



Programa de Pós- Graduação em
Modelagem Computacional
em Ciência e Tecnologia
Universidade Estadual de Santa Cruz - UESC



INDICADOR INDIRETO DE ROTAÇÃO EM AGLOMERADOS DE GALÁXIAS

Autor

Luenne Nailam Sousa Nascimento

Orientador

Prof. Dr. André Luis Batista Ribeiro

20 de maio de 2020



- ① Introdução
 - Aglomerados de Galáxias
 - Distribuição de Velocidades ao longo do Aglomerado
 - Rotação de Aglomerados
- ② Objetivos
- ③ Metodologia
 - Amostra
 - Algoritmo
- ④ Resultados Preliminares
- ⑤ Perspectivas
- ⑥ Referências



Aglomerado de Galáxias

- Aglomerados de galáxias são as maiores estruturas do Universo observável que podem ter alcançado o estado em equilíbrio dinâmico.
- Aglomerados de galáxias são definidos basicamente por três componentes: galáxias, meio intra-aglomerado e matéria escura.

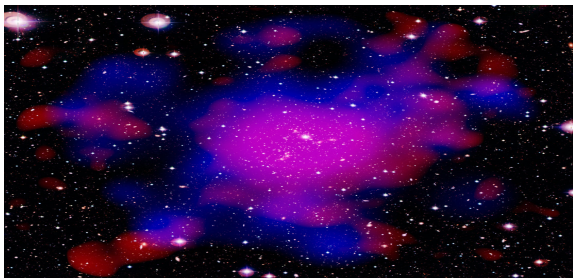


Figura: Composição de um Aglomerado.



Aglomerado de Galáxias

- A busca por compreender a formação e evolução dos aglomerados de galáxias é uma das questões mais importantes da Astrofísica.
- No paradigma atual de formação das estruturas, as galáxias e os aglomerados surgem a partir de halos escuros.
 - ▶ Aglomerados formados após as galáxias em um desvio para o vermelho $z \approx 2$.

Aglomerado de Galáxias

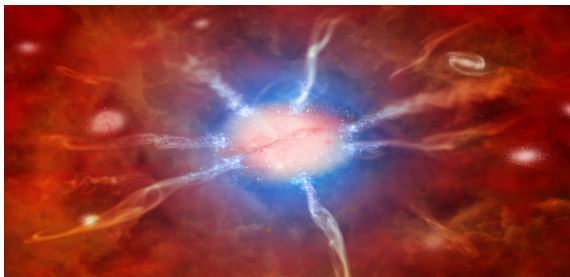


Figura: Aglomerado em processo de interação com galáxias ou grupo de galáxias.



Aglomerado de Galáxias

- O processo de formação de aglomerados não atingiu seu fim.
 - ▶ Distribuição de velocidades é bem ajustada por uma gaussiana somente na região virializada do sistema. Enquanto a periferia do sistema é continuamente perturbada por acréscimo de matéria.



Aglomerado de Galáxias

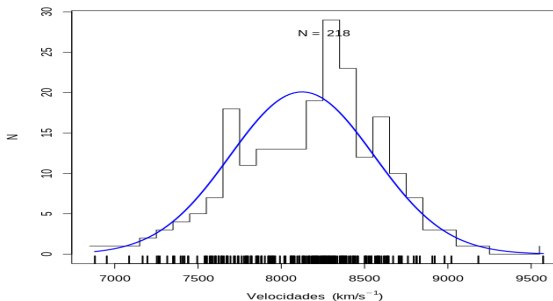


Figura: Histograma de velocidades de um dos aglomerados de nossa amostra.



Distribuição de Velocidades ao longo do Aglomerado

- A velocidade de uma galáxia contida em um aglomerado, em uma dada posição, não pode ser maior que a velocidade de escape do sistema.
- A velocidade de escape e a distância ao centro do aglomerado são grandezas inversamente proporcionais.
- O perfil radial da velocidade de escape permite definir os galáxias membro dos aglomerados.



Distribuição de Velocidades ao longo do Aglomerado

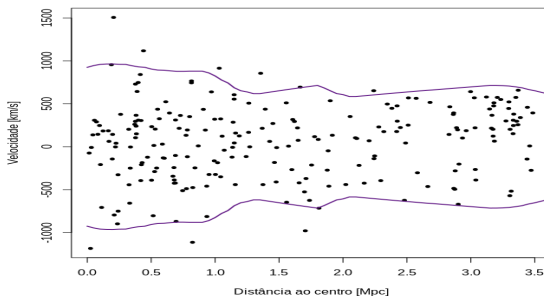


Figura: Distribuição de velocidades em função da distância ao centro de um dos aglomerados de nossa amostra.

- Após a determinação dos membros de um aglomerado, suas propriedades dinâmicas, como massa e raio, podem ser estimadas.
 - ▶ O método mais empregado é o de análise do virial.

