

La Relación $M_{\star}-\psi-Z_{\star}$

En la “nueva” era de sondeos espectroscópicos

Alfredo J. Mejía^{1,2}

¹Posgrado de Física Fundamental
Universidad de Los Andes

²Centro de Investigaciones de Astronomía

28 de julio de 2017

MOTIVACIÓN I

Los estudios del contenido estelar en las galaxias distantes ($z \sim 3$) solo tienen sentido en el límite de un número significativo de observaciones, pues debido a la gran variedad de fenómenos físicos que tienen lugar en estos sistemas (muchos aún en discusión) y distintas a las escalas temporales y espaciales en que estos ocurren, no es posible resolver las propiedades físicas de galaxias individuales de manera robusta. Por supuesto, las incertidumbres en los ingredientes de los modelos también juegan un papel importante. Aunque en principio en el universo local las galaxias se pueden resolver como imágenes extendidas en una exposición astronómica usando la técnica de la fotometría, la resolución espectral provista por esta clase de sondeos aunada al carácter degenerado del problema limitan considerablemente la información que se puede extraer de estos sondeos. Hoy en día existen sondeos espectroscópicos que proporcionan información espectral mucho más detallada y que permiten resolver espacialmente a las galaxias en el universo local. La disponibilidad de estos datos en efecto nos ha

MOTIVACIÓN II

permitido estudiar en un nivel de detalle sin precedentes las escalas temporales y espaciales de los fenómenos físicos que ocurren en las galaxias a lo largo de la secuencia de Hubble. En este seminario les hablaré en particular de la relación entre la masa estelar, la tasa de formación estelar y la metalicidad estelar (esencialmente el ciclo de la materia bariónica en las galaxias) en la era dorada de sondeos con unidades de campo integral.

EL CICLO DE MASA BARIÓNICA — UNA VISIÓN EMPÍRICA I

Simplemente considerando los tiempos característicos de la evolución de aquellas estrellas que contribuyen al enriquecimiento del medio interestelar, en el cual se formará la siguiente generación de estrellas, uno puede tener una idea de la escala típica de enriquecimiento químico en una galaxia.

Una supernova tipo II que retorna especies químicas más pesadas que el O (e. g. Mg, Ca, Ti y Si) en cuestión de unos 10^7 años. Las supernovas tipo Ia enriquecen el medio en una escala que puede ir desde 10^7 años hasta $\sim 10^9$ años. En las estrellas de baja masa, que pueden vivir por $> 3 \times 10^9$ años muestran evidencia de esta evolución química en sus distribuciones espectrales de energía. En galaxias tempranas estas son las estrellas que dominan su brillo, por lo tanto no es sorprendente que la primera evidencia de una relación entre la edad y la metalicidad de una galaxia se encontrara en estos sistemas.

EL CICLO DE MASA BARIÓNICA — UNA VISIÓN EMPÍRICA II

RELACIÓN EDAD–METALICIDAD. La relación entre la edad y la metalicidad medias ponderadas por el flujo integrado de la galaxia, que son trazadores de la HFE reciente de las galaxias, se ha estudiado de manera extensiva en la literatura reciente. Fue primero observada en galaxias tempranas, aunque la fuerte degeneración entre la ambas propiedades físicas, i. e. la degeneración edad–metalicidad, dificulta la interpretación de esta relación (Worthey, [1994](#)). La mayor parte de los estudios posteriores se concentró en sistemas tempranos, incluyendo bulbos de galaxias tardías (Proctor y Sansom, [2002](#); Terlevich y Forbes, [2002](#)), probablemente debido a que ambos, los modelos de síntesis de poblaciones y los índices espectrales usados para estimar la edad y la metalicidad, favorecían particularmente el estudio de estos sistemas. Sin embargo, poco después Gallazzi y col. ([2005](#)) presentó un análisis de la relación edad–metalicidad que incluía galaxias tardías. Sus resultados se pueden resumir como sigue: ambos, la edad y la metalicidad

