

Estudio de galaxias enanas de marea II- Formación y masa estelar en enanas de marea y su morfología

I. Vega-Acevedo¹, A.M. Hidalgo-Gómez¹

¹Departamento de Física, ESFM-IPN, México D.F., México

Teléfono (55) 5729-6000 Ext. 55017 Fax (55) 5729-55015 E-mail: ivegaa@ipn.mx, amhidalgo@ipn.mx

Resumen — Se determinó la masa estelar M_* , y la tasa de formación estelar, SFR , de una muestra de galaxias enanas de marea (o TDG, por sus siglas en inglés) empleando imágenes en el óptico y ultravioleta, respectivamente. Se encuentra que no hay una correlación lineal entre la SFR y la A , y la M_* y la C , respectivamente, como sí ocurre para el resto de las galaxias. Lo más interesante es que sí parece existir una relación lineal entre la M_* y la SFR similar a la que siguen las galaxias con muy alto corrimiento al rojo. Esto parece sugerir que el entorno y la turbulencia son parámetros cruciales para comprender la formación de galaxias.

Palabras Clave – Galaxias enanas, formación estelar, masa estelar y morfología de galaxias

Abstract — The stellar mass, M_* , and the star formation rate, SFR , of a sample of Tidal Dwarf Galaxies, TDG, were determined using optical and ultraviolet images, respectively. The most interesting conclusion are that there is no correlation between A and SFR and C and M_* , as observed for the rest of the galaxies. The most interesting result is the linear correlation between the M_* and the SFR for the TDG of our sample. Such correlation is followed by high redshift galaxies. This might indicate that environment and turbulence are crucial parameters for understanding galaxy formation.

Keywords — Dwarf galaxies, star formation, stellar mass and galaxy morphology

I. INTRODUCCIÓN

Como es bien sabido, las galaxias enanas de marea (o TDG por sus siglas en inglés), se podrían estar formando a partir de los escombros de la interacción entre galaxias [15], por lo cual las condiciones en las que se encuentra el medio interestelar (ó ISM por sus siglas en inglés) son probablemente muy turbulentas, similares a las condiciones en las cuales se encontraba el gas y la materia cuando se formaron las primeras estrellas y galaxias. Esto resulta interesante ya que, de ser cierto, nos permitiría estudiar en estos objetos del vecindario local la formación estelar de regiones similares a las del universo primitivo [19].

Las TDG suelen tener un radio promedio de 6 kpc, una SFR promedio de $8 \times 10^{-2} M_{\odot} yr^{-1}$, y una metalicidad de 8.5 dex [7]. Algunos autores incluso mencionan que los TDG tienen un índice de color promedio (B-V) de 0.3 [7]. Sin

embargo, este resultado es algo difícil de establecer ya que en otros trabajos se encuentran valores muy dispersos para el índice de color (g-r), así como para el índice (FUV-g), teniendo este último una dispersión muy grande de valores para todos los TDG [16].

Algunos autores, [4] y [5] entre otros, estudiaron galaxias de diferentes tipos morfológicos y encontraron que en general para la mayoría de las galaxias el parámetro de asimetría está relacionado con la formación estelar y que la concentración sigue una relación con la masa estelar. Sin embargo, otros estudios muestran que no necesariamente las galaxias enanas siguen dichas correlaciones ([17], [18], [19]). Esto podría indicar un origen y evolución diferente para estas últimas. Como en el caso de las TDG, su origen es bien conocido, puede ser muy interesante estudiar como son estas relaciones en ellas, y ver si se parecen a las del resto de galaxias enanas.

Por otro lado, se ha observado que para los objetos a alto z se presenta una correlación entre la SFR y la M_* [14]. Se piensa que las propiedades del IGM de donde se forman estas galaxias tan tempranas son muy turbulentas. Estas características puede que sean muy similares a las del medio en donde se forman las TDG, y por tanto una relación similar puede ser esperable en estas últimas.

Este trabajo está estructurado de la siguiente manera; La Sección 2 es una descripción de la metodología con la que se determinó la masa estelar y la formación estelar de la muestra. La Sección 3 presenta los resultados obtenidos, mientras que en la Sección 4 se realiza una discusión de los resultados, y finalmente, las conclusiones se dan en la Sección 5.

