

Escala acústica bariônica em $z_{eff} = 0,166$ com galáxias azuis do SDSS

Hanna Lima¹, Rafael C. Nunes^{1,2}, Felipe Avila³, Edilson Carvalho⁴ e Armando Bernui³

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

³Observatório Nacional

⁴Universidade do Estado do Amazonas

Resumo

Trabalho apresentado no evento As Astrocientistas: III Encontro Brasileiro de Meninas e Mulheres da Astrofísica, Cosmologia e Gravitação, realizado entre os dias 31 de março e 4 de abril de 2025.

Abstract

Work presented at the event As Astrocientistas: III Encontro Brasileiro de Meninas e Mulheres da Astrofísica, Cosmologia e Gravitação, held between March 31 and April 4, 2025.

Palavras-chave: cosmologia: estrutura em grande escala do Universo, cosmologia: observações, cosmologia: parâmetros cosmológicos.

Keywords: cosmology: the large scale structure of Universe, cosmology: observations, cosmology: cosmological parameters.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v7nEspecial.53378](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v7nEspecial.53378)

1 Introdução

No contexto da cosmologia, as Oscilações Acústicas Bariônicas (*Baryon Acoustic Oscillations*; BAO) são fenômenos originados no Universo primordial, anterior ao período da recombinação [1–4]. Nessa época, matéria bariônica e radiação estavam acoplados, onde a matéria se atraía gravitacionalmente e os fótons se afastavam pela pressão de radiação, gerando oscilações. Ao desacoplarem, este fluido fóton-báron deixou uma impressão na matéria bariônica, dando origem à formação de galáxias.

Atualmente, há um extenso estudo em relação a essa impressão, denominada Escala Acústica Bariônica. A partir de métodos estatísticos, como a função de correlação de 2 pontos angular (2PACF), pode-se determinar essa escala, sendo então uma demonstração da ocorrência do fenômeno BAO. Além disso, com esse sinal podemos estabelecer uma "régua padrão", uma medida de distância bem conhecida de objetos ou fenômenos

físicos. Para o BAO, essa distância é de aproximadamente $100 \text{ Mpc}/h$, que permanece constante independentemente da época na evolução do Universo. Esta medida é determinante na inferência da escala do horizonte sonoro na época do desacoplamento $r_s \equiv s_{BAO}$ e na distância média esférica D_V [3, 5–7].

Neste trabalho, buscamos a escala BAO em um conjunto de galáxias azuis em baixo *redshift* do *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS), assumindo um modelo mínimo. Ou seja, para este conjunto de galáxias azuis, determinaremos a medida da escala BAO sem assumir um modelo cosmológico como base nas equações.

Assim, o trabalho é organizado da seguinte forma: na seção 2 especificamos e justificamos a escolha dos dados observados, além das simulações criadas como ferramenta para a determinação da escala acústica. Definimos as equações e a metodologia da pesquisa na seção 3. Os resultados são elencados na seção 4 e as considerações finais na seção 5.

2 Dados

De acordo com [8], no Universo Local ($z \ll 1$), a determinação da escala BAO apresenta desafios. Isso se deve ao fato de que, em *redshifts* mais baixos, a aglomeração de galáxias torna-se mais complexa. Por esse motivo, escolhemos esse recorte para nossa análise. Para reduzir as incertezas em nossas medições, selecionamos como observáveis as galáxias azuis. Essas galáxias tendem a estar em regiões de baixa densidade, o que minimiza os erros associados ao movimento próprio das galáxias [9]. Utilizamos o catálogo *Main Galaxy sample* do SDSS no *redshift* efetivo $z_{eff} = 0,166$.

2.1 Simulações

Para a aplicação da 2PCF, é essencial estimar as incertezas das medições por meio da matriz de covariância. Para isso, geramos simulações log-normais, que reproduzem catálogos com características semelhantes ao nosso conjunto de dados. Neste trabalho, foram gerados 1000 catálogos com esse propósito.

Além disso, criamos catálogos aleatórios com as mesmas especificações do catálogo observado para calcular a 2PCF de forma consistente.

3 Metodologia

Neste trabalho precisamos definir a 2PCF como medida de dados e a 2PCF que irá modelar os dados. Para os dados, utilizamos os estimador Landy-Szalay [10]:

$$\xi(s) = \frac{DD(s) - 2DR(s) + RR(s)}{RR(s)}. \quad (1)$$

Nesta equação, $DD(s)$ conta pares de objetos cósmicos observados dada a separação s . O mesmo ocorre para $RR(s)$, onde a contagem é em catálogos aleatórios, e para $DR(s)$, para a contagem entre o objeto observado e o presente no catálogo. As medidas de $\xi(s)$ foram obtidas usando o código *TreeCorr* [11].

