

Facultad de Ciencias
Departamento de Astrofísica

OBSERVING OUR OWN GALAXY
FROM FAR AWAY: A JWST VIEW OF
MILKY WAY-LIKE GALAXIES

MÁSTER EN ASTROFÍSICA

Trabajo de fin de máster realizado por
Patxi Eguiguren Arrizabalaga

Tutores
Ignacio Martín Navarro
Adriana de Lorenzo-Cáceres Rodríguez

Junio 2024

Índice

Índice	2
1. Resumen del trabajo	3
2. Introducción	5
2.1. Contexto y motivación del trabajo	5
2.2. Evolución de las galaxias	5
2.3. Galaxias tipo Vía Láctea	9
2.4. JWST	10
3. Datos	12
3.1. TNG50	12
3.2. Librería estelar MILES	13
4. Metodología	15
4.1. Selección de partículas estelares	15
4.2. Asociación entre edad y metalicidad de TNG y MILES	16
4.3. Crear espectro sintético a la resolución de JWST a $z=1.5$	17
4.4. Ajuste del espectro con pPXF	19
5. Resultados	23
5.1. Capacidad de recuperación de pPXF: resolución espectral, SNR y regularización.	23
5.2. Poblaciones dominantes y evolución de la galaxia	28
6. Discusión	33
6.1. Límites en la capacidad de recuperación de las poblaciones estelares	33
6.2. Interpretación de la evolución de galaxias tipo Vía Láctea	35
7. Conclusiones	37
8. Bibliografía	38
Bibliografía	38
9. Anexos	42

1. Resumen del trabajo

El objetivo principal de este trabajo es ver cuánta información se puede obtener de un espectro del JWST de una galaxia tipo Vía Láctea en un corrimiento al rojo intermedio. Para ello, se hará una introducción sobre los aspectos necesarios para saber cómo se forma una galaxia y qué factores afectan en la formación estelar, para luego adentrarse en las galaxias tipo Vía Láctea, y acabar con las capacidades instrumentales que tiene JWST.

Para este propósito se usarán los datos de la simulación cosmológica TNG50, a corrimiento al rojo 0, para obtener pesos de los diferentes valores de edad y metalicidad sobre las diferentes partículas estelares. Sin embargo, los espectros se generarán con las SSPs de MILES. Por lo tanto, en la parte de la metodología se determinará cómo se ha llevado a cabo la correspondiente asociación de los valores de edad y metalicidad, además de especificar cómo se ha tratado el espectro para adaptarlo a un corrimiento al rojo de 1.5.

En el desarrollo del espectro también entrarán factores como el SNR (Signal-to-Noise Ratio), la regularización y la resolución espectral, que serán piezas fundamentales para ver cuánta información podemos obtener del ajuste de dicho espectro, ya que para el ajuste, en este trabajo se usa pPXF (Penalized Pixel Fitting). Esta herramienta se explicará en la última parte de la metodología, y se mostrarán los parámetros más relevantes.

Después de hacer el ajuste, seremos capaces de concluir si pPXF puede recrear los resultados de TNG, teniendo en cuenta el SNR, la regularización y la resolución espectral, además de mostrar las limitaciones de la herramienta pPXF. Sumado a esto, se mostrarán las relaciones de los valores de edad y metalicidad con la masa estelar, que servirán para entender mejor la relación entre los diferentes parámetros y que tienen en cuenta los procesos de la formación de la galaxia mencionados en la introducción. Al final, se mostrarán los gráficos obtenidos de la Historia de Formación Estelar (*Star Formation History*) y la Función de Metalicidad dependiente del Tiempo (*Time dependent Metallicity Function*), que servirán para la comprensión de la evolución de las galaxias tipo Vía Láctea.

Para finalizar este trabajo, se valorarán los resultados con investigaciones previas que hayan usado herramientas parecidas, de tal forma se le dará una consistencia a los resultados obtenidos y se establecerán cuáles son los límites de este trabajo. Después de la discusión, se expondrán las conclusiones principales del trabajo de manera concreta y se explicará la bibliografía usada en el trabajo.

Summary of the work

The main objective of this work is to see how much information can be obtained from a JWST spectrum of a Milky Way-type galaxy at an intermediate redshift. We will provide a brief introduction to the principal aspects of galaxy formation and the factors that influence star formation. Then, we will focus on the different definitions of Milky Way-like galaxies and determine which criterion we are adopting for this work. Finally, we will introduce the capabilities of JWST, highlighting its dispersive elements and observation modes.

For this purpose, we will use data from the TNG50 cosmological simulation at redshift 0 to obtain weights for different ages and metallicities of various stellar particles. However, the spectra will be generated using the MILES SSP (Single Stellar Population) models. Therefore, in the methodology section, we will explain the procedure used to associate age and metallicity, in addition to specifying how we adapt the spectrum as if we were observing the galaxy's spectrum from the JWST at $z=1.5$.

In the development of the spectra, we have to take into account factors such as SNR (Signal-to-Noise Ratio), regularization, and spectral resolution. These will be key components in understanding how much information we can obtain from the spectra during the fitting process. This fitting will be conducted using pPXF, a very useful tool based on the Full Spectrum Fitting method. Nevertheless, the last part of the methodology section will explain what pPXF is and its principal parameters.

After adjusting the spectra, we will be able to conclude whether pPXF can recreate the TNG results, considering how SNR, regularization, and spectral resolution affect it. Additionally, we will discuss the limitations of pPXF. Furthermore, we will show relationships between age, metallicity, and stellar mass, which are crucial for better understanding the connections between these parameters in galaxy formation. Finally, we will present the graphics obtained for the Star Formation History (SFH) and the Time-Dependent Metallicity Function (TMF), which will be useful for comprehending the evolution of Milky Way-like galaxies.

To finalize this work, we will evaluate our results alongside previous investigations that have utilized similar tools. This approach will provide consistency to our findings and help establish the scope of this study. Following the discussion, the conclusions will be presented in a concise and precise manner. Finally, the bibliography will be included.

2. Introducción

2.1. Contexto y motivación del trabajo

Existen muchas incógnitas a la hora de hablar de la evolución de las galaxias, ya que sigue siendo una incógnita el cómo se crearon las estructuras de la Vía Láctea. Y al estar nosotros dentro de ella, tenemos la posibilidad de medir cantidades inaccesibles en galaxias más distantes. Con la intención de averiguar más sobre la Vía Láctea se mandó la misión GAIA, que tenía como uno de sus objetivos crear un mapa tridimensional de nuestra galaxia, además de estudiar la formación de las estructuras de la Vía Láctea (Gallart et al., 2019). Esto ha permitido entender mejor muchos aspectos como la dinámica, estructura, química o formación galáctica, y ha dado acceso a mejorar los modelos físicos que definen los procesos del Universo.

El análisis de nuestra galaxia nos permite mejorar los modelos galácticos existentes para usarlos en el entendimiento de galaxias más lejanas y nunca vistas, lo que puede suponer un avance en el entendimiento de la formación y evolución estelar además de comprender mejor la estructura y composición de las galaxias. No solo eso, sino que mediante las investigaciones de las dinámicas estelares y galácticas también podemos inferir distribuciones como la de la materia oscura.

Sin embargo, nuestra posición en el universo dentro de la Vía Láctea nos crea algunas preguntas, lo que motiva a impulsar trabajos como el que yo presento aquí:

- ¿Cómo evoluciona nuestra galaxia?
- ¿Cómo se vería la Vía Láctea desde otra galaxia?
- ¿Podemos estudiar las estructuras parecidas a la Vía Láctea en otras galaxias? ¿Existe algún límite observacional? ¿Cuánta información podemos recuperar?
- Las medidas de objetos de nuestra galaxia nos ha permitido crear modelos de formación y evolución de las galaxias usando la Vía Láctea, pero ¿son válidos estos modelos para galaxias fuera de la Vía Láctea?
- ¿Cómo de especial es nuestra galaxia?

Con este trabajo se quiere mostrar la capacidad que tenemos con la tecnología y los modelos teóricos actuales para obtener información relevante en los aspectos mencionados.

Para este propósito se van a simular espectros sintéticos de las galaxias tipo Vía Láctea, usando datos de la simulación numérica cosmológica de TNG50 y los espectros teóricos de MILES, como si estuviésemos viendo dichas galaxias desde el JWST (James Webb Space Telescope) a desplazamientos al rojo intermedios. Luego serán analizados mediante pPXF lo que nos permitirá ver la capacidad de recuperación que tiene. Mediante este trabajo podremos saber si de verdad somos capaces de obtener información suficiente sobre las poblaciones estelares de estas galaxias mediante el JWST, a dicho desplazamiento al rojo, para avanzar en el conocimiento de la evolución de las galaxias.

2.2. Evolución de las galaxias

La evolución de las galaxias ocurre en escalas temporales de 10^9 años, por lo que es difícil detectar grandes cambios en poco tiempo. Sin embargo, por el simple hecho de que la luz tiene una velocidad finita, observar galaxias a distancias más lejanas es

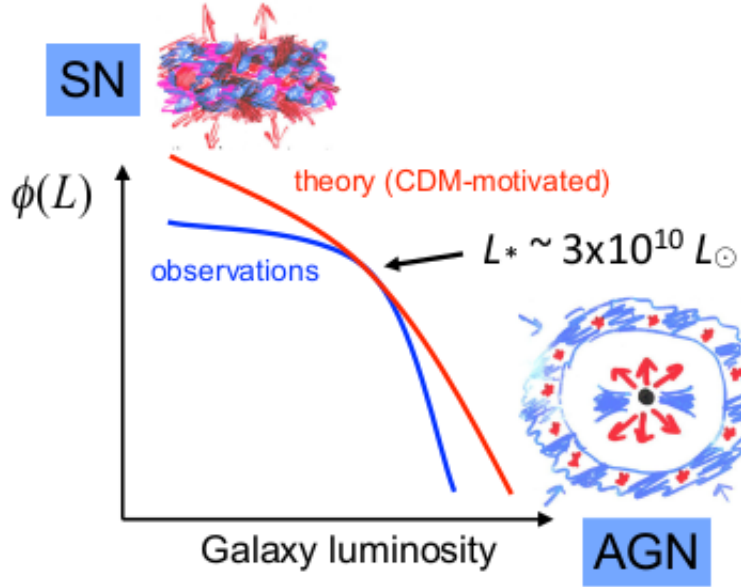


Figura 1: Figura sacada del trabajo de Silk and Mamon (2012) donde muestra como afecta el *feedback* en la función de luminosidad de la galaxia. Las galaxias menos masivas son las menos luminosas y el *feedback* más importante es el de las supernovas. En las galaxias más masivas, y por ello las más luminosas, afecta más el *feedback* por AGN. El rol que tiene el *feedback* se ve plasmado en la comparación de las dos líneas, donde la línea roja teoriza como sería la función de luminosidad si no fuese afectada por el *feedback* y la línea azul muestra lo que se ve observacionalmente. Y teniendo en cuenta el *feedback*, la línea roja teórica se convierte en la azul.

sinónimo de ver épocas más tempranas del Universo donde observamos galaxias en otra era evolutiva. El problema es que la observación de galaxias cada vez más lejanas tiene limitaciones observacionales, ya que a mayor distancia esté la galaxia, menor es el flujo que recibimos y además, la luz está desplazada al rojo, lo que obliga hacer observaciones en infrarrojo. Entonces, si queremos suficiente señal para obtener un espectro galáctico, necesitamos mayor tiempo de exposición, teniendo en cuenta que habrá componentes de gas y polvo que distorsionarán el espectro.

Por lo que respecta a la parte instrumental, se necesitan telescopios con gran sensibilidad, para captar las galaxias más tenues, y telescopios con gran precisión, para captar las estructuras que puedan contener las galaxias. Estas características son importantes a la hora de sacar información sobre las poblaciones estelares para el análisis de la evolución o formación galáctica.

La formación estelar en las galaxias se cree que es debida a los colapsos gravitacionales de densas nubes moleculares, sobre todo de moléculas de H_2 , que confinan grandes cantidades de gas ($10^8 - 10^{10} M_{\odot}$) en volúmenes de ~ 2 kpc (Kurtz et al., 2000). Es por ello que hoy en día se relaciona la relación de la formación estelar con la capacidad de la galaxia para retener nubes moleculares densas.

Teniendo en cuenta cómo se generan las partículas estelares a través de las nubes moleculares, es importante tener una perspectiva más global de la formación de las galaxias. Hoy en día se puede entender este proceso en tres fases (Silk and Mamon, 2012) teniendo en cuenta las fusiones de los halos de materia oscura de las galaxias (Blumenthal et al.

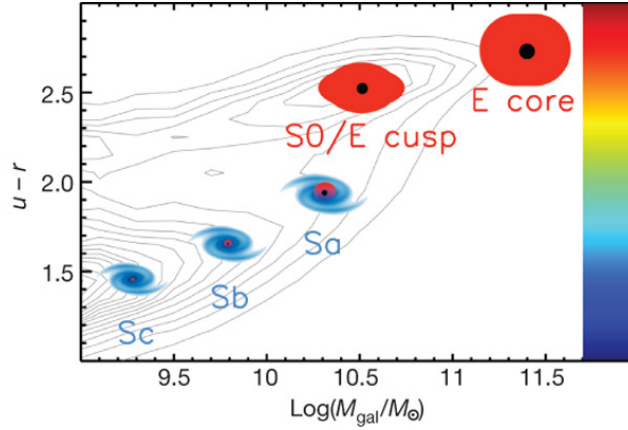


Figura 2: Color respecto a la masa estelar de la galaxia, donde se observa las diferentes morfologías y colores de las galaxias según la masa estelar. En la secuencia azul se encuentran las galaxias espirales, que contiene partículas estelares más jóvenes. En la secuencia roja, por encima de la masa de $\sim 10^{10,47} M_{\odot}$, se encuentran las partículas estelares más viejas.

(1984), Lacey and Cole (1993)): primero colapsan las pequeñas sobredensidades de materia oscura generando halos de materia oscura; luego, los pequeños halos se fusionan para dar como resultado un halo más grande y más masivo; mientras tanto, existe una continua acreción de gas del medio intergaláctico, lo que va a abastecer la formación estelar en nubes densas de gas; al final, las nubes de gas sufren colapsos gravitacionales, lo que conlleva a que se creen partículas estelares dentro de la galaxia.

Es por ello que hay que tener en cuenta también que las galaxias no están aisladas de otros objetos galácticos. De tal forma que es importante pensar tanto en los procesos de acreción de gas primordial como en las fusiones de galaxias o *mergers*, que influirán en las poblaciones estelares de las partículas estelares que se generen.

Los procesos de acreción de gas primordial pueden servir para teorizar, por ejemplo, cómo se han generado las estructuras de la Vía Láctea como hacen investigaciones de Colavitti et al. (2008), que se basan en la teoría de *two-infall model* de Chiappini et al. (1997). Esta investigación muestra dos eras de acreción de gas primordial que se usan para justificar las estructuras del halo y disco grueso y fino de la Vía Láctea, además de ser útil para definir el enriquecimiento químico de las galaxias.

Por otro lado, los procesos de fusión de galaxias son importantes para entender el agrupamiento jerárquico de las galaxias que sufren los halos de materia oscura de las galaxias, pero también son relevantes para la comprensión de la formación estelar ya que, por ejemplo, se sabe que una galaxia a mayor corrimiento al rojo, generalmente, tiende a la aglomeración de nubes de gas molecular, a la pérdida de momento angular y a tener flujos que enfrían el gas, lo que permite un aumento de formación estelar (Mo et al., 2010).

Por estudios como el de Looser et al. (2024) sabemos que existe una relación entre los *mergers* y la formación estelar, donde una galaxia más masiva es más probable que haya sufrido más de una fusión con otra galaxia, por lo que es más probable que haya tenido más formación estelar y que se haya enriquecido en metales. Aun así, esto dependerá de la Historia de Formación Estelar, donde normalmente, las galaxias con mayor masa experimentan eventos de formación estelar más amplios.

Sin embargo, la formación estelar está regulada por procesos que modulan las propiedades del medio interestelar, lo que delimita las condiciones de la formación estelar. Es aquí donde entra la retroalimentación o comúnmente conocido como *feedback* (Bower et al., 2016). Estas retroalimentaciones influyen en la dinámica del gas que les rodea, donde una expulsión de energía y materia puede regular la formación estelar de dos maneras: calentando el gas circundante, lo que frenaría la formación de nuevas partículas estelares por las altas temperaturas; o, por los flujos salientes de la galaxia, que dejarían menos material para la formación estelar. Aunque es remarcable que estos flujos salientes están determinados por la flotabilidad, ya que estos flujos salientes deben superar unos niveles de flotabilidad para escapar de la gravedad de la galaxia. Si no lo hacen, estos flujos se quedaría retenidos, no se regularía la formación estelar y el agujero negro que estaría en el centro de la galaxia aumentaría su tamaño.

Además, estos procesos astrofísicos están ligados directamente a la masa de las galaxia, ya que para las galaxias de masa menor que $< 10^{10.5} M_{\odot}$ el proceso dominante que limita la formación estelar es la retroalimentación por supernovas; y para galaxias más masivas, los que limitan son los AGN (*Active Galactic Nucleus*), mediante el *AGN feedback*.

De esta forma, sabemos que en el rango de masas de $10^{10} - 10^{11} M_{\odot}$ hay dos tendencias, que se conoce como la bimodalidad de las galaxias (Silk and Mamon (2012), Mo et al. (2010)). Esta bimodalidad se reparte en la secuencia roja y la secuencia azul: la secuencia roja está dominada por galaxias más luminosas, con partículas estelares más viejas y más ricas en metales; y, por otra parte, las galaxias que caen en la secuencia azul son menos luminosas, y contienen partículas estelares más jóvenes y menos metálicas. De tal forma que las galaxias elípticas y lenticulares entran en la secuencia roja y las galaxias espirales en la secuencia azul.

Trabajos como el de Dekel and Birnboim(2006) muestran que esta bimodalidad ocurre en valores de masa de $10^{10.47} M_{\odot}$ y que se ve reflejada en las siguientes relaciones: diagrama color-magnitud, Tasa de Formación Estelar (SFR en inglés), *starbursts* de partículas estelares masivas a alto corrimiento al rojo, Historia de Formación Estelar (SFH, e inglés), relación bulbo-disco, dependencia del entorno, etc. Se cree que esta bimodalidad se debe a la masa del halo de la galaxia anfitriona y los procesos de retroalimentación de supernovas y AGNs que afectan directamente a los procesos físicos dentro de las galaxias.

