



# Estudio del enriquecimiento químico de galaxias masivas en simulaciones numéricas cosmológicas

M.E. De Rossi<sup>1,2</sup>, S.E. Grimozzi<sup>3</sup>, R. Santamaria<sup>3</sup>, M.C. Tomasini<sup>3</sup>, L.J. Zenocratti<sup>4,5</sup> & M.C. Zerbo<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Astronomía y Física del Espacio, CONICET-UBA, Argentina

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA, Argentina

<sup>3</sup> Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA, Argentina

<sup>4</sup> Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, Argentina

<sup>5</sup> Instituto de Astrofísica de La Plata, CONICET-UNLP, Argentina

Contacto / mariaemilia.dr@gmail.com

**Resumen** / Distintos estudios sugieren que las galaxias masivas (i.e., con masas estelares  $M_{\star} \gtrsim 10^{10} M_{\odot}$ ) parecen seguir relaciones de escala asociadas a la metalicidad con características que difieren de aquellas correspondientes a sistemas menos masivos. En este trabajo, analizamos el origen del *scatter* de la relación masa-metalicidad (MZR, por sus siglas en inglés) de galaxias masivas mediante el uso de las simulaciones cosmológicas EAGLE (*Evolution and Assembly of GaLaxies and their Environment*). Encontramos que, a  $M_{\star}$  fija, la metalicidad de la fase gaseosa de las galaxias tiende a decrecer, en promedio, con la edad estelar de las mismas y la masa asociada a agujeros negros supermasivos. Además, en consistencia con trabajos previos, hallamos una clara dependencia del enriquecimiento químico de las galaxias con su morfo-cinemática. En particular, para galaxias de  $M_{\star}$  similar, aquellas con menor soporte rotacional muestran componentes gaseosas de menor metalicidad, siendo esta tendencia más fuerte a medida que aumenta  $M_{\star}$ . De acuerdo a nuestros resultados preliminares, los principales procesos que determinarían la MZR de galaxias masivas serían el *feedback* de núcleos activos de galaxias y las fusiones entre galaxias.

**Abstract** / Different studies suggest that massive galaxies (i.e., with stellar masses  $M_{\star} \gtrsim 10^{10} M_{\odot}$ ) seem to follow scaling relations associated with metallicity with characteristics that differ from those corresponding to less massive systems. In this work, we analyze the origin of the scatter of the mass-metallicity relation (MZR) of massive galaxies using the EAGLE (*Evolution and Assembly of GaLaxies and their Environment*) cosmological simulations. We find that, at a fixed  $M_{\star}$ , the gas-phase metallicity of galaxies tends to decrease, on average, with their stellar age and the mass associated with supermassive black holes. Furthermore, consistently with previous works, we find a clear dependence of the chemical enrichment of galaxies on their morfo-kinematics. In particular, for galaxies of similar  $M_{\star}$ , those with less rotational support show gas components with lower metallicities, this trend being stronger as  $M_{\star}$  increases. According to our preliminary results, the main processes that would determine the MZR of massive galaxies would be the *feedback* of active galactic nuclei and galaxy mergers.

**Keywords** / galaxies: abundances — galaxies: evolution — galaxies: formation — galaxies: star formation — galaxies: fundamental parameters — methods: numerical

## 1. Introducción

El estudio de las abundancias químicas de las galaxias puede aportar claves únicas sobre sus historias evolutivas. En particular, el origen de la relación entre la masa estelar ( $M_{\star}$ ) y la metalicidad de la fase gaseosa\* (MZR, por sus siglas en inglés) de las galaxias ha sido motivo de un intenso debate durante las últimas décadas, tanto desde el punto de vista observacional como teórico (e.g. Tremonti et al., 2004; Lara-López et al., 2010; De Rossi et al., 2017; Sánchez Almeida & Dalla Vecchia, 2018; Maiolino & Mannucci, 2019; Torrey et al., 2019).

