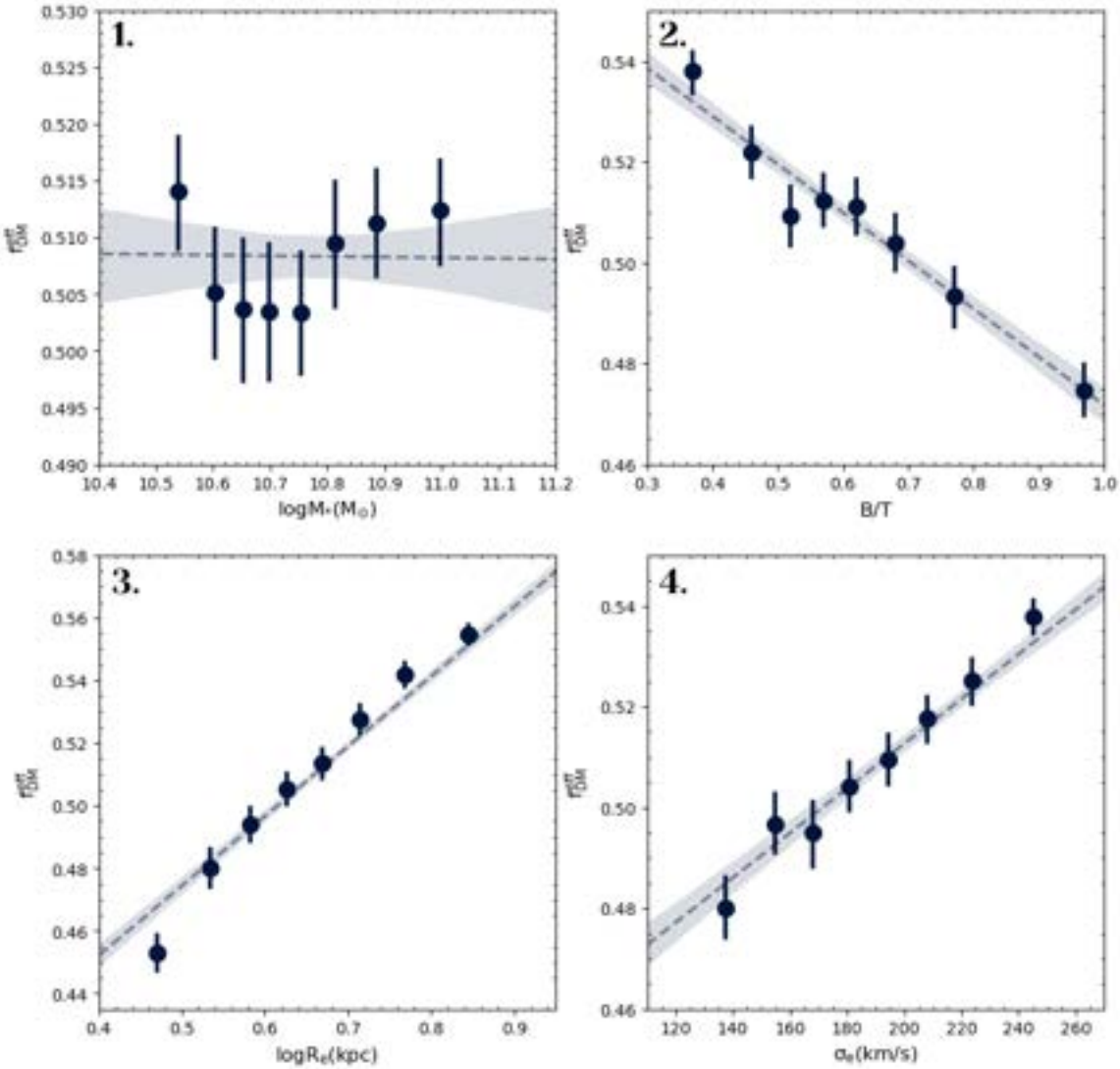
No painel 3, observa-se a relação entre a fração efetiva de matéria escura e o raio efetivo das galáxias, uma relação que também exibe um desvio da linearidade, com crescimento aproximadamente quadrático, tal que objetos menores que $R_e \approx 4$ kpc têm um crescimento mais intenso, enquanto objetos maiores que $R_e \approx 4$ kpc continuam a ter um crescimento da fração de matéria escura, porém com menor intensidade.

Ou seja, f_{DM}^{eff} cresce com R_e mas o ritmo de crescimento varia conforme o tamanho das galáxias. Isto é complementar ao comportamento da massa estelar, discutido anteriormente. O crescimento mais intenso de R_e abaixo de 4 kpc sugere que galáxias menos massivas crescem de maneira diferente que galáxias mais massivas, afetando a estimativa central da fração de matéria escura. O comportamento geral de aumento da fração de matéria escura com o raio efetivo deve-se ao fato de em menores raios haver maior densidade estelar, um resultado conhecido desde os trabalhos de (TORTORA et al., 2012; TORTORA et al., 2018).

Para verificar se estes comportamentos na amostra completa possuem alguma

[1] Em particular a função *seaborn.regplot*. Para mais informações acesse: <https://seaborn.pydata.org/generated/seaborn.regplot.html>.

Figura 24 – Fração de matéria escura em função das propriedades das galáxias para a amostra geral.



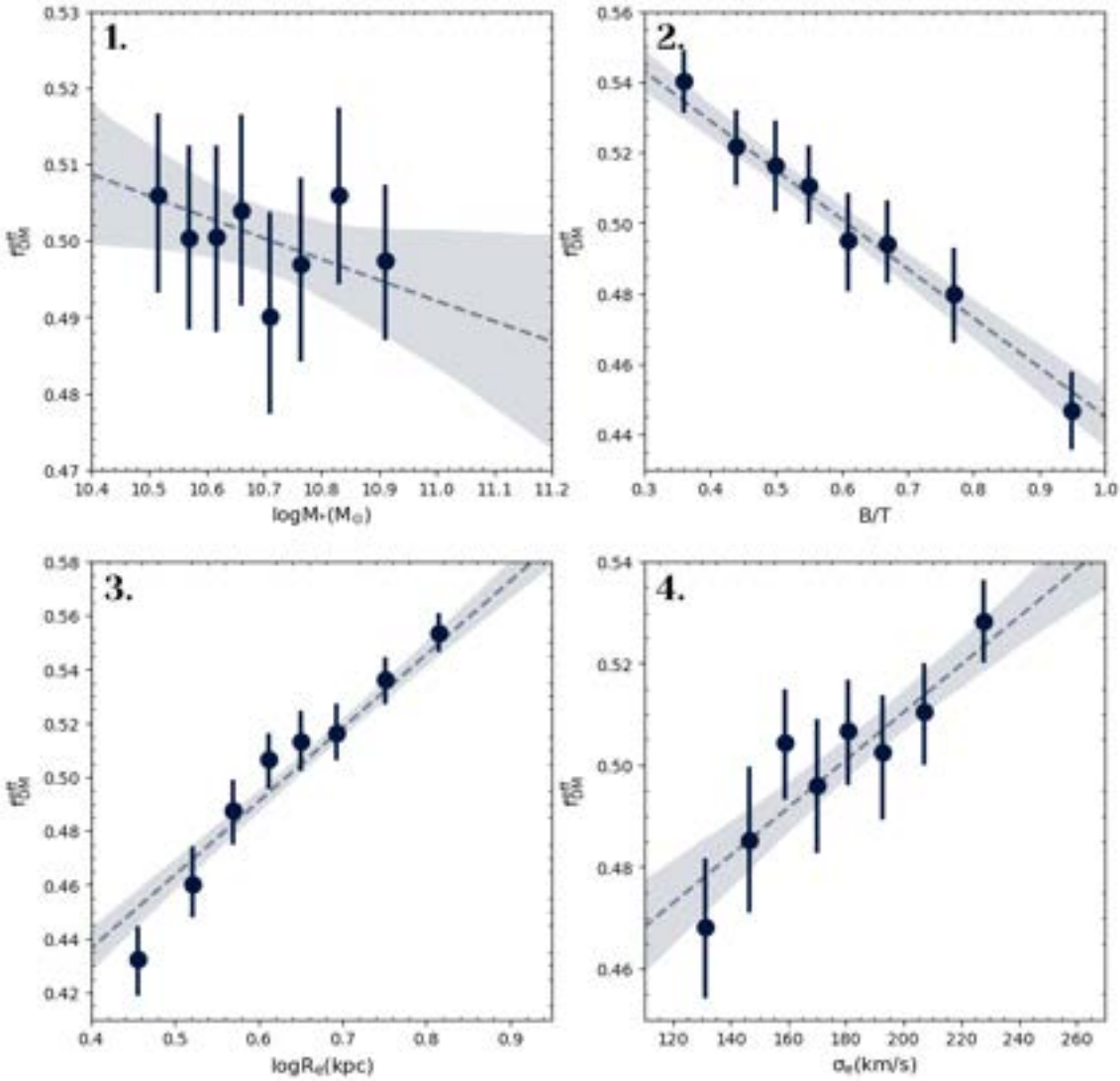
Legenda: Fração efetiva de matéria escura (f_{DM}^{eff}) em função da massa estelar (M_*), razão de luminosidade bojo-total (B/T), raio efetivo (R_e) e dispersão de velocidades (σ_e) para a amostra completa. Fonte: Autoria própria, 2024.

dependência com o ambiente, foram definidas duas subamostras, uma com $\Sigma_5 > 1.85$, correspondendo a ambientes densos (grupos e aglomerados); e outra com $\Sigma_5 < 0.17$, correspondendo a ambiente de baixa densidade (campo). Estes valores de Σ_5 equivalem aos primeiro e terceiro quartis da distribuição desta variável, como pode ser visto na Figura 22. Embora definidos estatisticamente para esta amostra, os valores correspondem majoritariamente a galáxias em ambiente de aglomerados e campo, respectivamente – vide Figura 3 de Lopes et al. (2016).

Os resultados são apresentados nas Figuras 25 e 26, onde não se percebem diferenças significativas para o comportamento da fração de matéria escura em função do ambiente. Contudo, nota-se um desvio menor da linearidade no painel superior esquerdo da Figura

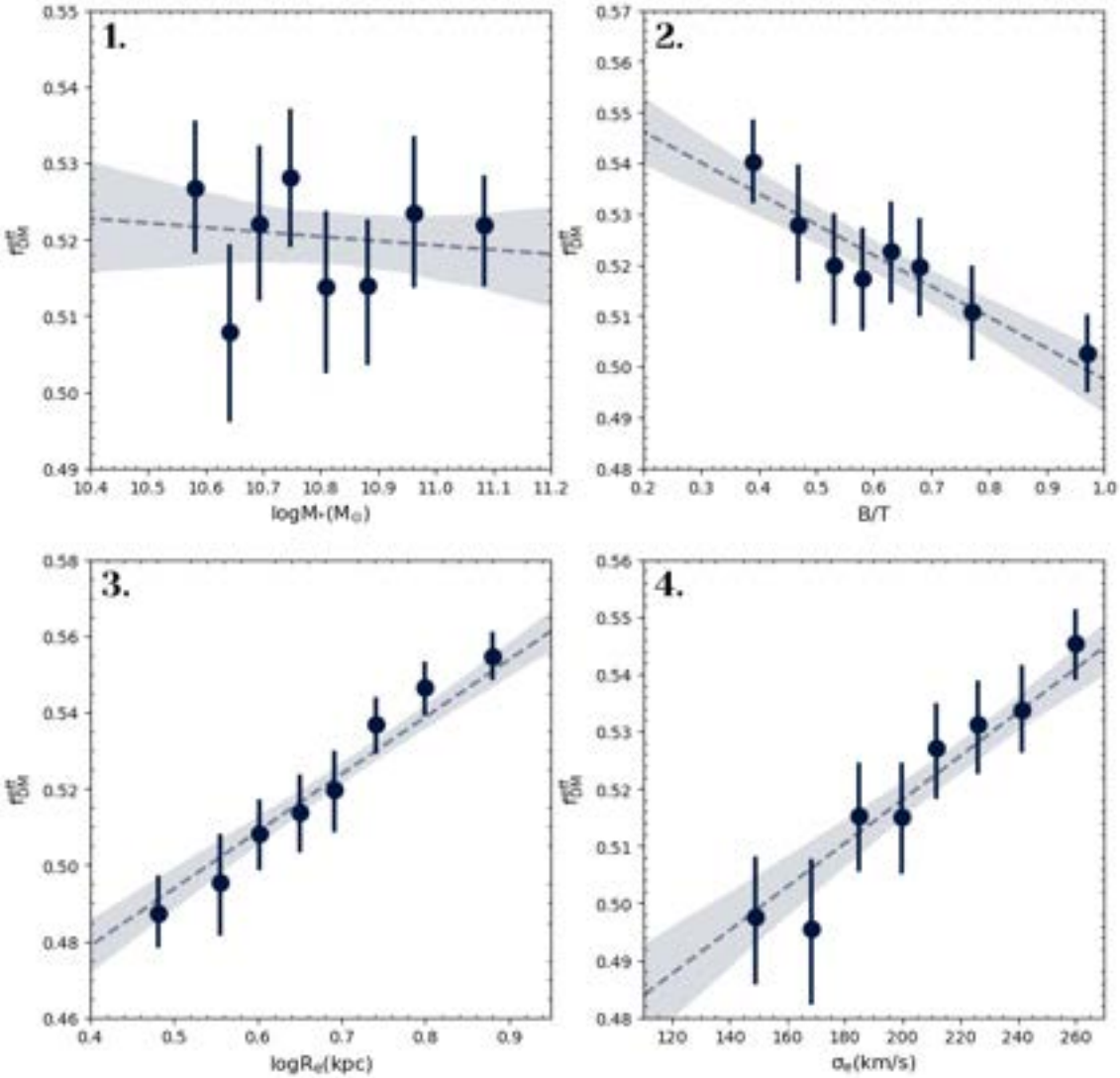
25, que relaciona f_{DM}^{eff} com a massa estelar para $\Sigma_5 < 0.17$. No caso de $\Sigma_5 > 1.85$ esta relação com a massa fica um pouco mais ruidosa, assim como as relações envolvendo B/T e σ_e.

Figura 25 – Fração de matéria escura em função das propriedades das galáxias com $(\Sigma_5) < 0.17$



Legenda: Fração efetiva de matéria escura (f_{DM}^{eff}) em função da massa estelar (M_*), razão de luminosidade bojo-total (B/T), raio efetivo (R_e) e dispersão de velocidades (σ_e) considerando apenas galáxias com $(\Sigma_5) < 0.17$. Fonte: Autoria própria, 2024.

Figura 26 – Fração de matéria escura em função das propriedades das galáxias com $(\Sigma_5) > 1.85$.



Legenda: Fração efetiva de matéria escura (f_{DM}^{eff}) em função da massa estelar (M_*), razão de luminosidade bojo-total (B/T), raio efetivo (R_e) e dispersão de velocidades (σ_e) considerando apenas galáxias com $(\Sigma_5) > 1.85$. Fonte: Autoria própria, 2024.

3.2.1 Dependência da Fração Efetiva de Matéria Escura com D_{4000}

Nesta seção, serão consideradas possíveis diferenças entre as relações discutidas na sessão 3.1 comparando as subamostras subdivididas de acordo com o índice D_{4000}, ou seja, galáxias cujo último surto de formação estelar foi mais recente ($D_{4000} < 1.6$) e galáxias cujo último surto de formação estelar é mais antigo ($D_{4000} \geq 1.6$).

As médias das propriedades R_e, $M_\star$, B/T e σ_e são apresentadas na Tabela 1, onde percebe-se que para R_e e f_{DM}^{eff} não há diferença significativa entre as duas subamostras, de acordo com os testes t, KS e de permutação (vide Capítulo 2), para um nível de confiança de 95%. O mesmo não pode ser dito para σ_e, B/T e M_{BH}, uma vezes que os testes indicam

diferenças significativas entre as subamostras. Na Tabela 1 os resultados dos testes são indicados pelas letras S e N, com destaque em vermelho para os casos onde houve diferença estatística detectada.

Tabela 1 – Comparação das subamostras de acordo com o Indice D4000.

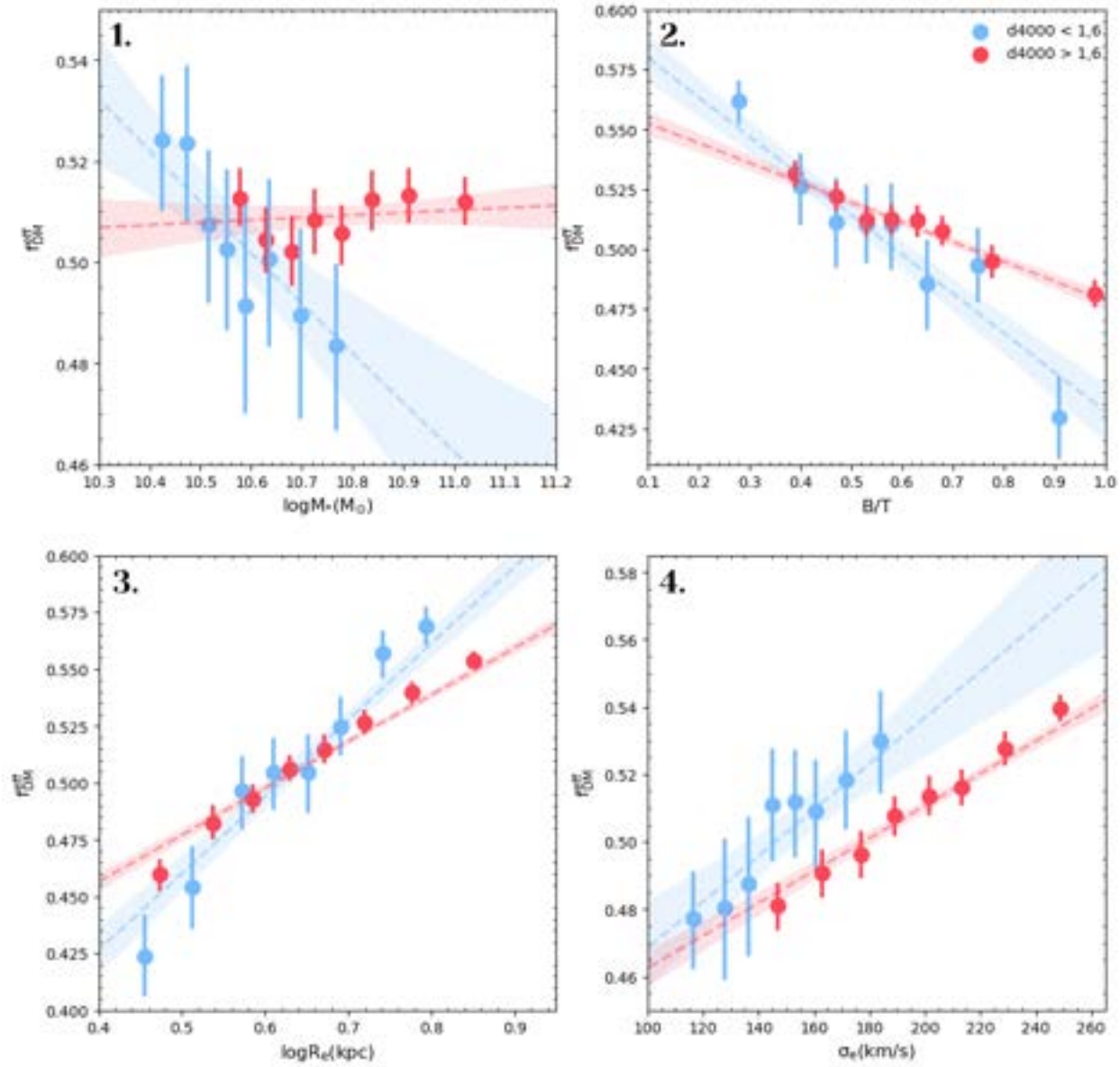
Propriedades	$D4000 < 1.6$	$D4000 > 1.6$	Testes
$R_e(kpc)$	4.49 ± 0.05	4.83 ± 0.02	N
$\sigma_e(km/s)$	150.6 ± 0.9	197.1 ± 0.5	S
B/T	0.57 ± 0.01	0.63 ± 0.01	S
$M_*(M_\odot)$	10.58 ± 0.01	10.78± 0.01	S
f_{DM}^{eff}	0.50 ± 0.01	0.50 ± 0.01	N
$M_{BH}(M_\odot)$	6.56 ± 0.01	6.97 ± 0.01	S

Legenda: Valores médios do raio efetivo (R_e) (log), dispersão de velocidades (σ_e), razão bojo-total (B/T), massa estelar (M_*) (log), fração efetiva de matéria escura (f_{DM}^{eff}) e massa do buraco negro (M_{BH}) (log) das galáxias com $D4000 < 1.6$ e $D4000 > 1.6$. Testes estatísticos indicando diferença significativa (S) ou não (N) entre as subamostras.

Portanto, apesar de as galáxias com $D4000 < 1.6$ e $D4000 \geq 1.6$ possuirem em média mesmos raios efetivos e fração de matéria escura, a subamostra com $D4000 \geq 1.6$ possuem maiores dispersão de velocidades, razão B/T e massa do buraco negro. Este resultado se mantém, mesmo considerando a amostra contida no intervalo $10^{10.2} - 10^{10.6}$ $M_\odot$.

Em seguida, as subamostras são analisadas com o objetivo de verificar tendências de f_{DM}^{eff} e M_{BH} em função das demais propriedades, inicialmente sem considerar possíveis efeitos ambientais. Os resultados são apresentados na Figura 27. A simples inspeção visual desta figura revela que as subamostras apresentam um comportamento distinto em todas as relações estudadas. O painel 1 da figura trata da relação entre a fração efetiva de matéria escura e a massa estelar das subamostras. Nota-se que a divisão dos dados em termos de D_{4000} permite entender melhor o comportamento observado na amostra completa, ao observar uma queda de f_{DM}^{eff} com $M_\star$ com recuperação a partir de $\sim 10^{10.7}$ $M_\odot$. Percebe-se agora que o comportamento aproximadamente linear de queda deve-se aos objetos com $D_{4000} < 1.6$ enquanto os objetos com $D_{4000} \geq 1.6$ possuem f_{DM}^{eff} entre 0.50 e 0.52, com poucas variações.

Figura 27 – Fração efetiva de matéria escura em função das propriedades das galáxias considerando D4000.



Legenda: Fração efetiva de matéria escura (f_{DM}^{eff}) em função da massa estelar (M_*), razão de luminosidade bojo-total (B/T), raio efetivo (R_e) e dispersão de velocidades (σ_e) considerando as subamostras com $D_{4000} < 1.6$ (em azul) e $D_{4000} \geq 1.6$ (em vermelho). Fonte: Autoria própria. 2024.

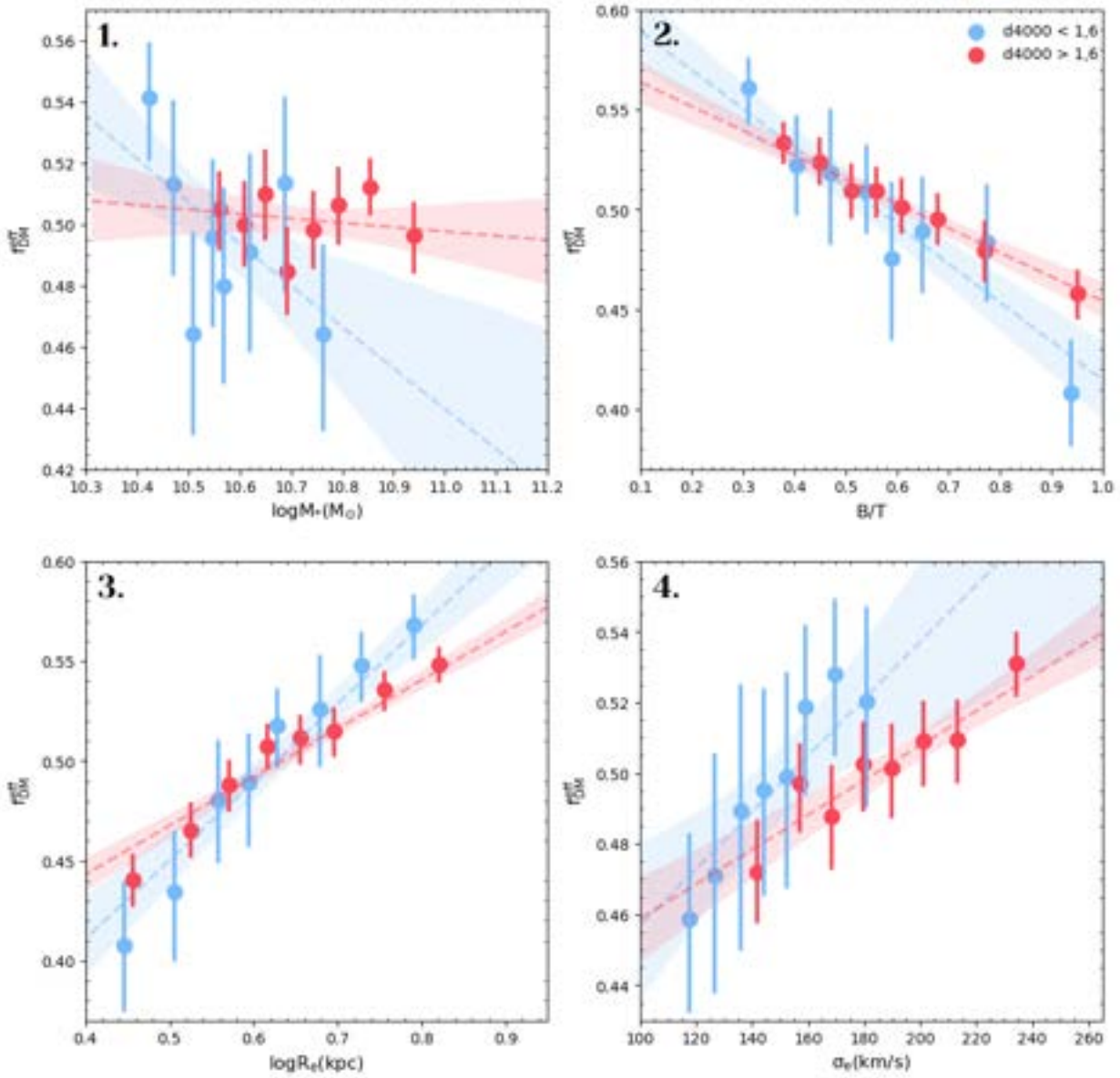
O painel 2 da figura exibe a relação entre a f_{DM}^{eff} e a razão B/T das galáxias. Neste caso, embora o comportamento da amostra completa se matenha, vê-se que as inclinações das retas ajustadas para cada subamostra são distintas, sendo a queda mais expressiva no caso de objetos com $D_{4000} < 1.6$. Além disso, nota-se que esta população "jovem"possui um intervalo de fração de matéria efetiva maior (aproximadamente entre 0.44 e 0.60). O painel 3 expõe a relação entre f_{DM}^{eff} e o R_e das galáxias, verificando-se que para ambas as subamostras a relação é de crescimento, com comportamentos similares ao da amostra

completa. Mais uma vez, nota-se que a amplitude da variação de f_{DM}^{eff} é maior para objetos com $D_{4000} < 1.6$.