Entonces, nos encontramos que cada secuencia tiene, una distribución amplia de valores de edad y metalicidad. La edad de una población estelar se entiende directamente como la consecuencia de su formación estelar, con la creación de las estrellas por un colapso gravitacional de una nube de gas. Sin embargo, la metalicidad está ligada al enriquecimiento químico por parte de estrellas masivas. Una estrella masiva ($M > 8M_{\odot}$) enriquece el medio interestelar mediante vientos estelares ($M > 20M_{\odot}$) o con la muerte de la estrella como una supernova tipo II ($8M_{\odot} < M < 20M_{\odot}$) y la consiguiente formación desde una nube de gas ya enriquecida en metales. Esto ocurre en tiempos de 10^8 años, enriqueciendo en elementos α (Worthey et al., 1992). Por su parte, el contenido en hierro de una galaxia viene determinado por la explosión de supernovas de tipo Ia, que tienen tiempos de vida más largos (~ 1 Gyr).

En este trabajo se hará hincapié en los valores de la edad y la metalicidad en las galaxias tipo Vía Láctea con rangos de masas que entran dentro de la zona de transición de la bimodalidad de las galaxias, por lo que es importante definir bien lo que significa

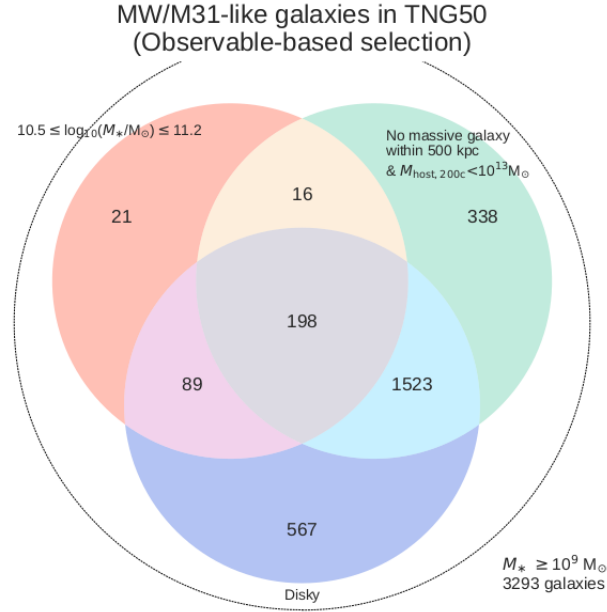


Figura 3: Criterio de selección de las galaxias tipo Vía Láctea dentro de la simulación TNG50 (Pillepich et al., 2023).

ser una galaxia tipo Vía Láctea.

2.3. Galaxias tipo Vía Láctea

La Vía Láctea es una galaxia espiral barrada donde la mayor parte del componente bariónico se encuentra dentro del disco fino, con una masa aproximada de $\sim 5 \cdot 10^{10} M_{\odot}$, con un radio efectivo de $\sim 3,5$ kpc y una altura vertical de $\sim 0,3$ kpc (Mo et al., 2010). El Sol se encuentra a ~ 8 kpc de distancia del centro galáctico con una velocidad de rotación de $\sim 220 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Además del disco fino, la Vía Láctea cuenta con un disco grueso que contiene el 10-20 % de la masa del disco fino, un bulbo que se encuentra en el centro de la galaxia y contiene la masa de $\sim 10^{10} M_{\odot}$ y un halo estelar que contiene el ~ 3 % de la masa. Se sabe que en el centro de la Vía Láctea se encuentra un agujero supermasivo de masa de $\sim 2 \cdot 10^6 M_{\odot}$.

Entonces, ¿a qué nos referimos cuando hablamos de galaxias tipo Vía Láctea? ¿Nos referimos al parecido en morfología? ¿Cinemática de las partículas estelares? ¿Poblaciones estelares? ¿Historia de Formación Estelar?

En la tabla 1 del trabajo de Pillepich et al. (2023) se muestran los trabajos previos que han hecho una selección independiente de las galaxias tipo Vía Láctea, aunque esto varía según el tipo de investigación que hagamos. Trabajos como el de Boardman et al. (2020) tienen como objetivo hacer un amplio catálogo de este tipo de galaxias por lo que tienen como criterio el rango de masa estelar, el ratio de formación estelar, el ratio B/T o características morfológicas como que tengan disco o barra.

Pero si, en cambio, nuestro objetivo es analizar los flujos de gas en el centro de la galaxia, trabajos como el de Tress et al. (2020) se centran más en obtener galaxias con morfología de disco similar a la Vía Láctea, con su respectiva dinámica, además de con-

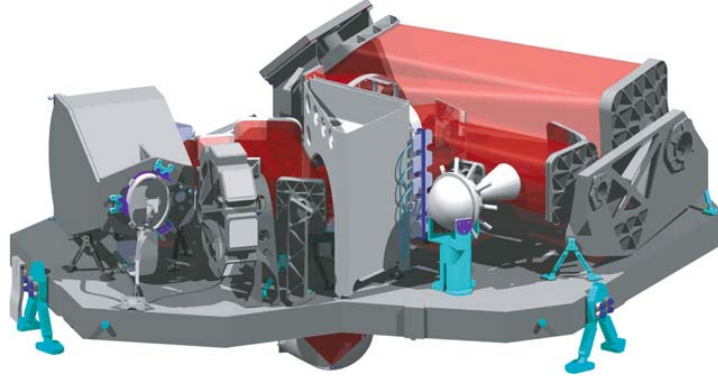


Figura 4: Imagen gráfica del instrumento NIRSpec.

seguir estructuras como el bulbo, barra y brazos espirales.

En este trabajo se usa la simulación cosmológica de TNG50 (que se describirá más tarde) y se basa en los siguientes criterios para decir si una galaxia es tipo Vía Láctea o no (ver figura 3) a corrimiento al rojo 0 (Pillepich et al., 2023) :

- **Masa estelar:** similar a la Vía Láctea; es decir, $10,5 < \log[\frac{M_*}{M_\odot}] < 11,2$
- **Morfología:** tipo disco, con geometría de los brazos espirales y con barra.
- **Entorno:** no puede tener una galaxia más cerca de 500 kpc con masa $\geq 10^{10,5} M_\odot$.

De tal forma esta simulación presentan 198 galaxias que tienen propiedades similares a la Vía Láctea o a M31. Estas galaxias se han analizado en investigaciones como la de Semenov et al. (2024) para determinar que la mayoría de la formación estelar que se da en galaxias tipo Vía Láctea se da en el disco (también ocurre en galaxias tipo disco que no sean tipo Vía Láctea). Respecto a la evolución del disco, Semenov et al. (2024) menciona que el disco de la Vía Láctea se formó en las primeras épocas evolutivas de la galaxia, y en la simulación de TNG50 solo el $\sim 10\%$ de las galaxias tipo Vía Láctea se forman pronto; aunque es verdad, que las poblaciones estelares que se obtienen son consistentes con los valores de la Vía Láctea. Es por ello, que concluye que la formación de la Vía Láctea no es la más habitual.

Aún así, aunque este trabajo se base en datos de las simulaciones cosmológicas, esta investigación tiene como objetivo ver las capacidades que tenemos de obtener información de estas galaxias mediante el JWST, con el fin de aumentar las evidencias observacionales. Por lo tanto, es importante mencionar brevemente las capacidades que tiene este telescopio, y en especial el instrumento NIRSpec.

2.4. JWST

JWST, en comparación con GAIA, tiene cuatro objetivos principales (Gardner et al., 2006): analizar el final de Edad Oscura y la reionización; estudiar los procesos de las construcciones de las galaxias; observar el nacimiento de partículas estelares y sistemas proto-planetarios; y examinar los sistemas planetarios y los orígenes de la vida.

Para ello, el JWST cuenta con un espejo primario de 6.6 metros de diámetro, compuesto por dieciocho paneles hexagonales que están protegidos con un escudo solar,

imprescindible para hacer las observaciones a baja temperatura, que es aspecto importante en observaciones en infrarrojo. Cuenta con cuatro instrumentos: MIRI (Mid-InfraRed Instrument), NIRCam (Near-InfraRed Camera); NIRISS (Near-InfraRed Imager and Slitless Spectrograph); NIRSpec (Near-InfraRed Spectrograph). Vamos a centrarnos en este último instrumento ya que es crucial para el trabajo.

NIRSpec (Böker et al., 2023) permite hacer observaciones en el infrarrojo cercano a $0,6 - 5,3\mu\text{m}$ a baja resolución, $R \sim 100$, usando PRISM; y observaciones a media y alta resolución, $R \sim 1000$ o $R \sim 2700$, usando rejillas que se muestran en 5, que cuentan con cuatro modos de observación. Dentro de los objetivos de este instrumento se encuentran hacer un estudio espectroscópico de la formación y evolución estelar las galaxias, y hacer una caracterización de poblaciones estelares, lo que hace que este instrumento sea el idóneo para este trabajo.

El NIRSpec tiene 5 modos de observación: Espectroscopía de Campo Integral (*Integral Field Unit*), Espectroscopía Multiobjeto (*Multi-object Spectroscopy*), Espectroscopía de Rendija Larga (*Long Slit Spectroscopy*), Espectroscopía de Rendija de Alta Dispersión (*High-Resolution Slit Spectroscopy*) y de Imagen Directa. Si queremos observar galaxias individuales o características específicas la mejor opción es hacer Espectroscopía de Rendija Larga o la Espectroscopía de Rendija de Alta Dispersión. Para mapear la estructura interna de una galaxia y obtener información sobre las diferentes regiones, la Espectroscopía de Campo Integral es la mejor opción. Aunque, si sabemos que en un campo de visión de $4' \times 4'$ tenemos dos galaxias tipo Vía Láctea, el modo Multiobjeto puede ser el más útil, ya que permite sacar espectros simultáneos en un campo de visión de $3.6' \times 3.4'$. Tiene la capacidad de sacar espectros de más de 100 objetos astronómicos en una sola toma, lo que puede ser muy útil. Sin embargo, es muy poco probable que haya 2 galaxias tipo Vía Láctea en un mismo campo de visión.

Es importante mencionar que como la expansión del universo desplaza la luz a longitudes de onda más rojas, siendo este desplazamiento más grande para objetos más distantes, que un estudio en infrarrojo permite estudiar objetos más lejanos. De tal forma como en este trabajo estamos 'observando' galaxias a $z=1.5$, este instrumento es lo más avanzado de la tecnología actual para dichos estudios.

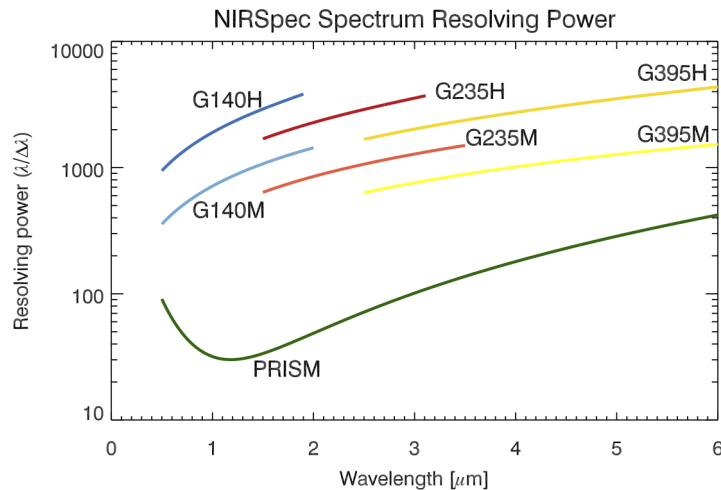


Figura 5: Gráfico donde se muestra el poder resolutivo de los elementos dispersores del instrumento NIRSpec del JWST. Este gráfico está sacado de Jakobsen et al. (2022)

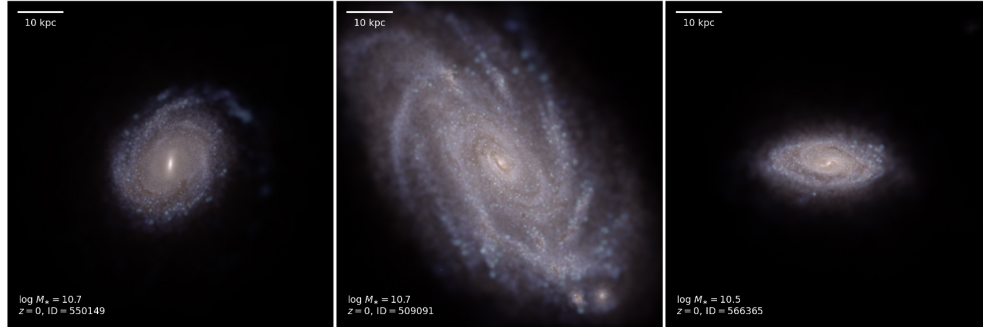


Figura 6: Ejemplo de tres galaxias tipo Vía Láctea simuladas con la simulación TNG50, proyectado en un cubo de 70 kpc de lado, donde se muestran tres perspectivas distintas de ellas. Para dibujar las galaxias se usan tres bandas diferentes de HST/ACS (F435W, F606W, F775W), donde cada píxel muestra 0.049arcsec.

3. Datos

En este apartado se determinarán los datos que se han utilizado en el trabajo: por un lado los datos de la simulación TNG50, que han permitido obtener los pesos estadísticos de cada valor de edad y metalicidad de las partículas estelares dentro de las galaxias tipo Vía Láctea, que servirán para crear un espectro sintético de este tipo de galaxias; y por otro lado, se mencionará la librería estelar de MILES que se ha usado para el ajuste del espectro sintético mediante pPXF (*Penalized PiXel-Fitting*).

3.1. TNG50

Las simulaciones de IllustrisTNG son los herederos de las simulaciones Illustris (Vogelsberger et al. (2014), Genel et al. (2014), Rodríguez-Gomez et al. (2015)), pero integrando nuevos modelos de formación de galaxia (Weinberger et al. (2017); Pillepich et al. (2018)) lo que introduce nueva física y mejoras numéricas. Las simulaciones TNG son simulaciones cosmológicas magnetohidrodinámicas en universo de Λ CMD (*Lambda-Cold Dark Matter*) (Ade et al., 2016) de diferentes volúmenes de cubos que se compilan con el código de Arepo (Springel, 2010). En nuestro caso usaremos la simulación TNG50, lo que implicará un volumen de cubo de aproximadamente 50 Mpc de longitud cada lado. Usar TNG50 en vez de TNG100 o TNG300 (100 Mpc y 300 Mpc de longitud de largo de los cubos, respectivamente) permite tener una mejor resolución de masa y establece un enfoque más detallado de las propiedades estructurales de las galaxias. Es importante remarcar que el objetivo principal de TNG50 no es generar galaxias tipo Vía Láctea, como se menciona en Pillepich et al. (2023), sino que se quiere obtener un universo realista en TNG50, y se quiere ver cuán representativa es la Vía Láctea con los criterios previamente mencionados.

Dentro de esta simulación Pillepich et al. (2023) presentan 198 galaxias que tienen propiedades similares a la Vía Láctea o M31, con los criterios mencionados en la introducción y se puede ver en la figura 6 tres imágenes de una de esas galaxias simuladas.

TNG50 permite elegir distintos *snapshots* hasta $z=7$, pero en este trabajo nos hemos limitado al que corresponde a $z=0$. Por cuestiones prácticas, de las 198 galaxias que cumplen los criterios mencionados anteriormente, hemos seleccionado una submuestra de 14 galaxias (tabla 1) para tener una distribución de masas uniforme en el rango cubierto por la simulación.

Nombre Archivo	$\log(M_*)[M_\odot]$
388544	11.09
414918	10.32
433289	11.16
452031	10.97
468590	11.02
469487	10.75
472548	10.88
497557	10.55
499704	10.59
500577	10.42
503987	10.63
510273	10.82
522530	10.70
542252	10.50

Tabla 1: Nombre y valores de masa seleccionados de los 198 galaxias tipo Vía Láctea de TNG50. Se han elegido estas galaxias para tener una distribución de masas uniforme en el rango de $10^{10.32-11.16} M_\odot$

Si se quiere saber más sobre los procesos astrofísicos que incluye y las propiedades que puede proporcionar la simulación, se puede acudir al artículo Pillepich et al. (2023).

3.2. Librería estelar MILES

Uno de los objetivos de este trabajo es crear un espectro sintético a través de los datos obtenidos de TNG50, usando la librería espectral empírica MILES. Esta librería se compone de espectros de SSPs (*Single Stellar Population*) que abarcan un rango de longitudes de onda en el óptico de entre 3535-7500 Å, con una resolución espectral de 2.51 Å. Para construir estas SEDs de SSPs se han tenido en cuenta tres ingredientes: una librería estelar empírica, isocronas teóricos y un modelo de IMF (*Initial Mass Function*).

La librería estelar empírica ha sido obtenida con el telescopio de 2.5m Isaac Newton Telescope (Sánchez-Blazquez et al., 2006) que se encuentra en el Roque de Los Muchachos, en la Palma, donde cada espectro es modelado con la temperatura efectiva, la gravedad superficial y la metalicidad de la partícula estelar. En la imagen 7 se muestran 6 espectros SSPs de esta librería, con diferente edad y metalicidad.

Las isocronas que se usan son las isocronas teóricas de Basti (Pietrinferni et al., 2004) que nos permiten saber cómo es la evolución de las partículas estelares en parámetros de temperatura efectiva, luminosidad o metalicidad. Además, usando librerías fotométricas estelares encontramos las relaciones entre estos parámetros en diferentes filtros, por lo que combinando con las isocronas podemos predecir las propiedades de las poblaciones estelares observadas en el diagrama color-magnitud. De esta forma se han determinado 12 valores de metalicidad y en cada valor tenemos una cobertura en la edad desde 0.03 Gyr hasta 14 Gyr.

