

# Estudio de oscilaciones bariónicas acústicas mediante *wavelets*.

Pablo Villanueva Domingo

Mayo de 2016

## Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Oscilaciones Bariónicas Acústicas</b>	<b>1</b>
<b>3. Wavelets</b>	<b>2</b>
<b>4. El catálogo LOWZ</b>	<b>5</b>
<b>5. Función de correlación</b>	<b>5</b>
<b>6. Cálculo de la BAOlet</b>	<b>7</b>
<b>7. Conclusiones</b>	<b>8</b>
<b>A. Apéndice: Selección en SQL</b>	<b>9</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>9</b>

## 1. Introducción

En las últimas décadas, ha habido enormes progresos en la comprensión del universo a grandes escalas. Gracias a la observación sistemática del cielo en *surveys* como el SDSS o 2dFGRS, hemos sido capaces de alcanzar un mejor entendimiento acerca de la formación y evolución del universo. Por ello, fenómenos de la formación de estructuras como las oscilaciones bariónicas acústicas (BAOs) han sido, en gran medida, satisfactoriamente entendidos. No obstante, la necesidad de una mejor comprensión de cosmos lleva a la comunidad científica a diseñar nuevos métodos estadísticos para abordar los problemas desde otros planteamientos. Uno de estos métodos que se está aplicando progresivamente en ciencia con éxito son las *wavelets*. En este trabajo se plantea utilizar esta herramienta estadística para el análisis de las ya mencionadas BAOs, siguiendo el ejemplo de otros trabajos ya realizados anteriormente [1], pero en este caso, empleando datos actualizados del catálogo BOSS, parte del *survey* SDSS-III [2], que comprende un volumen alrededor de 6 veces mayor que el utilizado en dicho trabajo de referencia.

Esta memoria se organiza de la siguiente manera. En la sección 2 se explicará brevemente la física de las oscilaciones bariónicas acústicas, mientras que en la sección 3 se introducirá el método de las *wavelets*. En la sección 4 se comentará el catálogo de galaxias utilizado, LOWZ, calculando

y comentando su función de correlación en la sección 5. Posteriormente se muestran los resultados del cálculo de *wavelets* en la sección 6, finalizando con las conclusiones en la sección 7.

## 2. Oscilaciones Bariónicas Acústicas

Las Oscilaciones Bariónicas Acústicas (BAO por sus siglas en inglés) son un fenómeno que aparece en la estructura a gran escala del universo y puede observarse analizando catálogos de galaxias. Se debe a las ondas acústicas presentes en el plasma cósmico primordial de fotones y bariones anterior al desacoplamiento materia-radiación. En esta sección procederemos a explicar brevemente sus fundamentos, para lo que se han seguido principalmente las referencias [3] y [4].

Antes de la época de recombinación, la materia bariónica (es decir, no oscura) y los fotones estaban fuertemente acoplados mediante scattering Compton, conformando un plasma cósmico muy homogéneo e isótropo. No obstante, habían pequeñas homogeneidades que causaban sobredensidades en algunas partes del fluido. Debido a la composición del fluido, dos fenómenos actuaban opuestamente: por un lado, la fuerza gravitacional tendía a colapsar y comprimir el plasma hacia las sobredensidades, mientras que por otro lado, la presión de radiación tendía a diluir dichas inhomogeneidades. Cuando las perturbaciones comienzan a crecer (lo cual ocurre especialmente en la era de dominación de la materia), la conjunción de estas dos fuerzas propició la propagación de ondas esféricas desde el centro de las sobredensidades hacia el exterior, modificando el perfil de densidad del plasma cósmico.