II. METODOLOGÍA

Como se ha dicho, el objetivo de esta investigación es ver si las galaxias TDG siguen algunas correlaciones entre parámetros, tal y como lo hacen otras galaxias de mayor tamaño. Lo primero que se debe hacer es obtener una muestra de galaxias libre de sesgos, tal y como se hizo en [19]. Es esta misma muestra la que vamos a usar en este trabajo, y que presentamos en la primera parte: Estudio de galaxias enanas de marea I. Análisis morfológico empleando el plano C-A. Para dicha muestra se van a determinar los valores de la SFR y de la M_* .

El estudio de la SFR en galaxias enanas de marea tiene la dificultad añadida de que al ser estas de pequeño tamaño y

estar muy cerca de galaxias grandes y muy luminosas, la adquisición de imágenes en H α suele ser complicada. En realidad, no existen imágenes en esta banda para las TDG en las bases de datos disponibles (p.e. NED-NASA). Debido a esto es que se usan las imágenes en el UV para determinar la SFR. Se sabe que existen diferencias entre los valores de la formación estelar obtenidos con el continuo en UV y con la luminosidad en H α (ver [10]). En el caso de la emisión en UV, esta proviene de estrellas formadas en los últimos 100 Myr, mientras que son solo las que se formaron en los últimos 20 Myr de años las estrellas que contribuyen a la luminosidad en H α . Por tanto, suele ser menor este último valor que el obtenido con el UV, aunque son comparables dentro de las incertidumbres. Las imágenes utilizadas en este trabajo para determinar la formación estelar en el ultravioleta se han obtenido de la base de datos del Observatorio Espacial Galex [2].

A pesar de lo complicado que es determinar la masa estelar, esta se obtuvo empleando imágenes en el óptico de las bandas g y r del catastro de SDSS ([3], [6]). Estas mismas imágenes fueron empleadas por [19] para determinar los valores de la asimetría, A, y la concentración, C. En el siguiente apartado se explica cómo se determina en este trabajo la tasa de formación estelar y la masa estelar.

II. A Determinación de la tasa de formación y de la masa estelar.

La tasa de formación estelar de las galaxias de nuestra muestra se determinó a partir del flujo en el ultravioleta cercano (NUV, por sus siglas en inglés) con la calibración propuesta por [8]:

$$SFR[M_{\odot}yr^{-1}] = 1.27 \times 10^{-28} L[ergs^{-1}Hz^{-1}] \quad (1)$$

donde $L[ergs^{-1}Hz^{-1}]$ es la luminosidad del objeto en el NUV y la constante se obtiene considerando una IMF de Salpeter y modelos de síntesis de población de [8]. Esta calibración está optimizada para galaxias de baja metalicidad, como es el caso de las galaxias TDG [7]. El principal problema es la falta de corrección de extinción, que podría sobreestimar sistemáticamente la SFR. Aunque es posible utilizar el flujo IR para corregir el flujo UV de extinción [13], sin embargo, esto no es posible hacerlo en este caso debido a la falta de resolución de las imágenes, que impide separar la contribución de la TDG de la de la galaxia madre.

Por otra parte, la masa estelar se determinó con la calibración de [1], dada por:

$$\log \left[\frac{M_*}{L_g} \right] = a_g + b_g(g - r), \quad (2)$$

donde M_* es la masa estelar en M_{\odot} , L_g es la luminosidad en el filtro g dada en L_{\odot} , (g-r) es el índice de color en esas

bandas y los coeficientes $a_g = -0.499$ y $b_g = 1.519$ se tomaron del trabajo de [1].

III. RESULTADOS

En la Tabla I se presentan los valores de la asimetría, A, y la concentración, C, en las columnas 2 y 3, respectivamente. Los valores de A y C fueron obtenidos de [19]. Los valores de la masa estelar, M_* , están en la columna (4) y se presentan en masas solares, M_{\odot} , y en la columna (5) está el valor de la tasa de formación estelar, SFR, en $M_{\odot}yr^{-1}$. El promedio de cada parámetro está puesto en la última fila, siendo el error correspondiente a la dispersión de los datos a 1σ .

