

# La relación color-magnitud de galaxias de tipo temprano analizada mediante los índices de Lick

M.C. Scalia<sup>1,2</sup>, A.V. Smith Castelli<sup>1,2</sup>, F.R. Faifer<sup>1,2</sup>, J.P. Godoy<sup>1</sup> & N. Guevara<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, Argentina*

<sup>2</sup> *Instituto de Astrofísica de La Plata, CONICET-UNLP, Argentina*

*Contacto / mscalia@fcaglp.unlp.edu.ar*

**Resumen** / La comprensión de los procesos involucrados en la formación y evolución de galaxias es un tema popular en astronomía. En particular, las galaxias de tipo temprano (elípticas y lenticulares) se caracterizan por una fuerte relación fotométrica en los diagramas color-magnitud que ha sido estudiada extensivamente desde hace ya más de 60 años. Esta relación, conocida como secuencia roja o relación color-magnitud (RCM), muestra características de pendiente y dispersión independientes del entorno en el que residen, la cual se interpreta como una relación masa-metalicidad. Sin embargo, aún no está claro de qué manera las diferentes especies químicas que dominan las poblaciones estelares de este tipo de galaxias, contribuyen a establecer las características de dicha relación. Los índices de Lick/IDS permiten derivar las edades y metalicidades medias pesadas por luminosidad de las galaxias de tipo temprano a partir de espectros de baja resolución, mediante su comparación con modelos de poblaciones estelares. Además, individualmente, cada uno de estos índices traza conjuntos diferentes de especies químicas dominantes. En este trabajo presentamos resultados preliminares del análisis de la RCM definida por galaxias de tipo temprano pertenecientes al cúmulo de Virgo y a la zona del cielo conocida como Stripe-82, a través de los índices de Lick derivados de espectros del Sloan Digital Sky Survey (SDSS). Nuestro objetivo es identificar las especies químicas relevantes en el trazado de la RCM.

**Abstract** / Understanding the processes involved in the formation and evolution of galaxies is a hot topic in astronomy. In particular, early-type galaxies display an interesting property that make them good targets to try to unveil such processes: in a color-magnitude diagram, they follow a strong photometric relation that displays similar characteristics regardless the environment in which they reside. That relation is known as red sequence or color-magnitude relation (CMR) and it is interpreted as a mass-metallicity relation. However, it yet not clear how the different chemical species that dominate the stellar populations of these kind of galaxies contribute to establish its features. The Lick/IDS absorption-line indices allow to derive luminosity-weighted ages and metallicities of old stellar systems from low-resolution spectra, by comparison with stellar population models. Also, each index is dominated by specific chemical species. In this work we present preliminary results of the analysis of the CMR defined by early-type galaxies located in the Virgo cluster and the Stripe-82 region, through their Lick indices obtained from Sloan Digital Sky Survey (SDSS) spectra. Our aim is to disentangle if the CMR can be explained through the dependencies of the colors and/or luminosities on particular indices and, as a consequence, on specific chemical species.

*Keywords* / galaxies: elliptical and lenticular, cD — galaxies: dwarf — galaxies: clusters: general — galaxies: clusters: individual (Virgo) — galaxies: abundances

## 1. Introducción

Las galaxias de tipo temprano (elípticas y lenticulares) se caracterizan principalmente por su sencillez morfológica y la gran uniformidad en las relaciones de diversos observables (ver por ejemplo, Visvanathan & Sandage, 1977; Prugniel & Simien, 1997). El estudio de las mismas en todo su rango de masas y en diversos medioambientes, presenta hoy en día un gran desafío para la astronomía moderna. Es de particular interés la fuerte relación fotométrica que definen en los diagramas color-magnitud llamada “secuencia roja” o “relación color-magnitud” (RCM), en la cual galaxias más masivas presentan colores más rojos y que se ha interpretado como que dichas galaxias masivas albergan una población estelar con mayor contenido metálico (Visvanathan & Sandage, 1977; Bower et al., 1992; Smith

Castelli et al., 2013; Roediger et al., 2017).

Un camino posible para develar de qué manera se formaron y evolucionaron, es el estudio de sus poblaciones estelares y su correspondiente contenido químico. Además, la RCM muestra características similares de pendiente y dispersión independientemente del entorno en el que dichas galaxias residan (ver por ejemplo, Bower et al., 1998; Kodama et al., 1998; Wake et al., 2005; Bernardi et al., 2006), por lo que ambas herramientas en conjunto pueden contribuir a entender el origen de las galaxias de tipo temprano, brindando un mayor acercamiento a los escenarios de formación propuestos hasta la actualidad (ver por ejemplo, Toomre & Toomre, 1972; Larson, 1974; McGlynn, 1984; Arimoto & Yoshii, 1987; Cole et al., 1994; Bower et al., 1998; Chiosi & Merlin, 2015; Naab & Ostriker, 2017).

