

O mistério do Local Cosmic Void

C. Franco, F. Avila e A. Bernui

Observatório Nacional

Resumo

O Modelo Λ CDM-plano (Λ é a constante cosmológica e CDM, *cold dark matter*) é o que melhor se ajusta aos dados observacionais atualmente. Ele se fundamenta no Princípio Cosmológico, que assume a homogeneidade e a isotropia estatísticas do universo em larga escala. Estudando as propriedades desta última no Universo Local (UL) por meio do catálogo ALFALFA (*Arecibo Legacy Fast ALFA Survey*) – um levantamento que cobre $\sim 7000 \text{ deg}^2$ do céu e conta com 31502 fontes extragalácticas de HI, distribuídas no intervalo $0 < z < 0.06$ e divididas entre os hemisférios Norte e Sul Galácticos – encontramos resultados que indicam a existência de uma região contendo poucas galáxias, e que foi descrita pela primeira vez por Tully & Fischer (1987), ficando conhecida como *Local Cosmic Void*. Nossas análises são independentes de modelo e usam a função de correlação angular de dois pontos (2PACF) como aferidor estatístico, além de simulações do tipo *lognormal* (que consideram os parâmetros cosmológicos) para a estimativa das incertezas dos resultados. Para entender as propriedades e a morfologia da estrutura encontrada, fizemos testes com *voids* simulados, além de investigações comparativas com as descrições de *voids* do UL disponíveis na literatura. Nossos resultados indicam que o LCV possui contraste de densidade numérica $\delta \simeq -0.3$, correspondente a uma subdensidade de $\sim 150 \text{ Mpc}$ de comprimento e $\sim 60 \text{ Mpc}$ de largura, características que concordam com a literatura.

Abstract

The flat- Λ CDM Model (Λ is the cosmological constant and CDM, *cold dark matter*) is the model that best fits current observational data. It is based on the Cosmological Principle, which assumes statistical homogeneity and isotropy of the universe on a large scale. Studying the properties of the latter in the Local Universe (LU) through the ALFALFA catalog (*Arecibo Legacy Fast ALFA Survey*) – a survey that covers $\sim 7000 \text{ deg}^2$ of the sky and has 31502 extragalactic sources of HI, distributed in the interval $0 < z < 0.06$ and divided between the North and South Galactic hemispheres – we found results that indicate the existence of a region containing few galaxies, and which was first described by Tully & Fischer (1987), becoming known as the *Local Cosmic Void*. Our analyzes are model-independent and use the two-point angular correlation function (2PACF) as a statistical gauge, in addition to *lognormal* simulations (which consider cosmological parameters) to estimate the uncertainties of the results. To understand the properties and morphology of the structure found, we carried out tests with simulated *voids*, in addition to comparative investigations with the descriptions of LU *voids* available in the literature. Our results indicate that the LCV has a numerical density contrast of $\delta \simeq -0.3$, corresponding to a subdensity of $\sim 150 \text{ Mpc}$ in length and width of $\sim 60 \text{ Mpc}$, characteristics that agree with the literature.

Palavras-chave: cosmologia, modelo padrão, vácuo local.

Keywords: cosmology, standard model, local void

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44878](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44878)

1 Introdução

O modelo cosmológico Λ CDM se fundamenta no Princípio Cosmológico, o qual estabelece que em escalas consideráveis –i.e., cerca de 100 Mpc [1–7] em 3-dimensões, e 20° [8] em 2-dimensões–, o universo é estatisticamente homogêneo (invariante sob translação) e isotrópico (invariante sob rotação) [9–16]. É importante ressaltar que homogeneidade e isotropia são conceitos independentes, embora a presença de isotropia em todos os pontos do espaço implique em

homogeneidade [10].

Se em largas escalas o universo é uniforme, o mesmo não é válido em escalas cada vez menores. A presença de pequenos corpos, filamentos, aglomerados e vazios (*voids*) se torna mais proeminente, destacando uma distribuição irregular das estruturas. Isso realça a importância de considerar o caráter estatístico da homogeneidade e isotropia nas análises.

A aplicação do Princípio Cosmológico ao Universo Local (UL) tem relevância devido à nossa falta de conhecimento sobre muitas estruturas presentes na

nossa vizinhança cósmica. Um exemplo notável é o Local Cosmic Void (LCV), localizado a ~ 1 Mpc do Grupo Local [17–19]. O LCV exibe uma baixa densidade de matéria luminosa dentro de seus limites, e estudos recentes sugerem que ele possa ser um *void* de largura entre 150 – 300 Mpc [18–24], um tamanho que impressiona pela grandiosidade [18, 25].

Além de suas dimensões notáveis, o LCV parece desempenhar um papel significativo em efeitos dinâmicos, como as velocidades peculiares observadas em galáxias próximas [18, 22, 23, 26]. Esses indícios motivaram investigações adicionais. Por isso, estudamos a distribuição das estruturas no UL usando o catálogo ALFALFA (Arecibo Legacy Fast ALFA Survey) e, mais especificamente, este trabalho complementa os resultados recentemente publicados por [27]. Essa análise oferece uma perspectiva nova sobre a configuração das estruturas observadas no UL.

Esta contribuição está organizada de acordo com a seguinte estrutura: na Seção 2, apresentamos os dados utilizados, os critérios de seleção e as propriedades dos catálogos sintéticos. Em seguida, na Seção 3, detalhamos a metodologia adotada para obter os resultados discutidos na Seção 4. Por fim, as conclusões são apresentadas na Seção 5.

