



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO
MAESTRÍA EN CIENCIAS (ASTROFÍSICA)

**RECONSTRUCCIÓN EMPÍRICA DE LA HISTORIA DE FORMACIÓN ESTELAR
DE GALAXIAS LOCALES E IMPLICACIONES EN SU DEMOGRAFÍA A
DIFERENTES ÉPOCAS**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS (ASTROFÍSICA)

PRESENTA:
EDER DE JESÚS SANTIAGO MAYORAL

TUTORES:
DR. VLADIMIR ANTÓN ÁVILA REESE
IA-UNAM
DR. ALDO RODRIGUEZ PUEBLA
IA,UNAM

CIUDAD DE MÉXICO, JULIO 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Reconocimientos

Agradezco profundamente a mis padres, aquellos sin los cuales no hubiera llegado al punto en el que me encuentro hoy en día, cuyos sacrificios me proporcionaron una educación y un futuro, a mi hermana que me mantuvo día y noche motivado, a mi compañera de vida que nunca dejó de sostenerme en los momentos difíciles y a mis tutores, por confiar plenamente en mí y guiarme durante este proceso académico, por nunca negarme una ayuda y brindarme de su conocimiento.

Declaración de autenticidad

Por la presente declaro que, salvo cuando se haga referencia específica al trabajo de otras personas, el contenido de esta tesis es original y no se ha presentado total o parcialmente para su consideración para cualquier otro título o grado en esta o cualquier otra Universidad. Esta tesis es resultado de mi propio trabajo y no incluye nada que sea el resultado de algún trabajo realizado en colaboración, salvo que se indique específicamente en el texto.

Eder de Jesús Santiago Mayoral. Ciudad de México, 2018

Resumen

Existe una conexión fundamental entre la evolución de la función de masa estelar de las galaxias, $\Phi(M_*, t)$ y la distribución de tasa de formación estelar con la masa estelar a diferentes épocas, $SFR(M_*, t)$. Gracias a que actualmente se cuentan con más y mejores inferencias observacionales de estas propiedades, recientemente se ha vuelto a abrir el debate de si existe consistencia entre esta conexión. No hay un consenso sobre la respuesta a esta cuestión. Una posible falla en estos trabajos previos es que suponen que las galaxias evolucionan alrededor de la relación promedio de $SFR(M_*, t)$.

En este trabajo, proponemos un enfoque “arqueológico-demográfico” en donde construyamos historias universales de formación estelar (SFHs) para una muestra completa de $\sim 6 \cdot 10^5$ galaxias locales del SDSS utilizando tres diferentes leyes. Mostramos que la ley de SFH τ -exponencial con retraso en nacimiento es la ley más simple capaz de describir la evolución de $\Phi(M_*)$ y del diagrama SFR— M_* al mismo tiempo. Mostramos que las SFHs promedio de las galaxias observadas al día de hoy no se describen del todo por una ley τ -exponencial con retraso en nacimiento, a pesar de que individualmente suponemos que las galaxias obedecen esta ley. Cuando la población de galaxias se divide en galaxias activas en SFR y pasivas o retiradas (varios criterios observacionales y físicos son usados), lo anterior es especialmente verdadero para las galaxias activas. Por su lado, las SFHs promedio de las galaxias retiradas se ajustan bien a una ley τ -exponencial con retraso en nacimiento.

Cuando se toma en cuenta los errores aleatorios en M_* y SFR a altos corrimientos al rojo para comparar adecuadamente con las observaciones, una ley τ -exponencial con retraso en nacimiento reproduce de manera aceptable la evolución temporal de $\Phi(M_*)$ y del promedio y desviación estándar de la relación SFR — M_* al mismo tiempo. Esto implica que la evolución de la función de masa de las galaxias se puede explicar básicamente en términos de pura formación estelar *in situ* dejando a las fusiones secas en un segundo plano. Por otro lado, mostramos que si aplicamos el enfoque de integración de la relación SFR — M_* tiempo por tiempo, reproducimos una evolución exagerada de $\Phi(M_*)$, misma que fue planteada en la literatura como una inconsistencia; la inconsistencia es falsa y se debe al uso de una relación promedio en vez de todo el diagrama SFR— M_* . Mostramos también que la ley τ -exponencial con retraso en nacimiento reproduce de manera aceptable las historias de densidad cósmica (por unidad de volumen comóvil) de formación estelar y de masa estelar al mismo tiempo. Encontramos

que las galaxias definidas como activas en el presente, contribuyen más a la densidad de tasa de formación estelar desde $z \sim 0.6$ mientras que a z 's mayores, domina más y más la contribución de las hoy galaxias retiradas. En la densidad de masa estelar cósmica domina siempre la contribución de las galaxias retiradas.

No obstante, nuestros resultados muestran que el surgimiento de una bimodalidad en el diagrama SFR— M_* es tardío y la fracción de galaxias retiradas decrece con z muy pronto con relación a inferencias observacionales. Esto sugiere que las SFHs de las galaxias retiradas deben decrecer más rápido que la ley τ —exponencial, es decir el proceso de apagado lento que implica esta ley debe ser reemplazado por uno rápido y antecedido de un brote inicial intenso.

Índice general

| | |
|--|-----------|
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Historias de formación estelar de las galaxias | 3 |
| 1.1.1. La secuencia principal de galaxias con formación estelar activa | 3 |
| 1.1.2. Galaxias retiradas y el apagado de la formación estelar | 7 |
| 1.1.3. Galaxias con brotes globales de formación estelar | 8 |
| 1.2. La evolución de la función de masa estelar de las galaxias | 9 |
| 1.3. Planteamiento del estudio a seguir en esta Tesis | 13 |
| 2. Metodología | 17 |
| 2.1. El Método: Restringiendo las Historias de Formación Estelar | 18 |
| 2.2. Leyes de Historia de Formación Estelar (SFH) | 20 |
| 2.2.1. Ley exponencial creciente/decreciente | 20 |
| 2.2.2. Ley τ -exponencial | 21 |
| 2.2.3. Ley τ -exponencial con retraso en nacimiento | 22 |
| 3. Muestra Observacional: El diagrama SFR – M_* y determinación de las Funciones de Masa Estelar | 25 |
| 3.1. Muestra Observacional del SDSS DR7 | 26 |
| 3.1.1. Masas Estelares y Tasas de Formación Estelar a Partir de la Base de Datos del MPA-JHU DR7 | 27 |
| 3.1.2. Masas Estelares y Tasas de Formación Estelar a Partir del Catálogo de Chang et al. (2015) | 27 |
| 3.2. Comparaciones de las Tasas de Formación Estelar | 28 |
| 3.3. Determinación de la Función de Masa Estelar | 29 |
| 3.3.1. Correcciones Locales por Volumen Utilizados a Altos Corrimientos al Rojo | 31 |
| 4. Análisis de las Leyes de Historia de Formación Estelar | 33 |
| 4.1. Relaciones sSFR– M_* y Edad– M_* Para Diferentes Leyes de Historia de Formación Estelar | 33 |
| 4.1.1. SFH con Aumento/Decrecimiento Exponencial | 34 |
| 4.1.2. SFH τ -Exponencial | 35 |
| 4.1.3. SFH τ -Exponencial con Retraso al Nacimiento. | 36 |

| | |
|---|-----------|
| 5. Resultados: La Población Total de Galaxias | 39 |
| 5.1. Distribución de los Parámetros Constreñidos de la ley de historia de formación estelar | 40 |
| 5.2. Evolución Temporal de la distribución sSFR- M_* | 42 |
| 5.3. Evolución Temporal de la Función de masa Estelar | 44 |
| 5.4. Comparaciones con la literatura: La Relación Promedio SFR - M_* y la Historia de Formación Estelar Cósmica | 46 |
| 5.5. Historias de Formación Estelar y Crecimiento de Masa Promedio | 49 |
| 6. Resultados: Evolución de las Subpoblaciones de Galaxias con Formación Estelar Activa y Retiradas | 53 |
| 6.1. Errores Aleatorios en Determinaciones de la SFR y M_* : Responsables de la Distribución Bimodal en el Diagrama sSFR- M_* a Altos z | 54 |
| 6.2. Criterios de Separación de Galaxias Activas y Retiradas | 57 |
| 6.3. Evolución Temporal de la población de Activas y Retiradas: Comparación con Determinaciones Observacionales | 60 |
| 6.4. Evolución de la Secuencia Principal de galaxias activas | 64 |
| 6.5. Historias de Formación Estelar y Masa Estelar Cósmicas de las galaxias Activas y Retiradas | 66 |
| 6.6. Historias Promedio de Formación Estelar y Crecimiento de Masa | 67 |
| 7. Discusión | 71 |
| 7.1. Criterios de Separación de las Galaxias en Activas y Retiradas Utilizando las Historias Individuales de Formación Estelar | 71 |
| 7.2. Fusiones y apagado rápido de las galaxias retiradas | 75 |
| 7.3. El Método Estadístico: Comentarios Sobre la Ecuación de Continuidad de la GSMF | 79 |
| 8. Resumen y Conclusiones | 85 |
| Bibliografía | 93 |

Introducción

La cuantificación, estudio y el eventual entendimiento físico de las historias de formación estelar de las galaxias, así como el ensamblaje de su masa estelar, es uno de los principales retos de la astronomía extragaláctica moderna. Indudablemente, restricciones robustas a las historias de formación estelar nos conducirán a una mejor comprensión de los múltiples procesos físicos y evolutivos que se han mezclado para establecer las propiedades observadas de las galaxias; dichos procesos son escasamente entendidos actualmente. Para abordar esta cuestión se han desarrollado dos principales enfoques con el objeto de cuantificar las historias de formación estelar de las galaxias a partir de observaciones:

1. Inferencias mediante el registro fósil o arqueológico, que tiene su origen en la reconstrucción de la historia de formación estelar individual de las galaxias mediante la síntesis de poblaciones estelares.
2. El enfoque del tipo estadístico (demográfico), que tiene su origen en la conexión temporal de poblaciones galácticas observadas a diferentes corrimientos al rojo (épocas) para establecer el ensamblaje promedio de las galaxias a partir de su densidad numérica.

Es indudable que hay una *diferencia sustancial* entre los enfoques del registro fósil o arqueológico y los demográficos. Los primeros usan la información actual de galaxias individuales impresa en sus propiedades observables, principalmente la Distribución de Energía Espectral, para constreñir la evolución *individual* de cada galaxia, por ejemplo su historia de tasa de formación estelar. Dicha posibilidad de seguir la historia de una dada galaxia es la gran ventaja de este enfoque. El problema es que con sólo la información actual, la técnica del registro fósil se vuelve muy degenerada e incierta para recuperar la historia de la galaxia muy en el pasado; más allá de 5-10 Gyr hacia atrás (dependiendo de la galaxia), es muy difícil poder diferenciar las contribuciones de diferentes poblaciones estelares a la historia de formación estelar y de evolución química. Además la técnica del registro fósil parte de la suposición de que las poblaciones estelares se formaron in situ en la posición en que se observan hoy. Los enfoques demográficos, por su parte, usan la información de poblaciones de galaxias observadas a diferentes

1. INTRODUCCIÓN

épocas y buscan conectar galaxias de una época con otras diferentes de otra época a nivel estadístico para así inferir la evolución “promedio” de las galaxias, por ejemplo, las historias de formación estelar. Su ventaja es que se basan en la observación directa de las galaxias a cada época, contando incluso con propiedades estructurales (radios, perfiles de brillo superficial, etc.) y dinámicas (velocidades de rotación, dispersión de velocidades). El problema con este enfoque es que las historias de formación estelar inferidas no son de una galaxia individual, son historias promedio, donde ese promedio se hace por masa, color, tipo morfológico, etc.

En recientes años se ha dado un notable progreso en la construcción de muestras locales en múltiples longitudes de onda consistentes de miles de galaxias con resolución espacial. Estas muestras de galaxias observadas con fotometría de banda ancha así como con espectroscopía de campo integral, están permitiendo lograr estudios sin precedentes en el entendimiento de las propiedades globales y locales de las galaxias y especialmente de sus poblaciones estelares. Los ejemplos más notables de muestras con espectroscopía de campo integral que han tenido como finalidad observar galaxias locales con resoluciones de 1 – 2 Kpc son el “Calar Alto Large Integral Field Area”, CALIFA, (Sánchez et al., 2012) y el “Mapping Near Galaxies at APO”, MaNGA, como parte de la colaboración SDSS-IV (Bundy et al., 2015). El éxito de estas campañas reside en que al mismo tiempo se ha logrado un progreso sustancial en el modelado de las síntesis de poblaciones estelares (para un revisión reciente sobre el tema ver por ejemplo, Conroy, 2013a). Esto ha permitido determinaciones cada vez más robustas de parámetros físicos de las galaxias (masa estelar, tasa de formación estelar y metalicidad) así como la reconstrucción arqueológica de su evolución (v. gr. Panter et al., 2007; Asari et al., 2007; Leitner, 2012; Pérez et al., 2013; González Delgado et al., 2016; Pacifici et al., 2016; Ibarra-Medel et al., 2016).

Por otro lado, en los últimos lustros ha habido un gran progreso en el emprendimiento de campañas masivas de observación de grandes muestras de galaxias a nivel global con fotometría en múltiples longitudes de onda y, en algunos casos, con espectroscopía integral. Estos avances no sólo han sido para galaxias locales sino para objetos distantes. Como resultado contamos hoy en día con muestras de galaxias con $\sim 7 \cdot 10^5$ hasta $z \sim 0.1$, como es el Sloan Digital Sky Survey (SDSS Blanton et al., 2005); $\sim 5 \cdot 10^4$, entre $z = 0.2$ y $z = 4$ (Lilly et al., 2007; Scoville et al., 2007; Grogin et al., 2011; McCracken et al., 2012); $\sim 10^4$ galaxias confirmadas por arriba de $z = 4$ (Bouwens et al., 2015; Illingworth et al., 2016), con 9 fuentes a $z \sim 10$ (~ 400 M-años de edad cósmica Oesch et al., 2018). Por lo tanto, el análisis de las propiedades estadísticas de las galaxias es cada vez mejor y con una precisión sin precedentes, de tal modo que es posible hacer mediciones robustas de distribuciones estadísticas a diferentes épocas tales como la Función de Masa Estelar de las Galaxias, $\Phi_*(M_*)$, y el diagrama SFR – M_* (SFR del inglés “star formation rate”). En consecuencia, los enfoques estadísticos se han visto enormemente beneficiados con estos avances para así poder determinar las historias de formación estelar más probables de las galaxias así como de crecimiento de masa estelar reflejado en la evolución de $\Phi_*(M_*)$ (ver, entre otros, Bell et al., 2007; Drory and Alvarez, 2008; Peng et al., 2010; Leitner, 2012; Leja et al., 2015; Muñoz and

[Peeples, 2015](#); [Tomczak et al., 2016](#); [Ciesla et al., 2017](#)).

1.1. Historias de formación estelar de las galaxias

El principal canal de crecimiento de masa estelar M_* de las galaxias individuales es por formación estelar in situ, misma que se caracteriza por la tasa de formación estelar (SFR) la cual es una cantidad instantánea que mide la cantidad de gas que se transforma en estrellas por unidad de tiempo; se mide generalmente en masas solares por año ($M_\odot/\text{año}$). Una galaxia individual puede crecer en masa estelar también por fusiones secas, cuando las estrellas de una galaxia secundaria se incorporan a la misma. No obstante, múltiples estudios observacionales han mostrado que este canal de crecimiento ex situ no es dominante en las galaxias, si acaso, puede tener importancia en las galaxias más masivas y tempranas actualmente (ver referencias en [Rodríguez-Puebla et al., 2017](#)).

Preguntas relevantes que emergen en cuanto a la evolución de la masa estelar de las galaxias son:

- ¿Qué ley(es) de historia de SFR tienen las galaxias?
- ¿Siguen las galaxias una ley universal o hay una diversidad de leyes en realidad que dependen de su masa, tipo morfológico, entorno, etc.?
- Más allá de una dada ley ¿las fluctuaciones estocásticas alrededor de la misma son importantes o no, es decir, dominan procesos estocásticos de brotes de formación estelar en las galaxias o ellas siguen más bien un proceso conforme, secular y autoregulado de formación estelar?

Estas son preguntas abiertas en el campo sobre las cuales se han hecho enormes avances en la última década gracias a los catastros observacionales mencionados más arriba. Obviamente la respuesta a estas preguntas nos lleva al entendimiento último de qué procesos físicos y evolutivos regulan la formación estelar en las galaxias.

1.1.1. La secuencia principal de galaxias con formación estelar activa

Las observaciones locales y a varios corrimientos al rojo han mostrado que la mayoría de las galaxias siguen una relación estrecha entre su SFR y masa estelar,

$$\text{SFR} = C(z) \times M_*^\alpha(z), \tag{1.1}$$

con α tendiendo a 1 hacia altos z 's y decreciendo hacia z 's menores (aunque hay discusión al respecto de este comportamiento con z); para resultados a $z \sim 0$ ver por ej. [Brinchmann et al. \(2004\)](#); [Salim et al. \(2007\)](#); [Renzini and Peng \(2015\)](#); [Cano-Díaz et al. \(2016\)](#), y para resultados a corrimientos mayores ver por ej. [Noeske et al. \(2007\)](#); [Elbaz et al. \(2007\)](#); [Karim et al. \(2011\)](#); [Rodighiero et al. \(2010\)](#); [Bauer et al. \(2013\)](#); [Whitaker](#)

et al. (2014); Speagle et al. (2014); Lee et al. (2015); Schreiber et al. (2015); Tomczak et al. (2016); Pearson et al. (2018). Noeske et al. (2007) denominaron a esa correlación, con una dispersión constante en masa y tiempo de 0.3 dex, como la *Secuencia Principal de galaxias con formación estelar activa* (SFMS del inglés Star Forming Main Sequence). La persistencia de esta estrecha correlación y el decrecimiento de su punto cero C con el tiempo cósmico sugieren que la formación estelar en la mayoría de las galaxias se ha dado y se da por procesos relativamente estables y autoregulados, típicos de los discos galácticos. Esto a su vez sugiere que existe una ley universal de historia de SFR, misma que tiene que tender a ser decreciente para la mayoría de las galaxias dado que el punto cero de la correlación decrece.

Una SFMS con $\alpha = 1$ implica una SFR específica $sSFR \equiv SFR/M_* = C$ constante con la masa, donde podemos definir $C = 1/t_{SF}$, siendo t_{SF} un tiempo característico formación estelar. Dado que $dM/M = dt/t_{SF}$, el crecimiento de la masa estelar se describe por una ley exponencial con un tiempo característico t_{SF} . Las leyes exponenciales (decrecientes y crecientes) para la historia de SFR han sido muy utilizadas en la astronomía extragaláctica desde los 70's del siglo pasado por múltiples razones y este sencillo análisis muestra que pueden tener cierto sustento observacional. No obstante la situación es más compleja con el tiempo:

1. la SFMS cambia en su punto cero, lo cual implica que C o t_{SF} son funciones del tiempo cósmico (ó z),
2. la pendiente de la SFMS, α , se determina que es generalmente < 1 y cambia también con el tiempo (tiende a decrecer),
3. muchos autores incluso determinan que la SFMS no se describe por una simple ley de potencias (v.gr. Whitaker et al., 2014; Lee et al., 2015; Schreiber et al., 2015; Tomczak et al., 2016), y
4. la SFMS tiene una dispersión de tal manera que es ingenuo pensar que todas las galaxias seguirán una traza evolutiva a lo largo de la relación principal.

Para avanzar hacia una inferencia de las historias de SFR de las galaxias a partir de la SFMS observada a diferentes épocas hay que introducir enfoques más sofisticados. Un enfoque muy explotado en la literatura es el de conectar evolutivamente el promedio de las SFMS's medidas a diferentes z 's con la simple suposición de que entre un intervalo de tiempo y otro, Δt , la SFR que corresponde a una M_* dada es constante de tal manera que el incremento en masa estelar es $\Delta M_* = SFR \times \Delta t$; la nueva masa estelar obtenida, $M_* + \Delta M_*$, es posicionada en la SFMS de la nueva época y la SFR correspondiente a esa masa es usada para dar el siguiente paso. En estos cálculos se toma en cuenta la pérdida de masa de una dada población estelar que aparece en un tiempo t por vientos estelares y Supernovas; esta pérdida se estima que va desde $\approx 30\%$ hasta $\approx 47\%$ para edades que van desde ~ 100 M-años hasta ~ 10 y más G-años (v. gr. Leitner and Kravtsov, 2011). Estos valores dependen también de la función inicial de masa (IMF del inglés Initial Mass Function) de la población estelar. Un ejemplo de la implementación del

enfoque mencionado (integración a lo largo de la SMFS) se presenta en la Fig. 1.1 tomada de Ciesla et al. (2017) donde estos autores usan determinaciones de las SFMS's de Schreiber et al. (2015), mismas que evolucionan en punto cero, pendiente y forma (ver recuadro insertado en la Fig. 1.1). En este caso el cálculo se hace hacia adelante (forward) suponiendo diferentes masas iniciales a $z = 5$ (ver también v. gr. Tomczak et al., 2016); en otros casos el cálculo se hace hacia atrás (backward), usando las masas actuales (ver por ej. Leitner, 2012; Muñoz and Peeples, 2015).

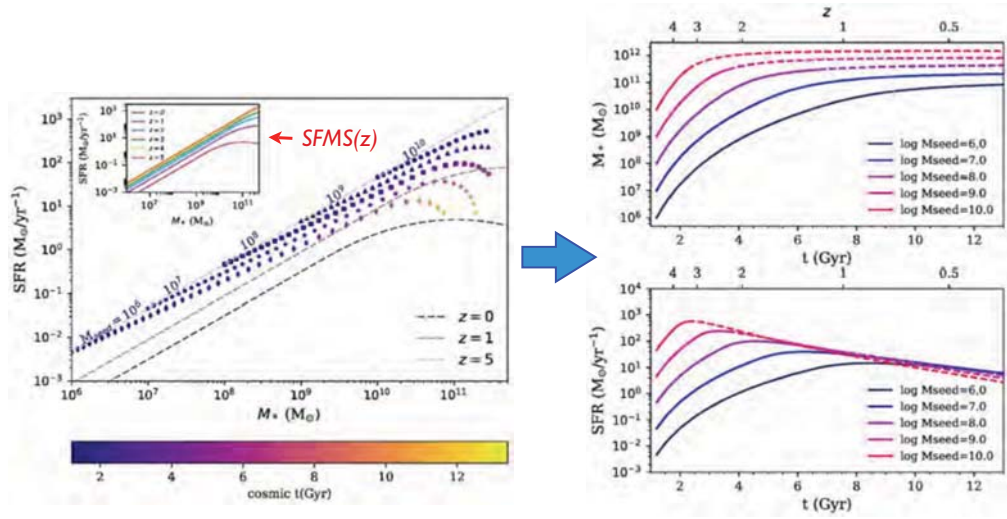


Figura 1.1: Ejemplo del método de integración a lo largo de la SFMS promedio observada a diferentes z 's (Schreiber+ 2015; recuadro en el panel izquierdo) tomado del artículo de Ciesla et al. (2017). Las historias promedio de SFR y crecimiento de masa estelar calculadas se muestran en el panel derecho. El cálculo se hizo de atrás hacia adelante en el tiempo para diferentes masas iniciales a $z = 5$.

Como resultado del método de integración de la SFMS se infieren las historias de SFR y crecimiento de masa estelar promedio, cosa que se ilustra también en la Fig. 1.1. En la Fig. 1.2 reproducimos también los resultados de Tomczak et al. (2016) (paneles superiores) y de Leitner (2012) (paneles inferiores). Los primeros, emplearon el método de integración de la relación SFR- M_* a diferentes z 's medida con el catastro ZFOURGES, tomando en cuenta sus dispersiones. Su integración es de atrás hacia adelante. El segundo autor usó el método de integración del promedio de la SMFS del presente hacia atrás utilizando varias SFMS's reportadas, lo cual lo tradujo en un intervalo de posibilidades (áreas sombreadas). Este autor buscó introducir también la contribución de fusiones secas al crecimiento de la masa (su efecto es pequeño).

Más allá de los detalles particulares de los enfoques de Ciesla et al. (2017), Tomczak et al. (2016) o Leitner (2012), note en las Figs. 1.1 y 1.2 que las historias de SFR promedio inferidas son decrecientes hacia $z \sim 0$ y que tienen un pico, más hacia el pasado mientras mayor es la masa. Esto se traduce en las historias de crecimiento de

1. INTRODUCCIÓN

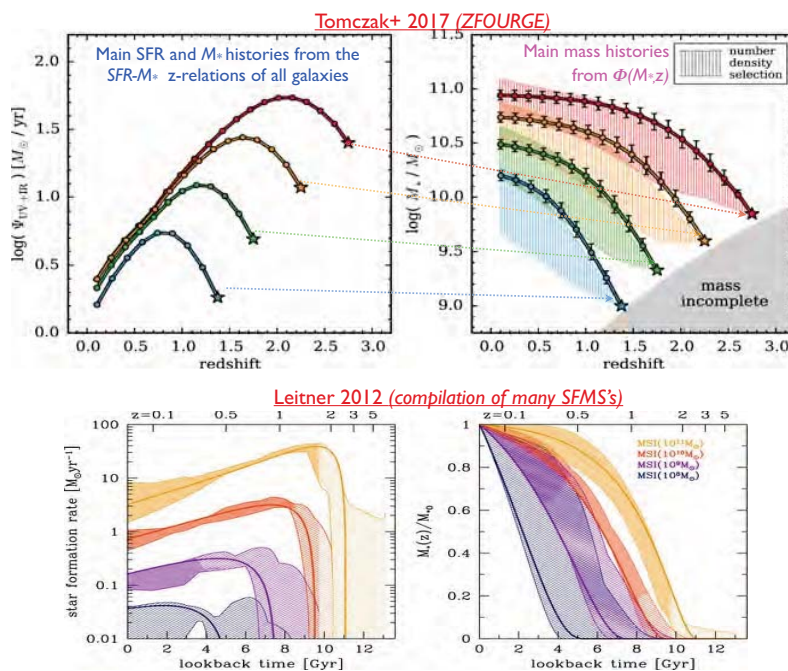


Figura 1.2: *Paneles superiores:* Ejemplo del método de integración a lo largo de la relación SFR– M_* observada a diferentes z 's considerando la dispersión; tomado del artículo de Tomczak et al. (2016). Se presentan las historias promedio de SFR y de crecimiento de masa estelar (líneas que unen los círculos). El cálculo se hizo de atrás hacia adelante en el tiempo. Se presentan también las historias de crecimiento de masa inferidas a partir de conectar las GSMF's (áreas sombreadas, tomando en cuenta dispersiones e incertidumbres). *Paneles inferiores:* Historias promedio de SFR y crecimiento de masa estelar obtenidas con el método de integración a lo largo de la SFMS promedio observada a diferentes z 's; figura tomada de Leitner (2012), quien realizó el cálculo de hoy hacia atrás usando una compilación de SFMS's (las áreas sombreadas despliegan el intervalo de las diferentes determinaciones de la SFMS en función de z). El color de las curvas corresponde a las masas estelares a $z \sim 0$ como se indica con la etiquetas del panel derecho.

masa en que las galaxias más masivas se ensamblaron más temprano que las menos masivas, un fenómeno conocido en la literatura como “downsizing” después de [Cowie et al. \(1996\)](#).

[Leitner \(2012\)](#) ha inferido también las historias de SFR y de crecimiento de masa estelar a través del método arqueológico, usando los resultados de un código de síntesis de población estelar aplicado a las galaxias del SDSS (VESPA [Tojeiro et al., 2009](#)). Las historias promedio por masa inferidas son cualitativamente similares a las que infirió con el método demográfico de integración de la SFMS, pero cuantitativamente presentan diferencias que plantean problemas para estos diferentes enfoques y sus variaciones.

1.1.2. Galaxias retiradas y el apagado de la formación estelar

En el diagrama $SFR-M_*$ se revelan otras poblaciones, mucho menos abundantes que las que se agrupan en torno a la SFMS. La más notoria es la de galaxias con muy bajos valores de sSFR, mismas que tienden a ser más comunes a las altas masas y con z tendiendo a 0. Valores bajos de la sSFR implican que la galaxia tiene una SFR muy pequeña con relación a la integral de todo su pasado (si sólo creció por SFR in situ), es decir que está casi apagada. Es difícil juzgar por el valor instantáneo de sSFR si la galaxia está ya en una fase definitiva de apagado (la llamaremos *retirada*) o si es un efecto temporal y luego podrá rejuvenecer. Por el hecho de que hay una brecha entre la SFMS y la región de galaxias retiradas, se tiende a especular que una vez que las galaxias entraron a la región de retiradas (bajos sSFR), ahí permanecen. No obstante, la mencionada brecha no es del todo vacía según muestran las observaciones (en el caso del diagrama color-masa, donde se observa la nube azul y la secuencia roja, esta zona de transición se denomina el valle verde, ver por ej. [Schawinski et al., 2010, 2014](#)). Esas galaxias en la zona de transición pueden ser galaxias que rejuvenecieron pero lo más probable, por una serie de evidencias, es que se trata mayoritariamente de galaxias en camino hacia la zona de las retiradas con tiempos de transición no tan rápidos (por rápido entenderemos < 1 G-año), sino que más bien intermedios, entre 1 y 3 G-años, ([Schawinski et al., 2014](#); [Vulcani et al., 2015](#)), .

Una de las preguntas que son parte de grandes discusiones actuales en el campo es:

- ¿Qué mecanismos operan para sacar a las galaxias de la SFMS y llevarlas a la región de las retiradas?

A estos mecanismos se les denomina genéricamente mecanismos de apagado (“quenching”). Aunque los resultados cuantitativos dependen del criterio usado para etiquetar a las galaxias como parte de la SFMS o como retiradas, a nivel cualitativo, los estudios observacionales muestran que la fracción de las galaxias retiradas se incrementa hacia $z \sim 0$ de manera diferencial con la masa: más eficientemente para las masas más grandes (v. gr. [Pozzetti et al., 2010](#); [Muzzin et al., 2013](#); [Moustakas et al., 2013](#); [Martis et al., 2016](#)). Es importante notar que *cualquier ley de historia de SFR decreciente implica ya que la galaxia está en proceso de apagado*, algo que es natural a medida que el reservorio de gas de la galaxia se transforma en estrellas.

Por lo tanto, a este punto hay que ser cautos con la semántica. El que exista una

brecha clara en los diagramas $\text{SFR} - M_*$ y $\text{color} - M_*$ (ver sin embargo [Chang et al., 2015](#); [Feldmann, 2017](#)) implica que el proceso de transición de galaxias con formación estelar activa a retiradas tuvo que ser relativamente rápido. Entonces *por apagado es mejor entender una paralización brusca ($\leq 1 \text{ Gyr}$) que implica una desviación cualitativa de la ley de historia de SFR que tienen las galaxias en la SFMS*. Por ejemplo, mientras la galaxia es dominada por el disco, su historia de SFR se da en un régimen de inestabilidades del disco a la Toomre, autoregulando su SFR con la retroalimentación por Supernovas y alimentándose por la acreción cosmológica de gas (v. gr. [Firmani and Avila-Reese, 2000](#); [Avila-Reese and Firmani, 2000](#); [Firmani et al., 2010](#)), en tal caso dicha historia se puede describir por una ley genérica. No obstante, si la galaxia sufre un evento extrínseco a su disco, por ejemplo una fusión mayor o la activación de un poderoso núcleo activo, el disco se destruye y/o el gas se expulsa de tal modo que la formación estelar ulterior de la galaxia se dará en un régimen de deficiencia de gas y en presencia de mecanismos estabilizadores que no propician la formación de nubes moleculares ([Martig et al., 2009](#)). Dado que los procesos de fusión o de duración del núcleo activo son rápidos ($< 1 \text{ G-año}$), se puede decir que la historia de SFR sufrirá en estos casos un cambio (decrecimiento) abrupto, un verdadero apagado que podrá ser de largo término si mecanismos externos evitan ulterior acreción de gas (por ej., en halos masivos, el gas chocado durante la virialización no alcanza ya a enfriar en un tiempo de Hubble o si la galaxia es satélite, el medio ambiente despoja su reservorio de gas o simplemente evita que le caiga más a la galaxia).

El estudio demográfico de las galaxias de la SFMS y de la región de las retiradas a diferentes épocas está intimamente relacionado con la cuestión de si las galaxias siguen una evolución “ordinaria” en el régimen de formación estelar autoregulada y secular -con una ley genérica de historia de SFR-, regimen al cual se le puede sobreponer un proceso abrupto de apagado en ciertos casos, de tal manera que las galaxias apagadas tengan que ser descritas con una ley diferente, al menos desde el momento en que sufren el proceso de apagado. E incluso, la situación puede ser más compleja en las distribuciones demográficas a diferentes épocas, implicando una diversidad de leyes de historia de SFR y procesos estocásticos de tal manera que una descripción genérica no es ya correcta.

1.1.3. Galaxias con brotes globales de formación estelar

En el diagrama $\text{SFR} - M_*$ existe también una región (escasa) de galaxias arriba de la SFMS por más del 1σ . Estas galaxias con altos valores de $s\text{SFR}$ pueden ser asociadas a objetos con brotes intensos de formación estelar (starburst galaxies [Rodighiero et al., 2011](#); [Schreiber et al., 2015](#); [Elbaz et al., 2017](#)). *¿Son estos brotes eventos estocásticos y poco frecuentes o son parte normal de la historia de las galaxias masivas (formadas en regiones altamente acumuladas) a altos z 's, cuando el contenido de gas molecular era 10–100 veces mayor al actual?* Esta es una cuestión justamente relacionada con lo discutido al final de la subsección previa.

Es posible que las galaxias (generalmente masivas) destinadas a sufrir un apagado

abrupto (quenching), hayan pasado por esta fase de formación estelar de brote, misma que se manifiesta más bien en el lejano infrarrojo (galaxias LIRG y ULIRG) y que se dispara por procesos comunes en el universo de alto corrimiento al rojo: fusiones gaseosas (húmedas) y/o fuerte acreción de gas frío a través de filamentos de materia oscura que aún no han sido virializados (destruidos) en el halo de la galaxia en formación, los así llamados “cold streams” (Dekel and Birnboim, 2006; Dekel et al., 2009a,b). De esta manera, brotes globales intensos de SFR conllevan al apagado de la galaxia, entrando posteriormente la misma en un régimen diferente y débil de SFR (ya no de disco).

El estudio de las galaxias en el lejano infrarrojo/milimétrico está en su infancia y hay que tener en cuenta que la población de las así llamadas galaxias polvorientas con formación estelar (“dusty star forming galaxies”, DSFGs) puede ser importante (ver una reseña reciente en Casey et al., 2014). Esta fase de brote intenso de formación estelar, que especulamos como antecesora del apagado, podría ser mucho más común en el diagrama SFR– M_* construido con observaciones en el lejano IR y (sub)milimétrico. Uno de los proyectos claves del Gran Telescopio Milimétrico “Alfonso Serrano”(GTM¹) en la Sierra Negra, Puebla, es levantar censos en el (sub)milimétrico de las DSFGs y estudiar a fondo dichas galaxias (ver algunos primeros resultados en Pope et al., 2017; Zavala et al., 2018).

1.2. La evolución de la función de masa estelar de las galaxias

La Función de Masa Estelar de la Galaxias (GSMF del inglés Galaxy Stellar Mass Function), $\Phi_*(M_*)dM_*$, describe el número de galaxias por unidad de volumen comóvil en un dado intervalo de masas estelares $[M_*, M_* + dM_*]$. Desde el punto de vista evolutivo, la GSMF codifica el ensamblaje de la masa estelar de las galaxias mediante los procesos de (1) formación estelar in situ (integral de la historia de SFR, incluyendo brotes y apagado) y (2) por fusiones secas con otras galaxias. La evolución de la GSMF se puede describir entonces por una ecuación de continuidad (Drory and Alvarez, 2008):

$$\frac{\partial \Phi_*(M_*, t)}{\partial t} \Big|_{\text{SFR}} = - \frac{\partial}{\partial M_*} [\Phi_*(M_*, t) \dot{M}_*(M_*, t)] \quad (1.2)$$

$$\frac{\partial \Phi_*(M_*, t)}{\partial t} = \frac{\partial \Phi_*(M_*, t)}{\partial t} \Big|_{\text{SFR}} + \frac{\partial \Phi_*(M_*, t)}{\partial t} \Big|_{\text{Merge}}, \quad (1.3)$$

donde $\dot{M}_*(M_*, t)$ es la SFR de una galaxia de masa M_* al tiempo t . Excluyendo las fusiones, la evolución de la GSMF es entonces resultado del flujo de galaxias contadas en un dado intervalo de masa en dos épocas al crecer ellas por la SFR entre esas dos épocas. De manera conceptual se puede decir que la SFR es proporcional a la derivada

¹<http://www.lmtgtm.org/?lang=es>

1. INTRODUCCIÓN

temporal de la GSMF. Esta conexión entre las dos cantidades observacionales, $\Phi_*(M_*, t)$ y $SFR(M_*, t)$ ha motivado múltiples estudios para calcular una en función de otra (v.gr. [Bell et al., 2007](#); [Drory and Alvarez, 2008](#); [Peng et al., 2010](#); [Papovich et al., 2011](#); [Moustakas et al., 2013](#); [Leja et al., 2015](#); [Steinhardt et al., 2017](#); [Tomczak et al., 2016](#)). En algunos de estos estudios se separan las galaxias observadas entre las activas de la SFMS (o azules) y las retiradas/pasivas (o rojas). Preguntas claves que surgen al respecto son entonces:

- ¿Son consistentes la evolución de la Función de Masa Estelar de la Galaxias y las tasas de SFR vs. M_* observadas a diferentes z 's?
- ¿Es consistente la integración temporal de la historia global de la SFR observada, $\dot{\rho}_*(t)$, con la historia de crecimiento de masa estelar global observada, $\rho_*(t)$?
- ¿Cuál es el rol de las fusiones secas en la evolución de la Función de Masa Estelar de la Galaxias y en el diagrama SFR- M_* ?

Generalmente se encuentra que el crecimiento en masa de las galaxias de la SMFS sobrepredice notablemente la GSMF, en especial en las bajas masas. En el lado de las altas masas, permitir la transición de galaxias de la SMFS a la región de retiradas, alivia el problema (ver por ej. [Bell et al., 2007](#); [Tomczak et al., 2016](#)). [Peng et al. \(2010\)](#) y [Peng et al. \(2012\)](#) van más allá y plantean un escenario empírico para el origen de la GSMF total y su descomposición en azules y rojas. Partiendo de una GSMF ley de potencias a épocas muy tempranas, suponen que la masa de las galaxias crece con una ley de SFR de la SFMS pero introducen una tasa de apagado por masa y entorno, donde el primero es proporcional a la SFR, de tal manera que galaxias masivas en el pasado que alcanzaron altos valores de SFR se apagan pronto. Por su parte, [Drory and Alvarez \(2008\)](#), usando sólo la $\Phi_*(M_*, t)$ y $SFR(M_*, t)$ totales, atribuyen la diferencia que emana entre ambas al aplicar la ecuación de continuidad (1.3) a la tasa de fusiones (ver también [Moustakas et al., 2013](#)).