Lo último es la IMF, que adoptaremos la de Kroupa (2001). Esta IMF es una ley de potencias de diferentes partes según el rango de la masa estelar, y que sigue la ecuación $\xi(m) \propto m^{-\alpha}$: por un lado, para masas superiores a $0.5 M_\odot$ la IMF es similar a la de Salpeter (1955), con un índice de $\alpha = 2,3$, indicando que hay menos partículas estelares masivas comparado a las menos masivas; por otro lado, en el rango de masas inferiores

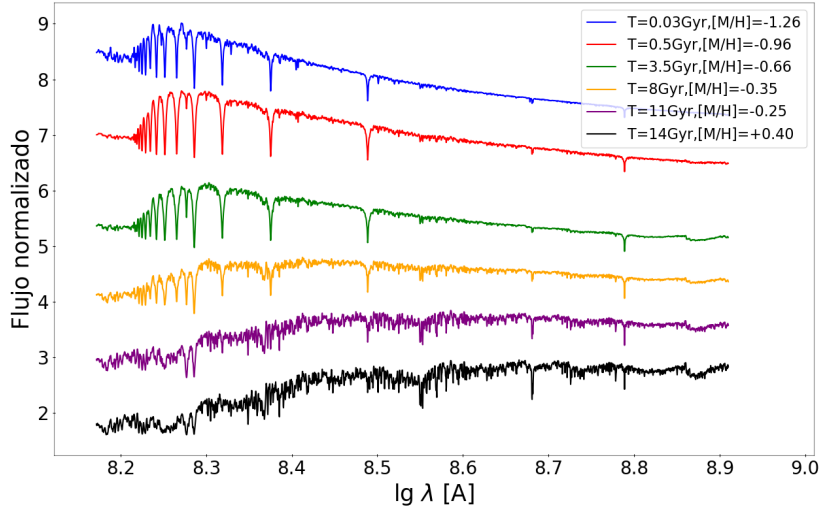


Figura 7: Seis espectros de seis poblaciones estelares diferentes de MILES, donde se aprecia gran cambio en la forma y cantidad de líneas según su edad y metalicidad. Los valores de flujo son arbitrarios, ya que se han multiplicado los valores para mostrar los 6 espectros en la misma gráfica.

a $0,5M_{\odot}$, de $0,08 - 0,5M_{\odot}$ tendría un índice de $\alpha = 1,3$ y en el rango inferior a $0,08M_{\odot}$ el índice será de $\alpha = 0,3$.

Es importante notar que el rango de metalicidades de las partículas en la simulación TNG50 es mayor que el cubierto por MILES. En particular, TNG50 requiere un rango de metalicidades de entre -7 hasta +1dex, mientras que la librería de SSP de MILES cubre únicamente entre -2.27 y +0.4. En el siguiente apartado se explicará cómo se enlazan los datos de TNG con los datos de la librería estelar de MILES, además de profundizar en cómo se ha procedido para obtener los resultados usando dichos datos.

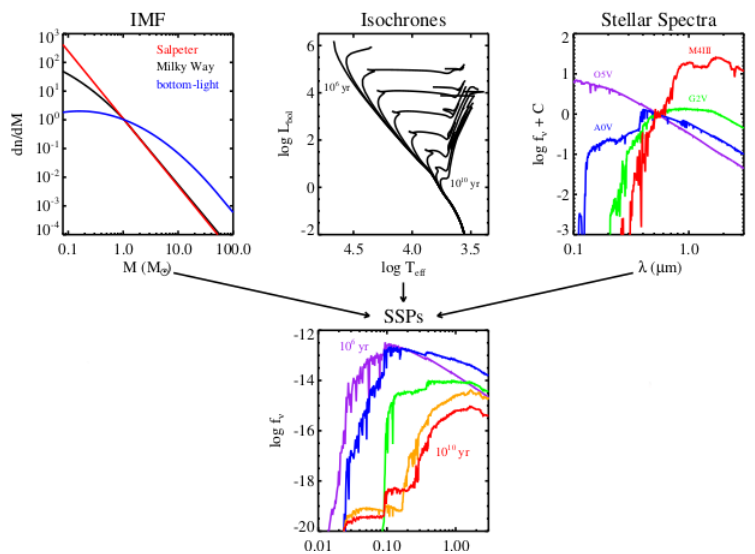


Figura 8: Imagen de Conroy (2013) que muestra los tres ingredientes para crear una SSP.

4. Metodología

En este apartado haremos hincapié en la metodología que hemos llevado a cabo para crear un espectro sintético de una galaxia tipo Vía Láctea de TNG y en cómo ajustamos dicho espectro mediante pPXF (*Penalized Pixel-Fitting*). Para el primer apartado hemos escogido partículas estelares dentro de un radio de 10 kpc, les hemos asignado un valor de edad y metalicidad de MILES y hemos sumado las masas de las partículas estelares que se repiten. De tal forma, para cada edad y metalicidad tenemos una suma de masas y dividiéndolo por la masa total obtenemos sus pesos. Con estos pesos y las SSPs de MILES creamos el espectro sintético a corrimiento al rojo 0, y para adecuar este espectro como si lo estuviésemos viendo a $z=1.5$ desde el JWST, le aplicamos una convolución.

En la segunda parte hemos ajustado el espectro con pPXF para ver la capacidad de recuperación de los valores de propiedades estelares que tenemos del espectro.

4.1. Selección de partículas estelares

El primer paso es crear el espectro sintético usando como información la cantidad de cada tipo de población estelar que hay en una galaxia de TNG a corrimiento al rojo 0. Estos datos fueron publicados por Pillepich et al. (2023), como hemos recogido en el apartado anterior, y están disponibles en la página web de TNG ¹.

Coger todas las partículas estelares de la galaxia podría ser muy interesante, sin embargo, puede haber partículas estelares dentro de la muestra de la galaxia que no estén ligadas a la misma, por lo que podría distorsionar los resultados. Por ello, vamos a limitar la distancia desde el centro de la galaxia hasta 10 kpc. De esta forma, como el disco de la Vía Láctea tiene un radio aproximado de 10-15 kpc, recogemos las partículas estelares de un posible disco estelar siendo esta la estructura más interesante para analizar ya que es fundamental para entender la formación y evolución de galaxias tipo Vía Láctea. También es remarcable que limitar el radio reduce el tiempo computacional del programa, lo que facilitará hacer el mismo análisis en más galaxias. Es importante subrayar que cada partícula estelar no describe a una partícula estelar individual, sino que representa a una cantidad de masa y energía que simula cómo se comportan un grupo de partículas estelares en cierta región de la simulación.

Con ese propósito pondremos como centro de la galaxia el centro de la componente estelar y no el centro de masas. Para ello, es importante tener en cuenta las unidades de las coordenadas, ya que TNG da las coordenadas en coordenadas comóviles: $\frac{ckpc}{h}$. Por lo tanto, para pasar a unidades de *kpc* solamente hay que multiplicar por el factor de escala y dividirlo por *h*, la constante de Hubble reducida con valor de 0.6777 (Philcox et al., 2021). Es importante recordar que en nuestro universo plano dominado por materia, pero sobre todo por la energía oscura, el factor de escala se relaciona de la siguiente forma con el corrimiento al rojo:

$$a(z) = \frac{1}{1+z} \quad (1)$$

Y aunque, en nuestro caso, hemos cogido los *snapshots* a corrimiento al rojo $z=0$, siendo el factor de escala la unidad, es importante remarcar este detalle por si se escoge otro archivo con otro corrimiento al rojo.

¹<https://www.tng-project.org/data/milkyway+andromeda/>

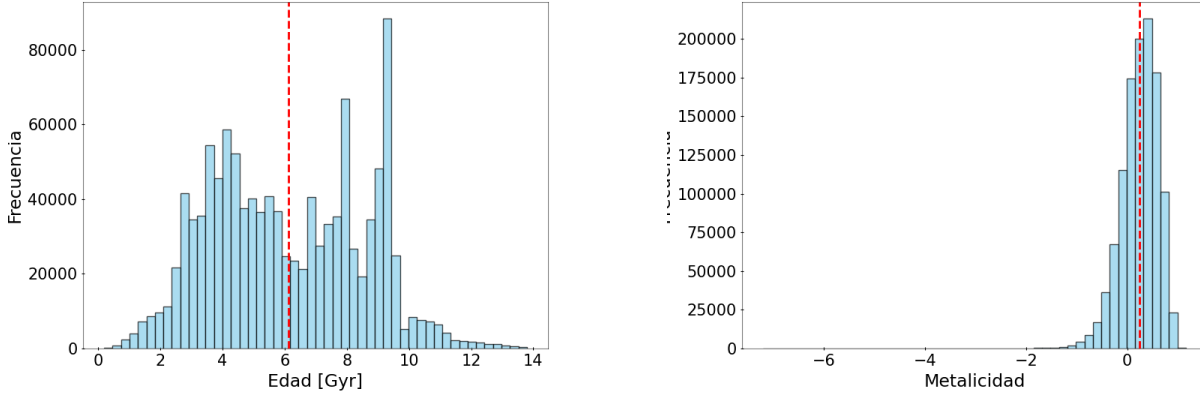


Figura 9: Histogramas de distribución de edades y metalicidades de la galaxia 472548 en un radio de 10 kpc. Muestran las veces que se repiten los valores de edad y metalicidad de las partículas estelares de la galaxia. La línea roja representa la media tanto en edad y metalicidad.

4.2. Asociación entre edad y metalicidad de TNG y MILES

Una vez tengamos las partículas estelares seleccionadas, queremos calcular cuál es el porcentaje en masa que hay de cada edad y metalicidad. Además, dado que los valores de edad y metalicidad de MILES y las partículas estelares de TNG son distintos, tenemos que hacer la correspondiente asociación para poder construir el espectro de la galaxia simulada con las poblaciones estelares proporcionadas por MILES.

Primero, adecuamos los datos de TNG ya que las edades de las partículas estelares están en términos de factor de escala y las metalicidades se dan en términos de masa; y en cambio, los valores de edades de MILES están en gigaaños y la metalicidad en metalicidades relativas a la metalicidad solar. No obstante, mediante la herramienta *astropy.cosmology.Planck13*, que pasa de valores de corrimiento a rojo a valores de Gyr, por lo que usando la relación 1 pasamos los valores de factor de escala a corrimiento al rojo, y luego mediante la herramienta de Planck lo pasamos a valores de gigaaños. Por otro lado, para adecuar la metalicidad solo hay que dividir el factor de metalicidad con la metalicidad solar $Z_{\odot} = 0,0127$ (Vazdekis et al., 2015) e introducirlo en escala logarítmica, lo que convierte directamente en metalicidad relativa.

Antes de asociar ningún valor de MILES miramos la distribución de metalicidades de las partículas estelares, para ver si podemos prescindir de algunos valores con el fin de ahorrar tiempo computacional. Mirando los histogramas de la figura 9, vemos valores casi nulos por debajo de metalicidades de -1.5, lo que nos hace prescindir de los valores de metalicidades de MILES -1.49,-1.79,-2.27. No obstante, vamos escoger todas las edades.

Para asignar a los valores de edad y metalicidad de TNG valores de dichos parámetros de MILES, comparamos cada edad y metalicidad de las partículas estelares de TNG con los valores de MILES y le asociamos el valor más cercano. De tal forma, generamos una matriz donde se han guardado las correspondientes edad, metalicidad y la masa de cada partícula estelar. El último paso es sumar los valores de las masas de las poblaciones que se repiten y dividirlos por la masa total, para ver el porcentaje de cada población estelar en masa.

De esta forma somos capaces de crear mapas de pesos en 2D como el de la figura 10, asociando cada punto del mapa a una edad y metalicidad de MILES. Este mapa nos ayudará a concluir si se puede obtener información suficiente con el ajuste de los espectros mediante pPXF, ya que con la herramienta de pPXF también obtendremos un mapa del mismo formato.

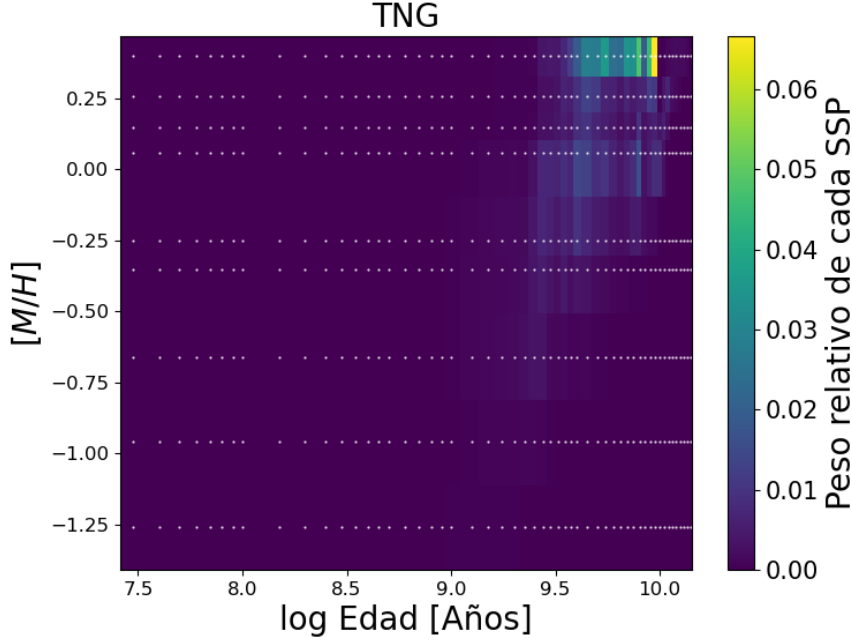


Figura 10: Mapa de pesos obtenido con los datos de TNG de cada edad y metalicidad de las poblaciones estelares que componen una galaxia de masa estelar de $10^{10.87} M_{\odot}$. La barra de colores muestra el valor de dichos pesos, siendo el color amarillo el valor con mayor peso.

4.3. Crear espectro sintético a la resolución de JWST a $z=1.5$

Ahora que tenemos unos pesos estadísticos de cada edad y metalicidad de MILES, creamos el espectro sintético sumando los espectros de MILES según su peso, es decir:

$$S(\lambda, Z, T) = \sum \rho_i \cdot P_{i,*}(Z, T) \quad (2)$$

Siendo ρ_i el peso que tiene la plantilla $P_{i,*}$ (o *template*) específica de la librería de SSPs, Z el valor de la metalicidad relativa a la metalicidad solar y T la edad. De tal forma, que tenemos un espectro ($S(\lambda, Z, T)$), con el valor de flujo para cada longitud de onda (λ).

Un ejemplo práctico se muestra en la figura 11, donde se ve el espectro resultante de la galaxia usando seis espectros de la librería estelar con pesos aleatorios, sin ningún componente de ruido añadido.

El objetivo principal de este trabajo es analizar los espectros de las galaxias tipo Vía Láctea a corrimientos al rojo de 1.5 y que hayan sido observados desde el JWST. Por

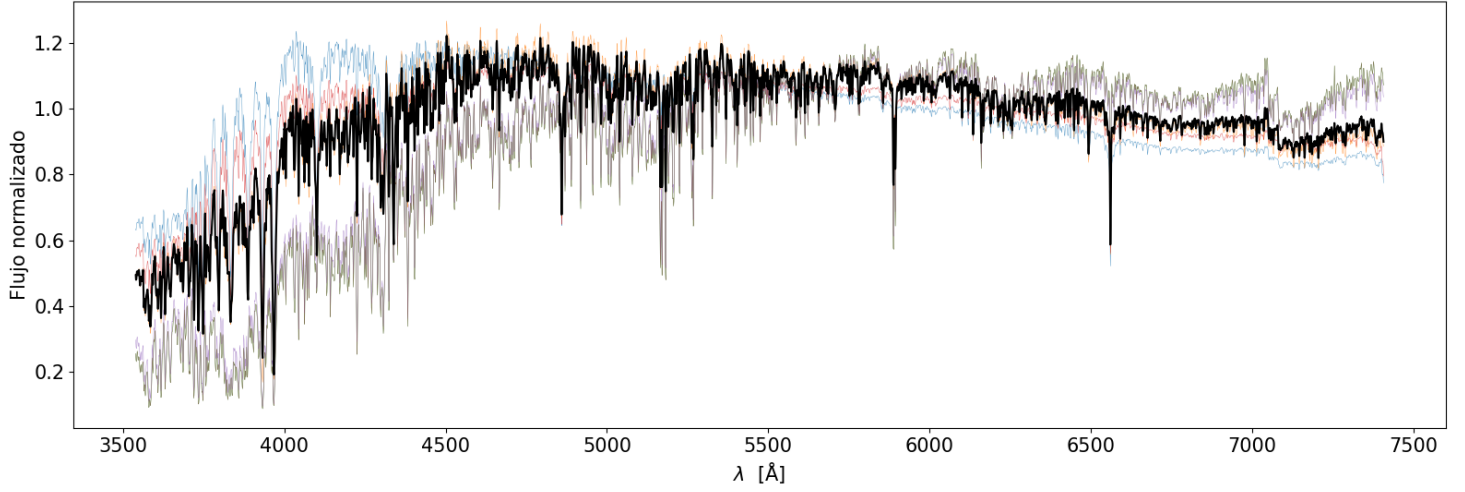


Figura 11: Ejemplo práctico de suma de seis espectros SSPs de MILES. El espectro resultante, en color negro, es la suma de los 6 espectros que aparecen de forma transparente. Los pesos de los 6 espectros se han cogido arbitrariamente. Sin embargo, en este trabajo tenemos 477 *templates* en vez de 6, y los pesos se calculan respecto a los datos de TNG.

ello, hay que adaptar el espectro a la misma resolución espectral de la observación.

Al observar una galaxia por el JWST los dos componentes que empeorarán la resolución y hay que tener en cuenta son: la dispersión de velocidades intrínseca de la galaxia y la resolución espectral del JWST. También hay que tener en cuenta que el espectro que hemos creado hasta ahora solo tiene el límite en la resolución espectral de los modelos de MILES. Este arreglo se hace de manera sencilla mediante la convolución gaussiana con el debido valor del sigma, que se obtiene de las diferencias del FWHM:

$$FWHM_{dif}^2 = FWHM_{gal}^2 + FWHM_{JWST}^2 - FWHM_{MILES}^2 \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{FWHM_{dif}}{2,355} \quad (4)$$

El $FWHM_{gal}$ se introduce usando el valor de dispersión de velocidades típica de una galaxia tipo Vía Láctea, que es de 100 km/s en espacio de velocidad. Por lo tanto, primero pasamos el valor de la dispersión de la galaxia al espacio de la longitud de onda usando la ecuación 5, y para pasar al FWHM usamos la relación 6.

$$\frac{\delta\lambda}{\lambda} = \frac{\delta v}{c} \quad (5)$$

$$FWHM_{gal} = \frac{\lambda}{c} \cdot \delta v \cdot 2,355 \quad (6)$$

El $FWHM_{JWST}$ es tal vez el ingrediente más relevante de este trabajo, porque es el que determina la capacidad de recuperación de la información que tenemos; ya que una mejor resolución implica no perder tanta información del espectro. En la figura 12 se puede observar la mejora o pérdida de información al cambiar el valor de la resolución instrumental.