2 Dados astronômicos

Para investigar a isotropia no UL ($z \lesssim 0.06$), utilizamos o catálogo ALFALFA (Arecibo Legacy Fast ALFA Survey) [28]. Essa escolha foi motivada pelas propriedades favoráveis deste levantamento, a saber:

- (i) boa densidade numérica ($n \sim 4 \text{ deg}^{-2}$), proporcionando quantidade significativa de dados para análise;
- (ii) alta cobertura espacial, abrangendo $\sim 7000 \text{ deg}^2$ ou $\sim 1/6$ do céu, o que é propício à divisão do céu em vários pedaços de tamanho mínimo apropriado; e
- (iii) bias relativo das fontes de HI, em relação à matéria, próximo ao bias de galáxias azuis [29, 30] que, por sua vez, é ~ 1 [8, 31]. Essa característica torna as fontes de HI como traçadores cósmicos interessantes para mapear a distribuição de matéria no UL.

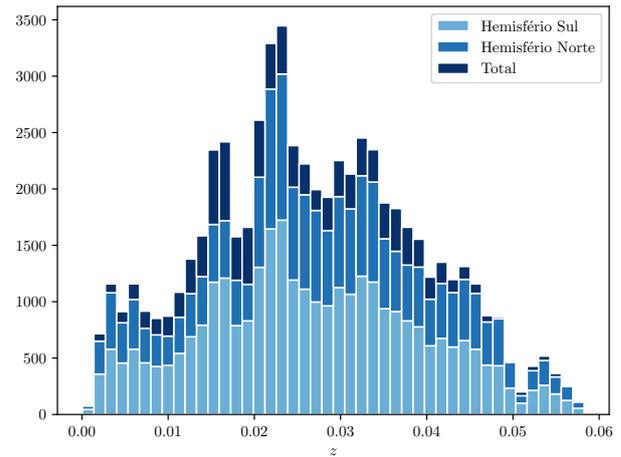


Figura 1: Histograma da distribuição de redshifts dos dados do ALFALFA, que ilustra a frequência de fontes no intervalo $0 < z < 0.06$ em cada hemisfério e na amostra completa.

Essas características conferem às fontes de HI uma singular relevância como traçadores cósmicos da matéria no UL.

Ao longo desta seção, serão apresentados os critérios de seleção dos dados do ALFALFA utilizados nesse trabalho (2.1), bem como o processo de criação dos catálogos sintéticos (2.2), necessários para as análises estatísticas.

2.1 Catálogo ALFALFA

Entre os anos 2005 e 2012 foram observadas 31502 fontes extragalácticas de nuvens de HI em 21 cm, com a versão completa do catálogo disponibilizada em 2018 [28, 32]. Esses objetos estão localizados no UL, dentro do intervalo de redshift $0 < z < 0.06$, distribuídos entre dois hemisférios: (i) Hemisfério Norte Galáctico (HNG, ou *Spring*) e (ii) Hemisfério Sul Galáctico (HSG, ou *Fall*), conforme mostra a Figura 1.

Ambos os hemisférios estão contidos na faixa de declinação $0^\circ < \delta < 36^\circ$, com o HNG cobrindo a região com ascensões retas entre $7^h 20^m < \alpha < 16^h 40^m$ e o HSG compreendendo $21^h 30^m < \alpha < 3^h 15^m$. Dentro do conjunto total de objetos, 21578 estão no HNG, enquanto 9924 estão localizados no HSG, conforme ilustrado na Figura 2.

Seguindo os critérios estabelecidos pela equipe do ALFALFA, os dados foram classificados como CODE 1 ou CODE 2 [28]. Um desses critérios é a razão Sinal-Ruído (SNR, do inglês, *signal-to-noise ratio*). Caso a fonte esteja associada a uma contraparte óptica (OC, ou *Optical Counterpart*) com redshift comparável e possua $\text{SNR} > 6.5$, sua classificação será

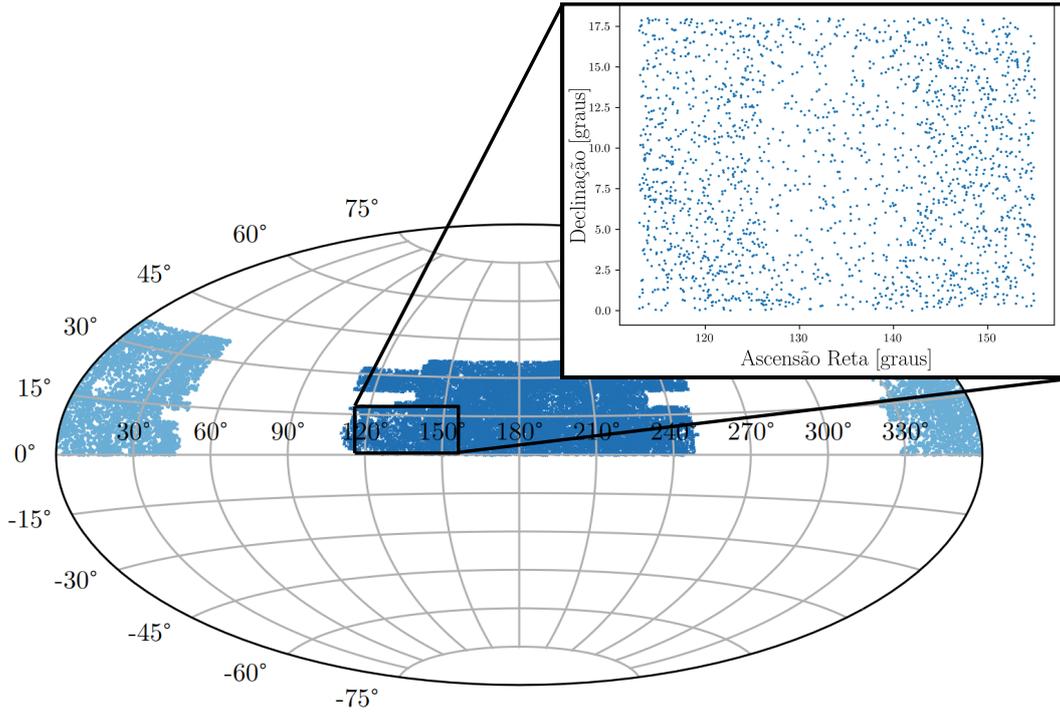


Figura 2: *Footprint* do catálogo ALFALFA em coordenadas equatoriais. A região central corresponde ao Hemisfério Norte Galáctico e as regiões nos extremos, juntas, correspondem ao Hemisfério Sul Galáctico. Em destaque, a Área 2, objeto de estudo deste trabalho.