En los trabajos de [Leja et al. \(2015\)](#) y [Steinhardt et al. \(2017\)](#) se plantea una fuerte dificultad para conciliar las observaciones de $\Phi_*(M_*, t)$ y $SFR(M_*, t)$. La Fig. 1.4, tomada de [Leja et al. \(2015\)](#), ilustra bien el problema. Haciendo crecer la $\Phi_*(M_*)$ observada a un dado tiempo con la relación observada SFR- M_* de las galaxias con formación estelar activa (SFMS), la $\Phi_*(M_*)$ resulta pronto con una pendiente a las bajas masas mucho mayor a la observada. [Leja et al. \(2015\)](#) concluyeron que la única forma de encontrar consistencia entre ambos conjuntos de observaciones es haciendo que la relación SFR- M_* de la SFMS se caiga considerablemente a las bajas masas, es decir la pendiente α en la ec. (1.1) se tiene que hacer mayor hacia masas menores a una dada M_* . De otro modo, la densidad de galaxias resulta mucho más alta de la que se observa en la GSMF para $z \lesssim 1$, particularmente a bajas masas, tal como se aprecia en la Fig. 1.4. Puesto de otro modo, una relación SFR - M_* para la SFMS descrita por una ley de potencias como la ec. (1.1) predice una GSMF con una pendiente mayor a la que se observa a bajos z y hacia las masas bajas. Han habido trabajos con muestras profundas que combinan luminosidades en FUV e IR para estimar la SFR de

las galaxias que muestran que puede existir una desviación de la ley de potencias por debajo de $\log M_* \lesssim 10$ (Whitaker et al., 2014) aunque no en el grado que Leja et al. (2015) dicen requerirse para estar de acuerdo con la evolución de la GSMF.

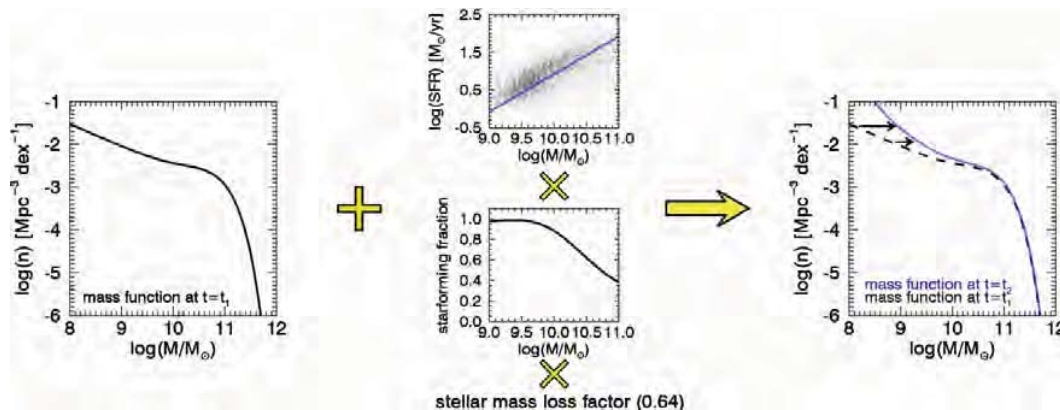


Figura 1.3: La conexión fundamental entre $SFR(M_*, t)$ y $\Phi_*(M_*, t)$. El diagrama muestra que después de tener una población inicial de galaxias con una $\Phi_*(M_*, t_{in})$ se puede utilizar la relación promedio $SFR(M_*, t_{in})$ de las galaxias con SFR activa (la SFMS) para predecir la GSMF en una siguiente época y así. Figura tomada de Leja et al. (2015).

Por otro lado, Steinhardt et al. (2017) han propuesto que, para resolver este problema, las fusiones entre las galaxias de baja masa debieron jugar un papel muy importante durante su evolución; de esta manera las galaxias inicialmente de baja masa y alta SFR abandonan la región de baja masa que crece activamente por SFR. No obstante, es pobre la evidencia de una tasa de fusiones de las galaxias tan alta como la requerida por Steinhardt et al. (2017), aunque para masas muy pequeñas y a z 's altos no hay estudios observacionales. Inferencias semi-empíricas constreñidas con múltiples observaciones no apoyan un escenario de alta tasa de fusiones de galaxias de baja masa (Rodríguez-Puebla et al., 2017), ni tampoco los resultados de simulaciones hidrodinámicas cosmológicas (Rodríguez-Gomez et al., 2016) donde se ha estudiado el ensamblaje promedio de las galaxias.

La fuerte limitación de la mayoría de los estudios mencionados arriba, incluyendo los dos recientes de Leja et al. (2015) y Steinhardt et al. (2017), es usar para sus cálculos la relación promedio SFR- M_* (total o de la SFMS). En realidad hay una dispersión en torno a esta relación y las galaxias pueden o mantener una coherencia de largo término en sus trazas evolutivas de tal manera que si están arriba o abajo de la relación promedio siempre se mantendrán arriba o abajo de ella, o pueden también oscilar alrededor del promedio con el tiempo. El primer caso implica que la dispersión observada en la SFMS está asociada a una diversidad fundamental en las leyes de historia de SFR de las galaxias de tal manera que usar las relaciones de SFMS promedio sólo genera una ilusión de un patrón de crecimiento que es falso. En el segundo caso, la dispersión alrededor del promedio es una fuente de ruido ó proceso estocásticos que dificulta o distorsiona la inferencia de las trazas universales. Por ambas razones, más la primera que la segunda,

1. INTRODUCCIÓN

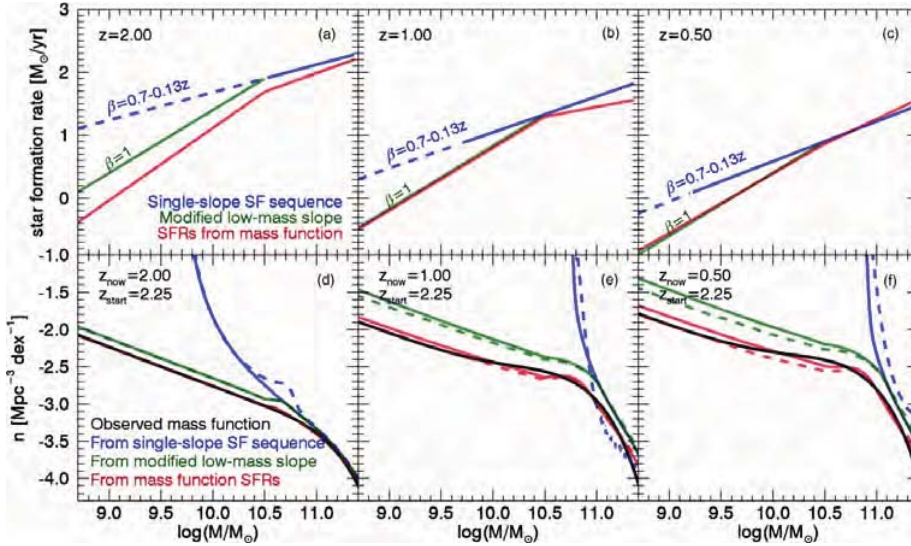


Figura 1.4: Paneles (a)-(c) muestran las diferentes relaciones adoptadas entre la masa estelar y la SFR. Los Paneles (d)-(f) muestran la GSMF, evolucionada con las correspondientes relaciones de SFR, utilizando el enfoque mostrado en la Fig 1.3. Figura tomada de [Leja et al. \(2015\)](#). El crecimiento excesivo de la GSMF a bajas masas es evidente.

es posible que *usar relaciones promedio de una población para calcular el promedio de otras relaciones/distribuciones, derive en inferencias incorrectas.*

Por ejemplo, [Tomczak et al. \(2016\)](#) han intentado introducir una dispersión coherente o incoherente en sus inferencias empíricas de la conexión entre $\Phi_*(M_*, t)$ y $SFR(M_*, t)$, encontrando que la misma ayuda a mejorar la consistencia entre las observaciones a diferentes tiempos de ambas distribuciones. No obstante, estos autores reportan que persisten ciertas diferencias para las galaxias masivas ($> 10^{10} M_\odot$) que estudian: las historias de crecimiento de masa calculadas integrando $SFR(M_*, t)$ están por encima de las historias calculadas usando $\Phi_*(M_*, t)$; sólo para las galaxias más masivas a z 's bajos se invierte ligeramente la situación y es debido al efecto de las fusiones secas (ver panel der. superior en la Fig. 1.2, las áreas sombreadas son las historias usando la información de $\Phi_*(M_*, t)$).

Una reminiscencia del problema mencionado ha sido también reportado en la literatura a nivel de las cantidades globales (por unidad de volumen cósmico) de la SFR y de la masa estelar, $\dot{\rho}_*(z)$ y $\rho_*(z)$ respectivamente. La integración en el tiempo de $\dot{\rho}_*(z)$ da un estimado de $\rho_*(z)$ y se encuentra que el mismo es superior en todas las épocas a la densidad global de masa estelar que se obtiene directamente a partir de las observaciones de $\Phi_*(M_*, t)$ ([Wilkins et al., 2008](#); [Reddy and Steidel, 2009](#)), aunque [Madau and Dickinson \(2014\)](#) con mediciones y correcciones de sistemáticos más recientes estimaron que la diferencia se reduce bastante.

En conclusión, parece haber una importante tensión entre las observaciones de $SFR(M_*, t)$ y $\Phi_*(M_*, t)$, *al menos cuando los enfoques para conectar una con otra*

usan sólo los promedios de las correlaciones $SFR - M_*$ (totales o de la SFMS) y no incluyen el rol de las fusiones secas.

1.3. Planteamiento del estudio a seguir en esta Tesis

Los estudios observacionales, la modelación empírica y los problemas que derivan de la misma discutidos en las previas secciones muestran la necesidad de exploraciones de carácter integral (arqueológico y demográfico) que hagan uso de muestras completas de galaxias en volumen y masa. En la Fig. 1.5 se presenta en forma esquemática el enfoque integral del problema del crecimiento de la masa estelar de las galaxias. Este es un enfoque que combina la esencia de los métodos arqueológicos y demográficos mencionados al principio del Capítulo.

Describamos la Fig. 1.5. Supongamos que tenemos caracterizada a la población local de galaxias en el diagrama $SFR - M_*$ y en la distribución de sus masas, $\Phi_*(M_*)$, en un volumen completo arriba de una masa estelar (por ejemplo, usando el SDSS). Si constreñimos los parámetros para cada galaxia de una ley propuesta de historia de SFR, es posible evolucionar hacia atrás a cada una de ellas (como en el método arqueológico) y medir a cada z o tiempo hacia atrás toda la demografía, es decir:

- la función de masa estelar de las galaxias (GSMF), $\Phi_*(M_*, t)$;
- la distribución de las galaxias en el diagrama $SFR - M_*$, $SFR(M_*, t)$;
- la fracción de galaxias retiradas y de aquellas con SFR activa, $f_{RG}(t)$ y $f_{SF}(t)$ (y por ende las GSMF de ambas poblaciones así como la SFMS y la región de galaxias retiradas en el diagrama $SFR - M_*$);
- las densidades de SFR y masa estelar globales, $\dot{\rho}_*(t)$ y $\rho_*(t)$, así como su segregación por la contribución de las galaxias que en la muestra observacional local son con SFR activa o retiradas.

Con este catálogo sintético podemos estudiar entonces dos tipos de cuestiones discutidas en las previas secciones:

- A). *Exploración de suposiciones metodológicas*: Al contar con un catálogo sintético podemos explorar el intervalo de validez de suposiciones que hemos visto suelen hacerse. Por ejemplo, la de usar el promedio de las correlaciones $SFR(M_*, t)$ para inferir la evolución de $\Phi_*(M_*, t)$ o la inversa (sección 1.2). Se puede explorar también cuánto puede variar una ley de historia de SFR inferida del promedio de las galaxias sintéticas en un intervalo de masas de la ley intrínseca propuesta para las galaxias (sección 1.1). Con el catálogo sintético, podemos poner a prueba criterios empíricos a nivel demográfico para separar galaxias con SFR activa y retiradas, viendo su consistencia con criterios físicos aplicados a una ley de historia de SFR

razonable. También podemos explorar los efectos de introducir errores sistemáticos y aleatorios en las cantidades físicas al momento de recuperar correlaciones y dependencias.

- B). *Exploración de escenarios*: Los catálogos observacionales usados como punto de partida (por ej. el SDSS con diferentes metodologías para calcular la SFR) permiten constreñir los parámetros de leyes de historia de SFR propuestas y hacer las predicciones enlistadas arriba (ver Fig. 1.5). La comparación de estas predicciones demográficas con las observaciones correspondientes a diferentes z 's discutidas en las secciones previas permiten poner a prueba la capacidad del método arqueológico, discernir leyes de historia de SFR que sean capaces de producir consistencia con las observaciones, estudiar la evolución de las fracciones de galaxias de la SFMS y las retiradas, etc.

Con esta finalidad de realizar dichas exploraciones, en esta Tesis construiremos catálogos sintéticos de poblaciones de galaxias a diferentes épocas a partir de un catastro observacional completo a $z \sim 0.1$ de $\sim 6 \times 10^5$ galaxias (SDSS) y constreñiremos los parámetros de leyes sencillas de historia de SFR para cada galaxia. Nótese que en este trabajo no suponemos que las galaxias evolucionan alrededor de las relaciones promedio; más bien predecimos dichas relaciones. Mostraremos que una ley de formación estelar del tipo τ -exponencial con retraso en el nacimiento es un buen modelo que explica la consistencia entre ambas observables, al menos para las galaxias con formación estelar activa. Para esto, mostraremos que es crucial tomar en cuenta errores aleatorios en las mediciones de las masas estelares y las SFR. Veremos también que para explicar el surgimiento relativamente temprano de una población de galaxias retiradas, es necesario considerar el rol de las fusiones secas en el crecimiento de la masa estelar de las galaxias especialmente masivas, así como introducir una variación a la ley τ -exponencial con retraso en el nacimiento: a partir de cierto tiempo, su decrecimiento debe ser más abrupto (apagado).

La Tesis se divide como sigue. El Capítulo 2, introduce la metodología que seguiremos en la Tesis. Describiremos cómo constreñimos parámetros de una dada ley de historia de SFR usando sólo la determinación de la masa estelar y SFR al tiempo de observación de una galaxia. Adicionalmente, discutiremos los tres tipos de leyes de historia de formación estelar que hemos considerado. El Capítulo 3 presenta y discute la muestra observacional que utilizaremos para generar los catálogos sintéticos a diferentes épocas a partir de las historias de formación estelar propuestas en el Capítulo 2. El Capítulo 4 presenta los primeros resultados obtenidos para distintas leyes de formación estelar, mostrando que una ley del tipo τ -exponencial con retraso en el nacimiento, es la mejor candidata a utilizar como ley de formación estelar. En el capítulo 5 mostramos los resultados obtenidos en este trabajo para los dos catálogos distintos de galaxias antes mencionados, mostrando así mismo, la evolución de la GSMF y la relación $SFR - M_*$ para ambos casos y su consistencia con las observaciones. Nuestros resultados muestran que existen una consistencia entre la función de masa estelar y la relación $SFR - M_*$ siempre y cuando se tomen en cuenta errores aleatorios en las mediciones de las masas

estelares y las tasas de formación estelar. En el capítulo 6 se analizan distintos criterios utilizados en la literatura para seleccionar galaxias con formación estelar activa y retiradas y sus implicaciones al utilizarlos a altos z 's. En el capítulo 7 se discuten tres diferentes cuestiones, en primer lugar, un nuevo criterio para decidir cuando una galaxia pasó de ser activa a retirada, el efecto de incluir fusión de galaxias y sus implicaciones a la demografía a altos z 's y lo arriesgado de considerar que una galaxia evoluciona alrededor de una relación promedio de $SFR - M_*$. Finalmente, el Capítulo 8 discute las conclusiones más importantes de este trabajo.

En esta Tesis adoptamos una cosmología con base en la misión Planck, $\Omega_M = 0.307 = 1 - \Omega_\Lambda$, $h = 0.678$ y una función inicial de masa de [Chabrier \(2003a\)](#).

1. INTRODUCCIÓN

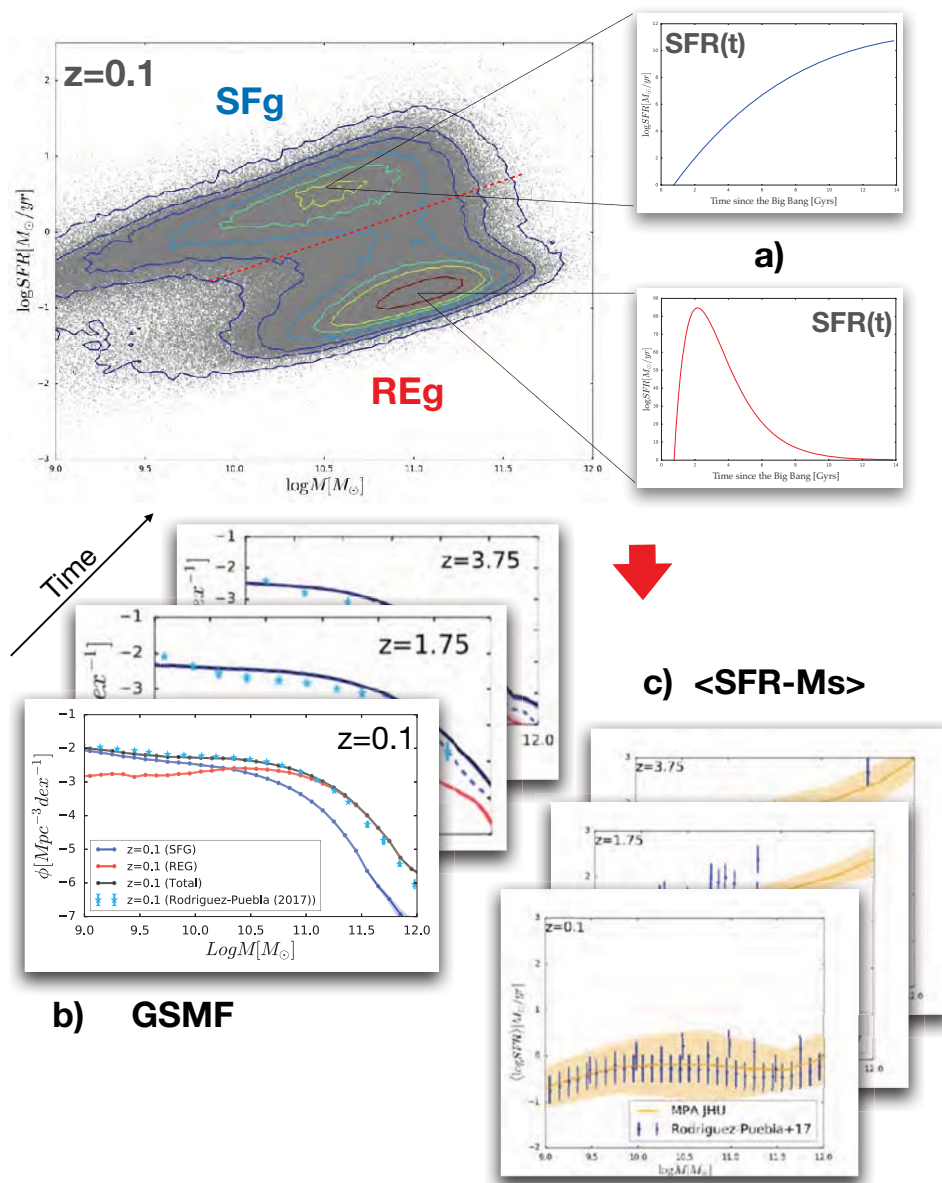


Figura 1.5: Esquema de nuestro enfoque arqueológico-demográfico. Partiendo de una muestra local completa de galaxias (SDSS), se constriñen sus historias individuales de SFR parametrizadas con una ley sencilla y se calcula la demografía a cualquier época en el pasado, incluyendo las densidades globales de SFR y masa ($\dot{\rho}_*(t)$ y $\rho_*(t)$). Introduciendo un criterio (empírico o físico) de separación de la población en galaxias activas en SFR y retiradas, la demografía se calcula segregada en estas dos poblaciones y se obtiene en particular la fracción de galaxias retiradas en función del tiempo y la masa. Los resultados se confrontan con observaciones a fin de explorar aspectos metodológicos con el catálogo sintético así como para explorar escenarios de crecimiento de las galaxias, en particular si la historia de SFR responde a procesos seculares in situ donde el apagado es parte de estos procesos o hay mecanismos extras que hacen diferente a las galaxias retiradas a nivel demográfico y de su historia de SFR.

Metodología

En el pasado se han utilizado distintos enfoques y métodos para inferir el ensamblaje de masa de las galaxias (véase la Sección 1). A nivel empírico, resumiendo, existen principalmente dos rutas para realizar este estudio: 1) enfoques de reconstrucción del tipo estadístico basados en observaciones a diferentes corrimientos al rojo z , donde principalmente se infiere el ensamblaje de masa estelar *promedio* de las galaxias utilizando, al mismo tiempo, la dependencia temporal de la función de masa estelar de las galaxias y la tasa de formación estelar (ver por ejemplo [Bell et al., 2007](#); [Drory and Alvarez, 2008](#); [Peng et al., 2010](#)); y 2) métodos basados en observaciones espectroscópicas o fotométricas multibanda donde se realiza la reconstrucción individual de la historia de formación estelar de las galaxias a través de la síntesis de población estelar (método del registro fósil; ver por ej. [Panter et al., 2004, 2007](#); [Asari et al., 2007](#); [Pérez et al., 2013](#); [González Delgado et al., 2016](#); [Pacifci et al., 2016](#); [Ibarra-Medel et al., 2016](#)). Como se ha discutido en la Sección 1, ambos métodos tienen sus virtudes y desventajas. Existen además algunas variantes a estos métodos (v. gr. [van Dokkum et al., 2013](#)).

En este trabajo, más que desarrollar o aplicar un método dado de inferencia del ensamblaje de masa estelar de las galaxias, pretendemos constreñir y explorar las consecuencias de leyes sencillas de historia de formación estelar (SFH) aplicada a cada galaxia individual de una muestra corregida por completitud de $\sim 6 \times 10^5$ galaxias locales del SDSS con un corrimiento al rojo promedio de $z \sim 0.1$ y para las cuales se han inferido anteriormente sus masas estelares (M_*) y tasas de formación estelar (SFR). Estas inferencias han hecho uso del enfoque de síntesis de población estelar. Las historias individuales de SFR constreñidas para las galaxias de esta muestra (enfoque arqueológico) se usarán para estudiar la evolución temporal de la función de masa estelar de las galaxias (GSMF, del inglés “Galaxy Stellar Mass Function”) y la relación SFR – M_* en función de z (enfoque demográfico), separando a las galaxias en activas en formación estelar (SFG, del inglés “star-forming galaxies”) y retiradas (RGs, del inglés “retired galaxies”). La combinación de demografía a diferentes épocas con la inferencia de SFHs individuales nos pone en una posición única de crear un laboratorio para estudiar de manera empírica y autoconsistente la evolución de las galaxias *a partir de sus propiedades observadas localmente*.

En el presente Capítulo pretendemos explorar tres leyes de historia de formación estelar, $SFR(t)$, que han sido ampliamente utilizadas en la comunidad para inferir tanto masas estelares como tasas de formación estelar a través del método de registro fósil. Estas leyes tienen como virtud su simplicidad. Nuestro enfoque tiene como objetivo **(1)** constreñir los parámetros de las leyes de SFH para cada una de las galaxias de nuestra muestra, misma que será descrita en mayor detalle en la Sección 3 y **(2)** calcular la demografía de esta población completa de galaxias locales a otras épocas más tempranas del Universo.

En este Capítulo describimos la metodología que seguiremos para constreñir los parámetros de una dada ley de SFH usando sólo la determinación de la masa estelar y SFR al tiempo de la observación de una galaxia. A su vez, estas cantidades fueron obtenidas, como se verá en el Capítulo 3, a partir de información espectro-fotométrica y la aplicación del método de registro fósil. En ese sentido, nuestro enfoque usa por construcción información del resultado de un análisis arqueológico aplicado a las galaxias y extiende la misma para lograr una descripción estadística de la evolución de la población de galaxias. Nótese que nuestro objetivo principal no es hacer un estudio exhaustivo de cada una de las leyes de SFH sino que más bien encontrar una ley universal y sencilla de la SFH (es decir $SFR(t)$) que sea capaz de explicar al mismo tiempo la evolución temporal de la GSMF y la relación $SFR - M_*$.

2.1. El Método: Restringiendo las Historias de Formación Estelar

En esta Sección describimos la idea general de nuestro enfoque. Para esto hay dos suposiciones claves que discutimos a continuación: *i*) la historia de formación estelar (SFH) de las galaxias sigue una ley universal y *ii*) la masa estelar de las galaxias crece por formación estelar *in situ* y decrece por pérdida de masa de las estrellas al medio interestelar. Por supuesto que ambas suposiciones son aproximaciones a una realidad que puede ser más compleja y las usamos sólo como punto de partida de nuestra exploración. En este trabajo no se están negando otras posibilidades, por ej., que las historias de formación estelar sean estocásticas o que una parte del ensamblaje de masa estelar de las galaxias fue mediante fusiones secas (discutimos esta posibilidad en más detalle en la Sección 7). Nuestro objetivo principal en este trabajo es desarrollar el modelo más sencillo posible que, aplicado a una muestra completa de galaxias locales, pueda explicar al mismo tiempo la evolución temporal de la función de masa de galaxias y de la relación $SFR - M_*$.

La virtud de las tres leyes de SFH utilizadas en este trabajo radican en su simplicidad. En los tres casos, estas leyes tienen a lo más tres parámetros libres, los cuales pueden ser reducidos a 2 parámetros bajo suposiciones físicamente plausibles. Así, de ahora en adelante supondremos que nuestras SFHs siguen una ley universal que puede

ser descrita mediante dos parámetros dada por la siguiente propiedad:

$$\text{SFR}(t; A, \tau) = A\psi(t, \tau), \quad (2.1)$$

donde $\psi(t, \tau)$ es una función suave e integrable que representa la evolución temporal de la $\text{SFR}(t)$, mientras que el parámetro A describe su amplitud. Aquí, el tiempo t indica la edad del universo. Para nuestra cosmología, ver Sección 1, la edad del universo actualmente es $t_0 \approx 13.8$ Gyrs. Una vez definida la forma funcional de la SFH podemos calcular el ensamblaje de masa estelar.

Calcular la historia de crecimiento de masa estelar, MGH, a partir de una ley de $\text{SFR}(t)$ es, sin embargo, más complejo que integrar la función $\text{SFR}(t; A, \tau)$ a lo largo del tiempo. Para esto uno debe tomar en cuenta que una fracción de la masa que originalmente se encontraba en las estrellas, f_{ml} , es reciclada al medio interestelar en forma de material gaseoso mediante diferentes mecanismos, principalmente por vientos estelares y estrellas de vida corta que explotan como supernovas. Puesto de otro modo, la fracción de masa estelar que se mantiene como tal es: $1 - f_{\text{ml}}$. En este trabajo hacemos la simplificación de que la fracción f_{ml} es reciclada de manera instantánea y que depende de manera muy débil de la metalicidad. Para describir dicha fracción utilizamos el ajuste propuesto por [Leitner and Kravtsov \(2011\)](#). Estos autores comprobaron que en efecto f_{ml} depende débilmente de la metalicidad y encontraron que la pérdida de masa para una población simple en función de su edad está dada por:

$$f_{\text{ml}}(t) = C_0 \ln \left(\frac{t}{\lambda} + 1 \right), \quad (2.2)$$

donde $C_0 = 0.046$ y $\lambda = 2.76 \times 10^5$ yrs. La fracción de masa reciclada al medio interestelar por una población simple después de 0.5 Gyrs es $f_{\text{ml}} \sim 0.35$ acercándose de manera asintótica a $f_{\text{ml}} \sim 0.47$ después de 10 Gyrs para una función inicial de masa de [Chabrier \(2003a\)](#). Así, dada una ley de $\text{SFR}(t)$ el crecimiento de masa estelar es:

$$M_*(t) = \int_{t_i}^t \text{SFR}(t') (1 - f_{\text{ml}}(t - t')) dt', \quad (2.3)$$

donde t_i es el tiempo de nacimiento de la galaxia. Utilizando la identidad (2.1):

$$M_*(t) = A \int_{t_i}^t \psi(t', \tau) (1 - f_{\text{ml}}(t - t')) dt'. \quad (2.4)$$

A continuación, supongamos que se cuenta con una muestra de galaxias donde se ha medido previamente la masa estelar y la tasa de formación estelar de cada una de estas galaxia al tiempo t_{obs} . Denotamos estas dos cantidades derivadas a partir de las observaciones como SFR_{obs} y $M_{*,\text{obs}}$. Lo siguiente es reconocer que después de sustituir

estas cantidades en las ecuaciones (2.1) y (2.4), respectivamente, se obtiene un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas. Dividendo la ecuación (2.1) por la ecuación (2.4), ambas evaluadas al tiempo t_{obs} , se obtiene que:

$$\text{sSFR}_{\text{obs}} = \frac{\text{SFR}_{\text{obs}}}{M_{*,\text{obs}}} = \frac{\psi(t_{\text{obs}}, \tau)}{\int_{t_i}^{t_{\text{obs}}} \psi(t', \tau) (1 - f_{\text{ml}}(t_{\text{obs}} - t')) dt'}. \quad (2.5)$$

La ecuación (2.5) es lo que comúnmente se denomina como la tasa de formación estelar específica (sSFR). Su inversa se interpreta como el tiempo característico que le tomaría a una galaxia doblar su masa a una tasa de formación estelar constante. El procedimiento de la ecuación anterior nos lleva a una conclusión importante. *En la familia de Leyes de formación estelar del tipo $\text{SFR}(t; A, \tau) = A\psi(t, \tau)$, la tasa de formación específica sSFR esta totalmente definida por el parámetro τ , esto es, $\text{sSFR}(t) = \text{sSFR}(t; \tau)$.* En particular en el caso del tiempo t_{obs} se tiene que $\text{sSFR}_{\text{obs}} = \text{sSFR}(t_{\text{obs}}, \tau)$. Esta ultima ecuación es invertible para τ , es decir:

$$\tau = \text{sSFR}^{-1}(t_{\text{obs}}, \text{sSFR}_{\text{obs}}). \quad (2.6)$$

Finalmente, una vez conocido el parámetro τ el parámetro A puede ser derivado a partir de la ecuación 2.1;

$$A = \frac{\text{SFR}_{\text{obs}}}{\psi(t_{\text{obs}}, \tau)}. \quad (2.7)$$

El sistema de ecuaciones (2.6) y (2.7) resume la metodología utilizada en este trabajo. En nuestro caso, utilizaremos una muestra grande y completa desde $\sim 10^9 M_{\odot}$ de galaxias observadas cada una a diferentes t_{obs} pero con $t_{\text{obs}} \approx t_0$; para cada una de estas galaxias se cuenta con una determinación de $M_{*,\text{obs}}$ y SFR_{obs} (ver Sección 3 para detalles de la muestra). A continuación describimos 3 leyes de formación estelar que cumplen con las propiedades de la ecuación (2.1) típicamente utilizadas en la literatura.

2.2. Leyes de Historia de Formación Estelar (SFH)

2.2.1. Ley exponencial creciente/decreciente

Esta forma funcional de la SFH ha sido utilizada extensivamente en el pasado para describir el crecimiento de las galaxias. En particular, la ley de la SFH exponencial decreciente fue introducido por trabajos pioneros como el modelo más simple para describir cómo un depósito inicialmente conformado por gas es consumido con el tiempo para ser transformado en estrellas (Tinsley, 1972). Mientras que esta funcionalidad se ha mantenido como base para explicar la SFH de galaxias retiradas o pasivas al día de hoy (por ejemplo, galaxias con morfologías tempranas), ésta ha llevado a resultados incongruentes cuando es utilizada para describir galaxias con formación estelar activa,

por ejemplo, galaxias con morfologías más tardías. Para este tipo de galaxias se ha invocado, como el modelo más sencillo, una ley de SFH que aumenta exponencialmente con el tiempo (ver por ejemplo, [Maraston et al., 2006](#)). La forma funcional de la SFH con aumento/decrecimiento exponencial es:

$$\text{SFR}(t) = Ae^{\pm t/\tau}, \quad (2.8)$$

donde el signo “+/-” indica una ley creciente/decreciente, A es una constante de normalización y τ es el tiempo característico en que la formación estelar aumenta/decrece por un factor e . Para la SFH decreciente exponencial valores pequeños de τ corresponden a un brote violento de formación estelar muy temprano y un rápido decrecimiento, mientras que valores grandes de τ corresponden a SFHs más planas. Para el caso de la SFH creciente exponencial, valores pequeños de τ corresponden a un brote violento reciente en la SFH de la galaxia, mientras que valores grandes de τ corresponden a SFHs más planas. Finalmente, nótese que en esta ley se supone que el tiempo inicial de formación estelar de las galaxias es el mismo que el origen del Universo.

Para una muestra observada de galaxias locales e identificando galaxias en su fase pasiva/retirada y activa de formación estelar, RGs y SFGs, es posible asignarles de una manera muy aproximada leyes de tipo decreciente y creciente exponencial respectivamente. En la Sección 3, discutimos nuestra definición de SFGs y RGs.

2.2.2. Ley τ -exponencial

Una de las leyes de formación estelar más usadas en la literatura es la τ -exponencial. Esta función se compone de un crecimiento como una ley de potencias seguido de una caída exponencial. La función τ -exponencial fue introducida entre otros por [Gavazzi et al. \(2002\)](#). Estos autores encontraron que la ley τ -exponencial aplicada a una población de galaxias predice las distribuciones de energía espectral observadas para las galaxias del cúmulo de Virgo. La ley τ -exponencial es lo suficientemente general para modelar galaxias en fases pasivas y activas de formación estelar. Con base en la ley τ -exponencial, se encuentra que típicamente galaxias retiradas observadas al día de hoy han tenido un pico de formación estelar alrededor de tiempos cósmicos $t_p \sim 1-3$ Gyrs y actualmente deberían estar en su régimen de fuerte caída exponencial. Por el contrario, las galaxias en regímenes de formación estelar activa, típicamente se encuentran cerca del inicio de la caída exponencial o incluso aún en la fase de crecimiento como una ley de potencias.

La forma funcional de la SFH τ -exponencial es:

$$\text{SFR}(t) = \frac{At}{\tau^2} e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (2.9)$$

donde A es la amplitud de la formación estelar y τ es el tiempo característico en el cual decrece la formación estelar por un factor e . Valores pequeños de τ corresponden

a galaxias que sea han formado tempranamente en un brote intenso de poca duración seguido de una caída exponencial. Por el contrario, valores grandes de τ corresponden a SFHs que se mantienen relativamente constante con el tiempo. Análogo a las leyes anteriores, en la SFH τ -exponencial estamos suponiendo que el tiempo inicial de las galaxias es el mismo que el tiempo inicial del Universo.

Finalmente, contrario a la SFH con crecimiento/decrecimiento exponencial, en la SFH τ -exponencial no es necesario explícitamente dividir la muestra observada de galaxias en RGs y SFGs ya que, como se mencionó antes, esta ley es más general como para poder intentar describir las SFHs de ambas poblaciones.

2.2.3. Ley τ -exponencial con retraso en nacimiento

Una forma de generalizar la ley de SFH τ -exponencial es introduciendo un tiempo de retraso para el nacimiento de la galaxia, t_i . La SFH τ -exponencial con retraso en nacimiento ha sido considerada en estudios observacionales recientes para estudiar la dependencia temporal de la relación SFR – M_* (v. gr. [Noeske et al., 2007](#)). Además, con base en resultados de simulaciones hidrodinámicas de alta resolución, [Simha et al. \(2014\)](#) han encontrado que las galaxias simuladas se ajustan mejor cuando se utiliza una ley τ -exponencial con retraso en su nacimiento. [Simha et al. \(2014\)](#) mostraron que un retraso ajustado a un $t_i \sim 1$ Gyr después del nacimiento del Universo es suficiente para caracterizar de manera precisa las SFHs de las galaxias simuladas.

La forma funcional de esta ley esta dada por:

$$\text{SFR}(t) = \frac{A(t - t_i)}{\tau^2} e^{-(t-t_i)/\tau}, \quad (2.10)$$

donde A es un factor de amplitud, τ es el tiempo característico en el cual sucede la formación estelar y t_i es el tiempo de inicio de formación estelar de la galaxia. El máximo de SFR, es decir donde $d\text{SFR}/dt = 0$ se da en:

$$t_{\text{max}} = t_i + \tau. \quad (2.11)$$

El tiempo en el cual la SFR decrece a la mitad del máximo es $t_{0.5} \approx 2.675\tau + t_i$. La integral de la ley ec. (2.10) es:

$$\langle M \rangle_{\text{SFR}}(t) = \frac{A}{\tau} [\tau - e^{-(t-t_i)/\tau} (t - t_i + \tau)]. \quad (2.12)$$

Note que $\langle M \rangle_{\text{SFR}}$ no es la masa estelar verdadera de la galaxia al tiempo t pues no considera la fracción de masa de las estrellas formadas que se recicla al medio interestelar a medida que evoluciona la población estelar. De la ec. (2.12) es fácil ver que A es justamente la integral de la ley ec. (2.10) cuando $t \rightarrow \infty$ (ver ec. 2.12). A es la masa acumulada en un tiempo infinito dada la ley de SFR ec. (2.10) sin considerar el reciclado.

Es fácil mostrar también que al tiempo t_{\max} , la masa acumulada sin reciclado es $0.264 \times A$ o $A = 3.783 \times \langle M \rangle_{\text{SFR,max}}$.

A diferencia de las leyes de SFH descritas en las secciones anteriores, la ley τ -exponencial con retraso en su nacimiento tiene tres parámetros libres. Aquí argumentamos que la ecuación (2.10) puede ser reducida a dos parámetros cuando se fija t_i . Como se discutió anteriormente, Simha et al. (2014) mostraron que en las simulaciones hidrodinámicas $t_i \sim 1$ Gyr en promedio, equivalente a un corrimiento al rojo de $z \sim 5.7$. No obstante, recientes descubrimientos a altos corrimientos al rojo han mostrado que existen poblaciones de galaxias hasta $z \sim 10$ (ver por ejemplo, Oesch et al., 2012, 2018) ó equivalentemente cuando el Universo tenía una edad de ~ 0.4 Gyrs, aunque todo parece indicar que esta es una población muy escasa y rara. En este trabajo supondremos que genéricamente la SFH inicia en un tiempo cósmico $t_i = 0.75$ Gyrs (corrimiento al rojo $z \sim 7.5$ para nuestra cosmología). Una vez fijado t_i podemos entonces regresar al enfoque presentado en la Sección 2.1.

Adelantando los resultados a presentar en la Sección 4, con $t_i = 0.75$ Gyrs encontramos que aproximadamente $\sim 65\%$ de las galaxias en nuestra muestra tienen soluciones al sistema de ecuaciones (2.6)-(2.7), mientras que para el $\sim 35\%$ restante no es posible resolver el sistema; la ley propuesta no es capaz de reproducir a t_0 la masa y SFR observadas. Al estudiar qué tipo de galaxias se encuentran en la población de ese $\sim 35\%$, vemos que la mayoría son galaxias de baja masa $M_{*,\text{obs}}$ con altos valores de SFR_{obs} . Lo anterior es indicativo de que para estas galaxias el inicio de su SFH tiene que ser más retrasado, con un $t_i > 0.75$ Gyrs. En efecto, en todos estos casos, al aumentar el valor de t_i se resuelve el problema, es decir, retrasando más el inicio de la formación estelar de esas galaxias (haciéndolas más jóvenes) es posible resolver el sistema de ecuaciones. En realidad, esto va en la dirección esperada y ha sido ampliamente reportado en la literatura (ver por ejemplo, Noeske et al., 2007).