## 2. Las muestras

Para el presente estudio se utilizaron dos muestras que contienen únicamente galaxias de tipo temprano. La primera muestra está compuesta por 148 galaxias del Cúmulo de Virgo, 125 de ellas fueron extraídas del Catálogo del Cúmulo de Virgo (VCC, por sus siglas en inglés; Binggeli et al., 1985) y las restantes 23 que no estaban previamente incluidas en el VCC, se obtuvieron del Catálogo Extendido del Cúmulo de Virgo (EVCC, por sus siglas en inglés; Kim et al., 2014). La segunda muestra corresponde a 230 galaxias que se encuentran en la región de cielo llamada Stripe-82.

Ambas muestras se eligieron en un amplio rango en ascensión recta, de modo que se incluye una cantidad de galaxias que no pertenecen a cúmulos o grupos de la región y cuyo corrimiento al rojo ( $z$ ) está en el rango de  $0.026 < z < 0.4$  (solo 14 de estas galaxias tienen un  $z > 0.2$ ). La finalidad de la elección de ambas muestras, es la búsqueda de posibles dependencias con la masa y el ambiente.

Para cada una de las galaxias analizadas en el presente trabajo, se obtuvo su espectro de la base de datos del SDSS DR16 (Ahumada et al., 2020). Además de compartir entre ellas el tipo morfológico, tienen en común el hecho de que sus espectros no muestran líneas de emisión evidentes y, para obtener datos de buena calidad, solo se trabajó con aquellas que presentan una relación señal/ruido media  $\langle S/N \rangle > 10$  (por Å). El espectrógrafo del SDSS utiliza fibras ópticas con un diámetro de  $3''$ . En consecuencia, dependiendo de la distancia a la que se encuentren dichas galaxias, el tamaño fijo de la fibra óptica cubre más superficie de galaxia si ésta se encuentra más lejos. A la distancia del Cúmulo de Virgo (esto es, a una distancia media  $\langle D \rangle = 16.5$  Mpc, Mei et al., 2007), este diámetro cubre  $\approx 0.26$  kpc de la zona central de las galaxias. El módulo de distancia de las galaxias de la muestra del Stripe-82 se encuentra en el rango  $35 < (m - M) < 41$ . Por esta razón, el área cubierta por las fibras ópticas en estas galaxias es mayor que en el Cúmulo de Virgo (escalas espaciales de 1.45 a 23 kpc).

La Fig. 1 muestra el diagrama color-magnitud de ambas muestras, diferenciadas como puntos negros y verdes. En ella se puede apreciar el rango de magnitudes ( $M_g$ ) y colores ( $g - z$ ), como también la RCM en referencia a las galaxias de tipo temprano de Virgo que se detallan en los trabajos de Chen et al. (2010) y Ferrarese et al. (2012). Las magnitudes utilizadas en este trabajo están dadas por y en el sistema del relevamiento SDSS (Fukugita et al., 1996). En este trabajo se utilizaron las magnitudes totales para expresar las magnitudes absolutas y para calcular los colores las magnitudes centrales, que son aquellas que cubren proporcionalmente los  $3''$  que abarcan las fibras ópticas del espectrógrafo. Dichas magnitudes se corrigieron por extinción. También se consideró el efecto que causa en ellas el corrimiento al rojo cosmológico y, por esto último, se aplicaron las correspondientes correcciones K que proporciona el relevamiento SDSS.

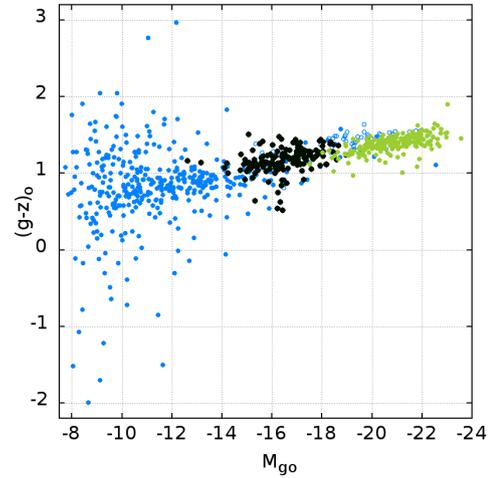


Figura 1: Diagrama  $(g - z)$  vs.  $M_g$  para las muestras de Virgo (puntos negros) y Stripe-82 (puntos verdes). Como referencia, se muestra la RCM del Cúmulo de Virgo del trabajo de Chen et al. (2010) (puntos azules vacíos) y la del *Next Generation Cluster Survey* (NGVCS, Ferrarese et al., 2012, puntos azules llenos).