TABLA I
VALORES DE LA MUESTRA

ID (1)	A (2)	C (3)	M_* [M_{\odot}] 10^8 (4)	$SFR[M_{\odot}yr^{-1}]10^{-2}$ (5)
1	0.5 \pm 0.1	1.7 \pm 0.3	3.3 \pm 0.5	61.9 \pm 0.5
2	0.4 \pm 0.1	1.7 \pm 0.3	6.1 \pm 0.5	38.5 \pm 0.5
3	0.6 \pm 0.1	2.1 \pm 0.3	1.6 \pm 0.5	28.8 \pm 0.5
4	0.8 \pm 0.1	1.7 \pm 0.3	0.4 \pm 0.5	8.0 \pm 0.5
5	0.7 \pm 0.1	1.6 \pm 0.2	1.0 \pm 0.5	7.9 \pm 0.5
6	0.6 \pm 0.1	2.1 \pm 0.3	0.2 \pm 0.5	3.9 \pm 0.5
7	0.2 \pm 0.1	1.5 \pm 0.2	3.5 \pm 0.5	17.9 \pm 0.5
8	0.7 \pm 0.1	1.6 \pm 0.2	8.3 \pm 0.5	10.8 \pm 0.5
9	0.3 \pm 0.1	1.7 \pm 0.3	1.7 \pm 0.5	39.2 \pm 0.5
10	0.6 \pm 0.1	1.8 \pm 0.3	0.8 \pm 0.5	20.2 \pm 0.5
11	0.1 \pm 0.1	1.5 \pm 0.2	1.2 \pm 0.5	29.9 \pm 0.5
12	0.1 \pm 0.1	1.6 \pm 0.2	1.2 \pm 0.5	11.1 \pm 0.5
^a 13	0.5 \pm 0.1	2.4 \pm 0.4	–	2.5 \pm 0.5
14	0.5 \pm 0.1	2.0 \pm 0.3	0.40 \pm 0.5	2.7 \pm 0.5
^a 15	0.5 \pm 0.1	1.5 \pm 0.2	–	0.7 \pm 0.5
16	0.6 \pm 0.1	1.9 \pm 0.3	1.4 \pm 0.5	5.0 \pm 0.5
^a 17	0.4 \pm 0.1	2.0 \pm 0.3	–	0.8 \pm 0.5
^b Promedio	0.5 \pm 0.2	1.8 \pm 0.3	1.8 \pm 2.3	17.0 \pm 17.3

^aLa masa estelar obtenida para estos objetos es menor que $0.1 \times 10^8 M_{\odot}$

^bEl error corresponder a la dispersión de los datos, σ .

De los valores en la Tabla I está claro que la mayoría de las TDG de nuestra muestra tienen masas estelares inferiores a $2 \times 10^8 M_{\odot}$, con un valor medio de $2.4 \times 10^8 M_{\odot}$, que es muy similar al determinado en para una muestra de 407 TDGc, de $1.9 \times 10^8 M_{\odot}$ [9]. En la muestra se tienen 3 objetos con masas menores o iguales a $0.1 \times 10^8 M_{\odot}$, lo cual está en el límite de detección, por lo que no los consideramos en este trabajo. Así mismo, se observaron 4 objetos cuyas masas estelares son menores a $1 \times 10^8 M_{\odot}$, lo cual los hace los objetos menos masivos de la muestra.

La SFR es muy baja para casi todas las galaxias de la muestra, siendo menor a $20 \times 10^{-2} M_{\odot}yr^{-1}$ para la gran mayoría de las galaxias, con un valor promedio de la SFR para la muestra de $17 \times 10^{-2} M_{\odot}yr^{-1}$. Se observa que solo 6 objetos tienen una SFR superior al promedio y 10 de los objetos están por debajo del promedio. En general, estos valores son similares a los valores típicos en una muestra de galaxias de tipo tardío [10], aunque son muy pequeños en comparación con la SFR

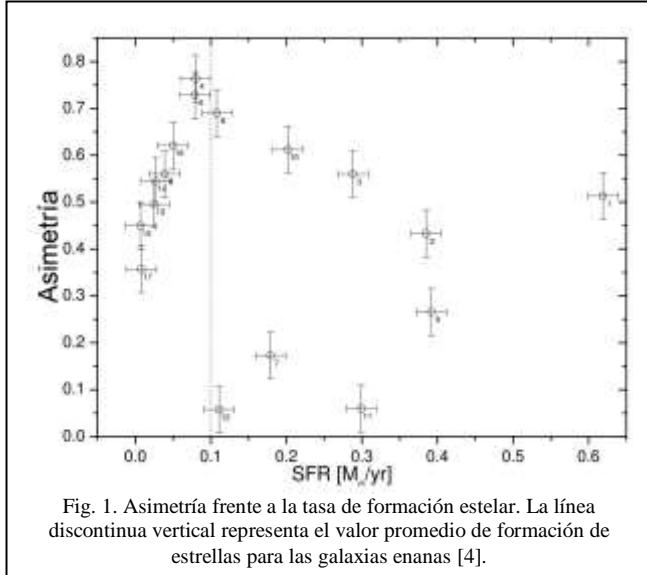
de las galaxias en interacción, que es del orden de $350 \times 10^{-2} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ [12].