Finalmente, o painel 4 indica a relação entre a f_{DM}^{eff} e a σ_e das estrelas nas galáxias. As galáxias da amostra "jovem"possuem velocidade menores, variando entre 100 km/s e 200 km/s, e um intervalo diferente e bem definido de matéria escura (entre 0.48 e 0.55). Enquanto as galáxias de população estelar "velha"possuem dispersões de velocidade maiores, refletindo sua maior massa, com as velocidades variando entre 150 e 250 km/s. Nota-se também que as regressões apresentam diferenças nos coeficientes de ajuste da relação linear.

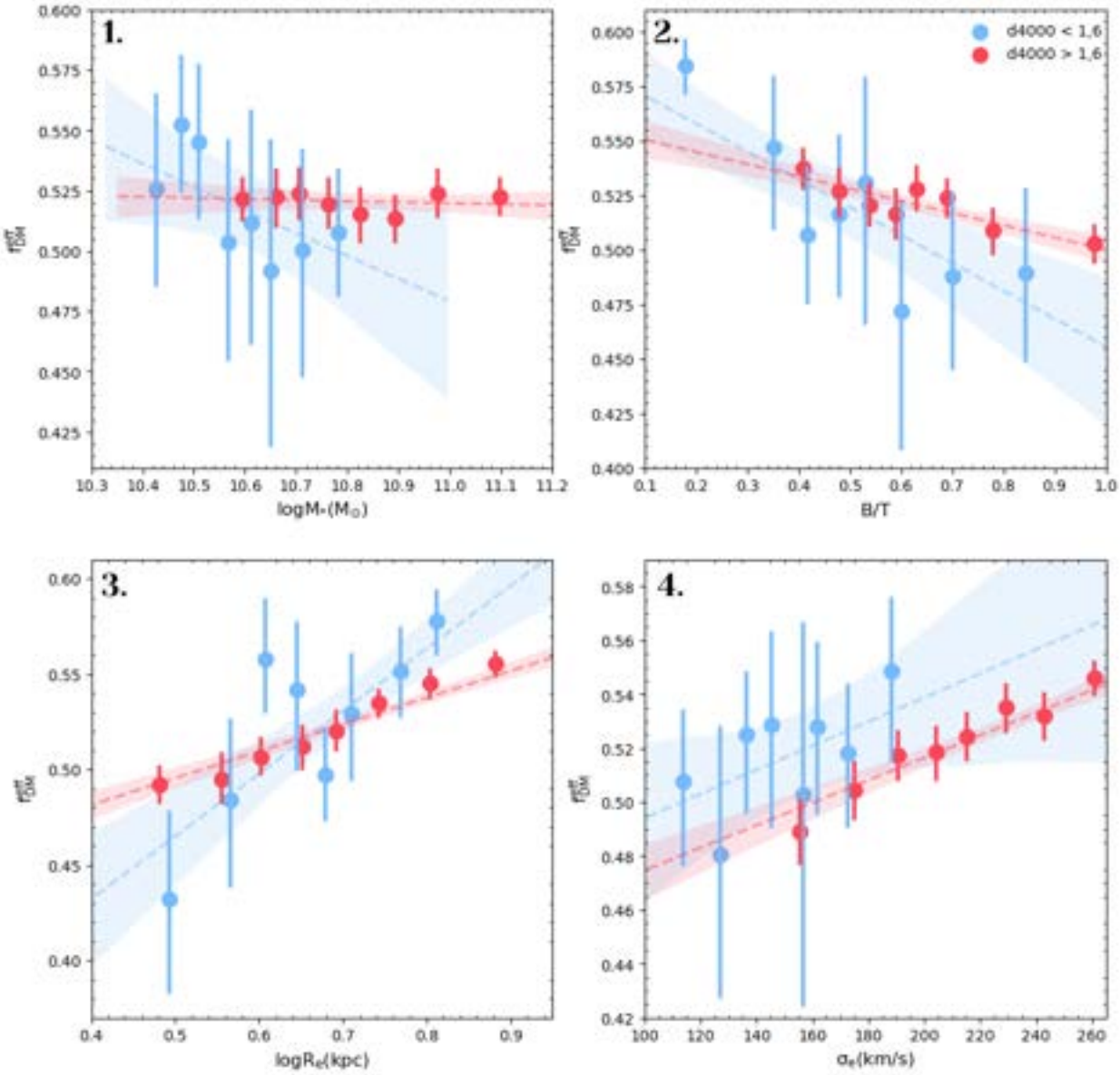
As Figuras 28 e 29 são semelhantes à Figura 27, porém seguem o mesmo intervalo de Σ_5 das Figuras 25 e 26, isto é, $(\Sigma_5) < 0.17$ e $(\Sigma_5) > 1.85$, respectivamente. De modo geral, o comportamento observado anteriormente na Figura 27 se mantém, com relações um pouco mais ruidosas e barras de erros maiores, o que leva a uma primeira conclusão sobre esta análise: embora haja forte dependência das relações envolvendo a fração de matéria escura considerando-se o tempo desde o último surto de formação estelar ocorrido nas galáxias, esta dependência não parece regulada pelo ambiente.

Figura 28 – Fração efevetiva de matéria escura em função das propriedades das galáxias considerando D4000 com $(\Sigma_5) < 0.17$.



Legenda: Fração efetiva de matéria escura (f_{DM}^{eff}) em função da massa estelar (M_*), razão de luminosidade bojo-total (B/T), raio efetivo (R_e) e dispersão de velocidades (σ_e) considerando as subamostras com $D_{4000} < 1.6$ (em azul) e $D_{4000} \geq 1.6$ (em vermelho) com $(\Sigma_5) < 0.17$. Fonte: Autoria própria, 2024.

Figura 29 – Legenda: Fração efetiva de matéria escura em função das propriedades das galáxias considerando D4000 com $(\Sigma_5) > 1.85$.



Fração efetiva de matéria escura (f_{DM}^{eff}) em função da massa estelar (M_*), razão de luminosidade bojo-total (B/T), raio efetivo (R_e) e dispersão de velocidades (σ_e) considerando as subamostras com $D_{4000} < 1.6$ (em azul) e $D_{4000} \geq 1.6$ (em vermelho) com $(\Sigma_5) > 1.85$. Fonte: Autoria própria, 2024.

3.2.2 Dependência da Fração Efetiva de Matéria Escura com regiões no diagrama WHAN

Como descrito no Capítulo 2, os dados também foram divididos de acordo com as regiões ocupadas pelas galáxias no diagrama WHAN (FERNANDES et al., 2011b), ou seja, galáxias com formação estelar (SF), AGNs fortes ou Seyferts (AGN S), AGNs fracas (AGN W), galáxias passivas (Passive) e aposentadas (Retired). As propriedades médias

das galáxias são apresentadas na Tabela 2, onde a coluna "Teste"apresenta o resultado do teste de Conover (vide Seção 2.3) que indica a existência de pelo menos duas subamostras com diferenças significativas entre suas médias, a um nível de confiança de 90%. Destaca-se o aumento de σ_e, B/T, M_* e M_{BH} indo da subamostra SF para a Passive; enquanto há um leve decréscimo em f_{DM}^{eff}, sendo esta variável portanto anticorrelacionada com as anteriores; e, finalmente, não vê-se uma tendência relativa ao raio efetivo médio das subamostras WHAN.

Tabela 2 – Comparação das subamostras de acordo com o Diagrama WHAN.

Propriedades	SF	AGN S	AGN W	Retired	Passive	Teste
$R_e(kpc)$	4.97 ± 0.09	4.53 ± 0.06	5.03 ± 0.07	4.78 ± 0.03	4.41 ± 0.04	S
$\sigma_e(km/s)$	143.9 ± 1.9	159.7 ± 1.2	174.25 ± 1.4	199.3 ± 0.6	212.7 ± 0.9	S
B/T	0.52 ± 0.01	0.57 ± 0.01	0.56 ± 0.01	0.64 ± 0.01	0.71 ± 0.01	S
$M_*(M_\odot)$	10.56 ± 0.01	10.62 ± 0.01	10.70 ± 0.01	10.79 ± 0.01	10.82± 0.01	S
f_{DM}^{eff}	0.55 ± 0.01	0.51 ± 0.01	0.52 ± 0.01	0.50 ± 0.01	0.49 ± 0.01	S
$M_{BH}(M_\odot)$	6.49 ± 0.02	6.64 ± 0.01	6.80± 0.01	6.98 ± 0.01	7.08 ± 0.01	S

Legenda: Valores médios do raio efetivo (R_e) (log), velocidade de dispersão (σ_e), razão bojo-disco (B/T), massa estelar (M_*) (log), fração efetiva de matéria escura (f_{DM}^{eff}) e massa do buraco negro (M_{BH}) (log) das galáxias com formação estelar (SF), AGN forte (AGN S), AGN fracas (AGN W), retired (aposentadas) e passive (passivas). Diagnóstico do teste de Conover.

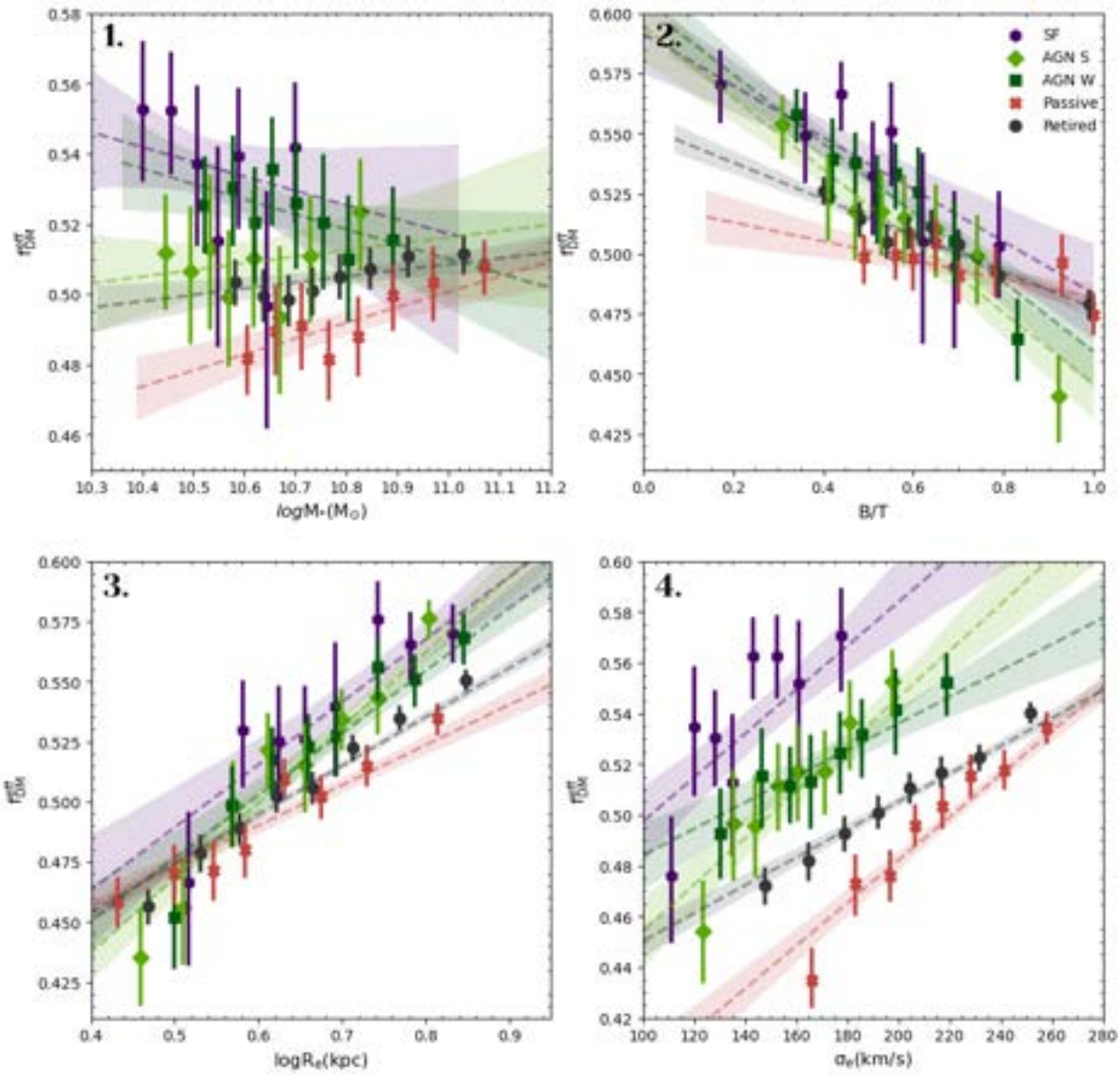
A Figura 30 mostra as mesmas relações exploradas nas duas sessões anteriores, considerando a divisão resultante do diagrama WHAN. O painel 1 da figura trata da relação entre a f_{DM}^{eff} e a $M_\star$ das subamostras. Nota-se que as galáxias passivas apresentam uma relação de crescimento de f_{DM}^{eff} com $M_\star$. Este comportamento é compartilhado pelas *retired* e AGN S, apesar de seus ajustes terem maiores resíduos. Ao passo que as SF apresentam uma relação de decréscimo de f_{DM}^{eff} com $M_\star$, compartilhado pela amostra AGN W, esta com ajuste mais ruidoso.

O painel 2 da figura exibe a relação entre a f_{DM}^{eff} e a razão de luminosidade bojo/total. Nota-se que todos os tipos de galáxias apresentam uma relação de decréscimo em relação à fração efetiva de matéria escura. As regiões de confiança das retas ajustadas indicam que é difícil discernir comportamentos específicos para cada subamostra, embora seja possível destacar um decrescimento mais lento com B/T para as passivas, além de uma amplitude menor de variação f_{DM}^{eff} entre 0.47 e 0.52.

O painel 3 expõe a relação entre f_{DM}^{eff} e o R_e das galáxias. De maneira geral, todas as subamostras apresentam um comportamento de crescimento, com uma disposição semelhante dos bins. Para raios efetivos menores que 4 kpc há um desvio da linearidade, como observado na seção anterior, revelando uma mundança no ritmo de crescimento em torno deste raio. Contudo, as diferentes subamostras não se distinguem significativamente

umas das outras.

Figura 30 – Fração elefetiva de matéria escura em função das propriedades das galáxias considerando o Diagrama WHAN.



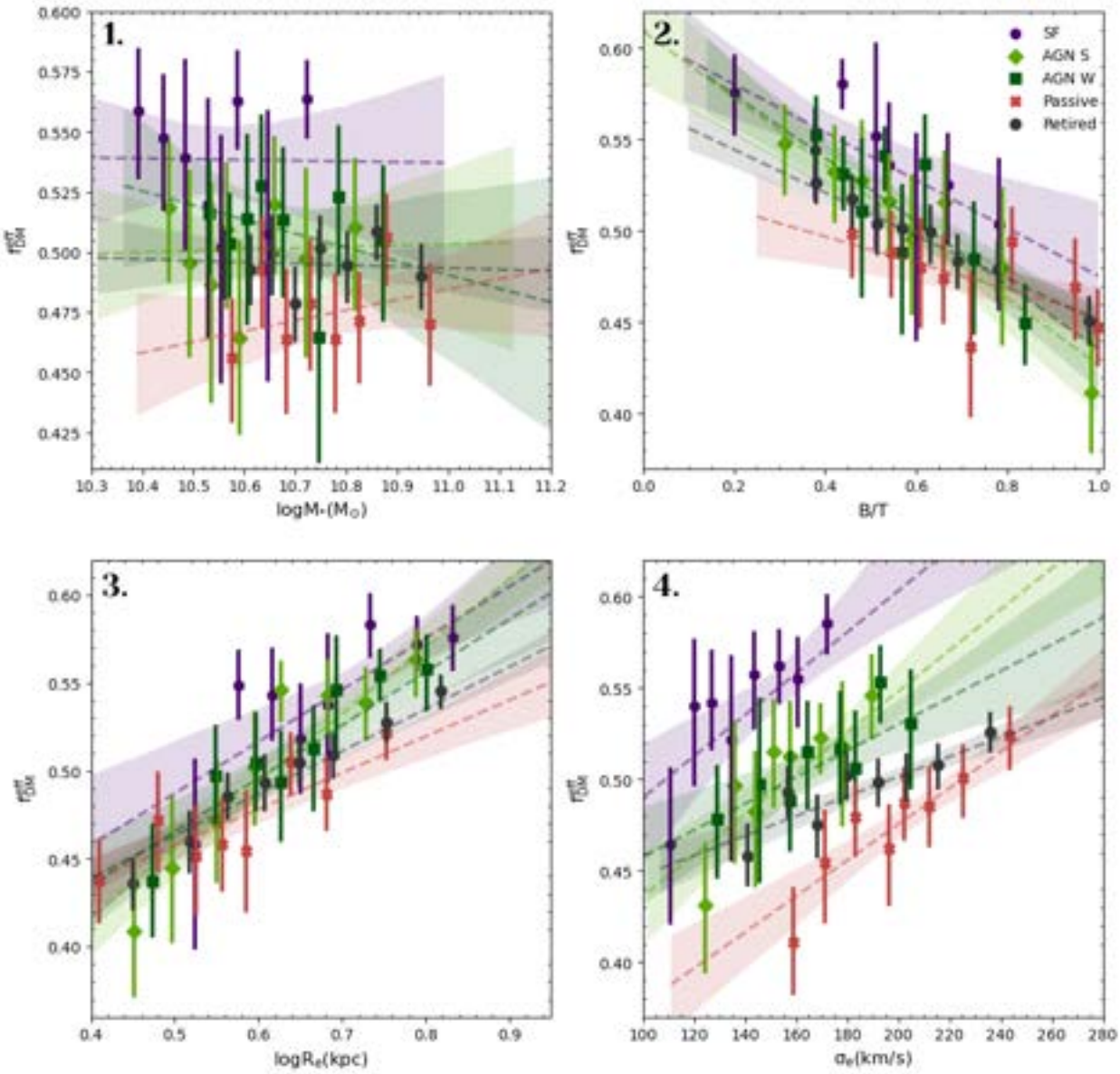
Legenda: Fração efetiva de matéria escura (f_{DM}^{eff}) em função da massa estelar (M_*), razão de luminosidade bojo-total (B/T), raio efetivo (R_e) e dispersão de velocidades (σ_e) para as galáxias com formação estelar (SF) em roxo, galáxias com núcleo ativo fortes (AGN S) em verde claro, galáxias com núcleo ativo fracas (AGN W) em verde escuro, aposentadas (Retired) em preto e passivas (Passive) em vermelho. Fonte: Autoria própria, 2024.

Finalmente, o painel 4 mostra a relação entre a f_{DM}^{eff} e a σ_e. Das quatro propriedades estudadas, esta é a que mais apresenta diferenças entre os tipos de galáxias. As galáxias com formação estelar apresentam velocidades menores (até 175 km/s) mas frações maiores de matéria escura (entre 0.50 e 0.60), as AGN S e W possuem dispersões de velocidades um pouco maiores (até 250 km/s) porém as frações são menores (até 0.56). Por fim, as

aposentadas e passivas possuem dispersões de velocidade maiores (chegando a 270 km/s), e frações menores de matéria escura, entre 0.46 e 0.54 e entre 0.43 e 0.54, respectivamente. É perceptível que as regressões apresentam coeficientes angulares distintos entre as subamostras, revelando uma dependência significativa do comportamento de f_{DM}^{eff} em relação às regiões do diagrama WHAN.

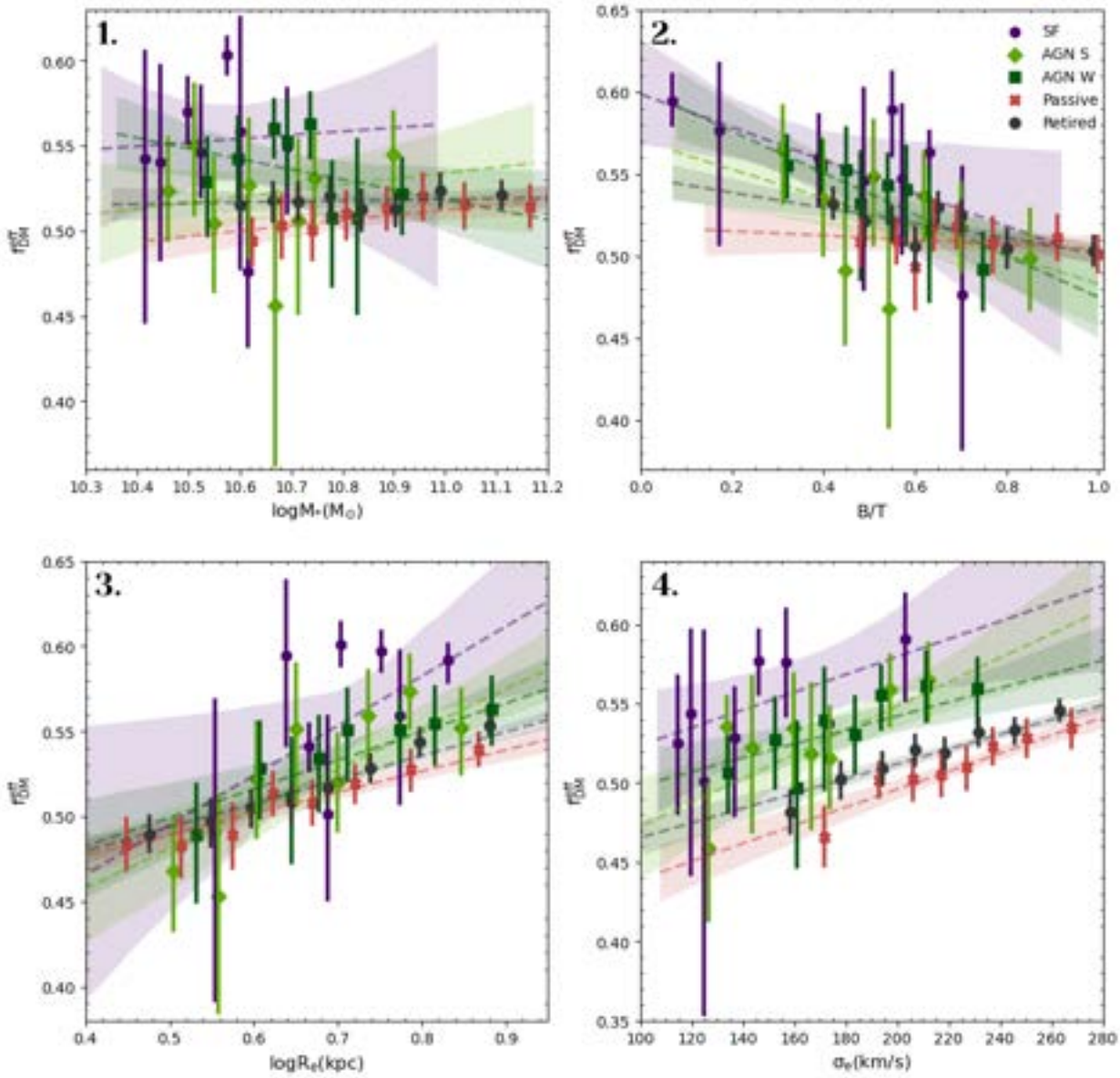
As Figuras 31 e 32 abaixo apresentam as mesmas propriedades da figura 30, distinguindo-se no que diz respeito aos intervalos de Σ_5 escolhidos. Como na seção anterior, os comportamentos observados não parecem influenciados pelo ambiente. Além disso, as relações ajustadas ficam significativamente mais ruidosas, prejudicando a identificação de possíveis diferenças entre as subamostras. Uma conclusão parcial é que a dispersão de velocidades é a propriedade que melhor permite distinguir comportamentos da fração de matéria escura em termos das regiões do diagrama WHAN.

Figura 31 – Fração efetiva de matéria escura em função das propriedades das galáxias considerando o Diagrama WHAN para $\Sigma_5 < 0.17$.



Legenda: Fração efetiva de matéria escura (f_{DM}^{eff}) em função da massa estelar (M_*), razão de luminosidade bojo-total (B/T), raio efetivo (R_e) e dispersão de velocidades (σ_e) para as galáxias com formação estelar (SF) em roxo, galáxias com núcleo ativo fortes (AGN S) em verde claro, galáxias com núcleo ativo fracas (AGN W) em verde escuro, aposentadas (Retired) em preto e passivas (Passive) em vermelho para $\Sigma_5 < 0.17$. Fonte: Autoria própria, 2024.

Figura 32 – Fração efetiva de matéria escura em função das propriedades das galáxias considerando o Diagrama WHAN para $(\Sigma_5) > 1.85$.



Legenda: Fração efetiva de matéria escura (f_{DM}^{eff}) em função da massa estelar (M_*), razão de luminosidade bojo-total (B/T), raio efetivo (R_e) e dispersão de velocidades (σ_e) para as galáxias com formação estelar (SF) em roxo, galáxias com núcleo ativo fortes (AGN S) em verde claro, galáxias com núcleo ativo fracas (AGN W) em verde escuro, aposentadas (Retired) em preto e passivas (Passive) em vermelho para $(\Sigma_5) > 1.85$. Fonte: Autoria própria, 2024.

