

Estudio de Morfología y Color de Galaxias con SDSS

Autor: Bustillos Federico

Abstract

Se realiza un estudio fotométrico de morfología y color de una muestra completa en volumen de 13000 galaxias del relevamiento SDSS. Para el estudio se analizan las distribuciones y diagrama de Color Magnitud, índice de concentración, peso de la componente de de Vaucouleurs y correlaciones existentes entre los parametros magnitud color M_{u-r} e índice de concentración c . También se estudia el tamaño de las galaxias utilizando las magnitudes y el radio petrosino. Como resultado de este análisis se encuentra que el diagrama color magnitud segrega a las galaxias en dos poblaciones marcadas, secuencia roja y nube azul. Se puede delimitar una frontera en el espacio M_{u-r} entre ambas poblaciones en el valor aproximado de $M_{u-r} = 2.1$. El índice de concentración también permite delimitar una frontera entre los tipos de morfología Early Type y Late Type en un valor de $c = 2.5$. La combinación de estas dos fronteras permite segregar también a las galaxias según la morfología en el espacio M_{u-r} , c . Finalmente son visibles las diferencias de tamaños entre galaxias segregadas como rojas Early Type vs Azules Late Type.

1 Generalidades sobre la Morfología de Galaxias

Las galaxias se clasifican morfológicamente en cuatro tipos principales según la Secuencia de Hubble [4]: elípticas (E), lenticulares (S0), espirales (S) e irregulares (Irr). Esta clasificación no solo describe su apariencia, sino que también correlaciona con propiedades intrínsecas como color, brillo y luminosidad.

- **Galaxias Elípticas (E):** Tienen forma elipsoidal y carecen de subestructuras significativas. Están compuestas principalmente de gas caliente y muestran poca formación estelar, predominando estrellas viejas, lo que les da un color fotométrico rojo. Su brillo superficial sigue un perfil de Vaucouleurs [3].
- **Galaxias Lenticulares (S0):** Son intermedias entre elípticas y espirales. Presentan un brillo suave similar al de las elípticas, pero poseen un bulbo y un disco delgado como las espirales, aunque el bulbo es más dominante.
- **Galaxias Espirales (S):** Tienen un disco aplanado con brazos espirales y un bulbo central. Algunas tienen una estructura en barra, clasificándose como espirales normales (S) o

barreadas (SB). Son más azules que las elípticas debido a la continua formación de estrellas, predominando gas frío y denso. Su brillo superficial sigue un perfil exponencial.

- **Galaxias Irregulares (Irr):** Carecen de una estructura regular y son amorfas.

2 Sloan Digital Sky Survey

El Sloan Digital Sky Survey (SDSS) se inició en 2000 con el objetivo de realizar un censo de galaxias y cuásares a través de un ambicioso estudio de redshift. Permite obtener una amplia cantidad de información fotométrica y espectroscópica de aproximadamente un millón de galaxias y 100.000 cuásares.

El relevamiento utiliza una cámara CCD de gran formato, ubicada en Apache Point Observatory, New Mexico, para capturar imágenes en cinco bandas (u, g, r, i, z) ópticas y dos espectrógrafos digitales. Cada uno de estos filtros tiene longitudes de onda efectivas de 3550, 4770, 6230, 7620 y 9130 Angstrom. El arreglo permite la resolución de objetos con tamaño menor a $1.5''$ FWHM [8].

2.1 Magnitudes Petrosianas

Las galaxias son objetos con bordes pobremente definidos y no todas tienen el mismo perfil radial de brillos superficial lo cual provoca que medir el flujo sea más dificultoso que en el caso de las estrellas, para evitar este problema SDSS toma una definición modificada del sistema Petrosian [5], de manera que se mide los flujos provenientes de galaxias con una apertura circular cuyo radio está dado por la forma del perfil de luz de la galaxia [2]. Este radio Petrosiano se define en la banda r y no es necesariamente el más óptimo para definir el radio en otras bandas.

Este tipo de definición recupera todo el flujo del perfil de una galaxia exponencial y el 80% del flujo de una galaxia con perfil de *de Vaucouleurs* [2].

El survey de SDSS tiene un límite de magnitud Petrosiana en la banda r de 17.77 [6].

2.1.1 Índice de Concentración

Para el flujo Petrosiano es posible definir r_{50} como el radio que contiene el 50% del flujo Petrosiano. De manera analoga también se puede definir r_{90} , como el radio que contiene el 90% del flujo. A partir de los anteriores definimos el índice de concentración: $c = \frac{r_{90}}{r_{50}}$ [2].