Para obter a distância s entre pares de galáxias i e j , que formam o ângulo de separação θ_{ij} , calculamos

$$s(z_i, z_j, \theta_{ij}) = (\chi(z_i)^2 + \chi(z_j)^2 - 2\chi(z_i)\chi(z_j)\cos(\theta_{ij}))^{1/2}, \quad (2)$$

onde $\chi(z)$ é a distância comóvel da galáxia com *redshift* z . Para obter χ , escolhemos três modelos cosmológicos diferentes e chamamos cada conjunto de dados de *samples*.

- **Sample 1:** O modelo Λ CDM plano ($\Omega_{k,0} = 0$). Nós adotamos os valores de Plank- Λ CDM nos parâmetros $\Omega_{m,0}$ e H_0 .
- **Sample 2:** Cosmografia em primeira ordem de expansão [12] usando a relação Hubble-Lemaître.
- **Sample 3:** Cosmografia em terceira ordem de expansão, configurando (q_0, j_0) para $(-0.55, 1.00)$ [13].
- **Sample 4:** Cosmografia em terceira ordem de expansão, configurando (q_0, j_0) para $(-0.71, 1.26)$ [14].

Em relação à 2PCF, usamos um modelo empírico, como em [15]. Adicionalmente, contamos com a potencial incerteza das escolhas de uma cosmologia fiducial.

$$\xi(s) = A + Bs^\delta + Ce^{(s-s_{BAO})^2/2\Sigma} + Ds^{-1}. \quad (3)$$

Na dada parametrização, A , B , δ , C , D , s_{BAO} e Σ são parâmetros livres para o ajuste da função aos dados. Para o ajuste, usamos o método Markov-Chain Monte-Carlo (MCMC) com os seguintes intervalos iniciais: $A \in [-5, 5]$, $B \in [0, 600]$, $\delta \in [-5, 5]$, $C \in [-1, 1]$, $D \in [-700, 0]$, $s_{BAO} \in [30, 150]$ e $\Sigma \in [10, 100]$.

4 Resultados

Nosso principal resultado são as medidas de s_{BAO} a partir do MCMC. Para os *samples* definidos anteriormente, temos os resultados na Tabela 1.

O ajuste linear da equação (3) para os quatro *samples* medidos estão ilustrados na Figura 1.

Com estes resultados obtivemos $s_{BAO} = 100, 28^{+10,79}_{-22,96}$ Mpc/h para o *sample* 1, sendo uma nova medida que pode ser comparada aos resultados para *redshifts* próximos, como em [6, 16].