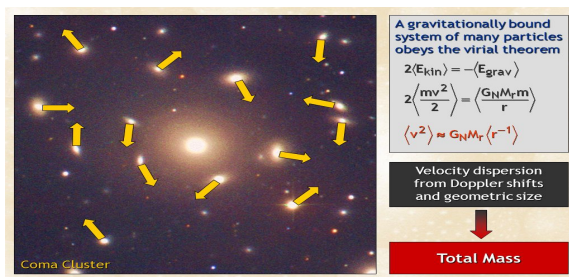


Figura: Análise do virial utiliza apenas as velocidades aleatórias das galáxias na região central do aglomerado.



Rotação de Aglomerados

- **Hwang & Lee (2007):**
 - ▶ **Amostra:** Dados espectroscópicos do Sloan Digital Sky Survey (SDSS) e Two-Degree-Field Galaxy Redshift Survey (2dF-GRS).
 - ▶ **Objetivo:** A busca por aglomerados de galáxias que mostrem uma indicação de rotação global.
 - ▶ **Conclusão e Resultados:**
 - ▶ Foram detectados seis sistemas com rotação, em um total de doze aglomerados.
 - ▶ Os aglomerados com rotação devem exibir divisão espacial entre galáxias com velocidades maiores e menores que a velocidade média do aglomerado além de apresentar um pico no mapa de densidade.
 - ▶ Constatou-se ainda que estes aglomerados estão em equilíbrio dinâmico e não sofreram fusão recente.



Rotação de Aglomerados

- **Kalinkov et al. (2008):**
 - ▶ **Amostra:** Aglomerado de Abell 2107.
 - ▶ **Objetivo:** Identificar a rotação do aglomerado de galáxias A2107.
 - ▶ **Conclusão e Resultados:**
 - ▶ O método buscou o gradiente máximo no campo de velocidade e determinou que a direção do coeficiente de correlação linear máximo definiria o eixo maior do aglomerado e o eixo menor seria o de rotação.
 - ▶ A massa foi corrigida (inicial era de $3.2 \times 10^{14} M_{\odot}$ e passou para $2.8 \times 10^{14} M_{\odot}$).
 - ▶ Materne et al. (1983) apontaram a dificuldade em diferenciar um aglomerado rotativo de dois que se sobrepõem, pelo motivo de estar se fundindo ou se afastando.



Rotação de Aglomerados

- **Tovmassian (2015):**
 - ▶ **Objetivo:** Detectar a rotação de aglomerados de galáxias baseado no estudo da distribuição de velocidades das galáxias membro.
 - ▶ **Conclusão e Resultados:**
 - ▶ Constatou-se 17 aglomerados rotativos de 65.
 - ▶ Taxa maior em aglomerados planos $f = a/b > 1.8$, (7 aglomerados rotativos em um total de 18).
 - ▶ Os aglomerados foram originalmente formados a partir das enormes nuvens de gás primordiais e preservaram a rotação das nuvens primordiais, a menos que sofram fusões com outros aglomerados e grupos de galáxias.



Rotação de Aglomerados

- **Manolopoulou (2014):**

- ▶ **Amostra:** Inicialmente os testes foram realizados em aglomerados gerados em simulações de Monte Carlo, posteriormente foi utilizado a amostra dos aglomerados de Abell com $z \approx 0.1$ do SDSS DR10.
- ▶ **Objetivo:** Identificação de rotação em aglomerados de galáxias usando a velocidade radial projetada.
- ▶ **Conclusão e Resultados:**
 - ▶ Utilizando o teste Kolmogorov-Smirnov, decidiu-se quanto a sua rotação significativa ou não, seu centro rotacional, orientação do eixo de rotação, amplitude de velocidade rotacional e o sentido de rotação no sentido horário ou anti-horário no plano do céu.
 - ▶ Constatou-se 23 aglomerados possivelmente rotativos dentro de 1.5 Mpc ou a uma distância de 2.5 Mpc do centro do aglomerado, de 45 da amostra.



Rotação de Aglomerados

- **Nascimento et al (2016):**

- ▶ **Amostra:** Par de aglomerados de Abell (A3407 e A3408) observadas no Cerro Tololo Interamerican Observatory (CTIO).
- ▶ **Objetivo:** Verificar se a amostra correspondia a um simples sistema de galáxias ou a um processo de fusão.
- ▶ **Conclusão e Resultados:**
 - ▶ Ambos os sistemas bem como cada aglomerado individual tem uma distribuição de velocidade Gaussiana.
 - ▶ Um gradiente de velocidade de $\approx 847 \pm 114 \text{ km s}^{-1}$ foi identificada ao redor do eixo principal da distribuição de galáxias projetada.
 - ▶ O estudo do *gap* permitiu encontrar diferença significativa entre estas subamostras.



Objetivos

- **Objetivo Geral:**

- ▶ Detecção da rotação em aglomerados para correção da sua massa.

- **Objetivos Específicos:**

- ▶ Implementar método de detecção de rotação;
- ▶ Identificar a velocidade rotacional;
- ▶ Aplicar o Teorema do Viral para correção da massa do aglomerado.