Valores altos de c están asociados a galaxias con perfil de *de Vaucouleurs* (Early Type). Por otro lado, un nivel bajo de c está asociado a perfiles exponenciales de galaxias (Late Type).

El límite de resolución para r_{50} debido al Seeing es de $1.5''$ [2],[8] de manera que no podrán resolverse galaxias con una separación menor a este valor. Esto representa entonces un valor de corte para las muestras estudiadas en el presente trabajo.

3 Selección de Muestra

Se selecciona una muestra de 20000 Galaxias del Data Release 17 (DR17) con las siguientes car-

acterísticas:

Parametro	Unidad	Intervalo	Descripcion
ra	deg		Right ascension of fiber, $J2000$
dec	deg		Declination of fiber, $J2000$
redshift		$0.02 < z < 0.05$	Redshift
$r'_p = r_p - \text{ext}^*$	mag	$14.5 < r < 17.77$	Petrosian Mag r (corr por extincion)
r_{50}	arcsec	$r_{50} > 1.5''$	Radius containing 50% of Petrosian flux
r_{90}	arcsec		Radius containing 90% of Petrosian flux
fracDeV_ $_r$			Weight of deV component in deV + Exp model
velDisp	km/s		Velocity dispersion

Table 1. Parametros utilizados para la muestra de Galaxias.

*Calculado de forma indirecta

Adicionalmente existen cantidades calculadas de forma indirecta:

- i. $M_r = r'_p - 5 \log_{10}(d_L) - 25 - \text{AB}$: Magnitud Absoluta Petrosiana (Banda r)
 - De manera similar se calculan las magnitudes petrosianas en las otras bandas: u, g, i, z dando como resultado: M_u, M_g, M_i, M_z .
 - A partir de las anteriores se define: $M_{g-r} = M_g - M_r$ y $M_{u-r} = M_u - M_r$
- ii. $r_{50}[\text{kpc}] = \frac{\pi}{180} d_{Ar50}[\text{arcsec}]$: Radio Petrosiano , 50% , en [kpc]
- iii. $\mu = M_r - 2.5 \log_{10}(2\pi r_{50}[\text{kpc}] + \text{AB})$: Brillo Superficial

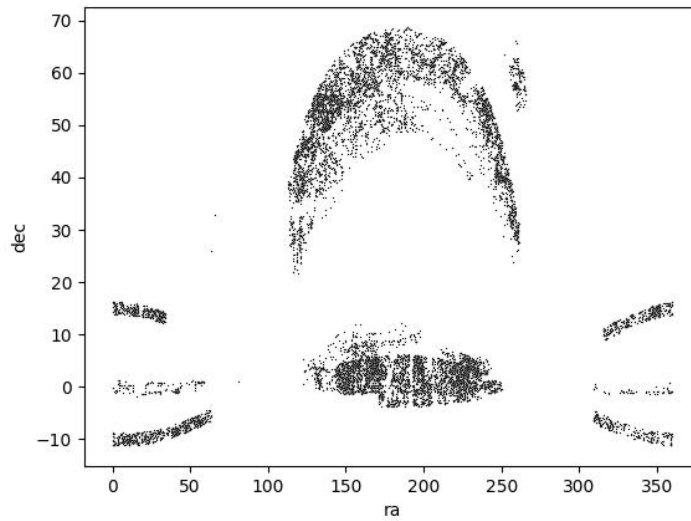


Figure 1. Proyeccion Aitoff de las coordenadas ecuatoriales del Survey SDSS

3.1 Muestra Completa en Volumen

Para poder trabajar con una muestra sin sesgos asociados a las galaxias más brillantes, se plantea trabajar con una muestra completa en volumen. Para obtenerla se considera: $M_r < -18.85$. Este valor se obtiene de considerar una submuestra tal que: $0.049 < z < 0.050$ el cual comprende 717 galaxias de las cuales el valor máximo de magnitud es -18.85 (Considerado como el mínimo valor posible de magnitud). Este recorte representa una pérdida del 44% de los objetos aproximadamente.