Para mitigar el problema mencionado arriba, dentro de nuestro esquema de restringir sólo dos parámetros con $M_{*,\text{obs}}$ y SFR_{obs} , hemos incluido un método iterativo para la solución de t_i y así encontrar las soluciones al sistema de ecuaciones (2.6)-(2.7). En los casos donde el sistema de ecuaciones (2.6)-(2.7) no puede ser resuelto con $t_i = 0.75$ Gyrs proponemos que $t_i^1 = t_0 - (t_0 - t_i)/2$ donde la edad del Universo al día de hoy es $t_0 = 13.82$ Gyrs. Si el sistema de ecuaciones (2.6)-(2.7) es soluble entonces proponemos un valor para t_i dado por $t_i^2 = t_i^1 - (t_i^1 - t_i)/2$ de otro modo (es decir, si el sistema de ecuaciones (2.6)-(2.7) no tiene soluciones) entonces $t_i^2 = t_i^1 + (t_0 - t_i^1)/2$. Lo anterior plantea un procedimiento recursivo para encontrar las soluciones al sistema de ecuaciones (2.6)-(2.7) en el cual se retrocede la mitad de la diferencia entre el valor actual y el valor anterior de las t_i propuestas cuando el sistema de ecuaciones (2.6)-(2.7) tiene soluciones. De otra manera se avanza la mitad de la diferencia entre el valor actual y el valor anterior de las t_i . Este procedimiento se realiza n -veces hasta que el valor $t_i^n - t_i^{n+1} < \epsilon$ donde $\epsilon = 0.4$. Adicionalmente, hemos impuesto la condición de que el tiempo donde sucede el máximo de SFR sea menor a $t_{\max} < 15$ Gyrs. Lo anterior garantiza que todas las galaxias tengan soluciones sensatas a los parámetros A , τ y t_i .

En resumen, la ley de SFH τ -exponencial con retraso en su nacimiento tiene 3 pará-

2. METODOLOGÍA

metros libres, A , τ y t_i . Inicialmente consideramos que $t_i = 0.75$ Gyrs y se encuentran las soluciones a las ecuaciones (2.6)-(2.7) para A y τ . En los casos donde no hay soluciones a dichas ecuaciones (signo de que su SFH es retrasada), aplicamos entonces un método iterativo de búsqueda para encontrar el mejor valor de t_i que resuelva las ecuaciones (2.6)-(2.7) para los parámetros A y τ .

Muestra Observacional: El diagrama SFR – M_* y determinación de las Funciones de Masa Estelar

Como se mencionó anteriormente, en este trabajo planteamos constreñir los crecimientos individuales de las galaxias a partir de las masas estelares y tasas de formación estelar medidas para galaxias locales (ver Sección 2). Aquí, nos enfocamos en utilizar estas historias de formación estelar (SFHs) individuales para estudiar la evolución temporal de la función de masa estelar de las galaxias (GSMF) y el diagrama SFR – M_* a diferentes corrimientos al rojo.

Existen distintas rutas para lograr nuestro objetivo. La primera y, quizás la más obvia, tiene su origen en utilizar ajustes analíticos a la función de masa, $\phi_*(M_*)$, y a la distribución de galaxias en el diagrama SFR – M_* a $z \sim 0$ que se usa como punto de partida para nuestra metodología arqueológico-demográfica. El sembrado de una población de galaxias a través de distribuciones restringidas por las observaciones ha sido utilizado con anterioridad en la comunidad, ver por ejemplo el trabajo de [Leja et al. \(2015\)](#) mencionado en la Introducción. Con esto, se puede construir una población de galaxias sintéticas utilizando un muestreo con base en técnicas de Monte-Carlo. Originalmente empezamos nuestro proyecto de esta manera pero encontramos que se introduce un alto grado de incertidumbre por las descripciones analíticas de las distribuciones a usar, en especial la relacionada al diagrama SFR– M_* pero también la GSMF. En el diagrama SFR– M_* hay que definir los mejores ajustes y sus dispersiones a las subpoblaciones de galaxias con SFR activa (SFGs) y las retiradas (RGs). Dichos ajustes son muy sensibles a los trazadores de SFR usados y a los criterios introducidos para definir dichas subpoblaciones.

Para evitar los problemas mencionados, decidimos utilizar un muestreo observacional de galaxias locales en el cual se pueda medir con alta precisión la GSMF $\phi_*(M_*)$ y la distribución de las galaxias en el plano SFR – M_* . En particular utilizaremos una

muestra espectroscópica del SDSS DR7. La ventaja de esto es que podemos utilizar directamente la distribución real de las galaxias evitando así la introducción de funciones analíticas que puedan introducir incertidumbres en el modelado o definiciones arbitrarias de la distribución de SFGs y RGs. La desventaja es que el SDSS-DR7 es completo hasta una magnitud aparente de $m_{\text{lim},r} = 17.77$, lo cual resulta en una masa estelar límite que depende a primera aproximación del corrimiento al rojo z . Para derivar $\phi_*(M_*)$ y la distribución de las galaxias en el plano SFR – M_* reales, es decir, las que se esperarían para un muestra completa en volumen utilizaremos correcciones en volumen con base en el método $1/V_{\text{max}}$ (Schmidt, 1968).

A continuación resumiremos los puntos más importantes de la muestra observacional que utilizamos en este trabajo. Presentaremos también la compilación de trabajos demográficos a diferentes corrimientos al rojo que usaremos para comparar con los resultados de evolución demográfica obtenidos con nuestro método aplicado a la muestra de galaxias locales.

3.1. Muestra Observacional del SDSS DR7

Utilizamos la muestra del “New York Value Added Galaxy Catalog”, NYU-VAGC Blanton et al. (2005) con base en el SDSS DR7. Específicamente, utilizamos galaxias espectroscópicas dentro del intervalo en corrimiento al rojo $0.01 < z < 0.2$ comprendiendo un ángulo sólido de 7748 deg^2 con magnitud aparente límite de $m_{\text{lim},r} = 17.77$. El número de galaxias utilizadas para este trabajo es del orden de $\sim 6 \times 10^5$. Para más detalles de la muestra observacional utilizada véase Yang et al. (2012) y Rodríguez-Puebla et al. (2015). Esta muestra observacional ha sido utilizada para estudiar varios sistemas ligados gravitacionalmente en el Universo local, desde galaxias aisladas, grupos, grupos ricos, grupos compactos, hasta escalas de cúmulos (Yang et al., 2012; Rodríguez-Puebla et al., 2015). Adicionalmente, esta misma muestra ha sido utilizada con anterioridad para estudiar diferentes ambientes en el Universo local (Dragomir et al., 2018). Es entonces una muestra ideal para nuestros propósitos ya que contiene una rica variedad de estructuras, ambientes y tipos de galaxias, lo cual da potencial para en un futuro extender nuestro proyecto a otros sistemas.

A continuación discutimos las referencias donde hemos obtenido las masas estelares y tasas de formación estelar para las galaxias de nuestro catálogo. Finalmente, enfatizamos que en este trabajo utilizamos dos catálogos que han restringido ambas cantidades pero con técnicas distintas: el catálogo del MPA-JHU DR7 presentado en Brinchmann et al. (2004, y actualizado en línea posteriormente) y el Chang et al. (2015). En ambos catálogos se utilizan los filtros observados del SDSS *ugriz*, sin embargo Chang et al. (2015) incluye además los filtros observados en WISE *W1234* del mediano infrarrojo. Esto tiene profundas consecuencias en la medición de las tasas de formación estelar globales de las galaxias; particularmente para galaxias con bajos niveles de formación estelar. En las siguientes secciones de este Capítulo discutimos las diferencias entre ambos catálogos.

3.1.1. Masas Estelares y Tasas de Formación Estelar a Partir de la Base de Datos del MPA-JHU DR7

Las masas estelares y las tasas de formación estelar (M_* y SFR) de cada una de las galaxias fueron recopiladas de la base de datos del MPA-JHU DR7¹. En el caso de las masas estelares, fueron inferidas mediante técnicas Bayesianas de ajuste utilizando la fotometría de banda ancha de cada una de las galaxias en los filtros observados del SDSS, *ugriz*; y utilizando diferentes modelos de SFH que incluyen brotes de formación estelar y diferentes intervalos de metalicidades. Para mayor detalle véase [Kauffmann et al. \(2003\)](#). En el caso de las tasas de formación estelar utilizamos los resultados obtenidos en [Brinchmann et al. \(2004\)](#). De manera analoga a [Kauffmann et al. \(2003\)](#), los autores utilizan técnicas Bayesianas de ajuste utilizando líneas de emisión de cada una de las galaxias de la muestra del SDSS DR7 en conjunto con diferentes modelos de historias de formación estelar que incluyen modelos físicamente motivados para las líneas de ionización para constreñir las tasas de formación estelar, para más detalles véase ([Brinchmann et al., 2004](#)). Ambas mediciones han sido corregidas por efectos de apertura con base a resultados empíricos utilizando modelos semi-analíticos de formación de galaxias (ver [Kauffmann et al., 2003](#); [Brinchmann et al., 2004](#)).

3.1.2. Masas Estelares y Tasas de Formación Estelar a Partir del Catálogo de [Chang et al. \(2015\)](#)

Para cada una las galaxias en nuestra muestra, recopilamos masas estelares y tasas de formación estelar a partir del catálogo publico de [Chang et al. \(2015\)](#)². En este trabajo, los autores hacen una revision de las tasas de formación estelar del SDSS al incluir la fotometría de WISE para el mediano infrarrojo, 3–22 μ m. En otras palabras, para cada galaxia los autores cubren un intervalo amplio del espectro, $\lambda = 0.4 - 0.22\mu$ m. Como resultado, las tasas de formación estelar de estos autores están determinadas por la remisión del polvo en la componente de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH, por sus siglas en ingles) y una componente de granos de polvo en equilibrio térmico con temperaturas entre 30 – 60 K. Análogamente a [Kauffmann et al. \(2003\)](#), [Chang et al. \(2015\)](#) utiliza técnicas Bayesianas en una malla de diferentes modelos de SFH con historias de formación estelar con decrecimiento exponencial para diferentes intervalos de metalicidades creados a partir del codigo MAGPHYS ([da Cunha et al., 2008](#))³.

¹<https://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/SDSS/DR7/>

²<http://irfu.cea.fr/pisp/yu-yen.chang/sw.html>

³MAGPHYS es un software desarrollado para interpretar los espectros de energía observados de las galaxias en el intervalo del mediano al lejano infrarrojo de manera consistente con la emisión en el ultravioleta y cercano infrarrojo, para mayores detalles véase ([da Cunha et al., 2008](#)).

3.2. Comparaciones de las Tasas de Formación Estelar

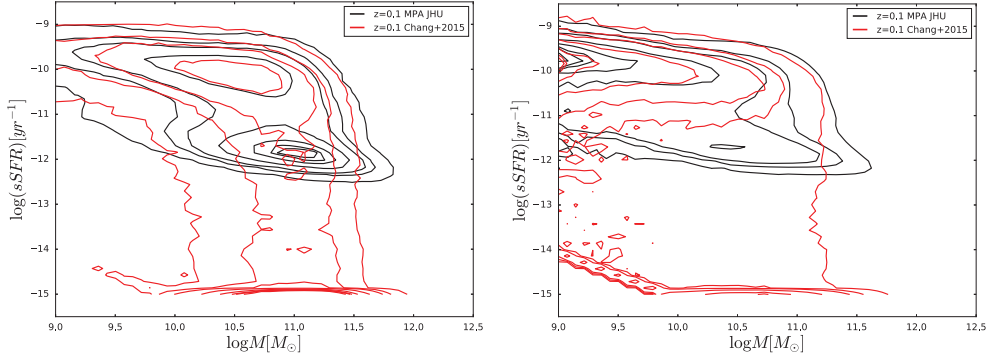


Figura 3.1: Distribución de las tasas de formación estelar específica, sSFR, en función de la masa estelar M_* para galaxias del SDSS DR7. Los isocontornos muestran el 10 %, 25 %, 50 %, 68 %, 75 % y 90 % de la distribución de la poblaciones. Los isocontornos en negro muestran las distribuciones de las galaxias utilizando el catálogo del MPA-JHU mientras los rojos muestran utilizando las mediciones de [Chang et al. \(2015\)](#). El catalogo del MPA-JHU muestra predice la existencia de una bimodalidad. Por el contrario, las mediciones de [Chang et al. \(2015\)](#) muestran que la distribución de tasas de formación estelar es una distribución más continua. **Panel Izquierdo:** Distribución observada sin considerar correcciones por Volumen. **Panel Derecho:** Distribución corregida por Volumen utilizando el método de $1/V_{\max}$, ver Sección 3.3.1.

Para cada una de las galaxias de nuestra muestra existen masas estelares y tasas de formación estelar de los catálogos del MPA-JHU y de [Chang et al. \(2015\)](#). Como hemos mencionado, la diferencia más sustancial entre ambos catálogos es la inclusión de la fotometría de WISE. Esto establece una diferencia fundamental ya que [Chang et al. \(2015\)](#) es capaz de restringir las propiedades del polvo en las galaxias del SDSS DR7 de una mejor manera que el catalogo MPA-JHU. Como se discute en detalle en [Chang et al. \(2015\)](#), las diferencias en las masas estelares entre ambos catálogos resultan ser mínimas, $\lesssim 0.15$ dex.

La Figura 3.1 muestra isocontornos de densidad alrededor en el diagrama sSFR– M_* donde sSFR= SFR/M_* es la tasa de formación estelar específica. Estos isocontornos muestran el 10 %, 25 %, 50 %, 68 %, 75 % y 90 % de la distribución de la población. El panel izquierdo de la misma figura muestra los iscontornos ignorando cualquier corrección por volumen, mientras el panel derecho muestra la distribución una vez que ha sido corregida por volumen, descrito en la Sección 3.3. Esta última se aproxima a la distribución real observada si el SDSS fuera una muestra completa en volumen y limitada en masa hasta galaxias con $M_* \sim 10^{8.5} M_\odot$. Opuesto a lo observado para las masas estelares, existen fuertes diferencias en las tasas de formación estelar, especialmente para galaxias con bajos niveles de formación estelar. Mientras las masas estelares parecen ser poco sensibles a incluir fotometría en el mediano infrarrojo, las tasas de formación estelar sí

son sensibles a esta información. Adicionalmente, nótese que los trazadores de formación estelar son totalmente distintos. Uno de las diferencias más evidentes al comparar las tasas de formación estelar específicas de los catálogos del MPA-JHU y de [Chang et al. \(2015\)](#) es la posible existencia de una bimodalidad o no en la distribución de galaxias en el diagrama sSFR– M_* , para una discusión al respecto véase [Feldmann \(2017\)](#). En el caso de las determinaciones de [Chang et al. \(2015\)](#), no se ve una bimodalidad clara, los valores de la sSFR decrecen monótonamente hasta valores mucho menores que las determinaciones del MPA-JHU.

En esta Tesis no hacemos un análisis exhaustivo de las diferencias entre los catálogos del MPA-JHU y de [Chang et al. \(2015\)](#) ya que se encuentran fuera del alcance de nuestros objetivos. Para una discusión más detallada sobre el tema remitimos al lector a [Chang et al. \(2015\)](#). No obstante, debido a las diferencias tan fuertes en las tasas de formación estelar derivadas en ambos catálogos es interesante estudiar sus consecuencias dentro del enfoque planteado en este trabajo. En el Capítulo 5 derivamos historias de formación estelares individuales para cada galaxia utilizando ambos catálogos. Es decir, cada galaxia en nuestra muestra tendrá dos historias de formación estelar una restringida a partir de las propiedades del catálogo del MPA-JHU y otra utilizando el catalogo de [Chang et al. \(2015\)](#) y estudiaremos sus consecuencias en la evolución de las galaxias y su demografía a diferentes corrimientos al rojo.

3.3. Determinación de la Función de Masa Estelar

En esta sección describimos las correcciones por volumen obtenidas para tener una muestra que es completa en masa estelar. Esto va a ser clave para estudiar la demografía de las galaxias con base en las inferencias de historias de formación estelar individuales que hacemos para las galaxias del SDSS DR7, ver Capítulo 2.

Localmente, estimamos la función de masa estelar entre $z = 0.01$ y $z = 0.2$ utilizando la técnica estándar $1/V_{\max}$:

$$\phi_*(M_*) = \frac{1}{\Delta \log M_*} \sum_{i=1}^N \frac{\omega_i(\log M_* \pm \Delta \log M_*)}{V_{\max,i}}, \quad (3.1)$$

donde ω_i es el factor de corrección de completitud en el NYU-VAGC que depende de la posición angular del cielo para galaxias en un intervalo de masas $\log M_* \pm \Delta \log M_*$ y

$$V_{\max,i} = \int_{\Omega} \int_{z_l}^{z_u} \frac{d^2 V_c}{dz d\Omega} dz d\Omega. \quad (3.2)$$

Aquí el ángulo solido del SDSS DR7 esta denotado por Ω mientras que V_c se refiere al ángulo comóvil encerrado dentro del intervalo de corrimiento al rojo $[z_l, z_u]$. Los limites al corrimiento al rojo $z_l = \max(0.01, z_{\min})$ y $z_u = \min(z_{\max}, 0.2)$; donde z_{\min} y z_{\max} son,

3. MUESTRA OBSERVACIONAL: EL DIAGRAMA SFR – M_* Y DETERMINACIÓN DE LAS FUNCIONES DE MASA ESTELAR

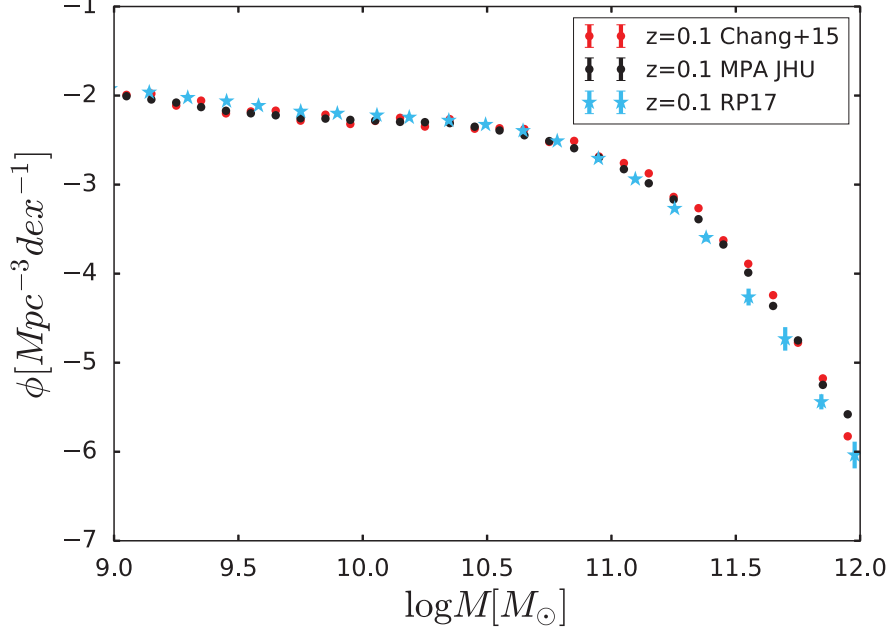


Figura 3.2: Función de masa estelar de galaxias del SDSS DR7. Las círculos negros con barras de error muestran la función de masa estelar con base al catalogo del MPA-JHU mientras que los círculos sólidos rojos con barras de error muestran lo mismo per para el catálogo de [Chang et al. \(2015\)](#). Las estrellas azules con barras de error muestran la compilación de [Rodríguez-Puebla et al. \(2017\)](#).

respectivamente, el mínimo y máximo corrimiento al rojo al cual cada galaxia puede ser observada en SDSS DR7 y mantenerse dentro de la muestra. Estimamos z_{\max} para cada galaxia de la muestra al resolver iterativamente la siguiente ecuación:

$$m_{\lim,r} - M_{r,i}^{0,0} = 5 \log D_{L,i}(z_{\max}) - 25 - K_{gr,i}(z_{\max}) + E_{r,i}(z_{\max}), \quad (3.3)$$

donde $M_{r,i}^{0,0}$ es la magnitud de Petrosian K+E corregida a un sistema de referencia $z = 0$ y $E = 1.1z$ de acuerdo con [Dragomir et al. \(2018\)](#). Para el calculo de z_{\max} utilizamos $m_{\lim,r} = 17.77$. De manera similar calculamos z_{\min} pero para una magnitud limite de $m_{\lim,r} = 14$ usando la ecuación 3.3.

La figura 3.2 muestra la función de masa resultante de galaxias locales. Los círculos sólidos negros con barras de error muestran la determinación de la función de masa estelar con base al catálogo del MPA-JHU mientras que los círculos sólidos rojos con barras de error muestran lo mismo pero para el catalogo de [Chang et al. \(2015\)](#). No es de sorprender que ambos catálogos den resultados similares. Esto obedece a que en las masas estelares en ambos catálogos son muy similares, como se notó anteriormen-

te. En la misma figura incluimos la función de masa resultante de una compilación y homogenización presentada en [Rodríguez-Puebla et al. \(2017\)](#) con las estrellas azules con barras de error. Nuestras funciones de masa son muy similares a la compilación de [Rodríguez-Puebla et al. \(2017\)](#).

3.3.1. Correcciones Locales por Volumen Utilizados a Altos Corrimientos al Rojo

Las correcciones por volumen inferidas anteriormente puede ser utilizadas para determinar la evolución con el corrimiento al rojo de la función de masa estelar de las galaxias. Esto es, para cada galaxia en nuestro catálogo hemos derivado historias de formación estelar individuales como se ha descrito en el Capítulo 2. Dada un historia de formación estelar podemos inferir el crecimiento de masa estelar individual; es decir, a cada tiempo sabemos la masa estelar de cada una las galaxias en nuestra muestra. Suponga que escogemos un corrimiento al rojo z , entonces la i -ésima galaxia de nuestro catalogo tendrá una masa estelar de $M_{*,i}(z)$ que debería ser menor o igual que la M_* de esa misma galaxia al corrimiento al rojo que ha sido observada en el SDSS. Así, al fijar diferentes épocas podemos medir las funciones de masa estelares a otros corrimientos al rojo utilizando las correcciones por volumen descritas anteriormente. Adicionalmente, usando estos resultados podemos derivar la densidad de tasa de formación estelar cósmica ($\rho_{\text{SFR}}(z)$) y la densidad de masa estelar cósmica $\rho_*(z)$ a cada época (por unidad de volumen comóvil).

Para derivar la función de masa estelar de galaxias, GSMF, a otras épocas utilizaremos el método del $1/V_{\text{max}}$ descrito en la Sección 3.3 pero con un ligero cambio:

$$\phi_*(M_*, z) = \frac{1}{\Delta \log M_*} \sum_{i=1}^N \frac{\omega_i (\log M_*(z) \pm \Delta \log M_*)}{V_{\text{max},i}}. \quad (3.4)$$

Arriba hemos indicado explícitamente que la masa estelar $M_*(z)$ ha sido evaluada a un z , es decir, utilizaremos las historias de crecimiento de masa de las galaxias, ver ecuación (2.3), para encontrar el valor de las masas de las galaxias al corrimiento al rojo z . El valor de V_{max} corresponde a las galaxias al obtenido a $z \sim 0$ así como también ω_i como se describió en la Sección 3.3.

Una vez inferida la GSMF a diferentes corrimientos al rojo, z , podemos obtener la densidad de masa estelar cósmica así:

$$\rho_*(z) = \sum_{i=1}^N \omega_i \frac{M_{*,i}(z)}{V_{\text{max},i}}, \quad (3.5)$$

3. MUESTRA OBSERVACIONAL: EL DIAGRAMA SFR – M_* Y DETERMINACIÓN DE LAS FUNCIONES DE MASA ESTELAR

mientras que la densidad de SFR cósmica es:

$$\rho_{\text{SFR}}(z) = \sum_{i=1}^N \omega_i \frac{\text{SFR}_i(z)}{V_{\text{max},i}}, \quad (3.6)$$

donde hemos utilizado las historias de formación estelar de las galaxias para evaluar el valor de la SFR a un corrimiento al rojo z , ver ecuación (2.1).

Análisis de las Leyes de Historia de Formación Estelar

En este Capítulo discutimos resultados preliminares sobre tres leyes de historia de formación estelar que tradicionalmente han sido consideradas en la literatura para inferir tanto masas estelares como tasas de formación estelar. Estas leyes de formación estelar fueron previamente definidas en el Capítulo 2 y cualquier detalle sobre las mismas el lector es remitido a esas secciones para mayores detalles. No obstante, nos gustaría recordar que la característica general de estas leyes de historia de formación estelar se basa en su simplicidad. Por supuesto, lo anterior implica que antes de entrar en una discusión e interpretación de los resultados aplicando la técnica sobre la evolución y crecimiento de las galaxias y sus demografía a altos corrimientos al rojo, debemos estudiar las ventajas y limitaciones de cada una de estas leyes. Al final de este Capítulo argumentaremos que la ley más realista *para nuestros propósitos* es una ley del tipo τ -exponencial con retraso en el nacimiento.

4.1. Relaciones sSFR- M_* y Edad- M_* Para Diferentes Leyes de Historia de Formación Estelar

En esta Sección discutimos las relaciones sSFR- M_* y Edad promedio- M_* para las leyes de historia de formación estelar, SFHs. Como veremos, es posible que imponiendo una dada ley de SFH haya una fracción de galaxias para las cuales esa ley no sea capaz de reproducir la SFR y M_* derivadas de las observaciones del SDSS. En otras palabras, para esas galaxias no se encuentra una solución que nos de los parámetros de la dada ley de SFH. A fin de explorar las consecuencias de cada ley estudiamos la distribución de las galaxias que tuvieron solución en los diagramas sSFR- M_* y Edad- M_* . Podemos también explorar las consecuencias en la evolución demográfica de cada ley de SFH propuesta pero veremos que estos dos diagramas son suficientes para poder

descartar en una primera aproximación ciertas leyes de SFH. La distribución de las edades pesadas por masa de las galaxias es una predicción que obtenemos con nuestro modelo y podemos contrastarlas con determinaciones observacionales independientes. En esta sección estudiamos las edades pesadas por masa las cuales están definidas por:

$$T = t_H - \frac{\int_{t_i}^{t_H} t \times \text{SFR}(t) dt}{\int_{t_i}^{t_H} \text{SFR}(t) dt}, \quad (4.1)$$

donde t_H es el tiempo de Hubble que corresponde a ~ 13.8 Gyrs a $z = 0$. Nuestra exploración en este Capítulo es usando el catálogo MPA JHU, no obstante nuestras conclusiones se mantienen válidas si utilizamos el catalogo de [Chang et al. \(2015\)](#).

4.1.1. SFH con Aumento/Decrecimiento Exponencial

La primera ley de historia de formación estelar (SFH) que analizamos en esta sección es una ley con decrecimiento exponencial (ver §§2.2.1). Esta ley ha sido muy popular, en especial para describir galaxias con morfologías del tipo temprano o galaxias pasivas/retiradas.

Cuando utilizamos esta ley, nuestra primera conclusión es que no todas las galaxias con mediciones de M_* y SFR tienen solución. Encontramos que el 46.83% de las galaxias se pudieron resolver con una ley con decrecimiento exponencial. Las galaxias que tuvieron soluciones tienen valores bajos de sSFR. El panel superior izquierdo de la Figura 4.1, muestra en rojo los isocontornos de densidad de la población que tiene solución con base en esta ley; como ejemplo ilustrativo hemos tomado el catalogo del MPA-JHU donde mostramos en gris los isocontornos de densidad de toda la población. Más aún, nótese que existe una tasa de formación específica límite, $\text{sSFR} \sim 1.3 \times 10^{-10} \text{ yr}^{-1}$, por arriba de la cual la ley con decrecimiento exponencial no tiene solución. ¿Cuál es el origen de este límite? Analizando más a fondo las ecuaciones (2.5) y (2.6) encontramos que para una M_* fija existe una relación que a gran aproximación es uno-a-uno monótona creciente entre la sSFR y el parámetro τ^1 de la ley exponencial, ecuación 2.8. En consecuencia, valores altos de sSFR corresponderían a valores altos en τ . A su vez, valores altos de τ corresponden a historias de formación estelar que son cada vez más planas hallando su límite superior en $\text{sSFR} \sim 1.3 \times 10^{-10} \text{ yr}^{-1}$ correspondiendo a $\tau > 200$ Gyr, valores a los cuales la solución comienza a ser inexacta.

Luego procedemos a explorar la ley con aumento exponencial. Nuevamente, el panel superior izquierdo de la Figura 4.1 muestra en azul los isocontornos de densidad de la población que tiene solución utilizando esta. De manera similar al caso anterior, encontramos que no todas las galaxias tienen solución con esta ley: sólo el 53.16%. Lo interesante es que nuevamente observamos una tasa de formación específica límite, en este caso es un límite inferior de $\text{sSFR} \sim 1.3 \times 10^{-10} \text{ yr}^{-1}$. Esta sSFR límite obedece

¹Esta relación no es completamente uno-a-uno debido a que el factor de reciclaje, f_{ml} , no es constante con el tiempo

a una explicación similar a la planteada anteriormente, recuerde que para una función exponencialmente creciente valores pequeños de τ corresponden a brotes recientes de formación estelar mientras que valores grandes de τ corresponden a historias de formación estelares cada vez más planas. Entonces generalizando la ley para toda la muestra a una exponencial creciente/decreciente se logra obtener solución para casi toda la muestra observacional pero con una separación bien definida en la sSFR entre las que tienen solución con una u otra ley. Finalmente, encontramos que 0.01 % de la muestra no tuvo solución con ninguna de las dos leyes: precisamente galaxias con sSFR $\sim 1.3 \times 10^{-10} \text{ yr}^{-1}$.

El panel inferior derecho de la Figura 4.1 muestra las edades pesadas por masa. Nuevamente, los isocontornos de densidad en rojo muestran a la población que tiene una ley con decrecimiento exponencial mientras que los azules muestran lo mismo pero para el caso de una ley con crecimiento exponencial. En gris mostramos los isocontornos de densidad para la población conjunta. Las galaxias resueltas utilizando una ley con decrecimiento exponencial tienen poblaciones con edades mayores a $T \sim 6.3$ Gyrs, mientras que las galaxias que siguen una ley con crecimiento exponencial tienen poblaciones con edades menores a $T \sim 6.3$ Gyrs. La línea sólida verde y la zona que la rodea muestra respectivamente la media y el 1σ de las edades pesadas por masa reportadas en Gallazzi et al. (2005) para el SDSS DR2, la cual representaba una versión preliminar del catálogo MPA JHU. La comparación muestra que los modelos con decaimiento exponencial predicen que existe una población importante de galaxias con poblaciones estelares muy viejas (>10 Gyr), que no están de acuerdo con las determinaciones de Gallazzi et al. (2005) ni con otro tipo de evidencias, en especial a las masas intermedias y bajas. Al tomar en cuenta la población general (isocontornos grises), se observa una tendencia similar a la de Gallazzi et al. (2005) pero con edades más viejas en general, en especial a las altas masas.

4.1.2. SFH τ –Exponencial

La ley de SFH τ –exponencial es otra función bastante popular en la literatura (§§2.2.2). Los paneles intermedios de la Figura 4.1 muestran en rojo los isocontornos de densidad en la relación SFR– M_* y la edad en función de la masa estelar para las galaxias que tuvieron solución con base en esta ley. En este caso encontramos que el 68.14 % de las galaxias tuvieron solución. Adicionalmente, encontramos, nuevamente, que existe una tasa de formación estelar específica límite para la cual ya no es posible resolver las ecuaciones (2.6)–(2.7) para una ley τ –exponencial: sSFR $\sim 3.2 \times 10^{-10} \text{ yr}^{-1}$. Los argumentos para explicar esta sSFR límite son similares a los expuestos para las leyes de formación exponencial; recuerde que valores grandes de τ corresponden a SFHs planas. Valores grandes de τ solo pueden encontrarse para galaxias con altas sSFR's a paridad de masa estelar, en nuestro caso no mayores a sSFR $\sim 3.2 \times 10^{-10} \text{ yr}^{-1}$ correspondiendo nuevamente a $\tau > 200$ Gyr valores a los cuales la solución comienza a ser inexacta.

El panel inferior central de la Figura 4.1 muestra las predicciones a las edades pesadas por masa. Como hemos discutido anteriormente, no todos los modelos han

tenido solución al aplicar una ley τ -exponencial. Esta figura muestra que los modelos que han tenido solución sólo son aquellos que tienen poblaciones con edades mayores a $T \sim 5$ Gyrs, es decir, 1.3 Gyrs más jóvenes que aquellos con decrecimiento exponencial. En el mismo panel volvemos a reproducir las inferencias de [Gallazzi et al. \(2005\)](#). Al comparar nuestras derivaciones con las de [Gallazzi et al. \(2005\)](#) observamos nuevamente la existencia de galaxias de masa baja/intermedia con edades muy viejas, algo que no es observado por las derivaciones observacionales.

4.1.3. SFH τ -Exponencial con Retraso al Nacimiento.

En §§2.2.3, hemos descrito una ley generalizada a la ley τ -Exponencial al incluir un retraso en el tiempo del nacimiento de las galaxias. En nuestro caso asignamos inicialmente a todas las galaxias un tiempo inicial cuando el Universo tiene una edad de $t_i = 0.75$ Gyrs. No obstante, no todas las parejas de valores M_* y sSFR tienen soluciones para estos modelos con $t_i = 0.75$ Gyrs. Como explicamos en §§2.2.3, para estos casos se ha desarrollado un método iterativo de búsqueda para encontrar el mejor valor de t_i que encuentre una solución a la pareja de valores M_* y sSFR.

Con la ley τ con retraso en el nacimiento, que implica tres parámetros, encontramos solución al 100 % de los casos como se aprecia en la Fig. 4.1 (paneles derechos). La distribución de edades pesadas por masa es muy razonable y concuerda con las inferencias de [Gallazzi et al. \(2005\)](#).

En resumen, hemos encontrado que no todas las leyes de SFH pueden ser derivadas a partir de las cantidades observacionales SFR y M_* actuales. El ejemplo más dramático fue la ley que decae exponencialmente donde sólo el $\sim 47\%$ de las galaxias tuvieron solución, seguido de la ley que incrementa exponencialmente con un $\sim 53\%$. También, encontramos que 0.01 % de las galaxias con sSFR $\sim 1.3 \times 10^{-10} \text{ yr}^{-1}$ nunca van a tener solución incluso si combinamos ambas leyes. Enfatizamos que este tipo de galaxias no tienen nada en especial y se encontrarían posiblemente en la frontera de las galaxias denominadas del valle verde. Combinando ambas leyes lleva a encontrar que en general las galaxias tendrían edades mayores a las que se observan. Por otro lado, utilizando la ley τ -exponencial se pudo restringir la historia de formación estelar de cerca de sólo 68 % de las galaxias lo cual es un problema; cerca de 1/3 de las galaxias no se pueden describir con esta ley, mayoritariamente las menos masivas. Finalmente, utilizando un retraso al nacimiento de las la ley τ -exponencial (introduciendo un tercer parámetro, t_i , encontramos que el 100 % de las galaxias en el SDSS DR7 tienen solución y que existía un buen acuerdo con las edades pesadas por masa observadas por [Gallazzi et al. \(2005\)](#). Por todo lo anterior, concluimos que la ley τ -exponencial con retraso es la ley de historia de formación estelar más realista que existe de las que hemos estudiado en esta sección y que utilizaremos en las siguientes secciones.

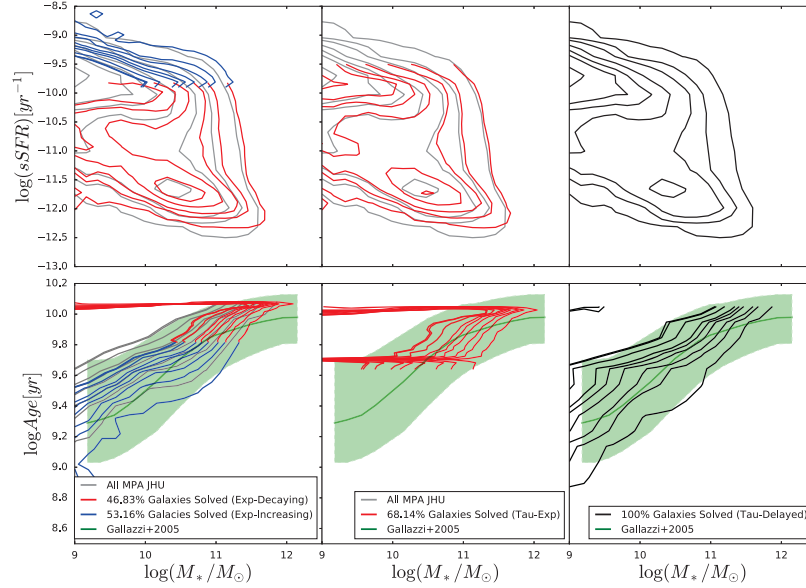


Figura 4.1: Paneles Superiores: Distribución de tasas de formación estelar específica en función de M_* . Los isocontornos muestran el 10 %, 25 %, 50 %, 68 %, 75 % y 90 %. De izquierda a derecha se muestran respectivamente los modelos con la siguiente leyes de SF: exponencial creciente (líneas azules)/decreciente (líneas rojas), τ -exponencial (líneas rojas) y τ -exponencial con retraso al nacimiento (líneas negras). Las líneas grises en los paneles izquierdo y central corresponden a toda la población del catálogo MPA JHU. Para la ley exponencial creciente sólo 46.83 % de las galaxias tuvieron una solución, mientras que para la ley exponencial decreciente sólo el 53.16 %; combinando ambas, quedan 0.01 % de galaxias sin solución las cuales tienen $\text{sSFR} \sim 1.3 \times 10^{-10} \text{ yr}^{-1}$. Para la ley τ -exponencial, tuvieron solución sólo el 68.14 %; aquellas con $\text{sSFR} > 3.2 \times 10^{-10} \text{ yr}^{-1}$ no tienen solución con esta ley. En el caso de la ley τ -exponencial con retraso al nacimiento el 100 % de las galaxias tuvieron solución. **Paneles Inferiores:** Distribución de la predicción de edades pesadas por masa para los casos descritos arriba. La línea verde y área sombreada es el promedio y 1σ de la determinación de edades pesadas por masa de Gallazzi et al. (2005) presentadas en Calura et al. (2014).

Resultados: La Población Total de Galaxias

En este Capítulo presentamos y discutimos los resultados concernientes a la población global de las galaxias, sin separarla en galaxias con formación estelar activa (las llamaremos activas o por su sigla en inglés, SFGs) y en retiradas (RGs por su sigla en inglés). Para la muestra de $\sim 6 \times 10^5$ galaxias espectroscópicas del SDSS DR7 descrita en el Capítulo 3 hemos derivado las historias individuales de formación estelar (SFHs) utilizando una ley τ -exponencial con retraso al nacimiento y con base en los catálogos MPA JHU y de [Chang et al. \(2015\)](#) para extraer la masa estelar y SFR de cada objeto. En consecuencia cada galaxia de nuestra muestra del SDSS DR7 tiene dos historias de formación estelar, una por MPA JHU y otra por el catálogo de [Chang et al. \(2015\)](#).