EL CICLO DE MASA BARIÓNICA — UNA VISIÓN EMPÍRICA III

están correlacionados con la masa estelar, aunque la fuerza de dicha correlación depende fuertemente del rango de masa. En general, las galaxias menos masivas están dominadas por poblaciones más jóvenes y menos ricas en metales pero con una dispersión estadística más grande, mientras que las más masivas están dominadas por poblaciones más viejas y más ricas en metales con dispersión estadística menor, esto último en acuerdo con los estudios previos de galaxias tempranas. En el caso de las galaxias más masivas, la relación edad-metalicidad sugiere que estas se forman en escalas de tiempo más cortas (~ 1 Gaño) que sus homólogas menos masivas. Las galaxias menos masivas, por otro lado, se distribuyen en el plano edad-metalicidad dependiendo del tipo: dominadas por disco o dominadas por esferoides. Esto evidencia que la HFE presente podría depender de parámetros estructurales y/o fenómenos locales en estos sistemas. Es importante notar, sin embargo, para las galaxias con formación estelar

EL CICLO DE MASA BARIÓNICA — UNA VISIÓN EMPÍRICA IV

reciente, determinar la metalicidad es particularmente complicado, pues los trazadores de metalicidad en poblaciones jóvenes suelen ser débiles en el rango óptico debido al efecto del *outshining* (e.g., Conroy, [2013](#)).

RELACIÓN MASA–METALICIDAD. Sin embargo, en los sistemas con formación estelar reciente, es particularmente sencillo estimar la metalicidad del MIE en fase de gas debido a la presencia de la emisión del gas. Tremonti y col. ([2004](#)) estimaron la relación masa–metalicidad en una muestra de galaxias con formación estelar, usando como trazador de la metalicidad la abundancia de oxígeno en unidades de $12 + \log \text{O}/\text{H}$ medida de la emisión del gas en varias líneas prohibidas (i.e. usando trazadores de la metalicidad en el medio interestelar), encontró una estrecha relación entre la metalicidad y la masa estelar en galaxias con formación estelar, donde las galaxias menos masivas eran también menos ricas en metales, mientras que las más masivas eran más ricas en metales, un resultado en acuerdo con estudios previos.

EL CICLO DE MASA BARIÓNICA — UNA VISIÓN EMPÍRICA V

Dos hipótesis competían para explicar el origen físico de la relación masa-metalicidad. Si es que las galaxias más masivas forman una fracción de estrellas mayor que sus contrapartes menos masivas, en el mismo rango de tiempo, entonces la relación indica una secuencia de astración, i.e. las estrellas formadas en las galaxias más masivas enriquecen el medio más eficientemente, mientras que las galaxias menos masivas encapsulan los metales por más tiempo en las estrellas. Si es que la eficiencia de la tasa de formación estelar es irrespectiva de la masa estelar, entonces las galaxias menos masivas de alguna forma han perdido de manera selectiva los metales, tal vez mediante vientos galácticos. Evidencia de que la fracción másica de gas decrece con la masa estelar existe (Bell y de Jong, [2000](#)) y podría explicar la relación masa-metalicidad como que las galaxias menos masivas están menos enriquecidas en metales, i.e. son menos eficientes formando estrellas. Por otra parte, existe evidencia también de que las

EL CICLO DE MASA BARIÓNICA — UNA VISIÓN EMPÍRICA VI

galaxias *star-burst* sufren de fuertes vientos galácticos, que el medio intracúmulo y el medio intergaláctico están está enriquecidos en metales. De acuerdo con las expectativas de un modelo de caja cerrada, la metalicidad está directamente relacionada con el *yield* estelar de la siguiente manera:

$$Z = y \ln \left[\mu_{\text{gas}}^{-1} \right],$$

donde y es el *yield* y μ_{gas} es la fracción de masa en gas. Suponiendo que y es constante (i. e. la TFE decrece **continuamente** en el tiempo). Dada una fracción de metales Z y una fracción de masa en gas μ_{gas} , usando esta relación se puede calcular el *yield efectivo*, i. e. el *yield* producido por las estrellas para observar *al menos* la metalicidad Z . Si el modelo de caja cerrada efectivamente describe a las galaxias tardías como las de la muestra de Tremonti y col., entonces $y_{\text{efectivo}} = y$ independientemente de la masa bariónica. Sin embargo, lo que se observa es que y_{efectivo} decrece con la

