

# Pares de galaxias en el S-PLUS DR2

M.C. Cerdosino<sup>1</sup>, M.A. Taverna<sup>2,3</sup>, F. Rodríguez<sup>2,3</sup>, A.L. O'Mill<sup>2,3</sup> & L. Sodr e Jr<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación, UNC, Argentina

<sup>2</sup> Instituto de Astronomía Teórica y Experimental, CONICET-UNC, Argentina

<sup>3</sup> Observatorio Astronómico de Córdoba, UNC, Argentina

<sup>4</sup> Departamento de Astronomía, Instituto de Astronomía, Geofísica e Ciências Atmosféricas, USP, Brasil

Contacto / candelacerdosino@mi.unc.edu.ar

**Resumen** / En este trabajo presentamos detalles preliminares de la implementación y el testeo de la pureza y completitud de un algoritmo para la identificación de pares de galaxias aisladas en el Southern Photometric Local Universe Survey Data Release 2 (S-PLUS DR2). Para ello, utilizamos un catálogo de galaxias simulado que imita las características del S-PLUS. El objetivo final es el estudio de pares de galaxias aisladas y comprender su entorno y evolución.

**Abstract** / In this research work, we present preliminary details of the implementation and testing of the purity and completeness in the Southern Photometric Local Universe Survey Data Release 2 (S-PLUS DR2) of an isolated galaxy pairs identification algorithm. To this end, we use a simulated galaxy catalogue that imitates the characteristics of S-PLUS. The final goal is to study isolated galaxy pairs and understand their environment and evolution.

*Keywords* / galaxies: groups: general — galaxies: distances and redshifts — methods: numerical — surveys

## 1. Introducción

Como es sabido, en un escenario de formación jerárquica, el estudio de los pares de galaxias es de mucha utilidad, ya que puede proporcionar información relevante sobre las primeras etapas de la formación de los sistemas más masivos. Dadas las frecuentes interacciones que pueden ocurrir entre los miembros de los pares, provocando cambios significativos en las propiedades físicas (Toomre & Toomre 1972; Hernández-Toledo et al. 2005; Woods & Geller 2007; Ellison et al. 2010; Mesa et al. 2014; Patton et al. 2016), es muy importante y de mucho interés, el estudio de la evolución de los pares de galaxias. Otra relevancia en el estudio de estos sistemas es la estimación de masas y las relaciones masa-luminosidad de sus miembros como para comprobar la presencia de halos de materia oscura.

En la actualidad, es un desafío obtener una muestra confiable de pares de galaxias donde ambas pertenezcan al mismo halo, en especial, basándose en datos fotométricos. Por lo tanto, es importante aplicar pruebas precisas que aseguren la recuperación de los sistemas verdaderamente ligados, evitando pérdidas y contaminación.

En este trabajo desarrollamos y probamos un algoritmo para la identificación de pares de galaxias en el Southern Photometric Local Universe Survey Data Release 2 (S-PLUS DR2, Almeida-Fernandes et al. 2021). El método propuesto para la identificación es similar a los aplicados a surveys espectroscópicos, pero teniendo en cuenta las incertidumbres del redshift fotométrico. El mismo, se basa en la aplicación de un algoritmo de identificación, el cual considera la distancia proyectada entre las galaxias, la diferencia de velocidad entre ellas

y un criterio de aislamiento para restringir la muestra a sistemas aislados. Además, para corroborar el correcto funcionamiento del algoritmo, se construye un catálogo simulado donde consideramos las propiedades físicas del S-PLUS DR2 y validamos los parámetros seleccionados.

Este trabajo está organizado de la siguiente forma: En la Sección 2 presentamos el catálogo y los datos utilizados. En la Sección 3 describimos el algoritmo de identificación. En la Sección 4 mostramos la evaluación del algoritmo por medio de la construcción de un catálogo simulado. En la Sección 5 presentamos los resultados preliminares. Finalmente, en la Sección 6 presentamos nuestras conclusiones y trabajo a futuro. A lo largo de este trabajo, asumimos la cosmología estándar  $\Lambda$ CDM de Planck Collaboration et al. (2016).

