

HOW DO GALAXIES BECOME RED AND DEAD?

¿CÓMO SE ENROJECEN Y MUEREN LAS GALAXIAS?

Ángela Abad Martín

Tutores: Pablo Corcho-Caballero y Violeta González Pérez

Agradecimientos: Yago Ascasibar Sequeiros

Mayo 2023, TFG-TUT

Resumen

Determinar la historia de formación estelar en galaxias para describir su evolución resulta ser un proceso complejo, considerado un reto dentro de la comunidad científica. El proyecto siguiente se basa en un estudio espectroscópico previo que clasifica a las galaxias en un “Diagrama de Envejecimiento” en función de si evolucionan de manera gradual (*ageing*) o si sufren algún episodio violento que trunque su formación estelar (*quenching*). Como alterativa, a continuación, se usan técnicas fotométricas para llevar a cabo dicha clasificación. Se parte de una muestra de alrededor de 150.000 galaxias del Universo Local pertenecientes al proyecto espectroscópico GAMA, cuyos datos se analizan para crear diagramas color-color que permitan excluir las galaxias *quenched* del resto. Como resultado, a través de la combinación de las bandas $u - g$ frente a $g - K$, se consigue discernir entre sendos caminos evolutivos. De esta manera, se abre la posibilidad de estudiar las distintas poblaciones de galaxias en función de su estado evolutivo utilizando datos fotométricos.

Índice

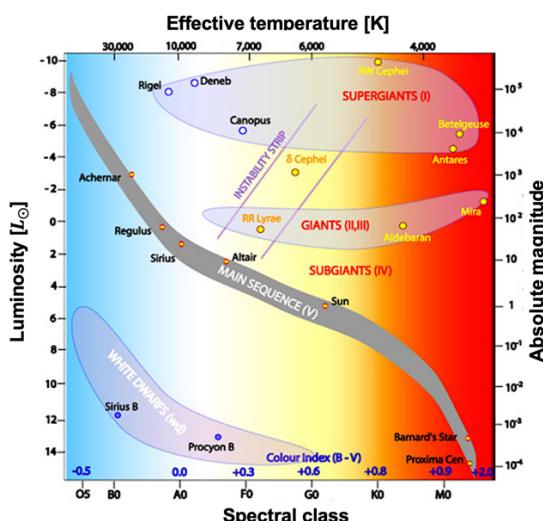
1.	Introducción.....	1
1.1.	Evolución de galaxias	1
1.2.	Estudios previos	2
1.2.1.	Ancho equivalente de la línea H α y salto de Balmer a 4000Å	2
1.2.2.	Líneas de demarcación para la clasificación de galaxias	4
2.	Metodología.....	4
2.1.	Análisis espectroscópico: <i>Ageing Diagram</i>	5
2.2.	Análisis fotométrico	6
2.2.1.	Ventajas frente a la espectroscopía.....	6
2.2.2.	Fundamentos teóricos	7
2.2.3.	Análisis para la representación de diagramas color-color	8
3.	Resultado	12
4.	Discusión	14
5.	Conclusiones.....	16

1. Introducción

1.1. Evolución de galaxias

El estudio sobre el desarrollo evolutivo de las galaxias ha sido siempre un asunto de gran interés. Una galaxia comienza su formación estelar a partir del colapso de nubes moleculares del medio interestelar ([Formación de estrellas, s.f.](#)), dando lugar a un espectro de diferentes masas estelares que generalmente comprende toda la secuencia principal (SP) ([F. López, 2019](#)) (ver *figura 1*), desde estrellas más masivas, calientes y brillantes (azules) hasta menos masivas, frías y de luminosidades más débiles (rojas). Asimismo, las estrellas azules de la SP (a pesar de no tener por qué ser el tipo mayoritario en la población) dominan la luz de la galaxia por su luminosidad, dotándola de ese mismo tono azulado.

Figura 1. Diagrama HR (Hertzsprung Russell): muestra las diferentes fases evolutivas estelares ([Cendrero, 2011](#)).



Por otro lado, la formación estelar en galaxias se ve afectada por múltiples procesos físicos que, en general, hacen que se creen cada vez menos estrellas ([Kormendy & Kennicutt Jr, 16 julio 2004](#)). Esto provoca la transición en color de la galaxia de azul (con población predominantemente joven) a roja (con estrellas veteranas y/o inactivas) debido al envejecimiento de estas estrellas y al hecho de que su reemplazo por otras nuevas ocurre cada vez menos.

Inicialmente, se estableció un paradigma aún vigente basado en el proceso de evolución de galaxias de azules a rojas por medio de lo que se denomina como *quenching* (truncamiento evolutivo) ([Peng, Maiolino, & Cochrane, 14 mayo 2015](#)). Este proceso

consiste en la reducción de la tasa de formación estelar (*Star Formation Rate*; SFR) de la galaxia de forma violenta por efectos tanto internos (p.ej. la acción de un núcleo galáctico activo o la explosión por supernova) como del entorno (p.ej. presión de ariete, efectos de marea por el potencial del cúmulo, *Starvation*...) (Cortese, Catinella, & Smith, 2021).

En cambio, estudios recientes sugieren un modelo en el que las galaxias rojas no surgen necesariamente de un proceso de *quenching*, sino que pueden haber evolucionado desde azules por *ageing* (envejecimiento del sistema) (Corcho-Caballero et al. 13 enero 2023). Se trata de un desarrollo paulatino de la galaxia, manteniendo un SFR que decrece gradualmente sin cambios violentos. De esta manera, se plantea un nuevo paradigma de evolución a través de dos tipos de secuencias: *ageing* y *quenching*. Este resulta ser el modelo fundamental con el que se trabaja durante el estudio.

1.2. Estudios previos

El objetivo principal del proyecto se basa en la identificación de las galaxias en base a su secuencia evolutiva haciendo uso de la fotometría. Para ello, se parte de estudios anteriores (Corcho-Caballero et al., 29 julio 2021; Corcho-Caballero et al., 13 enero 2023) en los que se determina, mediante modelos computacionales y técnicas espectroscópicas, un esquema de discriminación de poblaciones denominado Diagrama de Envejecimiento (*Ageing Diagram*; AD). Este se caracteriza con parámetros que son sensibles a diferentes poblaciones estelares y escalas de tiempo, como son el ancho equivalente (Ancho equivalente, s.f.) de la línea H _{α} y el salto de Balmer (Balmer Jump, 2021) a 4000Å. De esta manera, fijan líneas de demarcación fenomenológicas que introducen el criterio de discriminación entre sendos caminos evolutivos.

1.2.1. Ancho equivalente de la línea H _{α} y salto de Balmer a 4000Å

$EW(H_{\alpha})$ es el ancho equivalente de la línea H _{α} , definido como el cociente entre el flujo en la región del espectro en torno a $\lambda_{H_{\alpha}} \sim 6563\text{\AA}$ ($F(\lambda)$) y la densidad de flujo del espectro continuo del objeto (F_c), (Corcho-Caballero et al., 13 enero 2023),

$$EW(H_{\alpha}) [\text{\AA}] = \int_{6550\text{\AA}}^{6575\text{\AA}} \left(\frac{F(\lambda)}{F_c} - 1 \right) d\lambda \quad (1)$$

El espectro de las estrellas se caracteriza por un continuo que presenta generalmente líneas de absorción (Martínez Martínez, 2018). Asimismo, cuando hay presencia de gas en el medio interestelar y este se encuentra ionizado, aparecen también

líneas de emisión en los espectros. Para el caso del hidrógeno, este se ioniza completamente en torno a $1,5 \cdot 10^4 K$ ([Hidrógeno-H, s.f.](#); Ecuación de equilibrio de ionización de Saha, s.f.).

