

Universidade de São Paulo
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
Departamento de Astronomia

Isaac Bergerman

**Propriedades Físicas e Morfológicas de
Superaglomerados de Galáxias no Catálogo
eROSITA**

São Paulo

2025

Isaac Bergerman

Propriedades Físicas e Morfológicas de Superaglomerados de Galáxias no Catálogo eROSITA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Departamento de Astronomia do Instituto
de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
da Universidade de São Paulo como requisito
parcial para a obtenção do título de Bacharel
em Astronomia.

Vertente: Pesquisa Básica.

Orientador: Prof. Dr. Laerte Sodré Junior
(IAG/USP).

São Paulo

2025

Àqueles que me inspiraram a olhar para o céu com curiosidade e rigor.

Agradecimentos

Aos meus pais, Mauro e Celly, pelo amor incondicional e apoio constante. Certamente esse trabalho é fruto, sobretudo, do investimento sério deles na minha educação ao longo de toda a minha vida.

Aos meus irmãos, David e Daniela, por sempre me suportarem.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Laerte Sodré Junior, pela orientação atenciosa, disposição em sempre esclarecer minhas dúvidas e pela sugestão do projeto.

Aos colegas do IAG, que contribuíram com aprendizados e significativos momentos de convivência.

Resumo

Neste trabalho foram estimadas as massas e analisadas as propriedades morfológicas dos superaglomerados de galáxias identificados no levantamento *eROSITA Final Equatorial-Depth Survey* (eFEDS). O estudo dá continuidade ao Trabalho de Graduação I, no qual foi desenvolvida e implementada uma rotina *friends-of-friends* (FoF) para a identificação dessas estruturas a partir dos catálogos de aglomerados de Liu et al. (2022).

As massas individuais dos aglomerados foram determinadas a partir da relação de escala $L_X - M_{500}$ proposta por Lovisari et al. (2015), adotando-se um fator de conversão médio $c = 1,5$ para compatibilizar as diferentes bandas e aberturas de luminosidade. Essa aproximação mostrou-se satisfatória, apresentando boa concordância com resultados prévios.

A análise morfológica foi conduzida com base nos momentos de segunda ordem da distribuição tridimensional dos aglomerados, modelada por elipsóides de inércia. As razões entre os semieixos principais (b/a e c/a) indicam uma predominância de morfologias alongadas, com tendências *filamentares* e *laminares*, em conformidade com a expectativa teórica de que os superaglomerados se organizam ao longo dos filamentos e paredes da teia cósmica.

Uma segunda execução do algoritmo FoF com fator de sobredensidade $f = 5$ permitiu identificar estruturas mais extensas e explorar diferentes níveis hierárquicos da teia cósmica. Os resultados obtidos estão em boa concordância com a literatura, evidenciando a eficiência do método e a utilidade das relações de escala em raios X para a caracterização física e morfológica de grandes estruturas cósmicas.

Abstract

In this work, the masses and morphological properties of galaxy superclusters identified in the *eROSITA Final Equatorial-Depth Survey* (eFEDS) were investigated. This study continues the first part of the project (Undergraduate Thesis I), in which a *friends-of-friends* (FoF) algorithm was developed and implemented to identify such structures from the cluster catalogs of Liu et al. (2022).

Individual cluster masses were estimated using the $L_X - M_{500}$ scaling relation proposed by Lovisari et al. (2015), adopting an average conversion factor of $c = 1.5$ to match the different luminosity bands and apertures. This approximation proved satisfactory, showing good agreement with previous results.

The morphological analysis was performed based on the second-order moments of the three-dimensional cluster distribution, modeled by inertia ellipsoids. The ratios between the principal semi-axes (b/a and c/a) indicate a predominance of elongated morphologies, with *filamentary* and *laminar* tendencies, consistent with the theoretical expectation that superclusters are preferentially aligned along the filaments and walls of the cosmic web.

A second execution of the FoF algorithm with a lower overdensity factor ($f = 5$) enabled the identification of more extended structures and the exploration of different hierarchical levels of the cosmic web. The results obtained are in good agreement with the literature, highlighting the efficiency of the adopted methodology and the relevance of X-ray scaling relations for the physical and morphological characterization of large-scale cosmic structures.

Lista de Figuras

1.1	Representação da teia cósmica em diferentes escalas.	18
2.1	Ilustração dos mecanismos de emissão de radiação não térmica.	22
2.2	Imagen de todo céu em raios X pelo eROSITA.	23
2.3	Histograma de redshift do eROSITA	24
2.4	Mapas celestes dos aglomerados e superaglomerados do eROSITA	26
3.1	Histograma das massas viriais (M_{tot}) determinadas.	29
4.1	Diagrama morfológico do trabalho de Jaaniste et al. (1998)	33
4.2	Diagrama morfológico para os superaglomerados identificados com $f = 10$ nos dados do eFEDS	35
4.3	Diagrama morfológico para os superaglomerados identificados com $f = 5$ e $N \geq 5$	36
4.4	Superaglomerados do catálogo eFEDS com $f = 10$.	37

Lista de Tabelas

2.1	Comparação entre os superaglomerados encontrados no TG1 e os por Liu et al. a partir dos dados do eROSITA.	25
3.1	Comparação entre as massas dos superaglomerados calculadas no presente trabalho e aquelas calculadas por Liu et al. (2022) a partir dos dados do eROSITA.	28
4.1	Relações típicas entre os eixos principais do elipsoide e interpretações geométricas associadas.	32
4.2	Semieixos principais (a, b, c), razões b/a e c/a , número de membros (N) e coordenadas do centro geométrico (RA, Dec, z) dos superaglomerados. . .	34

Sumário

1. <i>Introdução</i>	17
2. <i>Base de dados</i>	21
2.1 Composição e Observação dos Aglomerados	21
2.2 Dados utilizados	22
2.3 Superaglomerados detectados no TG1	24
3. <i>Cálculo das Massas</i>	27
4. <i>Análise Morfológica</i>	31
4.1 Fundamentos Teóricos	31
4.2 Análise Morfológica	32
4.3 Resultados	34
5. <i>Conclusões</i>	39
<i>Referências</i>	43
<i>Apêndice</i>	45
A. <i>Conversão de coordenadas</i>	47

Capítulo 1

Introdução

O Universo em grande escala apresenta uma estrutura conhecida como teia cósmica, altamente anisotrópica. Essa estrutura é composta por regiões subdensas, chamadas de vazios, e regiões sobredensas, por sua vez classificadas em paredes, filamentos e nós, dependendo da distribuição espacial da matéria nessa região (Figura 1.1). Nessas regiões de sobredensidades encontram-se os superaglomerados (SAs).

A maioria das galáxias do Universo encontra-se em grupos e aglomerados. Grupos geralmente contêm até 100 galáxias, enquanto aglomerados podem abrigar de centenas a milhares. Essas estruturas, juntamente com galáxias isoladas, formam organizações ainda maiores conhecidas como superaglomerados, que estão entre as maiores estruturas já identificadas no Universo observável.

Superaglomerados podem se estender por centenas de megaparsecs e conter centenas de milhares de galáxias. Um exemplo notável é o superaglomerado Laniakea, no qual se encontra a Via Láctea. Ele possui cerca de 100 000 galáxias e se estende por aproximadamente 160 Mpc (Tully et al., 2014).

Diferentemente dos grupos e aglomerados de galáxias, os superaglomerados não são estruturas gravitacionalmente ligadas como um todo. Eles ainda não atingiram o equilíbrio dinâmico e não estão globalmente em processo de colapso. O que geralmente ocorre é que algumas partes podem estar em processo de colapso gravitacional, mas predomina o afastamento devido a expansão do Universo.

Feitas essas considerações, pode-se compreender que a identificação e análise de superaglomerados contribui para um entendimento mais amplo, detalhado e estruturado da teia cósmica. Em suma: os superaglomerados atuam como marcadores naturais dessa teia. Por sua vez, o estudo da teia cósmica é fundamental por, ao menos, duas razões principais.