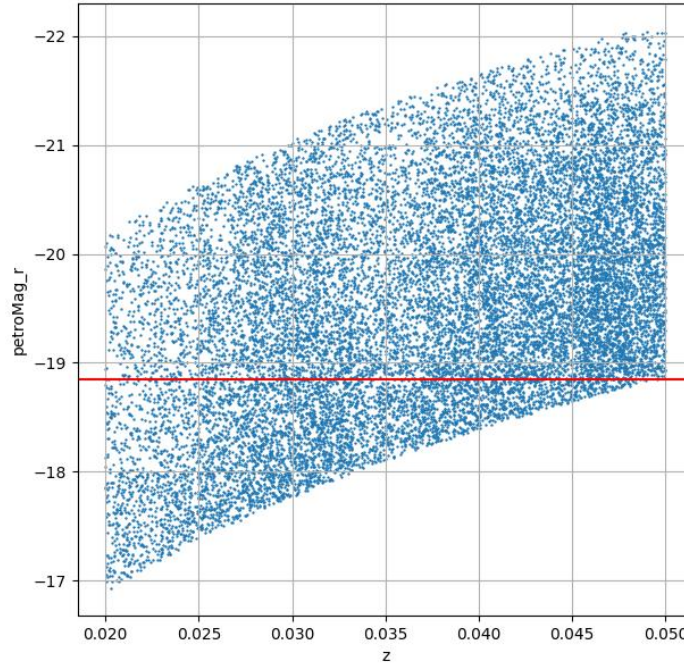


Figure 2. Grafico redshift z vs M_r . Puede observarse que a mayor redshift hay perdida de galaxias con magnitud M_r más débil por lo cual se propone recortar esta muestra para valores menores a -18.85 en magnitud y evitar sesgos en favor de los objetos mas brillantes.

4 Estudio de Color y Morfología

4.1 Bimodalidad

Las galaxias pueden ser clasificadas morfológicamente acudiendo al diagrama color magnitud[7].

Esta clasificacion morfologica divide la poblacion en dos regiones en el espacio de color magnitud $u - r$ o $g - r$, estas segregacion tiene como referencia el enrojecimiento de la galaxia, o cuanto la luz de la misma se aparta de este color, azul como caso opuesto.

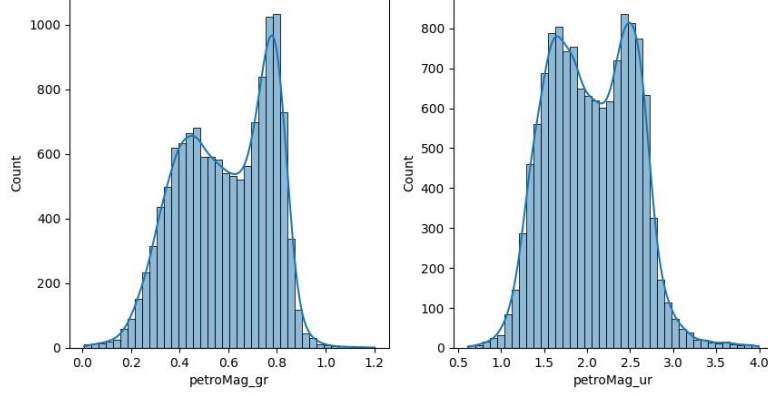


Figure 3. Distribucion Color-Magnitud de poblacion de galaxias. Izquierda, distribucion $g - r$. Derecha, distribucion $u - r$.

La Figura 2 muestra una distribucion bimodal de las galaxias segun su color. Concretamente en la distribucion $u - r$ podemos ver dos poblaciones, una de galaxias azules (Late Type) y otra con galaxias rojas (Early Type).

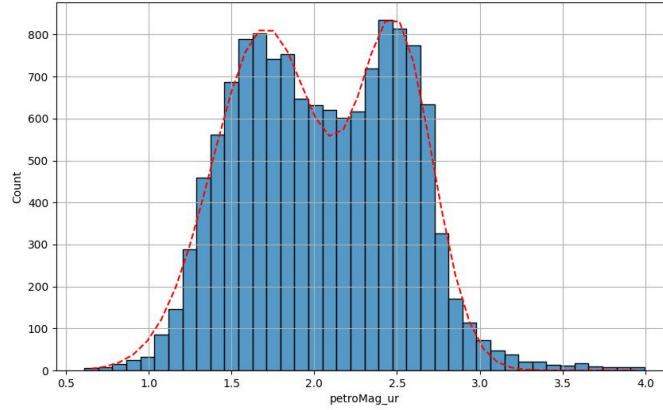


Figure 4. Estudio de la distribucion Color-Magnitud. Los centros asociados son: $\mu_{\text{early}} = 2.5, \sigma_{\text{early}} = 0.2$, mientras que $\mu_{\text{late}} = 1.7, \sigma_{\text{late}} = 0.3$