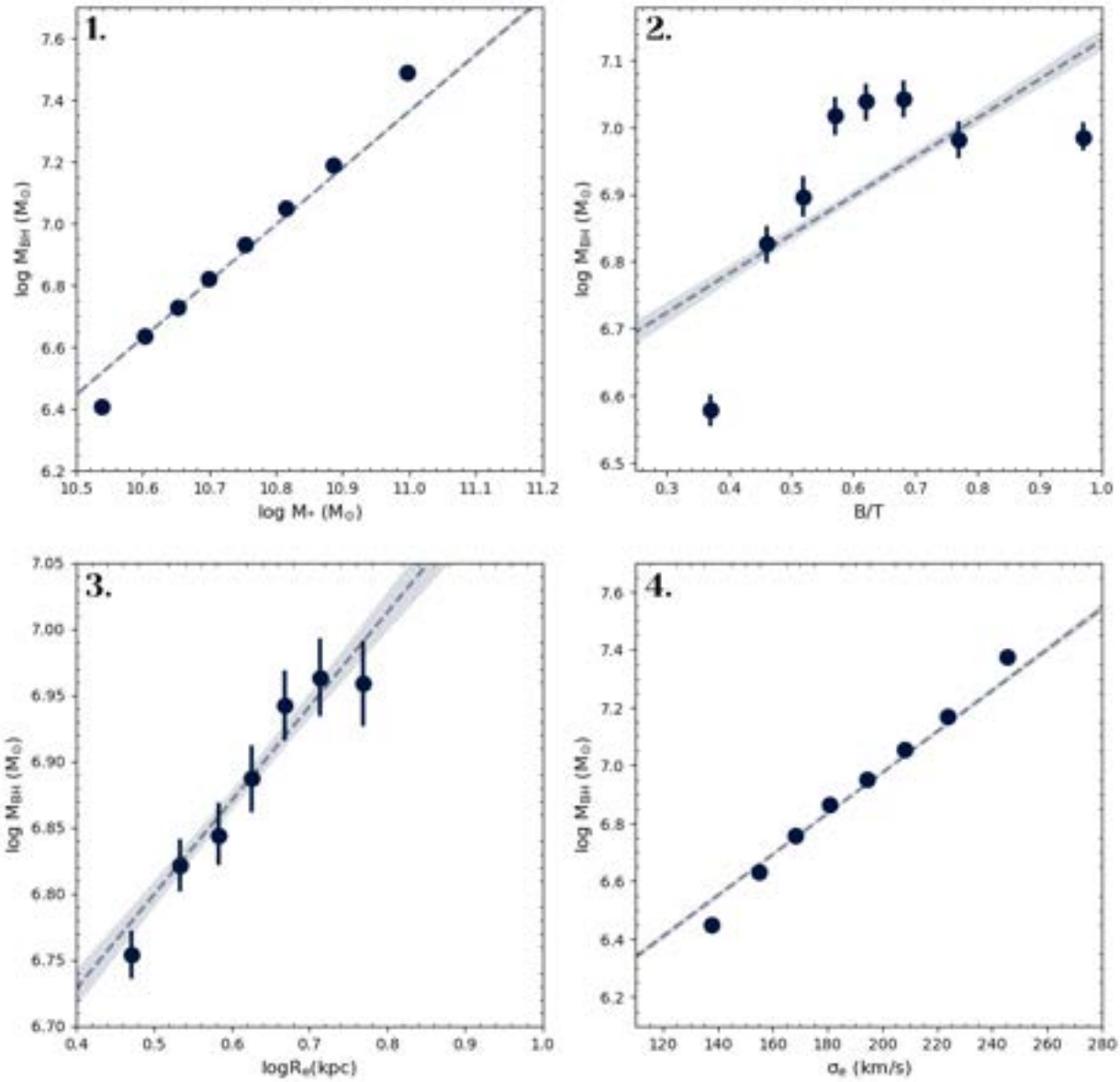
3.3 Relações envolvendo a Massa do Buraco Negro Central

Nesta seção serão exploradas as relações envolvendo as massas dos buracos negros (M_{BH}), estimadas fotometricamente, como descrito no Capítulo anterior, Equação 2.18, seguindo o trabalho de He, Guo e Shao (2022), e as propriedades analisadas na seção

anterior, sendo elas a massa estelar ($M_\star$), a razão bojo/disco (B/T), o raio efetivo (R_e) e a dispersão de velocidade (σ_e).

Inicialmente, foi analisada a amostra completa, sem considerar subdivisões de qualquer tipo. Os resultados são apresentados na Figura 33, onde nota-se que M_{BH} relaciona-se linearmente com $M_\star$ e σ_e com ajustes muito próximos aos dados, como vê-se nos painéis 1 e 4, respectivamente. Este resultado reproduz para a massa do buraco negro, estimada fotometricamente, as relações de escala bem conhecidas e esperadas entre estas variáveis (TREMAINE et al., 2002; VOLONTERI; NATARAJAN; GÜLTEKIN, 2011).

Figura 33 – Massa do buraco negro em função das propriedades das galáxias.



Legenda: Massa do Buraco Negro (M_{BH}) em função da massa estelar (M_*), razão de luminosidade bojo-total (B/T), raio efetivo (R_e) e dispersão de v8elocidades (σ_e) para a amostra geral. Fonte: Autoria própria, 2024.

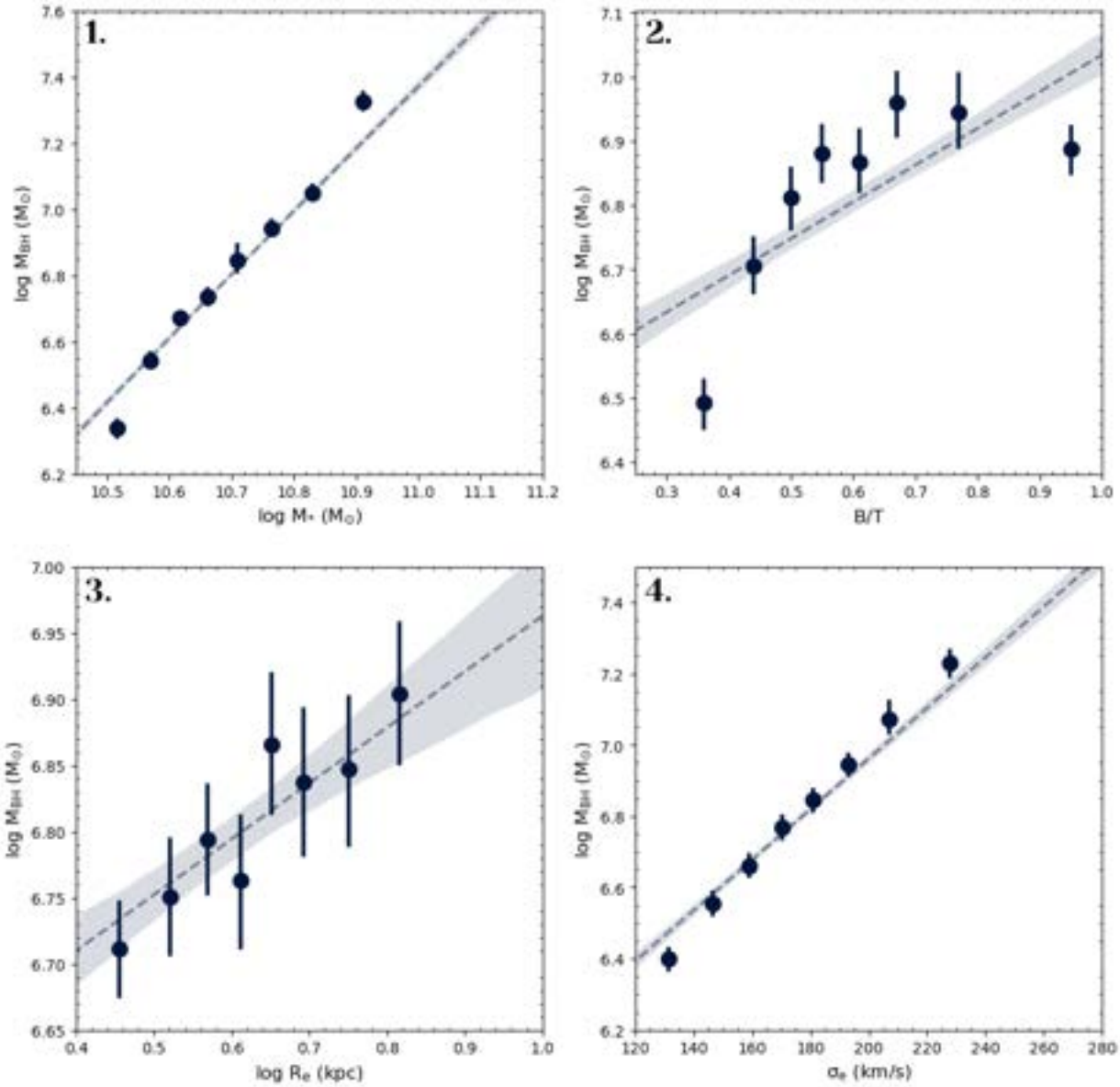
No painel 2, observa-se um desvio da linearidade na relação com B/T, tal que um

crescimento significativo de M_{BH} ocorre para valores de B/T entre 0.30 e 0.65, establizando-se em $\sim 10^7\ M_\odot$. É importante notar que, diferentemente da fração de matéria escura, que possui uma anticorrelação com B/T, a massa do buraco negro correlaciona-se com B/T, pelo menos até B/T≈0.6, sugerindo uma relação mais direta com o crescimento das galáxias do que com sua compacidade, como visto no caso da fração de matéria escura. Finalmente, no painel 3 da figura, observa-se a relação entre M_{BH} e o R_e, uma relação linear ruidosa ou que apresenta um possível desvio da linearidade, onde objetos menores que $R_e \approx 4,5$ têm um crescimento mais intenso do que aqueles com R_e maiores que 4.5.

Para verificar se estes comportamentos na amostra completa possuem alguma dependência com o ambiente, foram definidas, seguindo o exemplo da Seção 2.2.6, duas subamostras, uma com $\Sigma_5 > 1.85$, correspondendo a ambientes densos (grupos e aglomerados); e outra com $\Sigma_5 < 0.17$, correspondendo a ambiente de baixa densidade (campo). Estes valores de Σ_5 equivalem aos primeiro e terceiro quartis da distribuição desta variável. Os resultados são apresentados nas Figuras 34 e 35.

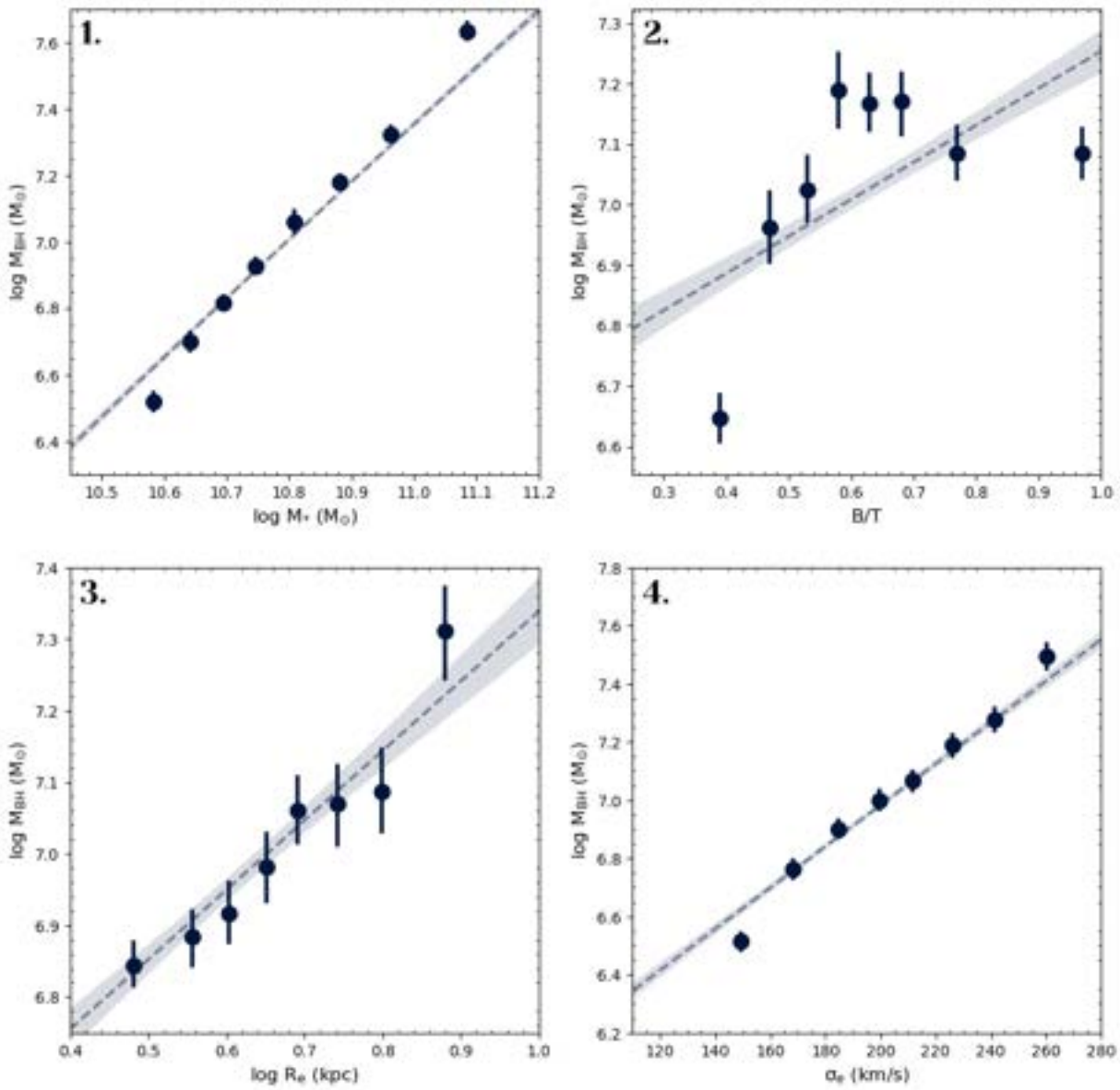
Analisando estas figuras, não se percebem diferenças significativas para o comportamento da massa do burano negro em função do ambiente, com exceção do raio efetivo. Apesar do R_e de ambas as subamostras permanecerem no mesmo intervalo (entre 3 kpc e 8 kpc), as galáxias em ambiente menos densos possuem valores de M_{BH} mais baixos (entre $10^{6.6} M_\odot$ e $10^{6.8} M_\odot$) e mais ruidosos, do que que as galáxias em ambientes mais densos, que apresentam M_{BH} maiores (entre $10^{6.8} M_\odot$ e $10^{7.3} M_\odot$), e comportamento menos ruidoso.

Figura 34 – Massa do Buraco Negro Central em função das propriedades das galáxias com $(\Sigma_5) < 0,17$.



Legenda: Massa do Buraco Negro (M_{BH}) em função da massa estelar (M_*), razão de luminosidade bojo-total (B/T), raio efetivo (R_e) e dispersão de velocidades (σ_e) com $(\Sigma_5) < 0,17$. Fonte: Autoria própria, 2024.

Figura 35 – Massa do Buraco Negro Central em função das propriedades das galáxias com $(\Sigma_5) > 1.85$.

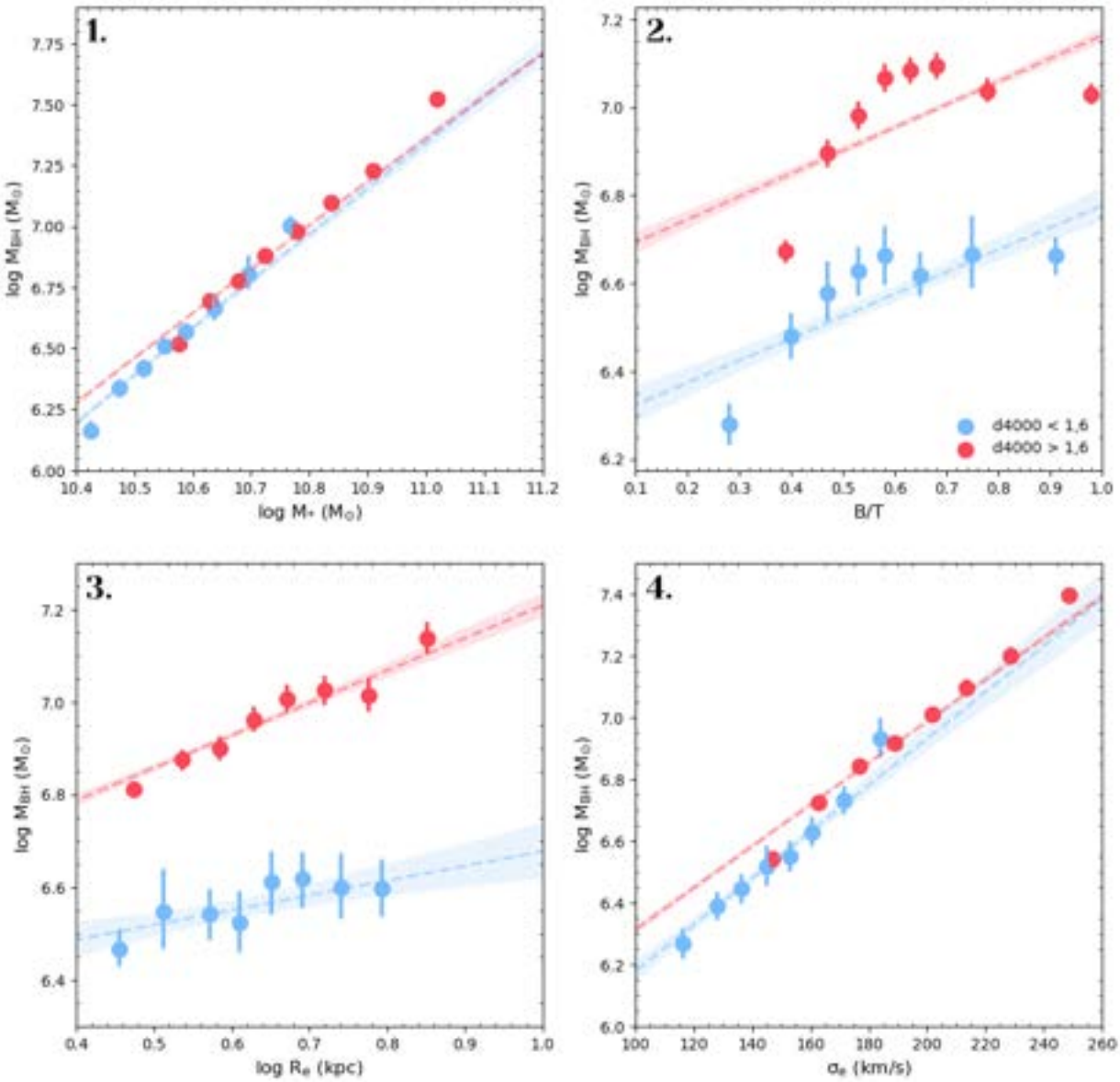


Legenda: Massa do Buraco Negro (M_{BH}) em função da massa estelar (M_*), razão de luminosidade bojo-total (B/T), raio efetivo (R_e) e dispersão de velocidades (σ_e) considerando apenas galáxias com $(\Sigma_5) > 1.85$. Fonte: Autoria própria, 2024.

3.3.1 Dependência da Massa do Buraco Negro com D_{4000}

Nesta seção, serão consideradas possíveis diferenças nas relações discutidas 3.1 comparando as subamostras subdivididas de acordo com o índice D_{4000}, ou seja, galáxias cujo último surto de formação estelar foi mais recente ($D_{4000} < 1.6$) e galáxias cujo último surto de formação estelar é mais antigo ($D_{4000} \geq 1.6$). Inicialmente, estas subamostras serão analisadas sem considerar possíveis efeitos ambientais. Os resultados são apresentados na Figura 36.

Figura 36 – Massa do Buraco Negro em função das propriedades das galáxias considerando D4000.



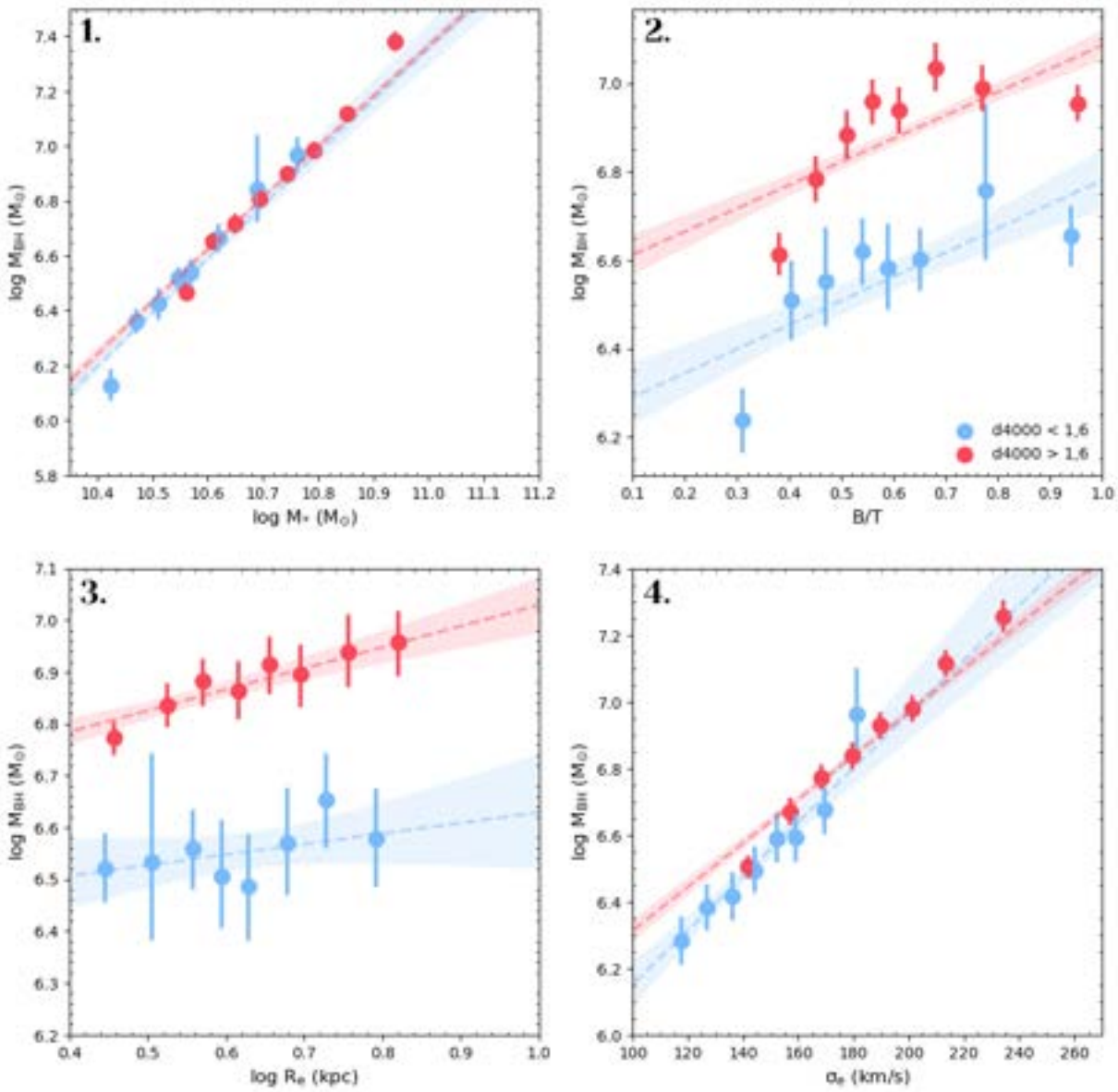
Legenda: Massa do Buraco Negro (M_{BH}) em função da massa estelar (M_*), razão de luminosidade bojo-total (B/T), raio efetivo (R_e) e dispersão de velocidades (σ_e), considerando as subamostras com $D_{4000} < 1.6$ (em azul) e $D_{4000} \geq 1.6$ (em vermelho). Fonte: Autoria própria, 2024.

A inspeção visual desta figura revela que tanto o quadro 1 quanto o 4 apresentam comportamentos similares entre a relação entre M_{BH} e $M_\star$, e a relação entre M_{BH} e a σ_e para as galáxias com $D_{4000} < 1.6$ e $D_{4000} > 1.6$. Apesar de exibirem comportamentos lineares, a subamostra "jovem"apresenta valores de massa estelar menores que a subamostra "velha", variando entre $10^{10.4} M_\odot$ e $10^{10.8} M_\odot$, e $10^{10.6} M_\odot$ e $10^{11} M_\odot$, respectivamente. Assim como dispersões de velocidades menores que a subamostra "velha", variando entre 100 km/s e 190 km/s, e 140 km/s e 245 km/s, respectivamente.

Já os painéis 2 e 3 exibem comportamentos que indicam diferenças entre as subamostras. Verifica-se, por exemplo, que ambas as subamostras apresentam intervalos de R_e parecidos, apesar de se encontrem em intervalos de massa completamente distintos, as galáxias com $D_{4000} > 1.6$ estão entre $10^{6.8} M_\odot$ e $10^{7.2} M_\odot$ e as galáxias com $D_{4000} < 1.6$ estão entre $10^{6.4} M_\odot$ e $10^{6.6} M_\odot$. E no que diz respeito à relação entre a M_{BH} e a razão B/T, as subamostras exibem o mesmo comportamento geral de crescimento, com regressões lineares visualmente parecidas. Todavia, as galáxias "jovens"apresentam massas dos buracos negros menores que as vermelhas, além de apresentarem bins mais próximos da regressão. O padrão de estabilização a partir de $B/T \approx 0.6$ é mais pronunciado na amostra "velha".

As Figuras 37 e 38 são semelhantes à Figura 36, para os mesmos cortes de Σ_5 das Figuras 34 e 35, isto é, $(\Sigma_5) < 0.17$ e $(\Sigma_5) < 1.85$, respectivamente.