## 3. Los índices de Lick

Uno de los métodos más utilizados hasta la actualidad para estudiar poblaciones estelares no resueltas, es a través de los índices de Lick obtenidos a partir de espectros integrados de las galaxias. El sistema Lick/IDS se definió con espectros tomados en el Observatorio de Lick con el instrumento *Image Dissector Scanner* (IDS) (Worthey et al., 1994; Worthey & Ottaviani, 1997). Los índices de Lick se identifican con ciertas líneas/características que se observan en los espectros de galaxias de tipo temprano. Los mismos representan una medida de la intensidad de dichas líneas en relación al continuo local (pseudocontinuo). Se definen en un cierto ancho en longitud de onda (banda) y se miden integrando la proporción del flujo de la línea/característica en relación al pseudocontinuo dentro de dicha banda.

Mediante la comparación con modelos de poblaciones estelares, los índices de Lick pueden utilizarse para derivar la edad y metalicidad de sistemas estelares a partir de espectros de baja resolución ( $\approx 9$  Å). Cada uno de estos índices traza conjuntos diferentes de especies químicas dominantes (Worthey et al., 1994; Trager et al., 1998). En el presente trabajo, los 25 índices de este sistema se calcularon utilizando el código LICK\_EW que se proporciona como parte del paquete EZ\_AGES (Graves & Schiavon, 2008). Los errores de los índices se estimaron mediante las ecuaciones dadas por Cardiel et al. (1998) y usando los espectros de error del relevamiento SDSS.

## 4. Análisis y conclusiones

La Fig. 2 muestra la RCM de las dos muestras consideradas. Algunos índices de Lick parecen definir un patrón en la RCM, con los valores más altos del índice correspondiendo a colores fotométricos más rojos. Este patrón se puede ver más claramente en la muestra de Virgo que