EL CICLO DE MASA BARIÓNICA — UNA VISIÓN EMPÍRICA VII

masa bariónica. Este hallazgo se interpreta como que la relación masa-metalicidad tiene un origen no solo en el fenómeno de formación estelar y en la subsiguiente evolución química, sino también en fenómenos reguladores en el MIE. El hecho de que se ha observado que el medio intergaláctico está enriquecido y que las galaxias *star-burst* sufren fuertes vientos galácticos que superan la velocidad de escape, soportan esta hipótesis para explicar esta relación de escala.

Algunos aspectos de estas dos escalas quedaban sin explicarse completamente y/o estaban plagadas de incertidumbres que limitaban una clara interpretación. Las fuentes de incertidumbres más importantes eran:

EL CICLO DE MASA BARIÓNICA — UNA VISIÓN EMPÍRICA VIII

Incertidumbres observacionales. Probablemente el efecto sistemático más importante en estos estudios es el efecto de apertura. Es bien sabido que existen gradientes radiales en las propiedades de las galaxias, por lo tanto, estudiar las relaciones entre las propiedades físicas ‘integradas’, supone aproximaciones que deben tomarse en cuenta durante la interpretación de dichas relaciones. Más cuidado aún se debe tener cuando se comparan propiedades integradas con diferentes aperturas. En este sentido las galaxias tempranas han ofrecido mejores posibilidades, pues exhiben gradientes menos en su contenido estelar como función de su radio. Las galaxias tardías por otro lado, no solo muestran gradientes más pronunciados en su contenido estelar, también tienen brillos superficiales típicamente menores y por lo tanto requieren tiempos de exposición más prolongados para alcanzar determinada S/N . Una alta S/N es deseable en estos sistemas para determinar de manera confiable la metalicidad estelar

EL CICLO DE MASA BARIÓNICA — UNA VISIÓN EMPÍRICA IX

usando rasgos espectrales como en Gallazzi y col. (2005), generalmente más débiles que en galaxias tempranas. Resolución espacial es deseable para estudios de galaxias tardías para interpretar de manera adecuada las relaciones de escala, i. e. tomando en cuenta los efectos de gradientes radiales y de ángulo de inclinación.

Incertidumbres en los modelos. Las galaxias tempranas de nuevo han sido favorecidas en el sentido de los modelos que usamos para interpretar su contenido estelar. Una población estelar simple por lo general es buena aproximación en estos sistemas, pues la relación masa luminosidad (en el óptico) evoluciona poco en poblaciones más viejas que unos pocos Gaños evolucionando pasivamente. Las galaxias tardías, por otro lado suponen retos que dificultan la interpretación de sus propiedades integradas como ya vimos en el punto anterior. Adicionalmente modelos de HFE más complejos deben adoptarse para interpretar de manera adecuada su emisión en el

EL CICLO DE MASA BARIÓNICA — UNA VISIÓN EMPÍRICA X

espectro óptico, considerando otras componentes además de la estelar, como por ejemplo el contenido de polvo y de gas. Es costumbre estudiar estas componentes por separado, probablemente debido a la ausencia de modelos de poblaciones estelares que incluyan de manera consistente la emisión del gas, la absorción. El efecto del *outshining* aunado al efecto de apertura atenta contra la interpretación de la masa estelar (usualmente menor que la masa real integrada de la galaxia) y de la metalicidad estelar. Varios intentos se han hecho por superar ambas limitaciones usando la resolución espacial provista por observaciones fotométricas (Sorba y Sawicki, [2015](#)) y sondeos en el cercano infrarrojo, donde el dicho efecto se espera sea menor (Eminian y col., [2008](#)). Sin embargo, las incertidumbres en el modelado de la emisión de las estrellas en la fase TP-AGB en el cercano infrarrojo de nuevo dificultan la interpretación (Zibetti y col., [2013](#)).