En este contexto, se ha reportado que las galaxias masivas ( $M_{\star} \gtrsim 10^{10} M_{\odot}$ ) parecen seguir relaciones de escala asociadas a la metalicidad con características dis-

tintas de aquellas correspondientes a sistemas menos masivos. Por un lado, es bien conocido el hecho de que la MZR se aplana para  $M_{\star} \gtrsim 10^{10} M_{\odot}$  (e.g. Tremonti et al., 2004). Por otro lado, estudios recientes basados en simulaciones numéricas (Zenocratti et al., 2020) predicen que, a  $M_{\star}$  fija, las galaxias masivas con mayor metalicidad en su componente gaseosa tienden a presentar, en promedio, mayor soporte rotacional y una mayor actividad de formación estelar. Por el contrario, las galaxias de menor masa muestran tendencias opuestas (ver, también, Zenocratti et al., 2022).

Mediante el uso de las simulaciones cosmológicas EAGLE (*Evolution and Assembly of GaLaxies and their Environment*), en este trabajo, extendemos estudios previos, indagando más detalladamente el origen del *scatter* de la MZR. Nuestro objetivo es aportar nuevas claves que contribuyan a explicar las tendencias halladas por Zenocratti et al. (2020).

\*Usualmente trazada por la abundancia de oxígeno,  $12 + \log(\text{O}/\text{H})$ , en regiones de formación estelar (ver, e.g., Maiolino & Mannucci 2019).

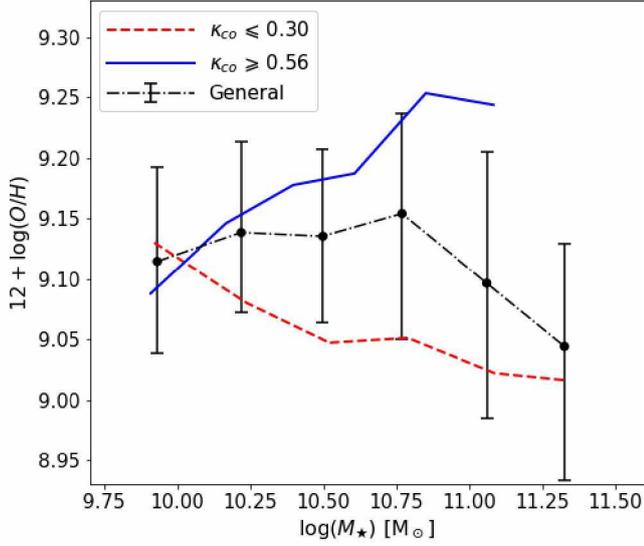


Figura 1: MZR para galaxias simuladas de alta masa a  $z = 0$ . La línea de trazo y punto negra muestra la relación para la muestra completa de galaxias de alta masa, con las barras de error indicando los percentiles 25 % y 75 % de la distribución. La línea continua azul representa la relación para galaxias cuya componente estelar está dominada por rotación, mientras que la línea de trazos roja corresponde a galaxias con componente estelar dominada por dispersión de velocidades.

## 2. Simulaciones y muestra de galaxias

Las simulaciones EAGLE (Schaye et al., 2015; Crain et al., 2015) son un conjunto de simulaciones hidrodinámicas que adoptan una cosmología  $\Lambda$ CDM:  $\Omega_\Lambda = 0.693$ ,  $\Omega_m = 0.307$ ,  $\Omega_b = 0.04825$  y  $h = 0.6777$  (Planck Collaboration, 2015). Incluyen procesos físicos relevantes para estudiar la evolución de galaxias, como enfriamiento radiativo, formación estelar, enriquecimiento químico y *feedback* de supernovas y núcleos activos de galaxias (AGN), entre otros. En este trabajo, utilizamos la simulación llamada “Ref-L0100N1504” (ver Schaye et al. 2015), correspondiente a una caja cúbica de 100 Mpc de lado en coordenadas comóviles. La resolución en masa inicial es de  $1.81 \times 10^6 M_\odot$  y  $9.7 \times 10^6 M_\odot$ , para bariones y materia oscura, respectivamente.