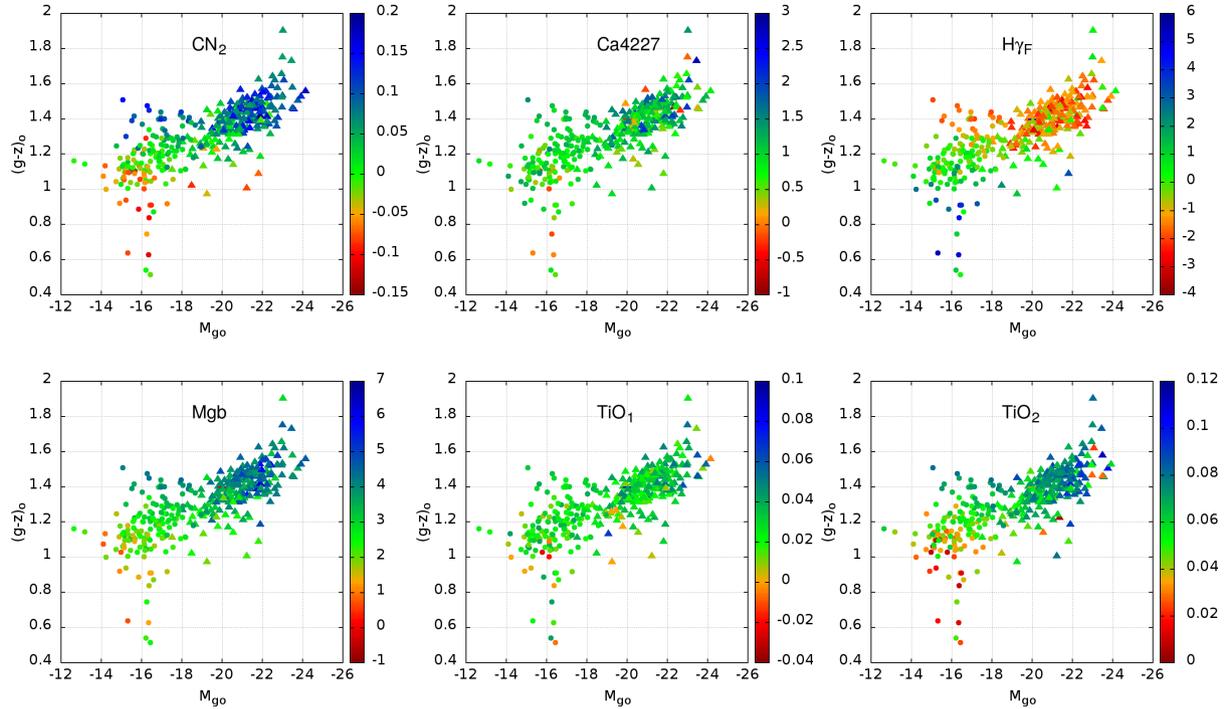


Figura 2: RCM de las dos muestras consideradas. Los círculos llenos representan los valores para la muestra de Virgo y los triángulos, los de la muestra del Stripe-82. Las distintas barras de colores muestran la variación de cada índice a lo largo de dicha relación. De izquierda a derecha, y de arriba hacia abajo, se muestran las variaciones para los índices CN<sub>2</sub>, Ca4227, H $\gamma$ , Mgb, TiO<sub>1</sub> y TiO<sub>2</sub> a lo largo de la RCM.

en la del Stripe-82. Esto podría ser el resultado de efectos de ambiente y/o de luminosidad entre ambas muestras. Sin embargo, no podemos descartar aun que los errores en la determinación de la magnitud absoluta de la muestra del Stripe-82 puedan estar difuminando las tendencias. Además, es pertinente recordar que en esa muestra, la fibra dentro de la cual se miden los índices, cubre diferentes regiones de las galaxias dependiendo de sus distancias. El grado de importancia de estos efectos será precisado en un trabajo futuro.

La Fig. 2 muestra que índices como el TiO<sub>1</sub> y el Ca4227 no exhiben patrones definidos, mientras que el TiO<sub>2</sub>, por ejemplo, sí lo hace. Teniendo en cuenta que, dentro del rango de magnitudes de estas muestras, la RCM está trazada principalmente por los cambios en la metalicidad, sería posible interpretar que las especies químicas que dominan el TiO<sub>1</sub> y el Ca4227 tienen menos influencia en la conformación de la RCM que las que dominan, por ejemplo, el TiO<sub>2</sub>, el grupo Mg, el grupo CN y H $\gamma$ . En el futuro próximo esperamos poder aclarar estos puntos, así como evaluar si estos patrones también se detectan en una RCM construida con colores de banda angosta como los proporcionados el relevamiento S-PLUS (Mendes de Oliveira et al., 2019).

*Agradecimientos:* Agradecemos los Comités Organizadores Local y Científico por hacer posible este Congreso en tan particulares condiciones. También agradecemos a las Instituciones que financian nuestro trabajo, el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas y la Universidad Nacional de La Plata (Argentina). Asimismo agradecemos el valioso trabajo del referí.

## Referencias

- Ahumada R., et al., 2020, *ApJS*, 249, 3  
Arimoto N., Yoshii Y., 1987, *A&A*, 173, 23  
Bernardi M., et al., 2006, *AJ*, 131, 1288  
Binggeli B., Sandage A., Tammann G., 1985, *AJ*, 90, 1681  
Bower R., Kodama T., Terlevich A., 1998, *MNRAS*, 299  
Bower R., Lucey J., Ellis R., 1992, *MNRAS*, 254, 601  
Cardiel N., et al., 1998, *A&AS*, 127, 597  
Chen C.W., et al., 2010, *ApJS*, 191, 1  
Chiosi C., Merlin E., 2015, *MmSAI*, 86, 162  
Cole S., et al., 1994, *MNRAS*, 271, 781  
Ferrarese L., et al., 2012, *ApJS*, 200, 4  
Fukugita M., et al., 1996, *AJ*, 111, 1748  
Graves G.J., Schiavon R.P., 2008, *ApJS*, 177, 446  
Kim S., et al., 2014, *ApJS*, 215, 22  
Kodama T., et al., 1998, *A&A*, 334, 99  
Larson R.B., 1974, *MNRAS*, 166, 585  
McGlynn T.A., 1984, *ApJ*, 281, 13  
Mei S., et al., 2007, *ApJ*, 655, 144  
Mendes de Oliveira C., et al., 2019, *MNRAS*, 489, 241  
Naab T., Ostriker J.P., 2017, *ARA&A*, 55, 59  
Prugniel P., Simien F., 1997, *A&A*, 321, 111  
Roediger J.C., et al., 2017, *ApJ*, 836, 120  
Smith Castelli A.V., et al., 2013, *ApJ*, 772, 68  
Toomre A., Toomre J., 1972, *BAAS*, vol. 4, 214  
Trager S., et al., 1998, *ApJS*, 116, 1  
Visvanathan N., Sandage A., 1977, *ApJ*, 216, 214  
Wake D.A., et al., 2005, *ApJ*, 627, 186  
Worthey G., Ottaviani D.L., 1997, *ApJS*, 111, 377  
Worthey G., et al., 1994, *ApJS*, 94, 687