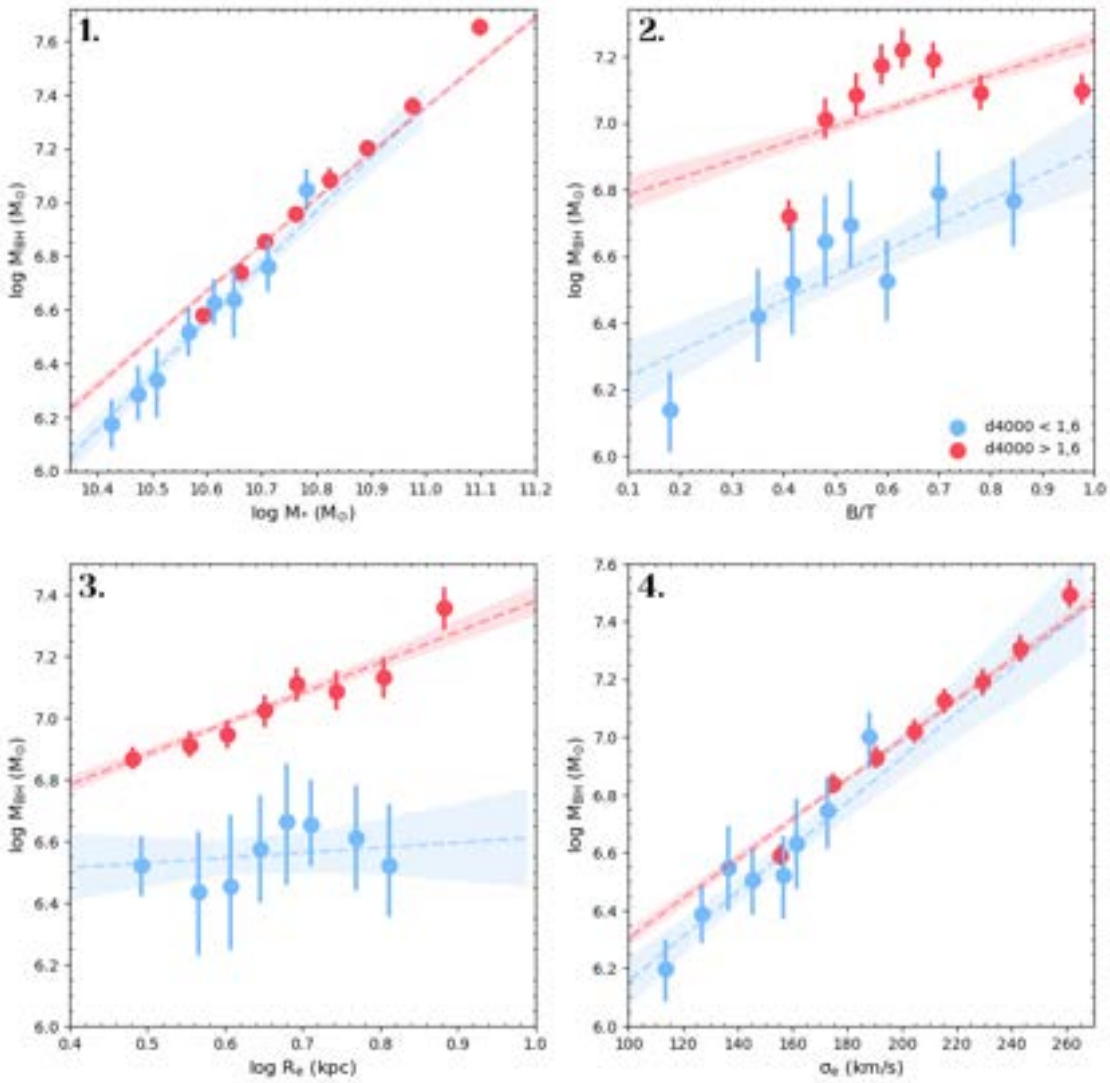
Figura 37 – Massa do Buraco Negro em função das propriedades das galáxias considerando D4000 com $\Sigma_5 < 0,17$.



Legenda: Massa do Buraco Negro (M_{BH}) em função da massa estelar (M_*), razão de luminosidade bojo-total (B/T), raio efetivo (R_e) e dispersão de velocidades (σ_e), considerando as subamostras com $D_{4000} < 1.6$ (em azul) e $D_{4000} \geq 1.6$ (em vermelho) com $\Sigma_5 < 0,17$.Fonte: Autoria própria, 2024.

De modo geral, o comportamento observado na Figura 36 se mantém em ambas as figuras, com relações um pouco mais ruidosas e barras de erros maiores, especialmente para a subamostra localizada em ambientes mais densos. Logo, pode-se concluir que embora haja forte dependência da massa do buraco negro ao último surto de formação estelar ocorrido nas galáxias, esta dependência não parece regulada pelo ambiente.

Figura 38 – Massa do Buraco Negro em função das propriedades das galáxias considerando D4000 com $\Sigma_5 > 1,85$.

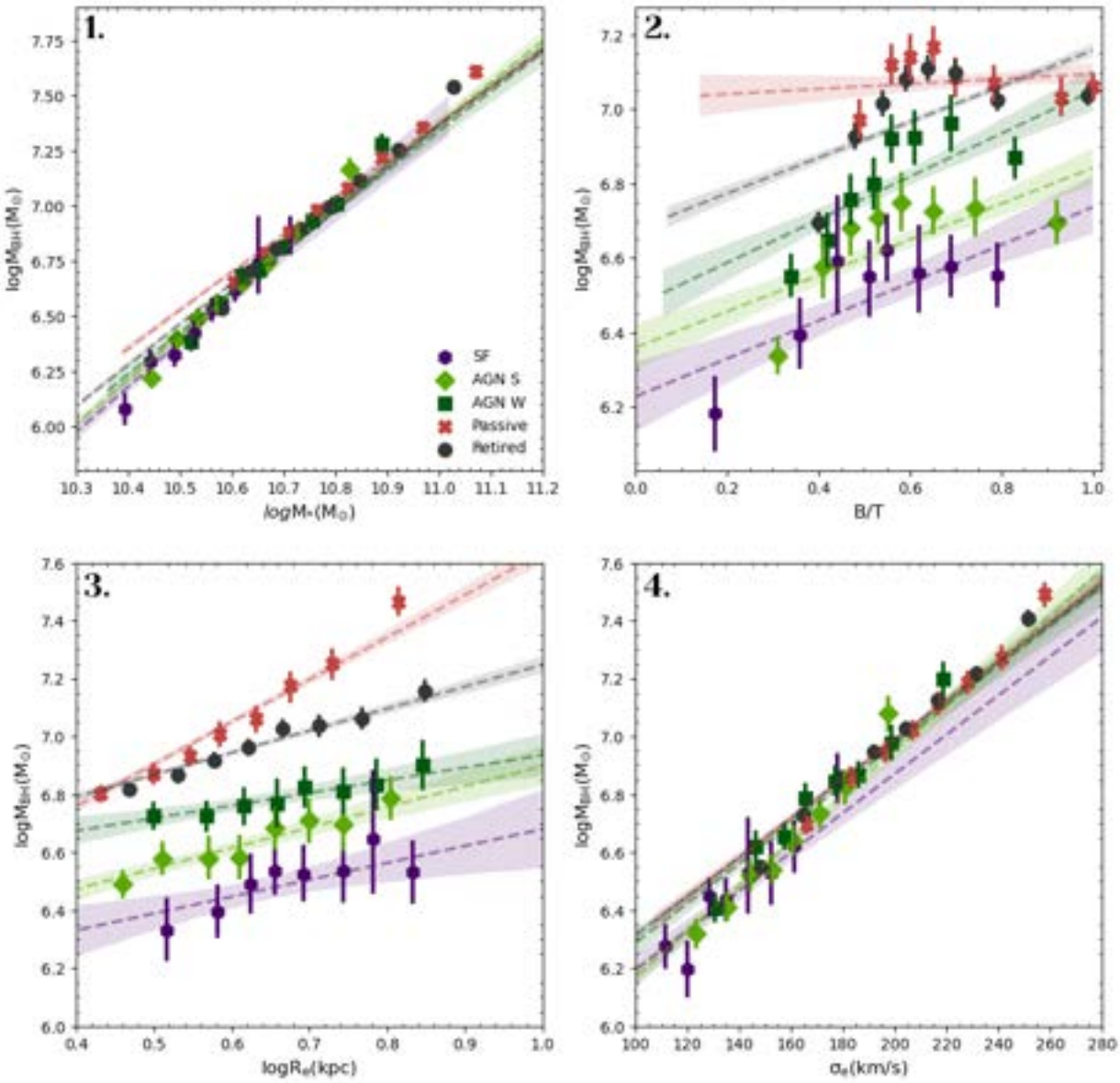


Legenda: Massa do Buraco Negro (M_{BH}) em função da massa estelar (M_*), razão de luminosidade bojo-total (B/T), raio efetivo (R_e) e dispersão de velocidades (σ_e), considerando as subamostras com $D_{4000} < 1.6$ (em azul) e $D_{4000} \geq 1.6$ (em vermelho) com $\Sigma_5 > 1,85$. Fonte: Autoria própria, 2024.

3.3.2 Dependência da Massa do Buraco Negro com regiões no Diagrama WHAN

Como descrito no Capítulo 2, e já citado na Seção 3.2.2, os dados também foram divididos de acordo com as regiões ocupadas pelas galáxias no diagrama WHAN (FERNANDES et al., 2011b), ou seja, galáxias com formação estelar (SF), AGNs fortes ou Seyferts (AGN S), AGNs fracas (AGN W), galáxias passivas (Passive) e aposentadas (Retired). De acordo com isso, a Figura 39 mostra as mesmas relações exploradas nas duas seções anteriores, considerando a divisão citada anteriormente.

Figura 39 – Massa do Buraco Negro em função das propriedades das galáxias considerando o Diagrama WHAN.



Legenda: Fração efetiva de matéria escura (f_{DM}^{eff}) em função da massa estelar (M_*), razão de luminosidade bojo-total (B/T), raio efetivo (R_e) e dispersão de velocidades (σ_e) para as galáxias com formação estelar (SF) em roxo, galáxias com núcleo ativo fortes (AGN S) em verde claro, galáxias com núcleo ativo fracas (AGN W) em verde escuro, aposentadas (Retired) em preto e passivas (Passive) em vermelho. Fonte: Autoria própria, 2024.

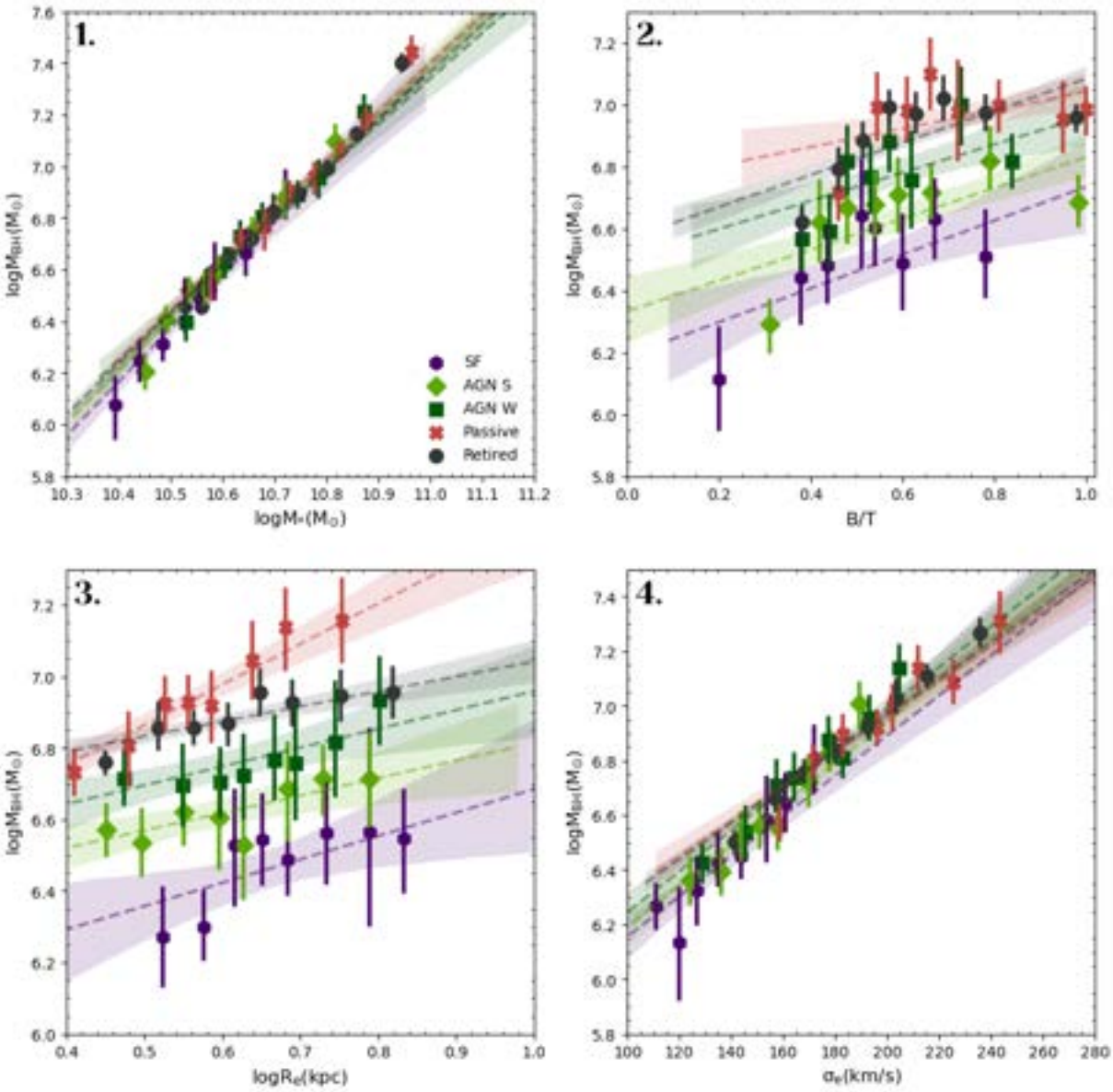
O painel 1 da figura trata da relação entre a M_{BH} e a $M_\star$ das subamostras. Nota-se que todas as galáxias apresentam uma relação de crescimento de M_{BH} com $M_\star$. As regiões de confiança das retas ajustadas indicam que é difícil discernir comportamentos específicos para cada subamostra, embora seja possível destacar valores menores de M_{BH} para as SF, entre $10^{5.8} M_\odot$ e $10^7 M_\odot$ e maiores para Passivas, entre $10^{6.5} M_\odot$ e $10^{7.7} M_\odot$. Esta mesma dificuldade de discernir comportamentos específicos para cada subamostra pode ser vista no painel 4, onde se encontra a relação entre M_{BH} e a σ_e, visto que a M_{BH} de todos os tipos

de galáxias crescem com a σ_e. Contudo, as SF possuem dispersões de velocidades menores, as passivas apresentam dispersões de velocidades maiores e as AGNs (W e S) possuem dispersões de velocidade intermediárias, e a subamostra SF possui valores menores de σ_e.

Tais semelhanças de comportamento não se repetem para as relações de M_{BH} com o R_e e B/T. No painel 2 nota-se uma relação de crescimento para todas as galáxias. Além disso, as galáxias parecem estar distribuidas em "faixas", onde as SF possuem M_{BH} menores (entre $10^6 M_\odot$ e $10^{6.6} M_\odot$) com B/T menores, ao passo que as AGNs (W e S) apresentam M_{BH} intermédiárias com valores de B/T intermediários, e as passivas e aposentadas apresentam M_{BH} maiores, com um intervalo mais restrito em B/T, além de crescerem de maneira mais moderada em comparação às outras subamostras.

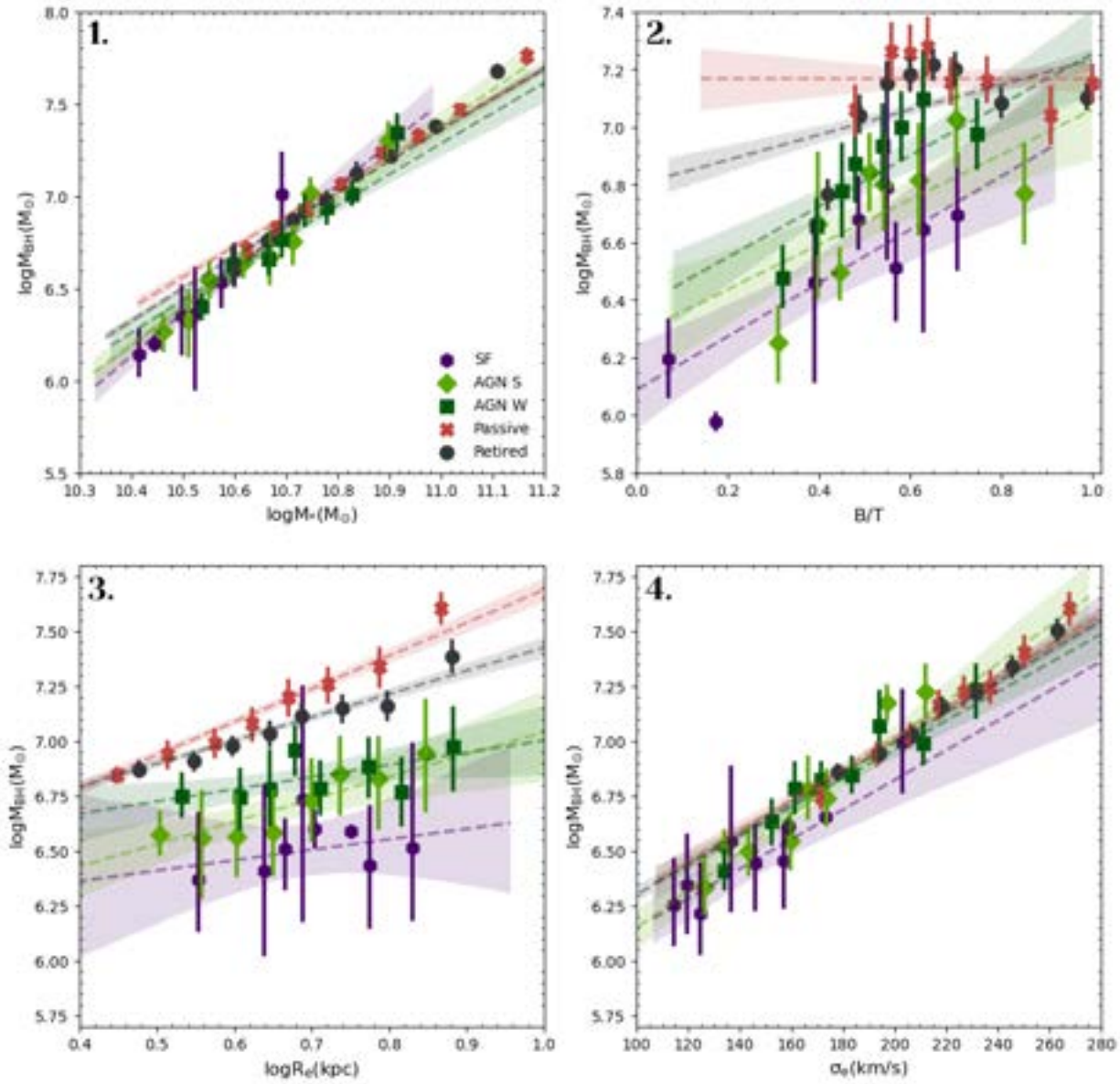
Por fim, o painel 3 exibe a relação entre M_{BH} e R_e das galáxias, que também aparentam estar representadas em "faixas". Ao contrário da relação anterior, neste caso, as galáxias que apresentam um comportamento de crescimento são as aposentadas, passivas e as AGNs S, enquanto as SF e AGNs W demonstram estabilidade. As Figuras 40 e 41 apresentam as mesmas propriedades da figura 39, distinguindo-se no que diz respeito aos intervalos de Σ_5 escolhidos. Como na seção anterior, os comportamentos não parecem influenciados pelo ambiente. Os resultados são basicamente os mesmos com barras de erro maiores.

Figura 40 – Massa do Buraco Negro em função das propriedades das galáxias considerando o Diagrama WHAN para $\Sigma_5 < 0.17$.



Legenda: Fração efetiva de matéria escura (f_{DM}^{eff}) em função da massa estelar (M_*), razão de luminosidade bojo-total (B/T), raio efetivo (R_e) e dispersão de velocidades (σ_e) para as galáxias com formação estelar (SF) em roxo, galáxias com núcleo ativo fortes (AGN S) em verde claro, galáxias com núcleo ativo fracas (AGN W) em verde escuro, aposentadas (Retired) em preto e passivas (Passive) em vermelhos, considerando apenas galáxias para $\Sigma_5 < 0.17$. Fonte: Autoria própria, 2024.

Figura 41 – Massa do Buraco Negro em função das propriedades das galáxias considerando o Diagrama WHAN para $\Sigma_5 > 1.85$.



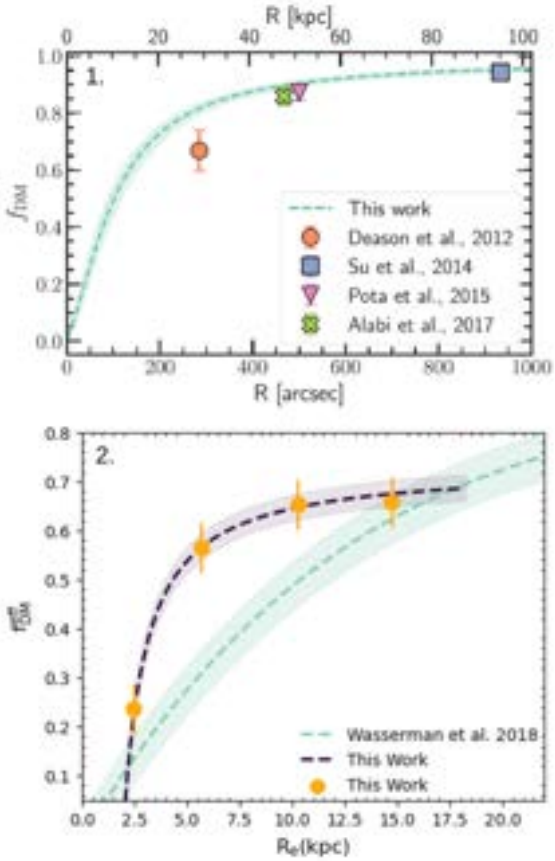
Legenda: Fração efetiva de matéria escura (f_{DM}^{eff}) em função da massa estelar (M_*), razão de luminosidade bojo-total (B/T), raio efetivo (R_e) e dispersão de velocidades (σ_e) para as galáxias com formação estelar (SF) em roxo, galáxias com núcleo ativo fortes (AGN S) em verde claro, galáxias com núcleo ativo fracas (AGN W) em verde escuro, aposentadas (Retired) em preto e passivas (Passive) em vermelho para $\Sigma_5 > 1.85$. Fonte: Autoria própria, 2024.

3.4 Comparação com a análise dinâmica de NGC 1407

Após as relações de escala da fração efetiva de matéria escura com a massa estelar, razão B/T, dispersão de velocidade e raio efetivo terem sido análisadas considerando subdivisões por morfologia ou ambiente, uma comparação com a literatura é feita, utilizando o trabalho de Wasserman et al. (2018), que estuda o perfil de densidade da matéria escura da galáxia elíptica NGC 1407 através da criação de modelos de Jeans esfericamente simétricos utilizando estrelas de campo e aglomerados globulares desta galáxia, a fim de melhor entender a dinâmica desta galáxia e calcular a sua fração de matéria escura.

Assim como neste estudo, a fração de matéria escura em Wasserman et al. (2018) foi obtida considerando a massa dinâmica da galáxia, mas aqui em função do raio, uma diferença em relação ao nosso trabalho, que considera a medida apenas dentro do raio efetivo. Por este motivo, considerou-se uma comparação com o perfil de matéria escura obtido por Wasserman et al. (2018), como pode ser visto na Figura 42 abaixo.

Figura 42 – Fração de matéria escura em função do raio efetivo.



Legenda: 1. Fração de matéria escura em função do raio efetivo; 2. Fração de matéria escura em função do raio efetivo comparada com Wasserman et al. (2018).
Fonte: 1. Wasserman et al. (2018); 2. Autoria própria.

O painel superior da Figura 42, retirada de Wasserman et al. (2018), exibe uma comparação entre a relação entre a fração de matéria escura e o raio obtida em seu trabalho

e outros disponíveis na literatura. Já o painel inferior compara o ajuste da relação entre a fração de matéria escura e o raio efetivo para os nossos dados (em roxo), agrupados em quatro bins de raio efetivo, e o modelo ajustado por Wasserman et al. (2018) para NGC 1407 (em verde), considerando apenas $R_e < 20$ kpc. Nota-se nesta figura que o ajuste do presente trabalho tem forma diferente do modelo de Wasserman et al. (2018), embora o escalonamento vertical dos pontos dependa do valor de η (vide Seção 2.2.2).

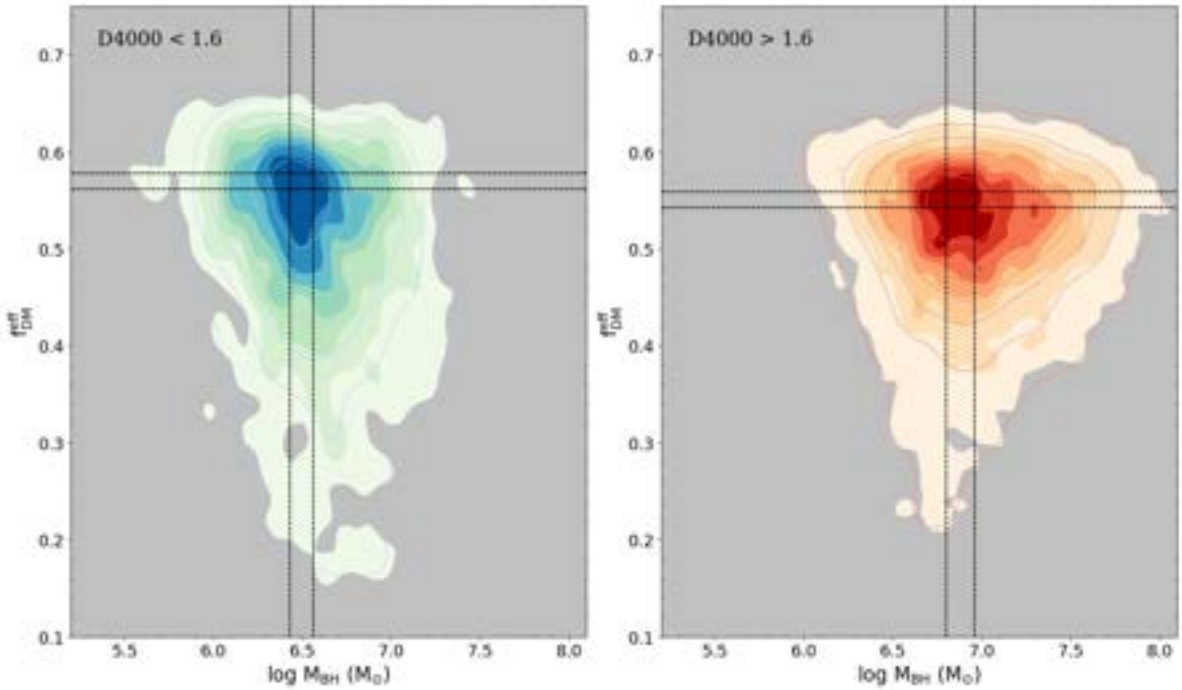
É preciso salientar que a galáxia estudada em Wasserman et al. (2018) é uma galáxia elíptica massiva, luminosa em raios-x, com $M_* = 10^{11.34}\ M_\odot$, $M_{BH} = 4.5 \times 10^9\ M_\odot$ e 20 kpc $< R <$ 100 kpc, ao passo que este trabalho engloba mais de 7000 objetos, entre elípticas e lenticulares, com 1.3 kpc $< R_e <$ 18.3 kpc, e apenas 0,6% delas tendo $M_* \geq 10^{11.34}\ M_\odot$. Diante disto, um ponto importante a se observar é que o comportamento geral dos ajustes nos dois paineis é similar, com um periodo de crescimento e então uma estabilidade, a diferença esta no inicio desta estabilidade, visto que o platô de Wasserman et al. (2018) começa em $f_{DM} \sim 0.8$ e o nosso platô começa em $\sim 0,6$. Contudo, após o "zoom"feito para $R_e < 20$ kpc no painel inferior, é possivel perceber a diferença no comportamento.