Para este trabajo, se seleccionaron, en primer lugar, galaxias con  $M_\star \geq 10^{9.8} M_\odot$  a corrimiento al rojo  $z = 0$ . Con el fin de disminuir la influencia de efectos ambientales (e.g. *ram-pressure stripping*), se requirió, además, que la muestra a analizar esté constituida sólo por las galaxias centrales de sus halos de materia oscura. Por otro lado, considerando que las abundancias de oxígeno observadas suelen derivarse de regiones H II, estimamos la metalicidad de una dada galaxia a partir de la abundancia de oxígeno de su componente gaseosa en condiciones de formar estrellas (ver De Rossi et al., 2017, por ejemplo). Y, para evitar problemas de resolución numérica, sólo incluimos en nuestra muestra final de galaxias a aquellos sistemas con una masa  $M_{\text{SF,g}} \geq 10^{7.75} M_\odot$  de gas en condiciones de formar estrellas.

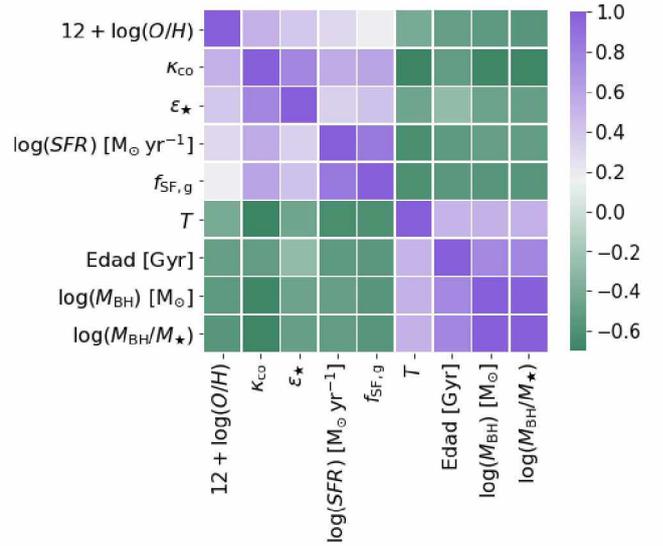


Figura 2: Matriz de correlación de diversas propiedades de galaxias simuladas con  $M_\star = 10^{10.6-10.8} M_\odot$ . La escala de colores representa los coeficientes de correlación. Ver el texto para mayores detalles.

## 3. Resultados

### 3.1. Relaciones entre propiedades fundamentales de galaxias masivas

En la Fig. 1 se muestra la MZR para galaxias con  $M_\star \gtrsim 10^{10} M_\odot$ . Se aprecia la relación para la población general y se comparan, también, los resultados obtenidos al separar a la muestra general según la fracción de energía cinética estelar invertida en rotación ( $\kappa_{\text{co}}$ ). En acuerdo con Zenocratti et al. (2020), para  $M_\star \approx 10^{10} M_\odot$ , las galaxias dominadas por rotación y dispersión de velocidades presentan metalicidades similares, mientras que, para  $M_\star > 10^{10} M_\odot$ , las primeras presentan mayores metalicidades que las segundas. Más aún, las galaxias con  $\kappa_{\text{co}} \leq 0.30$  ( $\geq 0.56$ ) describen una MZR mediana con pendiente negativa (positiva).\*\* Estas últimas tendencias, sumadas al incremento del porcentaje de galaxias de bajo  $\kappa_{\text{co}}$  hacia altas masas, genera que la MZR mediana de la población total pase de ser aproximadamente plana para  $M_\star \lesssim 10^{10.75} M_\odot$  a presentar pendiente negativa para masas mayores.