Cuando se produjo el desacoplamiento materia-radiación en la época de recombinación, las perturbaciones de cada componente del plasma dejaron de evolucionar conjuntamente. La presión de radiación acabó por diluir las sobredensidades en los fotones, mientras que la propagación de los bariones, al dejar de ser afectados por la presión de radiación, se detiene, formando una “cáscara” esférica alrededor de la perturbación inicial. La aparición de estos patrones de densidades por todo el universo son las denominadas BAOs. La distancia entre esta posición final de la onda y el centro de la sobredensidad inicial es el radio característico de las BAOs, y viene dado por la velocidad del sonido. Podemos identificar la aparición de estas estructuras en el universo analizando la estadística de distribuciones de galaxias, ya que producen elementos reconocibles tanto en la función de correlación como en el espectro de potencias. En el primero, la presencia de BAOs produce la aparición de un pico a una distancia dada por el radio característico (como veremos en la sección 5), mientras que en el segundo, aparecen oscilaciones en el espectro a la escala correspondiente.

Es posible realizar una estimación del radio de las BAOs, asumiendo que viene dado por el horizonte de sonido  $r_s$  en la recombinación, es decir, la máxima distancia que la onda acústica pudo recorrer hasta el momento del desacoplamiento con la radiación,  $t_{dec}$ . Esta distancia, que depende de la velocidad del sonido  $c_s$ , se puede escribir como:

$$r_s = \int_0^{t_{dec}} c_s(t)(1+z(t))dt. \quad (1)$$

Mediante ciertas aproximaciones [5], es posible obtener un valor estimado para el horizonte de sonido de  $r_s \simeq 105.5h^{-1}$  Mpc, el cual, como veremos, está en buen acuerdo con las observaciones.

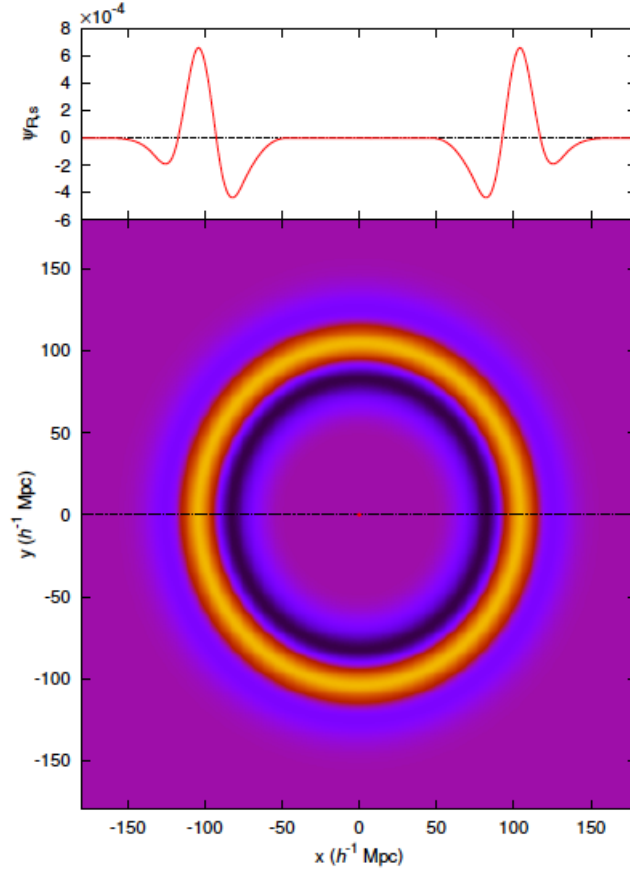


Figura 1: La función BAOlet  $\psi_{R,s}(\vec{x})$  empleada. En la imagen de abajo se muestra una visión 2D, mientras que arriba una rebanada 1D del mismo. Los parámetros usados han sido  $R = 105h^{-1}$  Mpc y  $s = 30h^{-1}$  Mpc. Figura extraída de [4].