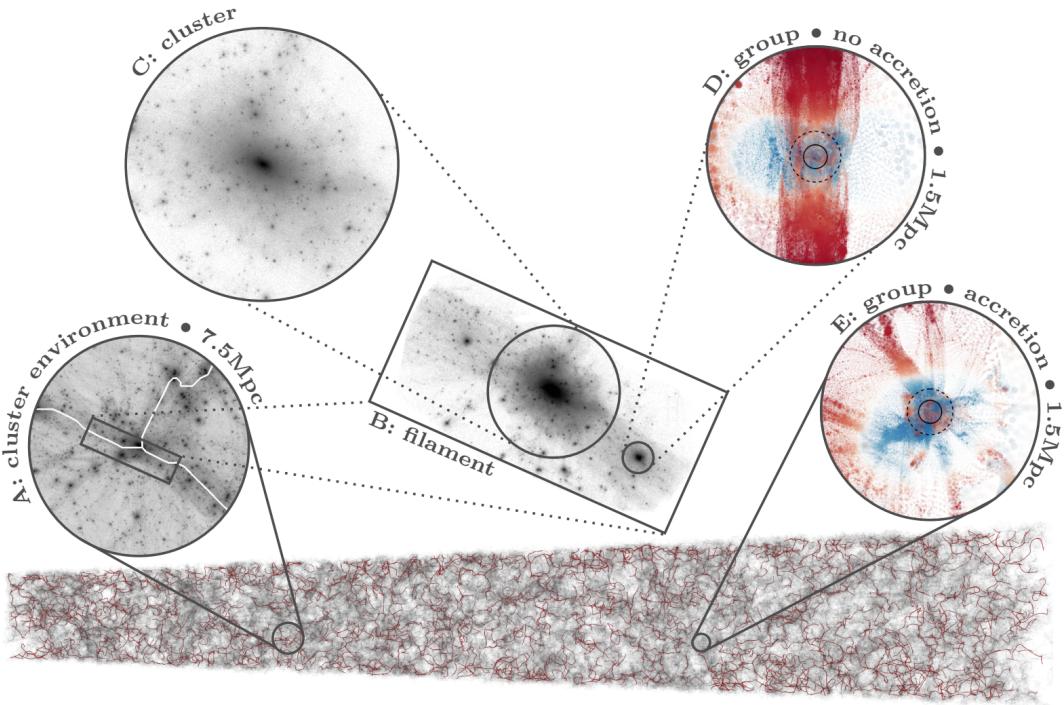


Figura 1.1: Representação da teia cósmica em diferentes escalas, destacando aglomerados, filamentos e grupos de galáxias em simulações cosmológicas. As linhas em vermelho representam os filamentos mapeados pela distribuição das galáxias. Também está representada a dinâmica entre as grandes estruturas e os halos de matéria escura. As regiões coloridas (azul e vermelho) ilustram o fluxo de matéria: azul indica material caindo em direção ao halo e vermelho indica material se afastando. Fonte: Tojeiro e Kraljic (2025).

Primeiramente, a teia cósmica tem origem nas flutuações do campo de densidade do Universo primordial, amplificadas posteriormente pelo colapso gravitacional anisotrópico. Seu mapeamento observational, portanto, fornece um parâmetro essencial de comparação para as simulações numéricas da evolução do Universo. Isso permite: (1) o refinamento dos modelos que descrevem o Universo primordial e (2) dos parâmetros cosmológicos adotados, uma vez que ambos influenciam diretamente as propriedades da teia cósmica.

Outra razão central para o estudo da teia cósmica é o seu papel direto na modulação das propriedades dos halos de matéria escura, quando comparados halos de mesma massa. Simulações cosmológicas mostram que halos localizados em filamentos espessos ou próximos a nós tendem a ser mais antigos, com baixas taxas de acreção, menor fração de subestrutura e órbitas mais tangenciais (Tojeiro e Kraljic, 2025). Em contraste, halos situados em regiões menos densas, afastadas dos efeitos de maré mais intensos, continuam a crescer, com maior fração de subestrutura e órbitas predominantemente radiais. Esse fenômeno está ilustrado

de forma interessantíssima nos grupos D e E da Figura 1.1: o grupo D está localizado no meio de um filamento e não apresenta acreção, enquanto o grupo E está em um vazio e apresenta mais acreção. Esse tipo de dependência com a posição na teia cósmica também explica o fenômeno conhecido como viés de formação de halos (*halo assembly bias*), no qual halos mais antigos apresentam um maior grau de aglomeração espacial. Esse viés é muito significativo em halos de baixa massa e pouco em halos de alta massa.

Além das duas razões discutidas anteriormente, há outros aspectos igualmente relevantes que motivam o estudo da teia cósmica, como seu impacto sobre propriedades escalares das galáxias — especialmente massa, taxa de formação estelar e metalicidade — e também sobre a orientação de seus momentos angulares. Ao leitor interessado em se aprofundar no tema, recomenda-se a leitura de Tojeiro e Kraljic (2025), um texto claro, abrangente e rigoroso sobre o assunto.

O objetivo principal deste trabalho é determinar as massas e caracterizar as propriedades morfológicas dos superaglomerados de galáxias identificados no levantamento *eROSITA Final Equatorial-Depth Survey* (eFEDS), em continuidade à análise iniciada no Trabalho de Graduação I. Para isso, estimam-se as massas dos aglomerados a partir de suas luminosidades em raios X, por meio da relação de escala $L_X - M_{500}$, e realizam-se análises morfológicas baseadas nos momentos de segunda ordem de suas distribuições espaciais.

Este trabalho está organizado da seguinte forma. No Capítulo 2, são apresentados os fundamentos teóricos relacionados à composição e identificação de aglomerados de galáxias, com ênfase nos levantamentos em raios X e, em particular, no levantamento utilizado neste estudo. O Capítulo 3 descreve o procedimento adotado para a determinação das massas, incluindo a aplicação da relação $L_X - M_{500}$ e a calibração empregada para compatibilizar as diferentes bandas e aberturas. No Capítulo 4, são detalhadas as etapas da análise morfológica, baseada no cálculo dos momentos de segunda ordem e na modelagem das distribuições espaciais por elipsoides de inércia. Os resultados são discutidos na Seção 4.3, na qual se comparam as tendências morfológicas observadas com aquelas reportadas na literatura recente. Por fim, o Capítulo 5 reúne as principais conclusões do estudo e apresenta perspectivas para investigações futuras.

Capítulo 2

Base de dados

2.1 Composição e Observação dos Aglomerados

Os aglomerados de galáxias são compostos, em termos de massa, por três componentes principais: (1) matéria escura, (2) a matéria bariônica no meio intra-aglomerado (ICM, *intracluster medium*) e (3) a matéria bariônica presente nas galáxias. No catálogo de Abell (Abell et al., 1989), para cada aglomerado a matéria escura representa cerca de 80% a 85% da massa total, o ICM contribui com 13% a 16%, e a matéria nas galáxias corresponde a aproximadamente 2% a 3% (Lima Neto, 2025). O catálogo de aglomerados ricos de Abell é um dos mais utilizados na literatura, contendo 4073 objetos com *redshift* $z \leq 0.02$ e cobrindo todo o céu.¹

O ICM consiste em um plasma difuso e superaquecido que permeia o interior dos aglomerados. É composto majoritariamente por hidrogênio ionizado e hélio, com temperaturas da ordem de $10^7 - 10^8$ K e densidades relativamente baixas ($\sim 10^{-2} - 10^{-3}$ partículas/cm³). Sua emissão é observável principalmente nas faixas de raios X e rádio. A intensa emissão em raios X deve-se, sobretudo, à *bremsstrahlung* térmica, resultante da desaceleração de elétrons livres ao passarem próximos a núcleos atômicos (Figura 2.1, à esquerda). Em menor escala, a emissão também ocorre por meio de linhas espectrais de elementos pesados, como ferro (Fe), silício (Si) e enxofre (S).

A observação em rádio de aglomerados de galáxias permite muitas vezes detectar o efeito Sunyaev-Zeldovich (efeito SZ). Esse efeito ocorre quando fótons da radiação cósmica de fundo (CMB, na sigla em inglês *cosmic microwave background*) atravessam o ICM e

¹ Termos amplamente utilizados na literatura em inglês, como *redshift* e *cluster*, serão utilizados ao longo deste trabalho sem destaque tipográfico.

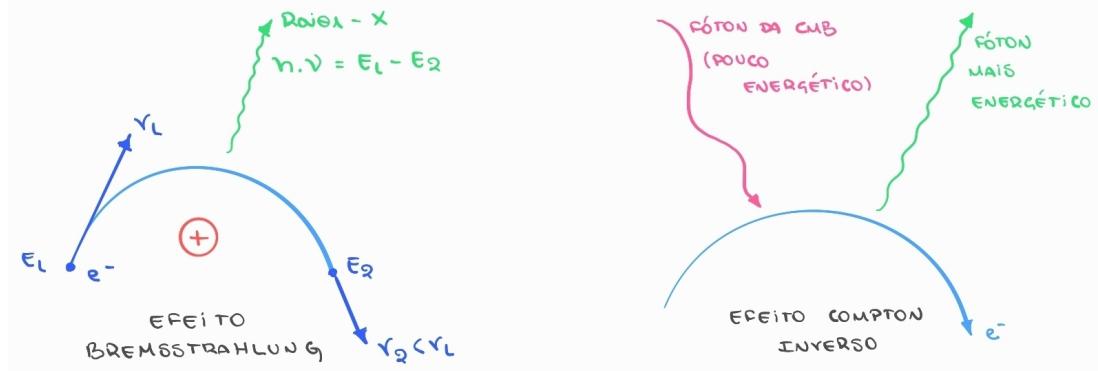


Figura 2.1: Processos radiativos fundamentais para a observação da ICM: Efeito *Bremssstrahlung* (à esquerda) e Efeito Compton Inverso (à direita). No caso da ICM, o efeito *Bremssstrahlung* é dita térmica pois os elétrons possuem uma distribuição de velocidades térmica (isto é, seguem a distribuição de Maxwell-Boltzmann) e assim as emissões individuais se somam para produzir um espectro contínuo característico da temperatura do plasma.

sofrem espalhamento Compton inverso pelos elétrons livres (Figura 2.1, à direita). Nesse processo, os fôtons ganham energia, modificando o espectro da CMB na linha de visada do aglomerado. Como resultado, ao se observar a CMB em frequências de rádio (para $\nu < 217$ GHz), nota-se uma deficiência de fôtons, fazendo com que o aglomerado apareça como uma região de menor intensidade (ou mais fria) no mapa da CMB.