IV. DISCUSIÓN

Como se ha dicho, uno de los propósitos de esta investigación es ver si hay alguna relación entre estos parámetros aquí determinados y la asimetría y la concentración, tal y como existe para otras galaxias ([17]; [18]; [5]; [11]).

En la Fig. 1 se muestra la relación $A - SFR$ para los objetos de la muestra aquí estudiada. A simple vista se ve que hay dos grupos diferentes: aquellos con un SFR inferior a $10 \times 10^{-2} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ que parecen seguir una correlación lineal con la asimetría de la galaxia. Esto nos viene a indicar que la forma de la galaxia está dominada por la formación estelar. Por otro lado, los TDG con una SFR más alta no muestran una correlación clara, solo un diagrama de dispersión, sin un valor particular de la asimetría.

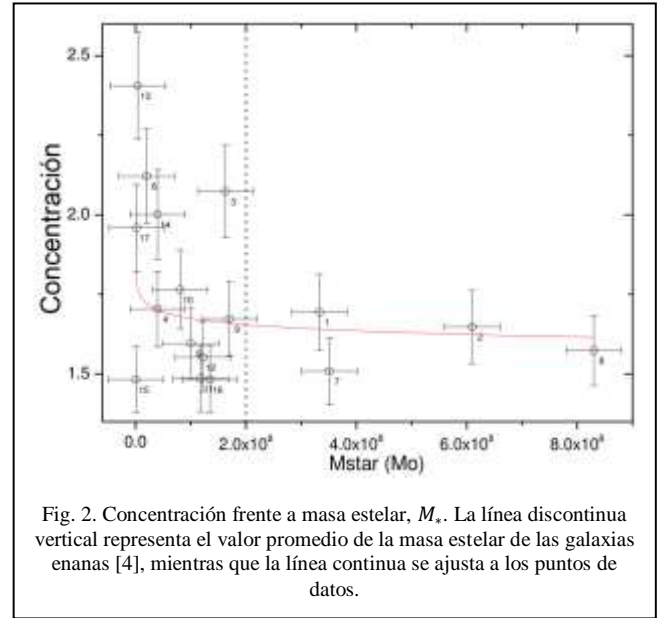
Es interesante ver que no hay diferencias reales entre los candidatos, los TDG confirmados y los nTDG en el diagrama, aunque tres de estos últimos se encuentran que tienen alta formación estelar, lo cual contradice lo esperado. Se necesitan más datos para confirmar la falta de tendencia de las galaxias con alta SFR.



También podemos comprobar si existe alguna relación entre C y la masa estelar como se propone para las galaxias normales [4]. De los datos de la Fig. 2 se puede obtener una relación logarítmica de la forma:

$$C = a(M_*)^b, \quad (3)$$

donde las constantes están dadas por: $a = 2,28 \pm 0,68$ y $b = -0,01 \pm 0,01$ a partir del ajuste de los datos (ver línea continua en la Fig. 2). También parece haber dos grupos de TDG con comportamientos diferentes. Por un lado los objetos con una masa estelar menor a $2 \times 10^8 M_{\odot}$ (aproximadamente el 76% de la muestra) no parecen seguir ninguna correlación mientras que aquellos con masas mayores (únicamente 4 objetos) que sí parecen tener una correlación clara. De nuevo, debido al bajo número de objetos en esta última zona, es necesario tener una muestra más amplia para poder obtener conclusiones más fuertes.



IV-A El Plano C-A

Podría ser interesante comprobar si los valores de la SFR y de la masa estelar implican cambios en la posición en el plano C-A. Para ello, vamos a graficar de nuevo las galaxias de la muestra en dicho plano, pero ahora indicando con color negro aquellas galaxias que presentan una SFR menor que $10 \times 10^{-2} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ (en el panel superior de la figura 3) y aquellas galaxias con masas estelares mayores a $2 \times 10^8 M_{\odot}$ (panel inferior de la figura 3).