### 3. Wavelets

Para la parte principal del trabajo, hemos utilizado un método alternativo del estudio de las BAOs, diferente de los métodos estadísticos usuales empleados en cosmología, conocido como *wavelets*. Las *wavelets* son un tipo de transformadas integrales que permiten localizar estructuras con una forma determinada. En cierto sentido, presentan una mejora respecto a las transformadas de Fourier, las cuales pierden la información espacial, mientras que estas nuevas transformadas integrales la conservan. Estas propiedades han mostrado su utilidad en las diversas áreas en las que se han aplicado, desde procesamiento de imágenes hasta diferentes disciplinas científicas. [6]

En nuestro caso, dado que lo que queremos es estudiar BAOs, necesitamos un tipo de *wavelets* que tengan una forma similar a una cáscara esférica, la estructura esperada en dicho fenómeno físico, como ya hemos comentado. Éstas *wavelets* específicas, conocidas como *BAOlets*, son funciones  $\psi_{R,s}(\vec{x})$  caracterizadas por el radio de dicha cáscara  $R$  y su grosor  $s$  [1]. Conviene definir las además con media nula, por el tipo de análisis realizado. Un ejemplo de la forma de las BAOlets se puede ver en la figura 1. Definida dicha función, la transformada integral correspondiente del campo de sobredensidades  $\delta(\vec{x})$  viene dada por:

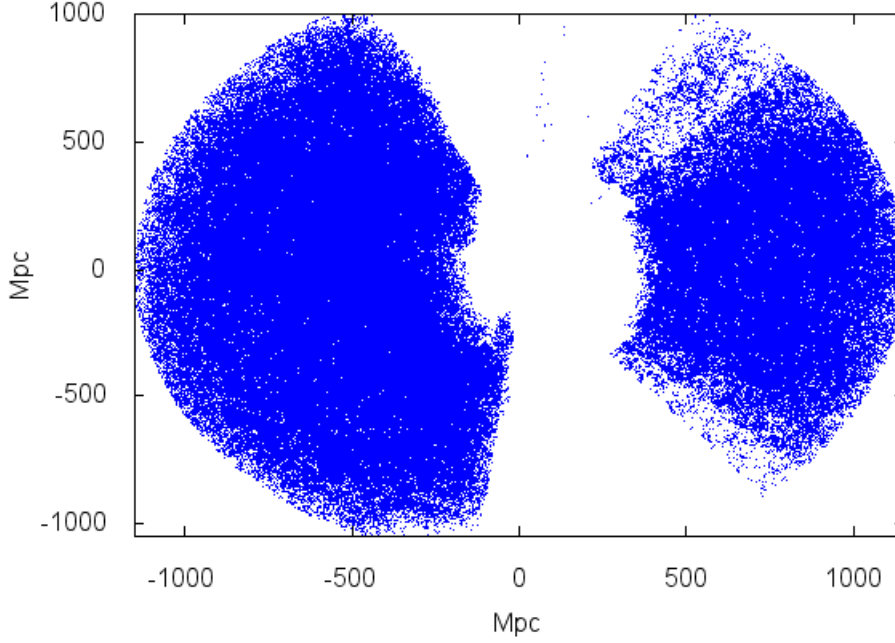


Figura 2: Porción del catálogo LOWZ empleado en el trabajo, en coordenadas cartesianas comóviles.

$$W_{R,s}(\vec{x}) = \int \psi_{R,s}(\vec{y}) \delta(\vec{y} - \vec{x}) d^3y. \quad (2)$$

El valor de  $W_{R,s}$  en un punto determinado mide como se asemeja a la forma de la BAOlet con los parámetros  $R$  y  $s$  el campo de sobredensidad alrededor de dicho punto. Esto nos permitirá identificar las estructuras propias de las oscilaciones bariónicas en un catálogo de galaxias, al transformar su densidad con la BAOlet, así como determinar su radio y grosor. Conviene citar además que una de las ventajas de este método es que permite identificar a qué centros corresponde la mayor parte de la señal de las BAOs calculando  $W_{R,s}(\vec{x})$ , lo cual podría ser útil para estudios posteriores [1], aunque no se haya explorado este camino en el presente trabajo.

Por último, conviene definir el estadístico  $B(R, s)$  como el promedio de los coeficientes  $W_{R,s}(\vec{x})$  evaluados en cada uno de los  $i$  centros  $\vec{x}_c^{(i)}$  de  $N$  halos masivos:

$$B(R, s) = \left\langle W_{R,s}(\vec{x}_c^{(i)}) \right\rangle_N. \quad (3)$$

Definido de esta forma,  $B(R, s)$  tendrá valores positivos si tenemos estructuras en forma de cáscara esférica centradas en los puntos  $\vec{x}_c^{(i)}$ . Por otra parte, el valor máximo de este estadístico nos dará los valores característicos de  $R$  y  $s$ .