Amostra

- Uma amostra de 20 aglomerados ricos do SDSS, localizados em baixos *redshifts*, com espectroscopia disponível para objetos com $m_r \leq 17.77$.
- A amostra foi estudada previamente por Lopes et al. (2009) que definiu e selecionou as galáxias membro estatisticamente.
- Implementamos o método de Nascimento et al. (2016) para analisar esta amostra.



Algoritmo

1. Estudo da distribuição de velocidades das galáxias membro do aglomerado em busca de gaps significativos.
 - ▶ Identifica a probabilidade de que um *gap*, de certo tamanho e em dada localização, possa ser reproduzido a partir de amostragens aleatórias retiradas de uma gaussiana.
 - ▶ Consideramos *gaps* com valores maiores que 2.25, uma vez que em retiradas aleatórias de uma gaussiana, *gaps* desse tamanho ocorrem no máximo em 3% dos casos (Wainer & Shacht 1978. Beers et al. 1991).



Algoritmo

Valor *gap*

$$g_i = v_{i+1} - v_i \quad (1)$$

$$w_i = i(N - i) \quad (2)$$

exemplo: $N = 100$

para = 1

para = 50

$$w_1 = 1(99) = 99$$

$$w_{50} = 50(50) = 2500$$

$$MM = \frac{2}{N} \sum_{i=N/4}^{3N/4} \sqrt{w_i g_i} \quad (3)$$



Algoritmo

2. Os dados são divididos em duas amostras, contendo objetos com velocidades maiores e velocidades menores do que o maior *gap* (**Amostras I e II**).
3. Determina-se então o eixo principal do aglomerado como aquele resultante do ajuste de uma elipse aos dados projetados no plano do céu (pacote: *ellipse*).
4. As amostras I e II são então comparadas em relação a sua distribuição de duas maneiras: independente do eixo principal e em cada lado do eixo.
 - Realizamos os testes de Cramér 2D e o de Hotelling.



Algoritmo

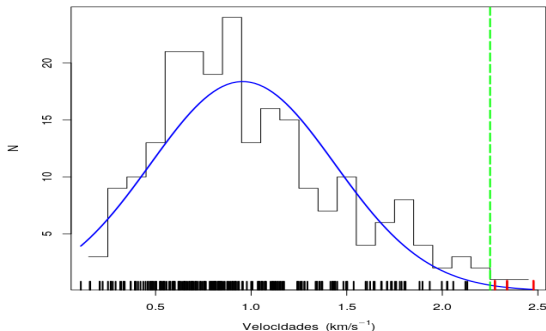


Figura: Histograma dos gaps, em vermelho os gaps significativos do Aglomerado 01 e a linha tracejada ao ponto 2.25.



Algoritmo

Teste de Crámer 2D

- É uma medida de associação entre duas variáveis nominais dado o intervalo de 0 a 1, indicando que um valor mais alto possui forte associação.

$$V = \sqrt{\frac{\chi_{obt}^2}{N.m}} \quad (4)$$

onde χ^2 é o valor obtido do teste estatístico, **N** é o tamanho da amostra e **m** = o menor de (r - 1) ou (c - 1), sendo r o número de linhas e c o número de colunas.

- **Hipótese nula (H_0):** duas amostras não são dependentes uma da outra.
- **Hipótese alternativa (H_1):** existe alguma associação entre duas amostras.



Algoritmo

Teste de Hotelling

- Um dos mais conhecidos testes de hipóteses multivariados, o teste de T^2 , compara vetores de médias populacionais.
- Baseado na generalização da estatística *t de Student*, foi o primeiro a levar em consideração a correlação das variáveis na formulação da estatística do teste.

$$H_0 : [\mu] = [\mu_0] \quad H_1 : [\mu] \neq [\mu_0], \quad (5)$$

onde $[\mu_0]$ é um valor pré-especificado para a forma média.



Algoritmo

5. Dado que as distribuições espaciais das amostras I e II sejam distintas com 95% de confiança em relação aos testes (passo 4), interpretamos o resultado como sendo uma indicação indireta de rotação nos aglomerados.
6. Para os aglomerados onde isto acontece, traçamos um perfil de velocidade de rotação ao longo da distância ao centro do aglomerado.
7. Caso o aglomerado não tenha *gap* significativo (> 2.25), utilizamos a mediana dos dados como divisor das velocidades do sistema.

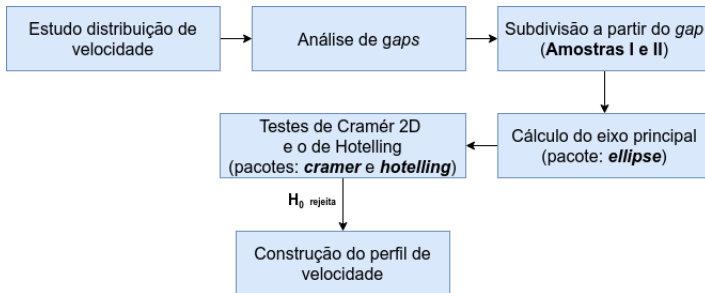


Linguagem R

- Linguagem que surgiu em 1993 e é considerada multi-paradigma: sequencialização, orientado a objetos, imperativo, dinâmico.
- Muito utilizada na manipulação, análise e visualização gráfica de dados.
- Pacotes utilizados:
 - ▶ *ellipse*;
 - ▶ *cramer*;
 - ▶ *hotelling*;
 - ▶ *astro*.