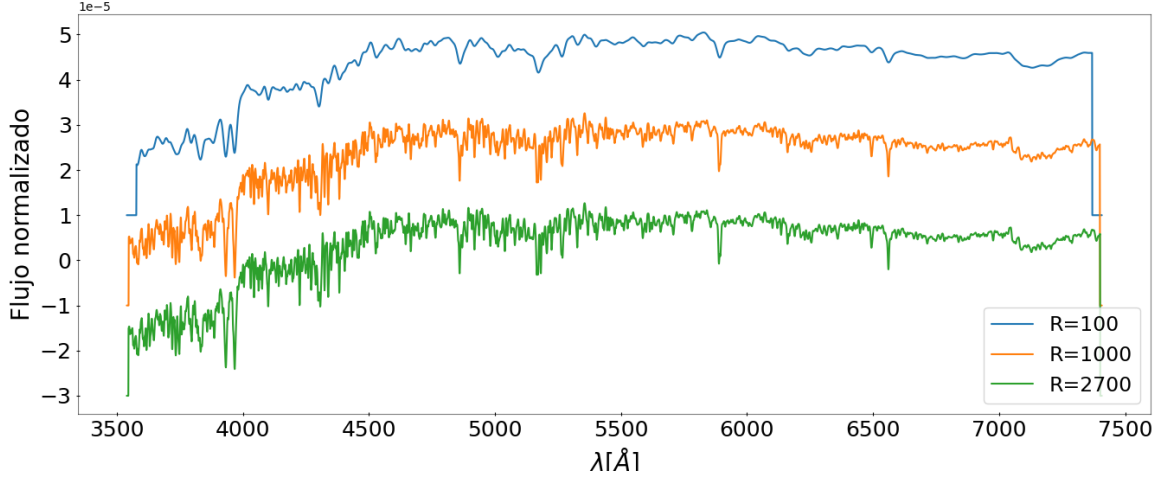


Figura 12: Espectro de una galaxia tipo Vía Láctea de masa $10^{10.87} M_{\odot}$ a diferentes resoluciones espectrales. Estos valores de resoluciones están establecidos Jakobsen et al.(2022), donde existen tres valores de resoluciones con las combinaciones entre los elementos dispersores y filtros: en azul R=100; en naranja R=1000 ; y en verde R=2700.)

En este trabajo se define una resolución espectral de 100, que está determinado por el poder de resolución del elemento dispersor PRISM del instrumento NIRSpec (Jakobsen et al., 2022) y tiene relación directa con el $FWHM_{JWST}$ y se calcula con la fórmula 7.

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = \frac{\lambda}{FWHM_{JWST}} \quad (7)$$

Sin olvidarnos que estamos desplazando el espectro a corrimiento al rojo 1.5, lo que influye en el valor de la resolución, mejorando su valor, y es por ello que influye directamente en el valor del FWHM, de la siguiente forma:

$$FWHM_{JWST} = \frac{\lambda}{R \cdot (1+z)} \quad (8)$$

Hay que tener en cuenta que no podemos ir a valores muy grandes de resolución instrumental, porque necesitamos que el poder resolutivo de los *templates* de MILES tengan mejor resolución que el espectro para el ajuste con pPXF. Por ello, en la parte de la discusión se mencionará cómo afecta dicho valor. Por último, el valor de FWHM de MILES, es de 2.51 Å (Falcón-Barroso et al., 2011), y se usa en las convoluciones.

Cabe destacar también, que la convolución se ha hecho usando la función *gaussian filter1d* por lo que el valor del sigma se ha tenido que introducir por unidad de píxel. Y siendo el tamaño de píxel de MILES de 0.9 Å, solo hay que dividir el sigma por este valor he introducirlo en la función.

4.4. Ajuste del espectro con pPXF

Una vez tengamos el espectro, queremos observar cuánta información podemos obtener usando herramientas ya existentes como pPXF (Cappellari and Emsellem (2004), Cappellari (2017)). PPXF (Penalized Pixe-Fitting) es un método que se basa en hacer el ajuste completo de los espectros teniendo en cuenta la discrepancia entre el espectro

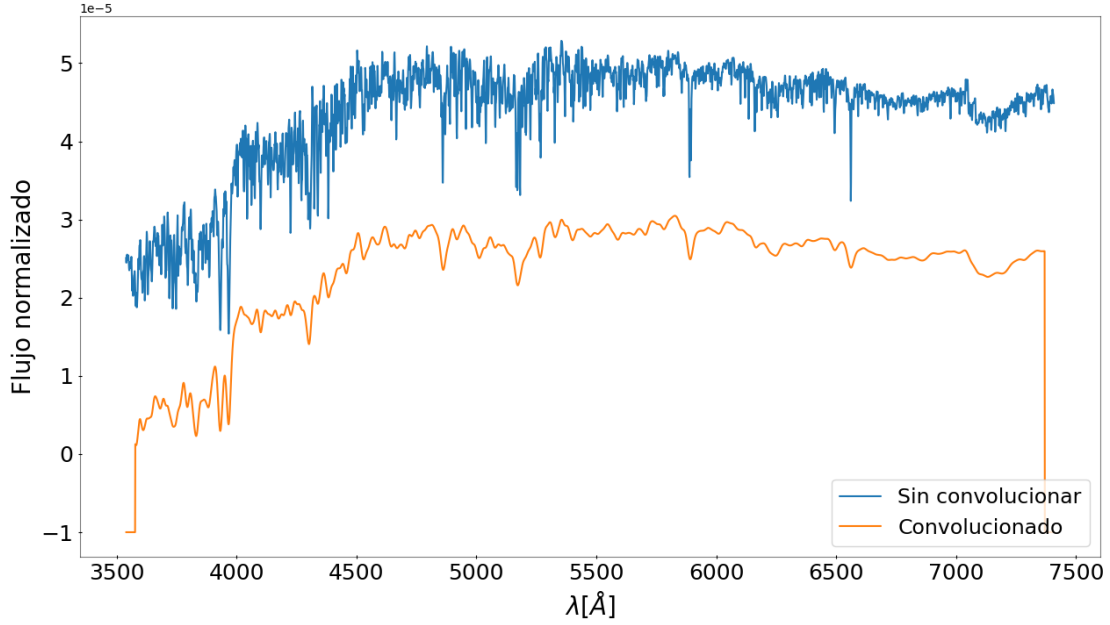


Figura 13: Azul: espectro de la galaxia sin convolucionar, solamente con los datos a $z=0$ de TNG, sin ruido añadido. Naranja: espectro de la galaxia después de la convolución a $z=1.5$, sin ruido añadido. Para la convolución se tienen en cuenta tanto la resolución de JWST a dicho corrimiento al rojo, el valor de dispersión de velocidades de la galaxia y la resolución de los *templates* de MILES. El ruido se implementa antes del ajuste de los espectros.

modelo (que se obtiene combinando espectros de las bibliotecas estelares) y el espectro observado en cada píxel. Esta herramienta nos permitirá sacar información de las poblaciones estelares, aunque se puede sacar más información como cinemática estelar o cinemática del gas. Es importante remarcar que este método penaliza las soluciones no-gaussianas para reducir el ruido; es decir, penaliza el sobreajuste del espectro, aunque el "grado del sobreajuste" se establece mediante la variable 'regul', lo que hará que el ajuste sea más o menos suave.

Una vez sepamos cómo funciona pPXF (Cappellari, 2017), es importante añadir un valor de ruido al espectro para que sea más realista y para ver la capacidad de recuperación a diferentes SNR (*Signal-to-Noise Ratio*). Es por ello, que uno de los *inputs* a tener en cuenta va a ser el RMS (*Root Mean Square*), ya que el programa que hemos creado genera un array de números aleatorios con una desviación estándar del valor del RMS que se suma a los valores del espectro en cada longitud de onda.

El espectro observado ya está listo, sólo falta determinar bien los parámetros de entrada de PPXF, entre ellos las plantillas (*templates*) de las librerías estelares. Los *templates* tienen que ser convolucionados para convertirlos como si los estuviésemos viendo con el mismo espectrógrafo que la galaxia, que en este caso es el NIRSpec del JWST. Esta convolución solo tiene dos elementos a tener en cuenta:

$$FWHM_{dif}^2 = FWHM_{JWST}^2 - FWHM_{MILES}^2 \quad (9)$$

Después de pasar el FWHM a valor de sigma, ya tenemos los *templates* con la correc-

ta resolución, pero existen muchos parámetros relevantes que determinar y las maneras de cómo hay que introducir es importante. Los datos espectrales, por ejemplo, se introducen en intervalos de longitud de onda logarítmicos en lugar de forma lineal, con el fin de mejorar la resolución, especialmente, en regiones donde hay cambios espectrales grandes, lo que facilita la identificación de líneas. Voy a mencionar otros parámetros relevantes, pero todos los detalles se encuentran en el paper de Cappellari (2017):

- Noise. Este parámetro se refiere al ruido que se asume en los espectros durante el ajuste. En nuestro caso, es el valor del RMS que nosotros elegimos.
- Velscale. Este parámetro se utiliza para determinar la resolución de velocidades en el ajuste cinemático de la galaxia.
- Start. Es la estimación inicial de los parámetros de LOSVD. En nuestro caso pondremos los valores de velocidad radial y dispersión de velocidades con valor [0,0], ya que el objetivo de este trabajo no es analizar la cinemática, sino hacer un buen ajuste del espectro.
- Moments. Orden de los momentos Gauss-Hermite que se queremos ajustar. En nuestro caso 2: la velocidad radial y la dispersión de velocidades.
- Goodpixels. Rango de píxeles que se quieren ajustar. En nuestro caso, la convolución anula los valores de los bordes del espectro, y si tenemos en cuenta estos píxeles, no hace un buen ajuste, por lo que debemos evitarlos. Es por ello que de los 2907 píxeles que hay evitamos los 50 píxeles del principio y del final.
- Regul. El valor de la regularización impone que las soluciones no varíen abruptamente entre poblaciones vecinas en el espacio de edad y metalicidad. Esto significa que en el caso que dos SSPs muy cercanas tengan pesos muy diferentes (lo cual no es físicamente plausible dado que las estrellas de una galaxia suelen formarse y evolucionar de manera más continua) la regularización impida que esto ocurra y genera soluciones más suaves.
- Reg_dim. Es un array que recuerda cuántos valores de edad y metalicidad tenemos, y es importante introducirlo en pPXF para que cree el mapa de pesos.
- Components. Este parámetro determina cuántos componentes cinemáticos se utilizan para el ajuste espectral. Como por ejemplo, si tenemos otra componente a parte que la estelar, como el gas. Nosotros solo tenemos en cuenta el componente estelar.

Una vez hemos introducido todos los parámetros, los *outputs* que nos interesarán de pPXF serán: el ajuste espectral, los valores medios de edad y metalicidad, y el mapa de pesos de edad y metalicidad.

Se puede observar un ajuste en la figura 14, donde se muestra el resultado visual del ajuste del espectro de la galaxia a SNR=100. Sin embargo, además del ajuste, también devuelve el valor de χ^2/DOF , que representa la bondad del ajuste.

Otros valores que devuelve el ajuste son la media de edad y metalicidad del espectro, pero esto varía según el valor de SNR; es decir, con un valor de SNR alto como 1000, los resultados del ajuste siempre van a rondar los mismos valores, ya que no va a haber cambios en el ajuste. No obstante, con valores como SNR=20, los valores medios de

edad y metalicidad que se obtienen tienen mucho que ver con el ruido añadido al espectro. Al ser el ruido un factor aleatorio, vamos a intentar minimizar el error haciendo el ajuste, del mismo espectro, 20 veces, por lo que podremos minimizar el error del ajuste.

De esta forma, obtendremos valores medios de edad y metalicidad y los compararemos con los valores de entrada; en otras palabras, vamos a comparar los valores de las medias de edad y metalicidad de TNG (input) y de pPXF (output).

Por último, vamos a sacar un mapa similar al de la figura 10, pero con los datos de pPXF. Esto nos mostrará cuánto de igual es la distribución de pesos en edad y metalicidad. Al igual que para sacar las medias, vamos a hacer 20 iteraciones, lo que supondrá 20 ajustes del mismo espectro (con el cambio del valor aleatorio del ruido), vamos a guardar cada mapa de pesos obtenido, para al final hacer una media de todos ellos. Esto nos permitirá sacar un mapa de pesos más fiable obtenidos de pPXF para luego comparar con el mapa de TNG.

Usando estos datos de edad y metalicidad, también seremos capaces de ver la Historia de Formación Estelar de las galaxias, además del enriquecimiento químico de ellas durante el tiempo.

En la siguiente sección pondremos los resultados obtenidos tanto de TNG como de pPXF, mostrando la importancia que tienen todos los elementos (como el SNR, regularización o la resolución espectral de JWST), para ver la capacidad de recuperación de la información de las poblaciones estelares.

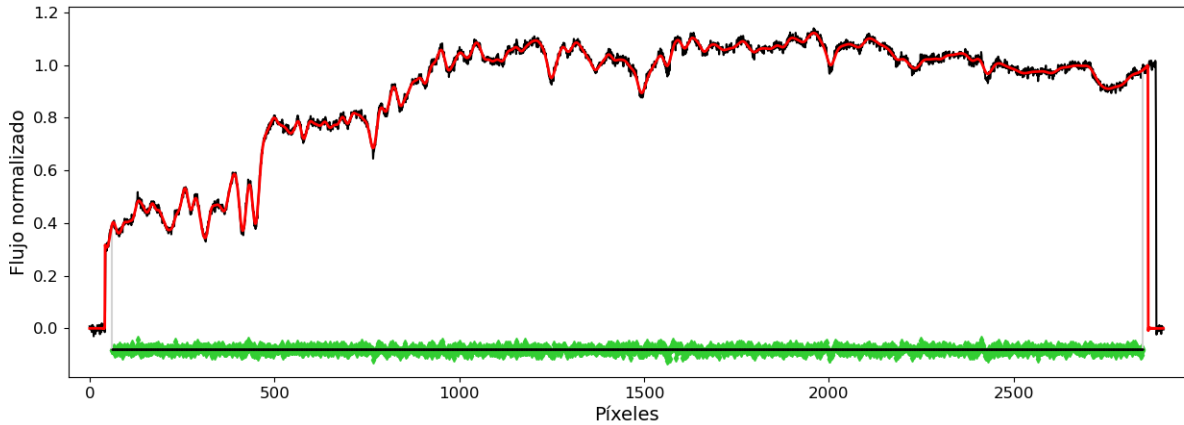


Figura 14: Ajuste del espectro sintético convolucionado mediante el método Penalized Pixel-Fitting (pPXF). El espectro sintético, con SNR=100, es la línea que se muestra en negro y, por otro lado, el ajuste del espectro se muestra con la línea en rojo. Los puntos verdes que se encuentran debajo del gráfico son los residuos que quedan comparando el espectro y el ajuste, donde la línea negra que va por los puntos verdes indica residuo nulo. Las dos líneas verticales grises que se encuentran en las dos esquinas, muestran en qué rango de píxel se ha hecho el ajuste.

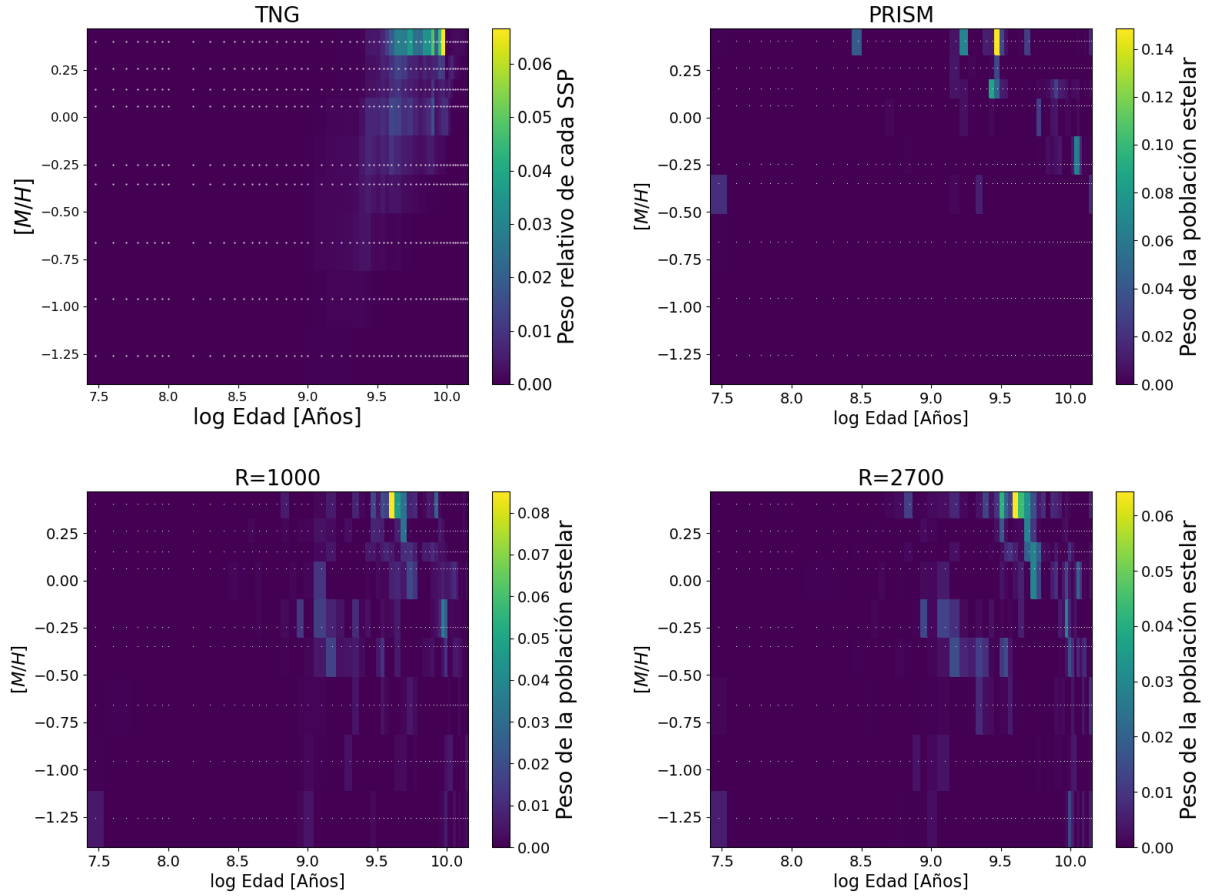


Figura 15: Mapas de pesos donde se muestran los pesos en masa en cada edad y metalicidad a diferentes resoluciones. **Arriba:** El mapa de la izquierda muestra el mapa obtenido de TNG. El de su derecha es lo que se obtiene de pPXF usando la resolución de PRISM ($R=100$). **Abajo:** el mapa de la izquierda muestra lo obtenido con resolución hipotética de $R=1000$. El mapa de la derecha es el resultado que se obtendría usando una resolución espectral, hipotética de $R=2700$. Los tres mapas que se obtienen del ajuste del espectro están a a $SNR=100$.