## 4. El catálogo LOWZ

Para nuestro análisis se han utilizado datos del catálogo de galaxias *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS-III) [2], uno de los mayores catálogos existentes en la actualidad. En concreto, hemos empleado observaciones de la parte del proyecto que se centra en el estudio de las BAOs, el BOSS (Barion Oscillation Spectroscopic Survey) [7]. Los datos se han dividido en dos subcatálogos. Por un lado, el catálogo principal de galaxias (*Main*), que usamos como trazador del campo de densidad global. Por otra parte, el del LRGs (*Large Red Galaxies*) como indicador de los centros de las grandes sobredensidades, alrededor de los cuales se forman las BAOs. La razón de la elección de estas galaxias para tal fin es que se ha observado que tienden a encontrarse cerca de los halos más masivos [8].

En lo referente al catálogo principal, dentro del catálogo BOSS, hemos restringido nuestra muestra para facilitar la identificación de BAOs, empleando los filtros en color que figuran en [7]. Asimismo, hemos seleccionado sólo las galaxias bien identificadas según su observación espectroscópica y fotométrica por el SDSS. Por último, hemos empleado galaxias a bajo redshift, comprendido entre  $0.15 < z < 0.43$ . Estas especificaciones comprenden el subcatálogo del BOSS llamado LOWZ [7]. Con esta selección, la muestra principal de galaxias que obtenemos, empleando los datos más actualizados del SDSS-III, DR12 (*Data Release*, [2]) comprende 407809 galaxias. El catálogo utilizado puede verse en la figura 2. Para obtener la selección, se ha realizado un *query* (consulta, búsqueda) en el servidor de SDSS habilitado para el acceso a sus datos, *CasJobs* [9]. El dicho *query* ha sido escrito en lenguaje SQL y ha sido adjuntado en el apéndice A.

## 5. Función de correlación

Antes de pasar al análisis propiamente dicho de las BAOs mediante BAOlets, el objetivo principal del trabajo, conviene estudiar la estadística del catálogo desde un punto de vista más tradicional: la función de correlación. Podemos definir este concepto de la siguiente manera [10]. Consideremos dos volúmenes  $dV_1$  y  $dV_2$  separados por una distancia  $r$ . La probabilidad de encontrar una galaxia en  $dV_1$  y otra en  $dV_2$  viene dada por:

$$dP_{1,2} = \bar{n}^2(1 + \xi(r))dV_1dV_2, \quad (4)$$

donde  $\bar{n}$  es la densidad de galaxias y  $\xi$  es la función de correlación. Por tanto, esta función aporta una medida del número de pares de galaxias separadas por una distancia  $r$  en exceso respecto a una distribución aleatoria de Poisson. En un universo totalmente aleatorio, sin correlación alguna en la posición espacial entre sus galaxias, tendríamos  $\xi(r) = 0$ . Para zonas en las que hay *clustering*, es decir, agrupamientos de galaxias mayor que el promedio, tendremos  $\xi(r) > 0$ , mientras que la función de correlación será negativa en el caso contrario, con valores comprendidos entre  $-1$  y  $0$ . Por esta razón, la función de correlación es una de las herramientas fundamentales en el estudio de estadística de galaxias, al darnos mucha información sobre su organización espacial. En concreto, para el estudio de las BAOs, proporciona una forma de discernir si se produce o no dicho fenómeno: dado que las BAOs producen cáscaras esféricas con un radio y anchura característicos, es de esperar que hayan más galaxias separadas por una distancia dada por dicho radio, es decir, que la función de correlación presente un máximo local a esa distancia.