2.2 Dados utilizados

No presente trabalho, utilizaremos os catálogos de aglomerados de Liu et al. (2022). Esses dados provêm do eROSITA Final Equatorial-Depth Survey (eFEDS), uma campanha de observação conduzida pelo telescópio espacial eROSITA, embarcado na missão russo-alemã Spektr-RG (SRG). O eROSITA é um telescópio de raios X desenvolvido pelo Instituto Max Planck de Física Extraterrestre (MPE) e foi lançado em 2019, como parte da missão SRG. Seu principal objetivo é realizar o primeiro levantamento completo do céu em raios X com resolução e profundidade sem precedentes, especialmente na faixa de energia de 2–10 keV — tarefa cuja primeira realização foi concluída em junho de 2020 (Figura 2.2).

Desde 2022, o telescópio encontra-se inativo, após decisão da equipe alemã de suspender sua operação em resposta à invasão da Ucrânia pela Rússia. Até então, haviam sido concluídas quatro das oito varreduras de todo o céu originalmente planejadas.

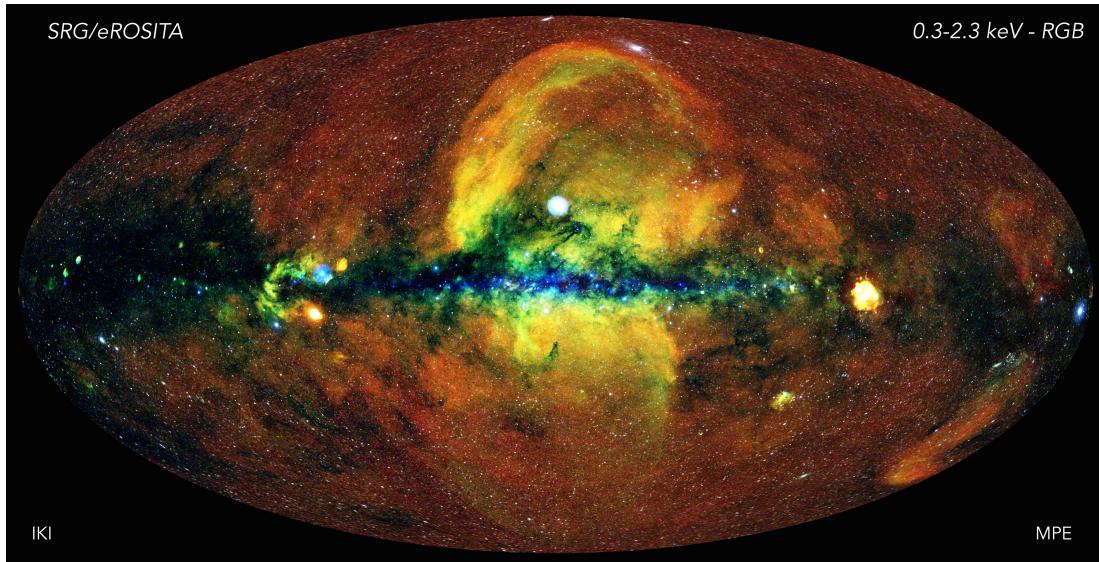


Figura 2.2: Imagem de todo o céu em raios X obtida pelo telescópio eROSITA, com fontes coloridas conforme a energia dos fótons detectados (vermelho: 0.3–0.6 keV; verde: 0.6–1 keV; azul: 1–2.3 keV). A imagem revela milhões de fontes, incluindo gás quente, AGNs e aglomerados. Créditos: Jeremy Sanders, Hermann Brunner e equipe eSASS (MPE); Eugene Churazov, Marat Gilfanov (IKI).

As observações do eFEDS foram realizadas entre os dias 4 e 7 de novembro de 2019, cobrindo uma área de aproximadamente 140 deg^2 do céu. Foram identificados 542 candidatos a aglomerados. Esse levantamento foi projetado com o intuito de testar os métodos de detecção e caracterização de aglomerados de galáxias, servindo como um estudo de prova de conceito antes da conclusão do levantamento completo do céu pelo eROSITA.

A Figura 2.3 apresenta a distribuição dos redshifts dos aglomerados do eFEDS. Observa-se que a amostra é dominada por aglomerados em redshifts baixos e intermediários, com rápido decaimento para valores mais altos. Esse perfil é típico para levantamentos em raios X limitados em fluxo.

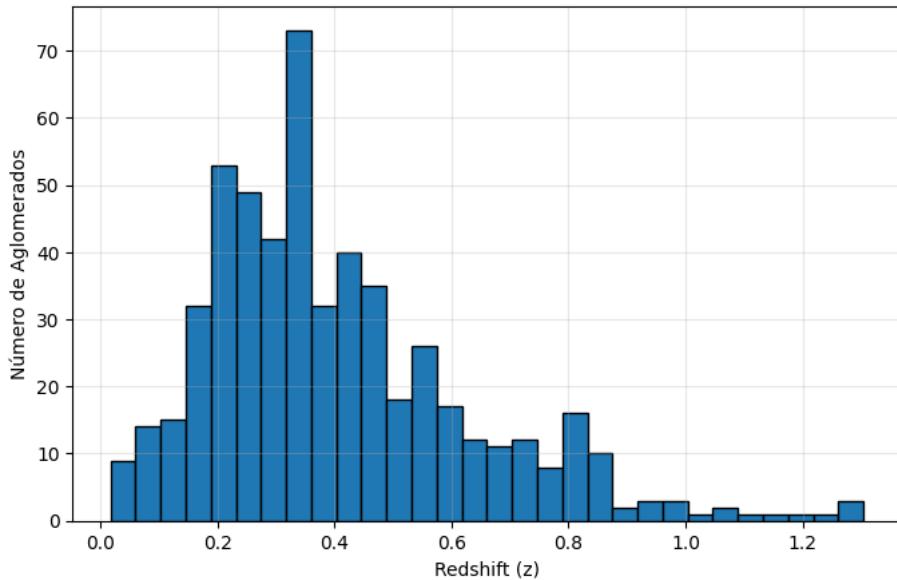


Figura 2.3: Histograma de redshift dos aglomerados detectados pelo levantamento eFEDS.

2.3 Superaglomerados detectados no TG1

No Trabalho de Graduação 1 (TG1), foi desenvolvido e aplicado um algoritmo do tipo *friends-of-friends* (FoF), implementado com base na metodologia de Liu et al. (2022), para a identificação de superaglomerados de galáxias em diferentes catálogos observacionais. O método foi testado em três levantamentos: eFEDS (eROSITA), RASS-MCMF (com base no trabalho de Klein et al. (2023)) e SPT-ECS (com base no trabalho de Bleem et al. (2020)). Os dois primeiros baseiam-se em observações em raios X, enquanto o último no efeito SZ. O resultado foi a determinação de várias estruturas em todos os catálogos. A partir dos dados do eROSITA, foram identificados 20 superaglomerados contendo ao menos quatro membros, dos quais 16 apresentaram boa correspondência espacial com os objetos reportados por Liu et al. (2022). Esses resultados estão representados na Tabela 2.1. O presente trabalho dá continuidade à pesquisa concentrando-se exclusivamente nos superaglomerados identificados a partir do levantamento eROSITA, visando à estimativa de suas massas e suas classificações morfológicas.

A Figura 2.4 apresenta os mapas celestes dos aglomerados estudados e dos superaglomerados detectados. No painel superior, são mostrados todos os aglomerados de galáxias detectados, distribuídos nas coordenadas equatoriais ($RA \times Dec$) e coloridos de acordo

Tabela 2.1 - Comparação entre os superaglomerados encontrados no TG1 e os por Liu et al. a partir dos dados do eROSITA. A sigla NE (não encontrado) indica que não foi encontrado correspondente.