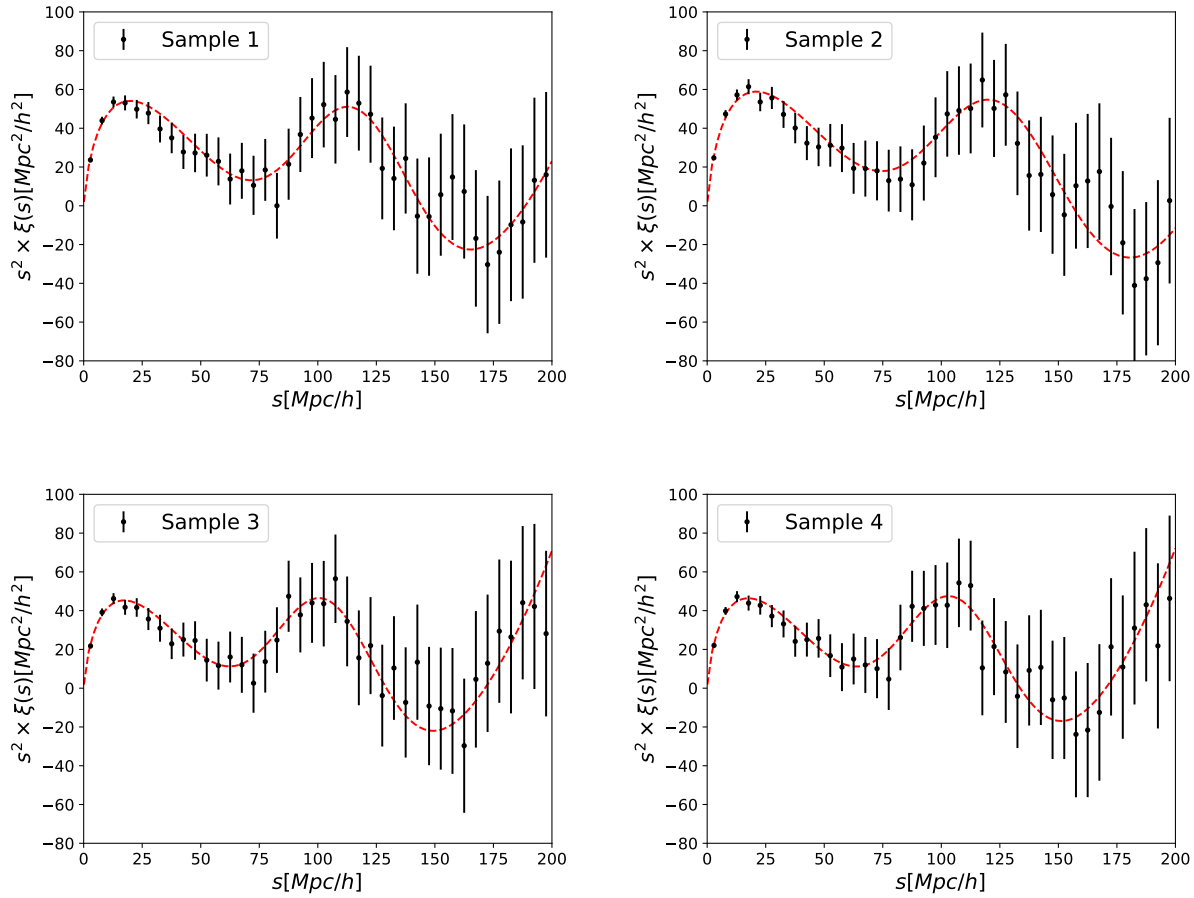


Figura 1: Assinatura BAO obtida com a 2PCF da equação (3) analisando as galáxias azuis do SDSS no intervalo de $z \in [0, 0.30]$ para o *sample 1* (acima à esquerda), *sample 2* (acima à direita), *sample 3* (abaixo à esquerda) e *sample 4* (abaixo à direita).

5 Conclusões

Tabela 1: Best-fit a 1σ para região de confiança da escala BAO para os quatro *samples*.

Metodologia	$s_{\text{BAO}}[\text{Mpc}/h]$
<i>Sample 1</i>	$100, 28^{+10,79}_{-22,96}$
<i>Sample 2</i>	$108, 94^{+13,69}_{-16,70}$
<i>Sample 3</i>	$87, 28^{+9,26}_{-21,86}$
<i>Sample 4</i>	$89, 21^{+9,24}_{-23,02}$

As Oscilações Acústicas de Bárions (BAO) são uma ferramenta essencial para a cosmologia, mas sua aplicação em pequenas escalas enfrenta desafios devido a efeitos não lineares. Neste estudo, utilizamos a função de correlação de dois pontos (2PCF) para estimar a escala BAO no Universo Local, adotando diferentes modelos cosmológicos para reduzir incertezas sistemáticas.

Nossos resultados reforçam a robustez da técnica e destacam a necessidade de refinamento contínuo para minimizar vieses. A evolução das análises, incluindo reconstrução do sinal BAO e novas abordagens estatísticas, pode aprimorar sua aplicação na cosmologia de precisão.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao revisor do artigo original pelos comentários e sugestões, aos quais incrementaram significativamente a qualidade do manuscrito. Felipe Avila agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro, FAPERJ - Processo SEI 260003/014913/2023, pelos seus suportes financeiros. Rafael C. Nunes agradece ao suporte financeiro do CNPq acerca do suporte financeiro parcial sob o projeto No. 304306/2022-3 e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) pelo suporte financeiro parcial sob o projeto No. 23/2551-0000848-3. Armando Bernui agradece ao CNPq.

Sobre os autores

Hanna Lima (hanna.lima@ufrgs.br) é mestranda no Programa de Pós-Graduação em Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e graduada em Física com ênfase em Astrofísica pela UFRGS (2024). Possui experiência na área de Astronomia, com ênfase em Cosmologia. Tem interesse na área da Cosmologia voltado aos estudos de Estrutura em Grande Escala (LSS) e discussões éticas no campo da Física e Astronomia.

Rafael da Costa Nunes (rafadcunes@gmail.com) é professor Adjunto no Instituto de Física da UFRGS e docente permanente no Programa de Pós-Graduação em Física da mesma instituição. Também é docente colaborador no Programa de Pós-Graduação em Astrofísica do INPE. Membro filiado da Academia Brasileira de Ciências. Suas áreas de atuação incluem Cosmologia, Análise de Parâmetros Cosmológicos, Anomalias e Tensões Observacionais em Dados Astrofísicos e Cosmológicos, Matéria Escura, Energia Escura, Testes e Extensões da Teoria da Relatividade Geral. Tem também interesse em tópicos gerais relacionados à Análise de Dados.

Felipe Avila (fsavila2@gmail.com) possui Licenciatura em Física pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (2015), mestrado em Astronomia pelo Observatório Nacional (2018)

e doutorado pelo Observatório Nacional (2022). Tem experiência na área de Astronomia, com ênfase em Cosmologia Observacional, atuando principalmente no seguinte tema: estrutura em grande escala do universo (Escala de Homogeneidade, Função de Crescimento, Oscilações Acústicas de Bárions).