Fluxograma



Resultados Preliminares

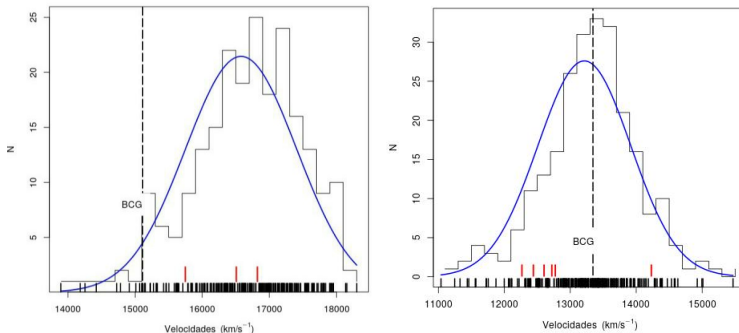


Figura: Histograma Distribuição de Velocidade e Análise de *gaps* Aglomerados 01 e 02.



Resultados Preliminares

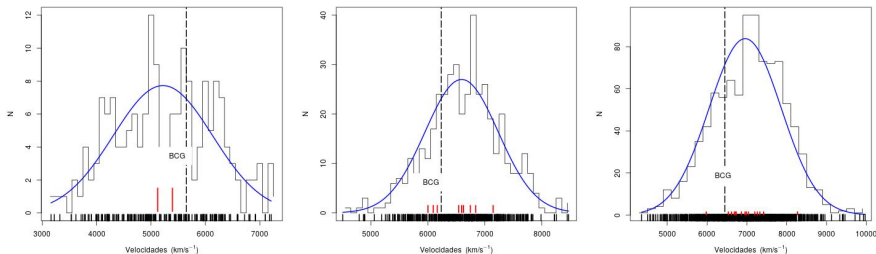


Figura: Histograma Distribuição de Velocidade e Análise de *gaps*
Aglomerados 03, 04 e 05.

Resultados Preliminares

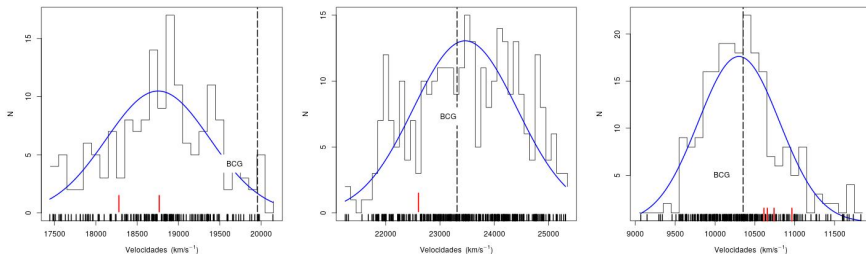


Figura: Histograma Distribuição de Velocidade e Análise de *gaps* Aglomerados 06, 07 e 08.



Resultados Preliminares

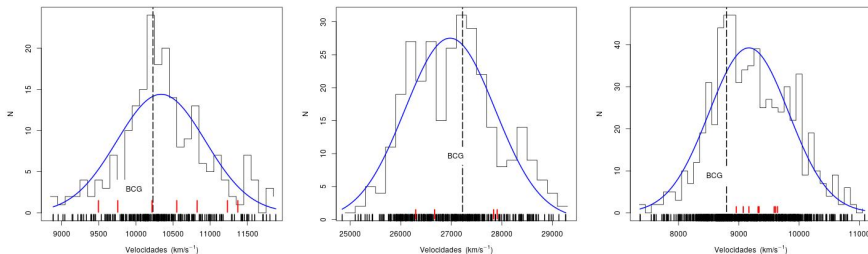


Figura: Histograma Distribuição de Velocidade e Análise de *gaps*
Aglomerados 09, 10 e 11.

Resultados Preliminares

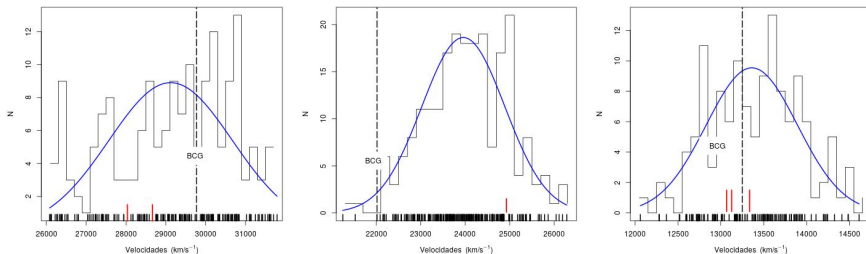


Figura: Histograma Distribuição de Velocidade e Análise de *gaps* Aglomerados 12, 13 e 14.