5. Resultados

En este apartado se muestra la capacidad de recuperación de las propiedades de poblaciones estelares de una galaxia tipo Vía Láctea a $z=1.5$ observando con JWST, haciendo un ajuste con pPXF, teniendo en cuenta tres factores: la resolución espectral del instrumento NIRSpec, SNR y la regularización. Además, se muestran las relaciones entre la masa estelar de las galaxias y los valores de edad y metalicidad, lo que permitirá discutir cómo influye la masa en la evolución de las galaxias tipo Vía Láctea.

5.1. Capacidad de recuperación de pPXF: resolución espectral, SNR y regularización.

Resolución instrumental

Hemos visto en la figura 13 que a la hora de aplicar la convolución para 'observar' el espectro de las galaxias desde JWST, que el parámetro de la resolución instrumental

del NIRSpec del JWST es parte fundamental. Nótese, sin embargo, que los datos del JWST pueden llegar a tener resoluciones espectrales mejores que las de los modelos de MILES, ya que si observamos la ecuación 9 una resolución espectral mejor implica un $FWHM_{JWST}$ menor, lo que hace que exista un punto donde la resolución instrumental del NIRSpec es mejor que el de los *templates* de MILES.

Tendríamos, en ese caso, un espectro con mejor resolución que los *templates*, por lo que a la hora del ajuste perderíamos información. Y es por ello que en este trabajo se usa la resolución de PRISM del NIRSpec, porque es el elemento dispersor que realmente entra dentro del límite de la resolución para todo el rango de longitud de ondas que permite hacer el ajuste sin pérdidas.

En la figura 15 se muestran los resultados obtenidos con los diferentes valores de resolución instrumental del NIRSpec, para ver la comparación con el mapa de pesos obtenido con TNG. Se observa que con la resolución espectral de PRISM, se pierde información de las líneas espectrales, lo que deteriora la calidad del espectro, y es por ello que con mejor resolución el resultado se parece más a lo obtenido a TNG. No obstante, por lo mismo que hemos mencionado en el párrafo anterior, necesitaríamos plantillas estelares con mejor resolución para hacer un buen ajuste de espectros con mayor calidad.

Estos mapas se han obtenido con un valor de SNR de 100, lo que permite tener una señal donde el ruido no es el dominante, y un valor de regularización de 1. Pero, ¿cómo afectan el valor de SNR y la regularización?

SNR

El valor de la señal a ruido es el indicador de la calidad del espectro. Un espectro con SNR baja indica un ruido alto para su señal, por lo que la información espectral está distorsionada y aunque pPXF haga un buen ajuste, el resultado está condicionado por el ruido.

En la figura 16 se ve que tener un valor más alto de SNR implica obtener una solución más definida y menos distribuida, ya que pPXF puede identificar mejor las propiedades estelares del espectro sin estar influenciado por el ruido. Para ver cómo recupera pPXF los valores de edad y metalicidad a diferentes SNR, se añade en la parte de los anexos los resultados obtenidos de ajustes de pPXF de espectros de una única SSP.

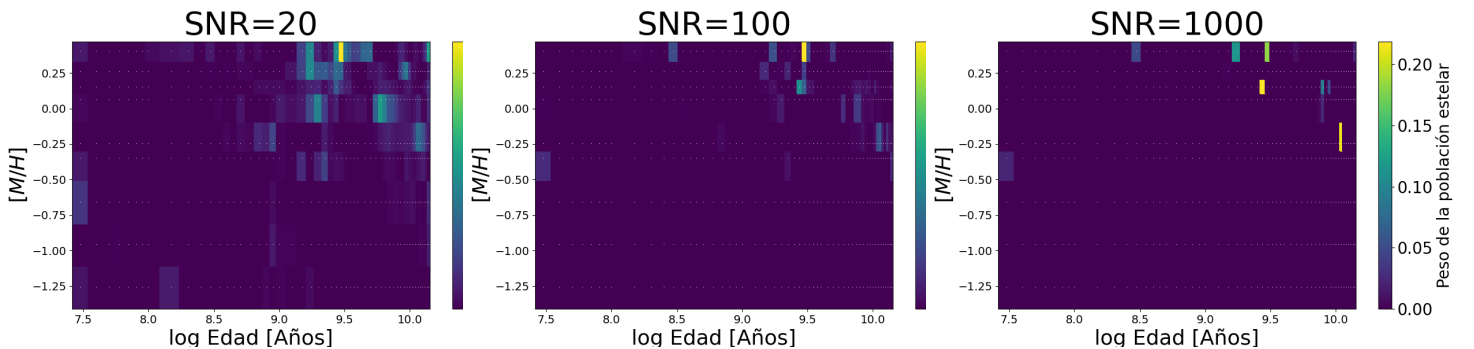


Figura 16: Mapas de pesos obtenidos del ajuste usando el método de pPXF con valores de SNR de 20, 100 y 1000, respectivamente, del espectro sintético de la galaxia con masa de $10^{10,87} M_{\odot}$

Regularización

En los mapas de pesos de la figura 17 se ve que un valor mayor de regularización implica una solución más suave, con lo que coincide con lo mencionado previamente, donde hemos dicho que el valor de la regularización dicta que las soluciones no pueden variar bruscamente entre dos SSPs vecinas.

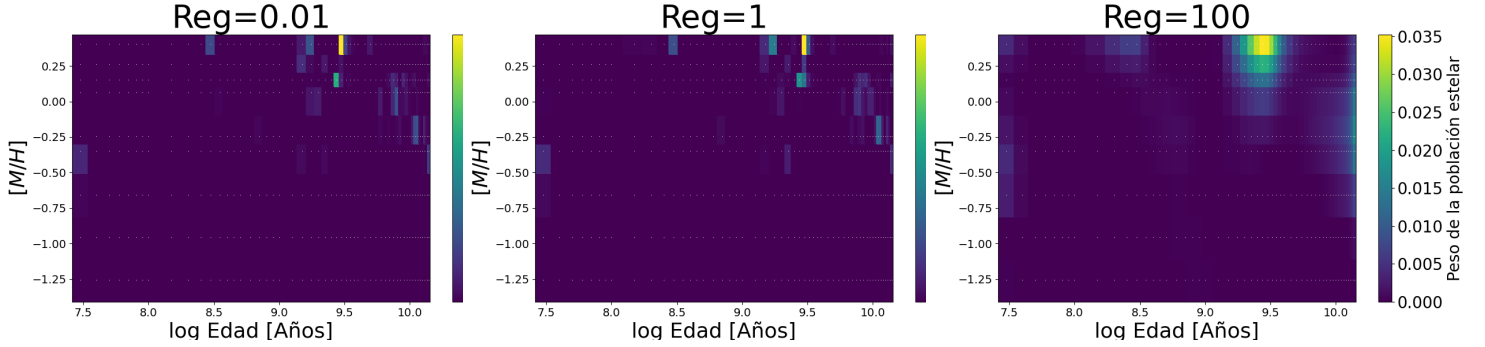


Figura 17: Mapas de pesos obtenidos del ajuste usando pPXF con valores de regularización de 0.01, 1 y 100, respectivamente, del espectro sintético de la galaxia con masa de $10^{10.87} M_{\odot}$

Capacidad de recuperación

Ahora, nos vamos a centrar cómo recupera pPXF los valores medios de edad y metalicidad, con $\text{SNR}=100$ y $\text{reg}=1$, para las diferentes galaxias de nuestra muestra de TNG. En la siguiente subsección mostraremos la relación que tiene la masa con la edad y metalicidad, lo que nos permitirá hablar de la evolución de las galaxias tipo Vía Láctea.

La figura 18 muestra que pPXF no recupera las edades de manera precisa y existe una diferencia sistemática entre lo que recupera pPXF y los valores de entrada, pero de manera relativa pPXF sí hace un buen trabajo a la hora de recuperar las edades; es decir, las galaxias que son más viejas en TNG también lo son según pPXF.

Para ver si la diferencia entre el *input* y el *output* es generalizada en todas las edades y metalicidades, vamos a comprobar cómo se recuperan los pesos en cada valor. De esta forma podremos ver en qué falla el ajuste o, mejor dicho, que valores de edad y metalicidad son subestimados o sobreestimados para que el valor medio no cuadre de manera acertada. Para ello usaremos los espectros sin convolucionar, ya que sabemos que con la resolución de PRISM se pierde información.

En la figura 19 se observa que para la galaxia con masa estelar de $10^{10.87} M_{\odot}$, pPXF subestima el valor de las edades entre $\sim 4-10$ Gyr, pero sobreestima los otros valores de edades entre los rangos de edad de 0.3-4 Gyr y 10-14 Gyr. El histograma de la figura 9, donde la mayoría de las partículas estelares se encontraban en el rango de 4-10 Gyr, explica que los valores medios obtenidos estén por debajo de los valores reales de TNG. Recordamos que estamos en el caso ideal donde la resolución espectral está limitada por los *templates* de MILES y no por la resolución de PRISM del NIRSpec. Por ello se puede entender que la diferencia entre el *input* y el *output* sea tan notoria. Es destacable que este es un caso de todas las galaxias de la muestra, pero se quiere constatar que estas tendencias de sobreestimación y subestimación ocurren en todas las galaxias, pero no en la misma medida.

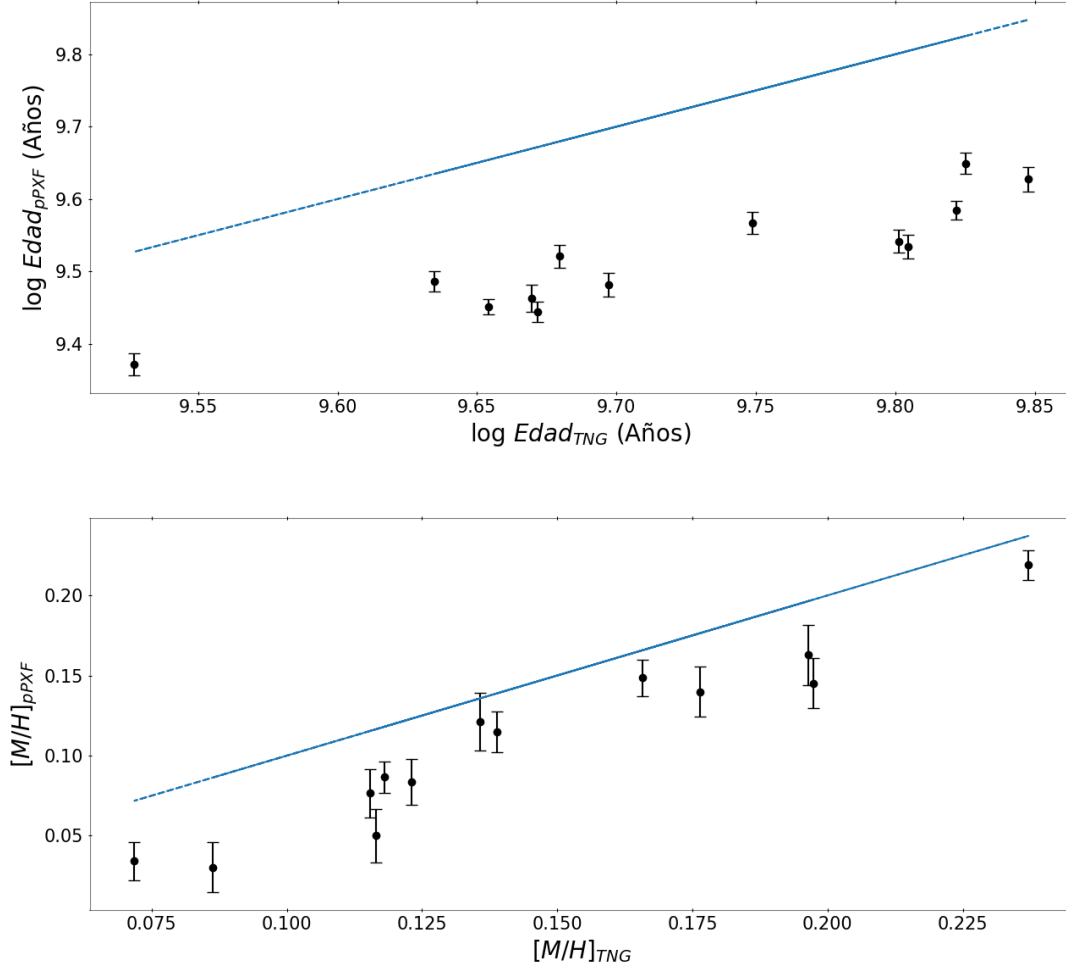


Figura 18: **Arriba:** La línea azul muestra la relación 1:1 de las edades medias que se obtienen de diferentes galaxias, con sus respectivas masas estelares, de TNG; mientras que los puntos negros muestran los valores medios obtenidos con pPXF. La barra de error se obtiene de la desviación estándar del ajuste del espectro, ya que se ha hecho el ajuste de cada espectro 20 veces. **Abajo:** La línea azul representa lo mismo que el gráfico de arriba pero con valores de metalicidad y, de igual forma, los puntos negros son las medias de metalicidades que devuelve pPXF con sus respectivos errores.

Por otra parte, hemos visto que los valores medios obtenidos por pPXF de la metalicidad se recuperan bien en el espectro convolucionado, pero con cierto error. Esto se debe a que los pesos de los valores más bajos y más altos de metalicidad son subestimados por pPXF. Destacamos, sin embargo, que los valores de entre -0.25 - 0.25 dex se recuperan bien.

En conclusión, si bien existen diferencias entre los pesos y por tanto en los valores promedios, las tendencias generales que se recuperan tanto en la edad como en la metalicidad parecen ser las mismas que recibe como entrada pPXF. Esto nos hace ser optimistas en cuanto a la información que podemos recuperar de unos posibles datos del JWST.

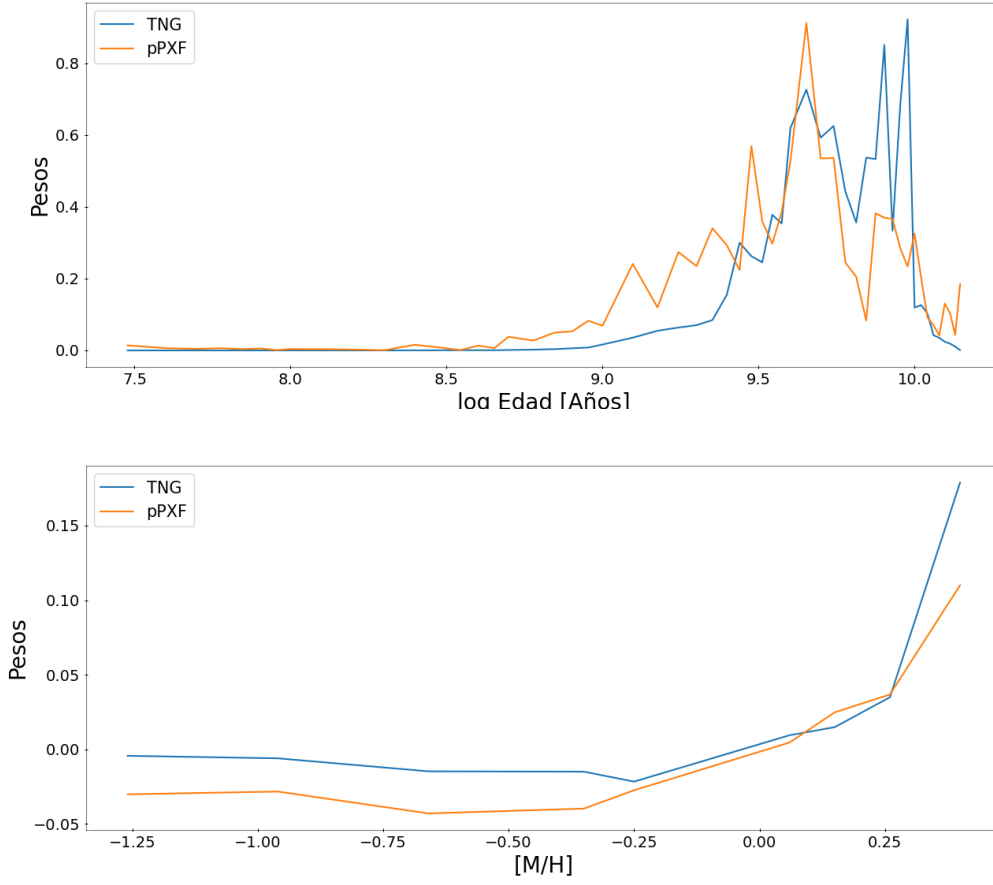


Figura 19: Gráficos donde se muestran cómo se recuperan los pesos en el eje de la edad y de la metalicidad de los espectros no convolucionados. La línea azul muestra los pesos obtenidos de TNG y la línea naranja los resultados de pPXF.

SNR	Reg	$\overline{\log T} [Gyr]$	$\overline{[M/H]}$ dex
20	100	9.63	0.08
50	100	9.61	0.10
100	100	9.59	0.13
1000	100	9.56	0.15
20	1	9.59	0.10
50	1	9.56	0.13
100	1	9.56	0.14
1000	1	9.56	0.15
20	0.01	9.59	0.09
50	0.01	9.56	0.14
100	0.01	9.56	0.14
1000	0.01	9.56	0.15

Tabla 2: Resultados de valores medios de edad y metalicidad de pPXF con parámetros diferentes de SNR y regularización para la galaxia con masa estelar de $10^{10.87} M_{\odot}$. Hay que tener en cuenta el valor del *input* de TNG del *log edad* es de 9.75 Gyr y el valor medio de metalicidad es de 0.18 dex.