La Fig. 2 representa los coeficientes de correlación entre diferentes propiedades de galaxias con masas en el rango  $M_\star \approx 10^{10.6-10.8} M_\odot$ . Las propiedades evaluadas son:  $12 + \log(\text{O}/\text{H})$ ,  $\kappa_{\text{co}}$ , elipticidad de la componente estelar ( $\epsilon_\star$ ), tasa de formación estelar (SFR, por sus siglas en inglés), fracción de gas en condiciones de formar estrellas ( $f_{\text{SF,g}}$ ), triaxialidad de la componente estelar ( $T$ ), edad estelar promedio, masa ( $M_{\text{BH}}$ ) asociada

\*\*Notamos que Zenocratti et al. (2020) hallaron una pendiente despreciable (positiva) para su muestra de menor (mayor)  $\kappa_{\text{co}}$ . Las diferencias respecto del presente trabajo son atribuibles a los distintos criterios de selección usados por Zenocratti et al. (2020), cuyas muestras, por ejemplo, incluyen galaxias satélites.

\*\*\*  $f_{\text{SF,g}} = M_{\text{SF,g}} / (M_{\text{SF,g}} + M_\star)$ .

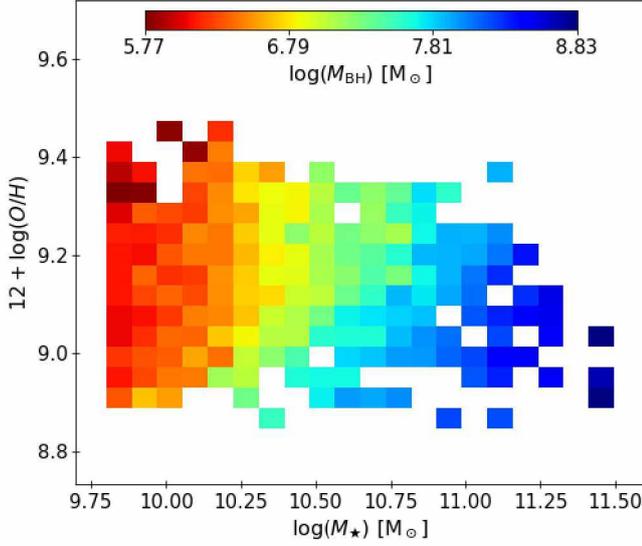


Figura 3: Plano masa-metalicidad coloreado según la masa de agujero negro  $M_{\text{BH}}$ , para la muestra de galaxias simuladas de alta masa a  $z = 0$ .

a agujeros negros supermasivos (SMBHs, por sus siglas en inglés) y  $M_{\text{BH}}/M_{\star}$ . Tendencias similares se obtienen para la matriz de correlación de las galaxias de nuestra muestra en caso de seleccionar otros rangos de  $M_{\star}$  para el análisis.

Se aprecian claramente dos subconjuntos de propiedades que presentan dependencias opuestas. Llamemos  $A$  al subconjunto de las siguientes propiedades:  $12 + \log(\text{O}/\text{H})$ ,  $\kappa_{\text{co}}$ ,  $\epsilon_{\star}$ , SFR y  $f_{\text{SF},g}$ . Y, llamemos  $B$  al subconjunto de propiedades dado por:  $T$ , edad estelar,  $M_{\text{BH}}$  y  $M_{\text{BH}}/M_{\star}$ . Los coeficientes de correlación entre propiedades asociadas al mismo subconjunto (i.e. propiedad de  $A$  y propiedad de  $A$ ; ó, propiedad de  $B$  y propiedad de  $B$ ) son positivos, mientras que los coeficientes de correlación entre propiedades de distintos subconjuntos (i.e. propiedad de  $A$  y propiedad de  $B$ , ó viceversa) son negativos. Considerando en forma general las tendencias obtenidas de la matriz de correlación, se ve que, a medida que  $M_{\text{BH}}$  se vuelve más dominante en una galaxia, es más probable que la misma: (1) presente menor soporte rotacional, (2) sea más esferoidal, (3) tenga una población estelar más envejecida, (4) muestre menor enriquecimiento químico, y (5) tenga menor actividad de formación estelar.