Resultados Preliminares

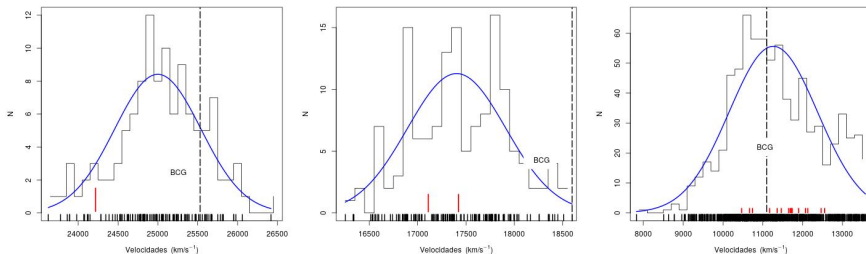


Figura: Histograma Distribuição de Velocidade e Análise de *gaps* Aglomerados 15, 16 e 17.

Resultados Preliminares

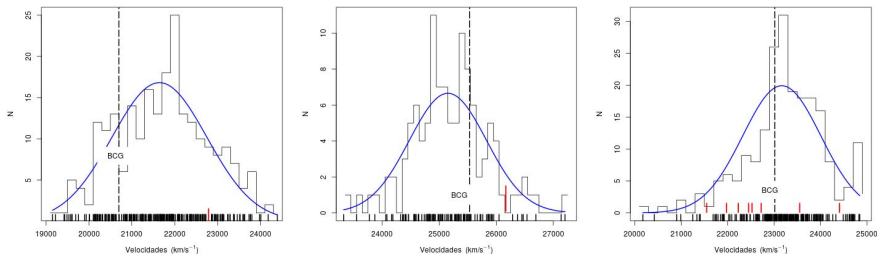


Figura: Histograma Distribuição de Velocidade e Análise de *gaps*
Aglomerados 18, 19 e 20.

Resultados Preliminares

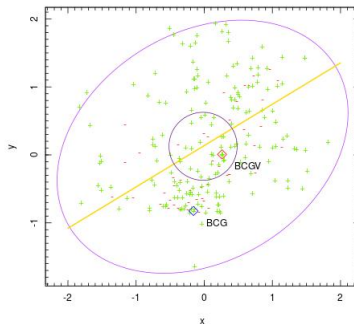
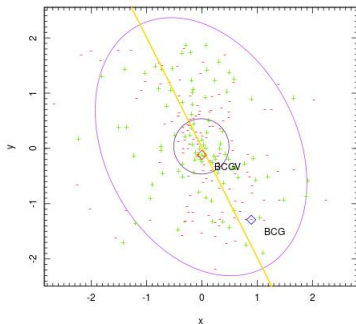


Figura: Histograma Distribuição de Velocidade e Análise de Gaps
Aglomerados 01 e 02.

Resultados Preliminares

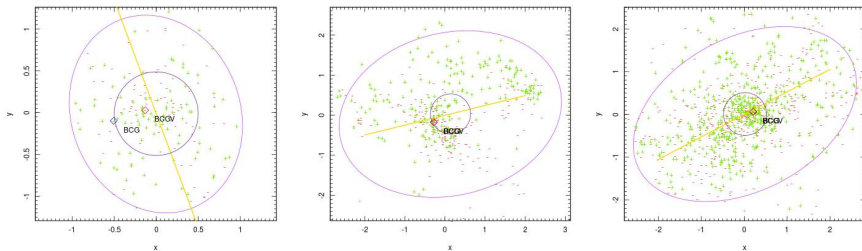


Figura: Histograma Distribuição de Velocidade e Análise de Gaps
Aglomerados 03, 04 e 05.



Resultados Preliminares

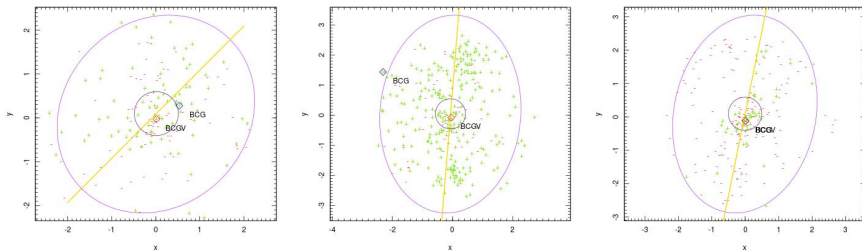


Figura: Histograma Distribuição de Velocidade e Análise de Gaps
Aglomerados 06, 07 e 08.