A_{blue}	μ_{blue}	σ_{blue}	A_{red}	μ_{red}	σ_{red}	$\mu_{\text{cut}} = \frac{A_{\text{blue}}\mu_{\text{blue}} + A_{\text{red}}\mu_{\text{red}}}{A_{\text{blue}} + A_{\text{red}}}$
814	1.7	0.3	799	2.5	0.2	2.1

Table 2. Resultados del ajuste bimodal Gaussiano $f(x) = A_{\text{blue}}\exp\left(\frac{(x - \mu_{\text{blue}})^2}{2\sigma_{\text{blue}}^2}\right) + A_{\text{red}}\exp\left(\frac{(x - \mu_{\text{red}})^2}{2\sigma_{\text{red}}^2}\right)$. μ_{cut} representa una magnitud de corte para diferenciar las poblaciones, calculada como la suma pesada en las cantidades maximas de cada poblacion.

4.1.1 Diagrama Color Magnitud

Teniendo en cuenta la bimodalidad que revela en el parametro M_{u-r} , se elabora un diagrama de Color - Magnitud , M_r vs M_{u-r} como en [1] para estudiar la segregacion de las galaxias segun su color. Se realiza el ajuste bimodal de la seccion anterior, sobre los quintiles ubicados en: $M_r = [-20.7, -20.1, -19.7, -19.2]$. Cada maximo señala un maximo de poblacion de cada tipo, caracterizando la nube azul, galaxias en general ubicadas a $M_{u-r} < 2.1$ y la secuencia roja.

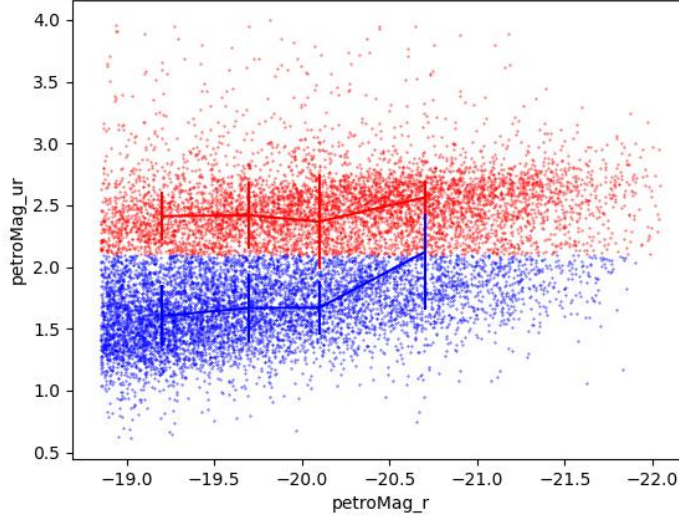


Figure 5. Diagrama M_r vs M_{u-r} . Se utiliza el valor 2.1 para discriminar las galaxias Secuencia roja (Rojo) y Nube Azul (Azul). El ajuste revela una poblacion bimodal bien definida de galaxias.

4.2 Clasificacion en funcion del indice de Concentracion

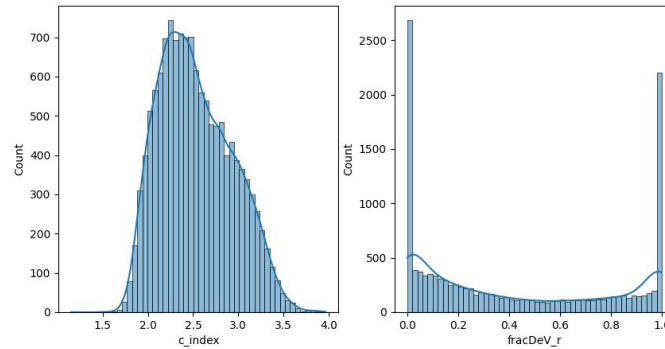


Figure 6. Izquierda: distribucion de indice de concentracion c , este grafico muestra una especie de bimodalidad. Sin embargo no hay tal. Hay un gran cantidad de galaxias con un indice de concentracion de 2.2 o 2.1, que serian mas galaxias espirales. Tambien hay una menor concentracion de elementos que tienen centro en masomenos 3.0, esas son galaxias elipticas. Derecha: fracDeV (Banda r) entre mas cerca e 1 sea fracDeV, mas eliptica es la galaxia dicho de otra manera, mas componente de Vauculerurs tiene la galaxia. Entre mas cerca a 0, menos tiene de este componente y por lo tanto seria menos eliptica.