## 2. Datos

El S-PLUS\* es un survey de imágenes que planea cubrir  $\sim 9300$  grados<sup>2</sup> del cielo del hemisferio sur en 12 filtros ópticos. En este trabajo usamos las observaciones de la región del STRIPE 82 (área rectangular dentro de las coordenadas  $0^\circ < RA < 60^\circ$ ,  $300^\circ < RA < 360^\circ$  y  $-1.4^\circ < DEC < +1.4^\circ$ ) realizadas con el sistema de 12 filtros ópticos del S-PLUS: 5 filtros banda ancha similares a los del Sloan Digital Sky Survey (SDSS, York et al. 2000):  $u$ ,  $g$ ,  $r$ ,  $i$ ,  $z$ , y 7 filtros de banda estrecha, que coinciden con las características del [OII], Ca H+K, H $\delta$ , G-band, triplete de Mg $b$ , H $\alpha$  y triplete de Ca. Este sistema de filtros es ideal para una mejor estimación del redshift fotométrico de galaxias en el Universo cercano (Cenarro et al., 2019). En consecuencia, su uso permite

\*<http://www.splus.iag.usp.br>

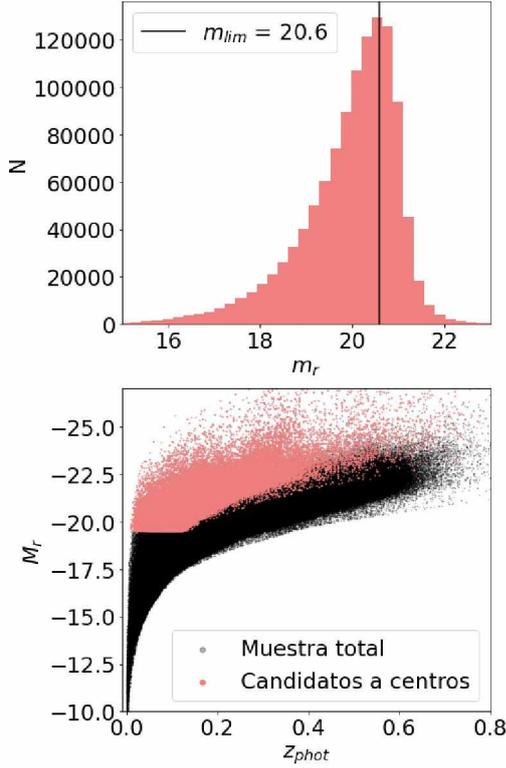


Figura 1: *Panel superior:* Distribución de magnitud aparente en la banda r para las galaxias del S-PLUS DR2. *Panel inferior:* Magnitud absoluta vs. redshift fotométrico para las galaxias del S-PLUS DR2.

desarrollar un método confiable y probado para identificar adecuadamente pares de galaxias y sus propiedades.

### 3. Algoritmo de identificación

El algoritmo con el que realizaremos la identificación de pares de galaxias, sigue un enfoque tradicional para la identificación de sistemas de galaxias utilizando una distancia proyectada máxima ( $r_p$ ) entre los miembros y una diferencia de velocidad límite ( $\Delta V$ ) calculada a partir del redshift fotométrico.

El catálogo de galaxias S-PLUS DR2, tiene una completitud en la magnitud en la banda r de  $m_{lim} \leq 20.6$ , como se puede ver en el panel superior de la Fig. 1 en línea continua.

En este trabajo, siguiendo el enfoque de Rodríguez et al. 2020, introducimos mejoras en la identificación: pedimos que el par tenga una galaxia más brillante (a la que llamamos "galaxia central") con una magnitud absoluta  $M_r < -19.5$  y una magnitud aparente menor que dos veces la magnitud límite del catálogo, es decir  $m_{gal} < m_{lim} - 2 = 18.6$  (donde  $m_{lim} = 20.6$ ). Además, establecemos una diferencia de magnitud aparente límite entre los miembros:  $\Delta m = 2$ . Esta última condición, nos asegura que estamos trabajando con pares de galaxias y no con una galaxia central y una satélite poco luminosa o enana. Finalmente, aplicamos también un criterio de aislamiento para asegurar que los pares no formen parte de un sistema más grande, pidiendo que

ninguna otra galaxia dentro de  $\Delta V$ , se ubique en el anillo entre  $r_p$  y  $3r_p$ . El valor que se asignará para  $\Delta V$  y  $r_p$  serán aquellos que impliquen una mayor pureza y completitud del algoritmo de identificación, los cuales serán analizados en la sección siguiente.

En el panel inferior de la Fig. 1, se muestra la magnitud absoluta en función de redshift fotométrico para el catálogo S-PLUS DR2, donde en color coral se pueden ver los candidatos a galaxias centrales de pares para nuestro algoritmo de identificación.