ID (Isaac)	RA	Dec	N	z	ID (Liu)	RA	Dec	N	z
SC1	142.47	3.5	5	0.09	NE	—	—	—	—
SC2	133.62	1.2	4	0.11	eFEDS-SC1	133.62	1.2	4	0.11
SC3	132.91	0.73	6	0.2	eFEDS-SC2	132.91	0.73	6	0.2
SC4	135.09	3.01	10	0.2	eFEDS-SC3	135.09	3.01	10	0.2
SC5	129.38	4.29	4	0.21	NE	—	—	—	—
SC6	140.52	3.95	5	0.27	eFEDS-SC4	140.53	3.92	6	0.27
SC7	129.95	-1.73	6	0.27	eFEDS-SC5	129.96	-1.7	7	0.27
SC8	140.0	2.44	5	0.28	eFEDS-SC6	140.0	2.44	5	0.28
SC9	135.39	-1.21	4	0.3	eFEDS-SC7	135.39	-1.21	4	0.3
NE	—	—	—	—	eFEDS-SC8	133.29	1.4	4	0.32
SC10	141.68	-1.05	6	0.34	eFEDS-SC9	141.68	-1.05	6	0.34
SC11	130.69	1.04	4	0.34	eFEDS-SC10	130.69	1.04	4	0.34
SC12	143.71	0.08	4	0.34	eFEDS-SC11	143.71	0.08	4	0.34
SC13	143.86	0.64	4	0.36	eFEDS-SC12	143.86	0.64	4	0.36
SC14	129.77	2.12	5	0.36	eFEDS-SC13	129.77	2.12	5	0.36
NE	—	—	—	—	eFEDS-SC14	130.67	1.23	8	0.41
SC15	130.31	0.94	4	0.41	NE	—	—	—	—
SC16	138.42	3.92	4	0.46	eFEDS-SC15	138.42	3.92	4	0.46
SC17	142.55	1.94	5	0.55	NE	—	—	—	—
SC18	129.63	-2.15	4	0.56	eFEDS-SC16	129.5	-2.06	6	0.56
NE	—	—	—	—	eFEDS-SC18	137.57	3.18	4	0.62
SC19	140.13	4.2	4	0.58	eFEDS-SC17	140.13	4.2	4	0.58
SC20	136.42	2.49	7	0.8	eFEDS-SC19	136.42	2.49	7	0.8

com seus valores de *redshift*. No painel inferior, estão representados os superaglomerados identificados no TG1. O tamanho de cada ponto é proporcional ao número de aglomerados pertencentes ao respectivo superaglomerado.

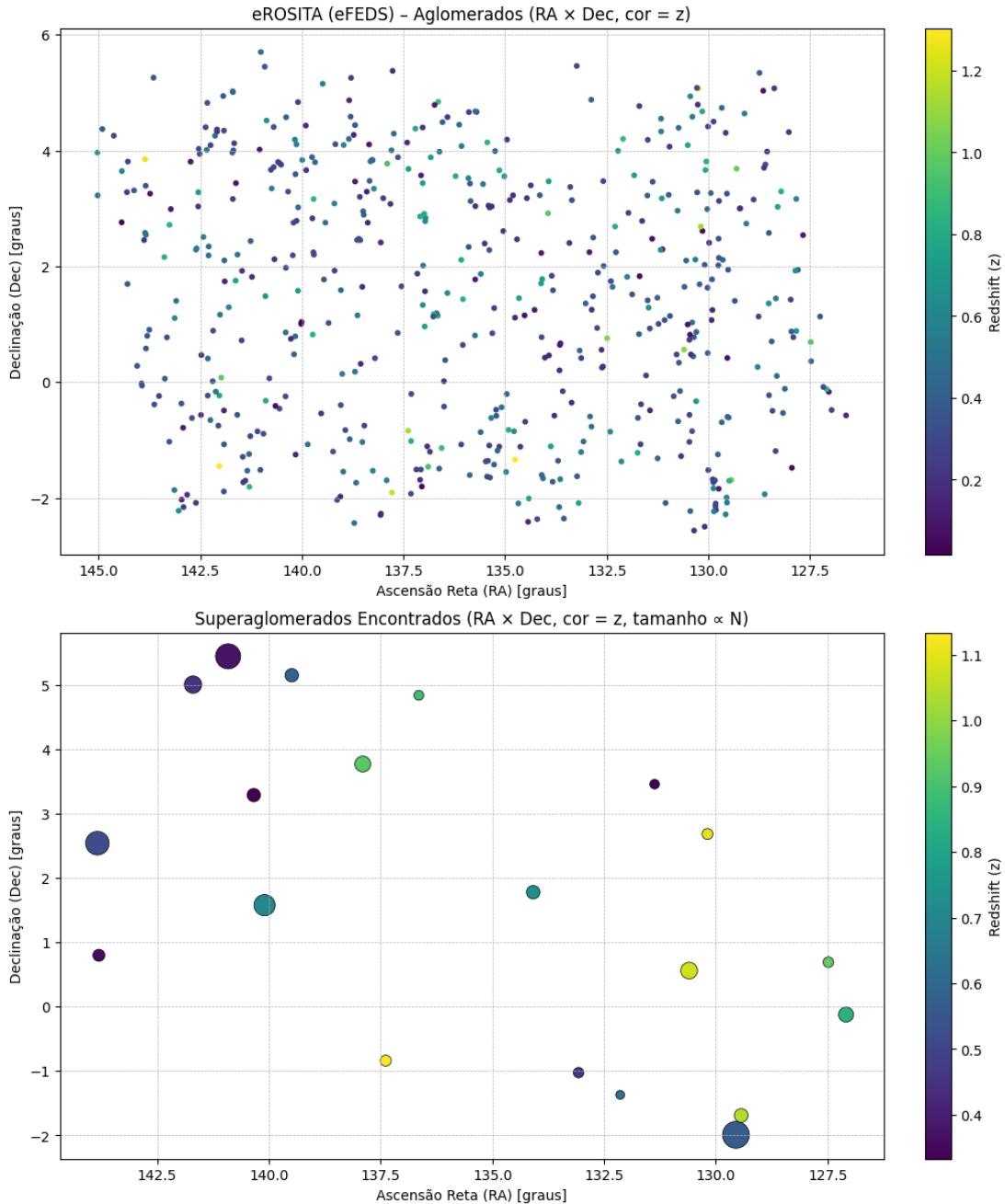


Figura 2.4: **Painel superior:** aglomerados de galáxias detectados pelo levantamento eROSITA (eFEDS), nas coordenadas equatoriais ($RA \times Dec$), coloridos conforme o *redshift*. **Painel inferior:** superaglomerados identificados a partir dos mesmos dados, considerando apenas aqueles com quatro ou mais membros. O tamanho dos marcadores é proporcional ao número de aglomerados em cada superaglomerado, e a coloração indica o *redshift*.

Capítulo 3

Cálculo das Massas

A determinação das massas dos aglomerados de galáxias foi realizada a partir de suas propriedades observadas em raios X, utilizando a relação de escala entre luminosidade em raios X e massa total (L_X – M_{500}) apresentada por Lovisari et al. (2015). O objetivo dessa etapa foi obter estimativas de M_{500} para todos os aglomerados pertencentes aos superaglomerados identificados no levantamento eROSITA (eFEDS). O método aqui empregado novamente baseou-se no trabalho de Liu et al. (2022), que também utilizou a relação proposta por Lovisari et al. (2015) para tal estimativa.

O catálogo eFEDS fornece as luminosidades integradas em aberturas fixas de 300 e 500 kpc, tanto na banda soft (0.5–2.0 keV) quanto bolométrica (todas as energias). No entanto, a relação de Lovisari et al. (2015) é expressa em termos da luminosidade na faixa de 0.1–2.4 keV, integrada até o raio característico R_{500} , denotada por $L_{0.1-2.4}^{R_{500}}$. Como essa quantidade não está diretamente disponível no catálogo, foi necessária uma conversão entre as grandezas.

Inicialmente, adotou-se uma aproximação expressa por

$$L_{0.1-2.4}^{R_{500}} = c \times L_{0.5-2.0}^{500 \text{ kpc}}, \quad (3.1)$$

onde $L_{0.5-2.0}^{500 \text{ kpc}}$ é a luminosidade observada na banda soft integrada até 500 kpc e c é um fator de correção médio. A adoção desse fator de correção foi realizada inicialmente apenas como aproximação inicial para permitir a continuidade do projeto e confirmar que no restante o método estava funcionando.

Com as luminosidades corrigidas segundo a Equação 3.1, as massas foram estimadas a partir da relação empírica:

$$\log \left(\frac{L_X}{10^{43} h_{70}^{-2} \text{ erg s}^{-1}} \right) = a \cdot \log \left(\frac{M_{500}}{5 \times 10^{13} h_{70}^{-1} M_\odot} \right) + b, \quad (3.2)$$

Tabela 3.1 - Comparação entre as massas dos superaglomerados calculadas no presente trabalho através da aproximação com $c = 1.5$ e aquelas calculadas por Liu et al. (2022).