Resultados Preliminares

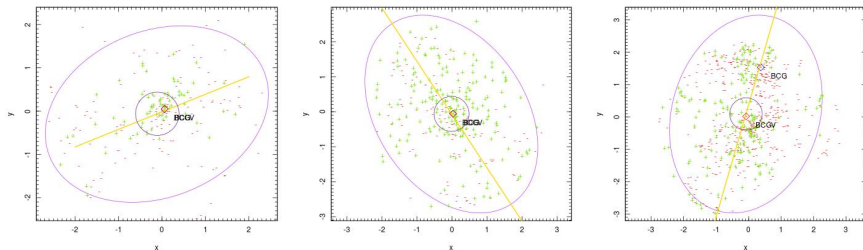


Figura: Histograma Distribuição de Velocidade e Análise de Gaps
Aglomerados 09, 10 e 11.

Resultados Preliminares

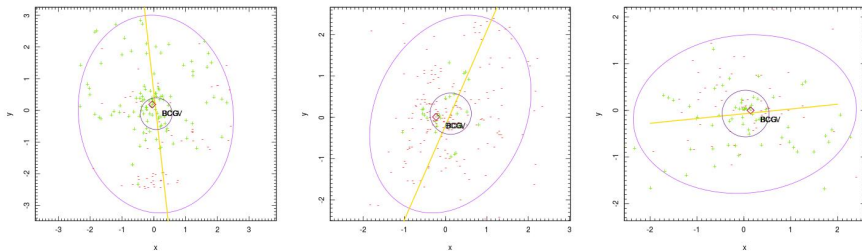


Figura: Histograma Distribuição de Velocidade e Análise de Gaps Aglomerados 12, 13 e 14.



Resultados Preliminares

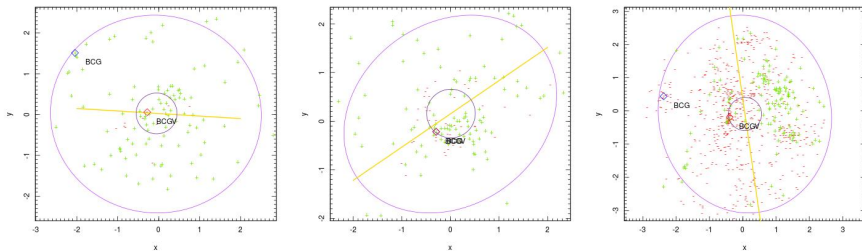


Figura: Histograma Distribuição de Velocidade e Análise de Gaps
Aglomerados 15, 16 e 17.



Resultados Preliminares

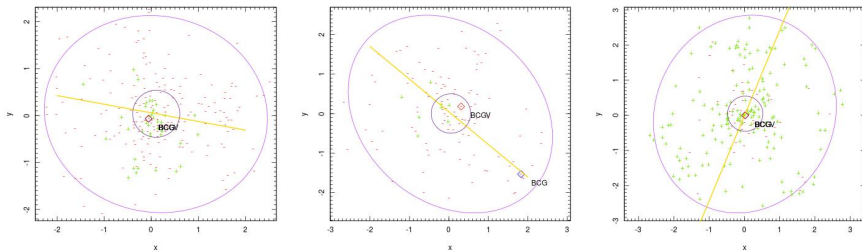


Figura: Histograma Distribuição de Velocidade e Análise de Gaps
Aglomerados 18, 19 e 20.



Resultados Preliminares

Tabela: Teste Cramér e Hotelling em todos os pontos.

| Aglomerado | Teste de Cramér <i>p-value</i> | Teste de Hotelling <i>p-value</i> |
|------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| 01 | 0.5064 | 0.6160 |
| 02 | 0.0059 | 0.0078 |
| 03 | 0.3376 | 0.5612 |
| 04 | 0.0009 | <0.0001 |
| 05 | 0.1018 | 0.0723 |
| 06 | 0.2357 | 0.8041 |
| 07 | 0.0519 | 0.6347 |
| 08 | 0.0069 | 0.0807 |
| 09 | 0.0279 | 0.0373 |
| 10 | 0.0009 | 0.0258 |
| 11 | 0.0049 | 0.9006 |
| 12 | <0.0001 | <0.0001 |
| 13 | 0.1148 | 0.1516 |
| 14 | 0.0289 | 0.0054 |
| 15 | 0.1148 | 0.5745 |
| 16 | 0.0629 | 0.5182 |
| 17 | <0.0001 | <0.0001 |
| 18 | <0.0001 | 0.0075 |
| 19 | 0.0939 | 0.4063 |
| 20 | 0.1018 | 0.9038 |



Resultados Preliminares

Tabela: Teste Cramér e Hotelling pontos acima do eixo.

| Aglomerado | Teste de Cramér <i>p-value</i> | Teste de Hotelling <i>p-value</i> |
|------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| 01 | 0.7772 | 0.8718 |
| 02 | 0.0959 | 0.0069 |
| 03 | 0.6623 | 0.2025 |
| 04 | 0.0009 | <0.0001 |
| 05 | 0.0319 | 0.0483 |
| 06 | 0.4575 | 0.2650 |
| 07 | 0.5894 | 0.5880 |
| 08 | 0.0049 | 0.4446 |
| 09 | 0.0389 | 0.2302 |
| 10 | 0.0029 | 0.0067 |
| 11 | 0.3386 | 0.0031 |
| 12 | <0.0001 | <0.0001 |
| 13 | 0.1518 | 0.6982 |
| 14 | 0.4795 | 0.0054 |
| 15 | 0.3406 | 0.5745 |
| 16 | 0.0059 | 0.5182 |
| 17 | <0.0001 | <0.0001 |
| 18 | 0.0169 | 0.0075 |
| 19 | 0.2817 | 0.4063 |
| 20 | 0.0699 | 0.3173 |