Se investiga brevemente la relacion entre c y fracDeV. Para ello se calcula la correlacion entre estas

dos propiedades asi como realizar un ajuste lineal:

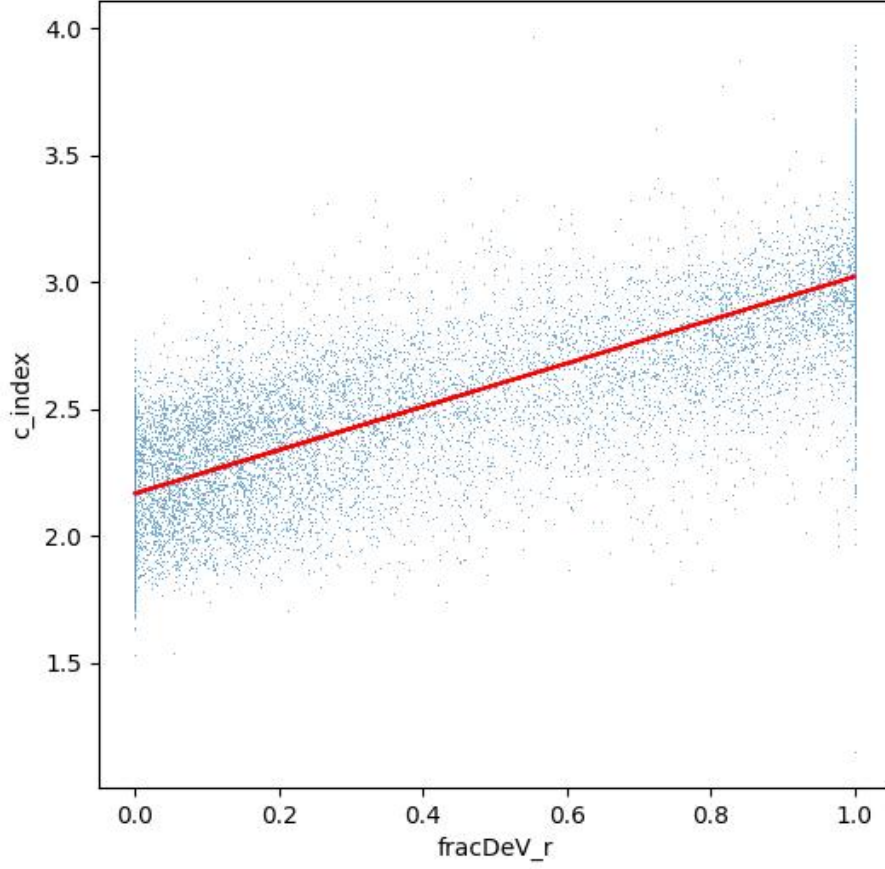


Figure 7. Grafico fracDeV_r vs c . Se observa una relacion lineal entre ambas propiedades.

Los parametros obtenidos del ajuste lineal son los siguientes:

Ecuacion	m	b	r	std
$y = mx + b$	0.855	2	0.8	0.005

Table 3. El coeficiente de correlacion r muestra una relacion lineal entre c y fracDeV.

4.2.1 Indice de concentracion vs Color

Se examina si existe alguna relacion entre c y M_{u-r} que permita clasificar galaxias. El indice de

correlacion entre ambas propiedades es de 0.54 y como muestra la figura de abajo no hay una relacion evidente. Sin embargo los valores $c=2.5$ y $M_{u-r}=2.1$ dividen una zona del espacio donde pueden clasificarse las galaxias como:

c	c – Clasificacion	M_{u-r}	M_{u-r} – Clasificacion	Densidad (porcentaje)
>2.5	Early Type	>2.1	Roja	37
<2.5	Late Type	<2.1	Azul	40
>2.5	Early Type	<2.1	Azul	11
<2.5	Late Type	>2.1	Roja	12

Table 4. Porcentaje de galaxias que se encuentran en las zonas delimitadas por las divisiones $c = 2.5$ y $M_{u-r} = 2.1$