En este Capítulo estudiaremos la evolución del diagrama $s\text{SFR}-M_*$ utilizando las historias de formación estelar individuales de las galaxias restringidas a partir de los catálogos MPA JHU y de [Chang et al. \(2015\)](#). Nos enfocaremos en entender las diferencias de los resultados entre ambos catálogos. Mostraremos que las historias de formación estelar restringidas a partir del catálogo del MPA JHU predicen que la distribución de galaxias en el diagrama $s\text{SFR}-M_*$ es aproximadamente bimodal sólo hasta corrimientos al rojo $z \lesssim 0.75$, mientras que en el caso del catálogo de [Chang et al. \(2015\)](#) se observa la existencia de una región de galaxias con bajos valores de $s\text{SFR}$ que marca una bimodalidad en el diagrama aproximadamente hasta $z \lesssim 1.75$. Adicionalmente, mostraremos que la evolución de la función de masa estelar $\Phi_*(M_*, t)$ inferida utilizando el catálogo del MPA JHU está en buen acuerdo con la evolución observada en muestreos cosmológicos. Por lo contrario, la evolución de la función de masa estelar inferida utilizando el catálogo de [Chang et al. \(2015\)](#) predice una sobreabundancia de galaxias de alta masa que no es observada. Es reveladora esta interconexión restrictiva entre las inferencias arqueológicas y la demografía a diferentes épocas.

5.1. Distribución de los Parámetros Constreñidos de la ley de historia de formación estelar

Antes de entrar en discusión sobre implicaciones demográficas a diferentes épocas de las historias de formación estelar restringidas a partir de las $(\text{SFR}, M_*)_{\text{obs}}$ del SDSS-DR7, en esta sección reportamos el espacio de parámetros resultante de utilizar los catálogos MPA JHU y de [Chang et al. \(2015\)](#).

La Figura 5.1 muestra la distribución de los 3 parámetros de nuestra ley τ -exponencial con retraso en el nacimiento: t_i , τ y A/τ , en función de M_* utilizando el catálogo del MPA JHU, paneles en la izquierda, y de [Chang et al. \(2015\)](#), paneles en la derecha.

Comenzamos estudiando el comportamiento de t_i , parámetro que marca el nacimiento de nuestras galaxias, paneles superiores. La Figura 5.1 muestra que aproximadamente el 68 % historias de formación estelares a partir del catálogo del MPA JHU tienen $t_i = 0.75$ Gyrs, la edad impuesta de entrada en nuestro método, ver Capítulo 2. De hecho, observamos que cerca del 100 % de las galaxias con masas mayores a $M_* \sim 10^{10} M_\odot$ tienen $t_i = 0.75$. Por otro lado, galaxias que están por debajo de esta masa, comienzan a tener una gran diversidad de valores de t_i y sistemáticamente hay cada vez t_i con valores mayores, tan grandes como $t_i \sim 13$ Gyrs, conforme decrece M_* . Algo similar observamos cuando estudiamos los resultados con base al catálogo de [Chang et al. \(2015\)](#); aquí encontramos, sin embargo, que aproximadamente el ~ 78 % de las galaxias, un ~ 10 % mayor que en el caso del MPA JHU, tienen $t = 0.75$ Gyrs. Observamos que las tendencias discutidas para el MPA JHU siguen siendo validas para [Chang et al. \(2015\)](#) en el caso de la distribución de galaxias con $t_i > 0.75$ Gyrs; es de esperarse que este catálogo requiera de menos casos con $t_i > 0.75$ Gyrs dado que hay una fracción de galaxias con sSFR iniciales (obs) menores a las del catálogo MPA JHU.

El parámetro τ marca la época donde la SFR tiene su pico, paneles intermedios. Es interesante notar que la edad promedio de una galaxia con una ley de formación estelar τ -exponencial con retraso al nacimiento está dada aproximadamente por $T \sim t_H - \tau$, ver ecuación 4.1. La distribución de τ para los catálogos MPA JHU y de [Chang et al. \(2015\)](#) son muy similares. No obstante, podemos observar que [Chang et al. \(2015\)](#) predice la existencia de una fracción de galaxias con τ menores a los del MPA JHU; nuestras predicciones con base en el MPA JHU muestran que mientras más del 90 % de las galaxias tienen $\tau \gtrsim 0.8$ Gyrs, siendo las únicamente las más masivas las que presentan los τ más pequeños, en el caso de [Chang et al. \(2015\)](#) es $\tau \gtrsim 0.2$ Gyrs. Estas diferencias pueden explicarse debido a los bajos niveles de SFR calculados en [Chang et al. \(2015\)](#) comparados a los del MPA JHU. Imagine que tenemos una galaxia con dos mediciones de masas estelares idénticas pero con diferentes SFR's donde una medición es mayor que la otra. Si inferimos las historias de formación estelar utilizando estas observaciones entonces concluiríamos que el caso con la medición de SFR más alta formó el grueso de sus estrellas tardíamente con relación al caso con una SFR más bajo. El punto clave en esta discusión es que ambas tienen la misma masa estelar final, así una tiene que formar sus estrellas más rápidamente a épocas más tardías que la otra.

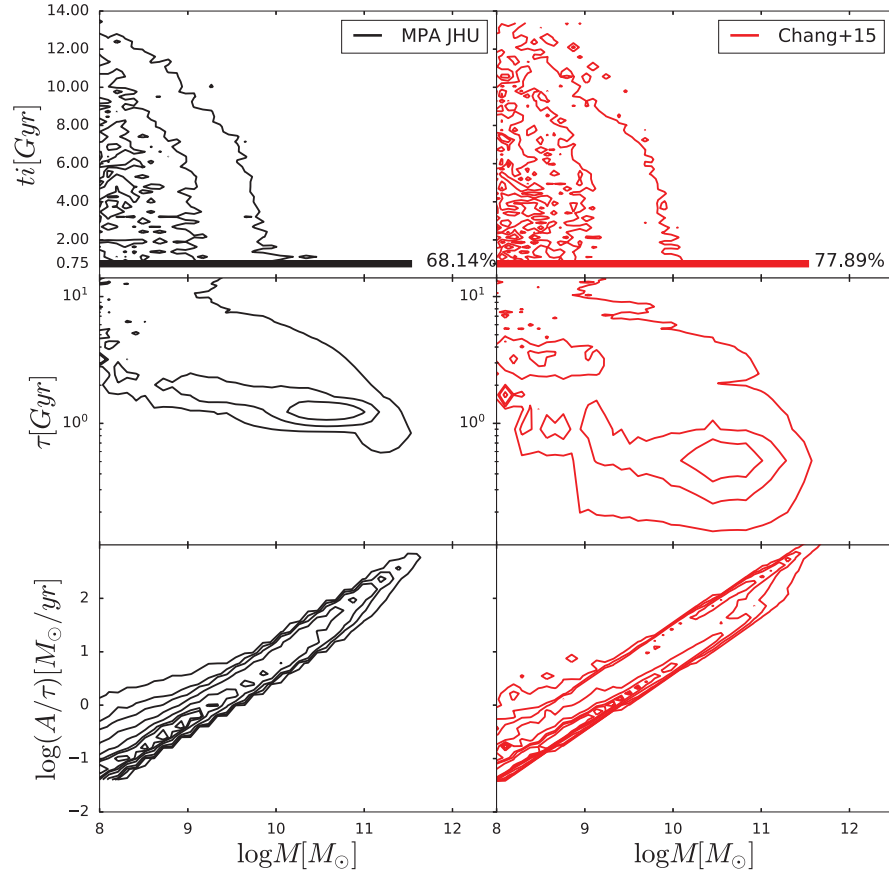


Figura 5.1: Distribución de los parámetros constrañidos t_i , τ y A/τ en función de la masa estelar, M_* , para las historias de formación estelar del SDSS en el caso del catálogo del MPA JHU (paneles de la izquierda) y de Chang et al. (2015, paneles de la derecha). Los iscontornos de densidad muestran la distribución de galaxias para el 1%, 5%, 10%, 25%, 50%, 68%, 75% y 90%. En el caso del MPA JHU aproximadamente 68% de las galaxias tienen un $t_i = 0.75$ Gyrs, mientras que para Chang et al. (2015) esta fracción es del 78%. Note que las diferencias en la distribución de las galaxias en el plano sSFR- M_* en ambos catálogos se proyecta principalmente en diferencias en la distribución del parámetro τ .

De hecho, esta es la situación que tenemos cuando usamos los catálogos del MPA JHU y de [Chang et al. \(2015\)](#).

Finalmente analizamos la distribución del cociente A/τ en función de M_* , paneles inferiores. Preferimos este cociente a simplemente A pues es más informativo. En §2.2.3 vimos que A es en realidad la masa hipotética total producto de integrar nuestra ley de SFH (ec. 2.10) hasta el infinito. Entonces A correlaciona muy fuertemente con M_{*obs} cuando $\tau \ll t_{obs}$ y tiende a ser mayor a M_* cuando τ es cercano o mayor a t_{obs} . El cociente A/τ es una especie de tasa de formación estelar característica del objeto. Como se aprecia en la Fig. 5.1 A/τ correlaciona estrechamente con M_* para ambos catálogos. Esto es seguramente una reminiscencia de que una ley tipo exponencial para la SFH predice poblaciones que siguen una dependencia de $SFR \propto M_*$, donde M_* es la masa estelar final de la galaxia, $z \sim 0.1$.

5.2. Evolución Temporal de la distribución sSFR– M_*

Las historias de formación estelar restringidas a partir de los catálogos MPA JHU y de [Chang et al. \(2015\)](#) nos permiten hacer predicciones *precisas* de la evolución de la distribución de galaxias en el plano sSFR– M_* para cada caso. La Figura 5.2, muestra la evolución de la distribución de galaxias en el plano sSFR– M_* para nueve corrimientos al rojo desde $z = 0.1$ hasta $z = 3.75$. Los isocontornos muestran el 1%, 5%, 10%, 25%, 50%, 68%, 75%, y 90% de la distribución de las galaxias a cada corrimiento al rojo. Las líneas negras muestran los resultados utilizando el catálogo del MPA JHU mientras que las líneas rojas muestran los resultados con base en el catálogo [Chang et al. \(2015\)](#).

Como se discutió con anterioridad, los trazadores para la medición de SFR en ambos catálogos son distintos; mientras el MPA JHU, aparte de la fotometría en óptico, utiliza líneas de ionización (mismas que en galaxias tempranas pueden corresponder más bien a la emisión de estrellas post AGB), [Chang et al. \(2015\)](#), aparte de la fotometría en óptico, usa las propiedades del polvo a través de la fotometría del mediano infrarrojo. Esto implica que a $z \sim 0.1$ la distribución de galaxias sea muy diferente entre ambos catálogos, especialmente cuando los valores de sSFR son bajos; mientras en el MPA JHU existe una distribución bimodal bastante fuerte en [Chang et al. \(2015\)](#), esta distribución es más continua con una población considerable de galaxias con bajos niveles de SFR. Podría ser que en el caso del MPA JHU se exagera entonces en los valores de SFR de galaxias retiradas/tempranas al usar líneas de ionización que más que trazar formación estelar, trazan la emisión de estrellas post AGB.

Cuando analizamos la evolución de la distribución sSFR– M_* encontramos que para el catálogo de [Chang et al. \(2015\)](#) surge una verdadera distribución bimodal hasta $z \lesssim 1.75$. En contraste, la distribución bimodal deja de ser más obvia para nuestras inferencias con base al catálogo del MPA JHU. Note que en la Figura 5.2, deliberadamente hemos omitido hacer comparaciones con la literatura ya que no es nuestro interés, por el momento, saber qué catálogo reproduce una distribución más realista de las galaxias en

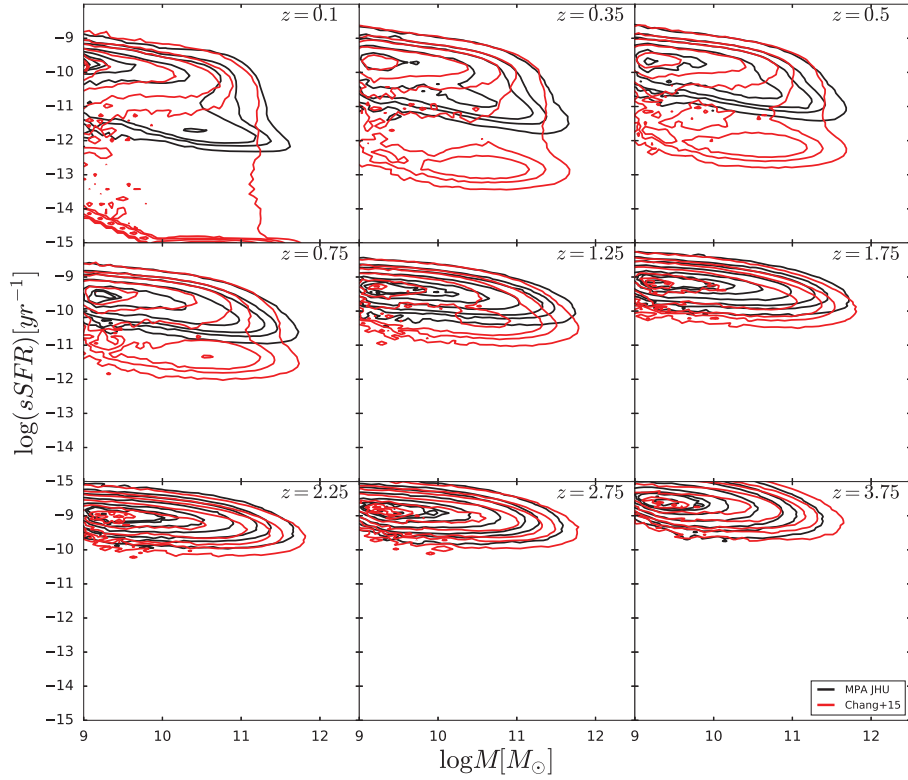


Figura 5.2: Distribución de galaxias en el diagrama sSFR– M_* desde $z = 0.1$ hasta $z = 3.75$. Los isocontornos de densidad en negro muestran los resultados de las historias de formación estelar restringidas a partir del catálogo del MPA JHU, mientras los que están en rojo muestran lo mismo pero utilizando el catálogo de [Chang et al. \(2015\)](#). Los isocontornos muestran el 1%, 5%, 10%, 25%, 50%, 68%, 75% y 90% de la distribución de las galaxias. Los resultados en base a [Chang et al. \(2015\)](#) muestran que la distribución de galaxias bimodal hasta $z \lesssim 1.75$, mientras que los resultados en base al MPA JHU sugieren que la distribución es bimodal hasta $z \lesssim 0.75$.

el diagrama $s\text{SFR}-M_*$ a diferentes z 's. Como veremos a continuación la evolución de la función de masa estelar de las galaxias será una cantidad clave para decidir el catálogo a usar.

5.3. Evolución Temporal de la Función de masa Estelar

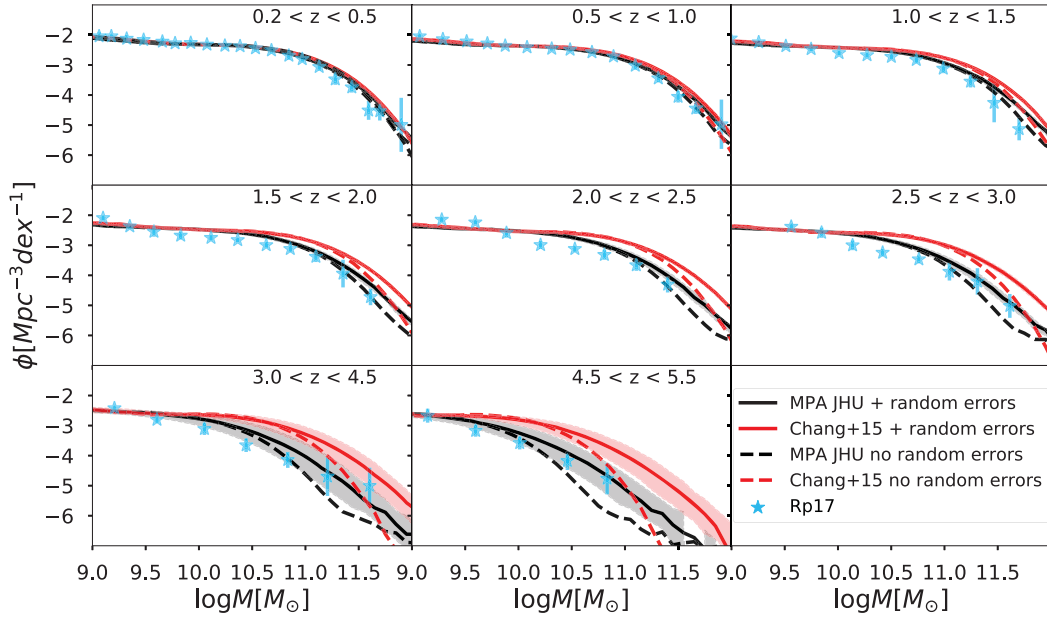


Figura 5.3: Función de masa estelar de galaxias (GSMF) para 8 intervalos de corrimientos al rojo. Predicciones de nuestro modelo cuando se toman o ignoran los errores aleatorios a las masas estelares están mostrados respectivamente con las líneas solidas y segmentadas. Los símbolos con barras de error muestran los promedios de la compilación hecha en Rodríguez-Puebla et al. (2017). Tomar en cuenta errores aleatorios muestra que es importante para comparar con las inferencias observacionales.

Una predicción inmediata de nuestro modelo es la evolución temporal de la función de masa estelar de las galaxias (GSMF). La Figura 5.3 muestra los resultados cuando hemos utilizado el catálogo del MPA JHU, líneas segmentadas negras, y para el catálogo de Chang et al. (2015), líneas segmentadas rojas. En esta figura mostramos predicciones desde $z \sim 0.35$ hasta $z \sim 5$ como se indican en las etiquetas. Derivamos las funciones de masa estelar a altos corrimientos al rojo utilizando la ecuación (3.4). Note que aquí hemos supuesto que las galaxias han evolucionado por pura formación estelar *in situ* y que las fusiones entre galaxias no juegan un papel relevante. Finalmente, comparamos nuestros resultados con la compilación y promediación de observaciones de Rodríguez-Puebla et al. (2017), símbolos con barras de error azules.

En general, ambas inferencias predicen a todos los corrimientos al rojo GSMF's del tipo Schechter; a bajas masas se comporta como una ley de potencias pero a altas tiene una caída exponencial. Para $z \lesssim 1$, ambas inferencias predicen GSMF's similares entre sí. A partir de corrimientos al rojo más altos encontramos que las diferencias entre ambas predicciones son más dramáticas. En general, la predicción de la evolución de la GSMF con base en el catálogo de [Chang et al. \(2015\)](#) es más lenta que la del MPA JHU en particular para las galaxias más masivas; esto es consecuencia de los bajos niveles de SFR que son detectados en [Chang et al. \(2015\)](#). Al comparar nuestros resultados con la compilación de [Rodríguez-Puebla et al. \(2017\)](#) concluimos que las inferencias a partir del catálogo del MPA JHU tienen un mejor nivel de aceptación que los resultados a partir de [Chang et al. \(2015\)](#), en especial a altos corrimientos al rojo. Lo anterior nos lleva a concluir que las SFHs con base en el MPA JHU son más realistas que a partir de [Chang et al. \(2015\)](#), simplemente porque reproducen mejor las observaciones de la GSMF a diferentes corrimientos al rojo. No obstante, existe siempre la posibilidad que la comparación que hemos hecho con las observaciones no sea del todo correcta.

Mediciones individuales de las masas estelares a altos corrimientos al rojo están sujetas a errores aleatorios o estadísticos. Estos errores aleatorios dependen del corrimiento rojo (ver por ejemplo, [Pérez-González et al., 2008](#); [Conroy, 2013b](#); [Muzzin et al., 2013](#)). Es decir, la función de masa estelar observada es la convolución de la función de masa intrínseca. En este trabajo suponemos que los errores estadísticos se desvían siguiendo una distribución lognormal que depende, en primera aproximación, de z :

$$\sigma = 0.1 + 0.05z, \quad (5.1)$$

de acuerdo con [Behroozi et al. \(2010\)](#) y [Rodríguez-Puebla et al. \(2017\)](#).

La Figura 5.3 muestra los resultados con las líneas sólidas después de tomar en cuenta errores aleatorios suponiendo un filtro lognormal con una desviación estandar dada por la ecuación (5.1). El efecto de la convolución lleva a predecir más galaxias a altas masas, un efecto conocido como “sesgo de Eddington”. Tomando en cuenta errores aleatorios, nuestro modelo recupera con mejor precisión las funciones de masa estelares a todos los corrimientos al rojo cuando usamos el MPA JHU y lleva a sobre predecir, aún más, la abundancia de galaxias masivas cuando usamos [Chang et al. \(2015\)](#).

En resumen, cuando suponemos una historia de formación estelar del tipo τ -exponencial con retraso al nacimiento, las masas estelares y tasas de formación estelar del catálogo del MPA JHU predicen una evolución de la GSMF que está en mejor acuerdo que cuando usamos el catálogo de [Chang et al. \(2015\)](#). Enfatizamos que por ningún motivo estamos concluyendo que las tasas de formación estelares en [Chang et al. \(2015\)](#) están incorrectas: nuestros modelos no cuentan con la capacidad de juzgar ambas mediciones. De hecho, es posible pensar en que existe una ley de formación estelar que aplicada a los datos de [Chang et al. \(2015\)](#) sería capaz de reproducir la evolución observada de la GSMF. Con lo anterior en mente, de aquí en adelante los resultados que discutiremos serán con base a las historias restringidas utilizando el catálogo del MPA JHU. Podemos repetir todos los cálculos para el catálogo de [Chang et al. \(2015\)](#).

5.4. Comparaciones con la literatura: La Relación Promedio SFR – M_* y la Historia de Formación Estelar Cós mica

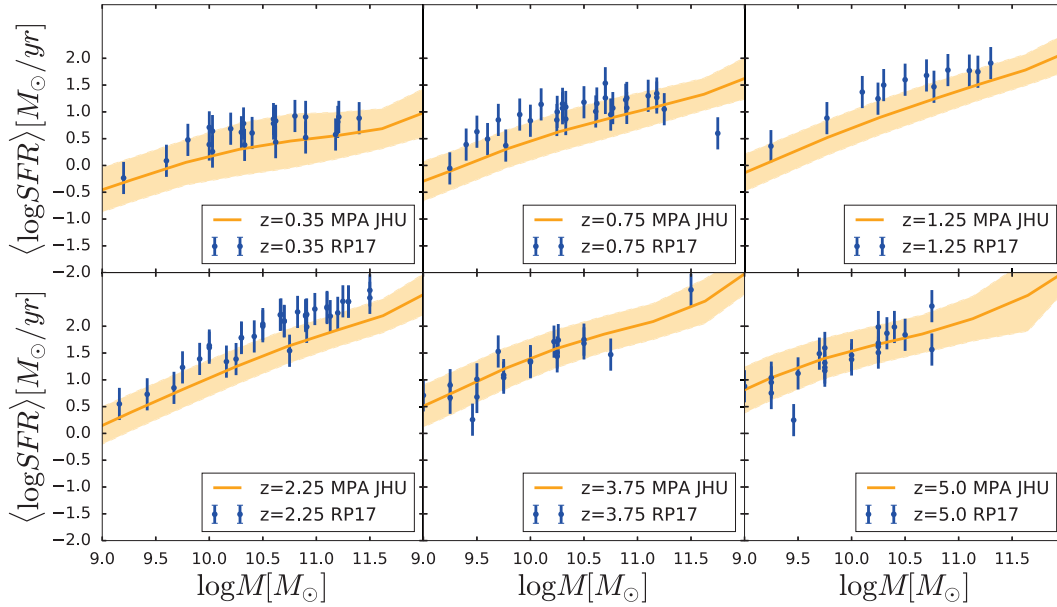


Figura 5.4: Tasa de formación estelar en función de la masa estelar. Nuestros modelos están presentados con las líneas sólidas y áreas sombreadas, representando respectivamente el promedio en $\langle \log \text{SFR} \rangle$ y su desviación estándar. Los círculos con barras de error muestran la compilación de [Rodríguez-Puebla et al. \(2017\)](#).

En la Sección 5.2 mostramos la distribución de las galaxias en el plano $\text{sSFR} - M_*$ y comparamos los resultados obtenidos a partir de los catálogos que hemos utilizado para la SFR y M_* . No obstante, no hemos hecho ninguna comparación con resultados observacionales a otros corrimientos al rojo. En esta Sección nos dedicamos a hacer comparaciones de nuestros resultados utilizando únicamente las inferencias con base al catálogo del MPA JHU. Comparamos nuestros resultados con una compilación presentada en [Rodríguez-Puebla et al. \(2017\)](#). Estos autores compilaron reportes de la relación promedio $\langle \log \text{SFR}(M_*) \rangle$ y en los casos donde se reportaban resultados en la forma $\langle \text{SFR}(M_*) \rangle$ homogeneizaron al primero asumiendo que la distribución de galaxias se dispersa lognormal con una dispersión de 0.3 dex. Note que bajo estas suposiciones $\log \langle \text{SFR}(M_*) \rangle = \langle \log \text{SFR}(M_*) \rangle + 0.1$. Con el fin de comparar directamente con estos resultados, en este trabajo presentamos promedios $\langle \log \text{SFR}(M_*) \rangle$.

La Figura 5.4 muestra las predicciones de nuestros modelos a la evolución del dia-

grama sSFR $-M_*$ para *todas las galaxias*, l3neas s3lidas, en comparaci3n a la compilaci3n de [Rodr3guez-Puebla et al. \(2017\)](#), c3rculos s3lidos con barras de error, para seis intervalos de corrimiento al rojo. Las 3reas sombreadas en la figura muestra la desviaci3n est3ndar en nuestros modelos. Esta desviaci3n est3ndar incluye errores aleatorios en la masa estelar, como se describi3 en la Secci3n 5.3, y errores aleatorios en la tasa de formaci3n estelar de 0.2 dex (ver por ejemplo [Speagle et al., 2014](#)). Nuestros resultados recuperan la tendencia general de las observaciones. Esto es, la normalizaci3n de la relaci3n SFR $- M_*$ aumenta con z . Adicionalmente, la relaci3n SFR $- M_*$ parece ser una ley de potencias con una pendiente que aumenta con el corrimiento al rojo. Observe que esta es una forma directa de comparar la historia de formaci3n estelar τ -exponencial con retraso al nacimiento supuesta en nuestro modelo. Con esto, concluimos que en general el modelo τ -exponencial con retraso al nacimiento captura con buena precisi3n las tasas de formaci3n estelar observadas a diferentes z 's en funci3n de la masa estelar.

Para finalizar la presentaci3n de los resultados con base al MPA JHU, discutimos a continuaci3n la historia de la formaci3n estelar c3smica, $\dot{\rho}_*(t)$.

La Figura 5.5 muestra las predicciones de $\dot{\rho}_*(t)$ con nuestro modelo, l3nea negra solida. La historia de la formaci3n estelar c3smica ha sido calculada como se explic3 en el Cap3tulo 3. Adicionalmente, hemos incluido errores aleatorios en la masa estelar y en la tasa de formaci3n estelar. En la misma figura incluimos la compilaci3n de [Madau and Dickinson \(2014\)](#). Estos datos fueron obtenidos utilizando luminosidades en el sistema de referencia del FUV e IR determinando, emp3ricamente, correcciones de oscurecimiento por polvo. La compilaci3n de [Madau and Dickinson \(2014\)](#) ha sido corregida adecuadamente para ser consistente con una funci3n inicial de masa de [Chabrier \(2003b\)](#). Observe el buen acuerdo que existe con las predicciones de nuestro modelo, especialmente para $z \lesssim 2$. Las diferencias encontradas a altos z entre nuestro modelo y las observaciones puede deberse a que nuestras funciones de masa estelar est3n ligeramente sobre prediciendo el n3mero de galaxias que deber3an observarse en particular para las galaxias activas (SFGs). En efecto, al estudiar la Figura 6.5 notamos que a altos corrimientos al rojo nuestro modelo tiene un d3ficit en el n3mero de galaxias retiradas resultando en una sobre estimaci3n en el n3mero de galaxias activas que deber3a observarse. Como resultado la tasa de formaci3n estelar c3smica es mas alta por arriba de $z \sim 2$.

Por 3ltimo, la Figura 5.5 muestra la historia de densidad de masa estelar cosmica, $\rho_*(t)$. Para referencia de c3mo hemos obtenido esta cantidad con base a nuestra muestra observacional, v3ase el Cap3tulo 3. Similarmente a la Figura 5.5, hemos incluido la compilaci3n de [Madau and Dickinson \(2014\)](#) y corregidas a una funci3n inicial de masa de [Chabrier \(2003b\)](#). Nuestro modelo reproduce bien las observaciones. Esto es alentador ya que conceptualmente la densidad de masa estelar c3smica es la integraci3n temporal de la tasa de formaci3n estelar c3smica. En numerosas ocasiones un tema recurrente en la literatura es la de estudiar la posible consistencia entre ambas cantidades y su evoluci3n (v3ase [Madau and Dickinson, 2014](#), para una reciente discusi3n y m3s referencias en la Introducci3n). La forma moderna de este problema es si la evoluci3n temporal de la funci3n de masa estelar es consistente con la evoluci3n de la relaci3n SFR $- M_*$ (ver Introducci3n).

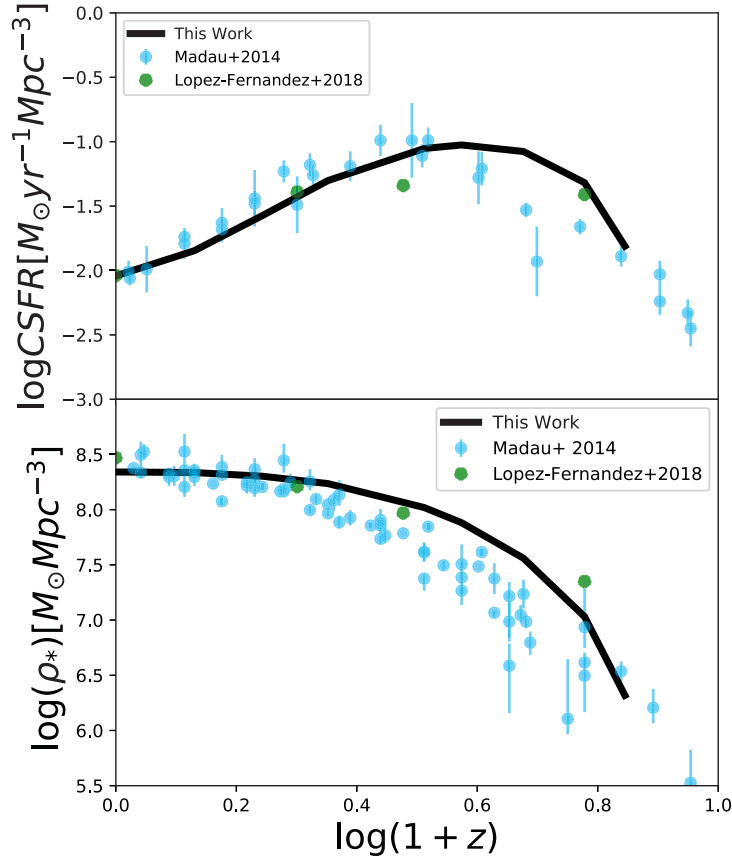


Figura 5.5: Panel Superior: Historia de formación estelar cósmica. La línea sólida negra muestra nuestros resultados para todas las galaxias. Los círculos azules con barras de error muestran la compilación de [Madau and Dickinson \(2014\)](#) y las estrellas verdes los resultados de [López Fernández et al. \(2018\)](#). **Panel Inferior:** Historia de la masa estelar cósmica. Observe el buen acuerdo entre observaciones y nuestro modelo en ambas historias.

En este Capítulo hemos estudiado tanto la evolución del diagrama $SFR-M_*$ como de la GSMF, así como de las historias de formación estelar y de masa estelar cósmicas y hemos mostrado que nuestro enfoque ha sido capaz de reproducir tanto las cantidades diferenciales como las integrales de acuerdo a como se observan. En otras palabras, mostramos que hay consistencia entre $SFR(M_*, t)$ y $\Phi_*(M_*, t)$ así como entre $\dot{\rho}_*(t)$ y $\rho_*(t)$.

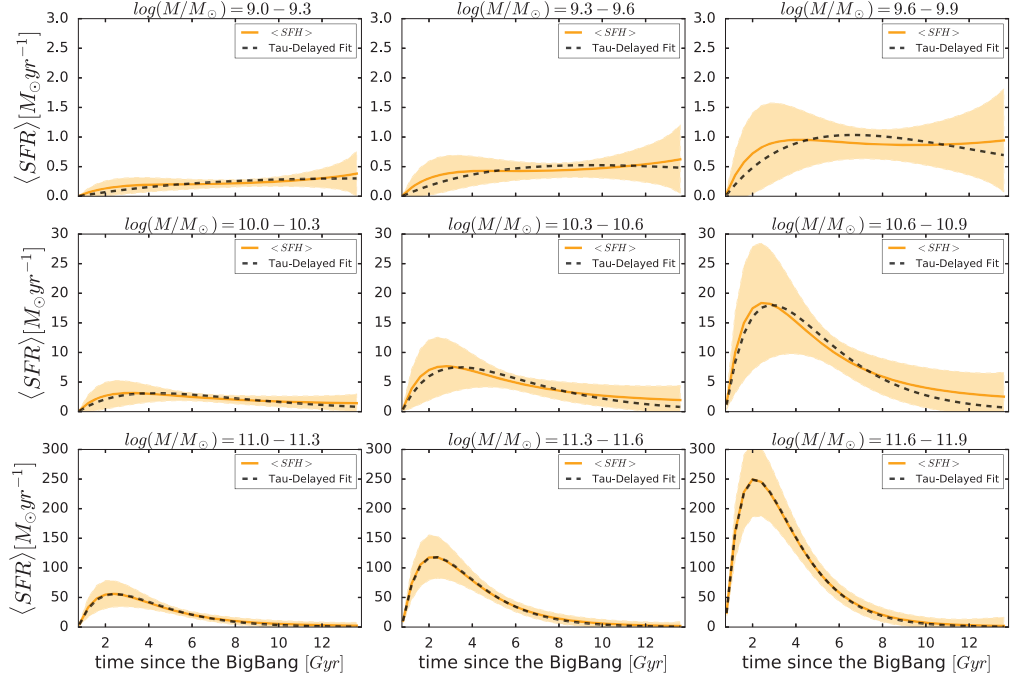


Figura 5.6: Historias de formación estelares promedio para los progenitores de las galaxias a $z = 0$ para galaxias con masas comprendidas entre $M_* = 10^9 - 10^{11.9} M_{\odot}$ en intervalos de 0.3 dex. Las líneas solidas en la figura muestra los promedios mientras que las áreas sombreadas delimitan la desviación estándar de todas las posibles historias para un intervalo dado de M_* . Los mejores ajustes utilizando una función τ -exponencial con retraso en nacimiento a las historias de formación estelar promedio se muestran en la misma figura con las líneas segmentadas. Note que las historias de formación estelar promedio de las galaxias no están bien caracterizadas por una ley τ -exponencial con retraso en nacimiento, para observar mejor esta diferencia ver Figura 5.7.

5.5. Historias de Formación Estelar y Crecimiento de Masa Promedio

La Figura 5.6 muestra las historias de formación estelar promedio para los progenitores de las galaxias a $z = 0$ con masa estelar M_* . Lo anterior se muestra para galaxias con masas comprendidas entre $M_* = 10^9 - 10^{11.9} M_{\odot}$ en intervalos de 0.3 dex. Las líneas sólidas en la figura muestran los promedios mientras que las áreas sombreadas delimitan la desviación estándar de todas las posibles historias para un intervalo dado de M_* .

La Figura 5.6 muestra que las historias de formación estelar promedio de las galaxias de baja masa es muy extendida en el tiempo, reflejando que en la gran mayoría de los casos las historias de las galaxias de muy baja masa tienen valores de τ grandes.

5. RESULTADOS: LA POBLACIÓN TOTAL DE GALAXIAS

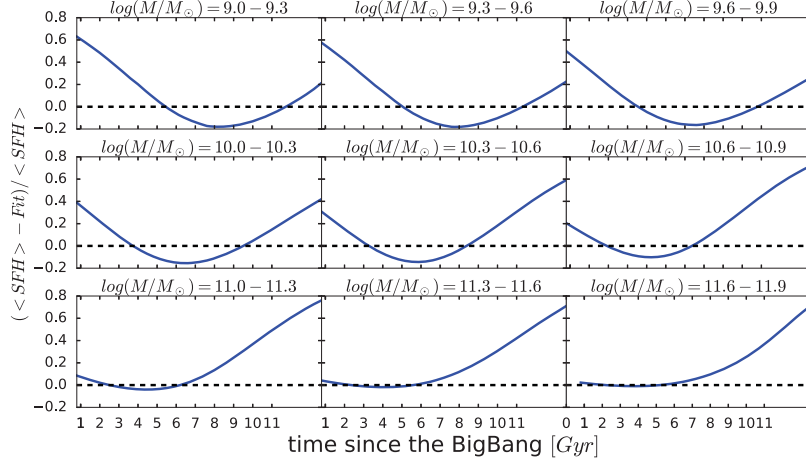


Figura 5.7: Diferencia entre la $\langle SFH \rangle$ y el mejor ajuste de una ley de tipo τ -Exponencial mostradas ambas en la Figura 5.6 (línea sólida en color azul). Se puede observar que aunque a primera vista en la Figura 5.6 no se aprecia una significativa diferencia, en realidad si existe, mostrando que el ajuste de una ley τ -Exponencial no puede ajustar el promedio de múltiples τ -Exponenciales.

De hecho, una fracción importante incluso tiene el t_i retrasado considerablemente con relación a los 0.75 Gyrs (ver Fig. 5.1 arriba), lo cual hace que estén en plena fase de crecimiento hacia el día de hoy; en las historias promedio de los dos primeros intervalos de M_* se ve este crecimiento hacia t_0 así como una fuerte dispersión, reflejo de la diversidad de historias que tienen las galaxias de baja masa. Las historias tardías de las galaxias de baja masa son de esperarse ya que en su mayoría éstas son galaxias con formación estelar activa (y azules) localmente y las cuales todavía probablemente no han alcanzado su pico de formación estelar o apenas lo están alcanzando.

A medida que aumenta la masa, las SFHs promedio por masa se van haciendo más regulares y decrecientes desde épocas más tempranas. Las galaxias más masivas muestran SFHs muy similares, todas con $t_i = 0.75$ Gyr y un pico de formación estelar en épocas muy tempranas; por ejemplo, galaxias con masas $M_* \sim 10^{11.75} M_\odot$ alcanzaron su pico cuando el Universo tenía una edad de $t \sim 2.5$ Gyrs (ver también distribución de la τ en la Fig. 5.1). Lo anterior es característico para galaxias con valores de τ pequeños. De nuevo, esto es de esperarse, en galaxias de alta masa, la mayoría son viejas, rojas y con baja actividad en su formación estelar.