EL CICLO DE MASA BARIÓNICA — VISTO POR CALIFA I

La madurez alcanzada por los sondeos con IFU en la última década ha permitido la construcción de muestras de galaxias de todas las clases espectrales. La culminación del sondeo CALIFA (Sánchez y col., [2012](#), [2016](#)) ha significado un hito en este sentido, pues con el tercer *public data release* se ha puesto a la disposición de la comunidad astronómica $\sim 600 \times 1000$ espectros en el rango $\sim 3000\text{—}7000\text{ \AA}$ para ~ 600 galaxias en el universo local. Ante las incertidumbres y las preguntas que quedaban abiertas respecto a la relación entre la edad, la masa y la metalicidad, sobre todo en sistemas con formación estelar, CALIFA presenta una oportunidad inigualable. Los estudios que buscaban desentrañar el carácter local de las relaciones de escala no tardaron en aparecer:

EL CICLO DE MASA BARIÓNICA — VISTO POR CALIFA II

RELACIÓN MASA-METALICIDAD. Rosales-Ortega y col. (2012) estudia por primera vez la relación entre la masa, la metalicidad y la tasa de TFE específica en $\sim 2\text{ k}$ regiones HII segregadas en una muestra de galaxias tardías sondeadas por CALIFA. Encontraron que la densidad superficial de masa y la metalicidad en las regiones HII están directamente correlacionadas y ambas propiedades inversamente correlacionadas con la TFE específica. Rosales-Ortega y col. demostraron que la relación masa-metalicidad encontrada en estudios usando datos integrados (con efectos de apertura incluidos) puede explicarse como la suma de dos efectos: un crecimiento tipo *inside-out*, en el que la región central de las galaxias se forma primero y luego la formación estelar se extiende sobre el disco; y un efecto de *downsizing* local, donde las regiones más masivas forman estrellas más rápido y por lo tanto en una escala temporal más corta. Ambos fenómenos a su vez explican los gradientes radiales observados en galaxias con discos.

EL CICLO DE MASA BARIÓNICA — VISTO POR CALIFA III

Es interesante notar también que el hecho de que la relación masa-metalicidad tenga un origen local sugiere que esta es en realidad una secuencia en astración, i. e., en las zonas de mayor formación estelar, los metales quedan atrapados en el interior de las estrellas de baja masa.

RELACIÓN MASA-METALICIDAD-TFE. Esta relación, también llamada relación fundamental (o plano fundamental) de masa-metalicidad ya había sido estudiada (Lara-López y col., [2010](#)) y tiene la siguiente forma: a una masa fija, las galaxias con mayor TFE tienen menor metalicidad y para galaxias de baja masa esta dependencia con la TFE es más fuerte. Existen varios fenómenos que pueden alterar la abundancia química presente en una galaxia: el enriquecimiento es producido en primer lugar por la formación y la evolución estelar, la acreción de material pristino del medio intergaláctico que diluye y disminuye la metalicidad, y las corrientes de salida que eyectan material enriquecido al medio intergaláctico. Sánchez y col. ([2013](#))

EL CICLO DE MASA BARIÓNICA — VISTO POR CALIFA IV

mostró que la correlación entre la TFE (específica) y la relación masa-metalicidad (local e integrada) es producto de ambos, el sesgo de apertura introducido por los sondeos espectroscópicos tradicionales y por la correlación que existe entre la (densidad superficial de) masa y la TFE (específica). Estos resultados son consistentes con que las galaxias dominadas por disco evolucionan de forma secular, como cajas cerradas, donde el reciclaje tiene lugar en escalas temporales más cortas que las dinámicas (e.g. correspondientes a vientos galácticos). De nuevo, consistente con una secuencia en astración.