CODE 1. Aquelas que coincidam com uma OC mas possuam $\text{SNR} \lesssim 6.5$ serão consideradas CODE 2. Fontes CODE 1 são aproximadamente 100% confiáveis [28] e, por esse motivo, foram as escolhidas para as análises feitas neste artigo. Esse critério reduziu nossa amostra para 16285 e 9149 fontes confiáveis nos HNG e HSG, respectivamente.

Prosseguindo, os hemisférios foram subdivididos para criar o maior número possível de regiões, cada uma com tamanho mínimo adequado para que não haja a predominância de ruído estatístico. Para essa subdivisão, adotamos como critério uma escala mínima para os polígonos, estabelecendo que estes deveriam ter mais de 20° [30]. Obtivemos, assim, dez regiões: seis no HNG e quatro no HSG.

É crucial notar que cada pedaço foi cuidadosamente delimitado de modo a evitar formatos que pudessem comprometer a reprodução do *footprint* em análise. Para garantir essa condição, alguns pontos adicionais foram removidos, resultando na amostra final contendo 15993 nuvens de HI no HNG e 8828 nuvens no HSG. As particularidades de cada região estão detalhadas na Tabela 1 [27].

Mesmo com variações na quantidade de fontes e na área de cada região, o foco principal está na busca por densidades numéricas (n) que sejam aproxima-

Tabela 1: Propriedades das dez regiões em análise. É de importância notar que a característica mais importante de cada região é a densidade numérica, cujo valor médio é $\bar{n} \simeq 3.42 \text{ deg}^{-2}$.

	Fontes	Área [deg^2]	n [deg^{-2}]
Area 1	1648	522	3.15 ± 0.08
Area 2	2081	756	2.75 ± 0.06
Area 3	3372	810	4.16 ± 0.07
Area 4	3427	810	4.23 ± 0.07
Area 5	2157	688	3.13 ± 0.07
Area 6	3308	864	3.83 ± 0.07
Area 7	2474	736	3.36 ± 0.07
Area 8	2844	875	3.25 ± 0.06
Area 9	1636	558	2.93 ± 0.07
Area 10	1874	558	3.36 ± 0.08

mente iguais – i.e., o número de objetos por unidade de área é mantido.

É importante notar que a região onde os dados do ALFALFA se concentram é repleta de estruturas, tais como grupos e aglomerados de galáxias, assim como também com vazios [17, 26, 33]. O modo como essas estruturas se distribuem determina a forma dos

campos gravitacionais que, por sua vez, dão origem às velocidades peculiares [34, 35]. Ao calcularmos a 2PCF, não fizemos correções a respeito dessas velocidades peculiares, pois consideramos que o tratamento adequado foi feito pela própria equipe do levantamento ALFALFA, seguindo o modelo de distâncias de [36], aplicado a fontes extragalácticas de HI com $cz_{\odot} < 6000 \text{ km s}^{-1}$ [28].

2.2 Catálogos sintéticos

Nossas análises empregaram catálogos sintéticos do tipo *random* para estimar a função de correlação de dois pontos, assunto que será explorado na Seção 3.1. Além disso, usamos catálogos *mock* para avaliar as incertezas associadas aos nossos resultados, tema a ser discutido na Seção 3.2.

Um catálogo randômico possui pontos pseudoaleatórios distribuídos uniformemente em um intervalo específico. Esses catálogos devem reproduzir a região em análise, ou seja, precisam ter os mesmos intervalos em ascensão reta e declinação, além de conter a mesma quantidade de pontos. Para o *footprint* apresentado na Figura 2, foram gerados 25 catálogos *random* seguindo o procedimento descrito por [37] (veja também [29, 38–41]).

Assim, considerando um número aleatório $R_i \in [-1, +1]$ em um intervalo $\Delta\delta'$, as declinações serão determinadas por

$$\delta_i = \arcsin R_i, \quad (1)$$

e as ascensões retas serão os valores no intervalo $\Delta\alpha'$.

Da mesma forma, um catálogo *mock* precisa reproduzir o *footprint* da região sob análise. No entanto, cada um dos catálogos desse tipo representa uma realização dos parâmetros de entrada previamente fornecidos ao código público LOGNORMAL GALAXIES [42] e que devem estar de acordo com as características do catálogo de dados, conforme listado na Tabela 2.

Além desses, o código também demanda os parâmetros cosmológicos que serão adotados na simulação. Para esta finalidade, usamos os resultados apresentados na Tabela 2 de [43], os quais estão listados na Tabela 3.

Dessa forma, criamos um conjunto composto por 1000 *mocks* que serão utilizados para estimar incertezas de maneira mais precisa. Isso se torna necessário, uma vez que catálogos randômicos tendem a gerar erros subestimados em comparação com as simulações [38, 44, 45].

Tabela 2: Configuração do survey usada para gerar um conjunto de 1000 catálogos *mock lognormal* usados nas análises.

Configuração do survey
$z = 0.0$
$b = 1.0$
$N_g = 2 \times 10^5$
$L_x = 230$
$L_y = 230$
$L_z = 230$

Tabela 3: Parâmetros cosmológicos disponibilizados por [43].