ID (Isaac)	N	z	M_{tot} ($10^{15} M_{\odot}$)	ID (Liu)	N	z	M_{tot} ($10^{15} M_{\odot}$)
SC1	5	0.09	0.237	NE	—	—	—
SC2	4	0.11	0.374	eFEDS-SC1	4	0.11	0.4
SC3	6	0.20	1.132	eFEDS-SC2	6	0.20	1.2
SC4	10	0.20	3.094	eFEDS-SC3	10	0.20	3.1
SC5	4	0.21	0.807	NE	—	—	—
SC6	5	0.27	1.895	eFEDS-SC4	6	0.27	2.2
SC7	6	0.27	1.645	eFEDS-SC5	7	0.27	1.9
SC8	5	0.28	1.576	eFEDS-SC6	5	0.28	1.8
SC9	4	0.30	0.972	eFEDS-SC7	4	0.30	0.9
SC10	6	0.34	1.935	eFEDS-SC9	6	0.34	2.3
SC11	4	0.34	0.784	eFEDS-SC10	4	0.34	0.8
SC12	4	0.34	1.437	eFEDS-SC11	4	0.34	1.5
SC13	4	0.36	2.851	eFEDS-SC12	4	0.36	3.0
SC14	5	0.36	2.242	eFEDS-SC13	5	0.36	2.3
SC15	4	0.41	1.415	NE	—	—	—
SC16	4	0.46	1.463	eFEDS-SC15	4	0.46	1.4
SC17	5	0.55	3.422	NE	—	—	—
SC18	4	0.56	3.501	eFEDS-SC16	6	0.56	4.4
SC19	4	0.58	2.698	eFEDS-SC17	4	0.58	2.5
SC20	7	0.80	5.057	eFEDS-SC19	7	0.80	5.2

com parâmetros $a = 1.39$ e $b = -0.12$, conforme Lovisari et al. (2015). A partir da inversão da Equação 3.2, obteve-se M_{500} individual para cada aglomerado.

Em seguida, calculou-se a massa virial (M_{vir}) de cada objeto, conforme o procedimento adotado por Liu et al. (2022). Adotou-se que os aglomerados seguem um perfil de densidade de Navarro–Frenk–White (NFW; Navarro et al., 1997), com parâmetro de concentração $c \equiv r_{200}/r_s = 4$. Sob essa hipótese, a razão entre as massas viriais e M_{500} é aproximadamente constante, resultando na aproximação descrita na Equação 3.3 (Reiprich et al., 2013).

$$M_{\text{vir}} \simeq 2 M_{500} \quad (3.3)$$

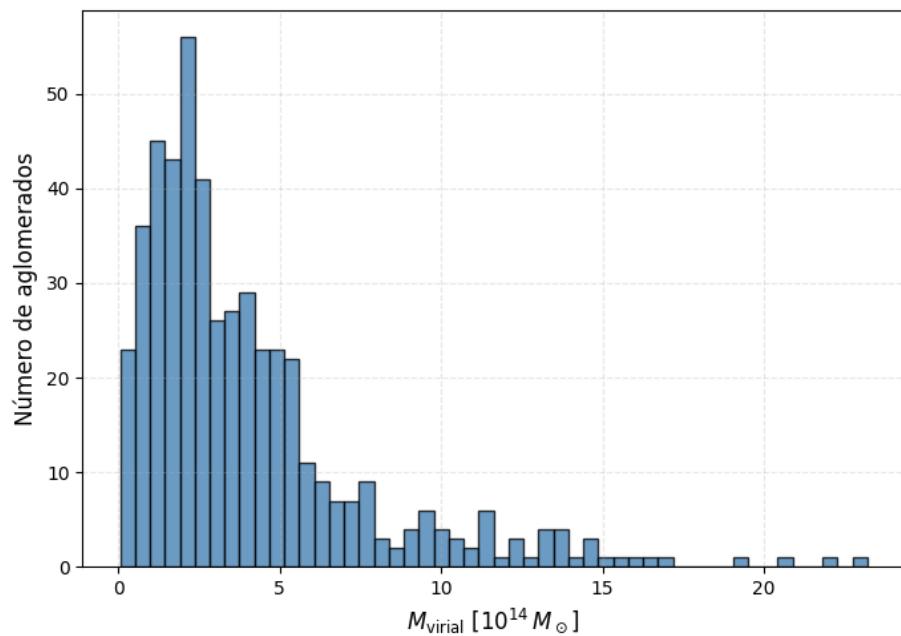
Essa conversão foi aplicada uniformemente a todos os aglomerados da amostra e, por fim, as massas dos superaglomerados foram calculadas como a soma das massas de todos os aglomerados pertencentes a cada estrutura.

Os resultados obtidos com a aproximação inicial utilizando $c = 1.5$ estão apresentados

na Tabela 3.1. Eles mostraram-se bastante satisfatórios, apresentando boa concordância com os valores obtidos por Liu et al. (2022) para os superaglomerados previamente classificados como compatíveis. Esses correspondem àqueles que, em função de sua posição espacial e número de membros, muito provavelmente compartilham parte dos mesmos aglomerados, conforme discutido no TG1. Como essa aproximação inicial apresentou desempenho consistente e resultados fisicamente plausíveis, ela foi adotada ao longo de todo o trabalho. Outros métodos de conversão também foram avaliados, mas mostraram-se de implementação mais complexa.

É importante destacar que a diferença entre os valores de M_{tot} não representa uma anomalia. Embora os superaglomerados identificados neste trabalho e por Liu et al. (2022) sejam compatíveis, eles não correspondem exatamente aos mesmos objetos: apresentam coordenadas espaciais semelhantes e estruturas sobrepostas, mas podem incluir membros distintos e um diferente número de membros.

A Figura 3.1 apresenta o histograma das massas viriais determinadas para os aglomerados. Observa-se que a maior parte da amostra concentra-se no intervalo de aproximadamente 0.8 a $10 \times 10^{14} M_{\odot}$, valor consistente com o reportado na literatura. Aglomerados ricos, como os catalogados por Abell, apresentam massas típicas nessa mesma faixa, entre ~ 1 e $10 \times 10^{14} M_{\odot}$ (Lima Neto, 2025).



Capítulo 4

Análise Morfológica

A análise morfológica de estruturas cósmicas extensas, como superaglomerados de galáxias, pode ser conduzida a partir dos momentos de segunda ordem de suas distribuições espaciais. Esse método fundamenta-se na analogia entre a distribuição tridimensional dos aglomerados e um corpo contínuo cuja geometria pode ser aproximada por um *elipsoide de inércia*. O procedimento e a formulação empregados neste trabalho baseiam-se na metodologia apresentada por Jaaniste et al. (1998).

4.1 Fundamentos Teóricos

Considerando um conjunto de N elementos distribuídos no espaço com posições (x_i, y_i, z_i) e, opcionalmente, pesos associados w_i (como massas ou luminosidades), o *centro geométrico* ou *centróide* da estrutura é definido por:

$$\mathbf{r}_c = \frac{\sum_i w_i \mathbf{r}_i}{\sum_i w_i}, \quad (4.1)$$

onde \mathbf{r}_i representa o vetor posição do i -ésimo elemento em relação a um referencial fixo.

A partir desse centróide, calcula-se a *matriz de covariância* (ou matriz dos momentos de inércia reduzida), que descreve o grau de dispersão espacial dos pontos em cada direção:

$$C_{jk} = \frac{\sum_i w_i (x_{i,j} - x_{c,j})(x_{i,k} - x_{c,k})}{\sum_i w_i}, \quad (4.2)$$

com $j, k \in \{1, 2, 3\}$ correspondendo aos eixos cartesianos x, y, z . Essa matriz simétrica contém toda a informação necessária para descrever o formato tridimensional da distribuição.

A diagonalização de C fornece seus autovalores $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ e autovetores correspondentes, que definem o sistema de eixos principais do elipsoide que melhor representa a

distribuição espacial. Os autovalores indicam as variâncias ao longo de cada eixo principal, de modo que os *semieixos principais* do elipsoide são dados por:

$$a = \sqrt{\lambda_1}, \quad b = \sqrt{\lambda_2}, \quad c = \sqrt{\lambda_3}, \quad (4.3)$$

com a convenção $a \geq b \geq c$. Assim, o elipsoide equivalente corresponde à superfície que engloba os pontos situados a uma unidade de desvio-padrão do centróide em cada direção principal.