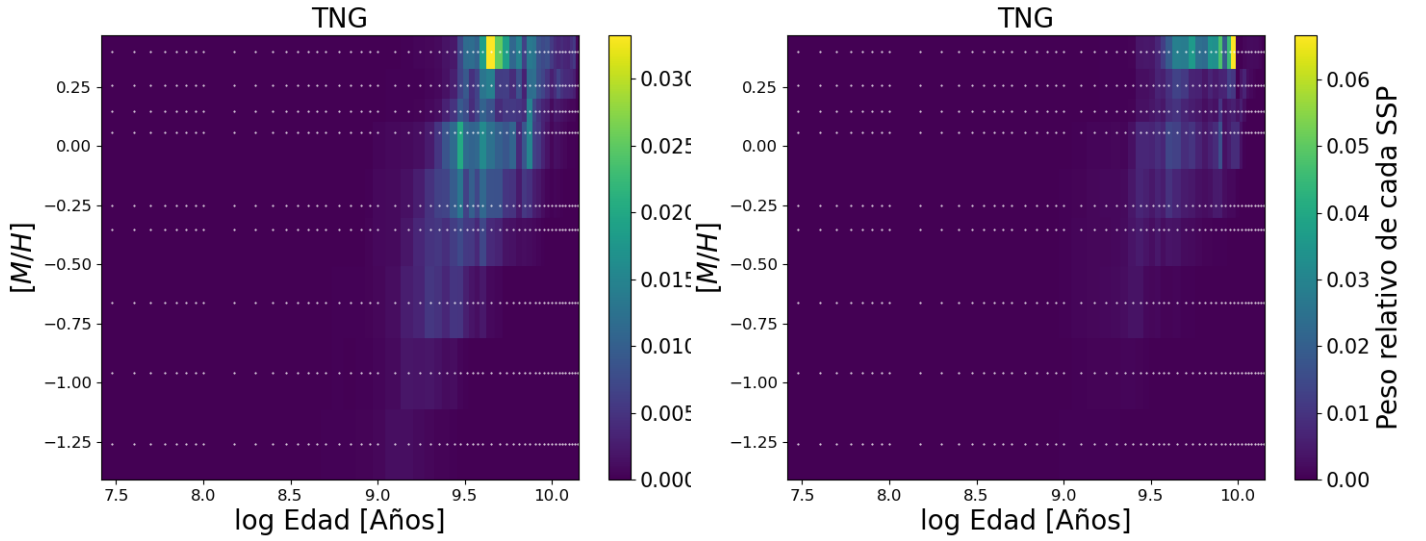


Figura 20: Mapa de pesos de dos galaxias de diferentes masas estelares. El panel de la izquierda es de una galaxia poco masiva ($10^{10.32} M_{\odot}$) dentro de nuestra muestra y el de la derecha de una galaxia más masiva ($10^{10.87} M_{\odot}$).

Para concluir este apartado se muestran en la tabla 2 cómo de bien se recuperan los valores de edad y metalicidad según su valor de SNR y regularización. Se observa que, a mayor SNR, el valor medio de la metalicidad se acerca al valor real, que en este trabajo sería el valor de TNG, pero que en la edad se va perdiendo esa similitud. Este suceso lo discutiremos en el siguiente apartado, teniendo en cuenta las investigaciones previas que han utilizado pPXF como herramienta de ajuste de espectros, y que subrayan cómo subestima y sobreestima ciertas edades y metalicidades.

5.2. Poblaciones dominantes y evolución de la galaxia

Sabemos que cada galaxia tendrá partículas estelares con unas ciertas edades y metalicidades según su formación estelar, pero si observamos la masa estelar de cada galaxia podemos predecir si las estrellas que contiene la galaxia son más o menos jóvenes y metálicas en promedio que otra galaxia con mayor o menor masa.

Como se observa en la figura 21 las edades y metalicidades varían según la galaxia que escojamos; es decir, va directamente ligada a la masa estelar de cada galaxia. Por ejemplo, si observamos la figura 20, vemos que una galaxia con menor masa estelar contiene partículas estelares de edades más jóvenes alrededor de 2.5-4.5 Gyr; y en comparación, una galaxia con mayor masa ya empieza a tener partículas estelares de edades más viejas de entre 5.5-7 Gyr de media. Por otro lado, en términos de metalicidad, se observa que mayor masa implica tener partículas estelares más metálicas de media, aunque es de subrayar que el gráfico de la izquierda de la figura 20, aún siendo la galaxia de menor masa de nuestra muestra (tabla 1), expone partículas estelares de alta metalicidad. Pero es evidente la diferencia, ya que muestra una distribución mayor de metalicidades, lo que baja la media de metalicidad.

No solo influye la masa que escojamos a la hora de las poblaciones estelares, ya que la distribución de las poblaciones estelares puede ser diferente si escojemos una región

más interna de la galaxia, como puede ser el bulbo, o si también cogemos las partículas estelares que se encuentran en los brazos espirales. Por ello, en este párrafo se quiere recordar que los valores que se obtienen están totalmente limitados a la región de 10 kpc respecto al centro galáctico.

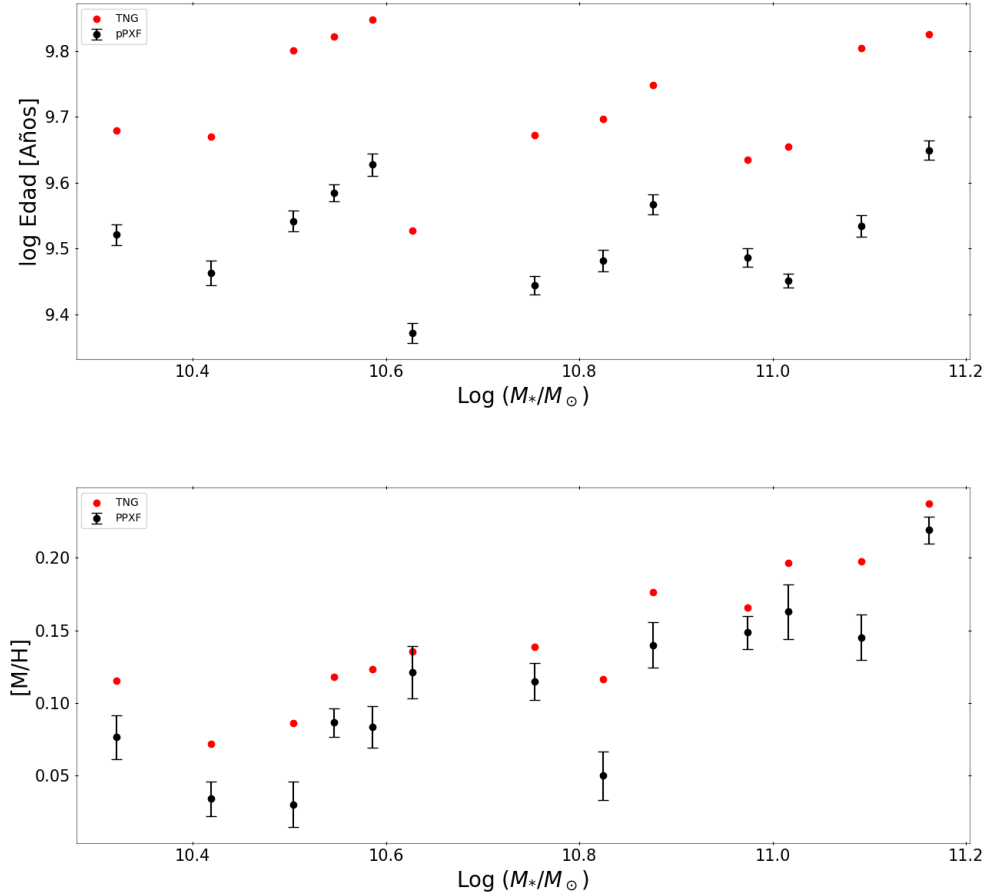


Figura 21: Gráficos de dependencias entre la edad y la metalicidad respecto a la masa estelar de las galaxias. Los puntos rojos muestran los valores medios obtenidos de los datos de TNG. Por otro lado, los puntos negros muestran los datos de pPXF, con el respectivo error estándar obtenido de los distintos ajustes del mismo espectro.

En las galaxias espirales hay una tendencia generalizada a que la densidad de gas y polvo se concentre más en los brazos espirales, lo que supone una formación estelar mayor que en otras regiones. Aunque esto no es exclusivo de los brazos espirales ya que las interacciones entre nubes de gas puede ocurrir en otras zonas como en el bulbo, pero en menor medida.

Entonces, es evidente que existe una relación entre la masa y los valores medios de edad y metalicidad de las galaxias. Esta relación se puede observar en la figura 21, donde la relación de la metalicidad es ascendente según se va aumentando en masa estelar. Sin embargo, la tendencia de la edad no se ve tan clara, ya que se puede observar una tendencia ascendente al aumentar la masa, aunque hay una ruptura en el valor de $\sim 10^{10.60} M_\odot$, lo que nos lleva a lo comentado en la introducción sobre la bimodalidad

de las galaxias (Silk and Mamon, 2012).

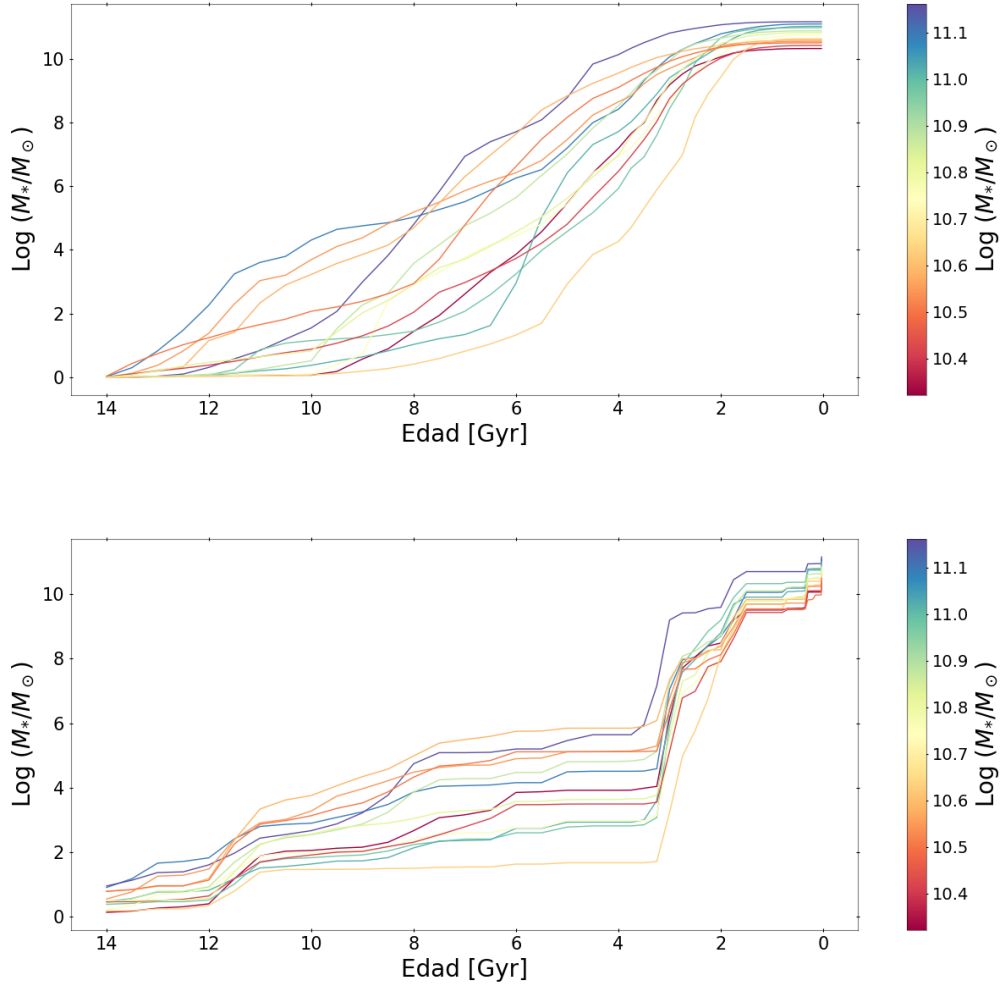


Figura 22: Gráficos donde se muestra la relación de la masa estelar, creada de la formación estelar dentro de las galaxias, dependiendo del tiempo, lo que sirve como una visualización de la historia de formación estelar de las galaxias. Cada color muestra el valor de una galaxia con diferente masa estelar. El gráfico de arriba muestra lo obtenido con los datos de TNG, y el gráfico de abajo lo obtenido con el ajuste de pPXF a la resolución de PRISM de NIRSpc.

Si queremos saber más sobre la evolución de las galaxias tipo Vía Láctea, tenemos que analizar los siguientes aspectos: la Historia de Formación Estelar (SFH, *Star Formation History*) que nos permitirá saber la tasa de formación de las partículas estelares desde el inicio del universo; y la Función de Metalicidad Dependiente del tiempo (TMF, *Time dependent Metallicity Function*), que nos mostrará cómo se fue enriqueciendo la galaxia con metales.

La SFH que se muestra en la figura 22, muestra cómo se ha ido formando la masa en la galaxia durante el tiempo, siendo el valor de hoy en día la masa que se obtiene al final. Vemos en las líneas del gráfico que las galaxias que hoy en día tienen mayor masa son las que tuvieron un aumento en masa a edades tempranas, lo que se traduce

como una formación estelar activa a esas edades. Es el caso de la línea azul oscura, que da un salto en masa en edades de entre 5-10 Gyr, consiguiendo su mayoría de masa en esta época. En consecuencia, en las edades recientes tiene una tendencia plana, lo que supone no tener formación estelar. Por lo general, se ve un aumento de la masa entre las edades de 3-10 Gyr, lo que viene en concordancia con las edades medias de las galaxias.

Además, en la figura 22 muestra también la capacidad que tenemos a la hora de recuperar la SFH de las galaxias, donde el hecho de subestimar en el ajuste los pesos en las edades intermedias hace que exista el error sistemático que hablábamos antes. Aunque sí que es verdad que las galaxias que se forman más rápido según TNG también se forman más rápido según pPXF.

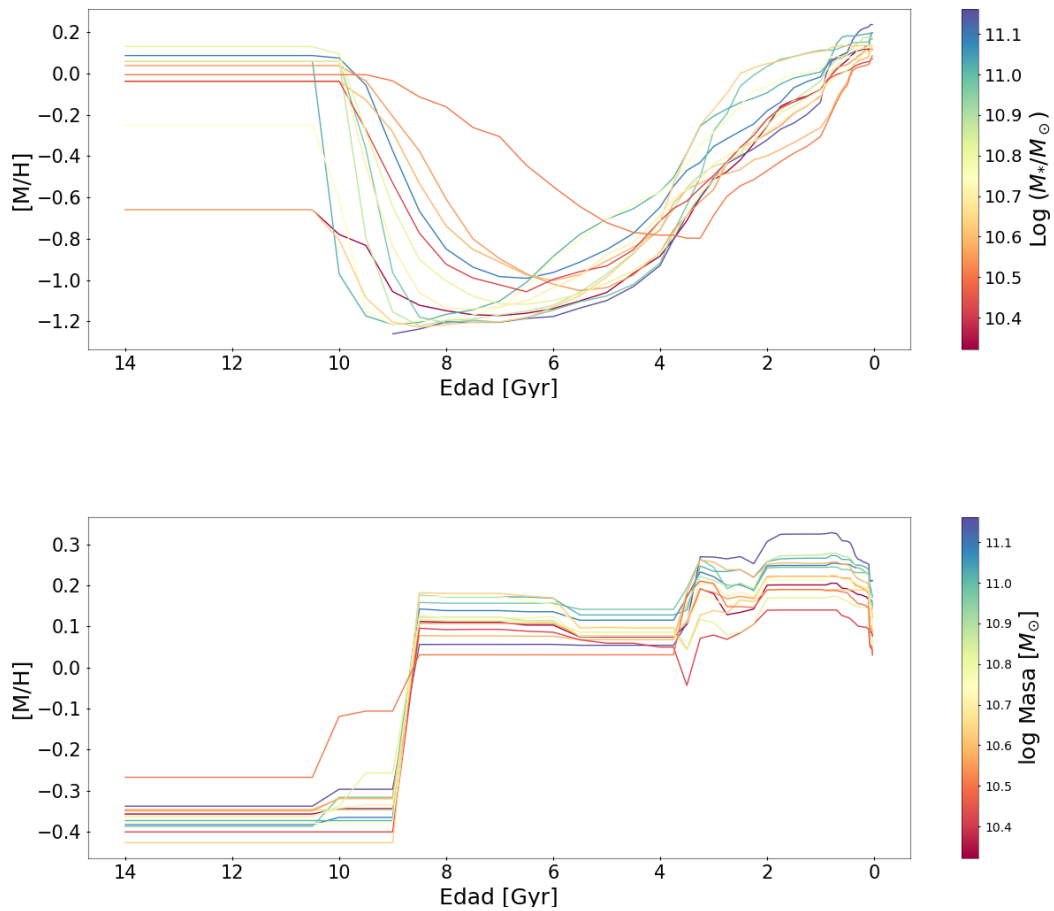


Figura 23: Función de metalicidad dependiente del tiempo (TMF, en inglés) donde cada color muestra el TMF de una masa estelar de la galaxia. Cada línea termina en el valor actual de la metalicidad. **Arriba** se muestra el resultado de TNG, y **abajo** el de pPXF.

Sin embargo, comparando las SFH de TNG y pPXF se ve que las tendencias de las masas se recupera bien. Como ejemplo, observamos tres líneas: la línea azul oscura, correspondiente a la galaxia más masiva; la línea beige, que es la línea que está más abajo del gráfico, y es de una galaxia de masa intermedia; y la línea roja, que va por la mitad del gráfico, y representa la SFH de la galaxia menos masiva de nuestra muestra.

Si comparamos estas tres líneas en los resultados de TNG y pPXF, vemos que en los dos gráficos mantienen dichas posiciones, lo que da pie a pensar que aunque no se recuperen bien los pesos, se diferencian bien las SFH. Aun así, también se ve que no existe una diferenciación entre las SFH de las galaxias menos y más masivas.

La TMF se muestra en la figura 23, donde se ha calculado la media acumulada de la metalicidad en cada edad. Es decir, para saber, por ejemplo, cuál es la metalicidad media acumulada en 8 Gyr, se han tenido en cuenta las metalicidades de los años previos para el cálculo de la metalicidad media.

Comparando ambos gráficos de la figura 23 vemos que la recuperación no es buena ya que con los datos de TNG la media de metalicidad va en aumento a partir de los 7 Gyr habiendo sufrido una caída en los primeros años. Y, en cambio, pPXF muestra una subida gradual a los 9 Gyr mostrando ciertos altibajos en los años posteriores. Aun así, se observa en los dos gráficos que las líneas de las galaxias más masivas dominan siempre los valores más altos que los demás, aunque esta diferencia se observa mejor en el gráfico de pPXF.

6. Discusión

En esta sección vamos a comparar los resultados de este trabajo con investigaciones previas para darle una consistencia a lo que hemos obtenido. Además, nos permitirá entender mejor la relevancia que tienen los diferentes parámetros mostrados, incluso la relación entre ellos. De tal forma, entenderemos mejor cuáles son los límites de este trabajo, nos hará saber qué cabos sueltos quedan para futuras investigaciones y nos adentrará en el entendimiento de la formación de las galaxias tipo Vía Láctea.

6.1. Límites en la capacidad de recuperación de las poblaciones estelares

Trabajos previos y recientes, como las investigaciones de Wang et al. (2023) y Boecker et al. (2020), han demostrado las capacidades en recuperar la información de las poblaciones estelares que tiene pPXF.