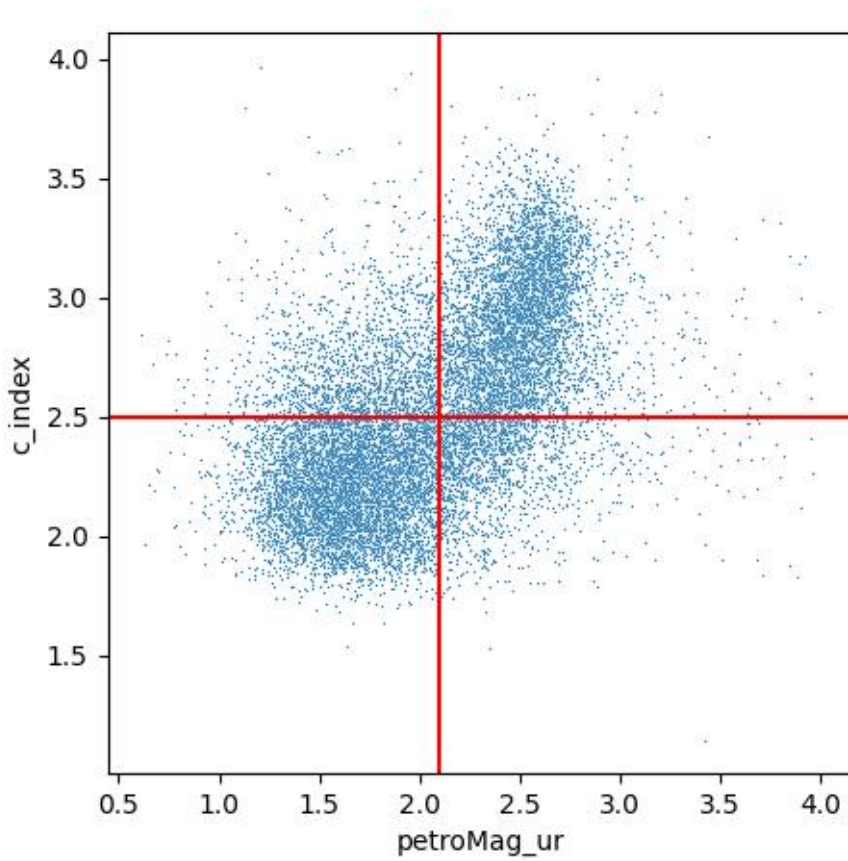


Figure 8. Los valores $c = 2.5$ y M_{u-r} dividen el espacio en 4 regiones, la mayor densidad de objetos se encuentra en la parte superior derecha y en la parte inferior izquierda y estan relacionados a Galaxias con morfologia Eliptica (Early Type) , morfologia Espiral (Late Type) , respectivamente.

4.3 Relacion Tamaño Luminosidad

Se estudia la relacion entre el tamaño de las galaxias y la luminosidad. Siendo el radio Petrosiano una propiedad relacionada con el tamaño de la fuente luminosa y la magnitud absoluta en la banda r , M_r , como una medida de su luminosidad.

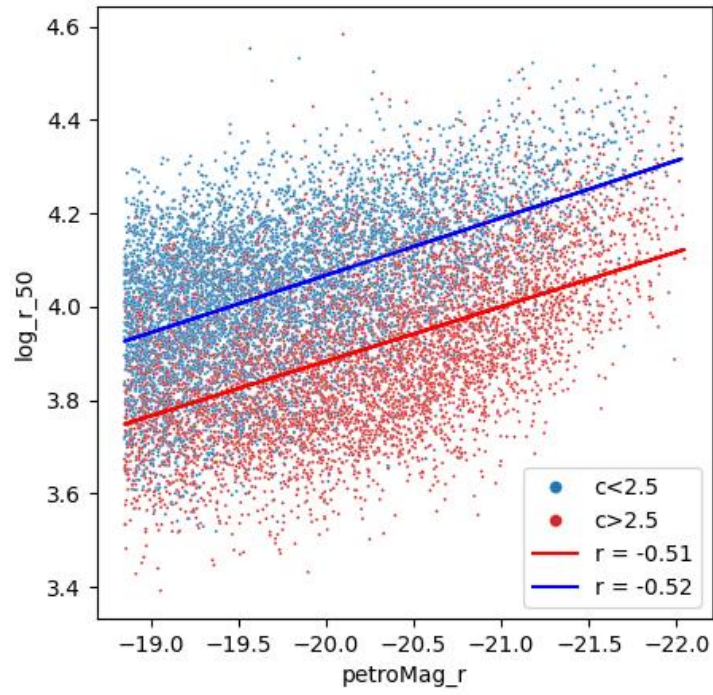


Figure 9. Grafico de Luminosidad vs Tamaño de galaxias discriminando entre early type ($c > 2.5$) y late type ($c < 2.5$).