Las estrellas de tipo O y B, como superan dicha temperatura (ver *figura 1*), ionizan el hidrógeno del medio interestelar, presentando líneas de emisión del gas que predominan frente a las de absorción de su espectro. En cambio, las de tipo A (ver *figura 1*), tienen una temperatura por debajo de la de ionización, caso óptimo para la absorción de la línea. Entonces, para galaxias con predominancia de estrellas O y B (azules) se registran líneas en emisión intensas ($EW(H_\alpha) > 0$) mientras que para galaxias con ausencia de este tipo de estrellas se detectan líneas de absorción ($EW(H_\alpha) < 0$). Por lo tanto, este parámetro se asocia a escalas de tiempo cortas ($\sim 10 - 30 Myr$ (mega años)), dadas por el tiempo de vida media de las estrellas de tipo O y B que caracterizan la línea de emisión (ver *figura 2b*).

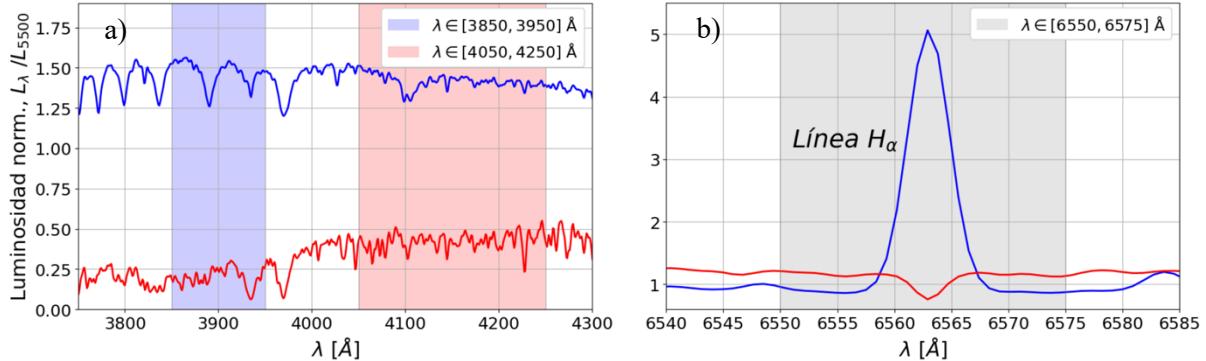
$D_n(4000)$, en cambio, se trata del salto en la distribución espectral de la galaxia en torno a 4000\AA (próximo al óptico). Se define como el cociente de densidades de flujo promedio entre el rango cercano al visible ($\langle F_\lambda \rangle_{(4050-4250)\text{\AA}}$) y el ultravioleta cercano ($\langle F_\lambda \rangle_{(3850-3950)\text{\AA}}$). Dicho de otra forma, se trata del valor de la pendiente entre ambas bandas, dando el siguiente resultado ([Corcho-Caballero et al., 13 enero 2023](#))

$$D_n(4000)[adim.] = \frac{\langle F_\lambda \rangle_{(4050-4250)\text{\AA}}}{\langle F_\lambda \rangle_{(3850-3950)\text{\AA}}} \quad (2)$$

Análogamente al caso anterior, $D_n(4000)$ proporciona información acerca de las características estelares de las galaxias: si existe una predominancia de estrellas jóvenes ionizantes (de tipo O y B) o de elevadas temperaturas (de tipo A), el salto de Balmer resulta ser más discreto e incluso inapreciable ($D_n(4000)$ bajo) ya que la densidad de flujo en la banda del ultravioleta supera a la del visible ($\langle F_\lambda \rangle_{(3850-3950)\text{\AA}} > \langle F_\lambda \rangle_{(4050-4250)\text{\AA}}$); en cambio, si predominan poblaciones estelares de menores temperaturas (de tipo F en adelante) y/o más longevas, se produce mayor radiación en la región del visible que en el ultravioleta ($\langle F_\lambda \rangle_{(3850-3950)\text{\AA}} < \langle F_\lambda \rangle_{(4050-4250)\text{\AA}}$, $D_n(4000)$ alto). Como consecuencia, este parámetro se asocia a escalas de tiempo largas ($\sim 1 Ga$

(giga año = 10^9 años)), periodo de vida media de las estrellas de tipo A que delimitan los dos comportamientos (ver *figura 2a*).

Figura 2. Comparación del espectro de dos galaxias: con población estelar joven (azul) y veterana (roja).
a) Salto de Balmer a 4000 Å. b) Ancho equivalente de la línea H_α.



1.2.2. Líneas de demarcación para la clasificación de galaxias

Elaborando una combinación entre simulaciones de formación de galaxias (ILLUSTRIS TNG) ([The IllustrisTNG project, s.f.](#)) y observaciones astronómicas con técnicas espectroscópicas de proyectos como CALIFA (*Calar Alto Legacy Integral Field Area*) ([CALIFA, s.f.](#)) y MaNGA (*Mapping Nearby Galaxies at APO*) ([MaNGA, s.f.](#)), estudios previos definen las regiones para cada población mediante dos líneas de demarcación fenomenológicas dadas por la siguiente expresión ([Corcho-Caballero et al., 13 enero 2023](#))

$$EW(D_n(4000)) = k \cdot 10^{\alpha \cdot D_n(4000)} + EW_{\infty}$$

Línea secuencia Ageing: $k = 250 \text{ Å}$, $\alpha = -1,2$ [adim.], $EW_{\infty} = -4,3 \text{ Å}$

Línea secuencia Quenching: $k = -12 \text{ Å}$, $\alpha = -0,5$ [adim.], $EW_{\infty} = 1,8 \text{ Å}$

donde k y α hacen referencia a constantes de parametrización y EW_{∞} se trata del ancho equivalente de la línea H_α en absorción dada por poblaciones de estrellas veteranas. Estas líneas permiten dividir teóricamente el plano del AD en cuatro regiones, proceso que se demuestra a continuación (ver *figura 3*).

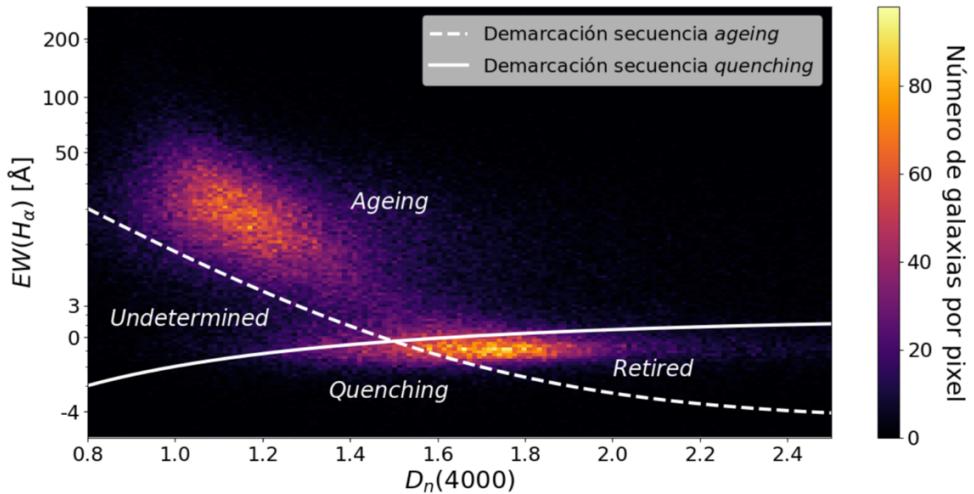
2. Metodología

Una vez definidas las secuencias por las que se espera que puedan evolucionar las galaxias durante su tiempo de vida, a continuación, se propone una alternativa para la identificación de galaxias *quenching* a través de la fotometría.