Hay diversos estimadores para la función de correlación. En nuestro caso hemos escogido el

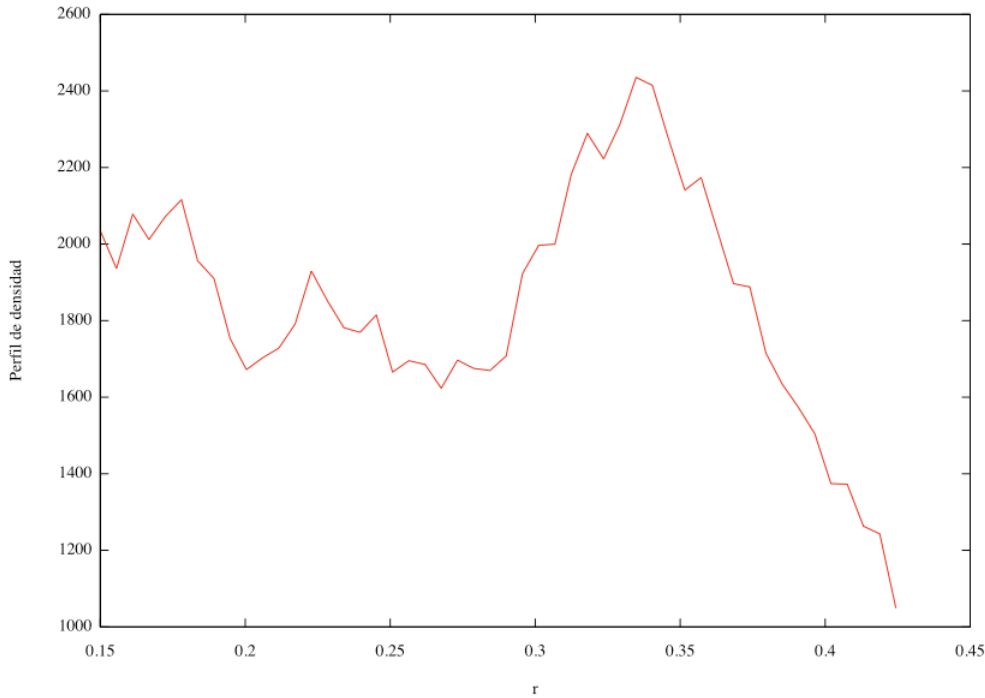


Figura 3: Perfil de densidad en función del redshift de la submuestra escogida, calculado mediante un código en Fortran.

conocido como de Landy-Szalay [11, 12]

$$\xi_{LS}(r) = \frac{DD(r)}{RR(r)} - 2\frac{DR(r)}{RR(r)} + 1, \quad (5)$$

donde  $DD(r)$ ,  $RR(r)$  y  $DR(r)$  son el número de pares de galaxias separadas por una distancia  $r$ , entre galaxias del catálogo, de un catálogo aleatorio, y entre una galaxia del catálogo y otra del aleatorio, respectivamente.

Para calcular la función de correlación, se ha empleado un software especializado en ello: CUTE [13]. Este código permite calcular diferentes funciones de correlación de un catálogo galáctico o simulación. En concreto, nos interesa el promedio angular de la función, conocido como monopolo. Para minimizar posibles efectos de contorno u otros problemas de la selección, del catálogo LOWZ comentado en la sección anterior se ha cogido una muestra menor, restringiendo la declinación y ascensión recta a un área que sabemos que está suficientemente completa, con un total de 197179 galaxias. El programa requiere además el perfil de densidad del catálogo, que se ha calculado mediante un código escrito en Fortran y se muestra en la figura 3. Conviene compara dicho perfil con el aparecido en [7] para confirmar su similitud con el análisis efectuado con los investigadores de BOSS con datos anteriores (DR11).