Notam-se ainda duas regiões, a primeira com fração de matéria escura ($\sim 0,1$) e a segunda com fração de matéria escura ($\sim 0,68$), onde as curvas se encontram. No que diz respeito às subamostras deste trabalho, são poucos os objetos que se encontram nestas regiões, das quais, a grande maioria pertence ao grupo das aposentadas, grupo composto pelas galáxias mais massivas da amostra total. Em um estudo subsequente, faremos uma análise dos objetos que individualmente se encontram dentro de 1-σ do ajuste de Wasserman et al. (2018).

3.5 Fração Efetiva de Matéria Escura e Massa do Buraco Negro considerando D4000 e as regiões no Diagrama WHAN

A última etapa desta análise explora a relação entre as duas quantidades principais deste estudo, isto é, a fração efetiva de matéria escura e a massa do buraco negro central, introduzida na Seção 1.3.1. A Figura 43 mostra a f_{DM}^{eff} em função da M_{BH} para a amostra subdividida usando o índice D4000.

Figura 43 – Gráficos de densidade da fração de matéria escura em função da massa do buraco negro considerando D4000.

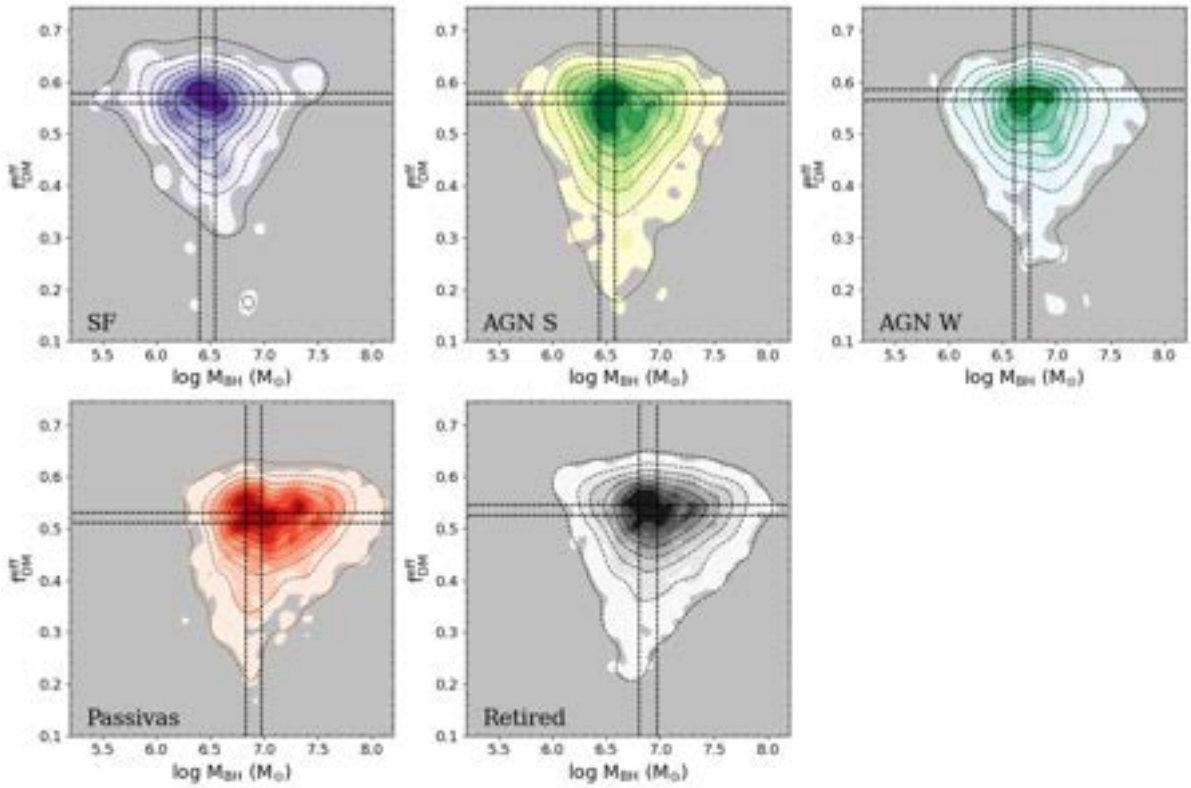


Legenda: Gráficos de densidade da fração de matéria escura (f_{DM}^{eff}) em função da massa do buraco negro (M_{BH}) considerando as subamostras com $D_{4000} < 1.6$ (azul) e $D_{4000} \geq 1.6$ (vermelho), com desvio padrão de 1σ (linhas pretas tracejadas). Fonte: Autoria própria, 2024.

Este gráfico de densidade mostra um intervalo de f_{DM}^{eff} similar para ambas as amostras, além de exibir uma maior concentração de galáxias por volta de $f_{DM}^{eff} \sim 0.6$. Contudo, é perceptivel que as galáxias em vermelho possuem buracos negros mais massivos (variando entre 10^6 e 10^8 massas solares) com f_{DM}^{eff} maiores, principalmente entre 0.40 e 0.66, mostrando uma distribuição mais horizontal. Já as galáxias em azul, possuem uma distribuição mais espalhada e vertical, em conjunto com os buracos negros menos massivos (entre $10^{5.5}$ e $10^{7.4}$ massas solares).

Seguindo as analises das seções anteriores, a Figura 44 abaixo mostra novamente a relação entre entre a fração efetiva de matéria escura e a massa do buraco negro central a partir da subdivisão considerando o diagrama WHAN.

Figura 44 – Gráficos de densidade da fração de matéria escura (f_{DM}^{eff}) em função da massa do buraco negro (M_{BH}) considerando o Diagrama WHAN.



Legenda: Gráficos de densidade da fração de matéria escura (f_{DM}^{eff}) em função da massa do buraco negro (M_{BH}) para as galáxias com formação estelar (SF) em roxo, galáxias com núcleo ativo fortes (AGN S) em verde claro, galáxias com núcleo ativo fracas (AGN W) em verde escuro, aposentadas (Retired) em preto e passivas (Passive) em vermelho, com desvio padrão de 1σ (linhas pretas tracejadas). Fonte: Autoria própria, 2024.

A divisão por diagrama WHAN mostra comportamentos marcantes e diferentes das subamostras. As galáxias SF se encontram em frações maiores (entre 0.3 e 0.7), com uma concentração forte próxima a ~ 0.6 e buracos negros menos massivos (entre $10^{5.2}$ e $10^{7.5}$ massas solares). Já as AGNs, fracas e fortes apresentam distribuições desiguais, visto que as AGN fortes possuem frações de matéria escura efetivas num imtervalo maior (entre 0.18 e 0.66) ao passo que as AGN fracas estão mais concentradas entre 0.40 e 0.64. Além disso, as AGNs fracas possuem M_{BH} um pouco maiores.

Por fim, as passivas e aposentadas apresentam os buracos negros mais massivos, a partir de $\sim 10^{6.2}$ $M_{\odot}$. As passivas apresentam um intervalo de fração de matéria escura entre 0.2 e 0.6 e massa do buraco negro variando entre $10^{6.6}$ e $10^{8.2}$ $M_{\odot}$, estando mais concentradas entre $0.40 < f_{DM}^{eff} < 0.58$ e as aposentadas apresentam um intervalo de fração de matéria escura entre 0.12 e 0.68 e massa variando entre 10^{6} e $10^{8,2}$ massas solares, exibindo uma distribuição mais ampla, ocupando mais o espaço definido por $M_{BH} \times f_{DM}^{eff}$.

Após esta descrição, nota-se que as galáxias SF e as passivas apresentam maior disparidade, a primeira estando no lado esquerdo do gráficos, com buracos negros menos

massivos e frações de matéria escura maiores, e a segunda localizando-se no lado direito, com massas do buraco negro maiores e frações de matéria escura um pouco menores. Para melhor analisar e entender essas relações, foi realizado o teste KDE (vide Seção 2.3), considerando a fração efetiva de matéria escura e a massa do buraco negro central das subamostras. Os resultados podem ser vistos na Tabela 3 abaixo.

Tabela 3 – Resultados do Teste KDE

Relação de comparação	Valor-p
SF - AGN S	0.101
SF - AGN W	< 0.001
SF - Passsive	< 0.001
SF - Retired	< 0.001
AGN S - AGN W	0.006
AGN S - Passive	< 0.001
AGN S - Retired	< 0.001
AGN W - Passive	< 0.001
AGN W - Retired	< 0.001
Passive - Retired	0.077

Os valores-p expostos na tabela mostram claramente que passivas e aposentadas não possuem similaridades com nenhuma das outras galáxias, mas são semelhantes entre si, para um nível de 95% de confiança. Além disso, as subamostras que mostram também similaridade entre si são as SF e as AGN S, com valor-p de 0.101. Estes casos de similaridade são destacados em vermelho na tabela. Todas as demais comparações indicam diferenças significativas entre as subamostras para suas distribuições no espaço $M_{BH} \times f_{DM}^{eff}$. Ou seja, usando apenas as ocupações das galáxias neste plano, teríamos três grupos de objetos: **(SF + AGN S)** $\rightarrow$ **AGN W** $\rightarrow$ **(Passive + Retired)**.

Discussão, Conclusões e Perspectivas

3.6 Discussão

Galáxias possuem em sua composição uma grande quantidade de matéria escura e abrigam em seu centro buracos negros supermassivos. O entendimento de como os bárions interagem, influenciam e são influenciados tanto pela distribuição de matéria escura, como pela presença do buraco negro central ainda é tema de debate na comunidade científica. Este entendimento é relevante não apenas para problemas relacionados à formação e evolução de galáxias, mas também no que se refere aos mecanismos de acreção e crescimento dos buracos negros, e ainda à própria distribuição e natureza da matéria escura.

As galáxias *early-type* (ETGs) são os sistemas galácticos mais massivos do Univerrso e representam o estágio final da evolução das galáxias. Como tal, transportam o registro fóssil do acúmulo de matéria estelar e escura ao longo do tempo e, por serem brilhantes e massivas, podem ser estudadas em detalhe desde baixos a altos *redshifts* (TORTORA; NAPOLITANO, 2022). As ETGs formam uma classe aproximadamente uniforme de objetos que são usualmente vermelhos, velhos, com pequenas quantidades de gás frio, e baixas taxas de formação estelar.

No presente trabalho, foram investigadas as variações no conteúdo de matéria escura em ETGs, definidas em subamostras de acordo com o último surto de formação estelar, estimado pelo parâmetro D4000, classificação no diagrama WHAN, e relação com o ambiente, quantificado por Σ_5. Além disso, são estudadas, como algumas propriedades relacionadas ao crescimento dessas galáxias (R_e, $M_\star$, B/T, σ_e) se relacionam tanto com a fração de matéria escura como com a massa do buraco negro central, visto que, durante o processo de evolução de galáxias vários processos físicos regulam o seu desenvolvimento em termos de formação estelar, crescimento do buraco negro central e alterações da distribuição de bárions e matéria escura.

Os mecanismos auto-reguladores das galáxias são os chamados processos de *feedback*, que tipicamente ocorrem quando supernovas e/ou núcleos ativos ejetam jatos ou ventos (chamados de fluxos de saída ou *outlfows*) que contêm gás e poeira e os expelem a longas distâncias, algumas vezes muito além da própria galáxia (GASPARI; BRIGHENTI; TEMI, 2012; MORGANTI, 2017). Fluxos assim podem "limpar"a galáxia de qualquer gás frio (ou impedir o gás quente de resfriar) e efetivamente interromper a formação de estrelas, bem como o crescimento do próprio buraco negro central, além de possivelmente afetar a distribuição de matéria escura e regular processos de auto-interação e aniquilação dessa componente (DESPALI et al., 2019; BARACCHINI; DEROCCO; DHO, 2020). Neste

contexto, são destacados agora alguns dos principais resultados apresentados no Capítulo 3 que podem auxilar a compreensão da evolução das galáxias da amostra.

Na Figura 27 viu-se que além de existirem correlações entre todas as propriedades estudadas com f_{DM}^{eff}, existem diferenças significativas entre as correlações obtidas para as subamostras definidas em função de D_{4000}. Notou-se, por exemplo, que f_{DM}^{eff} cai com o aumento de B/T. Como mencionado anteriormente, isto está associado ao fato de objetos com maiores razões B/T serem menos compactos e alcançarem densidades estelares menores em sua região central, o que implica em menores f_{DM}^{eff}. Contudo, percebeu-se que isto se dá de maneira diferente entre as subamostras "velha"($D_{4000} \geq 1.6$) e "jovem"($D_{4000} < 1.6$), uma vez que a queda da fração de matéria escura é mais rápida no caso da subamostra "jovem". Ao mesmo tempo, as relações entre f_{DM}^{eff} e σ_e também mostram um crescimento da fração de matéria escura com a dispersão de velocidades, com valores sistematicamente mais altos de f_{DM}^{eff} na amostra com população estelar mais jovem.

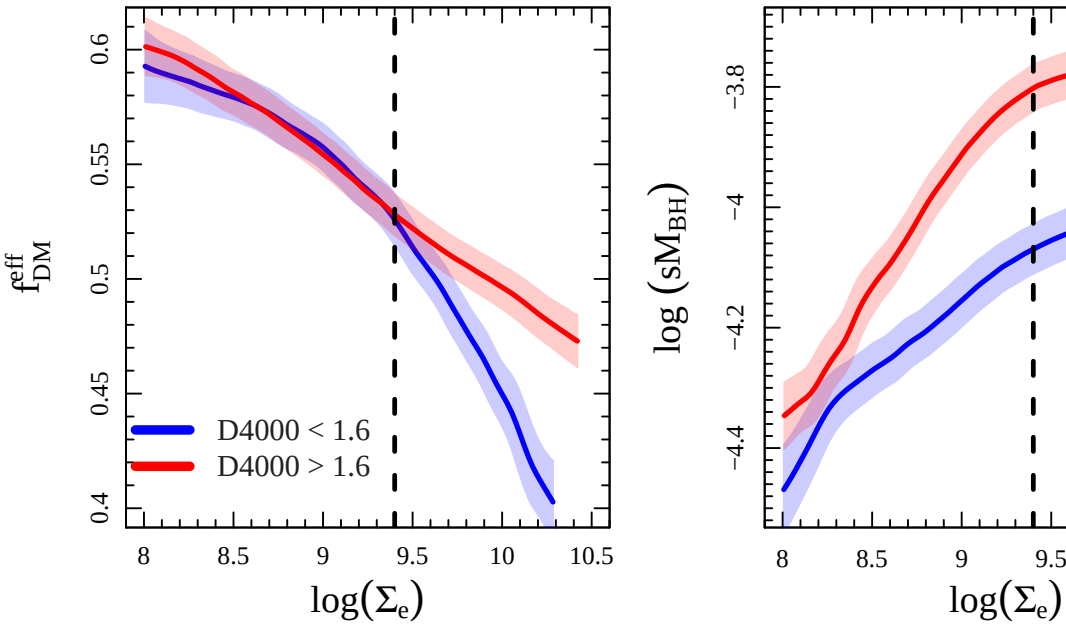
Simultaneamente, nota-se que na Figura 36 a M_{BH} cresce com B/T, agora com inclinações aproximadamente iguais, mas com valores sistematicamente maiores de M_{BH} para a amostra "velha". Percebe-se ainda que nesta figura as relações entre as variáveis R_e e B/T são significativamente separadas, sempre com maiores valores de M_{BH} no caso da amostra com população estelar mais velha; Ao passo que para as relações envolvendo as propriedades M_* e σ_e verifica-se que as duas subamostras se aproximam, embora os valores mais altos seja referentes às galáxias com $D_{4000} \geq 1.6$.

É interessante observar que em média, as duas subamostras apresentam valores semelhantes de $f_{DM}^{eff} \approx 0.51$ enquanto os valores de $\log(M_{BH})$ são diferentes (6.45 e 6.84, respectivamente para as subamostras "jovem"e "velha") de acordo com os testes estatísticos aplicados. Na verdade, além da fração de matéria escura, apenas o raio efetivo apresenta valores médios semelhantes nas duas subamostras.

Os comportamentos observados nas Figuras 27 e 36 podem então sugerir que a distribuição de luz (e massa estelar), expressos por R_e e B/T, e a quantidade de massa (estelar e dinâmica), expressos por M_* e σ_e, podem ajudar a compreender como a matéria escura e o buraco negro central são afetados pelo crescimento das galáxias. Uma forma de reunir tamanho e conteúdo estelar de uma galáxia em uma única quantidade é através da densidade projetada de massa estelar contida em um dado raio. No caso do raio efetivo, pode-se usar a definição de densidade superficial efetiva de massa estelar, introduzida na Seção 2.2.2, onde $\Sigma_e = 0.5M_*/\pi R_e^2$, uma quantidade calculada em unidades de $M_\odot/kpc^2$. O comportamento de f_{DM}^{eff} e M_{BH} em função de Σ_e é apresentado na Figura 45.[2]

[2] A suavização dos dados foi feita com o código VARPROF, em linguagem R, cedido pelo Dr. Dailer Morell. O código seleciona 100 valores aleatórios entre o máximo e mínimo de uma dada variável x. Obtém-se então 1000 medianas ponderadas de cada valor de y, a variável reposta em relação a x, numa amostra de n valores aleatórios da amostra. As 1000 medianas ponderadas são adicionadas a um *dataframe* com 100 linhas, uma para cada um dos valores aleatórios, sendo obtida a C_{BI} (*biweight*

Figura 45 – Fração de matéria escura efetiva e massa específica do buraco negro em função da densidade de massa estelar dentro do raio efetivo.



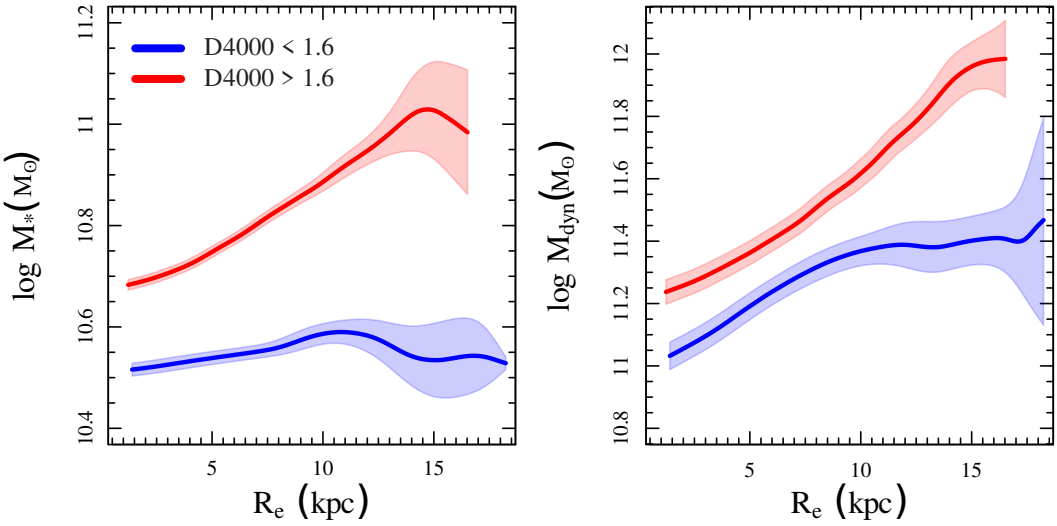
Legenda: Fração de matéria escura efetiva (f_{DM}^{eff}) em função da densidade de massa estelar dentro do raio efetivo (Σ_e), considerando as subamostras com D4000 $<$ 1.6 (azul) e D4000 $\geq$ 1.6 (vermelho).

Identifica-se que a fração de matéria escura cai com o aumento da densidade de massa estelar, comportamento esperado quando não há contração adiabática da matéria escura. Contudo, nota-se que até $\log \Sigma_e \approx 9.4$ as duas subamostras são semelhantes na forma como f_{DM}^{eff} diminui com o aumento da densidade de massa estelar. A partir deste valor, percebe-se que a queda em f_{DM}^{eff} é mais rápida na subamostra com população estelar mais jovem. Para melhor entender o comportamento dessas subamostras dentro do raio efetivo, segue uma suavização similar à fugura anterior, para M_* e M_{dyn}, como pode ser visto na figura 46.

Nota-se nesta figura que a massa estelar tem pouca variação com o raio efetivo para a subamostra "jovem", enquanto a massa dinâmica cresce ∼0.3 dex. No caso da subamostra "velha", a massa estelar cresce de ∼0.3 dex, enquanto ocorre um significativo crescimento (∼0.7 dex) em sua massa dinâmica. Este resultado, combinado ao fato de que f_{DM}^{eff} é em média, aproximadamente a mesma nas duas subamostras, de certa forma é contrário ao resultado de Napolitano, Romanowsky e Tortora (2010), pois esses autores encontram resultados indicando que galáxias com estrelas mais jovens possuem fração de matéria escura mais alta.

location, medida de localização da distribuição) e S_{BI} (*biweight scale*, medida de escala da distribuição) para cada linha, obtendo-se uma medida de y em função de x "diluindo"a dependência na amostra (BEERS; FLYNN; GEBHARDT, 1990).

Figura 46 – Massa estelar e massa dinâmica dentro do raio efetivo em função de R_e considerando D4000.



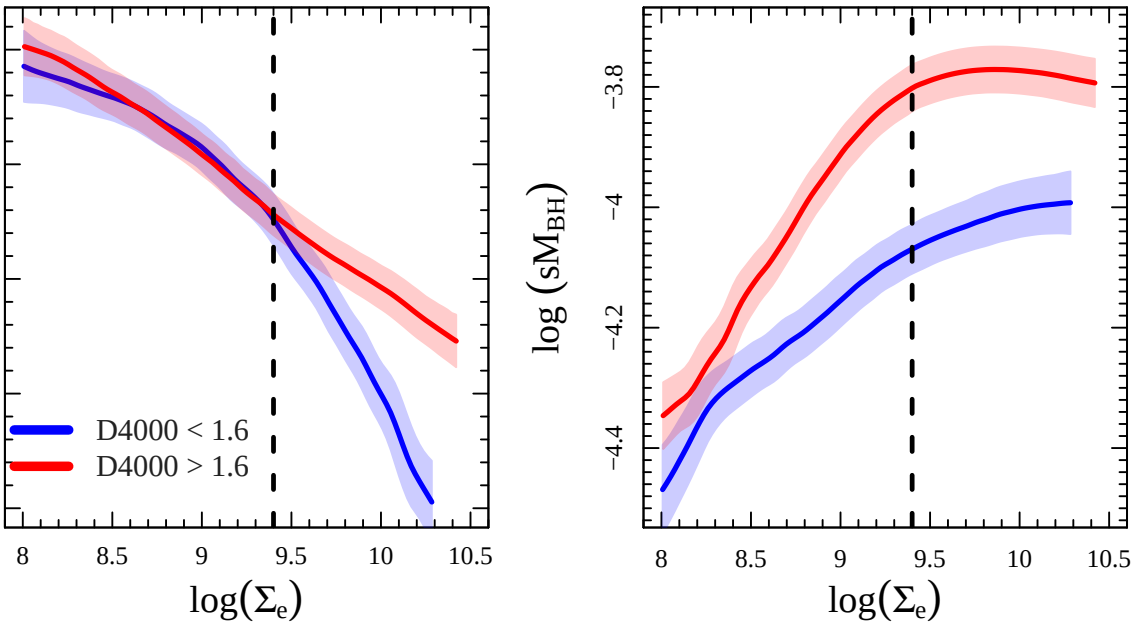
Legenda: Massa estelar (M_*) e Massa Dinâmica (M_{dyn}) dentro do raio efetivo em função do raio efetivo (R_e), considerando as subamostras com $D4000 < 1.6$ (azul) e $D4000 \geq 1.6$ (vermelho).

Entretanto, deve-se atentar ao fato de que os autores consideram galáxias com estrelas jovens aquelas cuja média da idade das estrelas é menor. O índice D_{4000} não é usado como indicador direto de idade e, de fato, como mencionados anteriormente, D_{4000} é um *proxy* do tempo desde o último surto de formação estelar das galáxias. Isto sugere um desdobramento futuro deste trabalho, onde a idade das galáxias será diretamente calculada a fim de avaliar a fração de matéria escura em função do raio efetivo (vide Seção 3.8).

É necessário mencionar ainda que o crescimento maior da massa dinâmica observado na subamostra "velha"para $\log \Sigma_e \geq 9.4$ pode estar ligado à história de fusões destas galáxias e consequentes alterações nos perfis de massa dinâmica e estelar, sem descartar a possibilidade de contração adiabática da matéria escura. De fato, este resultado está em concordância com o trabalho de Li et al. (2022b), onde se mostra para galáxias do levantamento *Spitzer Photometry and Accurate Rotation Curves* (SPARC) que sistemas com altas densidades de luminosidade dentro do raio efetivo possuem forte contração adiabática.

Não obstante, a partir das figuras 45 e 46 é possível concluir que a taxa de crescimento da massa dinâmica em relação à massa estelar é maior dentro de R_e para a amostra com população estelar mais velha no regime de alta densidade estelar. Semelhante a figura 45, a figura 47 expõe o comportamento da massa específica do buraco negro, definida como $sM_{BH} = M_{BH}/M_\star$.

Figura 47 – Massa estelar e massa dinâmica dentro do raio efetivo em função de R_e considerando D4000.



Legenda: Massa Específica do Buraco Negro (sM_{BH}) em função da densidade de massa estelar dentro do raio efetivo (Σ_e), considerando as subamostras com D4000 < 1.6 (azul) e D4000 ≥ 1.6 (vermelho).