Se parte de una muestra de alrededor de 150.000 galaxias del Universo Local pertenecientes al proyecto GAMA (*Galaxy And Mass Assembly*) (Project overview, s.f.). Este reúne los datos procedentes del equipo AAOmega en el telescopio AAT (*Anglo-Australian Telescope*), Australia. Inicialmente, por medio de un análisis espectroscópico basado en estudios previos (ver sección 1.2.), se representa el AD de la muestra, trazando la distinción de poblaciones a partir de las líneas propuestas en la ecuación (3). Posteriormente, se realiza un análisis multifrecuencia a través de la manipulación de los datos de las galaxias para “recrear” una variante del AD espectroscópico con fotometría en forma de diagramas color-color.

2.1. Análisis espectroscópico: *Ageing Diagram*

Figura 3. *Ageing Diagram*.



Representando los parámetros $EW(H_\alpha)$ y $D_n(4000)$ (Datos espectroscópicos (información por comunicación privada)) e introduciendo las líneas de demarcación según la ecuación (3), se grafica el correspondiente AD para la muestra de galaxias usada, caracterizándose cuatro poblaciones diferentes.

Las galaxias *ageing* presentan índices $D_n(4000)$ muy bajos y valores de $EW(H_\alpha)$ elevados debido a la presencia predominante de estrellas de tipo O y B ionizando el medio interestelar.

Por otro lado, se observa el caso de galaxias ligeramente azuladas y asociadas a índices $D_n(4000)$ bajos (indican la presencia de poblaciones de estrellas jóvenes a escalas de tiempo largas (de tipo A)), pero que a su vez se caracterizan por valores de $EW(H_\alpha)$ reducidos (implicando la escasez de población estelar ionizante). Estas son

galaxias *quenching*, cuya formación estelar se ve interrumpida, reduciendo drásticamente la población de estrellas O y B por explosiones de supernova, haciendo que dominen las de tipo A.

Si, por otro lado, se consideran galaxias con índices $D_n(4000)$ altos y valores de $EW(H_\alpha)$ bajos, se habla de galaxias *retired* (retiradas), caracterizadas por ser rojas y presentar un SFR ínfimo o prácticamente nulo.

Finalmente, se denominan galaxias *undetermined* (indeterminadas) a aquellas situadas entre medias de las *ageing* y *quenching* y cuyas propiedades y características evolutivas siguen resultando una incógnita a día de hoy pues bien podrían ser galaxias sufriendo truncamiento (*quenching*) o rejuvenecimiento (mediante un brote de formación estelar). Es por ello por lo que, al ser complejas de clasificar de forma observacional, no son tenidas en cuenta durante el estudio.

Como conclusión, el diagrama AD realiza una distinción entre las galaxias *ageing* y las *quenched*, pudiendo estas evolucionar en base a sus propiedades a través de la secuencia *ageing* (por encima de la línea de demarcación *ageing*) y *quenching* (por debajo de la línea de demarcación *quenching*) respectivamente, acabando ambas su proceso evolutivo en la región de las galaxias *retired* (punto de intersección). Una vez la galaxia se encontrase en dicha región, sería imposible distinguir a través de qué secuencia evolucionó. Cabe destacar que el mecanismo *ageing* es intrínseco a todas las galaxias por ser un proceso natural, progresivo y de envejecimiento tal y como ocurre con el resto de procesos biológicos en la naturaleza. Solo el *quenching* afectaría a una fracción reducida de galaxias ([Corcho-Caballero et al., 13 enero 2023](#)).

2.2. Análisis fotométrico

2.2.1. Ventajas frente a la espectroscopía

Las técnicas de espectroscopía ([Espectroscopía en Astronomía, s.f.](#); [La espectroscopia en la astronomía, s.f.](#)), a pesar de permitir medir con precisión los espectros de las galaxias y por tanto los parámetros mencionados con anterioridad, presentan varios inconvenientes a tener en consideración como son los largos tiempos de exposición requeridos y los efectos de apertura ([Maragkoudaki, Zezas, Ashby, & Willner, 19 mayo 2014](#)).

El primero de todos hace de esta una técnica poco eficiente y más laboriosa (costosa) lo que implica la medida de conjuntos de no más de cientos de galaxias a la vez. El segundo inconveniente surge del propio método de medida; es bastante común que queden regiones de la galaxia fuera del material que recoge los espectros y, por tanto, los datos obtenidos suelen representar únicamente la región central de la galaxia, dando resultados más rojos generalmente pues es ahí donde suelen predominar las estrellas veteranas ([Bulbo galáctico, s.f.](#)).

En cambio, la técnica de fotometría ([Fotometría, s.f.](#); [Galadí Enríquez, 2022](#); [Fotometría](#)) permite determinar el brillo aparente de los cuerpos celestes a través de la medida del flujo de energía obtenido en diferentes bandas. Esta técnica recoge los fotones en diferentes rangos del espectro para caracterizarlo de forma más burda, pudiendo así trabajar con un mayor número de galaxias (mayor estadística de datos) y empleando un menor tiempo de exposición (procedimiento más rápido). Como consecuencia, proporciona un espectro con menos información que el obtenido con espectroscopía, pero permite realizar un análisis cualitativo más accesible.

2.2.2. Fundamentos teóricos

La fotometría genera espectros de cuerpos astronómicos de baja resolución. Para ello, usa filtros que permiten dejar que la luz proveniente de las galaxias los atraviese en un cierto intervalo espectral (banda fotométrica) ([Sistema fotométrico, s.f.](#); [Richer, 2022](#)), prohibiendo que los fotones de frecuencias fuera de dicho intervalo puedan penetrar.

Por otro lado, el brillo de los objetos astronómicos se cuantifica a partir de la magnitud aparente ([Magnitud aparente, s.f.](#)), que da información acerca de la luz que se recibe de dicho cuerpo. Viene dada por la siguiente expresión,

$$m_{banda} = -2,5 \cdot \log_{10} \left(\frac{F_{banda}}{\mathcal{F}} \right) \quad (4)$$

donde m_{banda} es la magnitud aparente del objeto en una determinada banda fotométrica, F_{banda} se trata del flujo medido en dicha banda y $\mathcal{F} = 3631 \text{ Jy}$ se trata de la densidad de flujo espectral de referencia a $m = 0$ ($1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{Hz})$) ([Jansky \(unidad\), s.f.](#)).

Para el estudio fotométrico que compete, el objetivo consiste en determinar combinaciones de índices de color ([Richmond, s.f.](#)) a partir de los flujos de las diferentes galaxias en distintas bandas fotométricas (análisis multifrecuencia). De esta manera, se puede definir el color como una relación de magnitudes, siendo una de ellas más azul y otra más roja dentro de la combinación escogida:

$$m_{azul} - m_{rojo} = -2,5 \cdot \log_{10} \left(\frac{F_{azul}}{F_{rojo}} \right) \quad (5)$$

Así, m_{azul} y F_{azul} son la magnitud y flujo del objeto en la banda azul del par escogido y m_{rojo} y F_{rojo} la magnitud y flujo en la banda roja. Asimismo, de la relación (5) cabe destacar que durante el cálculo de un color cualquiera se anulan los parámetros de referencia entre sí, dejando solo el valor del flujo medido en cada banda.