Prólogo – efectos locales *versus* globales I

González Delgado y col. (2014) estudió los gradientes poblacionales en galaxias dominadas por discos y en galaxias dominadas por esferoides. En el mismo estudio concluyen que la HFE puede ser modulada por la masa estelar global o por la densidad de masa estelar, dependiendo de si la galaxia es dominada por una componente esferoidal o por un disco. González Delgado y col. (2014) estudió el rol de los efectos locales en la relación masa-metalicidad, en el que ambos, la componente estelar y la componente de gas eran considerados. Ellos lograron recuperar las mismas tendencias en la relación masa-metalicidad (en fase de gas y estelar). Mostraron que la metalicidad en fase de gas, es trazador de la metalicidad en las poblaciones jóvenes, como es de esperarse en sistemas con formación estelar reciente. La relación masa-metalicidad como función de la distancia al centro de las galaxias mostraba claramente una dispersión en metalicidad que era claramente modulada por los efectos globales medidos por la masa estelar integrada de las galaxias. A nivel local, por otro lado la densidad

Prólogo – efectos locales *versus* globales II

superficial de masa estelar correlaciona con la metalicidad estelar, como encontró Sánchez y col. (2013). Más interesante aún, la dependencia de la relación masa-metalicidad depende del radio dentro de la galaxia donde, en acuerdo con los resultados en González Delgado y col. (2014), la densidad de masa regula la metalicidad estelar, mientras que en las regiones más internas y por lo tanto más densas, la masa global regula la metalicidad.

Prólogo – Expectativas para el futuro I

Los procesos locales responsables de regular la formación estelar y el enriquecimiento químico, son probablemente los tópicos más relevantes en la literatura extragaláctica en la actualidad. Mucho se ha avanzado desde el punto de vista observacional con los sondeos de IFS. En este sentido, CALIFA ha marcado un hito, pues ha puesto a la disposición de la comunidad científica espectroscopía de campo integrado de una muestra de ~ 600 galaxias distribuídas a lo largo de la clasificación de Hubble. Ahora podemos decir con seguridad que ambos, los efectos globales y los locales determinan la HFE en las galaxias y que el paradigma de caja cerrada comunmente adoptado para decir algo respecto al enriquecimiento químico, no tiene cabida de manera universal, no entre galaxias ni dentro de una misma galaxia. Quedan aún incertidumbres sobre el rol relativo que juegan la TFE, los vientos galácticos y el acrecimiento de material enriquecido presente en el medio intergaláctico. El *feedback* estelar se ha invocado para explicar la ausencia de metales en el medio interestelar (Tremonti y col., [2004](#); Kobayashi, Springel

Prólogo – Expectativas para el futuro II

y White, [2007](#)). Las variaciones en la función inicial de masa se han invocado como un mecanismo adicional para explicar la ausencia de metales en las galaxias menos masivas (Köppen, Weidner y Kroupa, [2007](#)). Todos estos mecanismos se ha medido tanto en observaciones como en simulaciones en estudios independientes, mas aún no son mutuamente excluyentes. Determinar cual(es) y bajo que circunstancias actúan para regular la HFE en las galaxias, será tópico de investigación por los próximos años.

ANTECEDENTES DE SONDEOS CON IFU I

El problema de adquisición de imágenes astronómicas es, en el sentido general, un problema de dos dimensiones espaciales y una dimensión espectral $(x, y; \lambda)$. Desafortunadamente, debido a limitaciones de ingeniería, la mayoría de los esfuerzos que ofrecen una resolución espectral $R \sim 1000$, están limitados a una dimensión espacial, i. e. $(x; \lambda)$. El uso del formato *long-slit* (rendija) resuelve parcialmente el problema de la dimensión perdida por espectrógrafos convencionales: si la dispersión de la luz proveniente de las fuentes se hace perpendicular al largo de la rendija, es posible en principio obtener espectros de distintas regiones de un mismo objeto extendido (e. g. una galaxia en el Universo local) o de varios objetos adyacentes en su proyección en el cielo. Existen sin embargo varias limitaciones que complican la adquisición efectiva de la segunda dimensión usando este formato, todas relacionadas con el hecho de que las componentes espaciales y la espectral están correlacionadas.

ANTECEDENTES DE SONDEOS CON IFU II

Las unidades de campo integrado (IFU en inglés Vanderriest, [1980](#)) aparecieron en escena para resolver las limitaciones de resolución espacial de los previos intentos por registrar espectros de los objetos celestes. Vanderriest presentó un primer prototipo de IFU que consistía en un arreglo de fibras ópticas con forma hexagonal capaz de resolver espacialmente objetos en un campo de unas pocas decenas de segundos de arco ($\sim 20''$) y bajo brillo superficial. Tal dispositivo permitiría estudios de objetos cercanos siempre que la resolución espectral no fuera un factor importante para su desarrollo.

