



# El entorno de sistemas de galaxias enanas

C.Y. Yaryura<sup>1,2</sup>, M.G. Abadi<sup>1,2</sup>, S.A. Cora<sup>3,4</sup> & A.N. Ruiz<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Astronomía Teórica y Experimental, CONICET-UNC, Argentina

<sup>2</sup> Observatorio Astronómico de Córdoba, UNC, Argentina

<sup>3</sup> Instituto de Astrofísica de La Plata, CONICET-UNLP, Argentina

<sup>4</sup> Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, Argentina

Contacto / yamila.yaryura@unc.edu.ar

**Resumen** / Estudiamos los entornos de sistemas de galaxias enanas, es decir aquellos formados exclusivamente por este tipo de galaxias. Utilizando simulaciones numéricas cosmológicas de N-cuerpos acopladas a un modelo semi-analítico identificamos estos sistemas y clasificamos su entorno como nodos, filamentos, paredes o vacíos. Encontramos que más de la mitad de las asociaciones se encuentran en filamentos ( $\sim 63\%$ ), seguidos por paredes ( $\sim 32\%$ ), nodos ( $\sim 4\%$ ) y vacíos ( $\sim 1\%$ ). Además, encontramos que la dispersión de velocidades de los sistemas de galaxias enanas disminuye sistemáticamente con la densidad del entorno desde  $\sim 120$  km/s para nodos a  $\sim 18$  km/s para vacíos.

**Abstract** / We study the environments where preferably reside galaxy systems compounded exclusively by dwarf galaxies. We identify these systems in a semi-analytical model of galaxy formation coupled to a numerical simulation. Then we divide them in four different classifications according to their environment: knots, filaments, walls and voids. We find that more than half of the associations reside in filaments environments ( $\sim 63\%$ ), followed by walls ( $\sim 32\%$ ), knots ( $\sim 4\%$ ) and voids ( $\sim 1\%$ ). Systems located in more dense environments present velocity dispersion significantly greater than systems located in less dense environments.

*Keywords* / galaxies: dwarf — galaxies: groups: general

## 1. Introducción

Resultados observacionales recientes reportan la detección de sistemas de galaxias formados exclusivamente por galaxias enanas presumiblemente ligadas gravitacionalmente entre sí (Tully (1987), Tully et al. (2006), Tully (2015), Stierwalt et al. (2017)). Desde el punto de vista teórico, estos sistemas son de una importancia fundamental porque serían la evidencia observacional que probaría la formación jerárquica de galaxias en plena acción en el universo local. Aunque hasta el momento se conocen sólo del orden de una decena de estos objetos, el estudio de los mismos es crucial en vísperas de los próximos grandes relevamientos observacionales de galaxias que darán a conocer un mapa detallado del universo cercano facilitando la identificación y el análisis de estos sistemas tan particulares.

En Yaryura et al. (2020) analizamos de modo teórico las principales propiedades dinámicas de las “asociaciones de galaxias enanas”, nombre que reciben los sistemas extendidos compuestos exclusivamente por galaxias enanas. Los resultados de dicho trabajo indican que el modelo  $\Lambda$ CDM es capaz de reproducir la existencia de dichas asociaciones, y que sus principales propiedades son comparables con las propiedades de las siete asociaciones de galaxias enanas observadas presentadas por Tully et al. (2006). Como continuación de estos resultados, el principal objetivo de este trabajo es estudiar los entornos en los que se encuentran estos sistemas utilizando un modelo semi-analítico de formación de galaxias acoplado a una simulación numérica.

## 2. Muestra

Para identificar las asociaciones de galaxias enanas, hicimos uso de la simulación numérica SMALL MULTIDARK PLANCK (SMDPL) basada en la cosmología obtenida por la colaboración Planck (Planck Collaboration, 2016). Dicha simulación consiste en un cubo de  $400\text{Mpc h}^{-1}$  de lado conteniendo un total de  $3840^3$  partículas, por lo que la resolución de masa por partícula obtenida es igual a  $9.63 \times 10^7 M_{\odot} h^{-1}$ , suficiente para permitir el análisis de galaxias enanas. Los parámetros cosmológicos utilizados en SMDPL son:  $\Omega_m = 0.307115$ ,  $\Omega_{\Lambda} = 0.692885$ ,  $h = 0.6777$ ,  $\sigma_8 = 0.8228$  y  $n_s = 0.96$ , donde  $\Omega_m$  es la densidad total de materia (masa bariónica + materia oscura),  $\Omega_{\Lambda}$  es la densidad de energía oscura,  $h$  es la constante de Hubble a redshift cero en unidades de  $100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc h}^{-1}$ ,  $\sigma_8$  es la amplitud de las fluctuaciones lineales de masa en esferas de  $8 \text{ Mpc h}^{-1}$  a  $z = 0$ , y  $n_s$  es el índice espectral del espectro de potencia primordial.