Combinando diferentes colores se consigue una gran variedad de pares con los que se representan diagramas color-color ([Diagrama color-color, s.f.](#)), herramienta fundamental en la que se basa el análisis de distinción evolutiva de este proyecto.

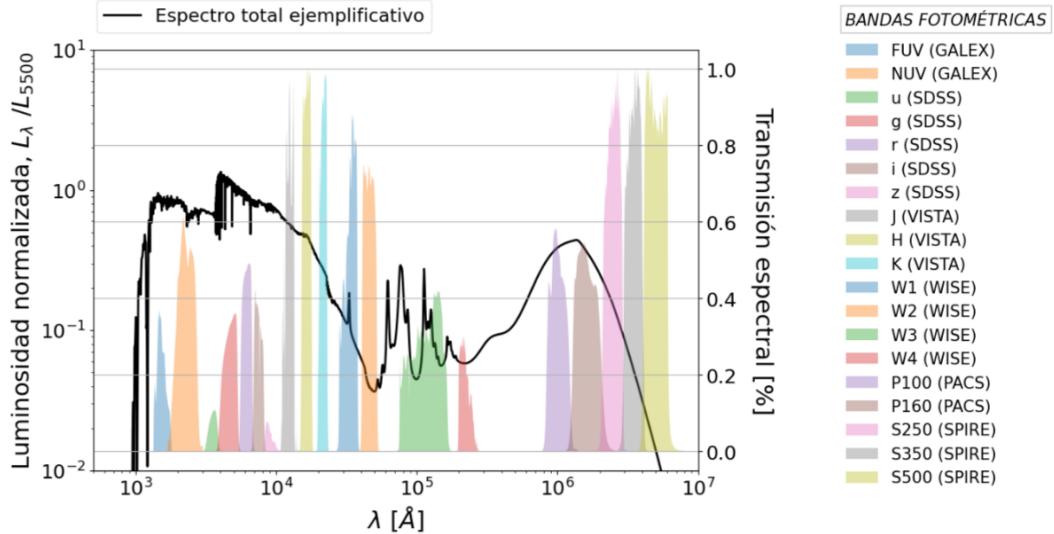
2.2.3. Análisis para la representación de diagramas color-color

A continuación, se hace uso del catálogo LAMBDAR ([Wright, Robotham, & Bourne, 12 abril 2016](#)) (disponible en GAMA), una base de datos que recopila la información de la muestra de galaxias en un rango multifrecuencia de 21 bandas fotométricas. Cubre el espectro electromagnético desde el ultravioleta lejano hasta el infrarrojo lejano y surge de una colaboración con los telescopios y sondeos siguientes:

- GALEX (*GALaxy Evolution eXplorer*): satélite que proporciona la región comprendida entre el ultravioleta lejano y cercano (bandas *FUV* y *NUV*).
- SDSS (*Sloan Digital Sky Survey*): proyecto de sondeo astronómico delimitado en la región del óptico (bandas *u, g, r, i, z*).
- VISTA (*Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy*): telescopio perteneciente al muestreo VIKING (*Vista Kilo-degree Infrared Galaxy survey*) y que caracteriza la región del infrarrojo cercano (bandas *X, Y, J, H* y *K*).
- WISE (*Wide-Field Infrared Survey Explorer*): satélite que delimita las imágenes en el espectro del infrarrojo medio (bandas *W1, W2, W3* y *W4*).
- PACS (*Physics and Astronomy Classification Scheme*) y SPIRE (*Spectral and Photometric Imaging Receiver*): instrumentos del observatorio espacial Herchel para

caracterizar imágenes en el infrarrojo lejano, desde $100\mu m$ hasta $500\mu m$ (bandas $P100, P160, S250, S350$ y $S500$).

Figura 4. Ejemplificación del rango que cubren las bandas fotométricas. No se ha podido encontrar la función de respuesta asociada a las bandas X e Y, por ello no vienen representadas (aunque sí se usan).



Las bandas (ver *figura 4*) del ultravioleta caracterizan la zona del espectro dominada por la formación de estrellas jóvenes mientras que la región desde el óptico hasta la banda $W2$ define el grueso de la masa estelar (contribuyendo tanto estrellas jóvenes como viejas). Por otro lado, las bandas WISE lejanas ($W3$ y $W4$) representan el polvo caliente del medio interestelar y, finalmente, la zona delimitada por las bandas de los instrumentos PACS y SPIRE representan la emisión térmica del polvo frío.

Es relevante mencionar que el catálogo LAMBDA reduce la muestra de 150.000 galaxias a unas 100.000 por una falta de completitud en sus datos de archivo.

Filtro en señal-ruido

Inicialmente se elaboraron combinaciones color-color para todo el rango de bandas disponibles. Sin embargo, tras advertir que no se observaba diferenciación entre las poblaciones aplicando el mismo criterio de distinción que en el AD, se prosiguió elaborando un análisis en señal-ruido (*Signal to Noise Ratio*, SNR) ([Ruido, señal y SNR en astrofotografía amateur, 2016](#)).

Toda toma de datos presenta un error asociado. Al manipular muestras con suficiente estadística (~ 100.000 galaxias) es necesario realizar un análisis en base al ruido presente en los datos medidos, que en ocasiones únicamente emborrona los

resultados en lugar de proporcionar claridad. Así, esta corrección consiste en la eliminación de aquellos valores que no proporcionen información relevante al estudio.

El parámetro SNR se define como el cociente de los flujos de las galaxias en cada una de sus bandas fotométricas (F_{banda}) y sus correspondientes errores asociados (ΔF_{banda}),

$$SNR = \frac{F_{banda}}{\Delta F_{banda}} \quad (6)$$

Por un lado, de la relación (4) se determina que la magnitud aparente es proporcional al flujo tal que $m_{banda} = -2,5 \cdot \log_{10}(F_{banda}) + C$ (con $C \equiv cte.$). Por propagación de errores de la magnitud respecto de dicho flujo se determina que:

$$\Delta m_{banda} = \left| \frac{\partial m_{banda}}{\partial F_{banda}} \right| \Delta F_{banda} \Rightarrow \Delta m_{banda} = \frac{2,5}{SNR \cdot \ln(10)} \quad (7)$$

donde se ha hecho uso de la relación (6) y de donde se observa que el error en la magnitud aparente para una banda dada es proporcional a la inversa de la señal-ruido. Mediante un proceso iterativo experimental se determina que la diferencia necesaria entre dos magnitudes (color) para trabajar con una precisión tal que se puedan distinguir las poblaciones es de