Con todo ello, se ha calculado la función de correlación, que se muestra en la figura 4. En dicha imagen se puede observar fácilmente un pequeño máximo a una distancia alrededor de  $100h^{-1}$  Mpc, que rompe con el comportamiento monótonamente decreciente de la función en esa zona. Esto indica que el radio medio de las cáscaras esféricas formadas por las oscilaciones bariónicas

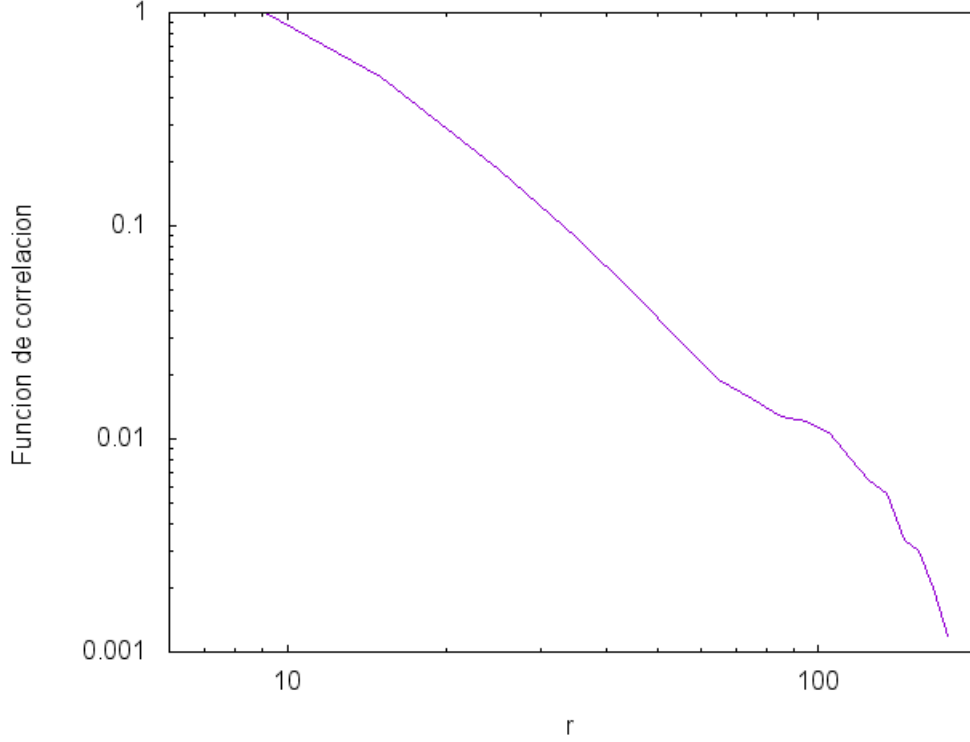


Figura 4: Función de correlación  $\xi(r)$  del catálogo LOWZ. Distancias en  $h^{-1}$  Mpc.

acústicas comprenderá unos  $100h^{-1}$  Mpc, lo que está en buen acuerdo con la estimación del horizonte de sonido realizada en la sección 2. Comparando con los análisis de BOSS realizados por los investigadores del proyecto, [2], podemos ver que también obtienen una función de correlación cualitativamente similar, con un máximo a la misma distancia. Cabe comentar que nuestro máximo es mucho más suave, lo cual puede ser causa de una distinta selección de la muestra para calcular la función de correlación. La comparación, no obstante, no hace sino reafirmar nuestras conclusiones: es evidente la presencia de un mayor clustering a dichas escalas, lo que confirma la existencia de BAOs.

## 6. Cálculo de la BAOlet

En esta sección procederemos a comentar los resultados de la práctica. Tras la adquisición del catálogo LOWZ, se ha calculado el estadístico  $B(R, s)$  para estos datos. Para ello, se ha empleado un código escrito en C<sup>1</sup>, que obtiene dicha magnitud para cada valor de  $R$  y  $s$ . El resultado en el plano  $(R, s)$  puede verse en la figura 5. La normalización es arbitraria. Cabe señalar que la imagen excluye la región en que  $R < 2s$ , dado que con esos valores la BAOlet no está compensada, es decir, no tiene media nula, condición que habíamos impuesto sobre la *wavelet* por definición. A partir de este resultado, podemos hallar los valores de  $R$  y  $s$  característicos de las BAOs, fijándonos en el máximo relativo de la función  $B(R, s)$ , con lo que obtenemos:

$$R_{max} = 108 h^{-1} \text{Mpc} \quad (6)$$

<sup>1</sup>Proporcionado por Pablo Arnalte Mur.