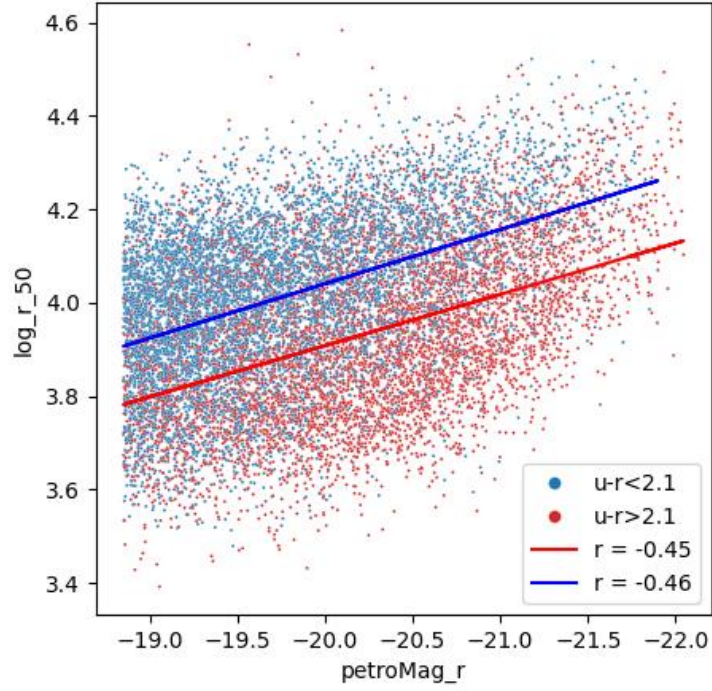


Figure 10. Grafico de Luminosidad vs Tamaño de galaxias discriminando entre galaxias azules ($M_{u-r} < 2.1$) y galaxias rojas ($M_{u-r} > 2.1$). Se muestran los indices de correlacion existente para cada poblacion discriminada segun M_{u-r} , la misma muestra una correlacion existente entre las variables M_r y $\log(r_{50})$.

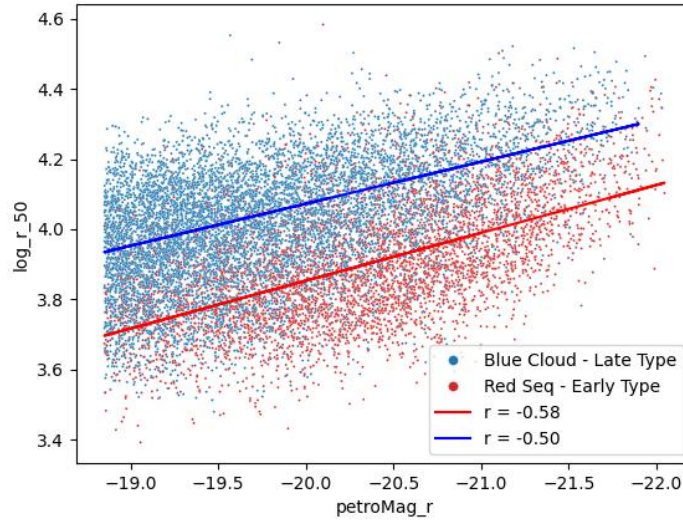


Figure 11. Grafico del Tamaño de las galaxias, $\log(r_{50}) \Leftrightarrow \log_r_{50}$ en funcion de su magnitud petrosiana $M_r \Leftrightarrow \text{petroMag}_r$, discriminando en dos grupos: $c > 2.5$, $M_{u-r} > 2.1$ correspondiente a galaxias Early Type y Rojas, mientras que el otro grupo consiste en $c < 2.5$, $M_{u-r} < 2.1$ correspondiente a galaxias Late Type y Azules.

Condicion	Tipo	m	b	r	std
$c > 2.5, M_{u-r} > 2.1$	Early + Roja	-0.136	1.126	-0.58	0.003
$c < 2.5, M_{u-r} < 2.1$	Late + Azul	-0.120	1.676	-0.50	0.003
$M_{u-r} > 2.1$	Roja	-0.110	1.715	-0.45	0.003
$M_{u-r} < 2.1$	Azul	-0.116	1.716	-0.46	0.003
$c > 2.5$	Early	-0.117	1.544	-0.51	0.002
$c < 2.5$	Late	-0.123	1.611	-0.52	0.002

Table 5. Valores obtenidos para los ajustes hechos segun los distintos discriminantes. Los coeficientes de correlacion r muestran una dispersion grande de los objetos luminosos en general.