Como se ve en dicha figura, no hay una verdadera separación, ya que no todas las galaxias con alta formación estelar tienen una gran asimetría. Es más, la mayoría de las galaxias con formación estelar menor que $10 \times 10^{-2} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ presentan los menores valores de la asimetría. Con respecto a la concentración, las diferencias son ligeramente más marcadas, donde las galaxias con alta formación estelar tienen valores más pequeños de la concentración.

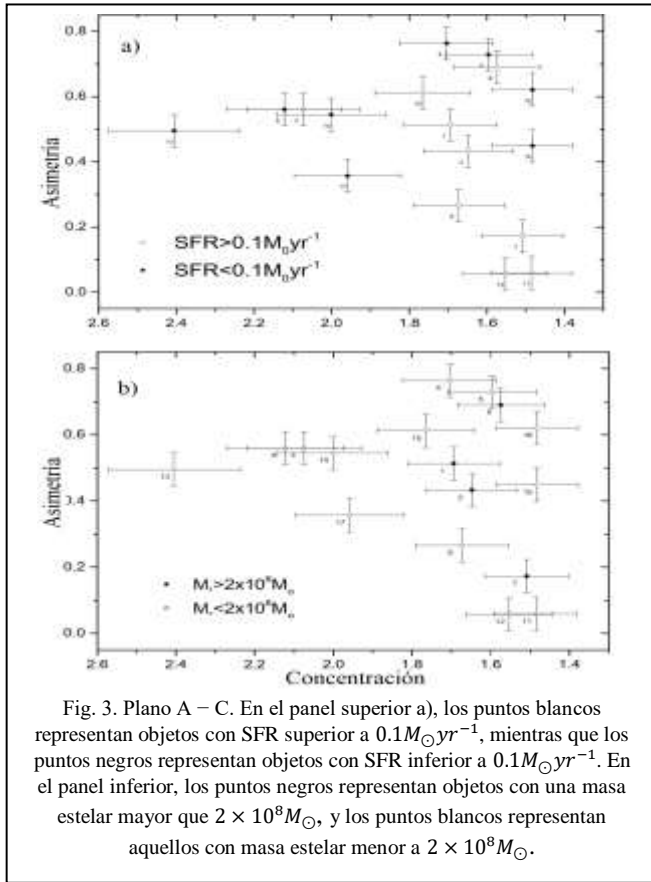


Fig. 3. Plano A – C. En el panel superior a), los puntos blancos representan objetos con SFR superior a $0.1M_{\odot}yr^{-1}$, mientras que los puntos negros representan objetos con SFR inferior a $0.1M_{\odot}yr^{-1}$. En el panel inferior, los puntos negros representan objetos con una masa estelar mayor que $2 \times 10^8M_{\odot}$, y los puntos blancos representan aquellos con masa estelar menor a $2 \times 10^8M_{\odot}$.

Y lo mismo ocurre con la masa estela, las galaxias con masas estelares mayores tienen menores concentraciones mientras aquellas con masas estelares bajas tienen una gran dispersión. Pero la asimetría no parece estar tan afectada.

IV.B. Comparación con galaxias a alto z

Como se dijo antes, en un estudio reciente de galaxias en ambientes caóticos con alto corrimiento al rojo (Cosmic Assembly Near-infrared Deep Extragalactic Legacy Survey, CANDELS) se encontró una correlación lineal entre la SFR y la masa estelar [14].

Las galaxias CANDELS tienen un alto z , entre 4 y 6, lo cual supone que el gas con el que se están formando se encuentra en un estado muy turbulento. En este sentido, se puede pensar que son muy similares a los TDG, que se forman también a partir de un entorno muy turbulento. Si esto es así, podría esperarse una correlación similar para estos últimos. Como se puede ver en la Fig. 4, dicha correlación sí parece existir en la forma:

$$SFR(M_{\odot}yr^{-1}) = \alpha M_*(M_{\odot}) + \beta, \quad (4)$$

donde $\alpha = (5 \pm 1) \times 10^{-10}yr^{-1}$ y $\beta = (2 \pm 1) \times 10^{-2}M_{\odot}yr^{-1}$ para las TDG aquí estudiadas. Estos valores son muy similares a los de las galaxias CANDELS para $z = 4$. Es muy interesante notar que aquellas galaxias con una masa estelar menor a $2 \times 10^8M_{\odot}$ y una formación estelar menor a $10 \times 10^{-2}M_{\odot}yr^{-1}$ son las que refuerzan tal relación, mientras que sólo dos galaxias fuera de esta “región” la siguen. Las galaxias con baja M_* pero alto SFR parecen seguir una correlación lineal pero con una pendiente diferente. Se necesitan más datos para comprender cuál es la razón por la que estas galaxias no siguen una única correlación entre la SFR y la masa estelar.

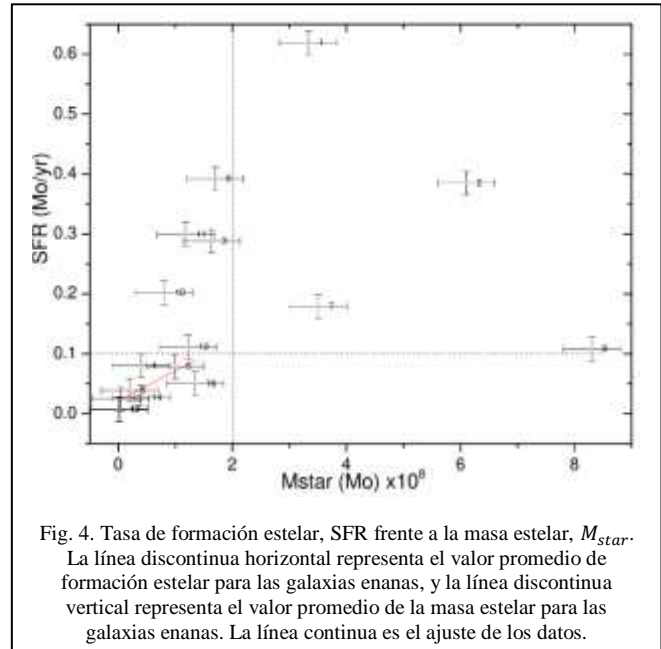


Fig. 4. Tasa de formación estelar, SFR frente a la masa estelar, M_{star} . La línea discontinua horizontal representa el valor promedio de formación estelar para las galaxias enanas, y la línea discontinua vertical representa el valor promedio de la masa estelar para las galaxias enanas. La línea continua es el ajuste de los datos.

V. CONCLUSIONES

En esta investigación determinamos que el parámetro C no depende linealmente de la masa estelar ni de la SFR, al contrario de lo que se obtuvo en galaxias grandes, mientras que solo existe una correlación lineal entre el parámetro A y SFR, para galaxias con SFR menores a $0.1M_{\odot}yr^{-1}$. La razón de este valor de corte no queda claro cuál sería.

En el plano A – C no se logra apreciar que exista alguna diferencia clara ni con la SFR ni con la masa estelar: las galaxias con masa estelar grande o pequeña parecen estar ubicadas en el mismo lugar en el plano. Por otro lado, tampoco se observa una clara tendencia de la ubicación de las galaxias en el plano A – C respecto a la SFR.

Se observó que existe una relación lineal entre la SFR y la masa estelar para los objetos de la muestra que tienen una masa estelar menor a $2 \times 10^8M_{\odot}$ y una formación estelar

menor a $10 \times 10^{-2} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$. Esta correlación es similar a la obtenida para las galaxias con $z > 4$. Sin embargo, únicamente 53% de la muestra sigue esta relación lineal, hace falta aumentar la muestra y estudiar a detalle estos objetos que no la siguen para poder concluir cual es la razón por la cual no lo hacen.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación es parte de la tesis de doctorado del M. en C. I. Vega Acevedo. Tesis, patrocinada por CONACYT. Esta investigación ha hecho uso de la base de datos extragaláctica de la NASA / IPAC (NED), que es operada por el laboratorio de propulsión a chorro, el Instituto de Tecnología de California, bajo contrato con la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA). Este trabajo se basa en parte en las observaciones realizadas con el telescopio espacial GALEX, que es operado por el laboratorio de propulsión a reacción con la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA). El sitio web SDSS-III es <http://www.sdss3.org/>. SDSS-III es administrado por el consorcio de investigación astrofísica para las instituciones participantes de la colaboración SDSS-III, incluida la Universidad de Arizona, el Grupo de Participación de Brasil, Laboratorio Nacional de Brookhaven, Universidad Carnegie Mellon, Universidad de Florida, el Grupo de Participación Francés, el Grupo de Participación Germano, Universidad de Harvard, el Instituto de Astrofísica de Canarias, la Universidad de Johns Hopkins, Laboratorio Nacional de Lawrence Berkeley, Instituto Max Planck, la Universidad Estatal de Nueva York, la Universidad Estatal de Ohio, la Universidad Estatal de Pennsylvania, la Universidad de Portsmouth, la Universidad de Princeton, el Grupo de Participación Española, Universidad de Tokio, Universidad de Utah, Universidad de Vanderbilt, Universidad de Virginia Washington y la Universidad de Yale.