El primer estudio mencionado crea cubos de datos (dos dimensiones para coordenadas espaciales y la tercera para el espectro) sintéticos de campo integral mediante GALCRAFT y los analiza mediante pPXF para ver la capacidad de recuperación de valores cinemáticos y de poblaciones estelares. De esa forma, Wang et al. (2023) concluyen que pPXF es una buena herramienta para la recuperación de la información de la población estelar, pero aún así hay ciertas regiones que no se recuperan bien. Al principio solo lo achacan al valor de SNR, pero también se atribuye la desviación al valor de la regularización y espaciado irregular en el eje de la edad de los *templates*. De esa forma, y observando sus gráficos de la figura 11, se dan cuenta de que pPXF sistemáticamente hace tres cosas:

- Los pesos de las edades de entre 2 a 4 Gyr y de entre 12 y 14 Gyr son sobreestimados.
- Los pesos de regiones de alta metalicidad se sobreestiman.
- Los pesos de las edades de entre 5 a 10 Gyr son subestimados.

Comparando con nuestros datos, en el ajuste de los espectro no convolucionados, la figura 19 comparte lo resumido en los tres puntos casi en su totalidad: pPXF subestima los valores de edades de entre ~ 4 -10Gyr y sobreestima los pesos de las edades de entre 0.3-4 Gyr y 10-14 Gyr. Sin embargo, no vemos que se sobreestime la metalicidad en las regiones más ricas, sino que en las menos metálicas, aunque con una diferencia muy pequeña. Aún así, creemos que los pesos en metalicidad se acercan muy bien con el *input* introducido de TNG.

Respecto a la recuperación de los pesos surge una pregunta: ¿por qué se recuperan mejor las medias de los valores de metalicidades mejor que las edades? Además de los dos factores mencionados previamente (el espaciado irregular de las edades de las plantillas de MILES y el algoritmo de la regularización) también hay que mencionar que la similitud de los espectros de las edades viejas hace que el ajuste sea más dificultoso. Este último argumento se usa en el trabajo de Boecker et al. (2020), donde se hace un análisis de poblaciones estelares del espectro integrado de M54, el núcleo de la galaxia enana esferoidal, usando pPXF. También concluyen que los modelos SSP mayores que 8 Gyr, con metalicidad fija, son difíciles de distinguir; por lo que puede dar resultados poco certeros en la edad. Es por ello, que el artículo hace hincapié en que los modelos

están bien, pero que están incompletos.

No obstante, la metalicidad se recupera mejor, y esto se debe a que los valores de metalicidad están esparcidos más uniformemente y el cambio de los valores de metalicidad hace que el espectro cambie de manera notoria sin importar en qué rango de metalicidad nos encontremos. De tal forma, hace que el ajuste de pPXF en la metalicidad sea más certera. Además, vemos que el rango que mejor recupera es entre -0.25 y 0.25 dex, justo donde se encuentran la mayoría de las estrellas que hemos seleccionado (como se observa en el histograma de la figura 9). De esa forma, la medidas que se obtienen en la figura 18 se acercan más a los valores de TNG.

Es destacable también la importancia de la regularización, que se observa directamente en nuestras figuras, y es mencionada en los dos artículos de arriba. Del mismo modo, Cappellari (2023) comenta en el artículo que la regularización tiene sus límites, y que debe ser utilizada de manera mínima cuando usamos muchas plantillas para el ajuste de un espectro, aunque sí que se debe buscar un equilibrio entre los datos y la fluidez de estos datos, con el objetivo de mostrar los datos de una manera realista. De tal forma, sabiendo que la solución para el ajuste no es única, el valor de la regularización servirá para elegir la solución más suave. En las figuras 5 y 6 de este artículo se muestran los resultados de los ajustes a diferentes valores de regularización que hace Cappellari (2023), lo que viene en consonancia con nuestros resultados mostrados en la figura 17.

Se quiere dejar constancia de la importancia de la resolución espectral, ya que afecta directamente al ajuste, y se ha mostrado en los resultados de la figura 15. Si observamos los diversos elementos dispersores de NIRSpec en la figura 5 parece posible observar una galaxia a $z=1.5$, donde esa galaxia emitirá sobre todo en el óptico, pero que nos llega en longitudes de onda más largas debido a la expansión del Universo. Se quiere recordar que el límite de la resolución espectral no lo pone el instrumento NIRSpec, sino las plantillas de MILES. Por ello, si queremos ajustar los espectros al corrimiento al rojo $z=1.5$ usando el método pPXF, y con mejor resolución espectral, sería necesario usar otra librería de modelos, ya que eso permitiría ajustar espectros con mayor resolución espectral obtenidos de pPXF. O bien, al no poder mejorar las resoluciones de las plantilla, habría dos opciones: aceptar que pPXF está limitado a observar en baja resolución en ciertos corrimientos al rojo; o, convolucionar los datos del JWST para adecuar a la resolución de las SSPs de la librería estelar, aunque de esta forma se pierda información relevante del espectro.

Entonces, resumiendo, el método de pPXF es una buena herramienta para el ajuste, pero la influencia del valor de SNR, el algoritmo de regularización y el espaciado irregular entre las edades hacen que haya sobreestimaciones y subestimaciones de pesos. Además, el que los espectros de las partículas estelares viejas y ricas en metales se parezcan mucho hace que el ajuste del espectro final tenga una respuesta degenerada. El hecho de que pPXF esté limitado en resolución espectral restringe las observaciones en altas resoluciones a corrimientos al rojo más altos, por lo que este método, para este trabajo, tiene un límite observacional.

6.2. Interpretación de la evolución de galaxias tipo Vía Láctea

La relación entre la masa estelar y los valores de edad y metalicidad de las partículas estelares no son mera casualidad ya que están correlacionados por la formación y evolución de la galaxia. Ya hemos mencionado en la introducción cómo trabajos como el de Silk and Mamon (2012) teorizan cómo se forman las galaxias.

Los valores de edades y metalicidades obtenidos se puede atribuir entonces a la historia de formación estelar, eventos de fusión, los procesos de acreción del gas y a los procesos de *feedback* que paran la formación estelar. La complejidad de las diferentes poblaciones estelares en las galaxias tipo Vía Láctea no permite hacer generalizaciones. Sin embargo, las partículas estelares más viejas, Población II, se encuentran normalmente en el bulbo o halo y suelen ser las menos metálicas. Por otro lado, las partículas estelares más jóvenes, de la Población I de partículas estelares, se encuentran más en los brazos espirales y en el disco, con valores más altos de metalicidad. Aunque investigaciones como la de Carrillo et al. (2023) hacen distinción en que el disco fino es menos metálico que el disco grueso, y que además contiene partículas estelares más jóvenes en comparación.

En el caso de la metalicidad, viendo los resultados de metalicidad de la figura 21, vemos que a mayor masa estelar obtenemos un valor mayor de metalicidad. Looser et al. (2024) argumenta que cuando la galaxia evoluciona va acumulando metales por los procesos astrofísicos que ocurren, como explosiones de supernovas o vientos estelares. Entonces, teniendo en cuenta que una galaxia más masiva tiene un recorrido temporal más amplio, le ocurrirán más procesos que aumenten el valor de metalicidad. Además, se puede argumentar el aumento de metalicidad con la masa como se menciona en Silk and Mamon (2012): una galaxia más masiva genera un pozo de potencial mayor, lo que haría más dificultoso para los elementos más pesados escapar, por lo que una galaxia con mayor masa retendría los elementos más pesados.

En el caso de las edades estudios como el de Looser et al. (2024) son relevantes para recordar que una galaxia más masiva es más probable que haya sufrido más *mergers*, por lo que, seguramente, haya tenido una tasa de formación estelar mayor y se haya enriquecido más con metales. Aunque esta afirmación no se da en todas las galaxias, pero podemos decir que es más probable que los *mergers* favorezcan a la formación estelar.

Por otro lado, como hemos mencionado en los resultados, hay una rotura de tendencia en el rango de masa de entre $\log(M_*) = 10,50 - 10,60$, lo que hemos hablado de la bimodalidad de la galaxia mencionado en el trabajo Dekel and Birnboim (2006). Trabajos como el de Kauffmann et al. (2003) concluye que las galaxias menos masivas que el valor de transición tienen menor densidad superficial de masa, índices típicos de galaxias de forma de disco y caen en la secuencia azul, donde se forman las partículas estelares más jóvenes. Y por otro lado, las galaxia más masivas, tienen mayor densidad superficial de masa, con grandes concentraciones de masa típicas de bulbos, donde predominan las poblaciones más viejas, típico de las galaxias que se encuentran en la secuencia roja donde la formación estelar es muy baja. Kauffmann et al. (2003) concluye también que existe un cambio radical en el punto de transición de poblaciones jóvenes a viejas. Con ello, nuestro resultado de la figura 21 muestra que en masas en el rango $M \sim 10^{10,5-10,6}$ la media de edad aumenta con la masa, aunque cuando salimos de la zona de transición, se rompe esa tendencia, volviendo a edades más jóvenes. No obstante, se obtienen edades más viejas al aumentar la masa, como era de esperar. Entonces, vemos que la relación entre la masa estelar de la galaxia y el valor de la edad es más compleja que el de la

metalicidad.

Esto puede estar relacionado con la retroalimentación (Bower et al., 2016), donde la formación estelar está regulada por procesos astrofísicos que están ligados directamente a la masa de las galaxias. Para las galaxias de masa menor que $< 10^{10,60} M_{\odot}$ el proceso dominante que limita la formación estelar es la retroalimentación por supernovas (*Supernovae Feedback*); y para galaxias más masivas, el que limita es el AGN (*AGN Feedback*), como hemos mencionado en la introducción.

Por lo tanto, relacionando lo dicho con lo obtenido en la figura 21, entendemos que por los procesos de retroalimentación, la formación estelar está regulada y no se forman tantas estrellas. Por ello, los valores medios de edad que obtenemos son mayores, ya que una formación estelar menor implica tener partículas estelares con edades más viejas. En la zona de transición, entendemos que los dos procesos de retroalimentación tienen su relevancia, cortando la formación estelar, dando menor lugar a partículas estelares jóvenes.

Respecto a la SFH, hemos observado en la figura 22 que la formación estelar en las galaxias tipo Vía Láctea solo cesa en las épocas recientes, lo que concuerda con la investigación de Ruiz-Lara et al. (2020), que usa los datos de Gaia DR2 para el cálculo de la SFH de la Vía Láctea en un radio de 2 kpc alrededor del Sol. Es verdad que nosotros cogemos las partículas estelares respecto al centro galáctico, pero esta investigación solo cogiendo las partículas estelares de alrededor del Sol concluye que la formación estelar no ha cesado en ningún momento de la Vía Láctea. Sin embargo, este trabajo y el de Carrillo et al. (2023) mencionan que a medida que pasa el tiempo, la intensidad a la que se forman las partículas estelares decrece, mostrando la figura 2 de la investigación de Ruiz-Lara et al. (2020) que los *burst* de las formaciones estelares pierden su fuerza a medida que pasa el tiempo. Esto también es observable en nuestros resultados de la figura 22, donde en la mayoría de las galaxias la formación estelar se aplanan en las épocas más recientes.

Es de mencionar que los gráficos de SFH y TMF están relacionados, ya que la formación estelar está ligada directamente al enriquecimiento de la galaxia; es decir, un brote de formación estelar implica que en épocas más tardías haya eventos como las supernovas que enriquezcan el entorno (Silk and Mamon (2012)). Es por ello que el aumento progresivo de la TMF después de los 6-7 Gyr se puede explicar con el aumento continuo de la SFH después de los 7-8 Gyr.

7. Conclusiones

Para finalizar se mencionarán las conclusiones de este trabajo de manera breve, para ver si hemos sido capaces de observar y analizar fiablemente las galaxias tipo Vía Láctea a $z=1.5$.

- El valor de la resolución instrumental PRISM del NIRSspec deteriora la calidad del espectro, haciendo perder información relevante. Sin embargo, el límite de la capacidad de recuperación de información lo determinan los *templates* de MILES, no la resolución instrumental del NIRSspec.
- Un valor mayor de SNR implica obtener una solución más definida y menos distribuida, ya que pPXF puede identificar mejor las propiedades estelares del espectro sin estar influenciado por el ruido.
- Un valor de regularización mayor implica una solución más suave ya que la regularización dicta que las soluciones no pueden variar bruscamente entre dos SSPs vecinas.
- Aunque la recuperación de pPXF esté limitada por la resolución instrumental, a la hora de recuperar los valores de las edades y metalicidades, las tendencias generales se recuperan tanto en la edad como en la metalicidad, ya que los valores parecen ser las mismas que recibe como entrada pPXF.
- PPXF subestima los valores entre los rangos de $\sim 4-10$ Gyr, pero sobreestima los valores en los rangos de $\sim 0.3-4$ Gyr y $\sim 10-14$ Gyr. Esto se debe a la similitud de los espectros más viejos y más metálicos, lo que hace que pPXF haga un ajuste poco certero. Por otro lado, los valores de metalicidad se recuperan mucho mejor que la edad.
- Los valores de media de edad aumentan respecto a la masa estelar de la galaxia, aunque existe una rotura en el rango de masas de $\sim 10^{10.5-10.6} M_{\odot}$, siendo este rango zona de transición entre la secuencia roja y azul, que definen la bimodalidad de las galaxias.
- La metalicidad aumenta con el valor de la masa estelar de la galaxia.
- La SFH muestra que la formación estelar no para en ningún momento de la historia de la galaxia, aunque a medida que pasa el tiempo la intensidad de esa formación estelar baja, siendo las épocas más recientes de muy poca formación estelar.
- Las galaxias que se forman más rápido según TNG también recuperamos que se forman más rápido según pPXF.

Después de estas conclusiones se quiere dejar un trabajo de investigación para el futuro: analizar en profundidad la capacidad de recuperación del TMF (*Time dependent Metallicity Function*) de las galaxias tipo Vía Láctea, usando SSPs con mayor resolución y que estén más completas. Sería interesante también hacer el trabajo con otro método de ajuste espectral, ya que como hemos visto, pPXF comete fallos en el ajuste sistemáticamente.

8. Bibliografía

Bibliografía

- [1] P. A. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, M. Ashdown, J. Aumont, C. Baccigalupi, A. Banday, R. Barreiro, J. Bartlett, N. Bartolo, et al. Planck 2015 results-xiii. cosmological parameters. *Astronomy & Astrophysics*, 594:A13, 2016. 12
- [2] G. R. Blumenthal, S. Faber, J. R. Primack, and M. J. Rees. Formation of galaxies and large-scale structure with cold dark matter. *Nature*, 311(5986):517–525, 1984. 6
- [3] N. Boardman, G. Zasowski, J. A. Newman, B. Andrews, C. Fielder, M. Bershad, J. Brinkmann, N. Drory, D. Krishnarao, R. Lane, et al. Are the milky way and andromeda unusual? a comparison with milky way and andromeda analogues. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 498(4):4943–4954, 2020. 9
- [4] A. Boecker, M. Alfaro-Cuello, N. Neumayer, I. Martín-Navarro, and R. Leaman. Recovering age–metallicity distributions from integrated spectra: Validation with muse data of a nearby nuclear star cluster. *The Astrophysical Journal*, 896(1):13, 2020. 33
- [5] T. Böker, T. Beck, S. Birkmann, G. Giardino, C. Keyes, N. Kumari, J. Muzerolle, T. Rawle, P. Zeidler, Y. Abul-Huda, et al. In-orbit performance of the near-infrared spectrograph nirspec on the james webb space telescope. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 135(1045):038001, 2023. 11
- [6] R. G. Bower, J. Schaye, C. S. Frenk, T. Theuns, M. Schaller, R. A. Crain, and S. McAlpine. The dark nemesis of galaxy formation: why hot haloes trigger black hole growth and bring star formation to an end. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, page stw2735, 2016. 8, 36
- [7] M. Cappellari. Improving the full spectrum fitting method: accurate convolution with gauss–hermite functions. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 466(1):798–811, 2017. 19, 20, 21
- [8] M. Cappellari. Full spectrum fitting with photometry in ppxf: stellar population versus dynamical masses, non-parametric star formation history and metallicity for 3200 lega-c galaxies at redshift z 0.8. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 526(3):3273–3300, 2023. 34
- [9] M. Cappellari and E. Emsellem. Parametric recovery of line-of-sight velocity distributions from absorption-line spectra of galaxies via penalized likelihood. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 116(816):138, 2004. 19
- [10] A. Carrillo, M. K. Ness, K. Hawkins, R. E. Sanderson, K. Wang, A. Wetzel, and M. A. Bellardini. The relationship between age, metallicity, and abundances for disk stars in a simulated milky way. *The Astrophysical Journal*, 942(1):35, 2023. 35, 36
- [11] C. Chiappini, Gratton, and R. The chemical evolution of the galaxy: the two-infall model. *The Astrophysical Journal*, 477(2):765, 1997. 7
- [12] E. Colavitti, F. Matteucci, and G. Murante. The chemical evolution of a milky way-like galaxy: the importance of a cosmologically motivated infall law. *Astronomy & Astrophysics*, 483(2):401–413, 2008. 7