4.2 Análise Morfológica

A forma do elipsoide fornece uma representação quantitativa da geometria global de cada superaglomerado. A partir dos autovalores da matriz de covariância espacial, determinam-se os semieixos principais $a \geq b \geq c$, que descrevem as direções de maior, intermediária e menor dispersão dos aglomerados em torno do centróide do sistema. Esses eixos sintetizam a distribuição tridimensional dos membros e permitem quantificar o grau de anisotropia das estruturas. A análise aqui adotada não visa classificar as estruturas em categorias discretas, mas identificar *tendências gerais* de forma e elongação, caracterizando o comportamento médio da amostra no contexto da teia cósmica.

A Tabela 4.1 resume as relações típicas entre os eixos principais e suas interpretações geométricas correspondentes.

Tabela 4.1 - Relações típicas entre os eixos principais do elipsoide e interpretações geométricas associadas.

Tipo	Relações típicas	Interpretação geométrica
Esférico (<i>balls</i>)	$a \approx b \approx c$	Quase isotrópico
Filamentar (<i>rods</i>)	$a \gg b \approx c$	Longo e fino (tipo “fio”)
Laminar (<i>cakes</i>)	$a \approx b \gg c$	Achatado, semelhante a um disco
Triaxial	$a > b > c$	Forma intermediária ou irregular

As tendências morfológicas de um conjunto de superaglomerados podem ser visualizada de forma sintética por meio do *diagrama morfológico*, no qual se representam as razões c/a e b/a para cada estrutura analisada. Esse diagrama permite distinguir diferentes regimes geométricos a partir da posição relativa das estruturas no plano bidimensional formado por essas razões. Cada ponto do diagrama corresponde a um superaglomerado.

No canto superior direito do diagrama ($b/a \approx 1$, $c/a \approx 1$) situam-se as estruturas quase *esféricas*, cujos três eixos apresentam comprimentos semelhantes. À medida que os valores de b/a e c/a diminuem, as distribuições tornam-se progressivamente mais anisotrópicas: na região inferior esquerda, localizam-se os sistemas do tipo *filamentar*, caracterizados por um único eixo dominante ($a \gg b \approx c$); já na porção inferior direita, concentram-se as estruturas *laminares*, nas quais dois eixos são comparáveis e o terceiro é significativamente menor ($a \approx b \gg c$). Os objetos distribuídos entre essas duas regiões extremas são considerados *triaxiais*, apresentando formas intermediárias ou irregulares.

A Figura 4.1 ilustra o diagrama obtido por Jaaniste et al. (1998) a partir da análise de 42 superaglomerados com 5 ou mais membros. Observa-se que a maior parte das estruturas se concentra em regiões correspondentes a formas achatadas, predominantemente do tipo *cakes*, embora também estejam presentes alguns superaglomerados fortemente alongados, de natureza filamentar. Esse comportamento indica que os superaglomerados, em geral, são objetos relativamente anisotrópicos, formados ao longo das paredes e filamentos da teia cósmica.

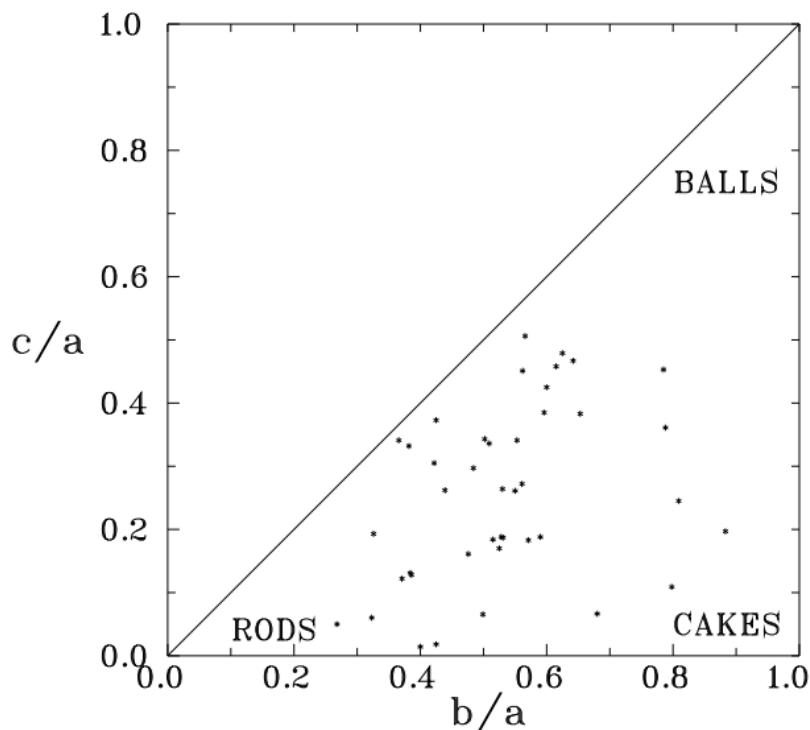


Figura 4.1: Diagrama morfológico do trabalho de Jaaniste et al. (1998). O trabalho analisou 42 superaglomerados com 5 ou mais membros.

4.3 Resultados

A partir do procedimento descrito na Seção 4.1, adotando como pesos associados w_i as massas viriais determinadas no Capítulo 3 ($w_i = M_{\text{tot}}$), obteve-se o resultado apresentado na Tabela 4.2. Todo o processo foi conduzido em coordenadas cartesianas (x, y, z) , deduzidas no TG1 a partir das equações apresentadas no Apêndice A. Quando se empregam as massas viriais como pesos, o centro geométrico da distribuição coincide com o centro de massa do superaglomerado. Dessa forma, os centros de massa foram inicialmente determinados em coordenadas cartesianas e, posteriormente, convertidos para o sistema de coordenadas originais — ascensão reta (RA, em graus), declinação (Dec, em graus) e redshift z — por meio do procedimento inverso, utilizando as mesmas equações do Apêndice A.

Tabela 4.2 - Semieixos principais (a, b, c), razões b/a e c/a , número de membros (N) e coordenadas do centro geométrico (RA, Dec, z) dos superaglomerados.

ID	N	a	b	c	b/a	c/a	RA (deg)	Dec (deg)	z
SC1	5	12.27	4.70	1.50	0.383	0.122	141.961	3.657	0.088
SC2	4	3.13	2.67	0.00	0.852	0.000	133.819	0.807	0.107
SC3	6	10.79	7.90	3.77	0.733	0.350	132.803	0.503	0.195
SC4	10	15.81	6.30	1.93	0.398	0.122	134.923	3.068	0.196
SC5	4	17.59	5.68	3.43	0.323	0.195	129.723	4.360	0.213
SC6	5	8.07	1.85	0.25	0.229	0.031	140.507	3.909	0.270
SC7	6	5.54	4.41	1.16	0.795	0.208	129.907	-1.711	0.270
SC8	5	7.17	6.04	2.01	0.842	0.281	140.017	2.502	0.282
SC9	4	7.85	0.70	0.01	0.089	0.002	135.413	-1.323	0.295
SC10	6	20.33	12.29	4.66	0.604	0.229	141.603	-1.090	0.337
SC11	4	10.20	8.34	1.79	0.818	0.176	130.840	1.079	0.342
SC12	4	11.00	5.37	0.00	0.488	0.000	143.815	-0.178	0.344
SC13	4	8.08	5.08	0.47	0.629	0.059	143.829	0.730	0.357
SC14	5	4.90	4.07	1.31	0.832	0.267	129.744	2.108	0.359
SC15	4	19.75	8.71	0.33	0.441	0.017	130.309	0.954	0.409
SC16	4	8.94	3.14	0.18	0.352	0.020	138.346	3.865	0.456
SC17	5	21.47	13.94	3.18	0.650	0.148	142.478	1.955	0.545
SC18	4	12.71	3.78	0.00	0.298	0.000	129.554	-2.072	0.560
SC19	4	34.60	5.00	0.10	0.144	0.003	139.873	4.580	0.579
SC20	7	49.51	25.43	15.77	0.514	0.318	136.402	2.571	0.803

Os resultados apresentados são analisados no diagrama morfológico da Figura 4.2.