A mediados de los 90s aparecieron los primeros resultados obtenidos a partir del análisis de datos de IFU como fuera concebida por Courtes ([1982](#)) (véase Bacon y col., [1995](#), para un resumen de los hallazgos con el dispositivo TIGER).

- Primera medida de campos de velocidad estelar en la región central de galaxias cercanas (Bacon y col., [1995](#)).

ANTECEDENTES DE SONDEOS CON IFU III

- Prueba de que las componentes de la cruz de Einstein (2237+0305) son en realidad imágenes múltiples del mismo objeto (Fitte y Adam, [1994](#)).
- Se logró resolver y mapear fuentes de emisión y continuo en NGC 1275 (Ferruit y Pecontal, [1994](#)).
- etc.

Las principales limitaciones eran el campo de visión, que seguía siendo demasiado pequeño para un estudio sistemático de una fuente extendida y la resolución espectral.

En los últimos 20 años las IFU han alcanzado madurez y han permitido estudios sistemáticos de muestras completas de galaxias en el universo local, abarcando en la mayoría de los casos la totalidad de la imagen proyectada de los objetos. En buena parte de lo que resta de este seminario hablaré de los resultados más importantes que estos sondeos han permitido y en qué sentido han cambiado los paradigmas en el contexto de la formación y la evolución de las galaxias.

SONDEOS CON IFU EN LA ACTUALIDAD I

Las IFU de la actualidad (< 2012) presentan las siguientes ventajas frente a la primera generación de IFUs:

- Tienen grandes campos de visión, usualmente permitiendo abarcar la imagen proyectada de galaxias a $z \sim 0,05$
- Tienen una mejor función de respuesta que permite integrar espectros de fuentes más débiles en exposiciones cortas ~ 30 min.

. Aún así, dos principales desventajas permanecen: la limitada resolución espectral y solo una fuente por exposición puede observarse.

CARACTERÍSTICAS DE LOS DATOS I

Los datos que se obtienen viven en el espacio (x, y, λ) , por lo tanto la información que permitiría construir mapas de determinada información espectral, a una resolución espacial fija, depende del rango y de la resolución espectral. Desde el punto de vista poblacional, probablemente los estudios más atractivos tienen que ver con la dependencia ambiental de las propiedades físicas de las galaxias, i. e., cómo cambian los promedios en la edad, la composición química, las propiedades del polvo, tasa de formación estelar (TFE), como función de la densidad bariónica, por ejemplo y a su vez como cambian estas propiedades de una galaxia a otra. Por supuesto, como mostré en el seminario anterior, los resultados de sondeos con IFU han permitido el refinamiento de los modelos dinámicos de galaxias y una clasificación morfológica basada en las propiedades físicas de las galaxias. El seminario anterior fue intencionalmente sesgado a galaxias tempranas porque la mayoría de los esfuerzos de los sondeos con IFU están también sesgados de la misma manera. Construir muestras de galaxias que permitan estudios cinemáticos

CARACTERÍSTICAS DE LOS DATOS II

sistemáticos necesariamente impondrá un sesgo hacia galaxias tempranas. Ahora mostraré los resultados de los estudios poblacionales, en los que la secuencia de Hubble se abarca en completitud. Por lo tanto los resultados que mostraré estarán claramente sesgados hacia los de CALIFA, que ya ha completado el sondeo de la muestra







Referencias I

- 📄 Vanderriest, C. (1980). "A fiber-optics dissector for spectroscopy of nebulosities around quasars and similar objects". En: *PASP* 92, págs. 858–862.
- 📄 Courtes, G. (1982). "An Integral Field Spectrograph (IFS) for Large Telescopes". En: *IAU Colloq. 67: Instrumentation for Astronomy with Large Optical Telescopes*. Ed. por C. M. Humphries. Vol. 92. Astrophysics and Space Science Library, pág. 123.
- 📄 Ferruit, P. y E. Pecontal (1994). "Sub-arcsecond resolution 2D spectrography of the central regions of NGC 1275 with TIGER". En: *A&A* 288, págs. 65–76.
- 📄 Fitte, C. y G. Adam (1994). "Sub-arcsecond integral field spectroscopy of the Einstein Cross 2237+0305: Lensing and microlensing effects". En: *A&A* 282, págs. 11–18.
- 📄 Worthey, G. (1994). "Comprehensive stellar population models and the disentanglement of age and metallicity effects". En: *ApJS* 95, págs. 107–149.