Cosmological parameters
$\Omega_b h^2 = 0.02236$
$\Omega_c h^2 = 0.1202$
$\ln(10A_s) = 3.045$
$n_s = 0.9649$
$\Sigma m_v = 0.06$
$h = 0.6727$

3 Metodologia

Nos estudos que abordam a estrutura em larga escala do universo, o uso da função de correlação de dois pontos (2PCF, do inglês *Two-Point Correlation Function*) é conveniente para quantificar a aglomeração de matéria [13, 45–51]. A versão bidimensional da 2PCF, a função de correlação angular de dois pontos (2PACF, ou *Two-Point Angular Correlation Function*), é vantajosa em análises independentes de modelo (como é a proposta desse trabalho), uma vez que requer apenas coordenadas angulares.

3.1 Função de correlação angular de dois pontos

Supondo uma coleção de N pontos distribuídos aleatoriamente em um volume V , a 2PACF é definida como a probabilidade de se encontrar dois objetos a uma dada separação angular [39, 52, 52, 53], calculada usando

$$\theta_{ij} = \cos^{-1} [\sin(\delta_i) \sin(\delta_j) + \cos(\delta_i) \cos(\delta_j) \cos(\alpha_i - \alpha_j)], \quad (2)$$

onde α_i , α_j e δ_i , δ_j são a ascensão reta e a declinação, respectivamente, das galáxias i e j .

Na literatura, encontram-se vários estimadores baseados na contagem de pares de objetos em função

da distância [54–57]. O estimador de Peebles-Hauser (PH) [55], chamado de estimador natural da correlação entre pares de objetos cósmicos, é

$$\omega(\theta)_{PH} = \frac{DD(\theta)}{RR(\theta)} - 1, \quad (3)$$

onde $DD(\theta)$ é o número de pares de objetos cósmicos no catálogo de dados com separação angular θ , normalizado pelo número total de pares; $RR(\theta)$ é uma quantidade similar, mas para pares no catálogo randômico. Valores nulos de $\omega(\theta)$ representam uma distribuição aleatória; enquanto valores positivos (negativos) indicam uma distribuição aglomerada (segregada) de matéria. PH é mais intuitivo – em termos físicos – que outros estimadores, uma vez que compara diretamente a contagem de pares de dados com pares randômicos [29].

Dessa forma, nosso próximo passo foi reunir todos os nossos catálogos (ALFALFA e sintéticos) e calcular a 2PACF usando 80 bins espaçados linearmente entre 0.01° e 40° .

3.2 Estimativa das incertezas

Os catálogos randômicos que usamos para calcular a 2PACF não são considerados satisfatórios para estimar as incertezas associadas a esse cálculo, levando a valores subestimados [38, 44]. Para contornar essa questão, usamos os *mocks* descritos na Seção 2.2, que fornecem uma avaliação mais fidedigna das flutuações estatísticas esperadas.

O procedimento seguiu a descrição feita na literatura como, por exemplo, por [40, 58, 59]. Após calcular a 2PACF para um conjunto de N_b bins usando os 1000 *mocks* e os 25 *random* gerados anteriormente, procedemos ao cálculo dos elementos da matriz de covariância de acordo com

$$\text{Cov}_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [\omega_k(\theta_i) - \bar{\omega}_k(\theta_i)][\omega_k(\theta_j) - \bar{\omega}_k(\theta_j)], \quad (4)$$

onde os índices $i, j = 1, 2, \dots, N_b$ representam cada bin θ_i ; ω_k é a 2PACF para o k -ésimo *mock* ($k = 1, 2, \dots, N$); $\bar{\omega}(\theta_i)$ e $\bar{\omega}(\theta_j)$ são os valores médios para os bins i e j , respectivamente. A incerteza de $\omega(\theta_i)$ é a raiz quadrada da diagonal principal da equação (4), $\Delta\omega(\theta_i) = \sqrt{\text{Cov}_{ii}}$.

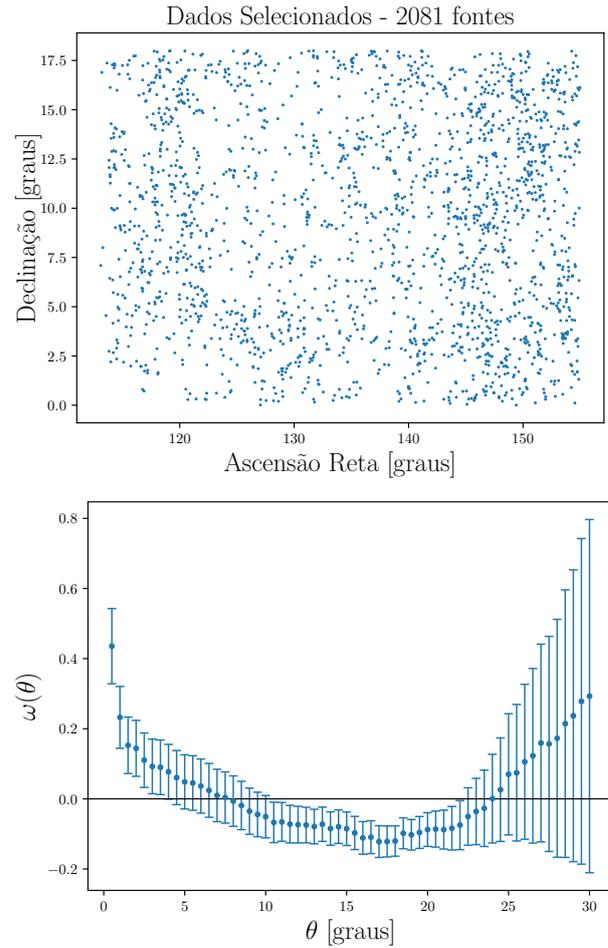


Figura 3: Superior: Projeção cartesiana da Área do HNG, contendo 2081 fontes extragalácticas. Inferior: 2PACF usando o estimador PH na Área 2.