Resultados Preliminares

Tabela: Teste Cramér e Hotelling pontos abaixo do eixo.

| Aglomerado | Teste de Cramér <i>p-value</i> | Teste de Hotelling <i>p-value</i> |
|------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| 01 | 0.3836 | 0.7469 |
| 02 | 0.0299 | 0.0916 |
| 03 | 0.0759 | 0.1299 |
| 04 | <0.0001 | <0.0001 |
| 05 | 0.1018 | 0.0483 |
| 06 | 0.2357 | 0.2650 |
| 07 | 0.0519 | 0.5880 |
| 08 | 0.0069 | 0.4446 |
| 09 | 0.0279 | 0.2302 |
| 10 | 0.0009 | 0.0067 |
| 11 | 0.0049 | 0.0031 |
| 12 | <0.0001 | <0.0001 |
| 13 | 0.1148 | 0.6982 |
| 14 | 0.0289 | 0.0054 |
| 15 | 0.1148 | 0.5745 |
| 16 | 0.0629 | 0.5182 |
| 17 | <0.0001 | <0.0001 |
| 18 | <0.0001 | 0.0075 |
| 19 | 0.0939 | 0.4063 |
| 20 | 0.1018 | 0.9038 |



Aglomerados com evidência de algum grau de rotação

- Aglomerados: 02, 04, 05, 08, 09, 10, 11, 12, 14, 16, 17, 18

Velocidade de Rotação

$$\omega = \Delta V/R \quad (6)$$

Unidades: $V = km/s^{-1}$ e $R = Mpc$

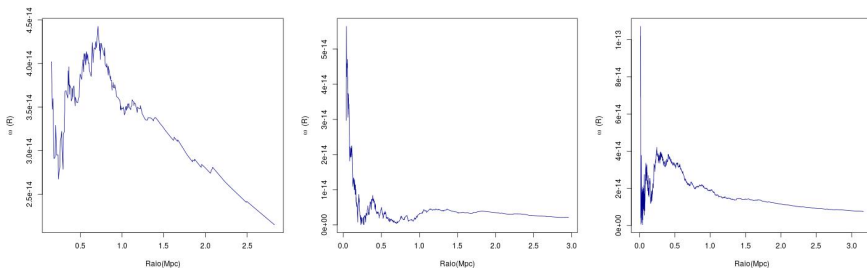


Figura: Perfil da velocidade de rotação Aglomerados 02, 04 e 05.

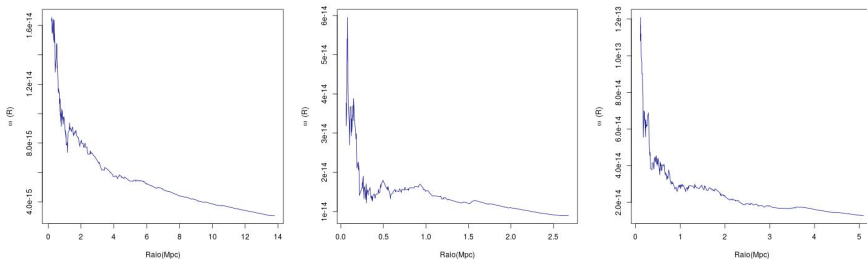


Figura: Perfil da velocidade de rotação Aglomerados 08, 09 e 10.

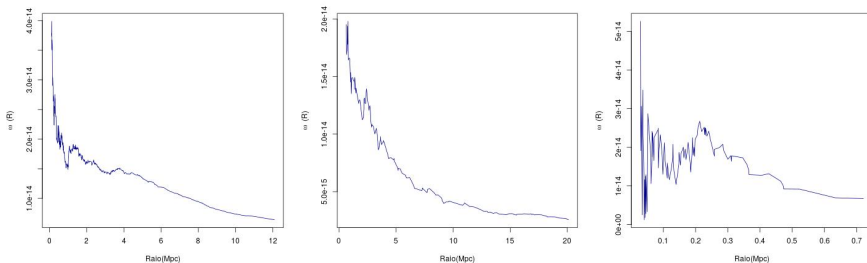


Figura: Perfil da velocidade de rotação Aglomerados 11, 12 e 14.