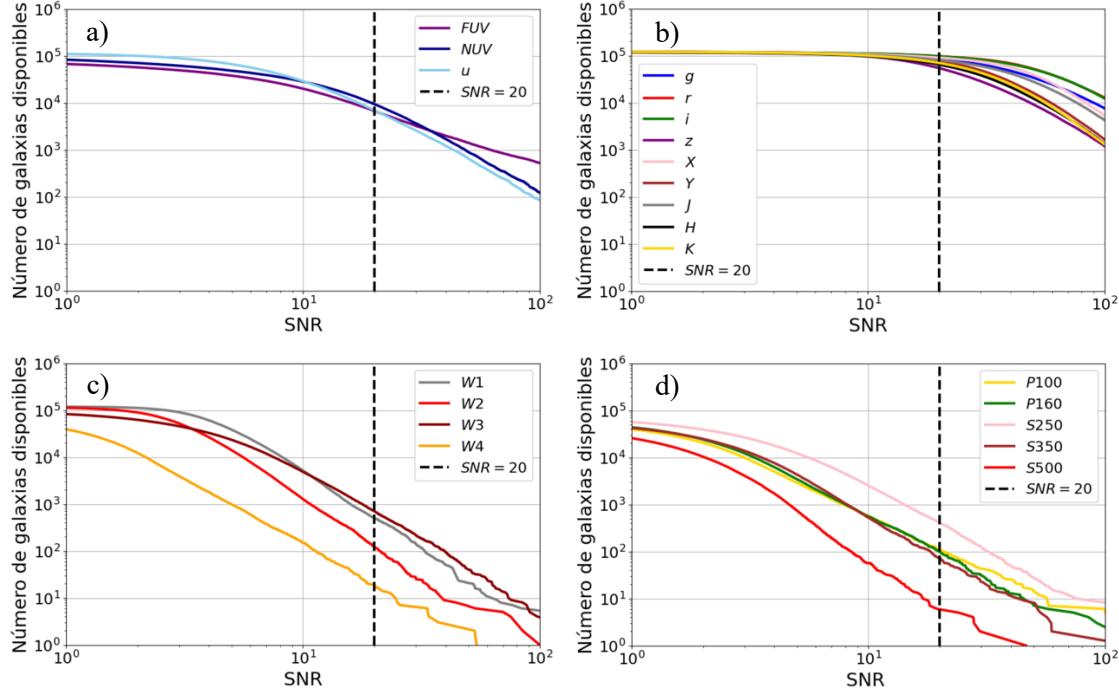
$$\Delta(m_{azul} - m_{rojo}) = \sqrt{\Delta m_{azul}^2 + \Delta m_{rojo}^2} \sim [0,05 - 0,1] \quad (8)$$

Asumiendo que los errores para diferentes bandas son aproximadamente iguales entre sí y que vienen dados por la relación (7), se comprueba la necesidad de introducir una cota en señal-ruido de valor $SNR = 20$.

Una vez introducido este filtro, se comprueba su efecto en las bandas fotométricas, representando el número de galaxias para cada una en función de la cota escogida (ver figura 5). En las *figuras 5c* y *5d* se observa que para $SNR = 20$, el número de galaxias disponibles y asociadas a datos rigurosos son de entre 10 a 1.000 para dichas bandas (infrarrojo medio-lejano). Se tratan de valores considerablemente menores en comparación con las 100.000 galaxias de partida. Estos resultados, por tanto, sugieren que los datos fotométricos en este rango apenas cumplen con las condiciones impuestas,

dando una ejemplar de galaxias sin apenas estadística, lo que dificulta el análisis de poblaciones. Por este motivo, se desprecian estas bandas en el estudio.

Figura 5. Número de galaxias frente al corte en señal-ruido ($SNR = 20$) para cada banda fotométrica.
a) Ultravioleta. b) Óptico–infrarrojo cercano. C) WISE (infrarrojo medio). d) Infrarrojo lejano.



Por otro lado, la *figura 5b* representa el rango fotométrico con mejor relación señal-ruido manteniendo, en buena aproximación, la muestra completa de galaxias. Es por ello por lo que se trabaja principalmente con bandas desde el óptico al infrarrojo cercano.

Finalmente, la *figura 5a* se corresponde con un caso intermedio, asociado a las bandas del ultravioleta. Se observa que el filtrado en este rango recorta la muestra de 100.000 galaxias a una de 10.000. Debido al hecho de que para el análisis de poblaciones era necesaria al menos una banda lo suficientemente energética (ver sección 1.2.1.), como excepción, se incluye en el procedimiento la banda *u*.

Como consecuencia del filtrado en SNR y la elección de bandas impuesta, la muestra final se reduce a 10.000 galaxias.

Corrección K

Una vez aplicado el filtro en señal-ruido para combinaciones de color diferentes se concluye que, a pesar de obtenerse una ligera distinción en comparación con estudios

iniciales “en bruto”, todavía se dificulta la tarea de discriminar claramente las poblaciones.

De este modo, seguidamente se recurre a la conocida como corrección K, un tipo de corrección aplicada a las magnitudes definidas a través de la ecuación (4) ([Taverna, 2014](#)). Este nuevo análisis surge del hecho de que el universo se encuentra en expansión, fenómeno que provoca que el espectro total de la galaxia se encuentre corrido hacia el rojo. De esta manera, existe una diferencia entre el flujo (o magnitud aparente) que emite el objeto desde su sistema de referencia en reposo y el valor medido desde el sistema de referencia de la Tierra.

Aplicando la corrección K se consigue, por tanto, estimar los valores “reales” de flujo de los cuerpos celestes, proporcionando una información mucho más fiable (los datos de corrección K empleados para cada una de las bandas de la muestra de estudio se han obtenido de ([Loveday, Norberg, & Baldry, febrero 2012](#))).

Cabe destacar, sin embargo, que de la nueva muestra de 10.000 galaxias de la que se parte, el ejemplar se reduce a unos 4.429 cuerpos finalmente. Esto ocurre por lo siguiente: durante la creación del filtro SNR se tuvo que introducir la condición de que solo aquellas galaxias con medidas de corrección K se tuviesen en cuenta. Esto resulta coherente, ya que no tendría sentido trabajar con galaxias en señal-ruido que luego no tuviesen una medida de corrección K asociada. De ahí que al eliminar los datos sin esta corrección la muestra se reduzca todavía más. Sin embargo, se desconoce el motivo por el que no hay valores de este parámetro para algunas galaxias.

3. Resultado

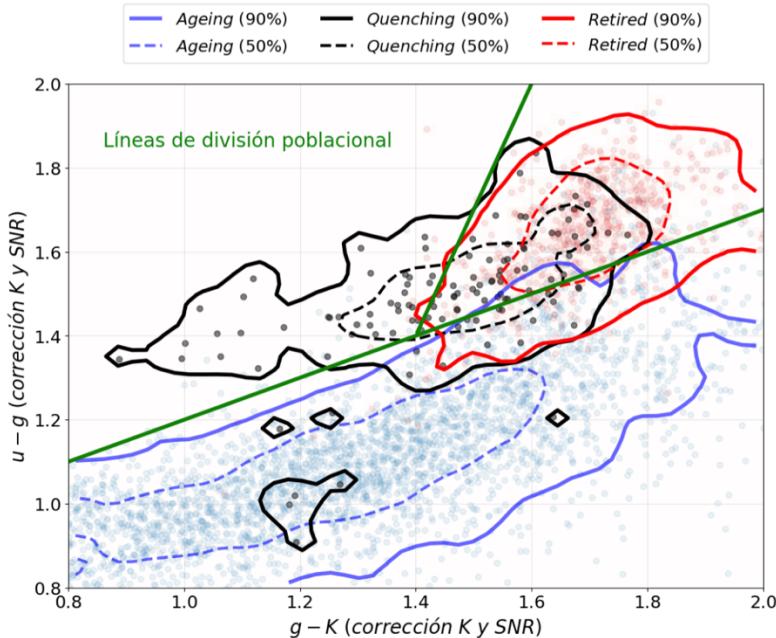
Una vez estudiados con detalle varios ejemplos de diagramas color-color, se determinó una combinación importante para el análisis. Se trata de la composición de magnitudes dada por las siguientes bandas: $u - g$ frente a $g - K$. A este resultado se le aplicó el filtrado en SNR y la corrección K a la par, obteniendo la representación siguiente (ver *figura 6*).