4 Resultados

Após a divisão dos dados selecionados em 10 regiões, cada uma com área de $\sim 700 \text{ deg}^2$, procedemos ao cálculo da 2PACF em cada pedaço do céu. Utilizamos o estimador PH no intervalo $0^\circ < \theta < 40^\circ$, repartido em 80 bins de largura $\Delta\theta = 0.5^\circ$. Consideramos apenas separações angulares até $\theta \approx 30^\circ$, uma vez que a quantidade de pares disponíveis diminui substancialmente com o aumento da distância angular.

Algumas regiões apresentaram características peculiares [27], dentre elas, a Área 2, localizada entre as coordenadas $RA \in [113^\circ, 155^\circ]$ e $DEC \in [0^\circ, 18^\circ]$, conforme ilustrado na Figura 3.

A análise da 2PACF na Área 2 indicou uma sistemática falta de correlação ao longo de um amplo intervalo angular. Esse padrão sugere marcadamente a presença de uma subdensidade (ou *void*) bem acentuada. Essa característica é mais facilmente perce-

bida através do estimador PH, uma vez que ele faz a comparação direta entre a razão dados-*random* e a unidade. Contrapondo os resultados apresentados na Figura 8 de [27] com os da Figura 3 deste trabalho, nota-se, claramente, que a presença do *void* é melhor detectada pelo estimador PH.

Avançamos mais no estudo dessa região, recorrendo à função distribuição cumulativa (CDF, do inglês *cumulative distribution function*), que quantifica a probabilidade de uma variável aleatória X assumir valores menores ou iguais a x no intervalo $F_X : \mathbb{R} \rightarrow [0, 1]$ [60]. Esse método proporciona uma análise das discrepâncias ou conformidades entre os dados observados e o modelo esperado. Comparamos os dados empíricos de distâncias (em Mpc) fornecidos pelo ALFALFA com a distribuição esperada, cujo resultado pode ser visto na Figura 4.

A CDF foi construída usando 44 bins e os parâmetros obtidos dos dados do ALFALFA: a média $\mu = 116$ Mpc e o desvio padrão $\sigma = 56$ Mpc. Ao comparar a CDF gerada com os dados observados, notamos duas regiões com depressões, uma menor em torno de $r \in [100, 140]$ e outra maior em $r \in [160, 245]$ [27].

A parte superior da Figura 4 oferece uma representação visual da dispersão dos objetos conforme a distância. Considerando toda essa informação com o resultado da CDF, verifica-se que as depressões estão relativamente próximas umas das outras. Essa proximidade sugere a possível interconexão entre os *voids*. Essa interpretação, respaldada por análises anteriores conduzidas por [61], indica que *voids* de pequeno e médio porte, quando projetados, podem ser percebidos como um único *void* de grandes dimensões.

Segundo nossos resultados, essa estrutura projetada na Área 2 está localizada aproximadamente em $100\text{Mpc} \lesssim r \lesssim 240\text{Mpc}$, o que corresponde a $\sim 140\text{Mpc}$ de comprimento e $\sim 60\text{Mpc}$ de largura [27].

4.1 Voids simulados

Para investigar mais propriedades da assinatura encontrada na 2PACF, desenvolvemos um modelo simplificado (*toy-model*) que mimetiza um *void*. Consideremos uma região do céu com as mesmas coordenadas da Área 2 e o mesmo número de objetos. Removemos 30% dos objetos de uma dada região circular com raio igual a 9° e os redistribuímos na parte externa ao círculo. O resultado desse procedimento pode ser visualizado na Figura 5.

A partir desses resultados, inferimos que a assina-

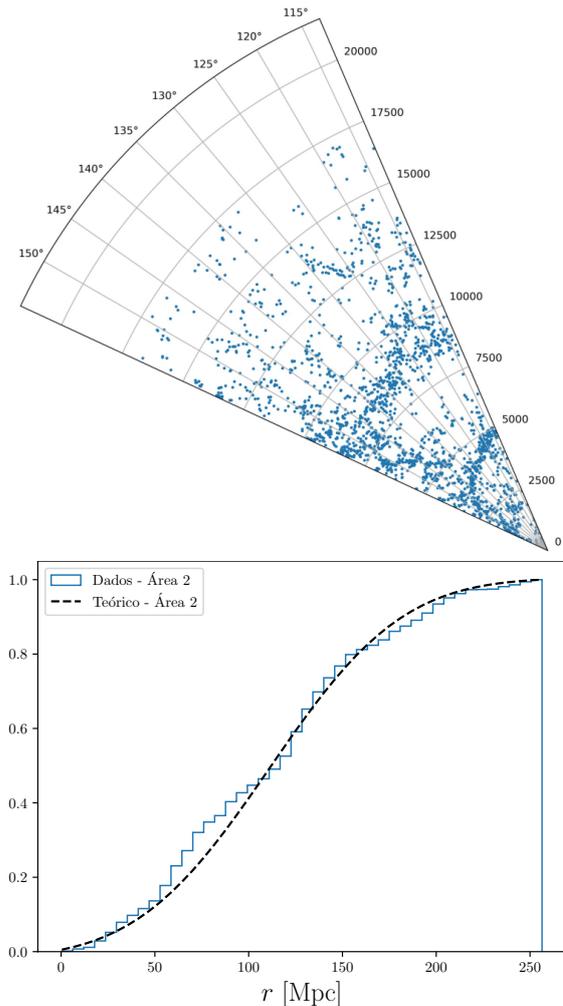


Figura 4: *Superior:* Distribuição de distâncias da amostra do ALFALFA na Área 2; *Inferior:* Comparação entre a distribuição teórica, dada por uma função gaussiana e os dados empíricos. Note que há duas visíveis depressões em torno de $r \in [100, 140]$ (menor) e $r \in [160, 245]$ (maior).

tura encontrada na 2PACF está associada a um *void* com contraste de densidade numérica $\delta \simeq -0.3$ que está parcialmente localizado na Área 2 [18, 25, 27]. Segundo todas as evidências apresentadas aqui, e em [27], a hipótese mais substancial sugere que essa subdensidade é o *Local Cosmic Void* (LCV) [18, 27].