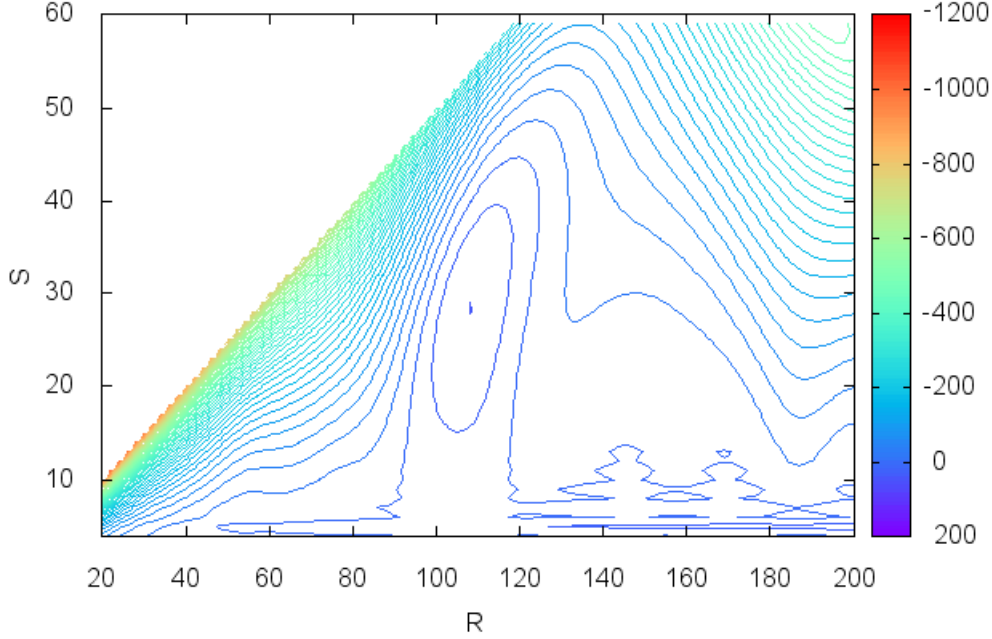


Figura 5: Estadístico  $B(R, s)$  en el plano  $(R, s)$ .

$$s_{max} = 28 h^{-1} \text{Mpc} \quad (7)$$

Podemos comprobar que tanto el estadístico  $B(R, s)$  como los valores que lo maximizan están en perfecto acuerdo con los obtenidos en el trabajo de referencia [1] ( $R_{max} = 110 h^{-1} \text{Mpc}$  y  $s_{max} = 22 h^{-1} \text{Mpc}$ ), realizado con un catálogo dado por la simulación MICE. Además, volvemos a ver un buen acuerdo con la estimación del horizonte de sonido realizada en la sección 2. Aseguramos así que las conclusiones referentes a la forma y tamaño de las BAOs se mantienen al usar un catálogo actualizado de SDSS. Observamos además que el radio  $R$  está en el rango sugerido por el cálculo de la función de correlación en el apartado anterior, por lo que ambos análisis están de acuerdo, pese a haber sido realizados con planteamientos y procedimientos totalmente diferentes.

## 7. Conclusiones

La formación de oscilaciones bariónicas acústicas es una de las predicciones más importantes en cosmología en lo referente a la estructura a gran escala del universo. El análisis de catálogos galácticos ha confirmado su presencia en los últimos años, como hemos visto en el cálculo de la función de correlación para el mayor *survey* hasta la fecha, el SDSS-III, en nuestro subcatálogo de interés LOWZ. Mediante un análisis paralelo y novedoso empleando BAOlets, hemos hallado unos resultados perfectamente compatibles, lo cual reafirma la existencia de dichas estructuras cósmicas. Además, hemos podido comprobar la utilidad y versatilidad de las *wavelets*, una herramienta que podría tener interesantes aplicaciones en otras áreas de la física y de la ciencia en general.