Se trata de un diagrama color-color de 4.429 galaxias, representado por poblaciones en forma de *scattering* de puntos: en azul las *ageing* (3.624 galaxias), en

negro las *quenching* (118 galaxias) y finalmente las *retired* en rojo (552 galaxias). El resto de galaxias hasta completar la muestra serían las *undetermined* que, como se comentó en la sección 2.1., quedan sin ser estudiadas durante el proyecto.

Estos tres tipos de galaxias se delimitan por contornos suavizados que representan el 90% (línea sólida) y 50% (línea a rayas) del grueso de cada población. De esta manera, se puede comprobar en primera instancia la existencia de dos secuencias diferenciables que terminan en la región de las *retired*, punto de intersección donde residen las galaxias ya envejecidas y con un SFR ínfimo (actividad estelar despreciable) o nulo (muertas) (ver sección 2.1.).

Figura 6. Diagrama color-color: $u - g$ frente a $g - K$. Representación total de la muestra con contornos y líneas de división poblacional.



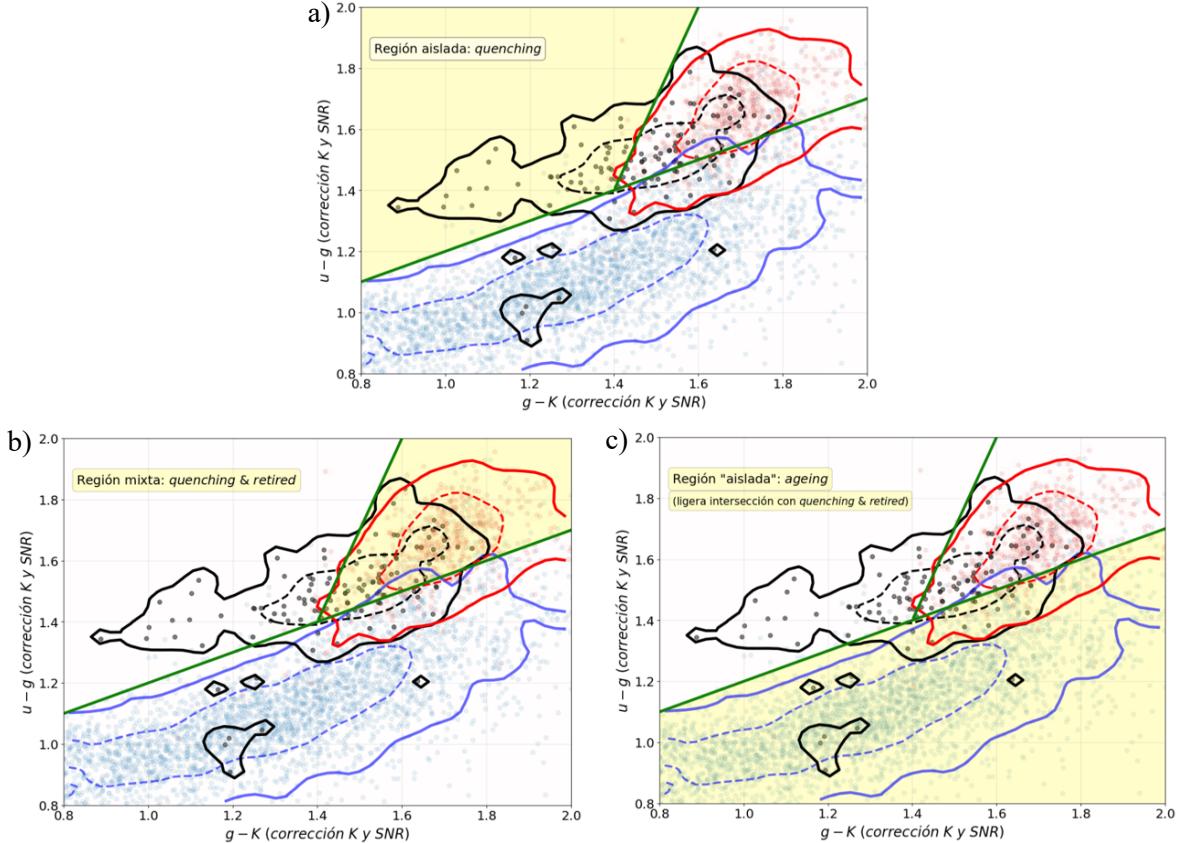
Para la clasificación de galaxias, se introducen dos líneas de demarcación, definidas según la ecuación (9), que dividen el mapa en tres regiones (ver *figuras 6 y 7*),

$$\begin{cases} (u - g) = 1,4 + \frac{(g - k) - 1,4}{2} \\ (u - g) = 1,4 + 2 \cdot ((g - k) - 1,4) \end{cases} \quad (9)$$

De esta manera, se demuestra la viabilidad de distinción de poblaciones por medio del uso de técnicas fotométricas y de nuevas líneas de separación. Así se consigue, en primer lugar, delimitar las galaxias *quenched* del resto (ver *figura 7a*). Asimismo, la *figura 7b* incluye la zona del diagrama con contribución de población *quenching* y *retired*.

Finalmente, se reconoce una región de galaxias *ageing* (*figura 7c*) en la que aparecen algunas galaxias con posible proceso de *quenching* reciente y una ligera intersección con la región mixta anterior.

Figura 7. Clasificación de poblaciones. a) Región aislada de galaxias *quenching*. b) Región mixta de galaxias *quenching* y *retired*. c) Región “aislada” de galaxias *ageing* (con algunas galaxias de *quenching* reciente e intersección con galaxias *retired*).