5 Conclusões

Esse trabalho realizou análises independentes de modelo para estudar a isotropia estatística no UL usando dados públicos do catálogo ALFALFA ($z < 0.06$) e se justifica devido à importância significativa que o Princípio Cosmológico possui para o modelo de concordância. Os resultados obtidos aqui servem

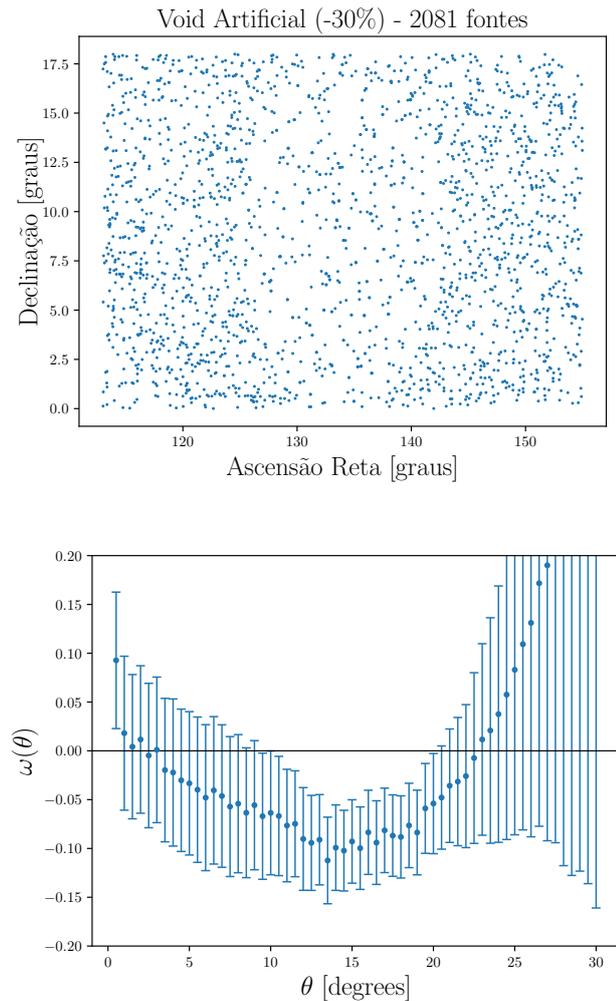


Figura 5: Experimento toy-model simulando um void com 9° de raio e contraste de densidade $\delta \simeq -0.3$. **Superior:** Amostra de dados com o void simulado. **Inferior:** A função 2PCF do void simulado.

como um teste complementar ao trabalho recentemente publicado por [27].

Baseado nisso, investigamos a distribuição angular do traçador cosmológico HI, selecionando dados estatisticamente confiáveis –classificados como CODE 1– e dividindo nossa amostra final em 10 regiões de tamanho mínimo apropriado. A cautela na escolha do tamanho de cada área se faz necessária para evitar que cada região seja grande demais e reduza a disponibilidade de dados para análise; ou pequena demais, comprometendo a densidade numérica. Além disso, delimitamos cuidadosamente cada recorte para eliminar formas irregulares e de difícil reprodutibilidade.

Nossas análises estatísticas foram feitas usando o estimador PH da função de correlação angular de dois pontos em cada uma das regiões. Com isso, encontramos peculiaridades em algumas regiões, dentre

elas, a Área 2. Nossas investigações mostraram que essa região apresenta uma grande subdensidade – ou uma coleção de subdensidades menores – que podem ter origem em um void com contraste de densidade $\delta \simeq -0.3$. Esse void está aproximadamente nas mesmas coordenadas onde estudos anteriores reportaram estar o Local Cosmic Void.

Para testar se a assinatura encontrada na 2PCF correspondia de fato a um void, realizamos um experimento toy-model, que mostrou que a Área 2 é bem compatível com um void de 9° e densidade de contraste numérico $\delta \simeq -0.3$.

Por fim, também utilizamos a função distribuição cumulativa para comparar os dados de distância fornecidos pelo ALFALFA com a distribuição esperada para a região, e encontramos, mais uma vez, evidências de que o void está (parcialmente) projetado na Área 2, com localização aproximada $100 \text{ Mpc} \lesssim r \lesssim 245 \text{ Mpc}$, correspondente a uma subdensidade de $\sim 150 \text{ Mpc}$ de comprimento e $\sim 60 \text{ Mpc}$ de largura, características que concordam com a literatura [25, 27, 61].

Agradecimentos

CF e AB agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelas bolsas de estudo concedidas para a realização desse trabalho. FA agradece ao CNPq e à Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), Processo SEI 260003/014913/2023, pelo auxílio financeiro recebido.

Sobre a autora

Camila Franco (camilafranco@on.br) é formada em física pelo Instituto Federal Fluminense (IFF) e mestre em Astronomia pelo Observatório Nacional (ON). Atualmente, é doutoranda em Astronomia pelo ON, com ênfase em cosmologia observacional, onde estuda a estrutura em grande escala do universo.

Sobre os autores

Felipe Avila é licenciado em Física pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Realizou mes-

trado e doutorado em Astronomia pelo Observatório Nacional, com foco em Cosmologia Observacional. Atualmente, é pós-doutor júnior no Observatório Nacional, em uma parceria entre o CNPq e a FAPERJ, estudando estruturas em grandes escalas no universo e aplicações de Aprendizado de Máquina em Cosmologia.