## A. Apéndice: Selección en SQL

Adjuntamos como apéndice el *query* realizado en la base de datos *CasJobs* del SDSS-III para obtener nuestra versión del catálogo LOWZ. Como ya se ha mencionado, se han usado las restricciones en filtros de color y redshift que aparecen en [7], sobre el conjunto de datos disponibles más actualizados del momento, DR12.

```
SELECT ra,dec,z
FROM SpecPhoto
WHERE
class='galaxy'
  AND z>0.15 and z<0.43
  AND ra<225 and ra>125
  AND dec>0 and dec<60
  AND ((cmodelmag_r < 13.5 + (0.7*(modelMag_g-modelMag_r) +
    1.2*((modelMag_r-modelMag_i)-0.18))/0.3
  AND (modelMag_r-modelMag_i -(modelMag_g-modelMag_r)/4.0 - 0.18) >
    -0.2 and (modelMag_r-modelMag_i -(modelMag_g-modelMag_r)/4.0 - 0.18) < 0.2
  AND cmodelmag_r > 16.0 and cmodelmag_r < 19.6
  AND psfmag_r-cmodelmag_r > 0.3
  AND TILE >=10324.0
  AND ZWARNING = 0)

OR

(cmodelmag_r < 13.5 + (0.7*(modelMag_g-modelMag_r) +
1.2*((modelMag_r-modelMag_i)-0.18))/0.3
  AND (modelMag_r-modelMag_i -(modelMag_g-modelMag_r)/4.0 - 0.18) >
-0.2 and (modelMag_r-modelMag_i -(modelMag_g-modelMag_r)/4.0 - 0.18) < 0.2
  AND cmodelmag_r > 16.0 and cmodelmag_r < 19.6
  AND psfmag_r-cmodelmag_r > 0.3
  AND Boss_target1=0
  AND ZWARNING = 0))
ORDER BY z ASC
```

## Bibliografía

- [1] Arnalte-Mur, P. et al. *Wavelet analysis of baryon acoustic structures in the galaxy distribution*. A&A 542, A34 (2012)
- [2] Cuesta, A. et al. *The clustering of galaxies in the SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: baryon acoustic oscillations in the correlation function of LOWZ and CMASS galaxies in Data Release 12*. MNRAS 457, 1770–1785 (2016).
- [3] Eisenstein, D.J., Seo, H., and White, M. *On the Robustness of the Acoustic Scale in the Low-Redshift Clustering of Matter*. ApJ, 664:660. (2007) [arXiv:astro-ph/0604361]

- [4] Arnalte-Mur, P. *Clustering of galaxies: evolution, segregation and baryon acoustic oscillations*. Tesis doctoral (2011).
- [5] Eisenstein, D.J. and Hu, W. *Baryonic Features in the Matter Transfer Function*. ApJ, 496:605. [arXiv:astro-ph/9709112] (1998).
- [6] Vidakovic, B., Mueller, P. *Wavelets for kids. A Tutorial Introduction*. (1991)
- [7] Anderson et al. *The clustering of galaxies in the SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: Baryon Acoustic Oscillations in the Data Release 10 and 11 Galaxy Samples*. MNRAS 441, 24 (2014).
- [8] Zheng, Z., Zehavi, I., Eisenstein, D.J., Weinberg, D.H., and Jing, Y.P. *Halo Occupation Distribution Modeling of Clustering of Luminous Red Galaxies*. ApJ, 707:554. (2009) [arXiv:0809.1868].
- [9] <http://skyserver.sdss.org/CasJobs>
- [10] Peebles, P. J. E. *Principles of physical cosmology* (Princeton Series in Physics, Princeton (1993).
- [11] M. J. Pons-Bordería et al. *Comparing Estimators of the Galaxy Correlation Function*. ApJ 523, 2. (1999).
- [12] Landy, S. D., Szalay, A. S. ApJ, 412, 64 (1993).
- [13] Alonso, D. *CUTE solutions for two-point correlation functions from large cosmological datasets* arXiv:1210.1833v2 (2013)