Nota-se que esta massa é uma quantidade crescente em função da densidade superficial estelar para ambas as subamostras. Entretanto, a partir de $\log(\Sigma_e \approx 9.4$ há uma estabilização em $\log(sM_{BH}) \approx -3.8$ para a amostra "velha", que de modo geral apresenta valores mais altos de sM_{BH} para todos os valores de Σ_e, embora para densidades de massa estelar menores as diferenças entre as subamostras sejam menores, passando por um máximo justamente em $\log \Sigma_e \approx 9.4$, e diminuindo um pouco para valores maiores.

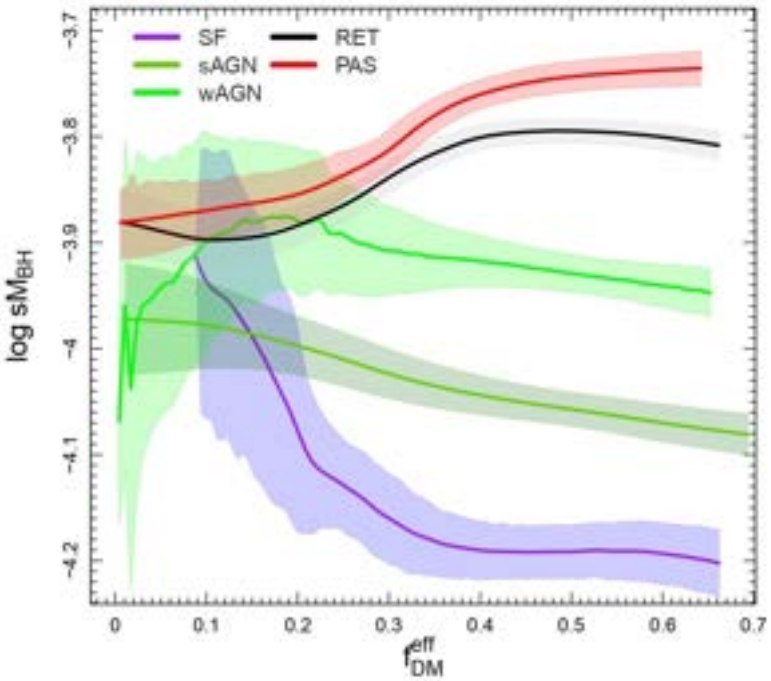
Ou seja, a massa do buraco negro cresce mais depressa em objetos com população estelar mais velha, até alcançar uma estabilização no regime de altas densidades de massa estelar. Esta estabilização provavelmente está relacionada ao comportamento de M_{BH} em função de R_e e de B/T, como visto nas Figuras 33 e 36. Note ainda na Figura 36 que M_{BH} cresce um pouco mais rapidamente com M_* e σ_e na amostra "jovem". Este crescimento um pouco mais rápido pode estar relacionado ao fato de sistemas com $D_{4000} < 1.6$ apresentarem último surto de formação estelar mais recente e ainda mostrarem taxa de formação estelar significativa, $\langle SFR \rangle \approx 2.95\ M_\odot\ yr^{-1}$, e portanto ainda converterem gás em estrelas, além de poderem fornecer gás ao buraco negro. No caso dos objetos mais massivos, menos compactos e mais velhos, $\langle SFR \rangle \approx 0.08\ M_\odot\ yr^{-1}$, a massa estelar cresce menos devido a inexistência de gás frio disponível, e então a massa do buraco negro se estabiliza.

Embora a massa do buraco negro compreenda apenas 0.2% da massa total de uma galáxia, o modo como ele cresce é de grande importância para se entender a evolução de sua hospedeira. Sabe-se que a amostra com população estelar mais velha possui massas maiores, tanto estelar como do buraco negro, mas o que é analisado na Figura 47 é a massa específica do buraco negro, ou seja, sua massa por unidade de massa estelar. Esta figura mostra uma diferença significativa de sM_{BH} entre as duas subamostras aproximadamente em todo intervalo de densidade de massa estelar. Isto sugere fortemente dois regimes de crescimento distintos. Considerando que buracos negros crescem por uma combinação de acreção e fusão, possivelmente as galáxias nas duas subamostras possuem diferentes contribuições desses mecanismos, o que leva ao estudo das amostras definidas no diagrama WHAN.

Na Tabela 2, verifica-se que enquanto a fração de matéria escura varia pouco em média entre as subamostras WHAN, a massa média do buraco negro forma uma sequência crescente desde as SF até as passivas. Esta mesma sequência se repete para M_*, B/T e σ_e. Na Figura 30 observa-se ainda que f_{DM}^{eff} cresce com M_* para as galáxias passivas, enquanto decresce para galáxias SF. Ao mesmo tempo, notamos diferentes taxas de crescimento de f_{DM}^{eff} com σ_e (ou seja, com a massa dinâmica contida em R_e). Paralelamente, a Figura 44 mostra que as distribuições no plano $M_{BH} \times f_{DM}^{eff}$ são significativamente distintas entre si, como indica o teste KDE (ao menos para três grupos de objetos). Para explorar um pouco mais o significado destes resultados, será estudado o comportamento da massa do buraco negro específica (sM_{BH}) em função de f_{DM}^{eff}. A Figura 48 exibe esta relação.

Nota-se nesta figura que as curvas são bastante distintas entre si, estratificadas por sua sM_{BH} aproximadamente a partir de $f_{DM}^{eff} > 0.3$. As galáxias SF apresentam um comportamento de queda acentuada de sM_{BH} com o aumento de f_{DM}^{eff}, enquanto as sAGNs mostram uma queda suave. As wAGNs apresentam um aumento de sM_{BH} até $f_{DM}^{eff} \approx 0.18$, e a partir daí uma queda suave. Ao contrário, das *retired* que mostram uma leve queda até $f_{DM}^{eff} \approx 0.18$ e a partir daí um aumento até $f_{DM}^{eff} \approx 0.4$, estabilizando-se deste ponto em diante. Finalmente, as galáxias passivas têm um suave aumento desde pequenas até altas frações de matéria escura efetiva.

Figura 48 – Massa específica do buraco negro em função da fração de matéria escura para as subamostras definidas no diagrama WHAN.



Legenda: Massa específica do buraco negro (sM_{BH}) em função da fração de matéria escura (f_{DM}^{eff}) para as subamostras definidas no diagrama WHAN – galáxias com formação estelar (SF) em roxo, galáxias com núcleo ativo fortes (sAGN) em verde claro, galáxias com núcleo ativo fracas (wAGN) em verde escuro, aposentadas (RET) em preto e passivas (PAS) em vermelho.

É importante destacar que em objetos SF o efeito de *feedback* de supernovas deve estar contribuindo para o comportamento observado na Figura 48. Este efeito ocorrendo nas regiões centrais das galáxias promove remoção do gás frio que poderia alimentar os buracos negros centrais. Se o *feedback* de supernovas (SN) por outro lado não afeta significativamente a matéria escura, pode-se ter simultaneamente uma redução da acreção de gás sobre os buracos negros e uma redução da massa bariônica dentro de R_e, fazendo com que f_{DM}^{eff} aumente. Ou seja, quanto menor a massa da galáxia SF (e de seu buraco negro) menor o potencial gravitacional e maior a ejeção da massa bariônica central, resultando em frações mais altas de matéria escura.

Objetos com núcleos ativos apresentam um comportamento intermediário no gráfico. Para estes, o *feedback* dos núcleos ativos é provavelmente quem regula a taxa de formação estelar e a acreção sobre o buraco negro central. Mais uma vez, objetos com maior f_{DM}^{eff} possuem menores valores de sM_{BH} (exceto por objetos wAGN com valores muito baixos de f_{DM}^{eff}). Contudo, a queda de sM_{BH} é menor do que no caso das galáxias SF, provavelmente pelo fato de as AGNs possuírem buracos negros mais massivos, possivelmente como resultado de fusões. Este resultado concorda com o trabalho de Bluck et al. (2014), onde se verifica que galáxias com baixos valores de M_{BH} são predominantemente SF.

Finalmente, as galáxias *retired* e passivas mostram um comportamento oposto, com crescimento de sM_{BH} com f_{DM}^{eff}, consistente com a ideia de *quenching* sendo desencadeado por *feedback* de AGNs numa fase anterior (BLUCK et al., 2014). Neste caso, o crescimento posterior do buraco negro e da quantidade de matéria escura provavelmente estão associados a eventos de fusão ao longo da história de formação dessas galáxias. De fato, $\sim 30\%$ da matéria incorporada ao buraco negro tem origem externa à galáxia, entrando no halo através de fusões, como mostra o trabalho de Choi et al. (2018), apesar de o tempo para que o material seja efetivamente acretado pelo buraco negro seja de $\sim$1.8 Gyr.

Contudo, esta não é a principal componente de "alimentação"do buraco negro. O gás reciclado em estrelas da própria galáxia contribui com $\sim$40% da massa acretada (CHOI et al., 2018). Não obstante, este gás reciclado está fortemente ligado à taxa de formação estelar, em declínio diante do processo de *feedback*, e sendo rapidamente acretado, dado que $\sim$50% da massa de um disco de acreção é incorporada ao buraco negro em 130 - 540 Myr (ARMIJO; PACHECO, 2011). Uma escala de tempo semelhante é necessária para que o *feeedback* interrompa a formação estelar, $\sim$ 500 Myr (FAN et al., 2008)

Ou seja, primeiro tem-se uma fase de formação estelar (necessária para produzir o gás reciclado) e aumento da massa do buraco negro, seguida de uma fase de núcleo ativo (regulando a taxa de formação estelar e a acreção sobre o buraco negro), e então uma fase passiva onde o sistema cresce via fusões ou permanece estável sem crescimento significativo. Deve-se notar ainda que a estratifiação de curvas observada na Figura 48 reflete as diferenças em massa das subamostras WHAN como pode ser visto na Tabela 2. Este cenário é consistente com o modelo de Lapi et al. (2018), onde tanto a formação estelar como o crescimento do buraco negro central ocorrem mais rapidamente em halos mais massivos, seguindo o cenário de *downsizing* (COWIE et al., 1996).

Um fator adicional que pode aumentar a fração de matéria escura na região central, fora a expulsão de material via *feedback*, é a contração adiabática (GONDOLO; SILK, 1999, vide também Seção 1.3). Entretanto, uma diferença importante resultante entre esses mecanismos seria a forma do halo de matéria escura na região central: tipo *core* no caso de fusões ou tipo *cuspy* no caso de contração adiabática. A presente análise não permite uma estimativa direta deste efeito, que depende de medidas gravitacionais independentes, através de lentes gravitacionais e/ou medidas da relação de aceleração radial (RAR) para cada galáxia(SCHULZ; MANDELBAUM; PADMANABHAN, 2010; LI et al., 2022a). Além disso, se a matéria escura for auto-interagente, a complexidade da combinação de efeitos de *feedback* e contração adiabática seriam ainda mais difíceis de se determinar, com a possibilidade até mesmo de efeitos de *feedback* bariônico induzidos por matéria escura, uma hipótese recentemente levantada por Acevedo et al. (2023).

Algumas teorias sugerem ainda que a matéria escura pode ser composta de partículas semelhantes a áxions, que podem interagir fracamente com os fótons por meio de um

processo chamado “conversão fóton-áxion”. Na presença de um campo magnético forte, uma pequena fração da radiação poderia ser convertida em áxions ou vice-versa, tornando mais complexo o comportamento da matéria escura submetida a um fluxo de radiação (DUFFY; BIBBER, 2009). Apesar destas dificuldades, a diferença de comportamento da fração de matéria escura em função da densidade de massa estelar entre as amostras "jovem"e "velha", observada na Figura 45, sugere um possível efeito de contração adiabática para objetos com D4000 $\geq$ 1.6.

3.7 Conclusões

No presente trabalho, foram estudadas relações entre propriedades das galáxias e sua fração de matéria escura central e massa do buraco negro. As principais conclusões alcançadas são:

1. Existem significativas diferenças no comportamento de M_{BH} e f_{DM}^{eff} entre galáxias cujo último surto de formação estelar ocorreu há mais tempo ($D_{4000} \geq 1.6$) e aquelas cujo último surto de formação estelar é mais recente ($D4000 < 1.6$).

2. Da mesma forma, existem diferenças significativas entre as subamostras definidas no diagrama WHAN. As diferenças sugerem estágios evolutivos de acordo com a massa do buraco negro e o regime de $feedback$ ocorrendo na galáxia hospedeira.

3. O ambiente, indicado por Σ_5 parece não afetar significativamente as relações encontradas, seja dividindo-se a amostra por $D4000$ ou de acordo com as regiões do diagrama WHAN.

4. A distribuição de galáxias no espaço definido por $M_{BH} \times f_{DM}^{eff}$ indica uma divisão dos dados em três categorias $(\mathrm{SF} + \mathrm{sAGN}) \rightarrow \mathrm{wAGN} \rightarrow (\mathrm{Ret} + \mathrm{PAS})$, de acordo com o teste KDE.

5. A massa específica do buraco negro, sM_{BH}, possui relação com a fração de matéria escura, estratificando as subamostras definidas no diagrama WHAN e sugerindo a sequência: SF $\rightarrow$ sAGN $\rightarrow$ wAGN $\rightarrow$ Ret $\rightarrow$ PAS. Nesta sequência, ocorre uma diminuição da massa específica do buraco negro para as SF e AGNs conforme aumenta f_{DM}^{eff}, enquanto para as aposentadas e passivas a massa do buraco negro aumenta com o aumento da fração de matéria escura.

6. É importante notar que para objetos com $f_{DM}^{eff} \lesssim 0.3$ as subamostras WHAN se superpõem, indicando que objetos com baixa fração de matéria escura têm maior complexidade em relação aos mecanismos reguladores, ou podem representar casos em que nossa metodologia não se mostrou adequada.

3.8 Perspectivas

Como perspectivas para trabalhos futuros, destacam-se cinco pontos que podem complementar as análises efeitas até o momento:

1. Usar medidas diretas de idade das galáxias para verificar o quanto M_{BH} e f_{DM}^{eff} estão correlacionadas com o envelhecimento das populações estelares. Para isso, será utilizado o código STARLIGHT (FERNANDES et al., 2011a) que ajusta o espectro das galáxias com uma superposição modelos de síntese de populações estelares (SSP) pré-definidos. Os modelos estelares adotados serão baseados na biblioteca de espectros empíricos de Sanchez-Blazquez et al. (2006).

2. Será realizado um *match* entre galáxias desta amostra e aquelas do levantamento Sloan Lens ACS (SLACS) (BOLTON et al., 2006), que apresenta dados para galáxias $early-type$ massivas selecionadas por efeitos de lente gravitacional. Serão utilizadas as estimativas de M_{BH} e f_{DM}^{eff} obtidas neste trabalho juntamente com as massas dinâmicas provenientes deste levamentamento, para estudar possíveis efeitos de contração adiabática.

3. Será aplicado o procedimento descrito neste trabalho para amostras de galáxias do SDSS em $0.1 < z < 0.3$, usando o estimador de M_{BH} fotométrica para estudar objetos em *redshifts* intermediários.[3]

4. Serão utilizados outros indicadores de ambiente, como Σ_7 e Σ_{10}, para verificar se o resultado obtido com os quartis de Σ_5 se mantém com outras definições. Outros quantis da própria distribuição de Σ_5 também pode ser testados.

5. Finalmente, pretende-se adaptar a metodologia empregada neste trabalho para explorar dados da próxima geração provenientes dos levantamentos obtidos no LSST (Large Synoptic Survey Telescope), ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) e Euclid.

[3] Lembrando que a calibração de He, Guo e Shao (2022) é feita com dados até z=0.35.

Referências

ABBOTT, B. P. et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. *Physical review letters*, APS, v. 116, n. 6, p. 061102, 2016. Citado na página 12.

ACEVEDO, J. F. et al. Dark matter-induced baryonic feedback in galaxies. *arXiv preprint arXiv:2309.08661*, 2023. Citado na página 90.

AGUADO, D. S. et al. The fifteenth data release of the sloan digital sky surveys: first release of manga-derived quantities, data visualization tools, and stellar library. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, IOP Publishing, v. 240, n. 2, p. 23, 2019. Citado na página 30.

AKIYAMA, K. et al. First m87 event horizon telescope results. iv. imaging the central supermassive black hole. *The Astrophysical Journal Letters*, IOP Publishing, v. 875, n. 1, p. L4, 2019. Citado na página 12.

ALABI, A. B. et al. The sluggs survey: dark matter fractions at large radii and assembly epochs of early-type galaxies from globular cluster kinematics. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 468, n. 4, p. 3949–3964, 2017. Citado na página 31.

ALEXANDER, D. M.; HICKOX, R. C. What drives the growth of black holes? *New Astronomy Reviews*, Elsevier, v. 56, n. 4, p. 93–121, 2012. Citado na página 43.

ALONSO, M. S. et al. Active galactic nuclei and galaxy interactions. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK, v. 375, n. 3, p. 1017–1024, 2007. Citado na página 44.

ALVAREZ, G. F. et al. The sloan digital sky survey reverberation mapping project: The hβ radius–luminosity relation. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 899, n. 1, p. 73, 2020. Citado na página 33.

ALVAREZ, M. A.; WISE, J. H.; ABEL, T. Accretion onto the first stellar-mass black holes. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 701, n. 2, p. L133, 2009. Citado na página 20.

ARGÜELLES, C. et al. On the growth of supermassive black holes formed from the gravitational collapse of fermionic dark matter cores. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 523, n. 2, p. 2209–2218, 2023. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 24.

ARMIJO, M. M.; PACHECO, J. de F. The growth of supermassive black holes fed by accretion disks. *Astronomy & Astrophysics*, EDP Sciences, v. 526, p. A146, 2011. Citado na página 90.

BAES, M. et al. The tng50-skirt atlas: Wavelength dependence of the effective radius. *Astronomy & Astrophysics*, EDP Sciences, v. 683, p. A182, 2024. Citado na página 114.

BAILYN, C. D. *What does a black hole look like?* [S.l.]: Princeton University Press, 2014. v. 4. Citado na página 12.

BALBERG, S.; SHAPIRO, S. L. Gravothermal collapse of self-interacting dark matter halos and the origin of massive black holes. *Physical Review Letters*, APS, v. 88, n. 10, p. 101301, 2002. Citado na página 2.

BALDRY, I. K. et al. Quantifying the bimodal color-magnitude distribution of galaxies. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 600, n. 2, p. 681, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 9.

BALDWIN, J. A.; PHILLIPS, M. M.; TERLEVICH, R. Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, IOP Publishing, v. 93, n. 551, p. 5, 1981. Citado na página 116.

BALOGH, M. L. et al. Differential galaxy evolution in cluster and field galaxies at z 0.3. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 527, n. 1, p. 54, 1999. Citado 2 vezes nas páginas 115 e 117.

BARACCHINI, E.; DEROCCO, W.; DHO, G. Discovering supernova-produced dark matter with directional detectors. *Physical Review D*, APS, v. 102, n. 7, p. 075036, 2020. Citado na página 83.

BARBERA, F. L. et al. Spider–iii. environmental dependence of the fundamental plane of early-type galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, The Royal Astronomical Society, v. 408, n. 3, p. 1361–1386, 2010. Citado na página 44.

BARCHI, P. H. et al. Machine and deep learning applied to galaxy morphology-a comparative study. *Astronomy and Computing*, Elsevier, v. 30, p. 100334, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 115.

BARNES, J. E.; HERNQUIST, L. E. Fueling starburst galaxies with gas-rich mergers. *Astrophysical Journal, Part 2-Letters (ISSN 0004-637X), vol. 370, April 1, 1991, p. L65-L68. University of California-supported research.*, v. 370, p. L65–L68, 1991. Citado na página 10.

BARTLETT, D. J. et al. Constraints on dark matter annihilation and decay from the large-scale structure of the nearby universe. *Physical Review D*, APS, v. 106, n. 10, p. 103526, 2022. Citado na página 2.

BATTAGLIA, G. et al. The kinematic status and mass content of the sculptor dwarf spheroidal galaxy. *The astrophysical journal*, IOP Publishing, v. 681, n. 1, p. L13, 2008. Citado na página 10.

BEERS, T. C.; FLYNN, K.; GEBHARDT, K. Measures of location and scale for velocities in clusters of galaxies-a robust approach. *Astronomical Journal (ISSN 0004-6256), vol. 100, July 1990, p. 32-46.*, v. 100, p. 32–46, 1990. Citado na página 85.

BELLSTEDT, S. et al. The sluggs survey: a comparison of total-mass profiles of early-type galaxies from observations and cosmological simulations, to 4 effective radii. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 476, n. 4, p. 4543–4564, 2018. Citado na página 22.

BENTZ, M. C. et al. The black hole mass–bulge luminosity relationship for active galactic nuclei from reverberation mapping and hubble space telescope imaging. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 694, n. 2, p. L166, 2009. Citado na página 33.

BERGMANN FAUSTO K. B. BARBOSA, R. S. N. T. S.; ALVES, L. S. *Buracos Negros*. 2017. <https://brazilastronomy.wordpress.com/universo/buracos-negros/definicao-geral-e-modelos/> [Accessed: (26/06/2024)]. Citado na página 13.

BERGMANN, T. S. Buracos negros supermassivos: os monstros que se escondem no centro das galáxias. *Ciência e Cultura*, Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, v. 61, n. 4, p. 38–42, 2009. Citado 3 vezes nas páginas 11, 12 e 14.

BERGMANN, T. S. Buracos negros supermassivos: qual é a importância deles no universo? os buracos negros estão entre os mais eficientes geradores de energia do universo e podem ter impactado até a nossa própria existência. *Ciência e Cultura*, Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, v. 75, n. 2, p. 01–09, 2023. Citado na página 14.

BERNARDI, M. et al. Early-type galaxies in the sloan digital sky survey. i. the sample. *The Astronomical Journal*, IOP Publishing, v. 125, n. 4, p. 1817, 2003. Citado na página 29.

BERTONE, G.; HOOPER, D.; SILK, J. Particle dark matter: Evidence, candidates and constraints. *Physics reports*, Elsevier, v. 405, n. 5-6, p. 279–390, 2005. Citado na página 21.

BEZANSON, R.; DOKKUM, P. V.; FRANX, M. Evolution of quiescent and star-forming galaxies since z 1.5 as a function of their velocity dispersions. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 760, n. 1, p. 62, 2012. Citado na página 113.

BLUCK, A. F. et al. Bulge mass is king: the dominant role of the bulge in determining the fraction of passive galaxies in the sloan digital sky survey. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 441, n. 1, p. 599–629, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 89 e 90.

BLUMENTHAL, G. R. et al. Contraction of dark matter galactic halos due to baryonic infall. *Astrophysical Journal, Part 1 (ISSN 0004-637X), vol. 301, Feb. 1, 1986, p. 27-34.*, v. 301, p. 27–34, 1986. Citado na página 2.

Bode, P.; Ostriker, J. P.; Turok, N. Halo formation in warm dark matter models. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 556, n. 1, p. 93, 2001. Citado na página 21.

BOLTON, A. S. et al. The sloan lens acs survey. i. a large spectroscopically selected sample of massive early-type lens galaxies. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 638, n. 2, p. 703, 2006. Citado na página 92.

BOSCH, R. C. van den. Unification of the fundamental plane and super massive black hole masses. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 831, n. 2, p. 134, 2016. Citado na página 33.

BOSE, S. et al. Revealing the galaxy–halo connection in illustristng. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 490, n. 4, p. 5693–5711, 2019. Citado na página 2.

BRAMBILA, D. et al. Examining transitional galaxies to understand the role of clusters and their dynamical status in galaxy quenching. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 523, n. 1, p. 785–801, 2023. Citado na página 27.

BRINCHMANN, J. et al. The physical properties of star-forming galaxies in the low-redshift universe. *Monthly notices of the royal astronomical society*, Blackwell Science Ltd Oxford, UK, v. 351, n. 4, p. 1151–1179, 2004. Citado na página 36.

BROMM, V.; YOSHIDA, N. The first galaxies. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, Annual Reviews, v. 49, n. 1, p. 373–407, 2011. Citado na página 6.

BRUZUAL, G.; CHARLOT, S. Stellar population synthesis at the resolution of 2003. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Blackwell Science Ltd Oxford, UK, v. 344, n. 4, p. 1000–1028, 2003. Citado na página 27.

BRYANT, G. *Structure of Dark MAtter Halo*. 2005. Last accessed 16 September 2024. Disponível em: <https://slideplayer.com/slide/12519459/>. Citado na página 10.

BUTA, R. J. Galaxy morphology. *Secular Evolution of Galaxies*, p. 155, 2013. Citado na página 7.

CAPPELLARI, M. et al. Dynamical masses of early-type galaxies at z 2: Are they truly superdense? *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 704, n. 1, p. L34, 2009. Citado na página 29.

CAPPELLARI, M. et al. The sauron project–x. the orbital anisotropy of elliptical and lenticular galaxies: revisiting the (v/σ,) diagram with integral-field stellar kinematics. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK, v. 379, n. 2, p. 418–444, 2007. Citado na página 6.

CAPPELLARI, M. et al. The atlas3d project – xx. mass–size and mass– distributions of early-type galaxies: bulge fraction drives kinematics, mass-to-light ratio, molecular gas fraction and stellar initial mass function. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press (OUP), v. 432, n. 3, p. 1862–1893, maio 2013. ISSN 0035-8711. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/stt644>. Citado na página 23.

CARR, B. J.; GIDDINGS, S. B. Quantum black holes. *Scientific American*, JSTOR, v. 292, n. 5, p. 48–55, 2005. Citado na página 14.

CARR, B. J.; HAWKING, S. W. Black holes in the early universe. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press Oxford, UK, v. 168, n. 2, p. 399–415, 1974. Citado na página 14.

CARVALHO, R. D. et al. Investigating the relation between galaxy properties and the gaussianity of the velocity distribution of groups and clusters. *The Astronomical Journal*, IOP Publishing, v. 154, n. 3, p. 96, 2017. Citado na página 118.

CHOI, E. et al. The role of black hole feedback on size and structural evolution in massive galaxies. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 866, n. 2, p. 91, 2018. Citado na página 90.

CIOTTI, L. Stellar systems following the r exp 1/m luminosity law. *Astronomy and Astrophysics*, v. 249, p. 99–106, 1991. Citado na página 28.

COLLABORATION, P. et al. Planck 2018 results. *A&a*, v. 641, p. A12, 2020. Citado na página 21.

CONOVER, W. J. *Practical nonparametric statistics*. [S.l.]: john wiley & sons, 1999. v. 350. Citado na página 47.