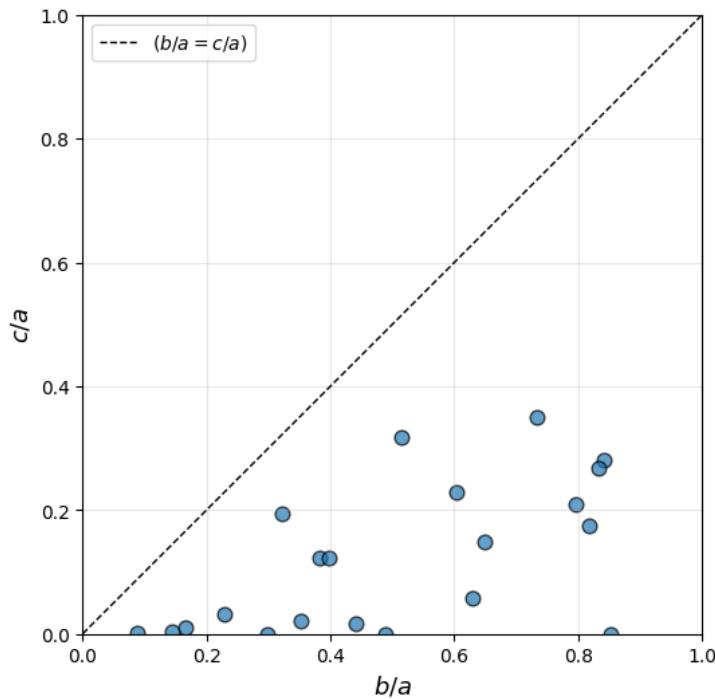


Figura 4.2: Diagrama morfológico para os 20 superaglomerados identificados no TG1. Observa-se que a maioria das estruturas apresenta $c/a < 0.4$, indicando alongamento acentuado e sugerindo uma predominância de morfologias não esféricas, típicas de regiões filamentares da teia cósmica.

Observa-se uma clara tendência a valores reduzidos de c/a — em todos os casos $c/a < 0.4$ — o que indica que o menor dos semieixos (c) é, na maioria dos superaglomerados, consideravelmente inferior ao maior semieixo (a). Em relação à razão b/a , cerca de metade da amostra apresenta valores baixos ($b/a < 0.45$), refletindo uma forte predominância do eixo principal a , enquanto a outra metade exibe razões mais elevadas, chegando a $b/a \approx 0.9$, o que sugere eixos a e b de comprimentos mais próximos.

Dessa forma, os superaglomerados localizados no canto inferior esquerdo da figura correspondem a estruturas com morfologia mais *filamentar*, dominadas por um único eixo proeminente. Por outro lado, aqueles situados mais à direita tendem a apresentar configuração mais *laminar*, caracterizada por dois eixos principais de dimensões comparáveis.

É necessário ressaltar que a metodologia adotada no presente trabalho apresenta uma limitação. O emprego dessa abordagem para a análise morfológica de superaglomerados é mais robusto quando as estruturas possuem um número suficientemente grande de membros, preferencialmente $N \geq 5$ e idealmente $N \geq 8$ (Jaaniste et al., 1998). Entretanto, considerando que o catálogo inicial obtido com o fator de sobredensidade $f = 10$ (con-

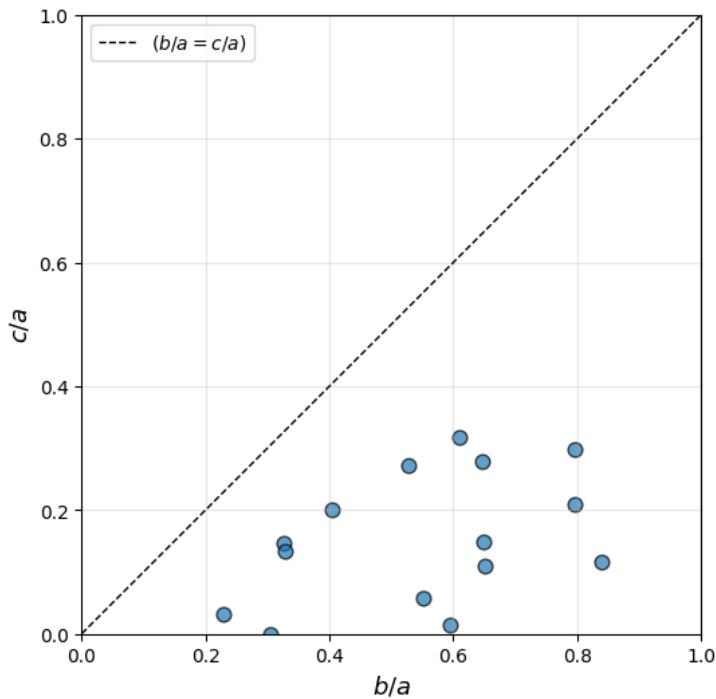


Figura 4.3: Relação entre as razões c/a e b/a para os 15 superaglomerados identificados com os critérios $f = 5$ e $N \geq 5$.

forme discutido no Trabalho de Graduação I) resultou em apenas 10 superaglomerados com $N \geq 5$, a amostra disponível mostrou-se estatisticamente restrita para uma análise morfológica mais abrangente.

Com o objetivo de identificar estruturas mais extensas e aumentar o número de sistemas analisáveis, o algoritmo *friends-of-friends* foi novamente executado, desta vez com um fator de sobredensidade $f = 5$. Esse valor mais permissivo permite a conexão de aglomerados mais distantes entre si, favorecendo a identificação de superestruturas de maior escala no catálogo do eFEDS. Após essa nova execução, foram consideradas para a análise morfológica apenas as estruturas com $N \geq 5$ membros. Esse procedimento resultou na identificação de 15 superaglomerados, cujas formas foram analisadas a partir do diagrama morfológico apresentado na Figura 4.3.

A mudança mais evidente é a redução no número de superaglomerados com razões muito baixas de c/a e b/a . Em outras palavras, observa-se um menor número de estruturas extremamente alongadas, nas quais o maior semieixo se destaca de forma pronunciada em relação aos demais. Essa é uma consequência natural do emprego de um fator de densidade menor e, portanto, mais permissivo: a estrutura passa a incorporar um número maior de

pontos situados longe do eixo principal de sobredensidade, o que reduz o caráter filamentar da elipse ajustada.

Por fim, a Figura 4.4 apresenta um painel ilustrando alguns dos superaglomerados identificados no catálogo do eFEDS para o fator de densidade $f = 10$.

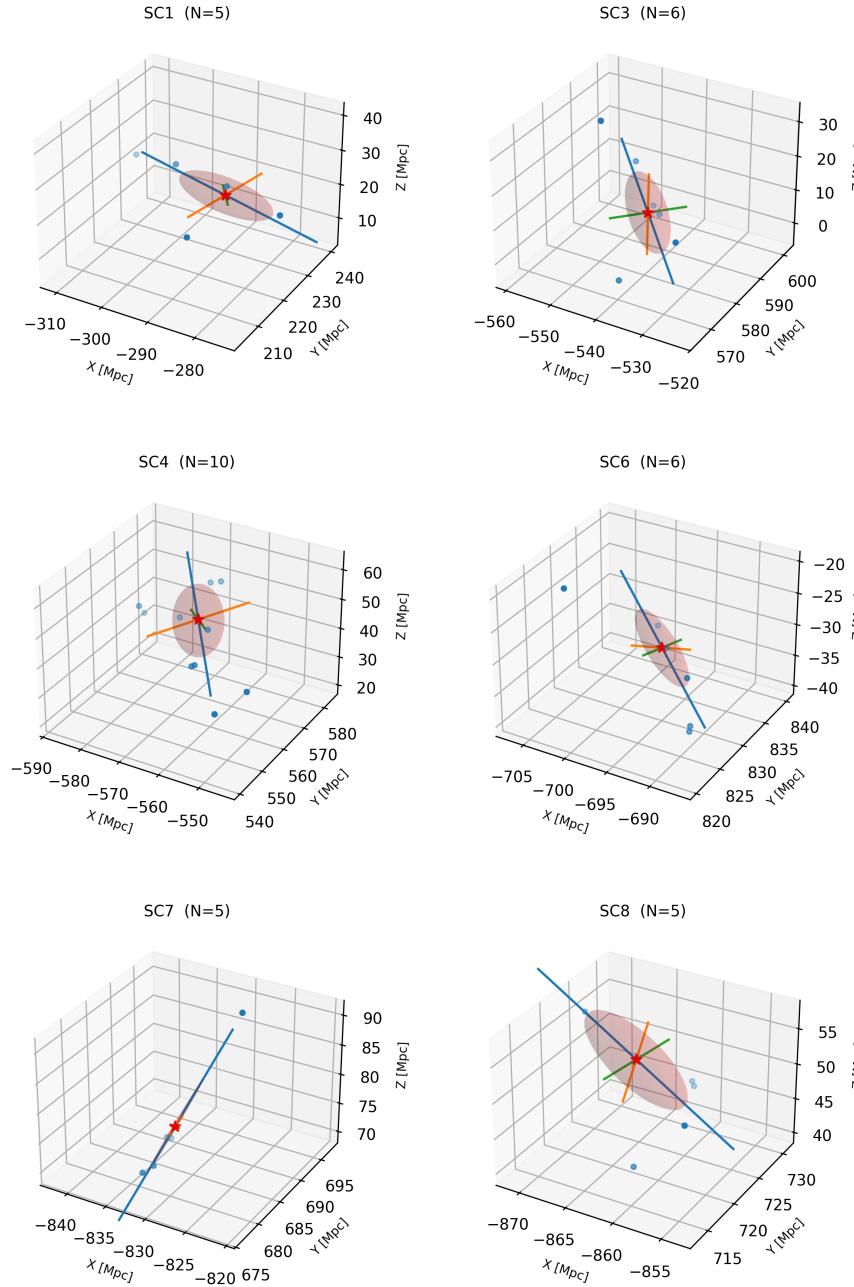


Figura 4.4: Painel ilustrando alguns dos superaglomerados identificados no catálogo do eFEDS com fator de densidade $f = 10$. As elipses representam os elipsóides de inércia ajustados a cada estrutura, enquanto as retas em azul, laranja e verde correspondem aos semieixos principais a , b e c , respectivamente. A estrela em vermelho indica o centro de massa de cada superaglomerado.