### 4. Evaluación del algoritmo

Como primer paso para corroborar el correcto funcionamiento del algoritmo y su implementación, utilizamos un catálogo simulado construido a partir de las propiedades del S-PLUS DR2, mencionadas anteriormente. Con este objetivo, utilizamos la simulación IllustrisTNG300-1 desarrollada por Nelson et al. (2019). La misma, es una simulación cosmológica magneto-hidrodinámica, caracterizada por un cubo de  $205 h^{-1}$  Mpc de lado, en el que se evolucionan  $2500^3$  partículas de materia oscura de  $4.0 \times 10^7 h^{-1} M_\odot$  y  $2500^3$  de gas de masa  $7.6 \times 10^6 h^{-1} M_\odot$ .

Para construir nuestro catálogo sintético, a partir del cubo simulado a redshift  $z = 0$ , primero colocamos al observador en una esquina del cubo, y considerando su periodicidad, el volumen del catálogo S-PLUS se consigue agregando el volumen TNG300 repetidamente. A partir de la información en el espacio 3D calculamos las coordenadas ( $\alpha, \delta$ ), el redshift espectroscópico ( $z_s$ ) y la magnitud aparente. El redshift fotométrico ( $z_{ph}$ ) de cada galaxia fue calculado como una distorsión al redshift espectroscópico:  $z_{ph} = z_s + err$ , donde  $err$  es un valor seleccionado a partir de una distribución gaussiana centrada en cero y con una varianza que se corresponde con el error esperado del S-PLUS  $\sim 0.001$ .

Luego, siguiendo el procedimiento descrito en la Sec. 3, aplicamos el identificador al catálogo simulado. Con el objetivo de seleccionar la mejor combinación de parámetros que permitan una correcta y segura identificación final de nuestra muestra de pares de galaxias en el S-PLUS, se realizaron diferentes identificaciones, variando  $r_p$  y  $\Delta V$ . Se analizaron 3 muestras con diferentes distancias proyectadas entre la galaxia central y su compañera ( $r_p = 100, 150$  y  $200$  kpc) y se varió, para cada muestra, la diferencia de velocidades entre ellas en un rango de  $\Delta V$  de  $500 \text{ km s}^{-1}$  a  $2600 \text{ km s}^{-1}$ .

### 5. Resultados preliminares

En una primera etapa, analizamos la pureza individual de cada sistema. Para ello, buscamos cuáles de nuestros pares identificados en el catálogo simulado poseen miembros que pertenecen al mismo halo. De esta manera, tenemos la certeza de que los sistemas fueron identificados correctamente. Para todos los casos se encontró una pureza individual del 90 %.

Otro factor a tener en cuenta es la completitud (C) de los sistemas, es decir, el porcentaje de pares verdaderos que fueron identificados con el algoritmo observacional. Para ello definimos la completitud de la muestra

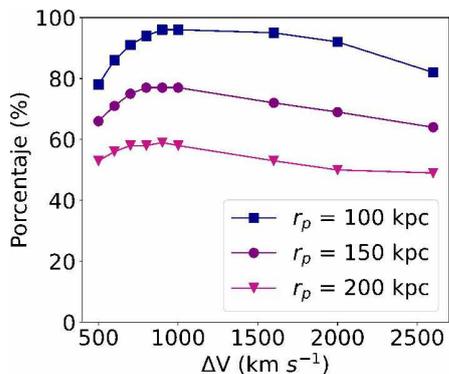


Figura 2: Completitud del algoritmo en función de las velocidades para diferentes  $r_p$  y  $\Delta V$ .

observacional de la siguiente manera:  $C = N_r/N_{true}$ , donde  $N_r$  es el número de pares identificados por el algoritmo y que también son pares verdaderos, y  $N_{true}$  es el número de pares verdaderos.

En la Fig. 2 se muestran los resultados de la completitud para las diferentes muestras obtenidas a partir de los diferentes valores de  $r_p$  y  $\Delta V$  que analizamos. Se puede ver que identificando pares con una distancia proyectada entre sus galaxias de  $r_p = 100$  kpc obtenemos los mayores valores de completitud, alcanzando el máximo de 96% para  $\Delta V = 900$  y  $1000$  km s<sup>-1</sup>. Este valor de  $r_p$  es sugerido por Lambas et al. (2003) como una distancia proyectada adecuada para la identificación de pares de galaxias en el 2dF (Colless et al., 2001).