- [13] C. Conroy. Modeling the panchromatic spectral energy distributions of galaxies. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 51:393–455, 2013. 14
- [14] A. Dekel and Y. Birnboim. Galaxy bimodality due to cold flows and shock heating. *Monthly notices of the royal astronomical society*, 368(1):2–20, 2006. 8, 35
- [15] J. Falcón-Barroso, P. Sánchez-Blázquez, A. Vazdekis, E. Ricciardelli, N. Cardiel, A. Cenarro, J. Gorgas, and R. Peletier. An updated miles stellar library and stellar population models. *Astronomy & Astrophysics*, 532:A95, 2011. 19
- [16] C. Gallart, E. J. Bernard, C. B. Brook, T. Ruiz-Lara, S. Cassisi, V. Hill, and M. Monelli. Uncovering the birth of the milky way through accurate stellar ages with gaia. *Nature Astronomy*, 3(10):932–939, 2019. 5
- [17] J. P. Gardner, J. C. Mather, M. Clampin, R. Doyon, M. A. Greenhouse, H. B. Hammel, J. B. Hutchings, P. Jakobsen, S. J. Lilly, K. S. Long, et al. The james webb space telescope. *Space Science Reviews*, 123:485–606, 2006. 10
- [18] S. Genel, M. Vogelsberger, V. Springel, D. Sijacki, D. Nelson, G. Snyder, V. Rodriguez-Gomez, P. Torrey, and L. Hernquist. Introducing the illustris project: the evolution of galaxy populations across cosmic time. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 445(1):175–200, 2014. 12
- [19] P. Jakobsen, P. Ferruit, C. A. de Oliveira, S. Arribas, G. Bagnasco, R. Barho, T. Beck, S. Birkmann, T. Böker, A. Bunker, et al. The near-infrared spectrograph (nirspec) on the james webb space telescope-i. overview of the instrument and its capabilities. *Astronomy & Astrophysics*, 661:A80, 2022. 11
- [20] P. Jakobsen, P. Ferruit, C. A. de Oliveira, S. Arribas, G. Bagnasco, R. Barho, T. Beck, S. Birkmann, T. Böker, A. Bunker, et al. The near-infrared spectrograph (nirspec) on the james webb space telescope-i. overview of the instrument and its capabilities. *Astronomy & Astrophysics*, 661:A80, 2022. 19
- [21] G. Kauffmann, T. M. Heckman, S. D. White, S. Charlot, C. Tremonti, J. Brinchmann, G. Bruzual, E. W. Peng, M. Seibert, M. Bernardi, et al. Stellar masses and star formation histories for 105 galaxies from the sloan digital sky survey. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 341(1):33–53, 2003. 35
- [22] P. Kroupa. On the variation of the initial mass function. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 322(2):231–246, 2001. 13
- [23] S. Kurtz, R. Cesaroni, E. Churchwell, P. Hofner, C. Walmsley, V. Mannings, A. Boss, and S. Russell. Protostars and planets iv, 2000. 6
- [24] C. Lacey and S. Cole. Merger rates in hierarchical models of galaxy formation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 262(3):627–649, 1993. 7
- [25] T. J. Looser, F. D’Eugenio, J. M. Piotrowska, F. Belfiore, R. Maiolino, M. Cappellari, W. M. Baker, and S. Tacchella. The stellar fundamental metallicity relation: the correlation between stellar mass, star-formation rate and stellar metallicity. *arXiv preprint arXiv:2401.08769*, 2024. 7, 35
- [26] H. Mo, F. Van den Bosch, and S. White. *Galaxy formation and evolution*. Cambridge University Press, 2010. 7, 8, 9
- [27] O. H. Philcox, B. D. Sherwin, G. S. Farren, and E. J. Baxter. Determining the hubble constant without the sound horizon: Measurements from galaxy surveys. *Physical Review D*, 103(2):023538, 2021. 15

- [28] A. Pietrinferni, S. Cassisi, M. Salaris, and F. Castelli. A large stellar evolution database for population synthesis studies. i. scaled solar models and isochrones. *The Astrophysical Journal*, 612(1):168, 2004. 13
- [29] A. Pillepich, V. Springel, D. Nelson, S. Genel, J. Naiman, R. Pakmor, L. Hernquist, P. Torrey, M. Vogelsberger, R. Weinberger, et al. Simulating galaxy formation with the illustrisng model. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 473(3):4077–4106, 2018. 12
- [30] A. Pillepich, D. Sotillo-Ramos, R. Ramesh, D. Nelson, C. Engler, V. Rodriguez-Gomez, M. Fournier, M. Donnari, V. Springel, and L. Hernquist. Milky way and andromeda analogs from the tng50 simulation. *arXiv preprint arXiv:2303.16217*, 2023. 9, 10, 12, 13, 15
- [31] V. Rodriguez-Gomez, S. Genel, M. Vogelsberger, D. Sijacki, A. Pillepich, L. V. Sales, P. Torrey, G. Snyder, D. Nelson, V. Springel, et al. The merger rate of galaxies in the illustris simulation: a comparison with observations and semi-empirical models. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 449(1):49–64, 2015. 12
- [32] T. Ruiz-Lara, C. Gallart, E. J. Bernard, and S. Cassisi. The recurrent impact of the sagittarius dwarf on the star formation history of the milky way. *Nature Astronomy*, 4(10):965–973, 2020. 36
- [33] E. E. Salpeter. The luminosity function and stellar evolution. *Astrophysical Journal*, vol. 121, p. 161, 121:161, 1955. 13
- [34] V. A. Semenov, C. Conroy, V. Chandra, L. Hernquist, and D. Nelson. Formation of galactic disks. i. why did the milky way’s disk form unusually early? *The Astrophysical Journal*, 962(1):84, 2024. 10
- [35] J. Silk and G. A. Mamon. The current status of galaxy formation. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 12(8):917, 2012. 6, 8, 30, 35, 36
- [36] V. Springel. E pur si muove: Galilean-invariant cosmological hydrodynamical simulations on a moving mesh. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 401(2):791–851, 2010. 12
- [37] P. Sánchez-Blázquez, R. Peletier, J. Jimenez-Vicente, N. Cardiel, A. J. Cenarro, J. Falcon-Barroso, J. Gorgas, S. Selam, and A. Vazdekis. Medium-resolution isaac newton telescope library of empirical spectra. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 371(2):703–718, 2006. 13
- [38] R. G. Tress, M. C. Sormani, S. C. Glover, R. S. Klessen, C. D. Battersby, P. C. Clark, H. P. Hatchfield, and R. J. Smith. Simulations of the milky way’s central molecular zone—i. gas dynamics. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 499(3):4455–4478, 2020. 9
- [39] A. Vazdekis, P. Coelho, S. Cassisi, E. Ricciardelli, J. Falcón-Barroso, P. Sánchez-Blázquez, F. L. Barbera, M. A. Beasley, and A. Pietrinferni. Evolutionary stellar population synthesis with MILES – II. Scaled-solar and -enhanced models. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 449(2):1177–1214, 03 2015. ISSN 0035-8711. doi: 10.1093/mnras/stv151. URL <https://doi.org/10.1093/mnras/stv151>. 16
- [40] M. Vogelsberger, S. Genel, V. Springel, P. Torrey, D. Sijacki, D. Xu, G. Snyder, D. Nelson, and L. Hernquist. Introducing the illustris project: simulating the coevolution of dark and visible matter in the universe. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 444(2):1518–1547, 2014. 12

-
- [41] Z. Wang, M. R. Hayden, S. Sharma, J. van de Sande, J. Bland-Hawthorn, S. Vaughan, M. Martig, and F. Pinna. The milky way in context: Building an integral-field spectrograph data cube of the galaxy. *arXiv preprint arXiv:2310.18258*, 2023. 33
- [42] R. Weinberger, V. Springel, L. Hernquist, A. Pillepich, F. Marinacci, R. Pakmor, D. Nelson, S. Genel, M. Vogelsberger, J. Naiman, et al. Simulating galaxy formation with black hole driven thermal and kinetic feedback. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 465(3):3291–3308, 2016. 12
- [43] G. Worthey, S. Faber, and J. Gonzalez. Mg and fe absorption features in elliptical galaxies. *Astrophysical Journal, Part 1 (ISSN 0004-637X)*, vol. 398, no. 1, p. 69-73., 398:69–73, 1992. 8

9. Anexos

En este apartado se mostrarán los ejercicios de prueba que se hicieron para ver el funcionamiento de pPXF, donde se hicieron ajustes de un espectro de la galaxia compuesto por una única SSP, y que sirven para ver cómo actúa pPXF al cambiarle los valores de SNR. El objetivo era ver con cuánto error, respecto al valor introducido de edad y metalicidad, devolvía pPXF.

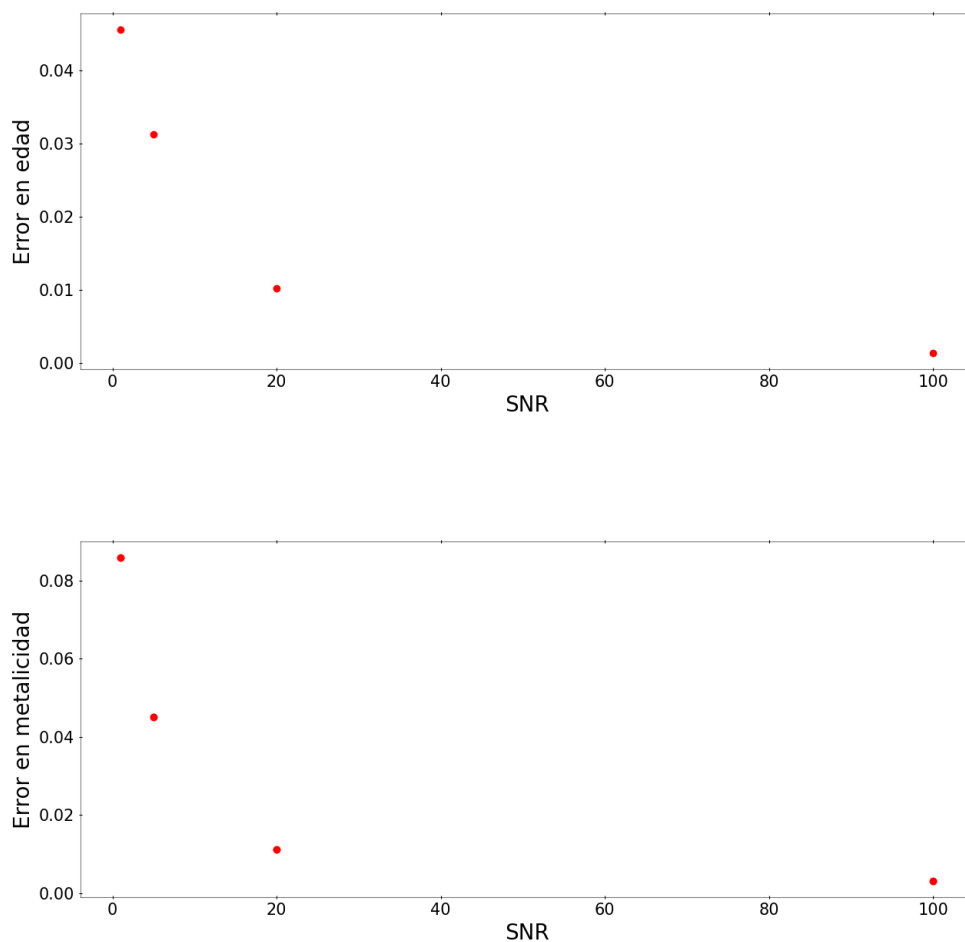


Figura 24: Error entre los datos introducidos de la SSP, edad y metalicidad, y los resultados de pPXF comparados en diferentes valores de SNR.

En la figura 24 se muestra cómo un valor mayor de SNR implica que el resultado sea más consistente con lo introducido. Aunque se quiere resaltar que aún poniendo valores de SNR mucho más altos que 100, los errores nunca convergen a 0, siempre hay un error sistemático.

En los siguientes gráficos se lleva a cabo el mismo proceso, aunque el objetivo es ver si todas las SSPs actúan igual, es decir, si el error varía de la misma forma con el SNR en diferentes valores de edad y metalicidad.

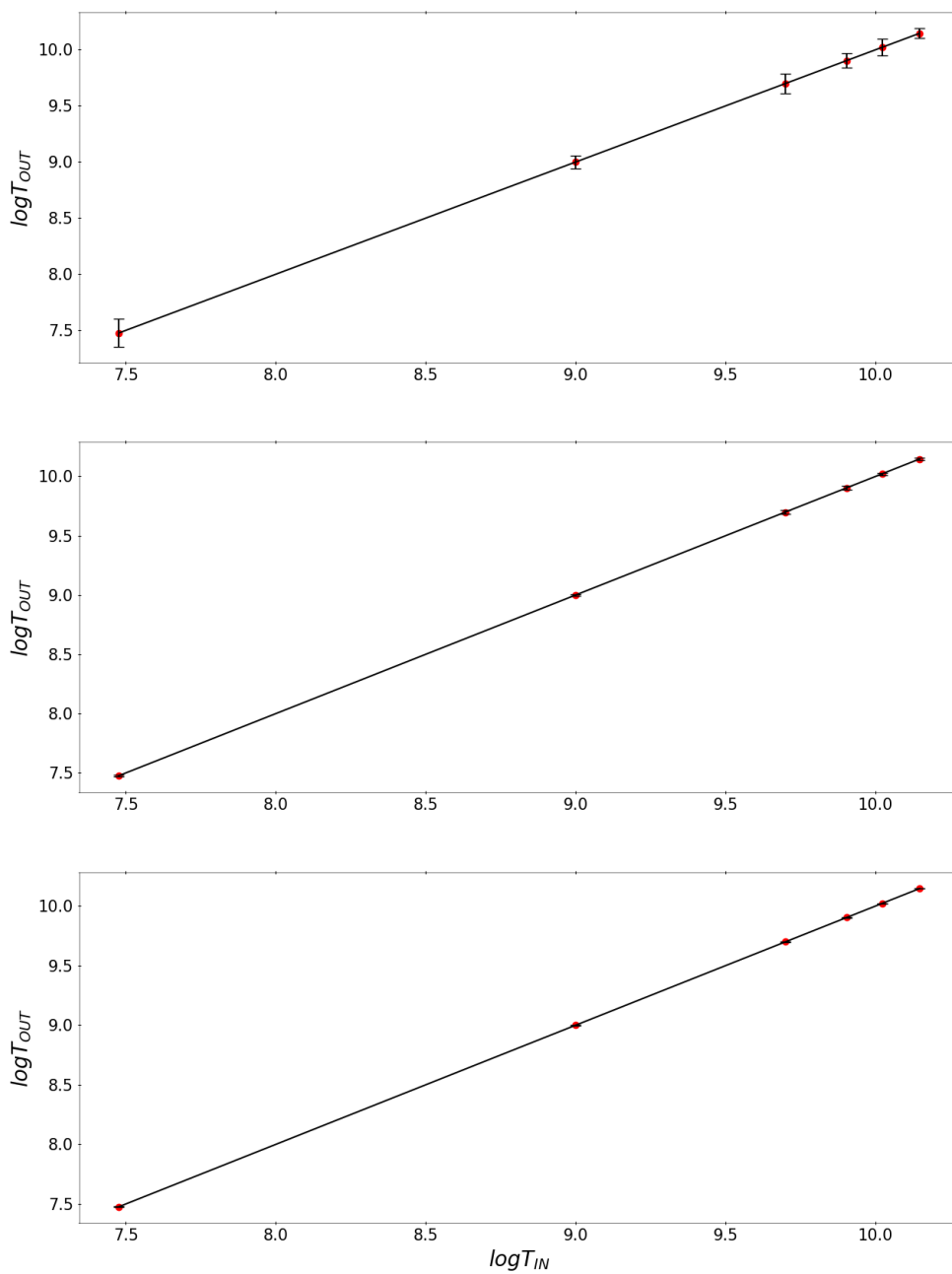


Figura 25: Relación entre las edades introducidas de diferentes SSPs y las edades que se obtienen después del ajuste de pPXF. Cada gráfico tiene un valor distinto de SNR, siendo 1,20 y 100 los valores de arriba a abjo. Los puntos rojos y la línea negra muestran la relación 1:1.

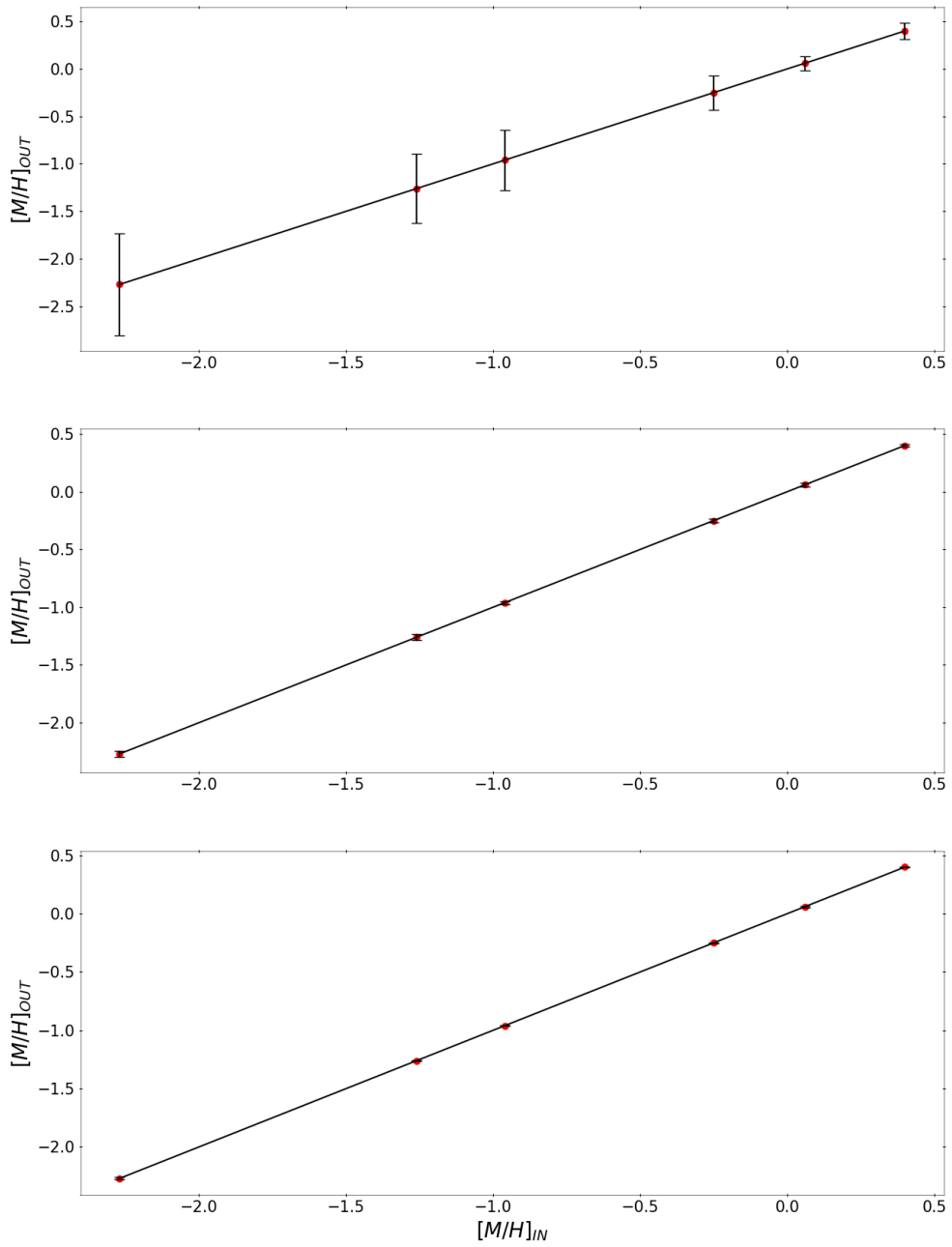


Figura 26: Relación entre las metalicidad introducidas de diferentes SSPs y las metalicidades que se obtienen después del ajuste de pPXF. Cada gráfico tiene un valor distinto de SNR, siendo 1,20 y 100 los valores de arriba a abjo. Los puntos rojos y la línea negra muestran la relación 1:1.