Para identificar las asociaciones de galaxias enanas y poder analizar sus principales propiedades dinámicas, combinamos dicha simulación cosmológica de materia oscura SMDPL con un modelo semianalítico de formación de galaxias SAG, cuya descripción y detalles pueden encontrarse en (Cora et al., 2018).

Siguiendo los pasos detallados en Yaryura et al. (2020), identificamos sistemas de galaxias mediante el algoritmo de percolación FOF (FRIENDS-OF-FRIENDS), con una longitud de percolación igual a  $b = 0.4 \text{ Mpc h}^{-1}$ . Para definir nuestra muestra de asociaciones de ga-

laxias enanas, nos quedamos sólo con aquellos sistemas que tengan al menos tres galaxias, donde todas las galaxias miembro tienen masa estelar menor que  $\log_{10}(M_{max}[M_{\odot} h^{-1}]) = 9.0$ . Nuestra muestra cuenta con 2256240 galaxias enanas contenidas en 606316 asociaciones. Luego, dividimos la muestra en tres submuestras de acuerdo a las siguientes condiciones: (a) sistemas con todas sus galaxias miembros pertenecientes al mismo halo de materia oscura, (b) sistemas con todas sus galaxias miembros pertenecientes a diferentes halos de materia oscura, (c) una mezcla de ambos, es decir sistemas en los cuales algunas galaxias pertenecen al mismo halo de materia oscura, pero otras pertenecen a diferentes halos. De ahora en adelante, nos referiremos a estas tres submuestras como: (a) *Same-halo*, (b) *Different-halos*, and (c) *Mixed-halos*. En resumen, analizamos una muestra de 606316 asociaciones de galaxias enanas, de las cuales 308250 pertenecen a la sub-muestra *Different-halos*, 257277 a la sub-muestra *Mixed-halos* y 40789 a la sub-muestra *Same-halo*.

Para conocer las características principales de estas muestras analizamos sus propiedades intrínsecas: el radio inercial ( $R_I$ ) como un indicador del tamaño del sistema, la dispersión de velocidades ( $\sigma$ ) y la masa virial ( $M_{vir}$ ). Definimos el radio inercial como:

$$R_I = \left( \sum_i^N r_i^2 / N \right)^{1/2}. \quad (1)$$

donde  $r_i$  es la distancia tridimensional de una galaxia al centroide del sistema, y la suma para cada sistema se realiza sobre todas sus galaxias miembros ( $N$ ). La dispersión de velocidades es:

$$\sigma = \left[ \sum_i^N v_i^2 / (N - 1) \right]^{1/2}. \quad (2)$$

donde  $v_i$  es la diferencia entre la velocidad unidimensional de una galaxia y la velocidad media del sistema. Para estimar la masa virial del sistema, usamos la expresión adoptada por Tully (2005) y Tully et al. (2006), dada por:

$$M_{vir} = 3[(N - 1)/N]\sigma^2 R_G / G. \quad (3)$$

donde el radio está dado por  $R_G = N^2 / \sum_{\text{pares}} (1/r_{ij})$ , donde  $r_{ij}$  es la distancia entre los pares de galaxias enanas. Es importante destacar que esta ecuación asume que el sistema está en equilibrio virial, la cual es una hipótesis que probablemente está lejos de ser cierta tanto para las asociaciones observacionales como para las teóricas. La Tabla 1 presenta los valores de las medianas de las principales propiedades para cada una de las muestras.

### 3. Metodología

Para clasificar el entorno en donde se encuentran nuestras asociaciones de galaxias enanas, utilizamos el método presentado por Wang et al. (2020). Utilizando la distribución de las partículas de materia oscura de la simulación SMDPL estimamos los autovalores  $\lambda_i$ ,  $i = 1, 2, 3$

Tabla 1: Valores de las medianas de las principales propiedades para cada una de las muestras: Mínimo y máximo del número de miembros (primera fila). Valor de la mediana del valor promedio de la masa estelar de las galaxias miembros (segunda fila). Valores de las medianas de  $R_I$ ,  $\sigma$  y  $M_{vir}$  (tercera, cuarta y quinta fila, respectivamente).