REFERENCIAS

- [1] Bell E. F., McIntosh D. H., Katz N., Weinberg M. D., 2003, *ApJS*, 149, 289
- [2] Bianchi L., Shiao B., Thilker D., 2017, *ApJS*, 230, 24. doi:10.3847/1538-4365/aa7053 Blanton M. R., Bershady M. A., Abolfathi B., Albareti F. D., Allende Prieto C., Almeida A., Alonso-García J., et al., 2017, *AJ*, 154, 28. doi:10.3847/1538-3881/aa7567
- [3] Blanton M. R., Bershady M. A., Abolfathi B., Albareti F. D., Allende Prieto C., Almeida A., Alonso-García J., et al., 2017, *AJ*, 154, 28. doi:10.3847/1538-3881/aa7567
- [4] Conselice C. J., 2006, *MNRAS*, 373, 1389
- [5] Conselice C. J., Bershady M. A., Dickinson M., Papovich C., 2003, *AJ*, 126
- [6] Doi M., Tanaka M., Fukugita M., Gunn J. E., Yasuda N., Ivezić Ž., Brinkmann J., et al., 2010, *AJ*, 139, 1628. doi:10.1088/0004-6256/139/4/1628
- [7] Duc, P.-A. & Mirabel, I. F. 1999, "Tidal Dwarf Galaxies", *Proceedings of IAUSymposium Galaxy Interactions at Low and High Redshift*, No. 186, pag. 61
- [8] Hunter D. A., Elmegreen B. G., Ludka B. C., 2010, *AJ*, 139, 447
- [9] Kaviraj S., Darg D., Lintott C., Schawinski K., Silk J., 2012, *MNRAS*, 419, 70 Kennicutt R. C., 1998, *ARAA*, 36, 189
- [10] Magaña-Serrano M. A., Hidalgo-Gómez A. M., Vega-Acevedo I., Castañeda H. O., 2020, *RMxAA*, 56, 39. doi:10.22201/ia.01851101p.2020.56.01.06
- [11] Mayya Y. D., Romano R., 2001, *RMxAC*, 11, 115
- [12] Pearson W. J., Wang L., Alpaslan M., Baldry I., Bilicki M., Brown M. J. I., Grootes M. W., et al., 2019, *AA*, 631, A51
- [13] Rosa-González D., Terlevich E., Terlevich R., 2002, *MNRAS*, 332, 283
- [14] Salmon B., Papovich C., Finkelstein S. L., Tilvi V., Finlator K., Behroozi P., Dahlen T., et al., 2015, *ApJ*, 799, 183. doi:10.1088/0004-637X/799/2/183
- [15] Schweizer, F. 1978, "Galaxies with Long Tails", *Proceedings of the Symposium Structure and Properties of Nearby Galaxies*, No. 77, pag. 279
- [16] Smith B. J., Giroux M. L., Struck C., Hancock M., 2010, *AJ*, 139, 1212. doi:10.1088/0004-6256/139/3/1212
- [17] Vega-Acevedo I., 2013, Mc thesis 'Estudio del parámetro de asimetría en galaxias espirales enanas', Escuela Superior de Física y Matemáticas, Instituto Politécnico Nacional, México
- [18] Vega-Acevedo I., Hidalgo-Gómez A. M., 2014, *ASPC*, 239, ASPC.480
- [19] Vega-Acevedo I., Hidalgo-Gómez A.M., 2022, *RMxAA*, 58, 61. doi:10.22201/ia.01851101p.2022.58.01.05