### 3.2. Impacto del *feedback* de AGN y fusiones de galaxias

De Rossi et al. (2017) analizaron simulaciones EAGLE corridas con diversos modelos de *feedback* de AGN y mostraron que tal proceso tiende a favorecer el calentamiento y eyección de gas en galaxias masivas. Como discuten estos autores, esto último favorece el decrecimiento de la actividad de formación estelar y el enriquecimiento químico de las galaxias. Las dependencias halladas en la Sec. 3.1 entre  $M_{\text{BH}}$ , SFR,  $f_{\text{SF},g}$ ,  $12 + \log(\text{O}/\text{H})$  y la edad estelar son consistentes con los estudios previos

mencionados. Más aún, en la Fig. 3, se puede apreciar la distribución de  $M_{\text{BH}}$  en el plano masa-metalicidad para las galaxias de nuestra muestra. Es claro que, a medida que aumenta  $M_{\star}$ , la masa correspondiente a los SMBHs crece, sugiriendo una creciente influencia del *feedback* de AGN para las galaxias de mayor masa. Todos estos resultados sugieren que el *feedback* de AGN es uno de los principales procesos que determinan el enriquecimiento químico de las galaxias masivas y, en particular, el *scatter* de la MZR.

Finalmente, notamos que, adicionalmente al *feedback* de AGN, otro mecanismo relevante en la evolución de galaxias masivas son las fusiones con otros sistemas galácticos. Un análisis preliminar de las historias evolutivas de nuestra muestra de galaxias para  $M_{\star} \approx 10^{10.6-10.8} M_{\odot}$ , indica que más del 70% de las galaxias más esferoidales ( $\kappa_{\text{co}} \leq 0.3$ ) experimentó al menos una fusión significativa (*major merger*, en la literatura en inglés) con otra galaxia desde  $z = 3$ . Por el contrario, para las galaxias soportadas por rotación ( $\kappa_{\text{co}} \geq 0.56$ ), el porcentaje de galaxias que experimentó este tipo de fusiones no supera el  $\sim 35\%$ .

## 4. Conclusiones

En este trabajo, se estudió el enriquecimiento químico de galaxias masivas en las simulaciones cosmológicas EAGLE. Encontramos que, a masa estelar fija, las galaxias con mayor soporte rotacional en su componente estelar presentan mayor metalicidad en su fase gaseosa. Además, las galaxias soportadas por rotación (dispersión de velocidades) presentan una MZR con pendiente positiva (negativa), en promedio. Nuestros resultados sugieren que el *feedback* de AGN y las fusiones de galaxias podrían jugar un rol clave en el origen de las tendencias encontradas.

*Este artículo muestra resultados de un proyecto de investigación grupal y todos los autores han contribuido por igual al presente trabajo.*

*Agradecimientos:* Agradecemos a la Asociación Argentina de Astronomía por permitirnos mostrar nuestros resultados. Agradecemos también al/a la evaluador/a de este artículo por sus constructivos comentarios. We acknowledge the Virgo Consortium for making their simulation data available. The EAGLE simulations were performed using the DiRAC-2 facility at Durham, managed by the ICC, and the PRACE facility Curie based in France at TGCC, CEA, Bruyères-le-Châtel. This work used the DiRAC@Durham facility managed by the Institute for Computational Cosmology on behalf of the STFC DiRAC HPC Facility (www.dirac.ac.uk).

## Referencias

- Crain R.A., et al., 2015, MNRAS, 450, 1937  
 De Rossi M.E., et al., 2017, MNRAS, 472, 3354  
 Lara-López M.A., et al., 2010, A&A, 521, L53  
 Maiolino R., Mannucci F., 2019, A&A Rv, 27, 3  
 Planck Collaboration, 2015, A&A, 594, A13  
 Sánchez Almeida J., Dalla Vecchia C., 2018, ApJ, 859, 109  
 Schaye J., et al., 2015, MNRAS, 446, 521  
 Torrey P., et al., 2019, MNRAS, 484, 5587  
 Tremonti C.A., et al., 2004, ApJ, 613, 898  
 Zenocratti L.J., et al., 2020, MNRAS, 496, L33  
 Zenocratti L.J., et al., 2022, MNRAS, 512, 6164