La Tabla 5 muestra que si se considera una separacion por tipos morfologico y color en el coeficiente b se tendra que en terminos de radio: Early + Roja < Late + Azul.

5 Conclusiones

Los análisis anteriores muestran, utilizando la fotometría, que distintos parámetros pueden ser tomados para realizar una segregación de las galaxias según su Morfología (Early / Late) y su color en distintas bandas, para una muestra completa en Volumen. La tabla 6 muestra un resumen de los resultados obtenidos:

Parametro/Estudio	Clasificacion
Distribucion M_{u-r}, M_{g-r}	Color: Azul / Rojo
Diagrama color Magnitud M_r vs M_{u-r}	Color: Azul / Rojo
Distribucion Indice c	Morfologia: Late / Early
Distribucion fracDeV	Morfologia: Late / Early
Indice c vs M_{u-r}	Morfologia y Color

Table 6. Resumen de parámetros estudiados que permiten clasificar los objetos del catálogo según el color y según la morfología.

En cuanto a la relación de Tamaño y luminosidad, esta se estudia desde el punto de vista de la ordenada al origen b . Por otro lado se considera que las propiedades M_{u-r} y $\log(r_{50})$ estan correlacionadas levemente.

- i. Segregando los objetos segun: $M_{u-r} = 2.1$. Este metodo no da los mejores resultados, no se distingue bien si hay una diferencia de tamaño entre los objetos (Aca estoy analizando la ordenada al origen b , ya que para valores fijos de M_r , b nos daría una medida estimativa de la relacion de tamaños entre los objetos)
- ii. Segregando los objetos segun: $c = 2.5$. Este metodo arroja una separacion mayor entre los objetos.
- iii. Segregando los objetos segun M_{u-r} y c . Combinar estos dos parametros da como resultado una diferencia significativa de tamaños entre objetos que son Azules y de morfologia Late Type y objetos rojos y Late Type.

References

- [1] Ivan K Baldry, Michael L Balogh, RG Bower, K Glazebrook, Robert C Nichol, Steven P Bamford, and T Budavari. Galaxy bimodality versus stellar mass and environment. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 373(2):469–483, 2006.
- [2] Michael R Blanton, Julianne Dalcanton, Daniel Eisenstein, Jon Loveday, Michael A Strauss, Mark SubbaRao, David H Weinberg, John E Anderson Jr, James Annis, Neta A Bahcall et al. The luminosity function of galaxies in sdss commissioning data. *The Astronomical Journal*, 121(5):2358, 2001.

- [3] G De Vaucouleurs. On the distribution of mass and luminosity in elliptical galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 113(2):134–161, 1953.
- [4] Edwin P Hubble. A spiral nebula as a stellar system: messier 33. *Astrophysical Journal*, 63, 236-274 (1926), 63, 1926.
- [5] Vahe Petrosian. Surface brightness and evolution of galaxies. *Astrophysical Journal*, vol. 209, Oct. 1, 1976, pt. 2, p. L1-L5., 209:0, 1976.
- [6] Chris Stoughton, Robert H Lupton, Mariangela Bernardi, Michael R Blanton, Scott Burles, Francisco J Castander, Andrew J Connolly, Daniel J Eisenstein, Joshua A Frieman, Gregory S Hennesy et al. Sloan digital sky survey: early data release. *The Astronomical Journal*, 123(1):485, 2002.
- [7] Iskra Strateva, Željko Ivezić, Gillian R Knapp, Vijay K Narayanan, Michael A Strauss, James E Gunn, Robert H Lupton, David Schlegel, Neta A Bahcall, Jon Brinkmann et al. Color separation of galaxy types in the sloan digital sky survey imaging data. *The Astronomical Journal*, 122(4):1861, 2001.
- [8] Donald G York, J Adelman, John E Anderson Jr, Scott F Anderson, James Annis, Neta A Bahcall, JA Bakken, Robert Barkhouser, Steven Bastian, Eileen Berman et al. The sloan digital sky survey: technical summary. *The Astronomical Journal*, 120(3):1579, 2000.