	Different-halos	Mixed-halos	Same-halo
$N^{\circ}$ de miembros	3 - 27	3 - 29	3 - 12
$\log(M_*) [M_{\odot}/h]$	7.8	8.04	8.15
$R_I$ [Mpc/h]	0.21	0.16	0.03
$\sigma$ [km/s]	42	47	49
$\log(M_{vir}) [M_{\odot}/h]$	11.3	10.9	10.5

obtenidos a partir del tensor tidal y/o del tensor velocidad ambos calculados utilizando 3 longitudes de suavizado diferentes: 1, 2 y 4 Mpc/h sobre una cuadrícula de  $400^3$  celdas. Luego, clasificamos el entorno de cada una de nuestras asociaciones como: nodos, filamentos, paredes o vacíos de acuerdo al valor de los autovalores  $\lambda_i$ . Adoptando un valor de corte  $\lambda_{th} = 0$  (Wang et al. (2020)) y la nomenclatura  $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3$ , para el menor autovalor, el intermedio y el mayor, respectivamente, entonces:

- **Nodo:** si  $0 < \lambda_1$
- **Filamento:** si  $\lambda_1 < 0 < \lambda_2$
- **Pared:** si  $\lambda_2 < 0 < \lambda_3$
- **Vacío:** si  $\lambda_3 < 0$

Encontramos que los resultados obtenidos son robustos frente a la elección de utilizar el campo tidal o de velocidad y al tamaño de la longitud de suavizado, por lo que en este trabajo presentamos los resultados obtenidos para el tensor tidal y la longitud de suavizado de 1 Mpc/h.

La Tabla 2 muestra el número de asociaciones de galaxias enanas en cada una de las 4 categorías de entorno en que se ubican. Encontramos que la mayoría de los sistemas se encuentran preferentemente en filamentos y paredes ( $\sim 63\%$  y  $\sim 32\%$ , respectivamente), tan sólo algunos en nodos ( $\sim 4\%$ ) y en ningún caso encontramos un número significativo de sistemas ubicados en vacíos (menos del 1%).

### 4. Efectos del entorno

Para analizar los efectos del entorno sobre nuestros sistemas, estudiamos cómo varían sus propiedades de acuerdo al entorno en el que residen. La Fig. 1 muestra las relaciones de escala entre las principales propiedades dinámicas de nuestros sistemas. Cada punto en la Fig. 1 muestra el valor de la mediana para cada una de las muestras descritas en las leyendas. Para cada una de dichas muestras, calculamos las barras de error usando la técnica de re-muestreo *bootstrap*, las cuales son lo suficientemente pequeñas como para estar contenidas dentro de cada círculo lleno.

A partir de esta figura es evidente que la dispersión de velocidades depende fuertemente del entorno en donde reside la asociación. Esta dependencia es significativamente mayor en las asociaciones que pertenecen a la muestra *Different-halos*, siguiendo con la muestra

Tabla 2: Número de sistemas en cada muestra, considerando los autovalores del tensor tidal y longitud de suavizado igual a 1 Mpc/h para la clasificación de su entorno.

	Different-halos	Mixed-halos	Same-halo
Nodos	17671	11500	1394
Filamentos	206839	163607	23210
Paredes	81407	80109	15762
Vacíos	2333	2061	423

*Mixed-halos* y una dependencia casi nula para la muestra *Same-halo*. Teniendo en cuenta la muestra *Different-halos*, las asociaciones tienen dispersiones de velocidades muy bajas ( $\sigma \sim 18$  km/s) si se encuentran en vacíos, mientras que aumenta hasta  $\sigma \sim 120$  km/s cuando se encuentran en nodos, mostrando valores intermedios si se encuentran en paredes y filamentos. Es decir que la dispersión de velocidades aumenta a medida que aumenta la densidad del entorno que los rodea. Tal como indica la Ec. 3, utilizamos la dispersión de velocidades ( $\sigma$ ) en la estima de la masa virial  $M_{\text{vir}}$ . Debido a esto, la variación de la  $M_{\text{vir}}$  con respecto al entorno en donde reside la asociación, presenta una tendencia muy similar a la que presenta  $\sigma$ . En cuanto al tamaño, no existen grandes efectos sistemáticos en el tamaño entre asociaciones que pertenecen a diferentes entornos como, vacíos, paredes, filamentos o nodos.