CONSELICE, C. J. The fundamental properties of galaxies and a new galaxy classification system. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK, v. 373, n. 4, p. 1389–1408, 2006. Citado na página 114.

COURTEAU, S. et al. Galaxy masses. *Reviews of Modern Physics*, American Physical Society (APS), v. 86, n. 1, p. 47–119, jan. 2014. ISSN 1539-0756. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1103/RevModPhys.86.47>. Citado na página 1.

COWIE, L. L. et al. New insight on galaxy formation and evolution from keck spectroscopy of the hawaii deep fields. *Astronomical Journal v. 112, p. 839*, v. 112, p. 839, 1996. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 90.

CROTON, D. J. Evolution in the black hole mass–bulge mass relation: a theoretical perspective. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK, v. 369, n. 4, p. 1808–1812, 2006. Citado na página 16.

CUCCIATI, O. et al. The zcosmos 10k-sample: the role of galaxy stellar mass in the colour-density relation up to z˜ 1. *Astronomy & Astrophysics*, EDP Sciences, v. 524, p. A2, 2010. Citado na página 1.

DEKEL, A. et al. Cold streams in early massive hot haloes as the main mode of galaxy formation. *Nature*, Nature Publishing Group UK London, v. 457, n. 7228, p. 451–454, 2009. Citado na página 43.

DESPALI, G. et al. The interplay of self-interacting dark matter and baryons in shaping the halo evolution. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 484, n. 4, p. 4563–4573, 2019. Citado na página 83.

Dicionário Merriam-Webster. *Galaxy*. 2024. <https://www.merriam-webster.com/dictionary/galaxy>. Online; acesso em 5 setembro 2023. Citado na página 5.

DING, X. et al. The mass relations between supermassive black holes and their host galaxies at 1< z< 2 with hst-wfc3. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 888, n. 1, p. 37, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 113.

DRESSLER, A. Observational evidence for supermassive black holes. In: CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS. *Symposium-International Astronomical Union*. [S.l.], 1989. v. 134, p. 217–232. Citado na página 1.

DRESSLER, A. et al. A spectroscopic catalog of 10 distant rich clusters of galaxies. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, IOP Publishing, v. 122, n. 1, p. 51, 1999. Citado na página 44.

DUBOIS, Y. et al. Blowing cold flows away: the impact of early agn activity on the formation of a brightest cluster galaxy progenitor. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, The Royal Astronomical Society, v. 428, n. 4, p. 2885–2900, 2013. Citado na página 20.

DUFFY, L. D.; BIBBER, K. V. Axions as dark matter particles. *New Journal of Physics*, IOP Publishing, v. 11, n. 10, p. 105008, 2009. Citado na página 91.

DUONG, T.; GOUD, B.; SCHAUER, K. Closed-form density-based framework for automatic detection of cellular morphology changes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, National Acad Sciences, v. 109, n. 22, p. 8382–8387, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 47 e 118.

EBELING, H.; STEPHENSON, L. N.; EDGE, A. C. Jellyfish: evidence of extreme ram-pressure stripping in massive galaxy clusters. *The Astrophysical Journal Letters*, IOP Publishing, v. 781, n. 2, p. L40, 2014. Citado na página 43.

EINSTEIN, A. et al. The foundation of the general theory of relativity. *Annalen Phys*, v. 49, n. 7, p. 769–822, 1916. Citado na página 11.

ESO. *Giant elliptical galaxy NGC 1316 in Fornax Cluster*. 2000. Last accessed 16 September 2024. Disponível em: <https://www.eso.org/public/images/eso0024a/>. Citado na página 6.

FAN, L. et al. The dramatic size evolution of elliptical galaxies and the quasar feedback. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 689, n. 2, p. L101, 2008. Citado na página 90.

FAROUKI, R.; SHAPIRO, S. Computer simulations of environmental influences on galaxy evolution in dense clusters. ii-rapid tidal encounters. *Astrophysical Journal, Part 1, vol. 243, Jan. 1, 1981, p. 32-41.*, v. 243, p. 32–41, 1981. Citado na página 43.

FEOLI, A. The mbh versus mgσ2 relation and the accretion of supermassive black holes. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 784, n. 1, p. 34, 2014. Citado na página 14.

FERNANDES, R. C. et al. Starlight: Spectral synthesis code. *Astrophysics Source Code Library*, p. ascl–1108, 2011. Citado na página 92.

FERNANDES, R. C. et al. A comprehensive classification of galaxies in the sloan digital sky survey: how to tell true from fake agn? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK, v. 413, n. 3, p. 1687–1699, 2011. Citado 6 vezes nas páginas 37, 59, 72, 116, 117 e 118.

FERRARESE, L.; MERRITT, D. A fundamental relation between supermassive black holes and their host galaxies. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 539, n. 1, p. L9, 2000. Citado 4 vezes nas páginas 1, 24, 32 e 33.

FERRER, F.; ROSA, A. M. da; WILL, C. M. Dark matter spikes in the vicinity of kerr black holes. *Physical Review D*, APS, v. 96, n. 8, p. 083014, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 24.

FONTANOT, F. et al. The many manifestations of downsizing: hierarchical galaxy formation models confront observations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK, v. 397, n. 4, p. 1776–1790, 2009. Citado na página 9.

FUKUGITA, M.; HOGAN, C.; PEEBLES, P. The cosmic baryon budget. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 503, n. 2, p. 518, 1998. Citado na página 9.

GARCÍA-BELLIDO, J. Primordial black holes. *Handbook of Gravitational Wave Astronomy*, Springer, p. 1–18, 2020. Citado na página 14.

GASPARI, M.; BRIGHENTI, F.; TEMI, P. Mechanical agn feedback: controlling the thermodynamical evolution of elliptical galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, The Royal Astronomical Society, v. 424, n. 1, p. 190–209, 2012. Citado na página 83.

GELLER, M. J. et al. Shels: A complete galaxy redshift survey with r 20.6. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, IOP Publishing, v. 213, n. 2, p. 35, 2014. Citado na página 36.

GEORGE, K. Structural analysis of star-forming blue early-type galaxies-merger-driven star formation in elliptical galaxies. *Astronomy & Astrophysics*, EDP Sciences, v. 598, p. A45, 2017. Citado na página 27.

GNEDIN, O. Y.; ZHAO, H. Maximum feedback and dark matter profiles of dwarf galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, The Royal Astronomical Society, v. 333, n. 2, p. 299–306, 2002. Citado na página 2.

GONDOLO, P.; SILK, J. Dark matter annihilation at the galactic center. *Physical Review Letters*, APS, v. 83, n. 9, p. 1719, 1999. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 90.

GRAHAM, A.; COLLESS, M. Some effects of galaxy structure and dynamics on the fundamental plane. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Blackwell Science Ltd Oxford, UK, v. 287, n. 1, p. 221–239, 1997. Citado na página 28.

GREENE, J. E.; STRADER, J.; HO, L. C. Intermediate-mass black holes. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, Annual Reviews, v. 58, p. 257–312, 2020. Citado na página 14.

GRILLO, C. Projected central dark matter fractions and densities in massive early-type galaxies from the sloan digital sky survey. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 722, n. 1, p. 779, 2010. Citado na página 31.

GROVER, H. et al. Predicting bulge to total luminosity ratio of galaxies using deep learning. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 506, n. 3, p. 3313–3322, 2021. Citado na página 113.

GUNN, J. E.; III, J. R. G. On the infall of matter into clusters of galaxies and some effects on their evolution. *Astrophysical Journal, vol. 176, p. 1*, v. 176, p. 1, 1972. Citado na página 43.

HAINES, C. et al. The vimos public extragalactic redshift survey (vipers)-downsizing of the blue cloud and the influence of galaxy size on mass quenching over the last eight billion years. *Astronomy & Astrophysics*, EDP Sciences, v. 605, p. A4, 2017. Citado na página 36.

HANSON, M. *NGC 1398 Updated*. 2023. Last accessed 16 September 2024. Disponível em: <https://www.hansonastronomy.com/ngc-1398>. Citado na página 7.

HARRIS, W. E. et al. Measuring dark matter in galaxies: The mass fraction within five effective radii. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 905, n. 1, p. 28, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 31.

HAWKING, S. W.; PENROSE, R. The singularities of gravitational collapse and cosmology. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, The Royal Society London, v. 314, n. 1519, p. 529–548, 1970. Citado na página 12.

HE, Y.; GUO, Q.; SHAO, S. Predicting supermassive black hole mass with machine learning methods. *Research in Astronomy and Astrophysics*, IOP Publishing, v. 22, n. 8, p. 085014, 2022. Citado 4 vezes nas páginas 33, 34, 64 e 92.

HOPKINS, P. F. et al. Compact high-redshift galaxies are the cores of the most massive present-day spheroids. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK, v. 398, n. 2, p. 898–910, 2009. Citado na página 10.

HOPKINS, P. F. et al. A unified, merger-driven model of the origin of starbursts, quasars, the cosmic x-ray background, supermassive black holes, and galaxy spheroids. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, IOP Publishing, v. 163, n. 1, p. 1, 2006. Citado na página 43.

HOPKINS, P. F. et al. A cosmological framework for the co-evolution of quasars, supermassive black holes, and elliptical galaxies. i. galaxy mergers and quasar activity. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, IOP Publishing, v. 175, n. 2, p. 356, 2008. Citado na página 10.

HUBBLE, E. The realm of the nebulae. *The Scientific Monthly*, JSTOR, v. 39, n. 3, p. 193–202, 1934. Citado na página 7.

HUŠKO, F.; LACEY, C. G.; BAUGH, C. M. Statistics of galaxy mergers: bridging the gap between theory and observation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 509, n. 4, p. 5918–5937, 2022. Citado na página 16.

KANJI, G. K. 100 statistical tests. Sage, 2006. Citado na página 47.

KASHINO, D. et al. Eiger. i. a large sample of [o iii]-emitting galaxies at 5.3< z< 6.9 and direct evidence for local reionization by galaxies. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 950, n. 1, p. 66, 2023. Citado na página 6.

KAUFFMANN, G. et al. The dependence of star formation history and internal structure on stellar mass for 105 low-redshift galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, The Royal Astronomical Society, v. 341, n. 1, p. 54–69, 2003. Citado 4 vezes nas páginas 23, 35, 36 e 115.

KAUFFMANN, G. et al. The environmental dependence of the relations between stellar mass, structure, star formation and nuclear activity in galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Blackwell Science Ltd, v. 353, n. 3, p. 713–731, 2004. Citado 3 vezes nas páginas 27, 43 e 44.

KAVIRAJ, S. et al. The role of minor mergers in the recent star formation history of early-type galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK, v. 394, n. 4, p. 1713–1720, 2009. Citado na página 16.

KEREŠ, D. et al. How do galaxies get their gas? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Blackwell Science Ltd Oxford, UK, v. 363, n. 1, p. 2–28, 2005. Citado na página 43.

KERR, R. P. Gravitational field of a spinning mass as an example of algebraically special metrics. *Physical review letters*, APS, v. 11, n. 5, p. 237, 1963. Citado na página 11.

KHOCHFAR, S.; BURKERT, A. On the origin of isophotal shapes in elliptical galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Blackwell Science Ltd Oxford, UK, v. 359, n. 4, p. 1379–1385, 2005. Citado na página 10.

KIM, S. et al. Yzics: On the mass segregation of galaxies in clusters. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 905, n. 1, p. 12, 2020. Citado na página 1.

KOLB, E. W.; TURNER, M. S. The early universe addison. *Wesley Abb*, v. 4, 1990. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 21.

KOMOSSA, S.; BAKER, J.; LIU, F. Growth of supermassive black holes, galaxy mergers and supermassive binary black holes. *Proceedings of the International Astronomical Union*, Cambridge University Press, v. 11, n. A29B, p. 292–298, 2015. Citado na página 17.

KORMENDY, J.; HO, L. C. Coevolution (or not) of supermassive black holes and host galaxies. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, Annual Reviews, v. 51, p. 511–653, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 1, 40 e 113.

KROUPA, P. On the variation of the initial mass function. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Blackwell Science Ltd Oxford, UK, v. 322, n. 2, p. 231–246, 2001. Citado na página 27.

LAGOS, C. d. P. et al. The origin of the atomic and molecular gas contents of early-type galaxies–i. a new test of galaxy formation physics. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 443, n. 2, p. 1002–1021, 2014. Citado na página 31.

LAPI, A. et al. The dramatic size and kinematic evolution of massive early-type galaxies. *The Astrophysical Journal*, v. 857, n. 22, p. 22pp, 2018. Citado na página 90.

LARSON, R. B. Dynamical models for the formation and evolution of spherical galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press Oxford, UK, v. 166, n. 3, p. 585–616, 1974. Citado na página 8.

LATIF, M. A.; FERRARA, A. Formation of supermassive black hole seeds. *Publications of the Astronomical Society of Australia*, Cambridge University Press, v. 33, p. e051, 2016. Citado na página 14.

LI, P. et al. The effect of adiabatic compression on dark matter halos and the radial acceleration relation. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 927, n. 2, p. 198, 2022. Citado na página 90.

LI, P. et al. Incorporating baryon-driven contraction of dark matter halos in rotation curve fits. *Astronomy & Astrophysics*, EDP Sciences, v. 665, p. A143, 2022. Citado na página 86.

LI, S. et al. Manga dynpop–vi. matter density slopes from dynamical models of 6000 galaxies versus cosmological simulations: the interplay between baryonic and dark matter. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 529, n. 4, p. 4633–4649, 2024. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.

LIN, L. et al. Where do wet, dry, and mixed galaxy mergers occur? a study of the environments of close galaxy pairs in the deep2 galaxy redshift survey. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 718, n. 2, p. 1158, 2010. Citado na página 43.

LINTOTT, C. J. et al. Galaxy zoo: morphologies derived from visual inspection of galaxies from the sloan digital sky survey. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK, v. 389, n. 3, p. 1179–1189, 2008. Citado na página 27.

LIU, H.-Y. et al. A comprehensive and uniform sample of broad-line active galactic nuclei from the sdss dr7. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, IOP Publishing, v. 243, n. 2, p. 21, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.

LOEB, A.; PEEBLES, P. Cosmological origin of the stellar velocity dispersions in massive early-type galaxies. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 589, n. 1, p. 29, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 10.

LOPES, P. et al. Nosocs in sdss–v. red disc and blue bulge galaxies across different environments. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 461, n. 3, p. 2559–2579, 2016. Citado na página 52.

LOPES, P.; RIBEIRO, A.; REMBOLD, S. Nosocs in sdss–iv. the role of environment beyond the extent of galaxy clusters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, The Royal Astronomical Society, v. 437, n. 3, p. 2430–2447, 2014. Citado na página 44.

LOUBSER, S. et al. The regulation of star formation in cool-core clusters: imprints on the stellar populations of brightest cluster galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, The Royal Astronomical Society, v. 456, n. 2, p. 1565–1578, 2016. Citado na página 115.

LOVELL, M. R. et al. The fraction of dark matter within galaxies from the illustristng simulations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 481, n. 2, p. 1950–1975, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.

LUCIA, G. D. et al. The formation history of elliptical galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Blackwell Science Ltd Oxford, UK, v. 366, n. 2, p. 499–509, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 2.

LYSKOVA, N.; CHURAZOV, E.; NAAB, T. Mass density slope of elliptical galaxies from strong lensing and resolved stellar kinematics. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 475, n. 2, p. 2403–2414, 01 2018. ISSN 0035-8711. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/mnras/sty018>. Citado na página 22.

MACMILLAN, J. D.; HENRIKSEN, R. N. Black hole growth in dark matter and the mbh-σ relation. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 569, n. 1, p. 83, 2002. Citado na página 2.

MARSDEN, C. et al. The case for the fundamental m bh-σ relation. *Frontiers in Physics*, Frontiers Media SA, v. 8, p. 61, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 38.

MARTIN, G. et al. Normal black holes in bulge-less galaxies: the largely quiescent, merger-free growth of black holes over cosmic time. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 476, n. 2, p. 2801–2812, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 16.

MASSONNEAU, W. et al. How the super-eddington regime regulates black hole growth in high-redshift galaxies. *Astronomy & Astrophysics*, EDP Sciences, v. 670, p. A180, 2023. Citado na página 20.

MAZURE, A.; CAPELATO, H. Exact solutions for the spatial de vaucouleurs and sérsic laws and related quantities. *Astronomy & Astrophysics*, EDP Sciences, v. 383, n. 2, p. 384–389, 2002. Citado na página 28.

MEERT, A.; VIKRAM, V.; BERNARDI, M. A catalogue of 2d photometric decompositions in the sdss-dr7 spectroscopic main galaxy sample: preferred models and systematics. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 446, n. 4, p. 3943–3974, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 114 e 115.

MEZCUA, M. Black holes. In: _____. *Encyclopedia of Astrobiology*. Springer Berlin Heidelberg, 2021. p. 1–8. ISBN 9783642278334. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-27833-4_5510-1>. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 13.

MILOSAVLJEVIĆ, M.; MERRITT, D. Formation of galactic nuclei. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 563, n. 1, p. 34, 2001. Citado na página 10.

MOORE, B.; LAKE, G.; KATZ, N. Morphological transformation from galaxy harassment. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 495, n. 1, p. 139, 1998. Citado na página 43.

MOORE, B. et al. Cold collapse and the core catastrophe. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, The Royal Astronomical Society, v. 310, n. 4, p. 1147–1152, 1999. Citado na página 10.

MORGAN, W. W.; MAYALL, N. A spectral classification of galaxies. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, JSTOR, v. 69, n. 409, p. 291–303, 1957. Citado na página 6.

MORGANTI, R. The many routes to agn feedback. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, Frontiers Media SA, v. 4, p. 42, 2017. Citado na página 83.

MOUNTRICHAS, G. The co-evolution of supermassive black holes and galaxies in luminous agn over a wide range of redshift. *Astronomy & Astrophysics*, EDP Sciences, v. 672, p. A98, 2023. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 113.

MUKHERJEE, S. et al. Seagle–iii: Towards resolving the mismatch in the dark-matter fraction in early-type galaxies between simulations and observations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 509, n. 1, p. 1245–1251, 2022. Citado na página 31.

MULDREW, S. I. et al. Measures of galaxy environment–i. what is 'environment'? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, The Royal Astronomical Society, v. 419, n. 3, p. 2670–2682, 2012. Citado na página 44.

MURDIN, P.; WEBSTER, B. L. Optical identification of cygnus x-1. *Nature*, Nature Publishing Group UK London, v. 233, n. 5315, p. 110–110, 1971. Citado na página 12.

NAIR, P. B.; ABRAHAM, R. G. On the fraction of barred spiral galaxies. *The Astrophysical Journal Letters*, IOP Publishing, v. 714, n. 2, p. L260, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 115.

NAPOLITANO, N. R.; ROMANOWSKY, A. J.; TORTORA, C. The central dark matter content of early-type galaxies: scaling relations and connections with star formation histories. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, The Royal Astronomical Society, v. 405, n. 4, p. 2351–2371, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 85.

NASA, E.; COLLABORATION the H. H. S.-E. *Galaxy NGC 4214: A Star-Formation Laboratory*. 2011. Last accessed 16 September 2024. Disponível em: <https://hubblesite.org/contents/media/images/2011/14/2844-Image.html>. Citado na página 7.

NASA/ESA; TEAM, T. H. H. *Galaxy NGC 2787*. 2002. Last accessed 16 September 2024. Disponível em: <https://esahubble.org/images/opo0207a/>. Citado na página 6.

NAVARRO, J. F.; FRENK, C. S.; WHITE, S. D. A universal density profile from hierarchical clustering. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 490, n. 2, p. 493, 1997. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 22.

NEISTEIN, E.; BOSCH, F. C. V. D.; DEKEL, A. Natural downsizing in hierarchical galaxy formation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK, v. 372, n. 2, p. 933–948, 2006. Citado na página 9.

NEWMAN, E. T. et al. Metric of a rotating, charged mass. *Journal of mathematical physics*, AIP Publishing, v. 6, n. 6, p. 918–919, 1965. Citado na página 11.

NIGOCHE-NETRO, A. et al. The quantity of dark matter in early-type galaxies and its relation to the environment. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 488, n. 1, p. 1320–1331, 2019. Citado 3 vezes nas páginas 22, 28 e 31.

NOIRLAB/NSF/AURA/P.MARENFELD. *Accretion Disks: How Big Are They Really?* 2023. Last accessed 16 September 2024. Disponível em: <https://noirlab.edu/public/blog/accretion-disks/>. Citado na página 18.

OBRESCHKOW, D.; RAWLINGS, S. The cosmic decline in the h2/h i ratio in galaxies. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 696, n. 2, p. L129, 2009. Citado na página 114.

PADMANABHAN, T. *Structure formation in the universe*. [S.l.]: Cambridge university press, 1993. Citado na página 8.

PATRICK, M. *Downsizing and galaxy formation*. 2006. Last accessed 16 September 2024. Disponível em: <https://www.slideserve.com/yank/downsizing-galaxy-formation>. Citado na página 9.

PEARSON, W. et al. Effect of galaxy mergers on star-formation rates. *Astronomy & Astrophysics*, EDP Sciences, v. 631, p. A51, 2019. Citado na página 16.

PEEBLES, P. Gravitational collapse and related phenomena from an empirical point of view, or, black holes are where you find them. *General Relativity and Gravitation*, Springer, v. 3, n. 1, p. 63–82, 1972. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.

PEEBLES, P. J. E. *Principles of physical cosmology*. [S.l.]: Princeton university press, 1993. v. 27. Citado na página 9.

PEIRANI, S.; PACHECO, J. A. de F. Dark matter accretion into supermassive black holes. *Physical Review D*, APS, v. 77, n. 6, p. 064023, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 20.

PENG, Y.-j. et al. Mass and environment as drivers of galaxy evolution in sdss and zcosmos and the origin of the schechter function. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 721, n. 1, p. 193, 2010. Citado na página 1.

PILLEPICH, A. et al. Simulating galaxy formation with the illustristng model. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 473, n. 3, p. 4077–4106, 2018. Citado na página 1.

POGGIANTI, B. M. et al. Jellyfish galaxy candidates at low redshift. *The Astronomical Journal*, IOP Publishing, v. 151, n. 3, p. 78, 2016. Citado na página 43.

POGGIANTI, B. M. et al. Ram-pressure feeding of supermassive black holes. *Nature*, Nature Publishing Group UK London, v. 548, n. 7667, p. 304–309, 2017. Citado na página 43.

POPESSO, P. et al. Rass-sdss galaxy cluster survey-ii. a unified picture of the cluster luminosity function. *Astronomy & Astrophysics*, EDP Sciences, v. 433, n. 2, p. 415–429, 2005. Citado na página 44.

QUINLAN, G. D.; HERNQUIST, L.; SIGURDSSON, S. Models of galaxies with central black holes: adiabatic growth in spherical galaxies. *arXiv preprint astro-ph/9407005*, 1994. Citado na página 25.

READ, J. I.; TRENTHAM, N. The baryonic mass function of galaxies. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, The Royal Society London, v. 363, n. 1837, p. 2693–2710, 2005. Citado na página 1.

RIBEIRO, A. et al. Late growth of early-type galaxies in low-z massive clusters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 521, n. 1, p. 1221–1232, 2023. Citado na página 28.

RICARDO, S. *Constraining the History of Star Formation of Early-type Galaxies*. 2006. Last accessed 16 September 2024. Disponível em: <https://slideplayer.com/slide/8963517/>. Citado na página 8.

RICHSTONE, D. et al. Supermassive black holes and the evolution of galaxies. *arXiv preprint astro-ph/9810378*, 1998. Citado na página 1.

ROMANO, M. Major mergers as possible drivers of the galaxy mass assembly in the early universe: New insights from alma observations. In: MDPI. *Physical Sciences Forum*. [S.l.], 2023. v. 7, n. 1, p. 30. Citado na página 16.

RUBIN, V. C. Dark matter in spiral galaxies. *Scientific American*, JSTOR, v. 248, n. 6, p. 96–109, 1983. Citado na página 20.

RUBIN, V. C. A brief history of dark matter. *The dark universe: matter, energy and gravity*, Cambridge University Press, p. 1–13, 2004. Citado na página 20.

SADEGHIAN, L.; FERRER, F.; WILL, C. M. Dark-matter distributions around massive black holes: A general relativistic analysis. *Physical Review D*, APS, v. 88, n. 6, p. 063522, 2013. Citado na página 24.

SAGLIA, R. et al. The sinfoni black hole survey: the black hole fundamental plane revisited and the paths of (co) evolution of supermassive black holes and bulges. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 818, n. 1, p. 47, 2016. Citado na página 33.

SANCHEZ-BLAZQUEZ, P. et al. Stellar populations of early-type galaxies in different environments-ii. ages and metallicities. *Astronomy & Astrophysics*, EDP Sciences, v. 457, n. 3, p. 809–821, 2006. Citado na página 92.

SÁNCHEZ, H. D. et al. Improving galaxy morphologies for sdss with deep learning. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 476, n. 3, p. 3661–3676, 2018. Citado na página 27.

SANDAGE, A. The classification of galaxies: Early history and ongoing developments. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, Annual Reviews, v. 43, p. 581–624, 2005. Citado na página 7.

SANTOS, D. D. dos et al. First observation of a double-peaked o i emission in the near-infrared spectrum of an active galaxy. *The Astrophysical Journal Letters*, IOP Publishing, v. 953, n. 1, p. L3, 2023. Citado na página 17.

SCHULZ, A.; MANDELBAUM, R.; PADMANABHAN, N. Testing adiabatic contraction with sloan digital sky survey elliptical galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, The Royal Astronomical Society, v. 408, n. 3, p. 1463–1475, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 90.

SCHWARZSCHILD, K. Über das gravitationsfeld eines massenpunktes nach der einsteinschen theorie. *Sitzungsberichte der königlich preussischen Akademie der Wissenschaften*, p. 189–196, 1916. Citado na página 11.

SERRA, P. et al. The atlas3d project–xiii. mass and morphology of h i in early-type galaxies as a function of environment. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, The Royal Astronomical Society, v. 422, n. 3, p. 1835–1862, 2012. Citado na página 31.

SHANKAR, F. The demography of supermassive black holes: Growing monsters at the heart of galaxies. *New Astronomy Reviews*, Elsevier, v. 53, n. 4-6, p. 57–77, 2009. Citado na página 15.

SHAPIRO, S. L. et al. The physics of compact objects. *Wiley, New York*, v. 19832, p. 119–123, 1983. Citado na página 20.