A modo de ejemplo, corrimos el código en el S-PLUS DR2 con los parámetros seleccionados del análisis de la Fig. 2. Obtuvimos un total de 1178 pares y, utilizando las coordenadas de los mismos, buscamos las imágenes en el SDSS-DR16. En la Fig. 3, se muestra un ejemplo de un par de galaxias obtenido, donde a la izquierda se ve su imagen extraída del catálogo SDSS-DR16 y a la derecha del S-PLUS DR2. Para el SDSS-DR16 sólo la galaxia central cuenta con información de redshift espectroscópico ( $z_{spec,SDSS} = 0.214$ ) mientras que muestra un  $z_{phot,SDSS} = 0.229$ , y su compañera  $z_{phot,SDSS} = 0.1784$ . Para los datos del S-PLUS DR2, la galaxia central tiene un  $z_{phot,SPLUS} = 0.209$  y la compañera  $z_{phot,SPLUS} = 0.206$ . La imagen del S-PLUS fue obtenida de la página del S-PLUS con 12 filtros y 100 pixel/radio.

## 6. Conclusiones y trabajo a futuro

Del análisis del gráfico de la completitud en función de  $\Delta V$  y  $r_p$  notamos que para los parámetros  $r_p = 100$  kpc y  $\Delta V = 900 - 1000$  km s<sup>-1</sup> obtenemos una completitud mayor, es decir, identificando los pares observacionales con estos parámetros recuperamos la mayor cantidad de pares de galaxias verdaderos. El valor de  $r_p = 100$  kpc

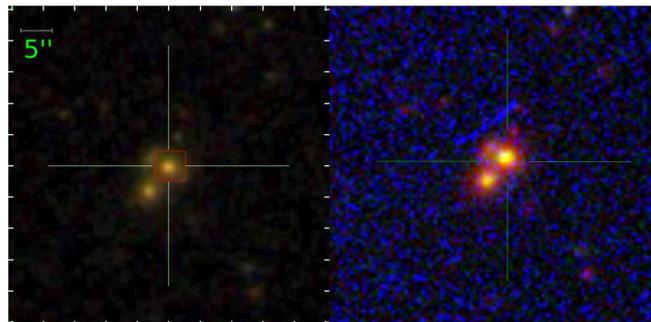


Figura 3: Ejemplo de un par de galaxias encontrado al aplicar el algoritmo con  $r_p = 100$  kpc y  $\Delta V = 1000$  km s<sup>-1</sup>. Panel izquierdo: imagen extraída del SDSS DR16 ( $z_{spec,SDSS} = 0.214$ ). Panel derecho: extraída del S-PLUS DR2 ( $z_{phot,SPLUS} = 0.209$ ).

es sugerido como un buen límite en la identificación de pares de galaxias en el trabajo de Lambas et al. (2003). Sin embargo, estos autores trabajan con pares de galaxias en el Universo local, puramente espectroscópicos y en interacción. Trabajos más recientes, en catálogos puramente fotométricos, como Rodríguez et al. 2020, sugieren distancias proyectadas y diferencias de velocidad mayores. No obstante, estos parámetros son similares a los utilizados por Díaz-Giménez et al. (2018, 2020) para grupos compactos. Si bien estos pares, no son grupos compactos, la similitud puede deberse a la selección de candidatos a galaxias centrales.

Como siguiente paso, debemos analizar la contaminación en nuestros pares y la pureza del algoritmo. Una vez finalizada esta etapa comenzaremos la identificación en el S-PLUS y SDSS.

*Agradecimientos:* El trabajo se realizó en el marco de una “Beca Estímulo a las Vocaciones Científicas” del CIN.

## Referencias

- Almeida-Fernandes F., et al., 2021, arXiv e-prints, arXiv:2104.00020
- Cenarro A.J., et al., 2019, A&A, 622, A176
- Colless M., et al., 2001, MNRAS, 328, 1039–1063
- Díaz-Giménez E., Zandivarez A., Taverna A., 2018, A&A, 618, A157
- Díaz-Giménez E., et al., 2020, MNRAS, 492, 2588
- Ellison S.L., et al., 2010, MNRAS, 407, 1514
- Hernández-Toledo H.M., et al., 2005, AJ, 129, 682
- Lambas D.G., et al., 2003, MNRAS, 346, 1189
- Mesa V., et al., 2014, MNRAS, 438, 1784
- Nelson D., et al., 2019, Comput. Astrophys. Cosmol, 6, 2
- Patton D.R., et al., 2016, MNRAS, 461, 2589
- Planck Collaboration, et al., 2016, A&A, 594, A13
- Rodríguez F., et al., 2020, A&A, 634, A123
- Toomre A., Toomre J., 1972, ApJ, 178, 623
- Woods D.F., Geller M.J., 2007, AJ, 134, 527
- York D.G., et al., 2000, AJ, 120, 1579