Armando Bernui (bernui@on.br) é formado em física pela Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), em Lima, Peru; fez doutorado em Física-Matemática na Scuola Internazionale di Studi Superiori Avanzati (SISSA) em Trieste, Itália; atualmente estuda a evolução do Universo e a sua estrutura em grande escala. Formador de AstroCientistas.

Referências

- [1] P. H. Coleman e L. Pietronero, *The fractal structure of the universe*, *Physics Reports* **213**(6), 311 (1992).
- [2] D. W. Hogg et al., *Cosmic Homogeneity Demonstrated with Luminous Red Galaxies*, *The Astrophysical Journal* **624**(1), 54 (2005). [ArXiv:astro-ph/0411197](#).
- [3] P. Laurent et al., *A $14 h^{-3} \text{Gpc}^3$ study of cosmic homogeneity using BOSS DR12 quasar sample*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2016**(11), 060 (2016). [ArXiv:1602.09010](#).
- [4] S. Nadathur, *Seeing patterns in noise: gigaparsec-scale ‘structures’ that do not violate homogeneity*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **434**(1), 398 (2013). [ArXiv:1306.1700](#).
- [5] P. Sarkar et al., *The scale of homogeneity of the galaxy distribution in SDSS DR6*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **399**(1), L128 (2009). [ArXiv:0906.3431](#).
- [6] S. Sarkar e B. Pandey, *An information theory based search for homogeneity on the largest accessible scale*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **463**(1), L12 (2016). [ArXiv:1607.06194](#).
- [7] M. I. Scrimgeour et al., *The WiggleZ Dark Energy Survey: the transition to large-scale cosmic homogeneity*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **425**(1), 116 (2012). [ArXiv:1205.6812](#).
- [8] F. Avila et al., *The angular scale of homogeneity in the local Universe with the SDSS blue galaxies*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **488**(1), 1481 (2019). [ArXiv:1906.10744](#).
- [9] B. Ryden, *Introduction to cosmology* (Cambridge University Press, New York, NY, 2003).
- [10] B. Schutz, *A First Course in General Relativity* (Cambridge University Press, New York, NY, 2009).
- [11] A. Bernui, *Anomalous CMB north-south asymmetry*, *Physical Review D* **78**(6), 063531 (2008). [ArXiv:0809.0934](#).
- [12] P. K. Aluri e P. Jain, *Parity asymmetry in the CMBR temperature power spectrum*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **419**(4), 3378 (2012). [ArXiv:1108.5894](#).
- [13] G. A. Marques et al., *Isotropy analyses of the Planck convergence map*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **473**(1), 165 (2018). [ArXiv:1708.09793](#).
- [14] M. I. Khan e R. Saha, *Isotropy statistics of CMB hot and cold spots*, *JCAP* **2022**, 006 (2022). [ArXiv:2111.05886](#).
- [15] M. Ishaque Khan e R. Saha, *Level correlations of CMB temperature angular power spectrum*, *Journal of Astrophysics and Astronomy* **43**(2), 100 (2022). [ArXiv:2101.06731](#).
- [16] C. E. Kester, A. Bernui e W. S. Hipólito-Ricaldi, *Probing the statistical isotropy of the universe with Planck data of the cosmic microwave background*, *Astronomy & Astrophysics* **683**, A176 (2024). [ArXiv:2310.02928](#).
- [17] R. B. Tully e J. R. Fisher, *Nearby galaxies Atlas* (Cambridge University Press, New York, NY, 1987).
- [18] R. B. Tully et al., *Cosmicflows-3: Cosmography of the Local Void*, *The Astrophysical Journal* **880**(1), 24 (2019). [ArXiv:1905.08329](#).

- [19] J. R. Whitbourn e T. Shanks, *The local hole revealed by galaxy counts and redshifts*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **437**(3), 2146 (2014). [ArXiv:1307.4405](#).
- [20] H. Böhringer, G. Chon e C. A. Collins, *Observational evidence for a local underdensity in the Universe and its effect on the measurement of the Hubble constant*, *Astronomy & Astrophysics* **633**, A19 (2020). [ArXiv:1907.12402](#).
- [21] M. Plionis e S. Basilakos, *The size and shape of local voids*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **330**(2), 399 (2002). [ArXiv:astro-ph/0106491](#).
- [22] R. B. Tully et al., *Our Peculiar Motion Away from the Local Void*, *The Astrophysical Journal* **676**(1), 184 (2008). [ArXiv:0705.4139](#).
- [23] R. B. Tully et al., *Cosmicflows-2: The Data*, *The Astronomical Journal* **146**(4), 86 (2013). [ArXiv:1307.7213](#).
- [24] J. R. Whitbourn e T. Shanks, *The galaxy luminosity function and the Local Hole*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **459**(1), 496 (2016). [ArXiv:1603.02322](#).
- [25] R. C. Keenan, A. J. Barger e L. L. Cowie, *Evidence for a ~ 300 Megaparsec Scale Underdensity in the Local Galaxy Distribution*, *The Astrophysical Journal* **775**(1), 62 (2013). [ArXiv:1304.2884](#).
- [26] Y. Hoffman et al., *The dipole repeller*, *Nature Astronomy* **1**, 0036 (2017). [ArXiv:1702.02483](#).
- [27] C. Franco, F. Avila e A. Bernui, *Probing cosmic isotropy in the Local Universe*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **527**(3), 7400 (2024). [ArXiv:2312.03152](#).
- [28] M. P. Haynes et al., *The Arecibo Legacy Fast ALFA Survey: The ALFALFA Extragalactic H I Source Catalog*, *The Astrophysical Journal* **861**(1), 49 (2018). [ArXiv:1805.11499](#).
- [29] E. M. Papastergis, *Statistical analysis of ALFALFA galaxies: Insights in galaxy formation & near-field cosmology*, Tese de Doutorado, Cornell University, New York (2013).
- [30] F. Avila et al., *The scale of homogeneity in the local Universe with the ALFALFA catalogue*, *JCAP* **12**(12), 041 (2018). [ArXiv:1806.04541](#).
- [31] J. G. Cresswell e W. J. Percival, *Scale-dependent galaxy bias in the Sloan Digital Sky Survey as a function of luminosity and colour*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **392**(2), 682 (2009). [ArXiv:0808.1101](#).
- [32] M. G. Jones et al., *Environmental dependence of the H I mass function in the ALFALFA 70% catalogue*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **457**(4), 4393 (2016). [ArXiv:1510.07050](#).
- [33] H. M. Courtois et al., *Cosmography of the Local Universe*, *The Astronomical Journal* **146**(3), 69 (2013). [ArXiv:1306.0091](#).
- [34] P. J. E. Peebles, *The Large-Scale Structure of the Universe* (Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1981).
- [35] N. Kaiser, *Clustering in real space and in redshift space*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **227**, 1 (1987).
- [36] K. L. Masters, *Galaxy Flows in and around the Local Supercluster*, Tese de Doutorado, Cornell University, New York (2005).
- [37] A. Bernui, T. Villela e I. Ferreira, *Analysis of the Angular Distribution of Cosmic Objects*, *International Journal of Modern Physics D* **13**(7), 1189 (2004).
- [38] E. de Carvalho et al., *Angular Baryon Acoustic Oscillation measure at $z=2.225$ from the SDSS quasar survey*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2018**(4), 064 (2018). [ArXiv:1709.00113](#).
- [39] E. de Carvalho, *Oscilações acústicas bariônicas nas distribuições de quasares e galáxias azuis*, Tese de Doutorado, Observatório Nacional, Rio de Janeiro (2019).
- [40] Y. Wang, R. J. Brunner e J. C. Dolence, *The SDSS galaxy angular two-point correlation function*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **432**(3), 1961 (2013). [ArXiv:1303.2432](#).