Otra conclusión que se puede derivar de la Figura 5.6 es que las historias promedio de formación estelar de las galaxias no siguen precisamente la ley τ -exponencial con retraso en nacimiento que describe cada galaxia individual. Los mejores ajustes utilizando una función τ -exponencial con retraso en nacimiento a las historias de formación estelar promedio se muestran en la misma figura con las líneas segmentadas. Nótese que la precisión con la que esta ley es capaz de describir las historias de formación estelar promedio es dependiente de la masa. Mientras las de baja masa muestran el peor

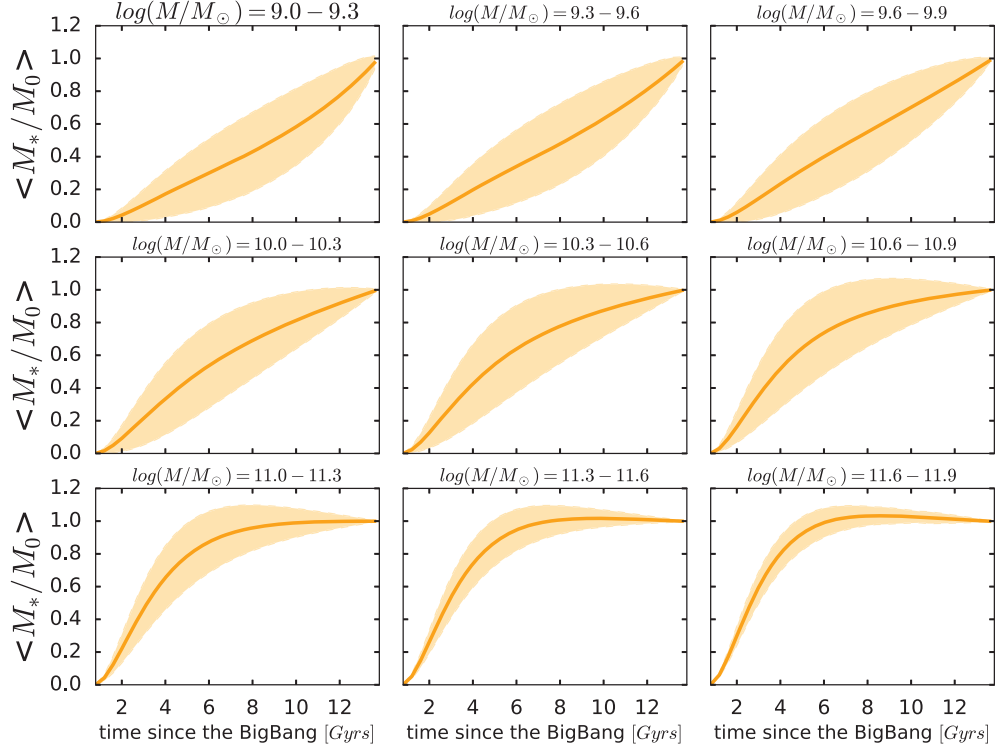


Figura 5.8: Historias de crecimiento de masas estelar promedio para todas las galaxias y sus progenitores a $z = 0$ con masa estelar M_* . Las áreas sombreadas muestran la dispersión alrededor de todas las historias. Las historias han sido renormalizadas a la masa $M_0 = M_*(z = 0)$.

acuerdo, las de alta masa muestran que este modelo es lo suficientemente preciso para describir las historias promedio. Lo anterior puede tener consecuencias para los enfoques donde se suponen que las galaxias evolucionan alrededor de la relaciones promedio de la $SFR - M_*$, en especial para las galaxias que se encuentran en la secuencia principal de galaxias con formación estelar activa (SFMS).

La Figura 5.8 muestran el crecimiento de masa estelar promedio para progenitores a $z = 0$ correspondientes a las historias de formación estelar mostradas en la Figura 5.6 (tomando en cuenta el factor de reciclado). Las áreas sombreadas muestran la dispersión alrededor de todas las historias. El crecimiento de masa estelar ha sido renormalizado a su masa $M_0 = M_*(z = 0)$. Las características principales de estas figuras son simplemente un reflejo de las historias de tasa de formación estelar promedio discutidas anteriormente. No obstante, el ensamblaje de masas estelar promedio da una información extra. Se observa que las galaxias de menor masa, en promedio, están actualmente en proceso de crecimiento acelerado, mientras que las más masivas incluso han detenido su crecimiento en el pasado, más temprano mientras más masivas son (downsizing); el

5. RESULTADOS: LA POBLACIÓN TOTAL DE GALAXIAS

hecho de que se vea incluso un ligero decrecimiento de la masa es por el retorno de una fracción f_{ml} de la masa estelar como gas al medio interestelar por vientos estelares y SNs. De estos comportamientos se puede deducir que la edad pesada por masa será corta para las galaxias menos masivas y muy grande para las más masivas. Esto es consistente con previos resultados, (ver por ejemplo, [Gallazzi et al., 2005](#); [Pacifi et al., 2016](#)).

Resultados: Evolución de las Subpoblaciones de Galaxias con Formación Estelar Activa y Retiradas

En este Capítulo presentamos y discutimos la población de las galaxias divididas en galaxias que forman activamente estrellas y galaxias retiradas (SFGs y RGs respectivamente). Como se planteó en la Introducción, globalmente éstas son las dos principales subpoblaciones de galaxias que se observan. Las primeras, SFGs, han sido tradicionalmente identificadas en la literatura como parte de la así llamada Secuencia Principal en el diagrama SFR– M_* (SFMS), secuencia donde SFR correlaciona estrechamente con M_* . Las segundas, RGs, presentan bajos niveles de formación estelar para sus masas. En este caso no es claro que exista una relación estrecha entre su SFR y M_* , ya que estos resultados dependen del trazador de formación estelar que se utilice; para una mayor discusión ver los Capítulos 1 y 3. Sin embargo, la existencia de dos subpoblaciones introduce un problema obvio de selección: ¿Qué criterio se debe utilizar para distinguir ambas subpoblaciones? Abordamos esta cuestión al estudiar varios estimadores populares en la literatura, físicos o poblacionales en base al diagrama sSFR– M_* . En nuestro análisis concluimos que estas definiciones en su mayoría son *subjetivas*, especialmente cuando son aplicadas a altos corrimientos al rojo donde ya no es trivial distinguir entre las dos subpoblaciones. Encontramos que un criterio de tipo físico es el más adecuado para comparar con observaciones a altos z que seleccionan galaxias de la SFMS utilizando el diagramas color–color. Encontramos también que errores aleatorios en la determinación de M_* y SFR, en particular a altos z , pueden llevar al establecimiento de una distribución bimodal *artificial* en el diagrama sSFR– M_* . Puesto de otro modo, encontramos que los errores aleatorios alrededor de la sSFR– M_* llevan a clasificar a galaxias que son intrínsecamente activas como retiradas.

Tomando en cuenta los errores aleatorios y el criterio de separación en SFGs y RGs, en este Capítulo abordamos la cuestión fundamental sobre el surgimiento de la

bimodalidad de SFGs y RGs. Mostraremos que una ley universal de SFH para todas las galaxias, como la τ -exp con retraso en el nacimiento, que aplicamos sobre la muestra del SDSS, implica que la subpoblación de RGs desaparece muy pronto con z . Las SFHs de estas galaxias tienen que decrecer más rápido que la exponencial a partir de un tiempo de apagado temprano a fin de que las fracciones de RGs en función de la masa sean compatibles con las observaciones a $z > 1$.

Finalmente, encontramos que mientras las historias de formación estelar *promedio* de las RGs sí están bien descritas por una ley τ -exp con retraso, las historias de formación estelar *promedio* de SFGs difieren de una ley τ -exp con retraso. Adicionalmente, mostramos la contribución de las SFGs y RGs de hoy a las densidades de SFR y masa estelar globales en el pasado, es decir a las historias de formación estelar y masa estelar cósmicas.

6.1. Errores Aleatorios en Determinaciones de la SFR y M_* : Responsables de la Distribución Bimodal en el Diagrama sSFR- M_* a Altos z

Como se discutió en la Sección 5, mediciones individuales de las masas estelares a altos corrimientos al rojo están sujetas a errores aleatorios que dependen, a primera aproximación, del corrimiento al rojo. Aunque existen indicios de que estos errores aleatorios dependen en segundo orden al color de las galaxias (Kauffmann et al., 2004), nosotros nos enfocamos en las implicaciones en la dependencia con z . Similarmente, mediciones individuales de las tasas de formación estelar están sujetas a errores aleatorios que incluso pueden variar con los estimadores utilizados (ver por ejemplo, Speagle et al., 2014; Pforr et al., 2014). Afortunadamente, el análisis desarrollado en Speagle et al. (2014), donde se estudia la relación SFR- M_* para galaxias de la secuencia principal con base a una compilación de la literatura, encuentra que la dispersión observada en la relación SFR- M_* es de ~ 0.3 dex con una dispersión intrínseca de ~ 0.2 dex y resultando en errores aleatorios del orden de ~ 0.22 dex independiente del corrimiento al rojo (para mayor detalle véase la sección 4.1 en Speagle et al., 2014). En resumen, en este trabajo consideraremos que existe un error aleatorio en la M_* que dependen del corrimiento al rojo utilizando la Ec. (5.1) del Capítulo 5 y un error aleatorio en la SFR de 0.22 dex independiente del corrimiento al rojo. Para ambos casos suponemos que las distribuciones en los errores aleatorios son independientes entre sí y están descritas por distribuciones lognormal.

La Figura 6.1 muestra la distribución de galaxias en el diagrama sSFR- M_* . Los isocontornos negros muestran la distribución de las galaxias incluyendo errores aleatorios en las tasas de formación estelar y masas estelares mientras que los isocontornos en rojo muestran lo mismo pero ignorando errores aleatorios. La línea segmentada negra muestra una definición típicamente utilizada para definir galaxias activas y retiradas

6.1 Errores Aleatorios en Determinaciones de la SFR y M_* : Responsables de la Distribución Bimodal en el Diagrama $sSFR-M_*$ a Altos z

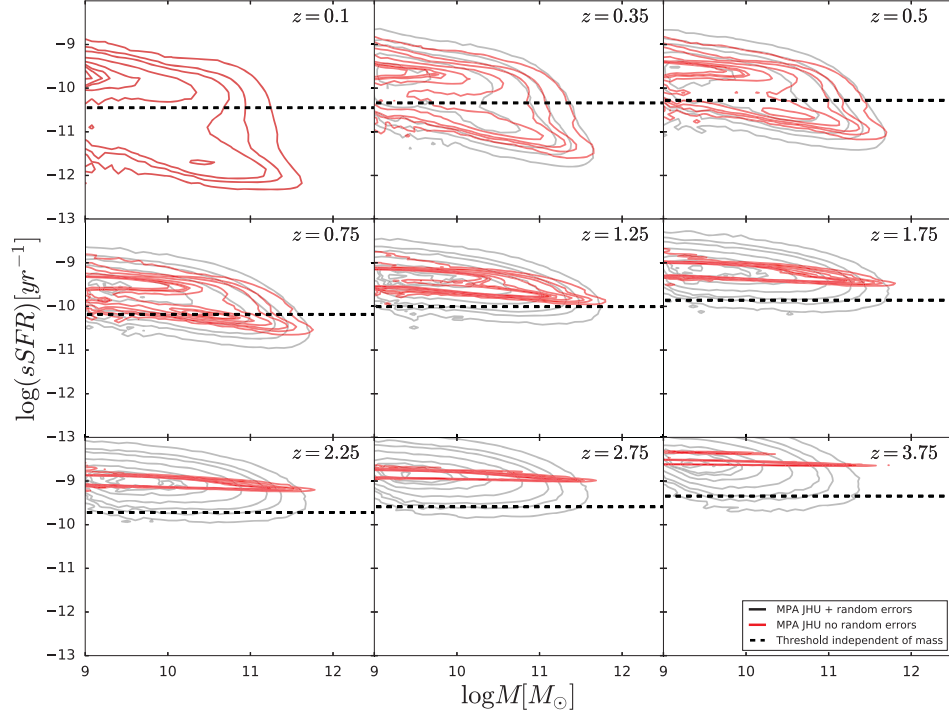


Figura 6.1: Distribución de galaxias en el plano $sSFR - M_*$ desde $z=0.1$ hasta $z=3.75$. Los isocontornos de densidad en negro muestran la distribución de las galaxias incluyendo errores aleatorios en las tasas de formación estelar y masas estelares, mientras los que están en rojo muestran lo mismo pero ignorando errores aleatorios. Los isocontornos muestran el 1 %, 5 %, 10 %, 25 %, 50 %, 68 %, 75 % y 90 % de la distribución de las galaxias. Los resultados muestran que una inclusión de errores a altos z 's impide que la relación $sSFR - M_*$ colapse en una distribución muy estrecha.

en el diagrama $sSFR-M_*$, la hemos incluido como una guía para el ojo e identificar ambas poblaciones a diferentes corrimientos al rojo. Este umbral será discutido en la siguiente sección. La primera conclusión que encontramos es que incluyendo errores aleatorios a altos z impide que la distribución en el diagrama $sSFR-M_*$ colapse en una distribución muy estrecha como se puede observar en el panel inferior derecho. Además, observe que incluyendo errores aleatorios la distribución bimodal se observa hasta altos z . En contraste, ignorando errores aleatorios encontramos que la distribución de galaxias retiradas emerge tardíamente por debajo de $z \lesssim 1.5$. Lo anterior lo hemos cuantificado en la Figura 6.2.

La Figura 6.2 muestra la fracción de galaxias retiradas utilizando el umbral mostrado en la Figura 6.1 cuando se toman en cuenta errores aleatorios, línea negra sólida, y cuando son ignorados, línea roja sólida. Las áreas sombreadas alrededor de cada línea muestra la dispersión existente de estos valores en el intervalo z correspondiente. Como

6. RESULTADOS: EVOLUCIÓN DE LAS SUBPOBLACIONES DE GALAXIAS CON FORMACIÓN ESTELAR ACTIVA Y RETIRADAS

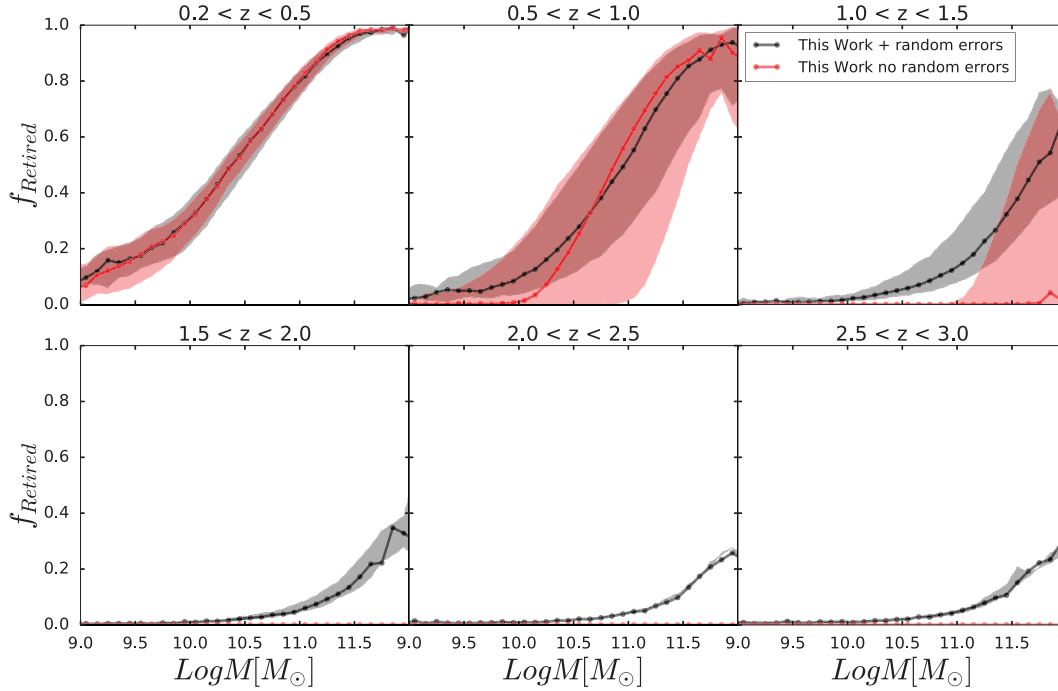


Figura 6.2: Fracción de galaxias retiradas predicha por una evolución con inclusión de errores en la tasa de formación estelar y en la masa estelar a altos z 's (puntos unidos en color negro) y sin tomar en cuenta errores (puntos unidos en color rojo). Los extremos de las áreas sombreadas en color negro y rojo corresponden a los extremos de los intervalos en z . Los resultados muestran que la fracción de galaxias retiradas desaparece abruptamente en el caso en el que los errores son ignorados, mientras que la inclusión de los mismo ayuda a que se mantenga una fracción mayor a alto z .

se anticipaba a partir de la Figura 6.1, utilizando las distribuciones intrínsecas observamos que la población de galaxias retiradas emerge tardíamente. No obstante, a $z \sim 0.35$ donde los errores aleatorios no son tan relevantes encontramos que ambas fracciones son similares. Lo anterior sugiere fuertemente que *la distribución bimodal observada de galaxias en los diagramas $sSFR-M_*$ (y las correspondientes fracción de RGs) a z 's altos pueden ser artificiales, y con una contaminación del orden de $\sim 20\%$.*

Con el fin de hacer comparación justas con las observaciones, de aquí en adelante consideraremos errores aleatorios tanto en la SFR como en la M_* .

6.2. Criterios de Separación de Galaxias Activas y Retiradas

Existe una gran variedad de criterios para distinguir a las galaxias que pertenecen a la SFMS y las que están en la zona de la RGs. De forma muy general, podemos dividir a estos dos criterios en dos por su esencia:

1. Basados en un proxy de la historia de formación estelar de las galaxias, como ser una sSFR umbral que permita evaluar si el binomio (SFR, M_*) medido para una dada galaxia implica que su SFR actual es importante con relación al promedio de su SFR en el pasado o no; de manera similar, un criterio tipo color-color puede indicar si la galaxia por sus colores ha dejado de formar estrellas hace mucho o no.
2. Basados en la demografía de las galaxias, por ejemplo en el diagrama sSFR– M_* (o color– M_*) se revelan regiones como la SFMS y la región de retiradas; imponiendo algún criterio de separación de esas regiones (el valle de las bimodalidades o un alejamiento mayor a $x\sigma$'s abajo de la SFMS) se divide en dos grupos a las galaxias.

Los criterios del primer tipo usando una sSFR umbral en términos de T_H^{-1} fueron usados en varios trabajos más de tipo teórico (v. gr. [Firmani et al., 2010](#)). Observacionalmente se usan más los criterios en diagramas color-color tales como el BzK ([Daddi et al., 2004](#); [Pannella et al., 2009](#)) o el diagrama UVJ ([Labbé et al., 2005](#); [Wuyts et al., 2007](#); [Williams et al., 2011](#); [Muzzin et al., 2013](#); [Martis et al., 2016](#)). Los diagramas UVJ son de los más utilizados en la comunidad, ya que este criterio permite separar el enrojecimiento por polvo y tener un estimado de la edad de las poblaciones estelares. Desafortunadamente, en este trabajo no contamos con colores sino tasas de formación estelar. Sin embargo, trabajos previos como [Pacifci et al. \(2016\)](#) han encontrado que un criterio de umbral en la sSFR inversamente proporcional a T_H (e independiente de la M_*) se traduce muy bien en el criterio ampliamente usado en el diagrama UVJ .

En lo que se refiere al segundo tipo de criterios, uno que ha resultado bastante popular en la literatura es definir un umbral donde la distribución de las galaxias aparece bimodal. La mayor desventaja que tiene es la de cuantificar la distribución bimodal, algo que a altos corrimientos al rojo no es claro (ver por ejemplo [Moustakas et al., 2013](#); [Karim et al., 2011](#)). Esto ha llevado a considerar una alternativa más sencilla, aunque no deja de ser subjetiva, al definir un umbral que es paralelo a la relación promedio de la SFMS pero desplazado por una constante. Este desplazamiento varía con la literatura desde 0.45 dex hasta 0.6 dex lo cual corresponde respectivamente al $\sim 93\%$ y $\sim 98\%$ de la población suponiendo una distribución lognormal con una dispersión de 0.3 dex para la SFMS. A continuación presentamos un inventario de definiciones de SFGs y RGs en el diagrama sSFR– M_* y que se encuentran enlistados en la Tabla 6.1.

La Figura 6.3 muestra la distribución de galaxias en el diagrama sSFR– M_* a diferentes corrimientos al rojo. Las predicciones con base a la ley τ –exponencial con retraso

6. RESULTADOS: EVOLUCIÓN DE LAS SUBPOBLACIONES DE GALAXIAS CON FORMACIÓN ESTELAR ACTIVA Y RETIRADAS

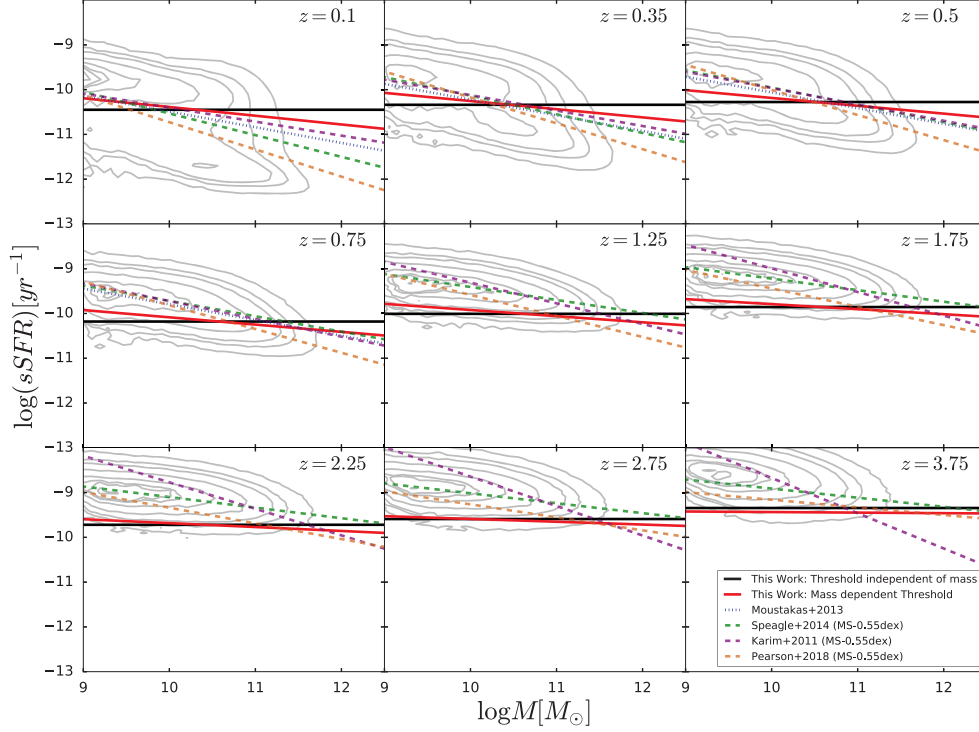


Figura 6.3: Distribución de galaxias en el diagrama $sSFR - M_*$ a diferentes z 's predichos con una ley de tipo τ -exponencial con retraso en nacimiento (isocontornos en color gris). Las diferentes líneas corresponden a los cortes $sSFR$ con base al inventario de la Tabla 6.1 para separar las galaxias en activas y retiradas (ver recuadro inferior derecho). Las líneas sólidas en color negro y rojo pertenecen a los cortes propuestos en este trabajo, dependiente e independiente de la masa estelar respectivamente.

Tabla 6.1: Inventario de definiciones para la selección de galaxias activas y retiradas en el diagrama $sSFR - M_*$. El tiempo de Hubble es denotado con $T_H(z)$.

| ID | Origen | $\log SSFR_T(z)$ | Tipo |
|----|--|--|---------------------------------|
| 1 | Del tipo Pacifci et al. (2016) , fiducial ¹ | $\log \frac{1}{4(T_H(z) - 0.75 Gyr)^{(1-f_{ml})}}$ | (1) - Equivalente al UVJ |
| 2 | Este Trabajo ² | $-0.45 + \alpha \times (\log M/M_\odot - 10) + 1.5 \times \log(1+z) - \log M/M_\odot$ | (2) - Distribución Bimodal |
| 3 | Moustakas et al. (2013) | $-0.49 + 0.65 \times (\log M/M_\odot - 10) + 1.07 \times (z - 0.1) - \log M/M_\odot$ | (2) - Distribución Bimodal |
| 4 | Del tipo Speagle et al. (2014) | $(0.84 - 0.026 \times T_H(z)) \times \log M/M_\odot + 0.11 \times T_H(z) - \log M/M_\odot - 0.706$ | (2) - Desplazamiento en la SFMS |
| 5 | Del tipo Karim et al. (2011) ³ | $\alpha \times (\log M/M_\odot - 10.5) + \beta - \log M/M_\odot - 0.55$ | (2) - Desplazamiento en la SFMS |
| 6 | Del tipo Pearson et al. (2018) ⁴ | $\alpha \times (\log M/M_\odot - 10.5) + \beta - \log M/M_\odot - 0.55$ | (2) - Desplazamiento en la SFMS |

¹ El factor de reciclaje se supone constante con $f_{ml} = 0.4$.

² $\alpha = 0.8 \times (1 + 0.0625 \times z)$.

³ $\alpha = 0.70 - 0.13 \times z$ y $\beta = 0.38 + 1.14 \times z - 0.19 \times z^2$.

⁴ $\alpha = 0.38 + 0.12 \times z$ y $\beta = 1.10 + 0.53 \times \log(0.03 + z)$

en el nacimiento usando el catálogo MPA JHU están mostradas con los isocontornos grises. Las diferentes líneas muestra los cortes con base en nuestro inventario de la Tabla 6.1. En general hemos dividido los criterios de separación en el diagrama $sSFR-M_*$ en 3 grupos:

- Aquellos del tipo (1) y que son equivalentes a separar las galaxias en el diagrama UVJ . En este caso utilizamos una versión ligeramente modificada a la de [Pacifiçi et al. \(2016\)](#), criterio con ID = 1);
- Aquellos del tipo (2) que dividen a la población notando el hecho de que la distribución $sSFR-M_*$ es bimodal. Típicamente la separación es arbitraria y la gran mayoría de los trabajos hacen una separación puramente *visual* sobre los diagramas $sSFR-M_*$ con que cuentan. En este caso hemos propuesto una separación visual con base en nuestras inferencias; por completés comparamos con [Moustakas et al. \(2013\)](#). Estos autores también hicieron una clasificación visual. En este campo son considerados los criterios con ID = 2 y 3;
- Aquellos del tipo (2) también pero donde se produce un desplazamiento constante de la relación promedio de la SFMS. Para esta separación utilizamos tres diferentes ajustes a la SFMS dados en la literatura, donde cada uno depende de las muestras particulares que usan a diferentes z 's, de cómo definen y hacen el ajuste a la SFMS. Supondremos un desplazamiento de 0.55 dex lo cual corresponde al $\sim 97\%$ de la población suponiendo una distribución lognormal con ancho de 0.3 dex. En este campo son considerados los casos con ID = 4, 5 y 6;

cNote que en la Figura 6.3 mostramos el criterio de [Moustakas et al. \(2013\)](#) hasta $z \lesssim 1$ donde es válido (ellos usaron PRIMUS). Una de las primeras conclusiones que obtenemos es que criterios de separación con base en un desplazamiento de la SMFs pueden llevar a encontrar una población no despreciable de galaxias retiradas de masas intermedias y bajas a altos corrimientos al rojo, algo que va en contra de lo que se ha encontrado cuando se utilizan criterios de separabilidad con base a diagramas color ([Peng et al., 2010](#); [Muzzin et al., 2013](#), por citar algunos trabajos). Lo anterior lo cuantificamos en mayor detalle en la Figura 6.4.

La Figura 6.4 muestra las fracciones de galaxias retiradas resultantes desde $z \sim 0.35$ hasta $z \sim 2.75$ para los criterios de la Tabla 6.1, tal y como se indican en las etiquetas. Como adelantábamos, los criterios de separabilidad con base a desplazamientos de la SFMS ([Speagle et al. \(2014\)](#), [Karim et al. \(2011\)](#) y [Pearson et al. \(2018\)](#), que tienen una dependencia con M_*), ID=4,5 y 6, tienden a predecir una población considerable de galaxias retiradas de masas bajas/intermedias que no está sustentado por las observaciones; recordemos que las observaciones muestran que la población de galaxias pasivas/retiradas depende fuertemente de la M_* con una fracción mayor de galaxias de alta masa como pasivas/retiradas a todos los corrimientos al rojo (ver por ejemplo [Faber et al., 2007](#); [Bell et al., 2012](#)). El modelo basado en la SFMS de [Karim et al. \(2011\)](#) da incluso un resultado totalmente opuesto a lo esperado de las observaciones. Los criterios de selección en base a [Pacifiçi et al. \(2016\)](#), ID = 1, y nuestra propuesta,

6. RESULTADOS: EVOLUCIÓN DE LAS SUBPOBLACIONES DE GALAXIAS CON FORMACIÓN ESTELAR ACTIVA Y RETIRADAS

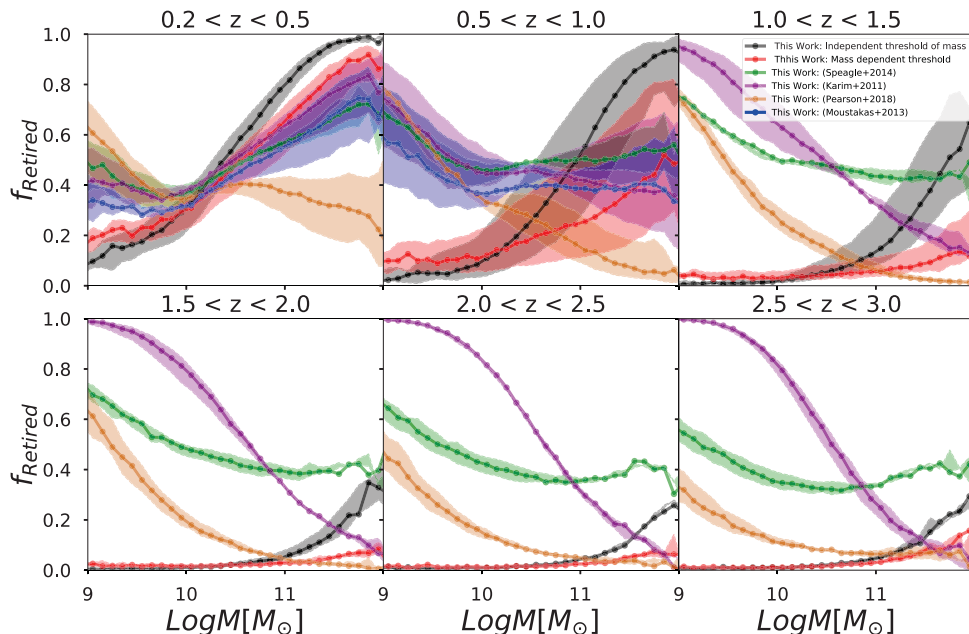


Figura 6.4: Similar a la Figura 6.2 se muestra la fracción de galaxias retiradas predichas por los distintos criterios de selección de la Tabla 6.1 a distintos intervalos de z . Los resultados muestran que, a excepción del los casos ID = 1 y 2 (puntos conectados en color negro y rojo), los demás predicen una alta fracción de galaxias retiradas para galaxias de masa baja e intermedia, con una tendencia a incrementar mientras menor es la masa.

que depende de la M_* con ID = 2, son consistentes con lo que se espera con observaciones a altos corrimientos al rojo. En base nada más a estas tendencias con la masa, tenemos argumentos para rechazar los criterios de separabilidad tipo (2) basados en la SFMS así como el de [Moustakas et al. \(2013\)](#), ID = 3-6. De aquí en adelante usaremos para nuestro estudio de las subpoblaciones de SFGs y RGs los criterios con ID = 1 y ID = 2.

6.3. Evolución Temporal de la población de Activas y Retiradas: Comparación con Determinaciones Observacionales

Utilizando los criterios de galaxias activas y retiradas de la Tabla 6.1 con ID = 1 y ID = 2, podemos contrastar la evolución temporal de ambas componentes contra resultados basados en observaciones, resultados que es importante notar a su vez dependen del criterio que hayan empleado para definir sus galaxias retiradas.

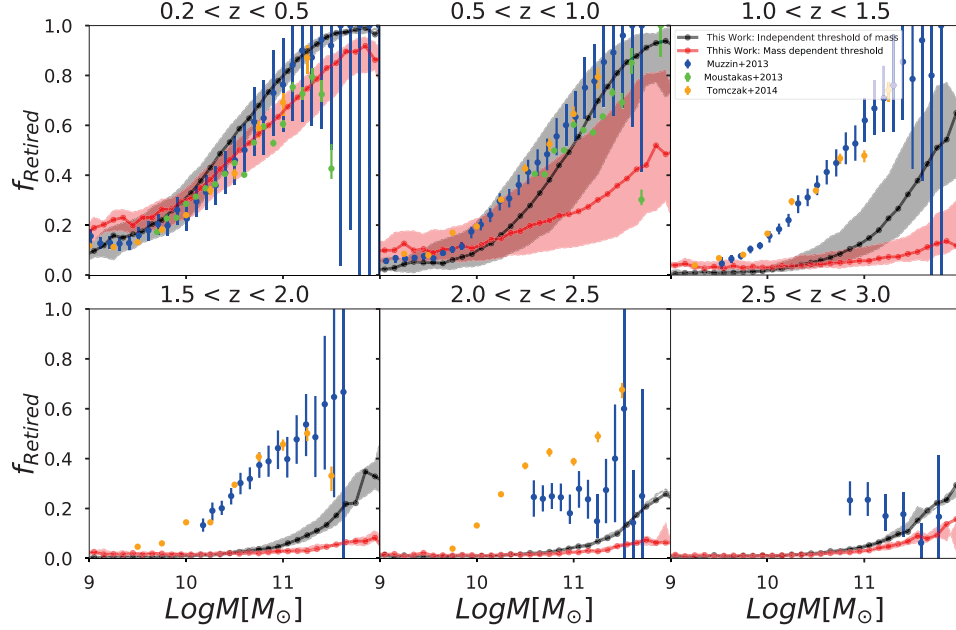


Figura 6.5: Similar a la Figura 6.4, se muestra la fracción de galaxias retiradas predichas por los criterios de selección ID = 1 y 2 y la fracción de galaxias retiradas observadas; [Muzzin et al. \(2013\)](#) (puntos con barras de error en color azul); [Moustakas et al. \(2013\)](#) (puntos con barras de error en color verde); [Tomczak et al. \(2014\)](#) (puntos con barras de error en color naranja). Los resultados muestran que aunque a bajos rangos de z las fracciones de los criterios (1) y (2) parecen estar de acuerdo con las observaciones, rápidamente caen por debajo de las mismas a $z > 1.5$.

La Figura 6.5 muestra nuevamente la fracción de galaxias retiradas utilizando nuestros criterios aceptados de separación tal como se indican en las etiquetas. Contrario a la Figura 6.4, aquí contrastamos contra resultados previos utilizando muestras observacionales a diferentes corrimientos al rojo. Los círculos azules con barras de error muestran la fracción de galaxias retiradas de [Muzzin et al. \(2013\)](#) quien utilizó una muestra completa y seleccionó galaxias retiradas con base en el diagrama UVJ de la muestra del COSMOS/UltraVISTA. Los círculos verdes con barras de error muestran la fracción de galaxias retiradas de [Moustakas et al. \(2013\)](#) quien utilizó la muestra espectroscópica multi-banda PRISM Multi-object Survey (PRIMUS) y el SDSS. Estos autores utilizaron la bimodalidad en el diagrama $SFR-M_*$ como criterio de separabilidad. Finalmente, comparamos con los resultados de [Tomczak et al. \(2014\)](#) quien utiliza la muestra del FourStar Galaxy Evolution Survey (ZFOURGE) y el Cosmic Assembly Near-IR Deep Extragalactic Legacy Survey (CANDELS) para establecer la fracción de galaxias retiradas en diferentes corrimientos al rojo. Al igual que [Muzzin et al. \(2013\)](#), estos autores utilizan el diagrama UVJ . En general nuestro modelo recupera las tendencias observadas, esto es, la fracción de galaxias retiradas va emergiendo con el tiempo y

6. RESULTADOS: EVOLUCIÓN DE LAS SUBPOBLACIONES DE GALAXIAS CON FORMACIÓN ESTELAR ACTIVA Y RETIRADAS

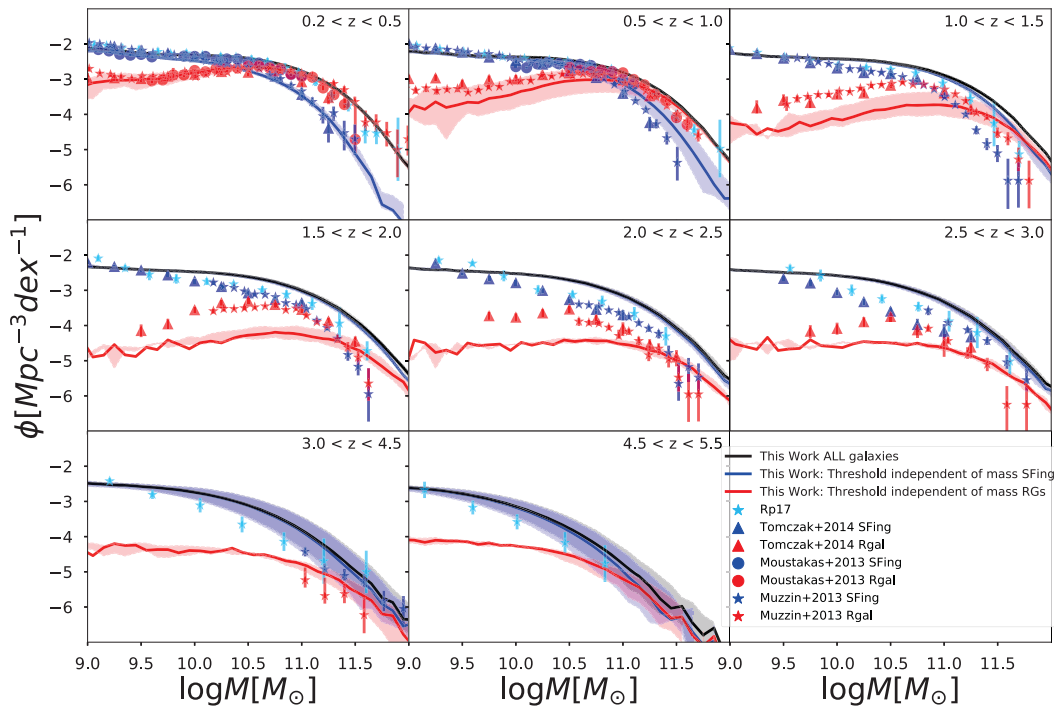


Figura 6.6: Función de masa estelar de galaxias activas (líneas en color azules) y retiradas (líneas en color rojo) mostradas para nuestro criterio de separación fiducial (ID= 1 de la Tab6.1). Los resultados se contrastan con inferencias observacionales de [Muzzin et al. \(2013\)](#) (estrellas en color azul y rojo); [Moustakas et al. \(2013\)](#) (círculos en color azul y rojo); [Tomczak et al. \(2014\)](#) (triángulos en color azul y rojo) y [Rodríguez-Puebla et al. \(2017\)](#) (estrellas en color azul cielo). Los resultados muestran que nuestro catálogo sintético con el criterio fiducial predice una función de galaxias retiradas que decae rápidamente con z , implicando que la masa donde se intersectan las GSMFs de activas y retiradas crece rápidamente después de $z \sim 1$.