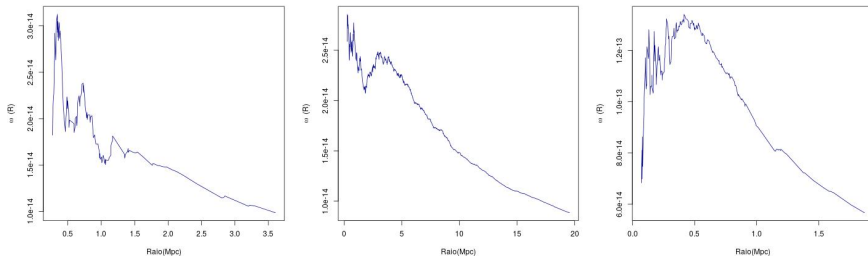


Figura: Perfil da velocidade de rotação Aglomerados 16, 17 e 18.

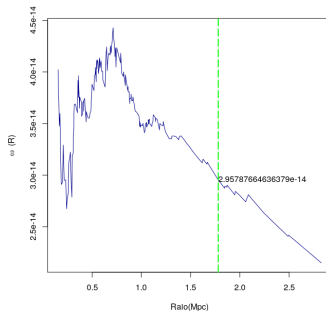


Figura: Velocidade rotacional identificada no Aglomerado 02.



Perspectivas

- Pretendemos repetir o cálculo usando a mediana da distribuição, como no método de Tovmassian (2015) e a definição de subestruturas, quando existirem, para a divisão de aglomerados, ao invés do uso do *gap* principal.
- Implementar e realizar uma comparação de nosso método com aquele de Hwang & Lee (2007).
- Aplicar nosso programa a um conjunto maior de dados, aproximadamente 500 aglomerados do SDSS, definida originalmente por Miller et al. (2005) com dados do SDSS-DR2 e redefinida aqui com dados do SDSS-DR12.
- Cálculo da massa do aglomerado com correção de rotação.



Perspectivas

- Cronograma para os próximos meses

| Atividades | 15/09 | 30/09 | 15/10 | 31/10 | 15/11 | 30/11 | 15/12 | 31/12 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Implementação do método de Hwang & Lee (2007) | x | x | x | | | | | |
| Implementação das alternativas ao cálculo de gap | | x | x | | | | | |
| Aplicação dos métodos em uma amostra maior | | | | x | x | | | |
| Análise dos resultados | | | | | | x | | |
| Escrita da dissertação | x | x | x | x | x | x | x | x |









Referências

-  Chluba, J.; Mannheim,. Kinetic Sunyaev-Zeldovich effect from galaxy cluster rotation. MNRAS, v. 396, p. 419 - 427, Agosto 2002.
-  Beers, T. C., Flynn K., Gebhardt K., 1990, AJ, 100, 32.
-  de Oliveira, F.; Viegas, S. M. M. Descobrindo o Universo. São Paulo: Edusp, v. 56, 2004.
-  Fang, T.; Humphrey, P. J.; Buote, D. A. Rotation and Turbulence of the Hot ICM in Galaxy Clusters. MNRAS, v. 691, p. 1648-1659, Agosto 2008.
-  Friaça, A. C. S. et al. Astronomia: Uma Visão Geral do Universo. 2a. ed. São Paulo: EDUSP, v. 28, 2008.









Referências

-  Hamden, E. T. et al. Measuring Transverse Motions for Nearby Galaxy Clusters. MNRAS, Maio 2010.
-  HWANG, Ho Seong; LEE, Myung Gyoan. Searching for rotating galaxy clusters in SDSS and 2dFGRS. The Astrophysical Journal, v. 662, n. 1, p. 236, 2007.
-  Kalinkov, M. et al. Rotation of the cluster of galaxies A2107. MNRAS, v. 359 , p. 1491-1497, Maio 2005.
-  Manolopoulou, M.; Plionis, M. Galaxy cluster's rotation. MNRAS, v. 465 , p. 2616-2633, Abril 2016.
-  Miller et al. 2005, Article (PDF Available) in the Astronomical Journal 130(3):198, December 2007.
-  Nascimento, R. S. Estudo da dinâmica de pares de aglomerados de galáxias. Dissertação (Programa de Pós- graduação em Física) - UESC. Ilhéus, p. 91. 2012.



Referências

-  Ribeiro A. L. B., Lopes P. A. A., Trevisan M., 2011, MNRAS, 413, L81.
-  Rembold, B. Tópicos especiais em física: Astronomia. Ilhéus: UAB /UESC, v. 4, 2011. 384 p.
-  Sampaio, F. S. Estudo da Distribuição de velocidades em aglomerados de galáxias - Testes de Não Rejeitabilidade e metanálise de Fisher. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Física) - UESC. Ilhéus, p. 51. 2013.
-  Tovmassian, H. M. The rotation of Galaxy Clusters. Astrophysics, v. 58, p. 353-363, Setembro 2015.
-  Velásquez, C. A. M. Estimativa de Parâmetros Cosmológicos usando Aglomerados de Galáxias. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Astronomia) - UFRJ. Rio de Janeiro, p. 74. 2007.
-  Yahil, A & Vidal, N. V The Velocity Distribution Of Galaxies In Clusters Ap. J. N 214, 347-350, 1997.