SHARMA, P.; BARAL, A. Galaxy classification using neural networks: a review. In: IEEE. *2018 International Conference on Audio, Language and Image Processing (ICALIP)*. [S.l.], 2018. p. 179–183. Citado na página 7.

SIMARD, L. et al. A catalog of bulge+ disk decompositions and updated photometry for 1.12 million galaxies in the sloan digital sky survey. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, IOP Publishing, v. 196, n. 1, p. 11, 2011. Citado na página 29.

SONNENFELD, A. et al. The sl2s galaxy-scale lens sample. v. dark matter halos and stellar imf of massive early-type galaxies out to redshift 0.8. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 800, n. 2, p. 94, 2015. Citado na página 23.

SPACETODAY. *Dando Sentido para a Sequência de Hubble*. 2010. Last accessed 16 September 2024. Disponível em: <https://spacetoday.com.br/dando-sentido-para-a-sequencia-de-hubble/>. Citado na página 7.

SPRINGEL, V. et al. Simulations of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars. *nature*, Nature Publishing Group UK London, v. 435, n. 7042, p. 629–636, 2005. Citado na página 2.

STORCHI-BERGMANN, T.; SCHNORR-MÜLLER, A. Observational constraints on the feeding of supermassive black holes. *Nature Astronomy*, Nature Publishing Group UK London, v. 3, n. 1, p. 48–61, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 113.

STRAUSS, M. A. et al. Spectroscopic target selection in the sloan digital sky survey: the main galaxy sample. *The Astronomical Journal*, IOP Publishing, v. 124, n. 3, p. 1810, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 29.

SXSLENSING. *Gravitational Lensing*. 2016. Last accessed 16 September 2024. Disponível em: <https://www.black-holes.org/lensing>. Citado na página 15.

TASCA, L. A. et al. The zcosmos redshift survey: the role of environment and stellar mass in shaping the rise of the morphology-density relation from z˜ 1. *Astronomy & Astrophysics*, EDP Sciences, v. 503, n. 2, p. 379–398, 2009. Citado na página 1.

TORTORA, C. et al. Spider—vi. the central dark matter content of luminous early-type galaxies: Benchmark correlations with mass, structural parameters and environment. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Blackwell Science Ltd Oxford, UK, v. 425, n. 1, p. 577–594, 2012. Citado na página 51.

TORTORA, C.; NAPOLITANO, N. R. The central dark matter fraction of massive early-type galaxies. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, Frontiers Media SA, v. 8, p. 704419, 2022. Citado na página 83.

TORTORA, C. et al. The last 6 gyr of dark matter assembly in massive galaxies from the kilo degree survey. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 473, n. 1, p. 969–983, 2018. Citado na página 51.

TREMAINE, S. et al. The slope of the black hole mass versus velocity dispersion correlation. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 574, n. 2, p. 740, 2002. Citado 3 vezes nas páginas 24, 32 e 65.

TREU, T.; KOOPMANS, L. V. Massive dark matter halos and evolution of early-type galaxies to z 1. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 611, n. 2, p. 739, 2004. Citado na página 32.

TYSON, N. d. G.; GOLDSMITH, D. Origens: catorze bilhões de anos de evolução cósmica. *São Paulo: Planeta do Brasil*, p. 74, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 20.

VAUCOULEURS, G. D. Revised classification of 1500 bright galaxies. *Astrophysical Journal Supplement, vol. 8, p. 31 (1963)*, v. 8, p. 31, 1963. Citado na página 114.

VAUCOULEURS, G. D. Structure, dynamics and statistical properties of galaxies. In: CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS. *Symposium-International Astronomical Union*. [S.l.], 1974. v. 58, p. 1–53. Citado na página 6.

VITO, F. et al. Black hole accretion preferentially occurs in gas-rich galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 441, n. 2, p. 1059–1065, 2014. Citado na página 43.

VOGELSBERGER, M. et al. Cosmological simulations of galaxy formation. *Nature Reviews Physics*, Nature Publishing Group UK London, v. 2, n. 1, p. 42–66, 2020. Citado na página 2.

VOLONTERI, M.; NATARAJAN, P.; GÜLTEKIN, K. How important is the dark matter halo for black hole growth? *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 737, n. 2, p. 50, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 65.

VULCANI, B. et al. The galaxy stellar mass function and its evolution with time show no dependence on global environment. *Astronomy & Astrophysics*, EDP Sciences, v. 550, p. A58, 2013. Citado na página 43.

WALKER, M. G.; PENARRUBIA, J. A method for measuring (slopes of) the mass profiles of dwarf spheroidal galaxies. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 742, n. 1, p. 20, 2011. Citado na página 10.

WAND, M. P.; JONES, M. C. Comparison of smoothing parameterizations in bivariate kernel density estimation. *Journal of the american Statistical Association*, Taylor & Francis, v. 88, n. 422, p. 520–528, 1993. Citado na página 47.

WASSERMAN, A. et al. The sluggs survey: The inner dark matter density slope of the massive elliptical galaxy ngc 1407. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 863, n. 2, p. 130, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 77 e 78.

WEINBERG, S. *Cosmology*. [S.l.]: OUP Oxford, 2008. Citado na página 21.

WHITE, S. D.; REES, M. J. Core condensation in heavy halos: a two-stage theory for galaxy formation and clustering. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press Oxford, UK, v. 183, n. 3, p. 341–358, 1978. Citado na página 8.

WILLETT, K. W. et al. Galaxy zoo 2: detailed morphological classifications for 304 122 galaxies from the sloan digital sky survey. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 435, n. 4, p. 2835–2860, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 115.

WISE, J. H. et al. Formation of massive black holes in rapidly growing pre-galactic gas clouds. *Nature*, Nature Publishing Group UK London, v. 566, n. 7742, p. 85–88, 2019. Citado na página 20.

XU, D. et al. The inner structure of early-type galaxies in the illustris simulation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press (OUP), v. 469, n. 2, p. 1824–1848, abr. 2017. ISSN 1365-2966. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/stx899>. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.

YOON, Y.; PARK, C. Dependence of the fundamental plane of early-type galaxies on age and internal structure. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 897, n. 2, p. 121, 2020. Citado na página 29.

ZAFARRIS. *A brief history of black holes*. 2020. <https://uselessetymology.com/2020/07/12/space-terms-word-origins-etymology-galaxy-chaos-cosmos-planet-nebula/>. Online; acesso em 15 December 2023. Citado na página 5.

ZAHID, H. J. et al. The stellar mass fundamental plane and compact quiescent galaxies at z< 0.6. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 821, n. 2, p. 101, 2016. Citado na página 35.

ZAROUBI, S. The epoch of reionization. *The first galaxies: theoretical predictions and observational clues*, Springer, p. 45–101, 2012. Citado na página 5.

ZHU, Q. et al. Baryonic impact on the dark matter distribution in milky way-sized galaxies and their satellites. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, The Royal Astronomical Society, v. 458, n. 2, p. 1559–1580, 2016. Citado na página 10.

ZWICKY, F. Nebulae as gravitational lenses. *Physical Review*, APS, v. 51, n. 4, p. 290, 1937. Citado na página 20.

ZWICKY, F. et al. The redshift of extragalactic nebulae. *Helv. Phys. Acta*, v. 6, n. 110, p. 138, 1933. Citado na página 20.

Apêndices

APÊNDICE A –

A.1 Relações de escala

As propriedades dinâmicas das galáxias têm um papel fundamental na formação e evolução das galáxias, elas são a forma mais direta de sondar o conteúdo de materia escura. Dito isso, as que mais interessam para este estudo são a massa estelar, a dispersão de velocidades, a razão de luminosidades bojo-total (B/T) e o raio efetivo da galáxia, entre outras (KORMENDY; HO, 2013; DING et al., 2020).

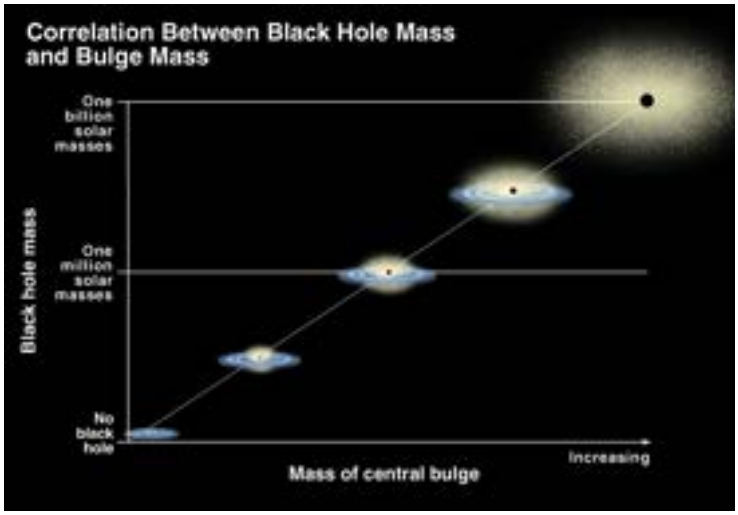
A dispersão de velocidades das estrelas é uma medida da velocidade combinada de muitas estrelas, obtida a partir do alargamento das linhas espectrais da galáxia (devido ao conjunto das diferentes velocidades das estrelas)(STORCHI-BERGMANN; SCHNORR-MÜLLER, 2019). A σ_e é usualmente preditor de algumas propriedades das galáxias, como por exemplo, a massa do bojo. Ela essencialmente mede o valor do movimento aleatório na linha de visão das estrelas devido à presença de massa, visto que investiga bem a profundidade do potencial gravitacional em que as estrelas estão situadas, o qual é dominado por matéria escura, o que permite também, traçar as propriedades do halo da matéria escura (BEZANSON; DOKKUM; FRANX, 2012).

A razão de luminosidade bojo-total (B/T) de uma galáxia é a fração da luminosidade total "contribuída"pelo bojo da galáxia. Os bojos são os componentes centrais de galáxias com disco, os quais aparecem como nucleos centrais brilhantes em imagens de galáxias ou como excesso de luminosidade sob discos de luz nas regiões internas de perfis de luz. A razão B/T é um importante indicador da estrutura galáctica e é bem correlacionada com outras quantidades físicas como a morfologia, cinemática, massa estelar e taxa de formação estelar (GROVER et al., 2021).

A razão B/T também pode determinar diretamente a luminosidade do bojo, a qual se correlaciona com a massa do buraco negro central. Além disso, um alto valor de B/T indica uma história evolutiva dominada por fusões. Já um baixo valor de B/T indica normalmente sistemas que abrigam pseudobojos, os quais devem ter passado por uma evolução lenta, através de processos evolutivos intervlos seculares (GROVER et al., 2021). Além disso, como pode ser visto na Figura 49, um aspecto importante a se considerar é a possível relação de proporcionalidade entre a massa do buraco negro e a massa do bojo de sua galáxia hospedeira, sugerindo uma co-evolução entre bojo e buraco negro central (MOUNTRICHAS, 2023).

O raio efetivo (R_e) ou raio de meia luz diz respeito à metade do fluxo total da galáxia, e é um dos indicativos mais comuns de tamanho da galáxia. O tamanho da galáxia

Figura 49 – Correlação entre a massa do bruaco negro e a massa do bojo



Fonte: Cordes & Brown (*Space telescope Science Institute*), 2000.

se correlaciona com diversas outras propriedades da galáxia, tais como massa estelar, brilho superficial e densidade estelar. A evolução dos tamanhos galácticos é um diagnóstico observacional importante para analisar/restringir modelos evolutivos. O tamanho também é importante para definir frações centrais de matéria escura.(BAES et al., 2024).

A.2 O Parâmetro T-Type

As subdivisões citadas anteriormente podem ser feitas utilizando-se um parâmetro conhecido como *T-type*, que pode ser atribuído aos tipos morfológicos ETG e LTG (VAUCOULEURS, 1963), que tem a vantagem de ser uma variável numérica. Isto permite estudar relações entre a morfologia das galáxias e suas propriedades estruturais, intrínsecas e ambientais. Os valores assumidos pelo parâmetro T podem ser equiparados aos tipos de Hubble como: -6 a -4 são elípticos, -3 a -1 são S0s e 0 a 9 são S0/a, Sa, Sab, Sb, Sbc, Sc, Scd, Sd, Sdm e Sm, respectivamente (CONSELICE, 2006). Portanto, de modo geral, valores mais baixos de T correspondem a uma fração maior da massa estelar contida em um esferóide (ou bojo) em relação ao disco. O mapeamento aproximado entre a razão entre a massa estelar esferóide e total (M_B/M_T) e o tipo de Hubble é $(M_B/M_T) = (10-T)^2/256$ baseado em galáxias locais (OBRESCHKOW; RAWLINGS, 2009), que pode ser expresso como

$$\begin{aligned} T &= -4.6 \times P(E) - 2.4 \times P(S0) \\ &\quad + 2.5 \times P(Sab) + 6.1 \times P(Scd). \end{aligned} \tag{A.1}$$

(MEERT; VIKRAM; BERNARDI, 2015).

No universo local, as ETG estão principalmente situadas em regiões mais densas, como o centro dos aglomerados de galáxias, e têm uma massa maior, menos gás, maior

dispersão de velocidades e populações estelares mais antigas que as LTG (BARCHI et al., 2020). A seperação de objets ETG dos LTG é de fundamental importância para a astrofísica extragaláctica. E o parâmetro T é uma ferramenta de grande importância para este fim.

Meert, Vikram e Bernardi (2015) usaram a classificação T-type a partir das probabilidades de tipo de galáxias (E, S0, Sab e Scd) que aparecem na expressão A.1. Os coeficientes da equação são calibrados para as galáxias classificadas visualmente por Nair e Abraham (2010) através de uma regressão linear não ponderada. Uma comparação semelhante foi usada em Willett et al. (2013), embora tenha sido utilizada uma regressão simbólica em vez de uma regressão linear. Em Willett et al. (2013), o resultado da regressão simbólica foi um modelo linear em parâmetros relativos apenas à dominância do bojo. O ajuste de regressão feito por Meert, Vikram e Bernardi (2015) estima tipos T entre -5 e 4 com valor mediano de 0 no tipo T e 68% das estimativas dentro de ± 2 no tipo T. Embora a dispersão seja relativamente alta, pode-se separar com segurança os tipos iniciais e tardios (a diferença no tipo T para essas galáxias é superior a 4).

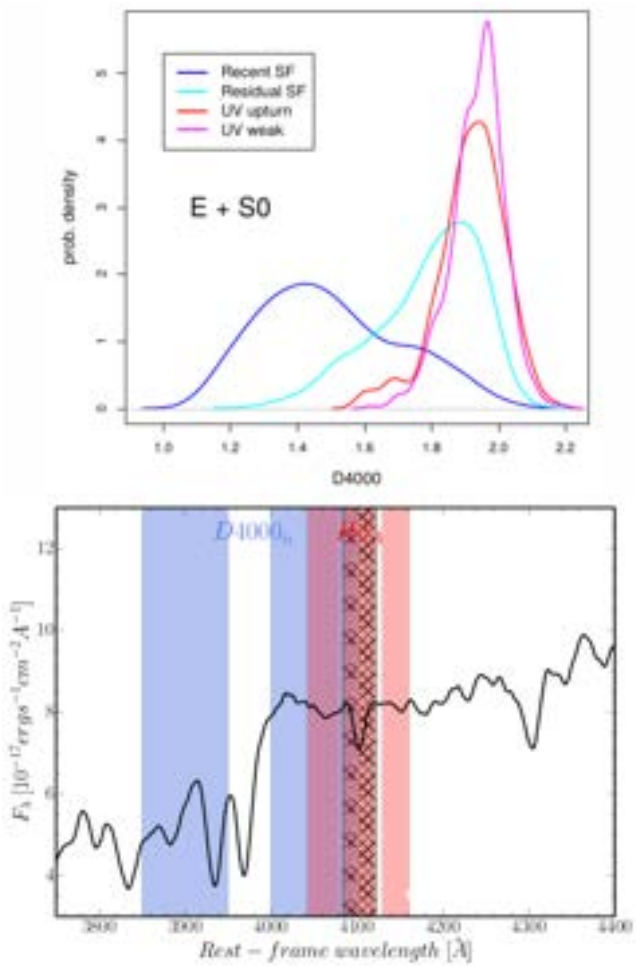
A.3 Índice D4000

Uma outra maneira de dividir as galáxias é através do índice D4000. O índice D4000 ou a "quebra" em 4000Å pode ser definido como a razão do fluxo no contínuo vermelho para aquele no contínuo azul. Esta quebra é a descontinuidade mais forte no espectro óptico de uma galáxia e surge devido ao acúmulo de um grande número de linhas espectrais em uma região estreita de comprimento de onda, como pode ser visto no segundo quadro da Figura 50.

Em estrelas quentes, os elementos são multiplamente ionizados e a opacidade diminui, então esta quebra será pequena para populações estelares jovens e grande para galáxias antigas e ricas em metais, ou seja, o índice D4000 pode ser utilizado para caracterizar a formação estelar de galáxias, principalmente no último Gyr, separando as galáxias em vermelhas velhas ou galáxias com formação estelar, um exemplo disso está exposto no primeiro quadro da Figura 50. Usualmente, D4000 é relacionado ao último grande surto de formação estelar das galáxias.

Balogh et al. (1999) introduziram uma definição usando bandas contínuas mais estreitas, no azul (3850-3950Å) e no vermelho (4000-4100Å). A principal vantagem desta definição é que o índice é consideravelmente menos sensível aos efeitos de avermelhamento. Além disso, possíveis erros são menores para galáxias mais velhas com quebras maiores de 4000Å do que para galáxias mais jovens com quebra menores (BALOGH et al., 1999; KAUFFMANN et al., 2003; LOUBSER et al., 2016).

Figura 50 – Distribuição de D4000.



Legenda: 1.Exemplo de espectro de galáxias passivas na faixa de comprimento de onda 3800 - 5000Å; 2. Distribuição típica de D4000 para ETG. Fonte:1. Siudek et al. (2016); 2. Fonseca, (2020).

A.4 Diagrama WHAN

Um outro método de classificação pode ser feito por meio das linhas de emissão de galáxias. Ele permite lidar com questões como a formação estelar, composição química ou atividade nuclear (FERNANDES et al., 2011b).

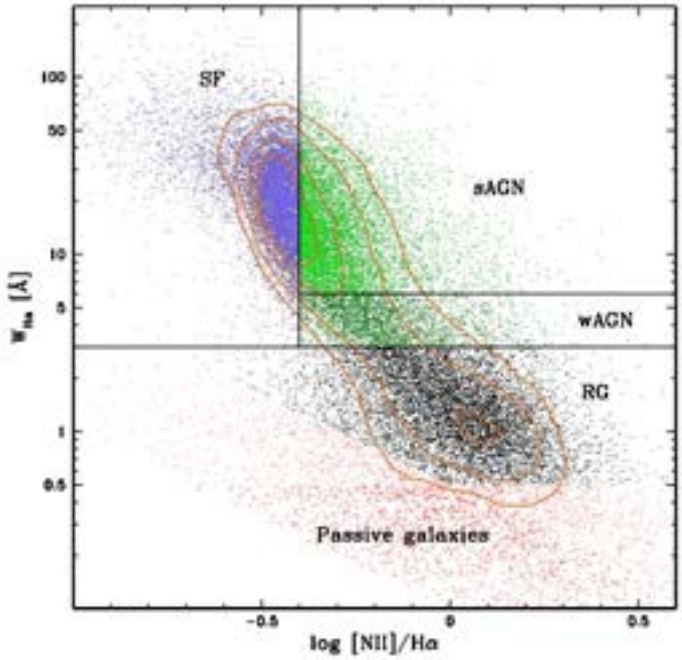
O diagrama de linha de emissão mais popular é o diagrama BPT (Baldwin, Phillips & Telervich), baseado nas relações entre quatro linhas de emissão, [OIII]λ5007/Hβ versus [NII]λ6584/Hβ. Este diagrama busca identificar a principal fonte de ionização nos espectros de objetos extragalácticos e se tornou uma das principais ferramentas para a classificação e análise de galáxias de linha de emissão no Sloan Digital Sky Survey. Contudo, o diagrama BPT possui uma limitação devido a requisitos de qualidade em todas as 4 linhas de emissão (BALDWIN; PHILLIPS; TERLEVICH, 1981; FERNANDES et al., 2011b).

Há um diagrama mais econômico, usando apenas duas linhas, Hα e [NII], que é feito através do plot da largura equivalente de Hα versus [NII]/Hα, conhecido como

diagrama WHAN. Fernandes et al. (2011b) considerou o critério baseado em Wλ (largura de linha) mais apropriado, pois é baseado em uma abordagem mais direta da medição da intensidade da linha e menos explicitamente dependente da qualidade dos dados.

No diagrama WHAN, pode-se classificar as galáxias em passivas, com linhas de emissão e aposentadas, como pode ser visto na figura 51. As galáxias passivas são definidas como aquelas com linhas de emissão muito fracas ou não detectadas, isto é, se as larguras equivalentes ($W\lambda$) de $H\alpha$ e [NII] forem menores que $0,5$Å. As galáxias locais nesta categoria são principalmente elípticas, S0 ou espirais precoces (Sa ou Sb) (FERNANDES et al., 2011b; BALOGH et al., 1999).

Figura 51 – Diagrama WHAN



Fonte: (FERNANDES et al., 2011b).

As galáxias com linhas de emissão podem ser divididas em galáxias com formação estelar (SF) ou com núcleo ativo (AGN). Tais galáxias são objetos que possuem largura equivalente da linha $H\alpha$ ($WH\alpha$) ou largura equivalente na banda NII (W[NII]) maior que $0,5$Å. Em particular, modelos para galáxias com formação estelar mostram que se tal formação estiver ocorrendo por pelo menos várias centenas de milhões de anos, a absorção estelar dominará qualquer emissão nebular desta classe. As galáxias locais deste tipo são normalmente espirais tardias (Sc) e algumas galáxias que foram classificadas como "starburst", com base na presença de fortes linhas de emissão (FERNANDES et al., 2011b; BALOGH et al., 1999).

Estes objetos estão tendo um surto de formação estelar. Além destas, temos as AGNs (em inglês: *active galactic nucleus-AGN*), que podem ser *early* ou *late type*, são regiões superluminosas, com emissão de radiação de natureza não necessariamente estelar,

presença de um buraco negro massivo no centro (circundado por um disco de acreção), excesso de radiação (linhas largas), apresentando nas observações a cruz de difração. Diferentemente das galáxias normais, as AGNs emitem linhas permitidas (ocorrem em transições cuja meia vida é curta) e emitem em linhas proibidas (ocorrem em transições cuja meia vida é mais longa).

São exemplos de AGNs as Seyfert, galáxias com núcleos emitindo no espectro continuo azul, que podem ter dois conjuntos de emissão (Tipo I) ou apenas linhas estreitas (Tipo II), sendo elas classificadas normalmente como espirais *early-type* ou precoces (Sa, Sb). As starbusts, são galáxias com alta taxa de formação estelar na região central, porém, de curta duração. Os quasares, também conhecidos como objetos "quase-estelares", são fontes intensas observadas em *redshifts* (z) mais altos, isto é, são habitantes de um universo mais jovem, têm forte emissão em rádio, UV e IV, além de serem mais luminosos que as Seyferts. E Liners, regiões nucleares de baixa ionização, que se encontram no universo próximo, sendo pouco compreendidas.

Finalmente, temos as galáxias "retired"(ou aposentadas) que são sistemas cujas populações estelares antigas são suficientes para explicar as propriedades das linhas de emissão observadas, isto é, são galáxias cujas populações estelares antigas são capazes de contabilizar toda a emissão de $H\alpha$ observada, por isso, elas são erroneamente associadas à atividade não-estelar. As galáxias retired são objetos que pararam de formar estrelas, cujas linhas de missão são alimentadas pelas suas estrelas quentes evoluídas de baixa massa (FERNANDES et al., 2011b).

De maneira geral, segundo Fernandes et al. (2011b), um comportamento que se percebe entre as galáxias é a diminuição dos níveis da taxa de formação estelar recentes à medida que a escala de massa aumenta. Contudo, há uma diminuição desta taxa a partir de galáxias SF para AGN, RGs e PGs, além disso, o histórico para RGs e PGs são muito semelhantes devido a propriedades globais semelhantes. Resumindo, o diagrama WHAN proposto por Fernandes et al. (2011b), definido no espaço da largura equivalente de $H\alpha$ versus $[NII]/H\alpha$, permite a identificação de 5 classes de galáxias: com formação estelar, starbursts, AGNs, retired e passivas.

A.5 Teste KDE

Segundo Carvalho et al. (2017), o teste KDE, presente na biblioteca ks da linguagem R baseia-se no método de Duong, Goud e Schauer (2012). Sumariamente, este método utiliza algoritmos para transformar pontos em kernel e cria um teste multivariante não paramétrico e assintóticamente normal de duas amostras, afim de comparar direta e quantitativamente diferentes distribuições. A normalidade assintótica ignora os calculos computacionalmente intensivos usados pelas técnicas de reamostragem para computar o

valor-p. Uma vez que todos os parametros necessários para o teste estatístico são estimados diretamente dos dados, não há necessidade de decisões subjetivas.

Dito isso, $X_1, X_2, ...$ e $Y_1, Y_2, ...$ são coordenadas espaciais das amostras, e f_1 e f_2 são as funções de densidade de probabilidade espaciais correspondentes. As estimativas de densidade de Kernel de f_1 e f_2 são dadad por

$$f_1(x, H_1) = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} Ke_{H_1}(x - x_i) \tag{A.2}$$

$$f_2(x, H_2) = \frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{n_1} Ke_{H_2}(x - x_i) \tag{A.3}$$

onde Ke é a função de Kernel com $Ke_{H_l} = |H_l|^{-\frac{1}{2}} K(H_l^{-\frac{1}{2}} X)$ e H_l é uma matriz de largura de banda para l=1,2. E, para testar a hipotese nula $H_o : f_1 = f_2$, uma medida de discrepância e introduzida

$$T = \int [f_1(x) - f_2(x)]^2 \, dx \tag{A.4}$$

Assumindo que a hipotese nula se mantenha, pode se mostrar que

$$mu_T = [n_1^{-1} |H_1|^{-1/2} + n_2^{-1} |H_2|^{-1/2}] K(0) \tag{A.5}$$

$$sigma_T^2 = 3[\int [f(x)^3 \, dx] - (\int [f(x)^2 \, dx])^2] \tag{A.6}$$

e o $z_e - score$ é

$$z_e = \frac{T - \mu_T}{\sigma_T \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \tag{A.7}$$

o valor-p é então computado a partir deste z-score, usando tabelas ou software padrão.