ésta emerge mucho más rápido para las galaxias de alta masa. No obstante, el establecimiento de las galaxias retiradas es más rápido en las determinaciones observaciones que en nuestro modelo. Es decir, en nuestro modelo el establecimiento de las galaxias retiradas comienza tardíamente. El modelo con el criterio de separabilidad con base a [Pacifci et al. \(2016\)](#), ID = 1, es el que se acerca más a las observaciones. Recuerde que este criterio es independiente de la M_* y sólo depende del tiempo de Hubble $t_H(z)$. Por tal razón, de aquí en adelante utilizaremos este criterio como nuestro criterio fiducial para distinguir las galaxias activas de la SFMS de las galaxias retiradas. Notese que cualquiera de estos criterios es muy estricto pues separa a las poblaciones sólo en dos grupos.

La Figura 6.6 muestra la Función de Masa Estelar de Galaxias activas (líneas azules), retiradas (líneas rojas) y el total (líneas negras) para nuestro modelo fiducial. En la

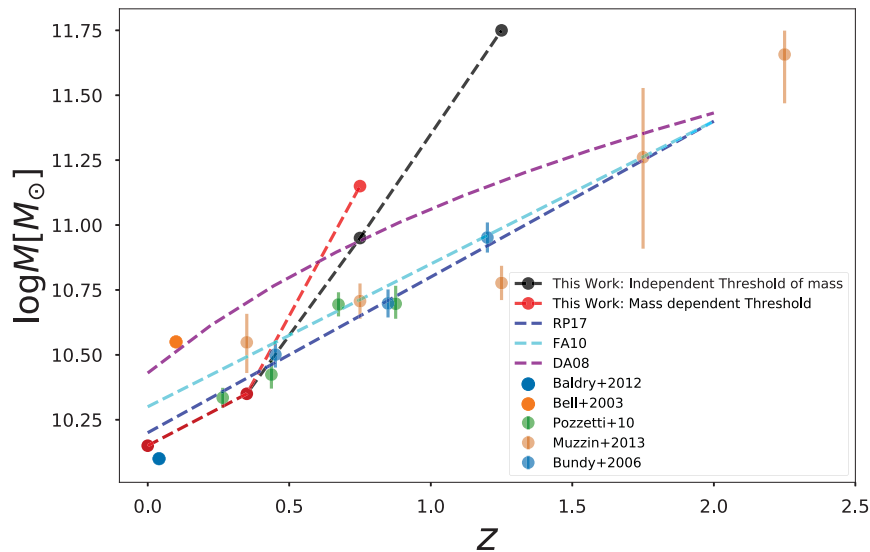


Figura 6.7: Masa estelar a la cual la fracción de galaxias activas/retiradas o azules/rojas es 50%; arriba de esta masa, dominan las galaxias retiradas/rojas, por debajo dominan las activas/azules. Las predicciones usando nuestro criterio de activas/pasivas independiente de la masa (ID=1) están mostrados con círculos negros unidos por una línea sólida, mientras que usando el criterio dependiente de la masa (ID=2), están mostrados con círculos rojos unidos por una línea sólida. Los resultados de de [Bell et al. \(2003\)](#) y [Bundy et al. \(2006\)](#) estan mostrados con los puntos y círculos azules respectivamente. Los resultados de diferentes autores se muestran con diferentes símbolos y líneas (ver recuadro y el texto principal para detalles). En todos los casos es evidente el comportamiento de “downzising” pero nuestras predicciones muestran que la galaxias retiradas emergen relativamente tarde con relación al grueso de las observaciones.

figura comparamos contra las inferencias observacionales de [Muzzin et al. \(2013\)](#) las cuales denotamos con las estrellas rojas y azules, [Moustakas et al. \(2013\)](#) los cuales se muestran con los círculos azules y rojos y [Tomczak et al. \(2014\)](#) que se muestran con los triángulos azules y rojos. Finalmente comparamos con la compilación de [Rodríguez-Puebla et al. \(2017\)](#) para todas las galaxias. Mientras la Figura 6.6 no aporta información extra a la ya concluida en la Figura 6.5, nos muestra que la función de masa estelar de activas y retiradas tiene una forma del tipo Schechter. Además, que la bajas masas la pendiente de la distribución de galaxias activas es mas pronunciada que de las galaxias activas.

Finalmente, la Figura 6.7 muestra la masa estelar a la cual la GSMF de galaxias activas y retiradas son iguales. En otras palabras, la masa a la cual la fracción de galaxias rojas y azules es 50%, M_{50} de aquí en adelante. Las predicciones de nuestro modelo independiente de la masa (criterio ID=1) están mostrados con círculos en color negro unidos por una línea sólida y el modelo dependiente de la masa (criterio 2) mostrados

con círculos en color rojo unidos por una línea sólida . Los Resultados de [Bell et al. \(2003\)](#) con base en el SDSS DR2 son mostrados con puntos en color azul mientras que el resultado de [Bundy et al. \(2006\)](#) obtenidos con datos del DEEP2 estan mostrados con los círculos zules. El resultado de [Drory and Alvarez \(2008\)](#) (DA08) con base en el FORS Deep Field y [Pozzetti et al. \(2010\)](#) con base en COSMOS son mostrados con la línea púrpura segmentada y círculos verdes. Los resultados de [Muzzin et al. \(2013\)](#) son presentados con los círculos cafés mientras que los resultados semi-empíricos de [Firmani and Avila-Reese \(2010\)](#) son mostrados con la línea segmentada azul cielo. Finalmente, un ajuste de M_{50} en función de z a todas a estas observaciones presentado en [Rodríguez-Puebla et al. \(2017\)](#) se muestra con la línea segmentado azul. Note que en cada caso se han usado diferentes criterios para definir galaxias en dos grupos, tanto por su SFR como por su color.

Con nuestro criterio fiducial con base a [Pacifci et al. \(2016\)](#) (ID=1), $M_{50}(z)$ es consistente con previas determinaciones para corrimientos al rojo hasta $z \sim 0.75$, z al cual nuestro modelo comienza a predecir una masa de cruce demasiado alta, evidenciando que existe una escasez de galaxias retiradas, mientras que con nuestro criterio dependiente de la masa (ID=2), es consistente para $z < 0.75$. *La tendencia de apagado “downsizing” es clara en todos los casos, pero en nuestro modelo sintético, como ya se discutió anteriormente, las galaxias retiradas emergen en épocas más tardías que el grueso de las determinaciones observacionales.*

6.4. Evolución de la Secuencia Principal de galaxias activas

En la literatura existen también mediciones a las tasas de formación estelar promedias $\langle \log \text{SFR}(M_*) \rangle$ a diferentes corrimientos al rojo para galaxias con formación estelar activa (SFGs), la así llamada secuencia principal, SFMS (ver Introducción). La Figura 6.8 presenta los promedios $\langle \log \text{SFR}(M_*) \rangle$ y las desviaciones estándar medidos en nuestro catálogo sintético fiducial para las SFGs en seis corrimientos al rojo. Nuevamente, incluimos la compilación de [Rodríguez-Puebla et al. \(2017\)](#) pero en este caso para galaxias de la SFMS. En general, observamos que nuestros modelos recuperan los resultados observacionales. En mayor detalle, observamos que existe una tensión entre nuestros modelos y las observaciones entre los corrimientos al rojo $z \sim 0.75$ y $z \sim 2.25$; nuestros modelos tienden a subestimar las tasas de formación estelar observadas en la SFMS. No obstante hay que considerar las diferencias que pueden haber en estas determinaciones por el sólo criterio que se emplea en cada caso para definir galaxias de la SFMS (ver discusión en las secciones anteriores).

Es posible también que el modelo τ -exponencial con retraso al nacimiento subyacente en la generación de nuestros catálogos a diferentes z no sea del todo correcta para las galaxias activas, teniendo éstas un levantamiento con relación a dicha ley desde $z \sim 2$ hasta ~ 0.7 . No obstante, para llegar a conclusiones de este tipo, hay que establecer

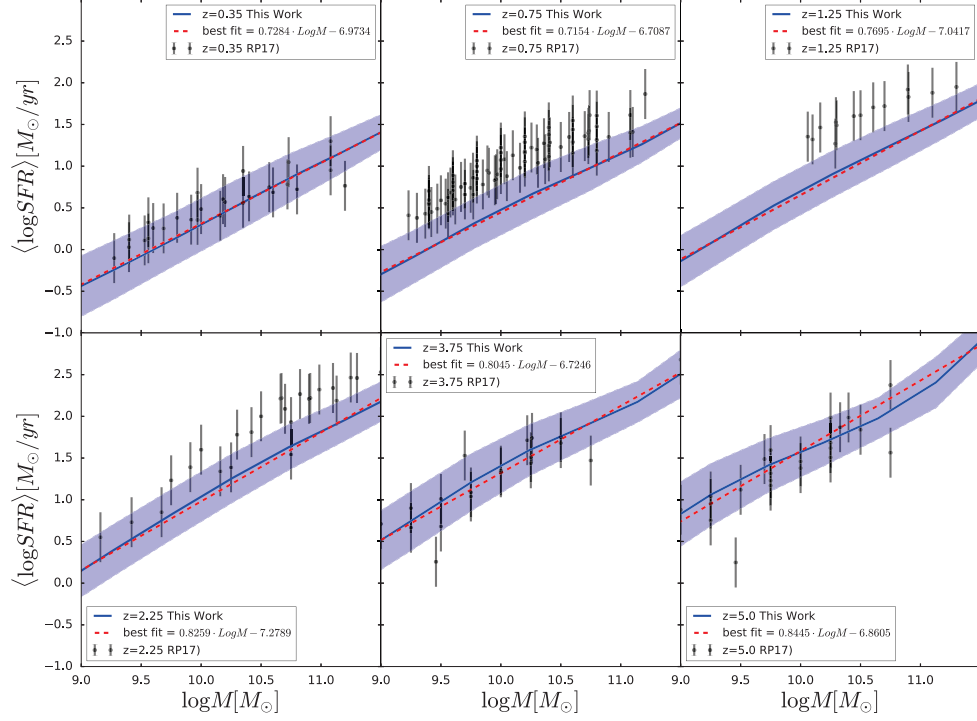


Figura 6.8: Similar a la Figura 5.4, se muestra la tasa de formación estelar en función de la masa estelar solo de galaxias activas (SFMS). Nuestros modelos están mostrados con líneas sólidas y áreas sombreadas en color azul. Los círculos con barras de error en color negro muestran la compilación de Rodríguez-Puebla et al. (2017). Un ajuste a dicha relación fue hecho a cada época mostrado con la línea segmentada en color rojo.

nuestras comparaciones con las observaciones de una manera más precisa, a paridad de criterios de selección de SFGs.

Finalmente, las líneas segmentada-rojas muestran nuestro mejor ajuste a la SFMS, $\langle \log \text{SFR}(M_*) \rangle$. Nuestros ajustes muestran que prácticamente a todos los corrimientos al rojo la relación promedio SFR– M_* de las SFGs se describe utilizando una ley de potencias. Encontramos que la pendiente de nuestra SFMS crece con el corrimiento al rojo: a $z \sim 0.35$ encontramos una pendiente de ~ 0.73 mientras a $z \sim 5$ encontramos una pendiente de ~ 0.84 .

6.5. Historias de Formación Estelar y Masa Estelar Cósmicas de las galaxias Activas y Retiradas

El panel superior de la Figura 6.9 muestra la densidad de SFR cósmica en función de z , $\dot{\rho}_*(z)$, presentada en la Figura 6.9 para el total (línea negra) así como para las galaxias activas en formación estelar y las retiradas *según su clasificación a $z = 0$* , líneas sólidas azul y roja, respectivamente.

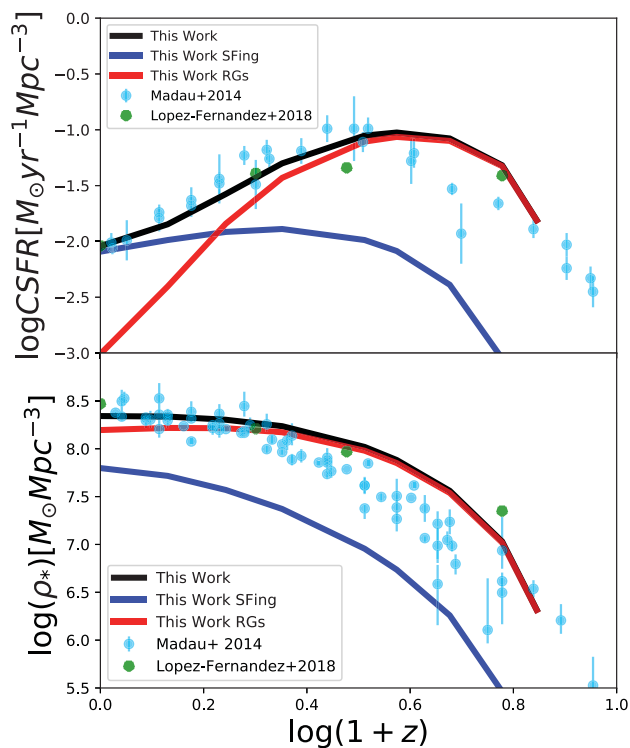


Figura 6.9: Similar a la Figura 5.5, añadiendo las contribuciones de la población de galaxias activas (SFGs, línea sólida azul) y galaxias retiradas (RGs, línea sólida roja) definidas a $z \sim 0$. Los progenitores de las SFGs contribuyeron más a la CSFR hasta $z \sim 0.6$ y en épocas anteriores son los progenitores de las RGs los que más contribuyen a la CSFR, siendo que al pico de esta función y después, dominan por completo. En el caso de la densidad de masa estelar cósmica, son los progenitores de las galaxias consideradas retiradas al día de hoy las que dominan en todas las épocas.

Nuestros resultados muestran que la densidad de SFR cósmica empieza a ser dominada por las galaxias que al día de hoy son clasificadas como retiradas a $z \sim 0.6$ y hacia el pico de $\dot{\rho}_*(z)$, alrededor de $z = 2$, el dominio ya es total. A bajos corrimientos al rojo $z < 0.6$, domina la contribución de las galaxias hoy clasificadas como SFGs. Estos

resultados son de esperarse ya que las galaxias retiradas al día de hoy fueron galaxias activas en el pasado mientras que la mayoría de la formación estelar ahora se encuentra en galaxias jóvenes que son de baja masa y poblan la SFMS.

Finalmente, la Figura 6.9 muestra la historia de la densidad masa estelar cosmica, $\rho_*(z)$, tanto la total presentada en la Figura 6.9, como las correspondientes a SFGs y RGs *definidas a $z = 0$* , líneas sólidas azul y roja, respectivamente. Notese que en este caso el grueso de la densidad de masa estelar a todas las épocas se encuentra en los progenitores de las galaxias retiradas. Según el panel superior, las progenitoras de estas galaxias fueron las que más eficientemente formaban estrellas en el pasado, de tal manera que es de esperar que en ellas es donde más masa estelar se fue acumulando con el tiempo.

6.6. Historias Promedio de Formación Estelar y Crecimiento de Masa

En esta Sección estudiamos las historias de formación estelar (SFHs) promedio para galaxias activas y retiradas (SFGs y REs) *según su clasificación a $z = 0$* . Los promedios se hacen para conjuntos de galaxias de masas definidas a $z = 0$ dentro de intervalos pequeños. Los resultados son presentados en la Figura 6.10 con las líneas azules sólidas mostrando las SFHs promedio de las galaxias activas, mientras que las líneas rojas sólidas muestran lo mismo pero para las galaxias retiradas. Las áreas sombreadas muestran la desviación estándar alrededor las SFHs promedio.

En general, las SFHs promedio de las galaxias activas son muy extendidas, especialmente para galaxias con masas menores a $M_* \sim 4 \times 10^{10} M_\odot$. En el caso de masas menores a $\sim 10^{10} M_\odot$, las SFHs promedio son incluso crecientes al día de hoy. Por otro lado, las SFHs promedio para galaxia con masas mayores a $M_* \sim 4 \times 10^{10} M_\odot$ tienen un pico de formación estelar a épocas tempranas pero no decaen del todo como exponencial como es de esperarse para una ley tipo τ -exponencial; al contrario después de mostrar un decaimiento en algunos casos se observa una subida en la SFH promedio. Lo anterior refleja que existen muchas galaxias jóvenes (con $t_i \gg 0.75\text{Gyrs}$) las cuales, muy probablemente, se encuentran en su fase de formación estelar más activa donde la ley τ -exponencial se comporta más como una ley de potencias, es decir, $\text{SFR}(t) \propto t$. Lo anterior resulta en que las SFHs promedio de las galaxias activas se desvíe de una ley del tipo τ -exponencial.

En el caso de las galaxias retiradas el comportamiento de las SFHs promedio es dramáticamente diferente a las activas. En todos los casos las galaxias retiradas muestran que tuvieron en promedio un pico de formación estelar en épocas muy tempranas $t_p \lesssim 4\text{Gyrs}$. Al contrario de las galaxias activas, la historia de formación estelar promedio de las galaxias retiradas se describe mejor por una ley del tipo τ -exponencial pues están en su mayoría ya en la fase del decrecimiento exponencial.

Los comportamientos anteriores muestran la existencia de un cruce en las SFHs

6. RESULTADOS: EVOLUCIÓN DE LAS SUBPOBLACIONES DE GALAXIAS CON FORMACIÓN ESTELAR ACTIVA Y RETIRADAS

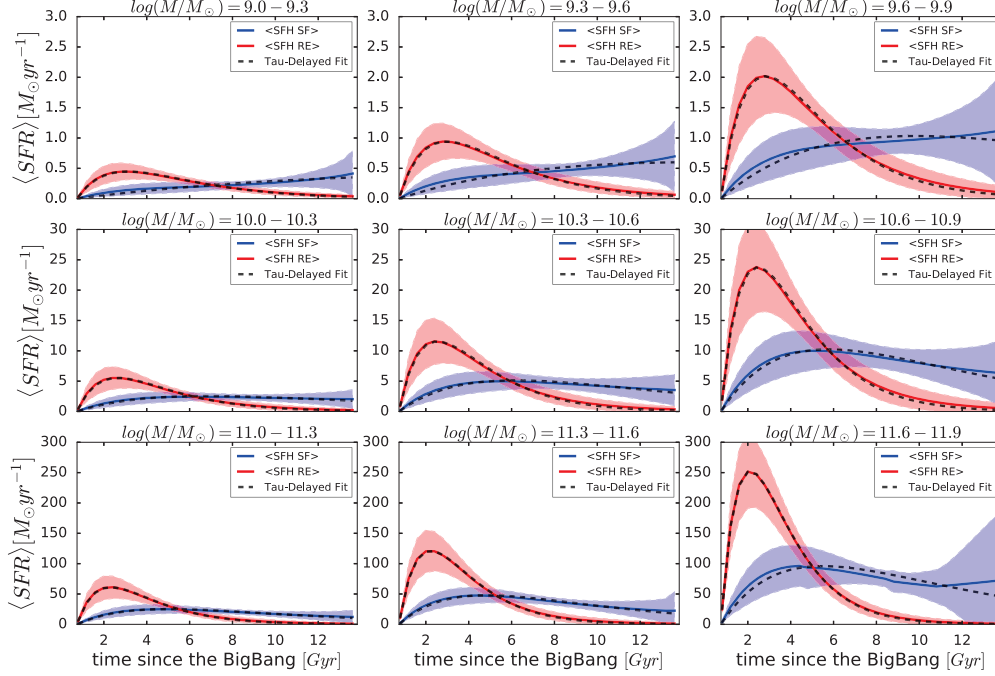


Figura 6.10: Historias de formación estelar promedio correspondientes a los progenitores de galaxias activas (línea sólida azul) y retiradas (línea sólida roja) definidas a $z = 0$ en intervalos de masa pequeños. Las áreas sombreadas delimitan la desviación estándar de todas las posibles historias para un intervalo dado de M_* . Los mejores ajustes de las SFHs promedio a una función τ -exponencial con retraso en nacimiento se muestran con las líneas segmentadas. Las SFHs promedio de las galaxias retiradas se describen bien con esta ley mientras que las SFHs promedio de las galaxias activas no tienen un buen ajuste a dicha ley, para observar en más detalle el acuerdo ver Figura 6.11.

promedio entre galaxias activas y retiradas. La Figura 6.12 muestra las épocas donde se dan estos cruces para los intervalos de masas mostrados en la Figura 6.10. Las SFHs promedio de los progenitores de galaxias activas y retiradas se cruzan más temprano mientras mayor es la masa: $z \sim 1.3$ para los progenitores de galaxias a $z = 0$ con $M_* \sim 5.6 \times 10^{11}$ y $z \sim 0.75$ para los progenitores de galaxias a $z = 0$ con $M_* \sim 3 \times 10^9$. Lo anterior revela que el apagado de las galaxias masivas sucedió en épocas más tempranas que sus contrapartes de baja masa. Puesto de otro modo, las galaxias que hoy en día son retiradas, en promedio, se han apagado más tempranamente mientras más masivas son. Para futuras comparaciones reportamos esta dependencia del corrimiento al rojo con la masa estelar para progenitores a $z = 0$

$$z_{\text{cruce}} = 0.2 \log(M_*/M_{\odot}) - 1.11. \quad (6.1)$$

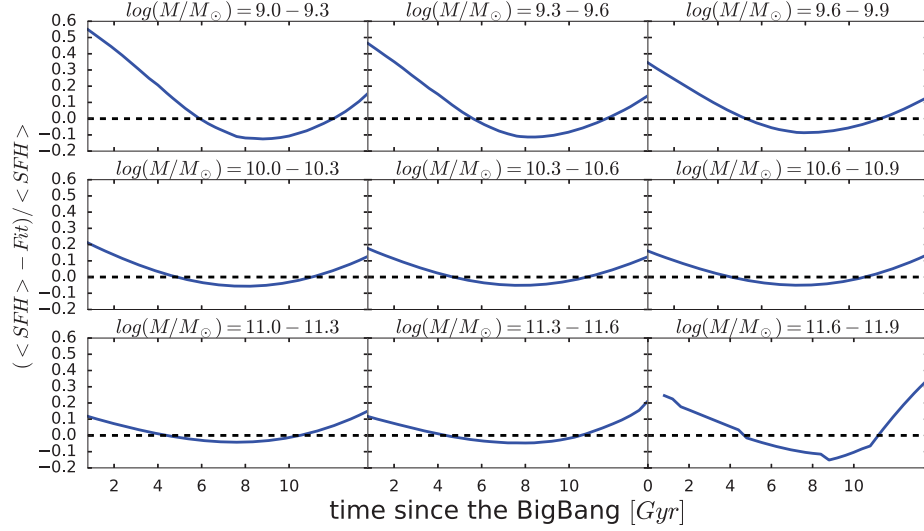


Figura 6.11: Similar a la Figura 5.7, se muestra la diferencia existente entre el $\langle SFH \rangle$ y el mejor ajuste de una ley de tipo τ -Exponencial mostrados en la Figura 6.10 (línea sólida en color azul). Se muestra la diferencia únicamente de las $\langle SFH \rangle$ pertenecientes a las galaxias SFGs, pues es aquí donde existe el peor ajuste.

Obviamente, a nivel demográfico hay que tener en cuenta que las galaxias de baja masa al día de hoy son mayoritariamente activas (SFGs), es decir no sufrieron ningún apagado, más bien ellas muestran una tendencia a haber retrasado el inicio de su formación estelar. Por lo tanto, la dependencia de la ec. (6.1) aplica sólo para las galaxias que al día de hoy son retiradas, una mayoría en el caso de altas masas y una minoría en el caso de bajas masas.

La Figura 6.13 muestra el crecimiento de masa estelar (in-situ) promedio dividido en galaxias activas y retiradas, según su clasificación a $z = 0$, para progenitores a $z = 0$ con masa estelar M_* , respectivamente. Las áreas sombreadas muestran la dispersion alrededor de todas las historias. El crecimiento de masa estelar ha sido renormalizado a su masa observada al día de hoy $M_0 = M_*(z = 0)$. Encontramos que a una masa estelar fija, las galaxias retiradas, en promedio, se han formado antes que las galaxias activas. Por otro lado, las galaxias retiradas de baja masa son en promedio más jóvenes que las galaxias retiradas de alta masa. Lo anterior también es válido para las galaxias activas. Notese que la pérdida de masa observada las historias promedio para todas las galaxias es debido a las galaxias retiradas, véase Figura 5.8.

6. RESULTADOS: EVOLUCIÓN DE LAS SUBPOBLACIONES DE GALAXIAS CON FORMACIÓN ESTELAR ACTIVA Y RETIRADAS

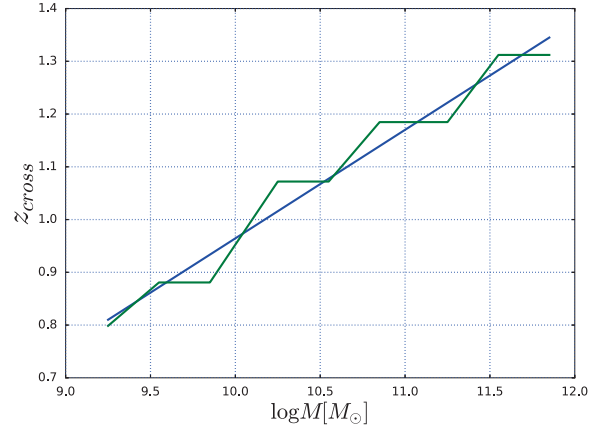


Figura 6.12: Época donde las historias promedio de las galaxias activas y retiradas se cruzan en función de la masa estelar. Esta figura muestra que, en promedio, galaxias de baja masa se están apagando a épocas más tardías que las de baja masa.

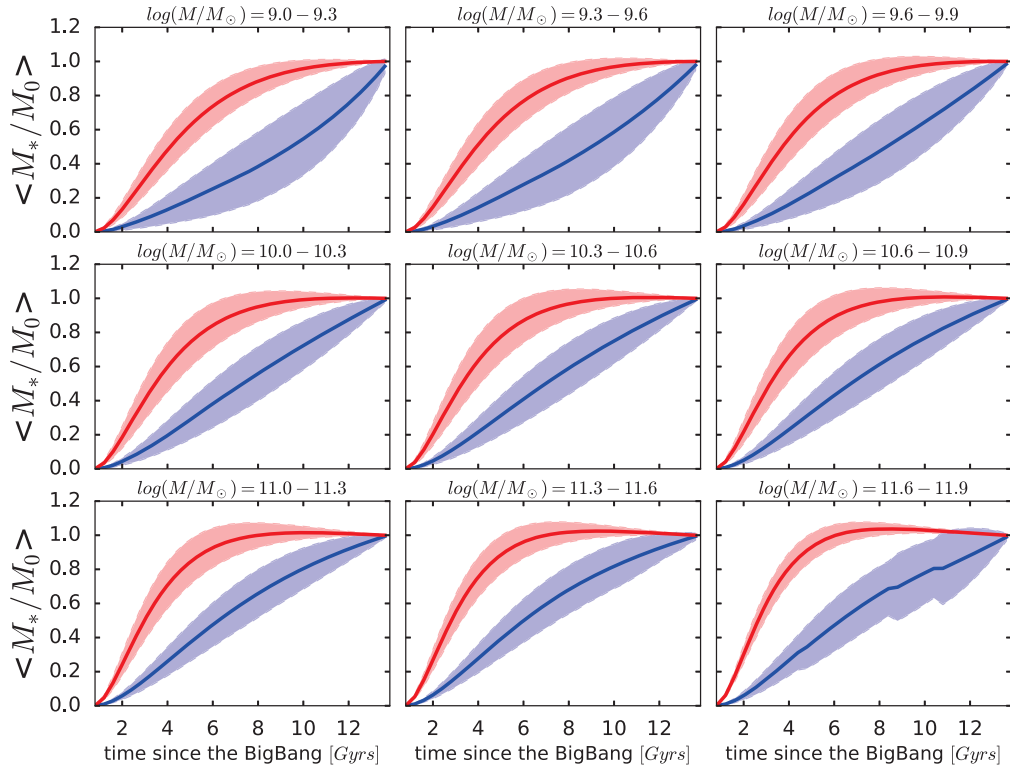


Figura 6.13: Similar a la Figura 5.8 pero para galaxias activas y retiradas según su clasificación a $z = 0$.

Discusión

El enfoque arqueo-demográfico desarrollado en esta Tesis permite explorar las consecuencias de las historias de formación estelar (SFHs) y crecimiento de masa estelar *individuales* de las galaxias sobre las distribuciones demográficas en diferentes épocas y viceversa. Una de las encarnaciones de nuestro enfoque, ampliamente explotado en los Capítulos anteriores, consistió en constreñir los parámetros de leyes sencillas de SFH para una población de $\sim 6 \times 10^5$ galaxias del SDSS usando como restrictores la masa estelar y tasa de formación estelar determinadas para este catastro anteriormente. Hecho esto, fue posible evolucionar hacia atrás la población de galaxias, misma que es completa en volumen desde masas $\sim 3 \times 10^8 M_{\odot}$ localmente.

En este Capítulo discutiremos algunas cuestiones concretas que podemos explorar con los catálogos sintéticos de galaxias que hemos generado a diferentes z 's a partir de la población local de galaxias del SDSS mencionada arriba.

7.1. Criterios de Separación de las Galaxias en Activas y Retiradas Utilizando las Historias Individuales de Formación Estelar

Como se discutió en el Capítulo 6, existe una gran variedad de criterios para separar a las galaxias en una subpoblación asociada a la secuencia de las galaxias con formación estelar activa, SFMS, y en otra subpoblación de galaxias retiradas, RGs. Muchos de estos criterios carecen de un sustento físico o identifican subpoblaciones sin equivalentes en otros criterios. En §6.2 vimos que los criterios de forma general se pueden dividir en dos por su esencia: 1) los que se basan en un proxy de la SFH para evaluar si la galaxia en cuestión está aún activa o ya se apagó, y 2) los que se basan en la demografía observada de las galaxias, donde se busca identificar bimodalidades.

Operacionalmente los criterios más usados han sido justamente los segundos aunque no es claro si esa separación de las galaxias a nivel demográfico en una época dada esté

asociado realmente al estado evolutivo de las galaxias en cuanto a su tasa de formación estelar. Un ejemplo es si la selección por el método color-color, como el BzK o el UVJ (mismo que es un proxy a las SFHs de las galaxias), es equivalente a separar galaxias a partir de la distribución observadas en el diagrama $sSFR-M_*$. Incluso no es claro cómo separar a las galaxias utilizando el diagrama $sSFR-M_*$; algunos métodos se enfocan en resaltar el hecho de que la distribución de galaxias es bimodal mientras que otros se limitan a definir un criterio para distinguir las galaxias que se concentran en la SFMS, ver Tabla 6.1 para un resumen de diferentes criterios. Cualquiera sea el criterio de separabilidad, la principal crítica es que existe un grado de subjetividad muy alto en cada método. De hecho creemos que esta es una discusión que debería ser abordada de manera más seria y sistemática en la comunidad dadas las implicaciones que tiene el resultado de estudiar la evolución por separado de una u otra subpoblación; para discusiones similares véase (Renzini and Peng, 2015). Motivados por la cuestión planteada arriba, en esta Sección explotaremos la esencia arqueo-demográfica de nuestro enfoque el cual nos permite explorar la conexión que hay (o no hay) entre un criterio basado en las SFHs en sí de las galaxias y los basados en proxies a esas SFHs o en la demografía de las galaxias.

Al contar nosotros con las SFHs individuales de cada galaxia de nuestra población (la del SDSS), podemos definir una época particular donde es evidente que la galaxia está en franco proceso de apagado. La Figura 7.1 muestra la historia de formación estelar de una de las galaxias del catálogo para el modelo τ -exponencial. En la misma figura resaltamos varias épocas que son claves durante el crecimiento de la galaxia y que enlistamos a continuación:

1. El tiempo al cual ocurre el máximo de formación estelar SFR_{peak} . Este tiempo es inferido al resolver la ecuación $dSFR/dt(t_{\text{peak}}) = 0$ y es igual a $t_{\text{peak}} = \tau + t_i$.
2. El tiempo en el cual la velocidad del crecimiento de la SFR alcanza un máximo (punto de inflexión). Este tiempo se encuentra al resolver la ecuación $d^2SFR/dt^2 = 0$ y es igual a $t_{\text{max,growth}} = 2\tau + t_i$.
3. El tiempo al cual la tasa de formación estelar ha decrecido un factor β de la SFR_{peak} . Este tiempo se encuentra de resolver la ecuación $xe^{1-x} = 1/\beta$, donde $x = (t - t_i)/\tau$. Para el caso de $\beta = 2$, $t_{1/2} \approx 2.675\tau + t_i$. Para el caso de $\beta = e$, $t_{1/e} \approx 3.15\tau + t_i$.

Consideremos que una galaxia está en proceso de franco apagado (retirada) cuando su SFR decreció ya un factor 2 con relación al máximo. Aplicando este criterio físico a cada una de las galaxias de nuestro catálogo sintético basado en el SDSS, definiremos galaxias retiradas y galaxias con SFR activa a cada época (en realidad, una vez que la SFH de una dada galaxia cayó por debajo del criterio, será en todas la épocas siguientes ya retirada). La Figura 7.2 muestra la evolución de la función de masa estelar, GSMF, de las galaxias activas y retiradas así definidas en intervalos de z anchos (las envolventes de la áreas sombreadas dan cuenta de los z extremos de los intervalos). En la misma figura incluimos los datos observacionales descritos en la Figura 6.6 para una comparación; note

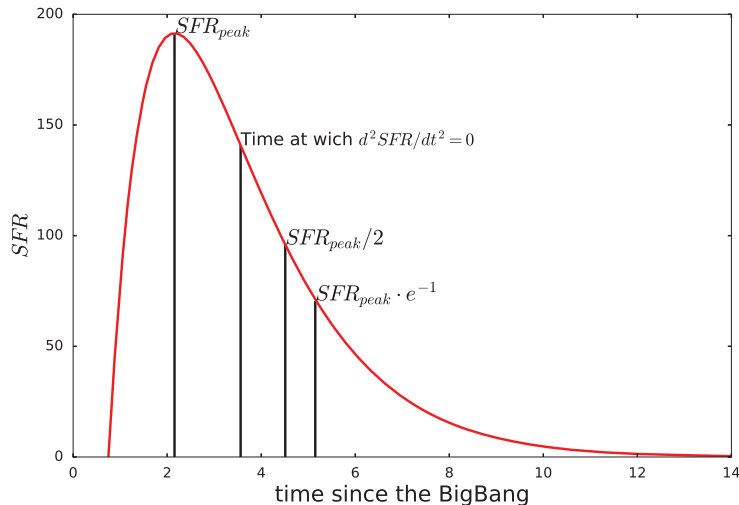


Figura 7.1: Historia de formación estelar de una galaxia con la ley τ -exponencial. Se muestran diferentes épocas claves que pueden ser asociadas con el apagado de la galaxia: SFR_{peak} , el tiempo al cual se alcanza el máximo de formación estelar; el tiempo de inflexión cuando $d^2SFR/dt^2 = 0$; $SFR_{peak}/2$, el tiempo al cual la SFR ha decrecido un factor 2 de la SFR_{peak} ; y $SFR_{peak} \cdot e^{-1}$ el tiempo al cual la SFR ha decrecido un factor e de la SFR_{peak} .

que en cada una de las muestras observacionales criterios muy distintos de separación han sido usados.

El criterio *bien definido* de apagado que hemos podido aplicar a cada galaxia *individualmente*, separa claramente a la población de galaxias en la GSMF en RGs (línea roja) y SFGs (línea azul) hasta $z \sim 1.5$, con la tendencia esperada: a medida que z decrece, el dominio de las RGs se va incrementando hacia masas cada vez menores. Se observa que la población de RGs desaparece a $z > 1.5$ de manera abrupta. Algo similar se observaba en el caso de imponer un criterio de separación global (por ej. una sSFR umbral en cada época), no obstante, como se demostró en §§6.1, cuando introducimos un error aleatorio observacional en la masa y SFR dependiente de z a fin de emular a las observaciones, dicha transición abrupta desaparece.

Los resultado arriba discutidos se muestran de manera más explícita en la Figura 7.3 donde presentamos la fracción de galaxias retiradas en función de M_* para diferentes corrimientos al rojo. Estas fracciones predichas con el criterio de separación aplicado individualmente pueden compararse con las fracciones predichas usando un criterio global de separación sobre toda la población (como se hace observacionalmente), por ejemplo, el de una sSFR umbral en cada época (criterio ID = 1 de la Tabla 6.1). Las líneas negras y áreas sombreadas corresponde a dicho criterio. Para que la comparación sea justa, en este caso no se toman en cuenta las incertidumbres observacionales, tal como se mostró en la Figura 6.2 con líneas rojas y áreas rojas¹. Esta comparación muestra

¹Recuerde que en §§6.1 mostramos que la convolución con los errores observacionales trabaja en la

7. DISCUSIÓN

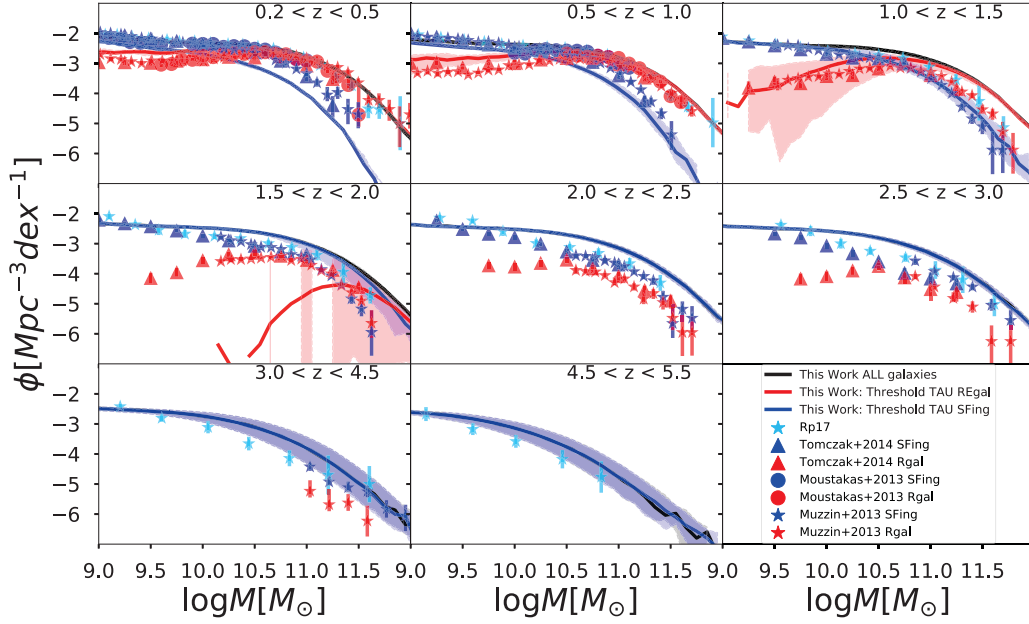


Figura 7.2: Similar a la Figura 6.6, mostrando la evolución de GSMF de galaxias activas y retiradas utilizando como criterio de separación el tiempo al cual la tasa de formación estelar a decrecido en un factor 2 de la SFR_{peak} . Los resultados muestran que para $z < 1$, esta nueva definición es consistente con determinaciones previas de GSMF's de galaxias activas y retiradas, no obstante, la GSMF de galaxias retiradas desaparece rápidamente a $z > 1$. Note que en esta figura no se tomaron en cuenta los errores aleatorios en M_* y SFR que tienden a aumentar la fracción de galaxias retiradas a altos z en mejor acuerdo con las observaciones.

que hay cierta diferencia sistemática en la fracción de retiradas usando el criterio global de separación que se aplica sobre las galaxias observadas y el criterio físico aplicado individualmente a cada galaxia. Estas diferencias se pueden disminuir subiendo la sSFR umbral en el criterio global o bajando el valor de la SFR individual donde se declara retirada a la galaxia ($\beta = e$ en vez de $\beta = 2$, por ej.).