Edilson Carvalho (dilsofilho@hotmail.com) possui graduação em Licenciatura em Física pela Universidade Federal do Amazonas (2011), mestrado em Física pela Universidade Federal do Amazonas (2013) e doutorado em Astronomia pelo Observatório Nacional (2019). Atualmente é professor da Universidade do Estado do Amazonas. Tem experiência na área de Física, com ênfase em Física, atuando principalmente nos seguintes temas: Cosmologia, estrutura em grande escala, oscilações acústicas de bárions e é líder do Grupo de Pesquisa Rede De Investigação em Matemática e Aplicações no Alto Solimões (RIMASOL). Coordena o Laboratório de Matemática Pura, Aplicada e Computacional - LAMATCOM.

Armando Bernui (bernui@on.br) possui graduação em Física - Universidad Nacional de Ingeniería (1981), mestrado em Física-Matemática - Scuola Internazionale Di Studi Superiori Avanzati (1985) e doutorado em Física-Matemática - Scuola Internazionale di Studi Superiori Avanzati (1990). Pesquisador Titular do Observatório Nacional (MCTI), tem experiência nas áreas de Física-Matemática e Cosmologia, com ênfase na Cosmologia Observacional, estudando principalmente os seguintes temas: a estrutura em grande escala do universo (Oscilações Acústicas de Bárions; Princípio Cosmológico; estrutura do Universo Local); e a Radiação Cósmica de Fundo e suas propriedades fundamentais, tais como sua distribuição angular (isotropia estatística) e suas propriedades estatísticas (Gaussianidade). Formador de AstroCientistas e Pesquisadores em Cosmologia.

Referências

- [1] P. J. E. Peebles e J. T. Yu, *Primeval Adiabatic Perturbation in an Expanding Universe*, **162**, 815 (1970).

- [2] R. A. Sunyaev e Y. B. Zeldovich, *Small-Scale Fluctuations of Relic Radiation*, **7**(1), 3 (1970).
- [3] D. J. Eisenstein e et al., *Detection of the Baryon Acoustic Peak in the Large-Scale Correlation Function of SDSS Luminous Red Galaxies*, **633**(2), 560 (2005). [ArXiv:astro-ph/0501171](#).
- [4] S. Cole e et al., *The 2dF Galaxy Redshift Survey: power-spectrum analysis of the final data set and cosmological implications*, **362**(2), 505 (2005). [ArXiv:astro-ph/0501174](#).
- [5] S. Alam e et al., *Completed SDSS-IV extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: Cosmological implications from two decades of spectroscopic surveys at the Apache Point Observatory*, **103**(8), 083533 (2021). [ArXiv:2007.08991](#).
- [6] F. Beutler e et al., *The 6dF Galaxy Survey: baryon acoustic oscillations and the local Hubble constant*, **416**(4), 3017 (2011). [ArXiv:1106.3366](#).
- [7] C. Blake e et al., *The WiggleZ Dark Energy Survey: mapping the distance-redshift relation with baryon acoustic oscillations*, **418**(3), 1707 (2011). [ArXiv:1108.2635](#).
- [8] M. Crocce e R. Scoccimarro, *Nonlinear evolution of baryon acoustic oscillations*, *Physical Review D* **77**(2) (2008).
- [9] E. de Carvalho et al., *BAO angular scale at $z_{eff} = 0.11$ with the SDSS blue galaxies*, **649**, A20 (2021). [ArXiv:2103.14121](#).
- [10] S. D. Landy e A. S. Szalay, *Bias and Variance of Angular Correlation Functions*, **412**, 64 (1993).
- [11] M. Jarvis, G. Bernstein e B. Jain, *The skewness of the aperture mass statistic*, **352**(1), 338 (2004). [ArXiv:astro-ph/0307393](#).
- [12] M. Visser, *Cosmography: Cosmology without the Einstein equations*, *General Relativity and Gravitation* **37**(9), 1541 (2005).
- [13] E.-K. Li, M. Du e L. Xu, *General cosmography model with spatial curvature*, **491**(4), 4960 (2020). [ArXiv:1903.11433](#).
- [14] J. Liu et al., *Revisiting cosmography via Gaussian process*, *European Physical Journal C* **83**(5), 374 (2023).
- [15] E. e. a. Sánchez, *Tracing the sound horizon scale with photometric redshift surveys*, **411**(1), 277 (2011). [ArXiv:1006.3226](#).
- [16] P. Carter e et al., *Low redshift baryon acoustic oscillation measurement from the reconstructed 6-degree field galaxy survey*, **481**(2), 2371 (2018). [ArXiv:1803.01746](#).