- [41] E. Keihänen et al., *Estimating the galaxy two-point correlation function using a split random catalog*, *Astronomy & Astrophysics* **631**, A73 (2019). [ArXiv:1905.01133](#).
- [42] A. Agrawal et al., *Generating log-normal mock catalog of galaxies in redshift space*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2017**(10), 003 (2017). [ArXiv:1706.09195](#).
- [43] Planck Collaboration et al., *Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters*, *Astronomy & Astrophysics* **641**, A6 (2020). [ArXiv:1807.06209](#).
- [44] P. Norberg et al., *Statistical analysis of galaxy surveys - I. Robust error estimation for two-point clustering statistics*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **396**(1), 19 (2009). [ArXiv:0810.1885](#).
- [45] E. de Carvalho et al., *Baryon acoustic oscillations signature in the three-point angular correlation function from the SDSS-DR12 quasar survey*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **492**(3), 4469 (2020). [ArXiv:2002.01109](#).
- [46] G. A. Marques e A. Bernui, *Tomographic analyses of the CMB lensing and galaxy clustering to probe the linear structure growth*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **05**(5), 052 (2020). [ArXiv:1908.04854](#).
- [47] F. Avila et al., *The growth rate of cosmic structures in the local Universe with the ALFALFA survey*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **505**(3), 3404 (2021). [ArXiv:2105.10583](#).
- [48] F. Avila et al., *The homogeneity scale and the growth rate of cosmic structures*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **509**(2), 2994 (2022). [ArXiv:2111.08541](#).
- [49] F. Avila et al., *Inferring $S_8(z)$ and $\gamma(z)$ with cosmic growth rate measurements using machine learning*, *European Physical Journal C* **82**(7), 594 (2022). [ArXiv:2201.07829](#).
- [50] F. Oliveira et al., *Reconstructing the growth index γ with Gaussian Processes* (2023). [ArXiv:2311.14216](#).
- [51] F. Avila et al., *Baryon acoustic scale at $z_{\text{eff}} = 0.166$ with the SDSS blue galaxies*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **529**(4), 4980 (2024). [ArXiv:2404.00747](#).
- [52] P. J. E. Peebles, *Principles of Physical Cosmology* (Princeton University Press, Princeton, N.J, 1993).
- [53] G. B. Lima Neto, *Astronomia Extragaláctica*, Notas de aula (2022). Disponível em <http://www.astro.iag.usp.br/~gastao/Extragal.html>, acesso em jul. 2024.
- [54] P. C. Hewett, *The estimation of galaxy angular correlation functions*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **201**, 867 (1982).
- [55] P. J. E. Peebles e M. G. Hauser, *Statistical Analysis of Catalogs of Extragalactic Objects. III. The Shane-Wirtanen and Zwicky Catalogs*, *Astrophysical Journal Supplement* **28**, 19 (1974).
- [56] M. Davis e P. J. E. Peebles, *A survey of galaxy redshifts. V. The two-point position and velocity correlations.*, *Astrophysical Journal* **267**, 465 (1983).
- [57] S. D. Landy e A. S. Szalay, *Bias and Variance of Angular Correlation Functions*, *apj* **412**, 64 (1993).
- [58] E. de Carvalho et al., *BAO angular scale at $z_{\text{eff}} = 0.11$ with the SDSS blue galaxies*, *Astronomy & Astrophysics* **649**, A20 (2021). [ArXiv:2103.14121](#).
- [59] A. D. Myers et al., *On statistical lensing and the anticorrelation between 2dF QSOs and foreground galaxies*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **359**(2), 741 (2005). [ArXiv:astro-ph/0502481](#).
- [60] L. Wasserman, *Random Variables*, in *All of Statistics: A Concise Course in Statistical Inference* (Springer, New York, 2004), 19–46.
- [61] C. M. Moorman et al., *The $H I$ mass function and velocity width function of void galaxies in the Arecibo Legacy Fast ALFA Survey*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **444**(4), 3559 (2014). [ArXiv:1408.3392](#).