La Figura 7.4 va un paso más allá y muestra las relaciones sSFR– M_* para las galaxias declaradas como activas y retiradas de acuerdo al criterio sobre las SFHs individuales; las áreas sombreadas indican la desviación estándar. Hacia z bajos se puede ver que se da una segregación, al menos al nivel de 1σ , de tal manera que un criterio global de separación puede ser aplicado, como es el caso de las líneas verde y negra que se pintan a cada época. No obstante, hacia z 's más altos, la bimodalidad tiende a esfumarse. Esto es porque, más hacia el pasado, las galaxias que hoy en día son claramente retiradas estaban apenas un poco después de sus 'épocas de transición, con valores de SFR y M_* similares a los de las galaxias clasificadas como activas (SFMS), mezclándose con ellas

dirección de aumentar la fracción de RGs a altos z así y por ende a hacer menos evidente la desaparición abrupta de esta subpoblación (líneas negras y áreas grises en la Fig. 6.2).

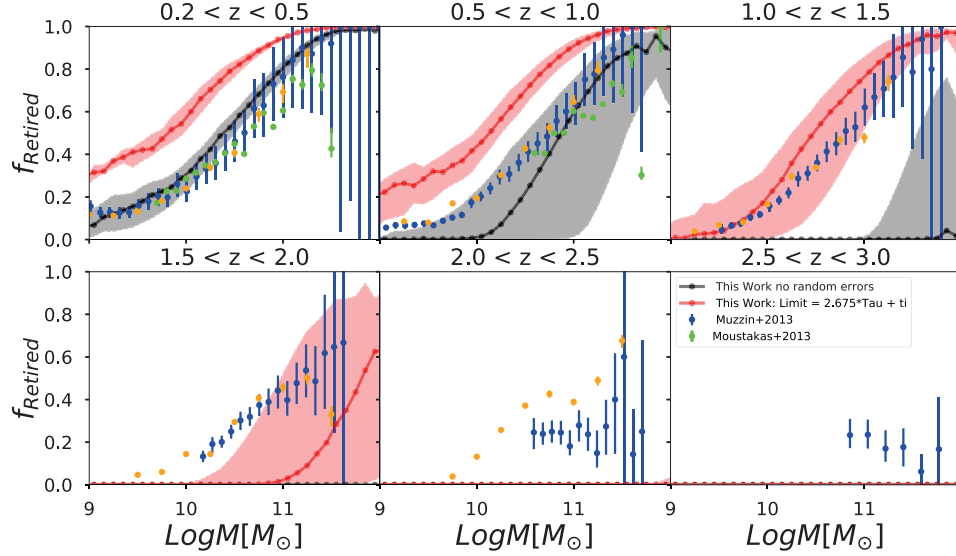


Figura 7.3: Fracción de galaxias retiradas en función de M_* y a diferentes z 's predicha usando el criterio de una SFR igual o menor a $SFR_{peak}/2$ para declarar retirada a la galaxia en base a su SFH individual (puntos rojos conectados con una línea sólida; los extremos de las áreas sombreadas corresponden a los extremos del intervalo dado de z 's). Se compara con las fracciones reportadas en la Figura 6.5 donde se usó un criterio global de umbral en la sSFR independiente de la masa (criterio ID=1; puntos en color negro unido con líneas sólidas). Para que la comparación sea justa, en el segundo caso no se introdujeron errores observacionales en las masas y SFR (puntos y líneas rojas en la Fig. 6.5). Por lo tanto la comparación con las observaciones en este caso no es del todo correcta.

en el diagrama sSFR- M_* . Tiene que pasar mucho tiempo para que la subpoblación de galaxias retiradas se segregue notablemente de la SFMS.

En conclusión, nuestros experimentos muestran que aplicar criterios globales de separación de las galaxias en retiradas y activas (SFMS) puede ser válido hacia z 's bajos, cuando se ha establecido una clara bimodalidad. Hacia épocas más en el pasado, estos criterios, a la luz de lo que individualmente está pasando con cada galaxia, no son muy adecuados ya que la bimodalidad desaparece y las retiradas, cada vez más escasas, tienden a estar muy cerca de la SFMS (apenas salieron de esta secuencia, habiendo incluso pasado anteriormente por una fase arriba de la misma en muchos casos).

7.2. Fusiones y apagado rápido de las galaxias retiradas

En la Sección previa, aplicando un criterio de tiempo de apagado sobre las SFHs individuales de las galaxias (cuando su SFR decrece un factor 2 con relación al pico de SFR) observamos que aunque aparecen ya galaxias que podemos clasificar como retiradas a $z \sim 2$, ellas permanecen un buen tiempo aún en la misma región de la SFMS

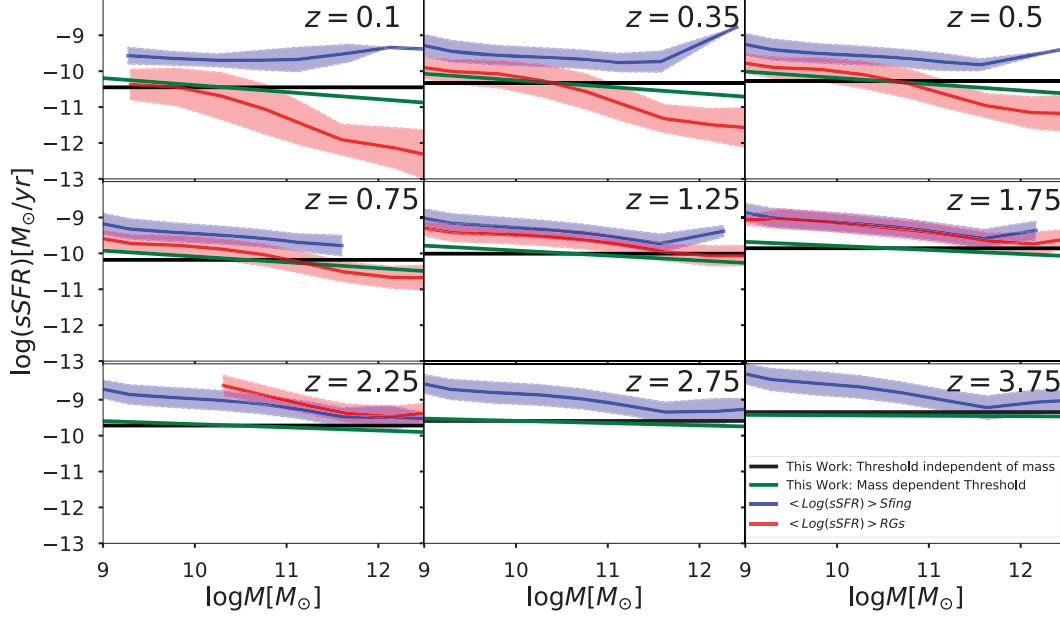


Figura 7.4: Promedio de la sSFR de galaxias con formación estelar activa (línea sólida azul) y de galaxias retiradas (línea sólida roja) desde $z=0.1$ a $z=3.75$, clasificadas bajo el nuevo criterio individual donde la SFR decrece un factor 2 de la SFR_{pico} , el área sombreada corresponde a la desviación estándar.

en el diagrama $\text{sSFR}-M_*$ (ver Fig. 7.4). Hemos experimentado con otros criterios individuales de retiradas listados en la Sección previa y observamos el mismo resultado de manera sistemática: la bimodalidad aparece relativamente tarde y de manera abrupta (ver Fig. 6.3) o, lo que es lo mismo, la subpoblación de galaxias retiradas se establece tardíamente y de manera rápida. Esto se observaba también usando los criterios de separación globales, en particular nuestro criterio fiducial basado en una sSFR umbral y motivado por trabajos que tratan de restringir las historias de formación estelar utilizando la fotometría de las galaxias (Pacifci et al., 2016). Esto nos lleva a pensar que, aunque existe una fuerte incertidumbre en como definir galaxias de la SFMS y galaxias retiradas tal como se discutió en la Sección previa, nuestro modelo empírico que supone una SFH universal para todas las galaxias observadas del SDSS, la τ -exponencial con retraso en el nacimiento, enfrenta un problema sistemático con relación a las observaciones. A nivel general, este modelo empírico ha mostrado consistencia con la demografía de las galaxias observadas hasta $z \sim 4$ (Capítulo 5), pero a nivel de la bimodalidad y surgimiento de una secuencia de galaxias retiradas, sufre del problema mencionado.

Las razones detrás del posible problema pueden ser varias. Una de ellas, y que debemos considerar, es el rol de las fusiones secas en la historia de crecimiento de masa de las galaxias. Recordemos que en este trabajo hemos ignorado el rol de ellas y hemos tratado de explicar todo el tiempo que la evolución de la función de masa estelar de

galaxias mediante formación estelar in situ. Obviamente esto no es del todo cierto ya que existen numerosos ejemplos de galaxias colisionando, así como numerosos trabajos que estiman la tasa de fusiones de galaxias en función de sus masas y a diferentes corrimientos al rojo. El consenso es que las fusiones secas han afectado más la historia de crecimiento de masa de las galaxias más masivas mientras que galaxias intermedias y de baja masa posiblemente no han sido muy afectadas por este canal de crecimiento de masa.

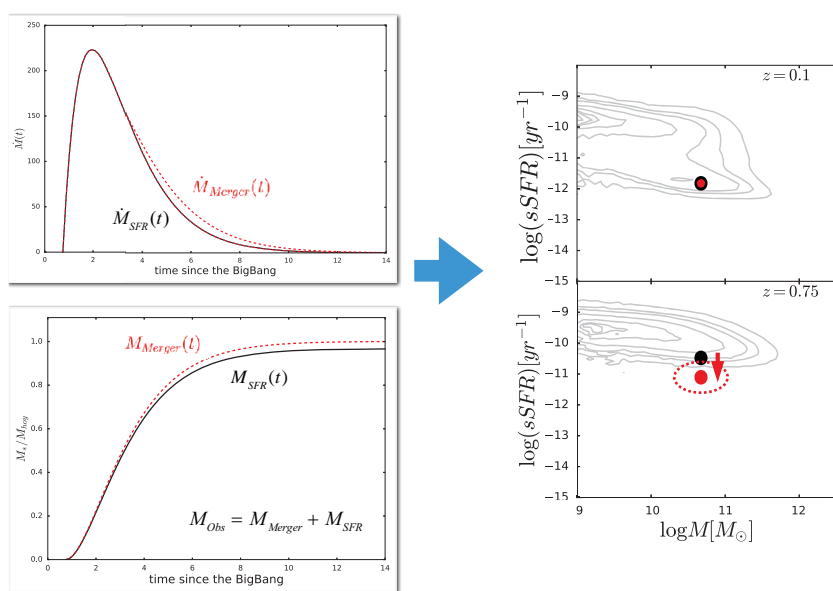


Figura 7.5: Esquema del efecto de introducir en el modelo fusiones secas. Del lado izquierdo se muestra la SFH de una galaxia escogida aleatoriamente (línea sólida en color negro), y su correspondiente ensamblaje de masa. La ley de tipo τ -Exponencial es ajustada ahora a una masa menor a la observada, pues la masa restante es la que se considera que se introdujo vía mecanismo de fusiones (línea subrayada en color rojo). Esto provoca que la SFH de pura formación estelar sea menor a la SFH_{Merger} , del lado derecho se muestra el efecto en el diagrama $sSFR-M_*$ en dos épocas, $z = 0.1$ y $z = 0.75$; con gris se muestra la bimodalidad predicha con un modelo sin considerar fusión de galaxias, y el punto negro ejemplifica la posición que esta galaxia hipotética tendría en dicho plano. Debido a que $sSFR = SFR/M_*$, una SFR menor hará que el valor de la $sSFR$ también lo sea; esto es precisamente lo que provocaría que la galaxia bajara en $sSFR$ en un modelo con fusiones secas, como se ejemplifica con el punto rojo, siendo la misma galaxia pero esta vez bajo un modelo de fusiones.

Ciertamente, la inclusion de fusiones secas en nuestro esquema podría ayudar a modificar las historias de formación estelar que restringimos para nuestras galaxias en la dirección que ayuda a establecer una subpoblación de galaxias retiradas de manera más

definida y temprana. Nuestro enfoque podría ser reformulado al pensar que la historia de crecimiento de una galaxia está compuesta por la formación estelar in situ y por fusiones. Partimos entonces de que sólo una fracción de la masa observada creció por SF in situ y la otra por fusiones. Para esa masa, M_{SFR} , y la SFR observada resolvemos los parámetros de la ley de SFH usada (τ -exponencial con retraso). Conociendo de alguna manera la historia de crecimiento de masa por fusiones, la sumamos a la historia de crecimiento por SF in situ y tenemos así la masa estelar total a cada z . La Figura 7.5 ejemplifica cómo funciona esta propuesta en el diagrama sSFR- M_* en dos épocas. Ciertamente ayuda a establecer la región de retiradas más temprano, creando una bimodalidad más pronunciada, aunque se requeriría de un rol importante de las fusiones para poder tener un efecto significativo.

La cuestión es cuánto son importantes las fusiones en el crecimiento de masa de las galaxias cuando se estudia a la población de las galaxias en conjunto. Por ejemplo, en el caso de la función estelar de masa, todavía no es claro. Existen trabajos preliminares que indican que el rol de las fusiones quizás sea marginal. Trabajos donde se han combinado la evolución de la función de masa estelar y las tasas de formación estelar con el crecimiento de los halos de materia oscura, donde se puede establecer de manera precisa el espectro de colisiones de galaxias (Rodríguez-Puebla et al., 2017) han mostrado que las fusiones secas son más relevantes a épocas tardías $z \lesssim 1$ y a lo más llegan a contribuir hasta un $\sim 40\%$ de la masa total en las galaxias más masivas y del tipo elípticas. Además, estos trabajos muestran que la gran mayoría de estas fusiones vienen en forma de fusiones menores a todas las épocas (ver por ejemplo Rodríguez-Puebla et al., 2017). Lo anterior es consistente con simulaciones hidrodinámicas cosmológicas donde se puede estudiar esto en mayor detalle y por tipo de galaxias (ver por ejemplo, Rodríguez-Gomez et al., 2016).

Por lo mencionado, consideramos que la inclusión de las fusiones secas no tendrá efectos notables en nuestros resultados, manteniéndose entonces el problema del surgimiento muy tardío y abrupto de la secuencia de galaxias retiradas. Posiblemente nuestros resultados están sugiriendo enfáticamente que la SFH de las galaxias retiradas al día de hoy no responde a la ley universal τ -exponencial con retraso que funciona muy bien para las galaxias activas de la SFMS. Podemos implementar la siguiente propuesta: las galaxias retiradas tuvieron una ley de SFH similar a las galaxias activas (de hecho muy en el pasado eran galaxias muy activas en formar estrellas) pero luego a partir de cierto tiempo de apagado t_Q sufren un proceso de decrecimiento de su SFR mucho más rápido que el de la ley τ -exponencial. Para implementar esto en nuestro esquema, la idea es que esta nueva ley de SFH de las galaxias retiradas debe dar siempre la masa y SFR observadas en el catálogo del SDSS usado. El efecto de esta propuesta en el diagrama sSFR- M_* lo mostramos esquemáticamente en la Figura 7.6. Claramente funciona en la dirección de establecer una bimodalidad más temprano (dependiendo de los t_Q asignados) y más pronunciada pues tanto la SFR es menor después del apagado como la M_* mayor (se tuvo que acumular más masa temprano) haciendo que la galaxia se desplace en el diagrama sSFR- M_* abajo y a la derecha, contribuyendo a establecer una bimodalidad temprana. Un proceso de apagado rápido de las galaxias que luego se retiran

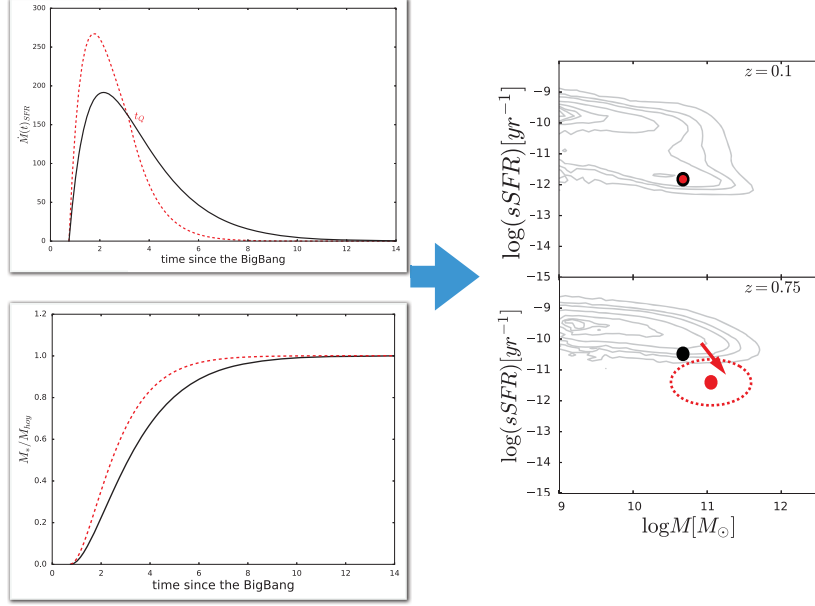


Figura 7.6: Esquema del efecto de modificar las SFHs de las galaxias retiradas, introduciendo un proceso de decrecimiento de la SFR más rápido que la ley τ -exponencial usada a partir de un tiempo de apagado t_Q . Del lado izquierdo se muestra una SFH de una galaxia dada de nuestro catálogo (línea sólida en color negro), mientras que al introducir un tiempo de apagado esta ley debe decrecer con mucha mayor velocidad, pero integrando la misma masa observada y teniendo la misma SFR observada. El efecto nuevamente se muestra en el lado derecho, en donde esta vez la SFH de la galaxia con un tiempo de apagado estará por abajo de aquella sin tiempo de apagado mayor tiempo y con mayor impacto que en el caso de fusión de galaxias, mas aún, la historia de ensamblaje de masa estará por arriba, logrando un doble efecto en la $sSFR = SFR/M_*$, logrando que la galaxia hipotética (punto negro en color negro) se desplace en el plano $sSFR - M_*$ a una masa mayor y una menor SFR a z 's más altos, creando una bimodalidad más definida.

parece ser inevitable si es que a nivel demográfico se confirma el surgimiento de una bimodalidad a altos z , bimodalidad que paulatinamente se incrementa.

7.3. El Método Estadístico: Comentarios Sobre la Ecuación de Continuidad de la GSMF

Como ya se mencionó en el capítulo 1, en la literatura, frecuentemente se ha intentado conectar la evolución de la función de masa estelar de las galaxias (GSMF) con la relación estrecha que surge en el diagrama $SFR - M_*$ observada a diferentes corri-

mientos al rojo (Bell et al., 2007; Drory and Alvarez, 2008; Peng et al., 2010; Papovich et al., 2011; Leja et al., 2015; Steinhardt et al., 2017). Tradicionalmente, esta conexión se ha estudiado suponiendo que *todas* las galaxias han evolucionando alrededor de una relación promedio de SFR– M_* , de tal suerte que la población total de galaxias puede ser totalmente descrita a través de una ecuación de continuidad, (Ecuación 1.3, Drory and Alvarez, 2008):

$$\frac{\partial \Phi(M_*, t)}{\partial t} \Big|_{\text{SFR}} = - \frac{\partial}{\partial M_*} [\Phi(M_*, t) \dot{M}_*(M_*, t)] \quad (7.1)$$

$$\frac{\partial \Phi(M_*, t)}{\partial t} = \frac{\partial \Phi(M_*, t)}{\partial t} \Big|_{\text{SFR}} + \frac{\partial \Phi(M_*, t)}{\partial t} \Big|_{\text{Merger}}, \quad (7.2)$$

donde $\dot{M}_*(M_*, t)$ es la SFR de una galaxia de masa M_* al tiempo t , como se discutió en el Capítulo 1.

Utilizando este enfoque de integración de la SFMS, trabajos previos han mostrado que existe una tensión entre la evolución observada entre las GSMF y las evolución observada de la relación SFR– M_* para galaxias de la SFMS encontrando, generalmente, que existe una sobre abundancia de galaxias de baja masa (ver más detalles en la Introducción). Aunque diferentes soluciones se ha ofrecido para explicar porqué no vemos esas galaxias, una de las más populares se encuentran en argumentar que las fusiones entre galaxias pudieron jugar un papel relevante especialmente fusiones de galaxias de baja masa con aquellas de alta (Drory and Alvarez, 2008; Steinhardt et al., 2017). Por otro lado, existen trabajos que argumentan que esto en realidad refleja nuestra ignorancia de la relación SFR– M_* a bajas masas y que han cuestionado que la relación SFR– M_* no es una ley de potencias como tradicionalmente se ha clamado (Leja et al., 2015). En esta dirección existen trabajos recientes que muestran un cambio de pendiente en la relación SFR– M_* a bajas masas (Whitaker et al., 2014), no obstante este cambio de pendiente no es del tipo requerido para reconciliar la GSMF y la relación promedio SFR– M_* .

En nuestra aportación al tema argumentamos que la suposición de que todas las galaxias han evolucionando alrededor de una relación promedio de SFR– M_* es un posible origen del problema. Podemos imaginar por ejemplo, que las galaxias que se encuentren en la relación promedio SFR– M_* a $z \sim 0$ se pueden encontrar fuera de la relación promedio a otros corrimientos al rojo. Más aún, el hecho de que las historias promedio de las galaxias no se ajusten del todo a una ley τ –exponencial, a pesar de que se ha utilizado como punto de partida, y en especial para las galaxias de la SFMS, sugiere que la mencionada suposición es incorrecta. En este trabajo estamos en una posición única para poner a prueba la hipótesis mencionada arriba debido a que hemos derivado historias de formación estelar individuales a partir de las cuales hemos derivado la evolución de la GSMF y la relación promedio SFR– M_* .

Para estudiar lo anterior procederemos de manera similar a trabajos previos, pero utilizando en todo momento las predicciones de este trabajo. Primeramente supondremos que la relación promedio $\langle \log \text{SFR} \rangle (M_*)$ es una ley de potencias, lo cual es una

buena aproximación al estudiar la Figura 6.8;

$$\langle \log \text{SFR} \rangle (M_*) = \alpha(z) \times \log M_* + \beta(z), \quad (7.3)$$

donde $\alpha(z)$ y $\beta(z)$ son funciones del corrimiento al rojo z . Las funciones que mejor describen estos parámetros estan dados por:

$$\alpha(z) = (0.0226 \pm 0.006) \times z + (0.7341 \pm 0.0156), \quad (7.4)$$

y

$$\beta(z) = (0.0612 \pm 0.0594) \times z - (7.1193 \pm 0.1529). \quad (7.5)$$

El siguiente paso es ajustar le evolución temporal de la función de masa estelar de galaxias. Para esto hemos encontrado que una función Schechter es suficiente para describir su evolución dada por

$$\Phi(M_*) = \phi^* \left(\frac{M_*}{\mathcal{M}} \right)^\alpha \exp \left(- \frac{M_*}{\mathcal{M}} \right), \quad (7.6)$$

donde ϕ^* es la normalización, α es la pendiente a bajas masas y \mathcal{M} es la masa de transición a la cual la GSMF decrece exponencialmente. Todos los parámetros depende del corrimiento al rojo z . Las funciones que mejor describen estos parámetros son

$$\log \phi^*(z) = -2.786_{-0.016}^{+0.015} - (2.110_{-0.208}^{+0.220} \log(1+z))^{1.658_{-0.141}^{+0.138}}, \quad (7.7)$$

$$\alpha(z) = -1.278_{-0.008}^{+0.008} - (0.754_{-0.08}^{+0.084} \log(1+z))^{2.027_{-0.270}^{+0.242}}, \quad (7.8)$$

y

$$\log \mathcal{M}(z) = 11.043_{-0.008}^{+0.008} - (1.676_{-0.143}^{+0.120} \log(1+z))^{5.697_{-0.645}^{+0.474}}. \quad (7.9)$$

Para resolver la ecuación de continuidad 1.3 ignoramos las fusiones entre galaxias. Recuerde que en gran parte de este trabajo hemos ignorado este canal de crecimiento de las galaxias y hemos mostrado en general esta aproximación es capaz de reproducir la demografía de las galaxias a otros corrimientos al rojo. Por lo anterior, la ecuación de continuidad se simplifica a:

$$\frac{\partial \Phi(M_*, t)}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial M_*} [\Phi(M_*, t) \dot{M}_*(M_*, t)], \quad (7.10)$$

la cual es una ecuación fácilmente tratable. Notase que en la ecuación de continuidad aparece la variable $\dot{M}_*(M_*, t)$ no obstante su relación con la SFR es $\text{SFR} = \dot{M}_*/(1-f_{\text{ml}})$. Para resolver la ecuación anterior, tomamos como condición inicial la función de masa

7. DISCUSIÓN

estelar a $z = 5$ y utilizando nuestros ajustes a la SFMS promedio podemos hacer predicciones de la función de masa estelar (GSMF) a otros corrimientos al rojo.

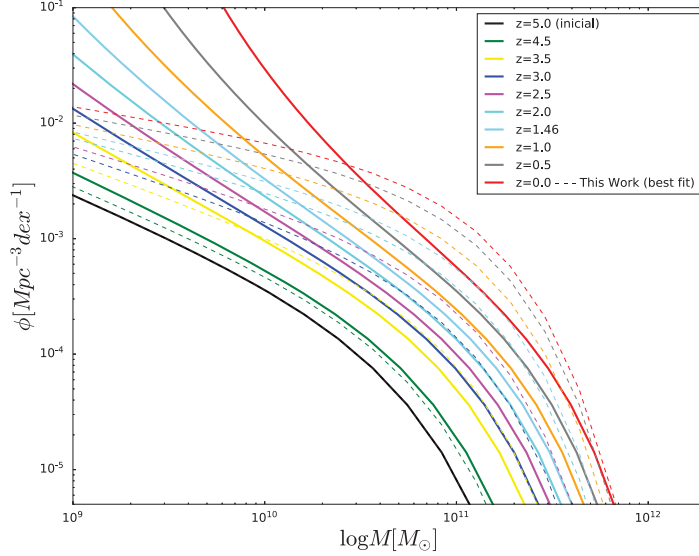


Figura 7.7: Comparación de las GSMF predichas por dos distintos enfoques. Partiendo de la GSMF a $z = 0$, se ha evolucionado la misma resolviendo la ecuación de continuidad (1.3) con una relación promedio ajustada a la SFMS a distintas épocas (líneas sólidas) y utilizando historias de formación estelar individuales (líneas segmentadas); los colores representan las GSMF a diferentes z 's, siendo el mismo en ambos caso al mismo valor de z .

La Figura 7.7 muestra nuestros resultados con las líneas sólidas. Las líneas punteadas muestran los ajustes a diferentes z 's de las GSMFs utilizando nuestras historias de formación estelar individuales. Observe como vemos la misma tensión encontrados en trabajos previos en nuestras inferencias, esto es, encontramos una sobre producción enorme de galaxias de baja masa que no se observa en la evolución de la GSMF de la población subyacente. Hacemos énfasis que por construcción la evolución de nuestra GSMF subyacente es consistente con la evolución de la relación SFR- M_* . La Figura 7.8 ilustra de manera clara el problema.

La Figura 7.8, que es similar a la Figura 6.13, muestra con la línea sólida azul el crecimiento de masa estelar promedio para galaxias activas, según su clasificación a $z = 0$, para progenitores que $z = 0$ tiene una masa estelar dada. Las áreas sombreadas muestran la dispersión alrededor de todas las historias. De manera similar, el crecimiento de masa estelar ha sido renormalizado a su masa observada al día de hoy $M_0 = M_*(z = 0)$. Las líneas segmentadas rojas muestran el ensamblaje integrando la relación SFR- M_* y suponiendo que todas las galaxias evolucionan alrededor de esa relación. Esta es la suposición estándar que se ha hecho en el pasado al integrar la ecuación de continuidad (Bell et al., 2007; Drory and Alvarez, 2008; Peng et al., 2010; Papovich et al., 2011;

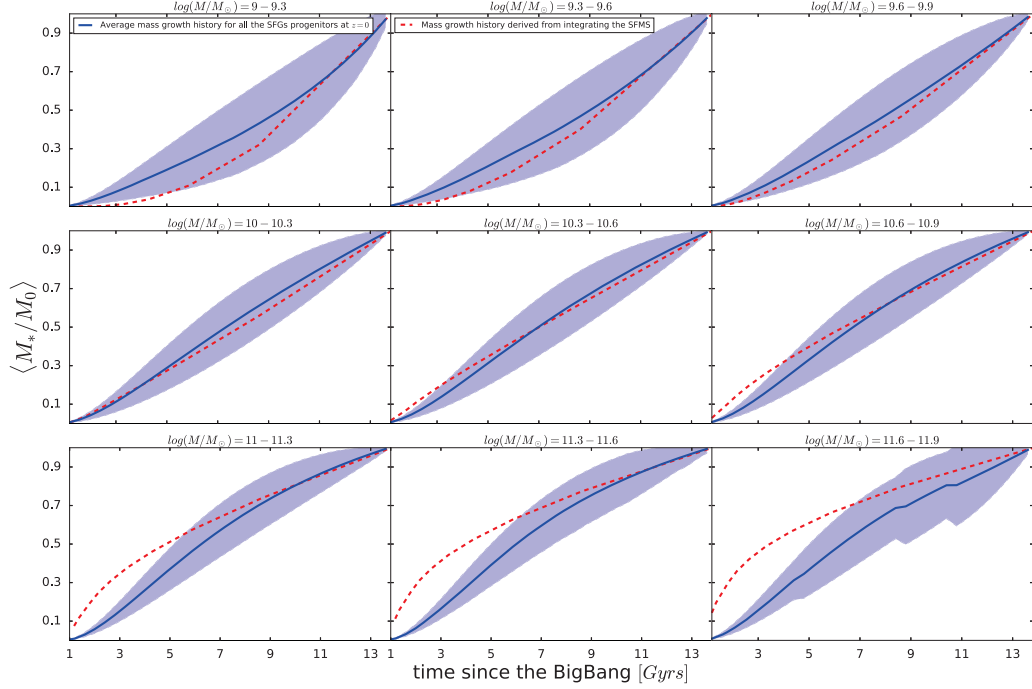


Figura 7.8: Similar a la Figura 6.13, reproducimos las historias promedio de galaxias activas según su selección a $z \sim 0$ normalizadas a su masa observada al día de hoy $M_0 = M_*(z = 0)$. Las líneas segmentadas rojas muestran el ensamblaje al integrar la relación promedio SFR– M_* de galaxias SFMS y suponiendo que las galaxias crecen por formación estelar *in situ* siguiendo esa relación.

(Leja et al., 2015; Steinhardt et al., 2017). Esta comparación muestra de manera clara que la suposición estándar de que las galaxias evolucionan alrededor de los promedios falla. Mientras a baja masas las galaxias son más jóvenes con una evolución rápida a épocas tardías, a altas masas las galaxias son más viejas y evolucionan más lento a bajos corrimientos al rojo. No obstante, encontramos que en el intervalo de masas $10^{10} \lesssim M_*/M_\odot \lesssim 10^{10.6}$ esta aproximación de hecho es buena.

Lo anterior sustenta nuestro argumento que la suposición de que las galaxias evolucionan alrededor de los promedios introduce una incertidumbre extra que no es tomada en los métodos de integración usan promedios de la relación SFR– M_* y que ha llevado a encontrar una tension entre dos observables que no es real. Esto muestra que entender las limitaciones de un método es clave para constreñir de manera correcta la evolución de las galaxias.

Resumen y Conclusiones

Existe una íntima relación entre la forma y la evolución de la función de masa estelar y los mecanismos de ensamblaje de la masa estelar de las galaxias. Existen dos canales por los cuales las galaxias crecen su masa: 1) formación estelar in situ, la cual podemos derivar a partir de observaciones y para la cual existe una gran variedad de métodos que permiten estimar las tasa de formación estelar, SFR, para un resumen véase [Speagle et al. \(2014\)](#). 2) Fusiones de galaxias: En este caso no existen mediciones directas de cual es y/o ha sido la contribución al ensamblaje galaxia por galaxias mediante fusiones. A lo más, existen estimaciones estadísticas de la tasa de fusiones como función del corrimiento al rojo; adicionalmente, la dificultad de observar fusiones “en el acto” introduce una incertidumbre extra sobre la definición en las observaciones de una fusión, para un resumen véase [Rodríguez-Gomez et al. \(2016\)](#). No obstante, inferencias empíricas con base en métodos poblacionales muestran que la contribución de las fusiones en la evolución de la función de masa es menor ([Rodríguez-Puebla et al., 2017](#)).

Bajo la suposición de que las fusiones tiene un rol secundario, es decir, suponiendo que las galaxias evolucionan por pura formación estelar in situ, en este trabajo hemos propuesto explotar la relación entre la evolución de la función de masa estelar y las historias de formación estelar *individuales* de las galaxias. Para esto, hemos constreñido las historias de formación estelar para una muestra de $\sim 6 \times 10^5$ galaxias locales del SDSS utilizando diferentes leyes de historia de formación estelar. Una vez restringidas las historias de formación estelar individuales de las galaxias hemos estudiado la evolución de la población de galaxias y contrastado frente a muestras observadas a diferentes corrimientos al rojo. Este enfoque, entonces, presenta una vision integral que combina la esencia de los métodos arqueológicos (restricciones a las historias de formación estelares individuales) y demográficos (evolución de la función de masa estelar y la relación promedio SFR– M_*), descritos en el Capítulo 1. En concreto, en nuestro enfoque arqueo-demográfico es posible estudiar:

- La evolución de la función de masa estelar de las galaxias;
- El cambio en z de la distribución de galaxias en el diagrama sSFR– M_* y la caracterización de la bimodalidad que pueda emerger en dicho diagrama;

- La evolución de la función de masa estelar separada en galaxias activas y retiradas en formación estelar, introduciendo diferentes criterios de separación en estas dos familias con base en el diagrama $s\text{SFR}-M_*$;
- El cambio en z de la fracción de galaxias retiradas en función de M_* , así como la determinación de de una masa de cruce de dominio de galaxias activas a dominio de retiradas a cada z ;
- La densidad de formación estelar cósmica así como la densidad de masa estelar cósmica en función de z y sus contribuciones por parte de los progenitores de las galaxias actualmente clasificadas como activas y retiradas en formación estelar;
- Las distribuciones de edades de las galaxias en función de su masa.

Uno de los ingredientes clave de nuestro enfoque es definir una ley *universal* de historia de formación estelar (SFH) para galaxias, misma que ponemos a prueba y que eventualmente podemos modificar hacia casos más complejos. En este trabajo hemos estudiado 3 leyes diferentes de SFH que son ampliamente utilizadas en la comunidad para derivar y constreñir tanto masas estelares como tasas de formación estelar aplicando modelos de síntesis de poblaciones estelares a la distribución de los espectros de energía de las galaxias y/o a la fotometría ancha en varias bandas. Las leyes que hemos estudiado son:

- SFH con aumento/decrecimiento exponencial: $\text{SFR}(t) = Ae^{\pm t/\tau}$.
- SFH τ -exponencial: $\text{SFR}(t) = A \times t \times e^{-t/\tau/\tau^2}$.
- SFH τ -exponencial con retraso al nacimiento: $\text{SFR}(t) = A \times (t-t_i) \times e^{-(t-t_i)/\tau/\tau^2}$.

Como explicamos en el Capítulo 2, hemos constreñido los parámetros de cada una de estas leyes utilizando las determinaciones para galaxias locales de (SFR , M_*). Esto es posible, debido a la sencillez que caracteriza estas leyes.

Utilizamos la muestra local de $\sim 6 \times 10^5$ galaxias del NYU-VAGC [Blanton et al. \(2005\)](#) con base en el SDSS DR7 para galaxias con $0.01 < z < 0.2$ y con una magnitud límite de $m_{\text{lim,r}} = 17.77$. Para cada galaxia hemos calculado una corrección por Volumen con base en el método $1/V_{\text{max}}$. Con respecto a las determinaciones de SFR y M_* , hemos utilizado dos catálogos públicos: MPA JHU y [Chang et al. \(2015\)](#). Ambos catálogos utilizan los filtros del SDSS *ugriz* pero el catálogo de [Chang et al. \(2015\)](#) incluye los filtros observados del mediano infrarojo de WISE $W1, W2, W3, W4$. Cada trabajo utiliza distintos trazadores de formación estelar, mientras en el MPA JHU se utilizaron líneas de ionización en [Chang et al. \(2015\)](#) se utilizó el mediano infrarojo para restringir las propiedades del polvo. Encontramos que la distribución de galaxias en el diagrama $s\text{SFR}-M_*$ es distinto en cada caso. En breve, el catálogo del MPA JHU muestra que existe una fuerte distribución bimodal en el diagrama $s\text{SFR}-M_*$ con galaxias con niveles de formación estelar mayores a $s\text{SFR} \sim 10^{-12.5} \text{ yr}^{-1}$. Por el contrario, en el catálogo de [Chang et al. \(2015\)](#) la distribución de galaxias es más continua en la región de bajos

valores de sSFR, resaltando galaxias con muy bajos niveles de sSFR, hasta $\text{sSFR} \sim 10^{-15} \text{ yr}^{-1}$. Esto tiene profundas consecuencias en nuestra metodología ya que para una ley dada de SFH el espacio de parámetros será distinto en ambos catálogos. Por lo tanto, para nuestra muestra observacional hemos constreñido dos historias de formación estelar, una a partir de las propiedades del catálogo del MPA JHU y otra utilizando [Chang et al. \(2015\)](#).