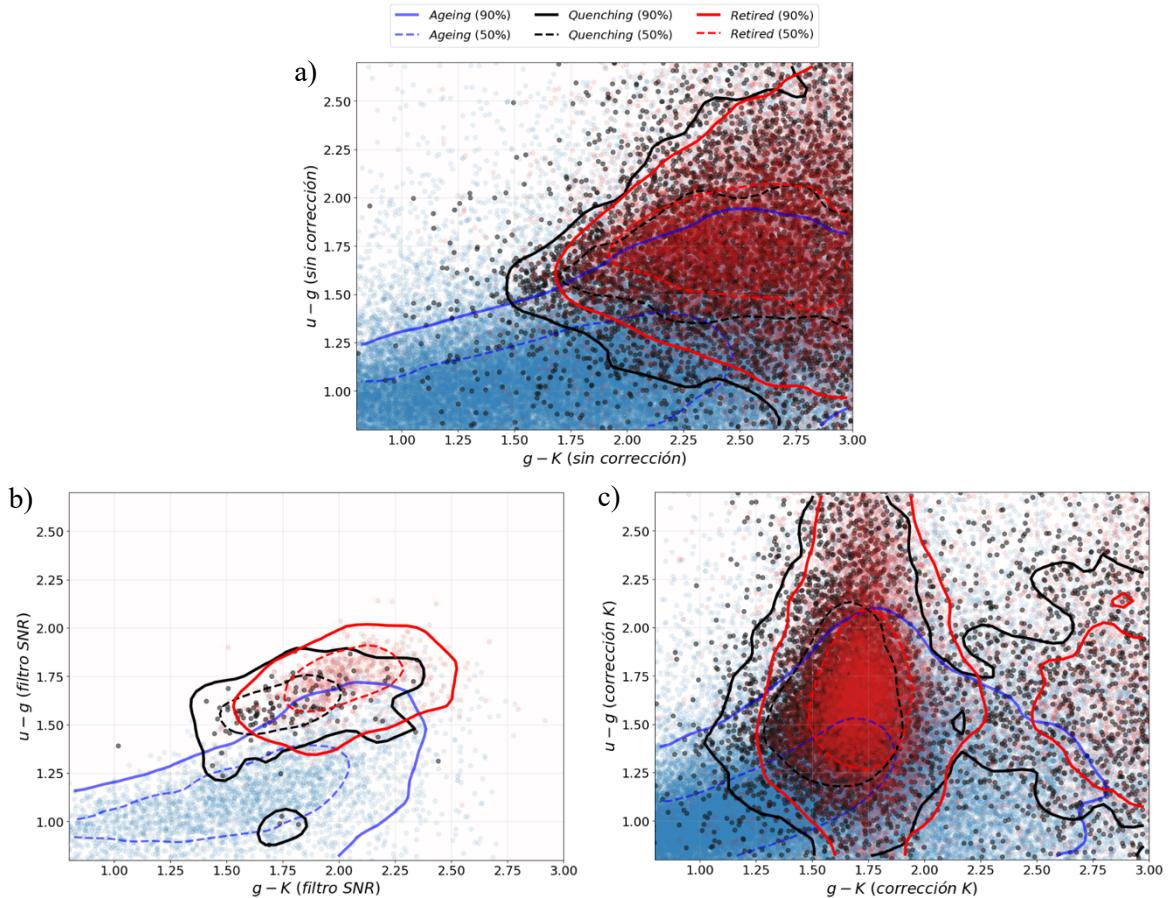


4. Discusión

Tal y como se indicaba en la sección 2.2.3., el proceso por el cual se llega al resultado final del proyecto consiste en la manipulación de datos a través del empleo de diferentes correcciones. El motivo por el cual se tuvo que emplear a la par tanto la corrección K como el filtrado en *SNR* se entiende observando la *figura 8*.

Inicialmente se representa la muestra de galaxias en bruto, sin correcciones de ningún tipo (ver *figura 8a*). En ella se puede apreciar la necesidad de manipulación de los datos ya que cualquier intento de clasificación resulta imposible por la gran cantidad de información sin corregir empleada y que únicamente proporciona ruido visual. Como consecuencia, es imposible delimitar una doble secuencia evolutiva o alguna región donde predominen las galaxias *quenching*, que era el objetivo principal.

Figura 8. Diagramas color-color intermedios (los límites de los ejes están modificados para una mejor visualización). a) Datos sin manipular (en bruto). b) Datos con filtrado en SNR. c) Datos con corrección K.



Seguidamente, al emplear únicamente el corte en señal-ruido (ver *figura 8b*) se consigue rápidamente reducir la muestra, lo que permite una distinción más notable entre las poblaciones. Empieza a divisarse una pequeña región del mapa donde destacan las galaxias *quenching*. Sin embargo, sigue existiendo una superposición notable entre las poblaciones *quenching* y *retired*, imposibilitando una delimitación más exacta.

Por otro lado, se evalúan las consecuencias de imponer únicamente corrección K a los datos (ver *figura 8c*). En este caso se observa una modificación de la posición de las galaxias en el plano, dada por el hecho de que la corrección K corre el espectro de la galaxia hacia la izquierda. En base al tipo de espectro inicial de cada galaxia, este corrimiento daría nuevos valores para los índices de color, haciendo que se observe un esparcimiento de las poblaciones e impidiendo, de nuevo, que se puedan diferenciar. De esta manera, la conclusión continúa siendo la misma que en el apartado anterior.

Son estas las razones por las que se decidió emplear ambas correcciones a la vez (ver resultados de la sección 3), observándose que al ser aplicadas por separado no se conseguía el resultado deseado mientras que, en conjunto, contruían un mapa de valores corregidos y con una señal-ruido adecuada.

5. Conclusiones

Durante el proyecto se estudia la clasificación de poblaciones para una muestra de 150.000 galaxias por medio de técnicas fotométricas como alternativa a resultados espectroscópicos de estudios previos.

A través de combinaciones de color se consigue determinar un diagrama exitoso representando $u - g$ frente a $g - K$. En él se verifica la distinción de dos secuencias evolutivas convergiendo a la región de galaxias *retired* tal y como se proponía en el AD. Asimismo, se delimita una región de galaxias puramente *quenched*, lo que satisface el objetivo inicial del trabajo. De igual forma, se determinan otras dos áreas extras en el mapa: por un lado galaxias *ageing* aisladas que terminan en una región mixta y que además tienen grupos reducidos de galaxias *quenched* (posiblemente por haber sufrido un episodio de truncamiento reciente); por otro lado existe un punto de intersección de galaxias *quenching* y *retired*, verificando de nuevo el paradigma evolutivo del AD.

Por un lado, es importante destacar la importancia en la elección de bandas. Al igual que en la parametrización espectroscópica, para la fotometría es necesario el uso de colores con escalas de tiempo diferente. En base al resultado obtenido, se concluye que los colores $u - g$ y $g - K$ son una buena elección: $u - g$ combina una banda del ultravioleta cercano (sensible a la población de estrellas O y B) con una del visible (sensible a todas las estrellas), mientras que $g - K$ combina la banda del visible con otra del infrarrojo cercano (más sensible todavía a población estelar de tipo A en adelante). De esta manera existe una analogía entre $u - g$ y $EW(H_\alpha)$ (escalas de tiempo cortas) y $g - K$ con $D(4000)$ (escalas de tiempo largas).

Por otro lado, cabe destacar la posible existencia de otras combinaciones de bandas exitosas para la distinción de poblaciones. Sin embargo, para el estudio no se consiguió determinarlas. Con 10 de las 21 bandas disponibles, solo se determinó un resultado

empleando u , g y K . Cabe destacar los motivos principales por los que la cota en señal-ruido para las bandas en el ultravioleta e infrarrojo medio-lejano es tan baja. En primer lugar, en base a la aproximación de cuerpo negro ([Cuerpo negro, s.f.](#)) de las estrellas que componen las galaxias, es lógico observar que la radiación emitida por ellas en el ultravioleta es mucho menor que en el resto de frecuencias. Esto hace que la cantidad de fotones ultravioletas que llegan a los telescopios sea menor, reduciendo la señal. Para las bandas del infrarrojo ocurre lo contrario. Todos los cuerpos emiten en este rango lo que hace que los datos que se obtengan de los telescopios tengan demasiado ruido térmico, dificultando la tarea de distinguir cuales de dichos fotones vienen del cuerpo de interés. Por lo tanto, se disminuye de nuevo el SNR de los datos.

Como conclusión, se propone este tipo de técnicas fotométricas como una primera aproximación de análisis estadístico para la búsqueda de posibles candidatos a galaxias *quenching*. Una vez determinadas las diferentes poblaciones se podría pasar a un estudio más exhaustivo y detallado empleando procedimientos espectroscópicos.