Comparando nuestros resultados con las siete asociaciones de galaxias enanas identificadas por Tully et al. (2006) (cruces negras en la Fig. 1) observamos que las propiedades de estas últimas son comparables con las de la muestra *Different-halos*. Teniendo en cuenta el entorno en donde habitan, las siete asociaciones observadas tienen preferentemente propiedades comparables con las de asociaciones que se encuentran en entornos de filamentos o paredes (6 de 7), mientras que tan sólo una presenta propiedades comparables con las asociaciones que se encuentran en entornos de voids.

## 5. Conclusiones

En este trabajo analizamos el entorno en donde habitan las asociaciones de galaxias enanas y el efecto de dicho entorno en sus principales propiedades dinámicas. Para caracterizar el entorno dividimos nuestra muestra en 4 clasificaciones: nodos, filamentos, paredes y vacíos. Más de la mitad de las asociaciones se encuentran en entornos de filamentos ( $\sim 63\%$ ), seguidos por entornos de paredes ( $\sim 32\%$ ), mientras que una fracción minoritaria está en nodos ( $\sim 4\%$ ) y vacíos ( $\sim 1\%$ ). En cuanto a las propiedades dinámicas, sistemas ubicados en entornos más densos presentan dispersión de velocidades significativamente mayores que los sistemas situados en entornos menos densos. Considerando los sistemas en donde todas las galaxias miembros pertenecen al mismo halo de materia oscura, es evidente que sus propiedades dinámicas no varían de manera significativa con el entorno en donde evolucionan. Es decir que el entorno

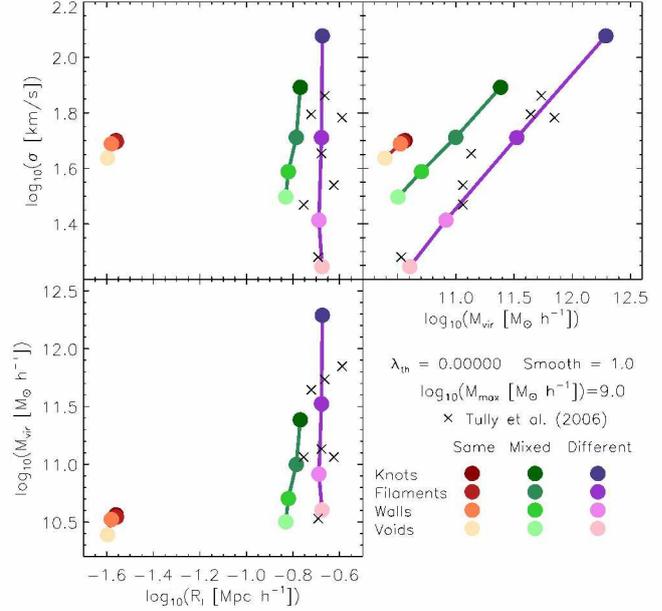


Figura 1: Relaciones de escala entre el tamaño, la velocidad y la masa para asociaciones compuestas sólo por galaxias enanas cuya masa estelar cumple  $M_{\text{stellar}} < 10^{9.0} M_{\odot}/h$ . Cada punto muestra el valor de la mediana para cada una de las muestras descriptas en las leyendas. Las barras de error fueron calculadas usando la técnica de re-muestreo *bootstrap* pero son lo suficientemente pequeñas como para estar contenidas dentro de cada círculo lleno. Las cruces negras corresponden a las siete asociaciones observadas de galaxias enanas presentadas por Tully et al. (2006).

no cumple un rol fundamental en su evolución dinámica. Esto podría indicarnos que estos sistemas poseen mayor probabilidad de ser sistemas físicos, gravitacionalmente ligados y probablemente ya virializados, que aquellos sistemas donde sus galaxias miembros pertenecen a halos de materia oscura diferentes.

*Agradecimientos:* Este trabajo fue financiado por el Consejo de Investigaciones Científicas y Técnicas de la República Argentina (CONICET), la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional de Córdoba (SeCyT), Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica, y Universidad Nacional de La Plata, Argentina.

## Referencias

- Cora S.A., et al., 2018, MNRAS, 479, 2  
Planck Collaboration, 2016, A&A, 594, A13  
Stierwalt S., et al., 2017, Nat. Astron., 1, 0025  
Tully R.B., 1987, ApJ, 321, 280  
Tully R.B., 2005, ApJ, 618, 214  
Tully R.B., 2015, AJ, 149, 54  
Tully R.B., et al., 2006, AJ, 132, 729  
Wang P., et al., 2020, NewA, 80, 101405  
Yaryura C.Y., et al., 2020, MNRAS, 499, 5932