Capítulo 5

Conclusões

Neste trabalho, foram estimadas as massas e analisadas as propriedades morfológicas dos superaglomerados de galáxias identificados no levantamento eROSITA Final Equatorial-Depth Survey (eFEDS). O estudo deu continuidade ao Trabalho de Graduação I, no qual foi desenvolvida e implementada a rotina *friends-of-friends* (FoF) para a identificação dessas estruturas a partir dos catálogos de aglomerados de Liu et al. (2022).

A primeira etapa consistiu na determinação das massas individuais dos aglomerados, utilizando a relação de escala $L_X - M_{500}$ proposta por Lovisari et al. (2015), calibrada para a faixa de energia de 0.1–2.4 keV. Como o catálogo do eFEDS disponibiliza luminosidades em bandas e aberturas distintas, foi necessário adotar um fator de conversão médio igual a (1.5) para compatibilizar os dados. Essa aproximação mostrou-se satisfatória, apresentando boa concordância com os resultados obtidos por Liu et al. (2022), e foi, portanto, mantida ao longo de toda a análise.

Em seguida, foi conduzida a caracterização morfológica das estruturas, com base na analogia entre a distribuição tridimensional dos aglomerados e um elipsoide de inércia. Essa abordagem permitiu estimar quantitativamente os semieixos principais ($a \geq b \geq c$) de cada superaglomerado, bem como suas razões b/a e c/a , fornecendo uma medida direta de sua anisotropia. A análise revelou que a maioria das estruturas apresenta valores reduzidos de c/a , o que indica uma predominância de morfologias alongadas, com tendências *filamentares* e *laminares*, em concordância com a expectativa teórica de que os superaglomerados se organizam preferencialmente ao longo dos filamentos e paredes da teia cósmica.

Uma segunda execução do algoritmo FoF, com fator de sobredensidade menor ($f = 5$), permitiu ampliar a amostra e identificar estruturas de maior extensão. Observou-se, entretanto, que o caráter filamentar médio das distribuições diminuiu, resultado esperado

da incorporação de aglomerados mais distantes do eixo principal de sobredensidade. Tal comportamento reforça a sensibilidade do método aos parâmetros de ligação espacial e demonstra que diferentes valores de f permitem explorar distintos níveis hierárquicos da teia cósmica.

De modo geral, os resultados obtidos confirmam que as propriedades físicas e morfológicas dos superaglomerados do eFEDS estão em bom acordo com as encontradas em trabalhos anteriores, tanto em termos de massas totais quanto de forma e alongamento. O estudo evidencia a eficiência do método aplicado e reforça a utilidade das relações de escala em raios X na derivação de propriedades globais de grandes estruturas.

Por fim, destaca-se que o presente trabalho constitui um passo inicial na caracterização morfológica sistemática de superaglomerados detectados em levantamentos modernos. Estudos futuros poderão expandir a amostra para os demais catálogos analisados no TG1 (RASS-MCMF e SPT-ECS), bem como incluir outras métricas adicionais de morfologia, como o parâmetro de triaxialidade e a orientação relativa em relação a grandes filamentos. Tais extensões permitirão refinar a compreensão da formação e evolução das superestruturas no contexto da teia cósmica e sua relação com os processos de acúmulo e distribuição de matéria em larga escala no Universo.

Parte da redação deste trabalho, bem como o desenvolvimento do código, contou com o apoio do assistente de linguagem ChatGPT (OpenAI). Todo o conteúdo final foi cuidadosamente revisado pelo autor, que assume total responsabilidade por eventuais imprecisões ou erros.

Referências Bibliográficas

Abell G. O., Corwin H. G., Olowin R. P., A catalog of rich clusters of galaxies, The Astrophysical Journal Supplement Series, 1989, vol. 70, p. 1

Bleem L. E., Bocquet S., Stalder B., Gladders M. D., Ade P. A. R., Allen S. W., et al. The SPTpol Extended Cluster Survey, The Astrophysical Journal Supplement Series, 2020, vol. 247, p. 25

Hogg D. W., , 1999 Distance measures in cosmology

Jaaniste J., Tago E., Einasto M., Einasto J., Andernach H., Müller V., The Supercluster–Void Network. IV. The Shape and Orientation of Superclusters, Astronomy and Astrophysics, 1998, vol. 332, p. 441

Klein M., Hernández-Lang D., Mohr J. J., Bocquet S., Singh A., RASS-MCMF: a full-sky X-ray selected galaxy cluster catalogue, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2023, vol. 526, p. 3757

Lima Neto G. B., , 2025 Astronomia Extragaláctica e Cosmologia <https://www.iag.usp.br/~extragal>

Liu A., Bulbul E., Ghirardini V., Liu T., Klein M., Clerc N., Özsoy Y., Ramos-Ceja M. E., Pacaud F., Comparat J., Okabe N., Bahar Y. E., Biffi V., Brunner H., Brüggen M., Buchner J., Ider Chitham J., Chiu I., Dolag K., Gatuzz E., Gonzalez J., Hoang D. N., Lamer G., Merloni A., Nandra K., Oguri M., Ota N., Predehl P., Reiprich T. H., Salvato M., Schrabbach T., Sanders J. S., Seppi R., Thibaud Q., The eROSITA Final Equatorial-Depth Survey (eFEDS) – Catalog of galaxy clusters and groups, Astronomy & Astrophysics, 2022, vol. 661, p. A2

Lovisari L., Reiprich T. H., Schellenberger G., Scaling properties of a complete X-ray selected galaxy group sample, *Astronomy & Astrophysics*, 2015, vol. 573, p. A118

Navarro J. F., Frenk C. S., White S. D. M., A Universal Density Profile from Hierarchical Clustering, *The Astrophysical Journal*, 1997, vol. 490, p. 493

Reiprich T. H., Basu K., Ettori S., Israel H., Lovisari L., Molendi S., Pointecouteau E., Roncarelli M., Outskirts of Galaxy Clusters, *Space Science Reviews*, 2013

Tojeiro R., Kraljic K., , 2025, Elsevier Amsterdam

Tully R. B., Courtois H., Hoffman Y., Pomarède D., The Laniakea supercluster of galaxies, *Nature*, 2014, vol. 513, p. 71

Apêndice

Apêndice A

Conversão de coordenadas

Para a aplicação da análise de elipses via momentos de segunda ordem, é necessário que os dados estejam em um sistema métrico euclidiano. Por essa razão, as coordenadas dos aglomerados foram convertidas de coordenadas equatoriais e redshifts para coordenadas cartesianas comóveis (X , Y , Z). No catálogo eFEDS utilizados neste trabalho os aglomerados estão originalmente descritos por ascensão reta (α), declinação (δ) e redshift (z).

A conversão para coordenadas cartesianas comóveis é dada por:

$$\begin{cases} X = D_c(z) \sin \delta \cos \alpha \\ Y = D_c(z) \sin \delta \sin \alpha \\ Z = D_c(z) \cos \delta \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

em que $D_c(z)$ é a distância comóvel no redshift z , calculada conforme Hogg (1999):

$$D_c(z) = D_H \int_0^z \frac{dz'}{E(z')} \quad (\text{A.2})$$

A constante D_H corresponde à distância de Hubble, definida por:

$$D_H = \frac{c}{H_0} \quad (\text{A.3})$$

onde H_0 é a constante de Hubble e c é a velocidade da luz. A função $E(z)$ é dada por:

$$E(z) = \sqrt{\Omega_m(1+z)^3 + \Omega_k(1+z)^2 + \Omega_\Lambda} \quad (\text{A.4})$$

sendo Ω_m , Ω_k e Ω_Λ os parâmetros cosmológicos que representam, respectivamente, as densidades relativas de matéria (bariônica e escura), curvatura espacial e energia escura.

Neste trabalho, adota-se o modelo Λ CDM com curvatura nula, ou seja, $\Omega_k = 0$, o que implica um universo espacialmente plano. Utilizam-se os valores $\Omega_m = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$, $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ e $c = 3 \times 10^5 \text{ km s}^{-1}$.