De cara a estudios futuros, sabiendo que el ultravioleta supone un buen trazador de la población estelar joven, si se pudiesen fabricar telescopios con una tecnología más avanzada y una mayor sensibilidad en dicha banda, se podrían caracterizar mejor las poblaciones y su separación. Emplear mejores modelos teóricos para la corrección K también podría ayudar a no perder estadística de datos durante el análisis y a obtener resultados más completos.

Referencias

- Ruido, señal y SNR en astrofotografía amateur.* (7 de octubre de 2016). Obtenido de Sideribus Astrofotografía: <https://www.sideribus.com/blog/ruido-snr-astrofotografia-amateur>
- Ancho equivalente.* (s.f.). Obtenido de https://hmong.es/wiki/Equivalent_width
- Balmer Jump.* (8 de junio de 2021). Obtenido de Wikipedia, The Free Encyclopedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Balmer_jump
- Bulbo galáctico.* (s.f.). Obtenido de Wikipedia, La enciclopedia libre: https://es.wikipedia.org/wiki/Bulbo_gal%C3%A1ctico
- CALIFA: A panoramic view of the properties of galaxies.* (s.f.). Obtenido de CALIFA SURVEY: <https://califa.caha.es>
- Cendrero. (8 de septiembre de 2011). *Cien años del diagrama de Hertzsprung-Russell, el gráfico que organizó las estrellas.* Obtenido de NAUKAS (ciencia, escepticismo y humor): <https://naukas.com/2011/09/08/cien-anos-del-diagrama-de-hertzsprung-russell-el-grafico-que-organizo-las-estrellas/>
- (2023). Datos espectroscópicos (información por comunicación privada). (P. Corcho-Caballero, Editor)
- Corcho-Caballero, P., Ascasibar, Y., F. Sánchez, S., & López-Sánchez, Á. R. (13 enero 2023). *Ageing and Quenching through the ageing diagram: predictions from simulations and observational constraints.* MNRAS.
- Corcho-Caballero, P., Casado, J., Ascasibar, Y., & García Benito, R. (29 julio 2021). *Galaxy evolution on resolved scales: ageing and quenching in CALIFA.* MNRAS.

Cortese, L., Catinella, B., & Smith, R. (2021). *The Dawes Review 9: The role of cold gas stripping on the star formation quenching of satellite galaxies*. Cambridge University Press.

Cuerpo negro. (s.f.). Obtenido de Wikipedia, La enciclopedia libre: https://es.wikipedia.org/wiki/Cuerpo_negro

Diagrama color-color. (s.f.). Obtenido de https://hmong.es/wiki/Color–color_diagram

Ecuación de equilibrio de ionización de Saha. (s.f.). Obtenido de <http://astro.if.ufrgs.br/levato/leyeslte2/SAHA.htm>

Espectroscopía en Astronomía. (s.f.). Obtenido de LibreTexts: [https://espanol.libretexts.org/Fisica/Astronom%C3%ADa_y_Cosmolog%C3%ADa/Libro%3A_Astronom%C3%ADa_\(OpenStax\)/05%3A_Radiaci%C3%B3n_y_espectros/5.03%3A_Espectroscopia_en_Astronom%C3%ADa](https://espanol.libretexts.org/Fisica/Astronom%C3%ADa_y_Cosmolog%C3%ADa/Libro%3A_Astronom%C3%ADa_(OpenStax)/05%3A_Radiaci%C3%B3n_y_espectros/5.03%3A_Espectroscopia_en_Astronom%C3%ADa)

F. López, M. (26 de agosto de 2019). *Evolución Estelar: Secuencia Principal*. Obtenido de AstroAfición: <https://astroaficion.com/2019/08/26/evolucion-estelar-secuencia-principal/>

Formación de estrellas. (s.f.). Obtenido de Astronomía y Desarrollos Tecnológicos, Instituto Geográfico Nacional: <https://astronomia.ign.es/formacion-de-estrellas>

Fotometría. (s.f.). Obtenido de SEA: <https://www.sea-astronomia.es/glosario/fotometria>

Fotometría. (s.f.). Obtenido de Técnicas experimentales en Astrofísica (Universidad Complutense de Madrid): https://webs.um.es/bussons/tea_04_Fotometria.pdf

Galadí Enríquez, D. (1 de marzo de 2022). *Fundamentos de fotometría astronómica*. Obtenido de Agrupación Astronómica de Madrid: <https://www.aam.org.es/fundamentos-de-fotometria-astronomica/>

Hidrógeno-H. (s.f.). Obtenido de LENNTECH:
<https://www.lenntech.es/periodica/elementos/h.htm>

Jansky (unidad). (s.f.). Obtenido de Wikipedia, La enciclopedia libre:
[https://es.wikipedia.org/wiki/Jansky_\(unidad\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Jansky_(unidad))

Kormendy, J., & Kennicutt Jr, R. C. (16 julio 2004). *Secular Evolution and the Formation of Pseudobulges in Disk Galaxies*. arxiv (Cornell University).

La espectroscopia en la astronomía. (s.f.). Obtenido de AstroMía:
<https://www.astromia.com/historia/espectrohistoria.htm>

Loveday, J., Norberg, P., & Baldry, I. K. (febrero 2012). *Galaxy and Mass Assembly (GAMA): ugriz galaxy luminosity functions*. ads (astrophysics data system).

Magnitud aparente. (s.f.). Obtenido de Wikipedia, La enciclopedia libre:
https://es.wikipedia.org/wiki/Magnitud_aparente

MaNGA. (s.f.). Obtenido de SDSS: <https://www.sdss4.org/surveys/manga/>

Maragkoudaki, A., Zezas, A., Ashby, M. L., & Willner, S. (19 mayo 2014). *Aperture effects on spectroscopic galaxy activity classification*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.

Martínez Martínez, J. L. (9 de enero de 2018). *El color de las estrellas y el espectro*. Obtenido de Astronomía para todos:
<https://astronomiaparatodos.com/2018/01/09/el-color-de-las-estrellas-y-el-espectro/>

Peng, Y., Maiolino, R., & Cochrane, R. (14 mayo 2015). *Strangulation as the primary mechanism for shutting down star formation in galaxies*. Nature.

Project overview. (s.f.). Obtenido de Galaxy And Mass Assembly: <http://www.gama-survey.org>

Richer, M. (13 de septiembre de 2022). *Sistemas fotométricos*. Obtenido de <http://www.astrosen.unam.mx/~richer/docencia/tecnicas/sistemafot.pdf>

Richmond, M. (s.f.). *Astronomical "color"*. Obtenido de <http://spiff.rit.edu/classes/phys440/lectures/color/color.html>

Sistema fotométrico. (s.f.). Obtenido de https://hmong.es/wiki/Photometric_system

Taverna, M. A. (diciembre de 2014). *Función de luminosidad de galaxias a partir de corrimientos al rojo fotométricos*. Obtenido de Universidad Nacional de Córdoba: [https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/2785/TE%20A%20T_%20Taverna.pdf?sequence=1#:~:text=La%20corrección%20K%2C%20K\(z,sistema%20en%20receso%20a%20z%20%3D%200](https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/2785/TE%20A%20T_%20Taverna.pdf?sequence=1#:~:text=La%20corrección%20K%2C%20K(z,sistema%20en%20receso%20a%20z%20%3D%200)

The IllustrisTNG project. (s.f.). Obtenido de <https://www.tng-project.org>

Wright, A. H., Robotham, A. S., & Bourne, N. e. (12 abril 2016). *Galaxy And Mass Assembly: accurate panchromatic photometry from optical priors using LAMBDAR*. Monthly Notices of the Astronomical Society.