Referencias II

- 📄 Bacon, R. y col. (1995). "3D spectrography at high spatial resolution. I. Concept and realization of the integral field spectrograph TIGER." En: *A&AS* 113, pág. 347.
- 📄 Bell, E. F. y R. S. de Jong (2000). "The stellar populations of spiral galaxies". En: *MNRAS* 312, págs. 497-520.
- 📄 Proctor, R. N. y A. E. Sansom (2002). "A comparison of stellar populations in galaxy spheroids across a wide range of Hubble types". En: *MNRAS* 333, págs. 517-543.
- 📄 Terlevich, A. I. y D. A. Forbes (2002). "A catalogue and analysis of local galaxy ages and metallicities". En: *MNRAS* 330, págs. 547-562.
- 📄 Tremonti, C. A. y col. (2004). "The Origin of the Mass-Metallicity Relation: Insights from 53,000 Star-forming Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey". En: *ApJ* 613, págs. 898-913.
- 📄 Gallazzi, A. y col. (2005). "The ages and metallicities of galaxies in the local universe". En: *MNRAS* 362, págs. 41-58.

Referencias III

-  Kobayashi, C., V. Springel y S. D. M. White (2007). "Simulations of Cosmic Chemical Enrichment". En: *MNRAS* 376, págs. 1465–1479.
-  Köppen, J., C. Weidner y P. Kroupa (2007). "A possible origin of the mass-metallicity relation of galaxies". En: *MNRAS* 375, págs. 673–684.
-  Eminian, C. y col. (2008). "Physical interpretation of the near-infrared colours of low-redshift galaxies". En: *MNRAS* 384, págs. 930–942.
-  Lara-López, M. A. y col. (2010). "A fundamental plane for field star-forming galaxies". En: *A&A* 521, L53, pág. L53.
-  Rosales-Ortega, F. F. y col. (2012). "A New Scaling Relation for H II Regions in Spiral Galaxies: Unveiling the True Nature of the Mass–Metallicity Relation". En: *ApJ* 756, L31, pág. L31.
-  Sánchez, S. F. y col. (2012). "CALIFA, the Calar Alto Legacy Integral Field Area survey. I. Survey presentation". En: *A&A* 538, A8, A8.

Referencias IV

- Conroy, C. (2013). "Modeling the Panchromatic Spectral Energy Distributions of Galaxies". En: *ARA&A* 51, págs. 393–455.
- Sánchez, S. F. y col. (2013). "Mass-metallicity relation explored with CALIFA. I. Is there a dependence on the star-formation rate?" En: *A&A* 554, A58, A58.
- Zibetti, S. y col. (2013). "Near-infrared spectroscopy of post-starburst galaxies: a limited impact of TP-AGB stars on galaxy spectral energy distributions". En: *MNRAS* 428, págs. 1479–1497.
- González Delgado, R. M. y col. (2014). "Insights on the Stellar Mass–Metallicity Relation from the CALIFA Survey". En: *ApJ* 791, L16, pág. L16.
- González Delgado, R. M. y col. (2014). "The star formation history of CALIFA galaxies: Radial structures". En: *A&A* 562, A47, A47.
- Sorba, R. y M. Sawicki (2015). "Missing stellar mass in SED fitting: spatially unresolved photometry can underestimate galaxy masses". En: *MNRAS* 452, págs. 235–245.

Referencias V

- 📄 Sánchez, S. F. y col. (2016). "CALIFA, the Calar Alto Legacy Integral Field Area survey. IV. Third public data release". En: *A&A* 594, A36, A36.