Nuestros principales resultados y conclusiones son:

1. Estudiamos la distribución de galaxias en el diagrama $\text{sSFR}-M_*$ y Edad pesada por masa- M_* para nuestras tres leyes de historia de formación estelar (Capítulo 4). De aquí concluimos que:
 - No todas las leyes de historia de formación estelar pueden ser derivadas a partir de las cantidades SFR y M_* inferidas para las galaxias observadas. Mientras que para la ley con decrecimiento exponencial se pudo restringir las historias para $\sim 47\%$ de la población, para una ley con crecimiento exponencial fue del $\sim 53\%$. Encontramos una población del 0.01% de las galaxias con $\text{sSFR} \sim 1.3 \times 10^{-10} \text{ yr}^{-1}$ que no tuvieron solución con ninguno de los dos casos exponenciales.
 - Para una ley τ -exponencial se pudo restringir sólo el $\sim 68\%$ de la población, mientras que para la ley τ -exponencial con retraso al nacimiento se pudo restringir el 100% de la población.
 - Al comparar las predicciones de la ley que cae exponencialmente con determinaciones observacionales para la distribución de galaxias en el diagrama Edad- M_* , encontramos que predice una población de galaxias a todas las masas con edades estelares muy viejas ($> 11 \text{ Gyr}$), lo cual no es realista especialmente para galaxias de masas intermedias y bajas.
 - Similarmente, la ley τ -exponencial predice una población de galaxias de masas intermedias/bajas demasiado viejas que no se identifican con un gran conjunto de evidencias observacionales.
 - La ley τ -exponencial con retraso al nacimiento entrega resultados más aceptables para la distribución de galaxias en el diagrama Edad- M_* . Con esto, concluimos que la ley τ -exponencial con retraso al nacimiento es capaz de ofrecer una descripción sensata de las historias de formación estelar de las galaxias observadas actualmente y la declaramos como nuestra ley fiducial.
2. Una vez definida nuestra ley fiducial de SFH, estudiamos las implicaciones en las historias individuales de las galaxias al utilizar (SFR, M_*) de los catálogos del MPA JHU y [Chang et al. \(2015\)](#). Nuestros principales conclusiones son (Capítulo 5):
 - El $\sim 68\%$ de nuestra muestra de galaxias con propiedades obtenidas del catálogo del MPA JHU están bien descritas con galaxias que empezaron a formarse en un tiempo cósmico de $t_i = 0.75 \text{ Gyrs}$; el resto, inicia su formación

en tiempos posteriores. Cerca del 100 % de las galaxias con $M_* > 10^{10} M_\odot$ tiene $t_i = 0.75$ Gyrs, mientras que para las galaxias de más baja masa pueden haber algunas que apenas empezaron a formarse, con $t_i \sim 13$ Gyrs.

- Lo anterior también es observado para el catálogo de [Chang et al. \(2015\)](#). En este caso encontramos que $\sim 78\%$ de las galaxias tienen $t_i = 0.75$ Gyrs.
 - El mayor impacto de las diferencias de las SFR en ambos catálogos se da en la distribución del parámetro τ , el cual es un tiempo característico de la ley usada relacionado con el pico de la SFR. En el caso del MPA JHU encontramos que $\tau > 1$ Gyrs mientras que para [Chang et al. \(2015\)](#) encontramos que $\tau > 0.1$ Gyrs, siendo las galaxias más masivas las que tienen $\tau < 1$ Gyr. Es decir, en el catálogo de [Chang et al. \(2015\)](#) las galaxias masivas con bajos niveles de formación estelar se forman a épocas muy tempranas y en un periodo corto de tiempo.
 - La distribución del cociente de los parámetros A/τ (una especie de SFR característica de la ley τ -exponencial) correlaciona estrechamente con M_* para ambos catálogos, indicando que una ley exponencial implica en general que $SFR \propto M_*$.
 - El cambio con z del diagrama sSFR- M_* es muy distinto entre los dos catálogos. Mientras que los resultados obtenidos a partir del MPA JHU predicen una distribución bimodal en el diagrama sSFR- M_* desde $z \sim 0$ hasta $z \sim 0.75$, los resultados con base en [Chang et al. \(2015\)](#) muestran una distribución bimodal hasta $z \sim 1.7$.
 - Las SFHs restringidas a partir del MPA JHU implican historias de crecimiento de M_* en mejor acuerdo con la evolución temporal de la GSMF observada en muestras a diferentes corrimientos al rojo. Las SFHs restringidas a partir del catálogo de [Chang et al. \(2015\)](#) predicen GSMFs a $z > 0.1$ arriba de las observadas especialmente en el lado de altas masas. Con esto, concluimos que para nuestros fines, las historias de formación estelar restringidas con base al MPA JHU son más aceptables para estudiar la evolución de las galaxias y su demografía a altos corrimientos al rojo.
3. Encontramos que es importante introducir errores aleatorios a las masas estelares, como los que tienen las determinaciones de las observaciones, cuando se busca comparar los resultados de modelos con las determinaciones observacionales de la GSMF a altos corrimientos al rojo. La evolución de la función de masa estelar obtenida a partir de nuestras SFHs está en mucho mejor acuerdo cuando tomamos en cuenta estos errores aleatorios en M_* .
 4. Adicionalmente a los errores aleatorios en M_* , los errores aleatorios en SFR son importantes cuando se compara la distribución de galaxias en el diagrama sSFR- M_* con resultados observacionales.
 5. Un resultado importante que encontramos usando nuestros catálogos sintéticos (Capítulo 6) es que la introducción de errores aleatorios en SFR y M_* , como

los que tienen las observaciones, llevan al establecimiento de una distribución bimodal *artificial* en el diagrama sSFR– M_* así como a un ensanchamiento de la SFMS, especialmente a altos corrimientos al rojo. En consecuencia, galaxias que son clasificadas como galaxias retiradas pueden en realidad ser intrínsecamente activas de la SFMS. Encontramos que cerca de un $\sim 20\%$ de galaxias masivas a altos corrimientos al rojo pueden ser clasificadas erróneamente como retiradas.

Todas las conclusiones listadas a partir de este momento incluyen errores aleatorios en SFR y M_* para su correcta comparación con las observaciones.

6. Clasificamos y estudiamos diversos criterios globales usados en la literatura para dividir a las galaxias en activas y pasivas en los diagramas sSFR– M_* o color–color (Capítulo 6). Encontramos con nuestro catálogo sintético que el criterio donde se define un umbral en la sSFR que es inversamente proporcional al tiempo de Hubble, $T_H(z)$, es el más adecuado por diversas razones, en especial por su compatibilidad con criterios observacionales basados en el diagrama color–color. Usando las historias de formación estelar que tenemos para cada galaxia e imponiendo ahí un criterio físico de apagado, mostramos cómo se “proyecta” esto a nivel global en las poblaciones a cada z (Capítulo 7.1).

Encontramos que los criterios globales de separación en activas y retiradas pueden ser válidos hacia corrimientos al rojo bajos, cuando se ha establecido una clara bimodalidad en el diagrama sSFR– M_* , mientras que a z 's mayores, cuando la bimodalidad tiende a desaparecer, los criterios globales llevan a conclusiones erróneas ya que las galaxias que individualmente sabemos están en proceso de apagado (cada vez más escasas hacia el pasado) tienden a mezclarse con las galaxias de la SFMS.

7. Encontramos que nuestras SFHs constreñidas para el catálogo MPA JHU del SDSS predicen la evolución tanto de la GSMF total como de la correlación SFR– M_* hasta $z \sim 5$ en acuerdo con las determinaciones observacionales (Capítulo 5).

Al dividir la muestra en galaxias activas (SFMS) y pasivas/retiradas, la evolución de las respectivas GSMFs, así como de la fracción de galaxias retiradas en función de M_* , son compatibles con las determinaciones observacionales sólo hasta $z \lesssim 1$ (Capítulo 6). A z 's mayores la fracción de galaxias retiradas tiende a valores muy pequeños: la subpoblación de galaxias retiradas emerge a z 's menores que el grueso de las determinaciones observacionales. Más allá de la separación en subpoblaciones -lo cual es muy subjetivo-, nuestros resultados con una ley universal de SFH muestran que la bimodalidad en el diagrama sSFR– M_* se establece tardíamente y de manera rápida.

En cuanto a la estrecha correlación que establecen las galaxias con formación estelar activa, la así llamada SFMS, es consistente con las observaciones.

8. Nuestras SFHs reproducen también de manera aceptable las historias de formación estelar y masa estelar cósmicas, $\dot{\rho}_*(z)$ y $\rho_*(z)$, observadas en un amplio intervalo

de corrimientos al rojo. Al dividir la población entre activas y pasivas en formación estelar a $z \sim 0$ vemos que los progenitores de las primeras comenzaron a dominar en $\dot{\rho}_*$ apenas desde $z \sim 0.6$; en épocas anteriores, el dominio de las progenitoras de las galaxias hoy retiradas aumenta drásticamente. En el caso de ρ_* , los progenitores de las galaxias retiradas dominan en todas las épocas.

9. Encontramos que los promedios de las SFHs de las galaxias definidas en diferentes intervalos de masa a $z \sim 0$ no siempre se describen bien por la ley τ -exponencial con retraso que siguen las galaxias individualmente. La diferencia se hace más significativa a medida que la masa es menor. Al dividir la población en galaxias activas y retiradas, encontramos que el promedio de las SFHs de galaxias retiradas están en su mayoría bien descritas por la ley τ -exponencial pero no en el caso de las galaxias activas, aún para las más masivas.
10. Estudiamos el problema ampliamente discutido en la literatura sobre la inconsistencia entre la evolución de la GSMF y la integración temporal de la relación promedio SFR- M_* (basicamente la SFMS) establecida observacionalmente a diferentes z 's (Capítulo 7.3). Con nuestro catálogo sintético de $\sim 6 \times 10^5$ galaxias a diferentes z 's, calculamos las relaciones promedio SFR- M_* a cada z y repetimos el procedimiento de previos autores de calcular la evolución de la GSMF integrando esas relaciones. Confirmamos lo que se ha reportado en varios trabajos: la GSMF crece mucho más con el tiempo que lo observado, en particular se empuja drásticamente en el lado de bajas masas (Fig. 7.7.); no obstante la evolución verdadera de la GSMF que medimos en nuestro catálogo no sufre ese problema, dando resultados compatibles con las observaciones (ver ítem 7). Concluimos que el enfoque de usar relaciones promedio para evolucionar a la población de galaxias no es correcto.

Una de las principales conclusiones de esta Tesis es que una ley de historia de formación estelar universal, como lo es la τ -exponencial con retraso en el nacimiento, habiendo sido constreñida (sus parámetros) individualmente para cada galaxia de una población completa a $z \sim 0.1$, es capaz de hacer predicciones demográficas hacia el pasado en buen acuerdo con las observaciones a nivel global (cuando se introducen los errores aleatorios que tienen las determinaciones observacionales de M_* y SFR); por ejemplo, la evolución de la función de masa estelar, de la relación promedio en el diagrama SFR- M_* , y las historias de formación estelar y masa estelar cósmicas, $\dot{\rho}_*(z)$ y $\rho_*(z)$. Esta consistencia es muy alentadora y sugiere basicamente que el grueso de las galaxias crecen en masa estelar por procesos de formación estelar in situ relativamente estables, seculares y autoregulados posiblemente (régimen de disco, ver Introducción).

Lo anterior fue el vaso de agua medio lleno. Nuestros resultados mostraron también que la distribución en el diagrama sSFR- M_* desarrolla la bimodalidad de galaxias activas en formación estelar (SFMS) y de galaxias pasivas/retiradas, demasiado tarde. Más allá del criterio que se use para separar galaxias activas y retiradas, las fracciones de las últimas son muy bajas a $z > 0.7 - 1$ comparadas con inferencias observacionales. Como se discutió en la Introducción, cualquier ley de SFH decreciente, implica un

proceso de apagado que lleva a las galaxias a la zona de las retiradas. Este es el proceso “lento” implícito en nuestros resultados y que parece no ser del todo consistente con las observaciones. Este es el vaso de agua medio vacío.

Hemos discutido (Capítulo 7.2) que la adecuada inclusión de las fusiones secas en el crecimiento de masa de las galaxias funciona en la dirección de aliviar el problema del surgimiento tardío de la subpoblación de galaxias retiradas en nuestro esquema. No obstante, múltiples estudios tienden a converger recientemente en que el rol de las fusiones secas no es relevante en el crecimiento de masa estelar de las galaxias; quizá sólo para las más masivas donde pueden en promedio contribuir hasta en un 40–50 % de su masa ensamblada actual. Incluir el rol de las fusiones en nuestro esquema posiblemente no resolverá el problema. Por eso, consideramos que nuestros resultados sugieren fuertemente que la SFH de las galaxias retiradas es diferente en esencia a la de las galaxias activas en formación estelar. Nuestra propuesta es que las galaxias retiradas tuvieron una SFH más concentrada hacia altos z 's, alcanzando SFR máximas muy altas y muy pronto para luego entrar en la fase de decrecimiento, y desde un tiempo de apagado abrupto t_Q , con una ley de decrecimiento más rápida de la que constreñimos con nuestro modelo (ver Fig. 7.6). Esta propuesta se traduce en el diagrama sSFR– M_* en el surgimiento temprano de la bimodalidad (las galaxias de la SFMS emigran rápidamente a una zona de galaxias retiradas que además con el tiempo se va alejando más de la SFMS).

El trabajo a futuro será implementar un esquema de inclusión del rol de las fusiones en nuestro esquema, pero sobre todo, de una metodología adecuada para considerar y constreñir el proceso de apagado rápido mencionado arriba para las galaxias que hoy están en la zona de las retiradas.

Bibliografía

- Asari, N. V., Cid Fernandes, R., Stasińska, G., Torres-Papaqui, J. P., Mateus, A., Sodré, L., Schoenell, W., and Gomes, J. M. (2007). The history of star-forming galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. *MNRAS*, 381:263–279. [2](#), [17](#)
- Avila-Reese, V. and Firmani, C. (2000). Properties of Disk Galaxies in a Hierarchical Formation Scenario. *Rev. Mex. Astron. Astrofis.*, 36:23. [8](#)
- Bauer, A. E., Hopkins, A. M., Gunawardhana, M., Taylor, E. N., Baldry, I., Bamford, S. P., Bland-Hawthorn, J., Brough, S., Brown, M. J. I., Cluver, M. E., Colless, M., Conselice, C. J., Croom, S., Driver, S., Foster, C., Jones, D. H., Lara-Lopez, M. A., Liske, J., López-Sánchez, Á. R., Loveday, J., Norberg, P., Owers, M. S., Pimblet, K., Robotham, A., Sansom, A. E., and Sharp, R. (2013). Galaxy And Mass Assembly (GAMA): linking star formation histories and stellar mass growth. *MNRAS*, 434:209–221. [3](#)
- Behroozi, P. S., Conroy, C., and Wechsler, R. H. (2010). A Comprehensive Analysis of Uncertainties Affecting the Stellar Mass-Halo Mass Relation for $0 < z < 4$. *ApJ*, 717:379–403. [45](#)
- Bell, E. F., McIntosh, D. H., Katz, N., and Weinberg, M. D. (2003). The Optical and Near-Infrared Properties of Galaxies. I. Luminosity and Stellar Mass Functions. *ApJS*, 149:289–312. [63](#), [64](#)
- Bell, E. F., van der Wel, A., Papovich, C., Kocevski, D., Lotz, J., McIntosh, D. H., Kartaltepe, J., Faber, S. M., Ferguson, H., Koekemoer, A., Grogin, N., Wuyts, S., Cheung, E., Conselice, C. J., Dekel, A., Dunlop, J. S., Giavalisco, M., Herrington, J., Koo, D. C., McGrath, E. J., de Mello, D., Rix, H.-W., Robaina, A. R., and Williams, C. C. (2012). What Turns Galaxies Off? The Different Morphologies of Star-forming and Quiescent Galaxies since $z \sim 2$ from CANDELS. *ApJ*, 753:167. [59](#)
- Bell, E. F., Zheng, X. Z., Papovich, C., Borch, A., Wolf, C., and Meisenheimer, K. (2007). Star Formation and the Growth of Stellar Mass. *ApJ*, 663:834–843. [2](#), [10](#), [17](#), [80](#), [82](#)

BIBLIOGRAFÍA

- Blanton, M. R., Schlegel, D. J., Strauss, M. A., Brinkmann, J., Finkbeiner, D., Fukugita, M., Gunn, J. E., Hogg, D. W., Ivezić, Ž., Knapp, G. R., Lupton, R. H., Munn, J. A., Schneider, D. P., Tegmark, M., and Zehavi, I. (2005). New York University Value-Added Galaxy Catalog: A Galaxy Catalog Based on New Public Surveys. *AJ*, 129:2562–2578. [2](#), [26](#), [86](#)
- Bouwens, R. J., Illingworth, G. D., Oesch, P. A., Trenti, M., Labbé, I., Bradley, L., Carollo, M., van Dokkum, P. G., Gonzalez, V., Holwerda, B., Franx, M., Spitler, L., Smit, R., and Magee, D. (2015). UV Luminosity Functions at Redshifts $z = 4$ to $z = 10$: 10,000 Galaxies from HST Legacy Fields. *ApJ*, 803:34. [2](#)
- Brinchmann, J., Charlot, S., White, S. D. M., Tremonti, C., Kauffmann, G., Heckman, T., and Brinkmann, J. (2004). The physical properties of star-forming galaxies in the low-redshift Universe. *MNRAS*, 351:1151–1179. [3](#), [26](#), [27](#)
- Bundy, K., Bershady, M. A., Law, D. R., Yan, R., Drory, N., MacDonald, N., Wake, D. A., Cherinka, B., Sánchez-Gallego, J. R., Weijmans, A.-M., Thomas, D., Tremonti, C., Masters, K., Coccato, L., Diamond-Stanic, A. M., Aragón-Salamanca, A., Avila-Reese, V., Badenes, C., Falcón-Barroso, J., Belfiore, F., Bizyaev, D., Blanc, G. A., Bland-Hawthorn, J., Blanton, M. R., Brownstein, J. R., Byler, N., Cappellari, M., Conroy, C., Dutton, A. A., Emsellem, E., Etherington, J., Frinchaboy, P. M., Fu, H., Gunn, J. E., Harding, P., Johnston, E. J., Kauffmann, G., Kinemuchi, K., Klaene, M. A., Knapen, J. H., Leauthaud, A., Li, C., Lin, L., Maiolino, R., Malanushenko, V., Malanushenko, E., Mao, S., Maraston, C., McDermid, R. M., Merrifield, M. R., Nichol, R. C., Oravetz, D., Pan, K., Parejko, J. K., Sanchez, S. F., Schlegel, D., Simmons, A., Steele, O., Steinmetz, M., Thanjavur, K., Thompson, B. A., Tinker, J. L., van den Bosch, R. C. E., Westfall, K. B., Wilkinson, D., Wright, S., Xiao, T., and Zhang, K. (2015). Overview of the SDSS-IV MaNGA Survey: Mapping nearby Galaxies at Apache Point Observatory. *ApJ*, 798:7. [2](#)
- Bundy, K., Ellis, R. S., Conselice, C. J., Taylor, J. E., Cooper, M. C., Willmer, C. N. A., Weiner, B. J., Coil, A. L., Noeske, K. G., and Eisenhardt, P. R. M. (2006). The Mass Assembly History of Field Galaxies: Detection of an Evolving Mass Limit for Star-Forming Galaxies. *ApJ*, 651:120–141. [63](#), [64](#)
- Calura, F., Menci, N., and Gallazzi, A. (2014). The ages of stellar populations in a warm dark matter universe. *MNRAS*, 440:2066–2076. [37](#)
- Cano-Díaz, M., Sánchez, S. F., Zibetti, S., Ascasibar, Y., Bland-Hawthorn, J., Ziegler, B., González Delgado, R. M., Walcher, C. J., García-Benito, R., Mast, D., Mendoza-Pérez, M. A., Falcón-Barroso, J., Galbany, L., Husemann, B., Kehrig, C., Marino, R. A., Sánchez-Blázquez, P., López-Cobá, C., López-Sánchez, Á. R., and Vilchez, J. M. (2016). Spatially Resolved Star Formation Main Sequence of Galaxies in the CALIFA Survey. *ApJ*, 821:L26. [3](#)
- Casey, C. M., Narayanan, D., and Cooray, A. (2014). Dusty star-forming galaxies at high redshift. *Phys. Rep.*, 541:45–161. [9](#)

-
- Chabrier, G. (2003a). Galactic Stellar and Substellar Initial Mass Function. *PASP*, 115:763–795. 15, 19
- Chabrier, G. (2003b). Galactic Stellar and Substellar Initial Mass Function. *PASP*, 115:763–795. 47
- Chang, Y.-Y., van der Wel, A., da Cunha, E., and Rix, H.-W. (2015). Stellar Masses and Star Formation Rates for 1M Galaxies from SDSS+WISE. *ApJS*, 219:8. IX, 8, 26, 27, 28, 29, 30, 34, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 86, 87, 88
- Ciesla, L., Elbaz, D., and Fensch, J. (2017). The SFR- M_* main sequence archetypal star-formation history and analytical models. *A&A*, 608:A41. 3, 5
- Conroy, C. (2013a). Modeling the Panchromatic Spectral Energy Distributions of Galaxies. *ARA&A*, 51:393–455. 2
- Conroy, C. (2013b). Modeling the Panchromatic Spectral Energy Distributions of Galaxies. *ARA&A*, 51:393–455. 45
- Cowie, L. L., Songaila, A., Hu, E. M., and Cohen, J. G. (1996). New Insight on Galaxy Formation and Evolution From Keck Spectroscopy of the Hawaii Deep Fields. *AJ*, 112:839. 7
- da Cunha, E., Charlot, S., and Elbaz, D. (2008). A simple model to interpret the ultraviolet, optical and infrared emission from galaxies. *MNRAS*, 388:1595–1617. 27
- Daddi, E., Cimatti, A., Renzini, A., Vernet, J., Conselice, C., Pozzetti, L., Mignoli, M., Tozzi, P., Broadhurst, T., di Serego Alighieri, S., Fontana, A., Nonino, M., Rosati, P., and Zamorani, G. (2004). Near-Infrared Bright Galaxies at $z \sim 2$. Entering the Spheroid Formation Epoch? *ApJ*, 600:L127–L130. 57
- Dekel, A. and Birnboim, Y. (2006). Galaxy bimodality due to cold flows and shock heating. *MNRAS*, 368:2–20. 9
- Dekel, A., Birnboim, Y., Engel, G., Freundlich, J., Goerdt, T., Mumcuoglu, M., Neistein, E., Pichon, C., Teyssier, R., and Zinger, E. (2009a). Cold streams in early massive hot haloes as the main mode of galaxy formation. *Nature*, 457:451–454. 9
- Dekel, A., Sari, R., and Ceverino, D. (2009b). Formation of Massive Galaxies at High Redshift: Cold Streams, Clumpy Disks, and Compact Spheroids. *ApJ*, 703:785–801. 9
- Dragomir, R., Rodríguez-Puebla, A., Primack, J. R., and Lee, C. T. (2018). Does the Galaxy-Halo Connection Vary with Environment? *MNRAS*. 26, 30
- Drory, N. and Alvarez, M. (2008). The Contribution of Star Formation and Merging to Stellar Mass Buildup in Galaxies. *ApJ*, 680:41–53. 2, 9, 10, 17, 64, 80, 82

BIBLIOGRAFÍA

- Elbaz, D., Daddi, E., Le Borgne, D., Dickinson, M., Alexander, D. M., Chary, R.-R., Starck, J.-L., Brandt, W. N., Kitzbichler, M., MacDonald, E., Nonino, M., Popesso, P., Stern, D., and Vanzella, E. (2007). The reversal of the star formation-density relation in the distant universe. *A&A*, 468:33–48. [3](#)
- Elbaz, D., Leiton, R., Nagar, N., Okumura, K., Franco, M., Schreiber, C., Pannella, M., Wang, T., Dickinson, M., Diaz-Santos, T., Ciesla, L., Daddi, E., Bournaud, F., Magdis, G., Zhou, L., and Rujopakarn, W. (2017). Starbursts in and out of the star-formation main sequence. *ArXiv e-prints*. [8](#)
- Faber, S. M., Willmer, C. N. A., Wolf, C., Koo, D. C., Weiner, B. J., Newman, J. A., Im, M., Coil, A. L., Conroy, C., Cooper, M. C., Davis, M., Finkbeiner, D. P., Gerke, B. F., Gebhardt, K., Groth, E. J., Guhathakurta, P., Harker, J., Kaiser, N., Kassin, S., Kleinheinrich, M., Konidaris, N. P., Kron, R. G., Lin, L., Luppino, G., Madgwick, D. S., Meisenheimer, K., Noeske, K. G., Phillips, A. C., Sarajedini, V. L., Schiavon, R. P., Simard, L., Szalay, A. S., Vogt, N. P., and Yan, R. (2007). Galaxy Luminosity Functions to $z \sim 1$ from DEEP2 and COMBO-17: Implications for Red Galaxy Formation. *ApJ*, 665:265–294. [59](#)
- Feldmann, R. (2017). Are star formation rates of galaxies bimodal? *MNRAS*, 470:L59–L63. [8](#), [29](#)
- Firmani, C. and Avila-Reese, V. (2000). Disc galaxy evolution models in a hierarchical formation scenario: structure and dynamics. *MNRAS*, 315:457–472. [8](#)
- Firmani, C. and Avila-Reese, V. (2010). Galaxy Downsizing Evidenced by Hybrid Evolutionary Tracks. *ApJ*, 723:755–766. [64](#)
- Firmani, C., Avila-Reese, V., and Rodríguez-Puebla, A. (2010). Can galaxy outflows and re-accretion produce a downsizing in the specific star-formation rate of late-type galaxies? *MNRAS*, 404:1100–1110. [8](#), [57](#)
- Gallazzi, A., Charlot, S., Brinchmann, J., White, S. D. M., and Tremonti, C. A. (2005). The ages and metallicities of galaxies in the local universe. *MNRAS*, 362:41–58. [35](#), [36](#), [37](#), [52](#)
- Gavazzi, G., Bonfanti, C., Sanvito, G., Boselli, A., and Scodreggio, M. (2002). Spectrophotometry of Galaxies in the Virgo Cluster. I. The Star Formation History. *ApJ*, 576:135–151. [21](#)
- González Delgado, R. M., Cid Fernandes, R., Pérez, E., García-Benito, R., López Fernández, R., Lacerda, E. A. D., Cortijo-Ferrero, C., de Amorim, A. L., Vale Asari, N., Sánchez, S. F., Walcher, C. J., Wisotzki, L., Mast, D., Alves, J., Ascasibar, Y., Bland-Hawthorn, J., Galbany, L., Kennicutt, R. C., Márquez, I., Masegosa, J., Mollá, M., Sánchez-Blázquez, P., and Vílchez, J. M. (2016). Star formation along the Hubble sequence. Radial structure of the star formation of CALIFA galaxies. *A&A*, 590:A44. [2](#), [17](#)

- Grogin, N. A., Kocevski, D. D., Faber, S. M., Ferguson, H. C., Koekemoer, A. M., Riess, A. G., Acquaviva, V., Alexander, D. M., Almaini, O., Ashby, M. L. N., Barden, M., Bell, E. F., Bournaud, F., Brown, T. M., Caputi, K. I., Casertano, S., Cassata, P., Castellano, M., Challis, P., Chary, R.-R., Cheung, E., Cirasuolo, M., Conselice, C. J., Roshan Cooray, A., Croton, D. J., Daddi, E., Dahlen, T., Davé, R., de Mello, D. F., Dekel, A., Dickinson, M., Dolch, T., Donley, J. L., Dunlop, J. S., Dutton, A. A., Elbaz, D., Fazio, G. G., Filippenko, A. V., Finkelstein, S. L., Fontana, A., Gardner, J. P., Garnavich, P. M., Gawiser, E., Giavalisco, M., Grazian, A., Guo, Y., Hathi, N. P., Häussler, B., Hopkins, P. F., Huang, J.-S., Huang, K.-H., Jha, S. W., Kartaltepe, J. S., Kirshner, R. P., Koo, D. C., Lai, K., Lee, K.-S., Li, W., Lotz, J. M., Lucas, R. A., Madau, P., McCarthy, P. J., McGrath, E. J., McIntosh, D. H., McLure, R. J., Mobasher, B., Moustakas, L. A., Mozena, M., Nandra, K., Newman, J. A., Niemi, S.-M., Noeske, K. G., Papovich, C. J., Pentericci, L., Pope, A., Primack, J. R., Rajan, A., Ravindranath, S., Reddy, N. A., Renzini, A., Rix, H.-W., Robaina, A. R., Rodney, S. A., Rosario, D. J., Rosati, P., Salimbeni, S., Scarlata, C., Siana, B., Simard, L., Smidt, J., Somerville, R. S., Spinrad, H., Straughn, A. N., Strolger, L.-G., Telford, O., Teplitz, H. I., Trump, J. R., van der Wel, A., Villforth, C., Wechsler, R. H., Weiner, B. J., Wiklind, T., Wild, V., Wilson, G., Wuyts, S., Yan, H.-J., and Yun, M. S. (2011). CANDELS: The Cosmic Assembly Near-infrared Deep Extragalactic Legacy Survey. *ApJS*, 197:35. [2](#)
- Ibarra-Medel, H. J., Sánchez, S. F., Avila-Reese, V., Hernández-Toledo, H. M., González, J. J., Drory, N., Bundy, K., Bizyaev, D., Cano-Díaz, M., Malanushenko, E., Pan, K., Roman-Lopes, A., and Thomas, D. (2016). SDSS IV MaNGA: the global and local stellar mass assembly histories of galaxies. *MNRAS*, 463:2799–2818. [2](#), [17](#)
- Illingworth, G., Magee, D., Bouwens, R., Oesch, P., Labbe, I., van Dokkum, P., Whitaker, K., Holden, B., Franx, M., and Gonzalez, V. (2016). The Hubble Legacy Fields (HLF-GOODS-S) v1.5 Data Products: Combining 2442 Orbits of GOODS-S/CDF-S Region ACS and WFC3/IR Images. *ArXiv e-prints*. [2](#)
- Karim, A., Schinnerer, E., Martínez-Sansigre, A., Sargent, M. T., van der Wel, A., Rix, H.-W., Ilbert, O., Smolčić, V., Carilli, C., Pannella, M., Koekemoer, A. M., Bell, E. F., and Salvato, M. (2011). The Star Formation History of Mass-selected Galaxies in the COSMOS Field. *ApJ*, 730:61. [3](#), [57](#), [58](#), [59](#)
- Kauffmann, G., Heckman, T. M., White, S. D. M., Charlot, S., Tremonti, C., Brinchmann, J., Bruzual, G., Peng, E. W., Seibert, M., Bernardi, M., Blanton, M., Brinkmann, J., Castander, F., Csábai, I., Fukugita, M., Ivezić, Z., Munn, J. A., Nichol, R. C., Padmanabhan, N., Thakar, A. R., Weinberg, D. H., and York, D. (2003). Stellar masses and star formation histories for 10^5 galaxies from the Sloan Digital Sky Survey. *MNRAS*, 341:33–53. [27](#)
- Kauffmann, G., White, S. D. M., Heckman, T. M., Ménard, B., Brinchmann, J., Charlot, S., Tremonti, C., and Brinkmann, J. (2004). The environmental dependence of

BIBLIOGRAFÍA

- the relations between stellar mass, structure, star formation and nuclear activity in galaxies. *MNRAS*, 353:713–731. [54](#)
- Labbé, I., Huang, J., Franx, M., Rudnick, G., Barmby, P., Daddi, E., van Dokkum, P. G., Fazio, G. G., Schreiber, N. M. F., Moorwood, A. F. M., Rix, H.-W., Röttgering, H., Trujillo, I., and van der Werf, P. (2005). IRAC Mid-Infrared Imaging of the Hubble Deep Field-South: Star Formation Histories and Stellar Masses of Red Galaxies at $z > 2$. *ApJ*, 624:L81–L84. [57](#)
- Lee, N., Sanders, D. B., Casey, C. M., Toft, S., Scoville, N. Z., Hung, C.-L., Le Floch, E., Ilbert, O., Zahid, H. J., Aussel, H., Capak, P., Kartaltepe, J. S., Kewley, L. J., Li, Y., Schawinski, K., Sheth, K., and Xiao, Q. (2015). A Turnover in the Galaxy Main Sequence of Star Formation at $M_{\star} \sim 10^{10} M_{\odot}$ for Redshifts $z < 1.3$. *ApJ*, 801:80. [4](#)
- Leitner, S. N. (2012). On the Last 10 Billion Years of Stellar Mass Growth in Star-forming Galaxies. *ApJ*, 745:149. [2](#), [5](#), [6](#), [7](#)
- Leitner, S. N. and Kravtsov, A. V. (2011). Fuel Efficient Galaxies: Sustaining Star Formation with Stellar Mass Loss. *ApJ*, 734:48. [4](#), [19](#)
- Leja, J., van Dokkum, P. G., Franx, M., and Whitaker, K. E. (2015). Reconciling the Observed Star-forming Sequence with the Observed Stellar Mass Function. *ApJ*, 798:115. [2](#), [10](#), [11](#), [12](#), [25](#), [80](#), [83](#)
- Lilly, S. J., Le Fèvre, O., Renzini, A., Zamorani, G., Scodreggio, M., Contini, T., Carollo, C. M., Hasinger, G., Kneib, J.-P., Iovino, A., Le Brun, V., Maier, C., Mainieri, V., Mignoli, M., Silverman, J., Tasca, L. A. M., Bolzonella, M., Bongiorno, A., Bottini, D., Capak, P., Caputi, K., Cimatti, A., Cucciati, O., Daddi, E., Feldmann, R., Franzetti, P., Garilli, B., Guzzo, L., Ilbert, O., Kampczyk, P., Kovac, K., Lamareille, F., Leauthaud, A., Le Borgne, J.-F., McCracken, H. J., Marinoni, C., Pello, R., Ricciardelli, E., Scarlata, C., Vergani, D., Sanders, D. B., Schinnerer, E., Scoville, N., Taniguchi, Y., Arnouts, S., Aussel, H., Bardelli, S., Brusa, M., Cappi, A., Ciliegi, P., Finoguenov, A., Foucaud, S., Franceschini, A., Halliday, C., Impey, C., Knobel, C., Koekemoer, A., Kurk, J., Maccagni, D., Maddox, S., Marano, B., Marconi, G., Meneux, B., Mobasher, B., Moreau, C., Peacock, J. A., Porciani, C., Pozzetti, L., Scaramella, R., Schiminovich, D., Shopbell, P., Smail, I., Thompson, D., Tresse, L., Vettolani, G., Zanichelli, A., and Zucca, E. (2007). zCOSMOS: A Large VLT/VIMOS Redshift Survey Covering $0 < z < 3$ in the COSMOS Field. *ApJS*, 172:70–85. [2](#)
- López Fernández, R., González Delgado, R. M., Pérez, E., García-Benito, R., Cid Fernandes, R., Schoenell, W., Sánchez, S. F., Gallazzi, A., Sánchez-Blázquez, P., Vale Asari, N., and Walcher, C. J. (2018). The cosmic evolution of the spatially-resolved star formation rate and stellar mass of the CALIFA survey. *ArXiv e-prints*. [48](#)
- Madau, P. and Dickinson, M. (2014). Cosmic Star-Formation History. *ARA&A*, 52:415–486. [12](#), [47](#), [48](#)

-
- Maraston, C., Daddi, E., Renzini, A., Cimatti, A., Dickinson, M., Papovich, C., Pasquali, A., and Pirzkal, N. (2006). Evidence for TP-AGB Stars in High-Redshift Galaxies, and Their Effect on Deriving Stellar Population Parameters. *ApJ*, 652:85–96. [21](#)
- Martig, M., Bournaud, F., Teyssier, R., and Dekel, A. (2009). Morphological Quenching of Star Formation: Making Early-Type Galaxies Red. *ApJ*, 707:250–267. [8](#)
- Martis, N. S., Marchesini, D., Brammer, G. B., Muzzin, A., Labbé, I., Momcheva, I. G., Skelton, R. E., Stefanon, M., van Dokkum, P. G., and Whitaker, K. E. (2016). The Evolution of the Fractions of Quiescent and Star-forming Galaxies as a Function of Stellar Mass Since $z = 3$: Increasing Importance of Massive, Dusty Star-forming Galaxies in the Early Universe. *ApJ*, 827:L25. [7](#), [57](#)
- McCracken, H. J., Milvang-Jensen, B., Dunlop, J., Franx, M., Fynbo, J. P. U., Le Fèvre, O., Holt, J., Caputi, K. I., Goranova, Y., Buitrago, F., Emerson, J. P., Freudling, W., Hudelot, P., López-Sanjuan, C., Magnard, F., Mellier, Y., Møller, P., Nilsson, K. K., Sutherland, W., Tasca, L., and Zabl, J. (2012). UltraVISTA: a new ultra-deep near-infrared survey in COSMOS. *A&A*, 544:A156. [2](#)
- Moustakas, J., Coil, A. L., Aird, J., Blanton, M. R., Cool, R. J., Eisenstein, D. J., Mendez, A. J., Wong, K. C., Zhu, G., and Arnouts, S. (2013). PRIMUS: Constraints on Star Formation Quenching and Galaxy Merging, and the Evolution of the Stellar Mass Function from $z = 0-1$. *ApJ*, 767:50. [7](#), [10](#), [57](#), [58](#), [59](#), [60](#), [61](#), [62](#), [63](#)
- Muñoz, J. A. and Peeples, M. S. (2015). A framework for empirical galaxy phenomenology: the scatter in galaxy ages and stellar metallicities. *MNRAS*, 448:1430–1445. [2](#), [5](#)
- Muzzin, A., Marchesini, D., Stefanon, M., Franx, M., McCracken, H. J., Milvang-Jensen, B., Dunlop, J. S., Fynbo, J. P. U., Brammer, G., Labbé, I., and van Dokkum, P. G. (2013). The Evolution of the Stellar Mass Functions of Star-forming and Quiescent Galaxies to $z = 4$ from the COSMOS/UltraVISTA Survey. *ApJ*, 777:18. [7](#), [45](#), [57](#), [59](#), [61](#), [62](#), [63](#), [64](#)
- Noeske, K. G., Weiner, B. J., Faber, S. M., Papovich, C., Koo, D. C., Somerville, R. S., Bundy, K., Conselice, C. J., Newman, J. A., Schiminovich, D., Le Floch, E., Coil, A. L., Rieke, G. H., Lotz, J. M., Primack, J. R., Barmby, P., Cooper, M. C., Davis, M., Ellis, R. S., Fazio, G. G., Guhathakurta, P., Huang, J., Kassin, S. A., Martin, D. C., Phillips, A. C., Rich, R. M., Small, T. A., Willmer, C. N. A., and Wilson, G. (2007). Star Formation in AEGIS Field Galaxies since $z=1.1$: The Dominance of Gradually Declining Star Formation, and the Main Sequence of Star-forming Galaxies. *ApJ*, 660:L43–L46. [3](#), [4](#), [22](#), [23](#)
- Oesch, P. A., Bouwens, R. J., Illingworth, G. D., Gonzalez, V., Trenti, M., van Dokkum, P. G., Franx, M., Labbé, I., Carollo, C. M., and Magee, D. (2012). The Bright End of the Ultraviolet Luminosity Function at $z \sim 8$: New Constraints from CANDELS Data in GOODS-South. *ApJ*, 759:135. [23](#)
-

BIBLIOGRAFÍA

- Oesch, P. A., Bouwens, R. J., Illingworth, G. D., Labbé, I., and Stefanon, M. (2018). The Dearth of $z < 10$ Galaxies in All HST Legacy Fields-The Rapid Evolution of the Galaxy Population in the First 500 Myr. *ApJ*, 855:105. [2](#), [23](#)
- Pacifici, C., Oh, S., Oh, K., Lee, J., and Yi, S. K. (2016). Timing the Evolution of Quiescent and Star-forming Local Galaxies. *ApJ*, 824:45. [2](#), [17](#), [52](#), [57](#), [58](#), [59](#), [62](#), [64](#), [76](#)
- Pannella, M., Carilli, C. L., Daddi, E., McCracken, H. J., Owen, F. N., Renzini, A., Strazzullo, V., Civano, F., Koekemoer, A. M., Schinnerer, E., Scoville, N., Smolčić, V., Taniguchi, Y., Aussel, H., Kneib, J. P., Ilbert, O., Mellier, Y., Salvato, M., Thompson, D., and Willott, C. J. (2009). Star Formation and Dust Obscuration at $z > 2$: Galaxies at the Dawn of Downsizing. *ApJ*, 698:L116–L120. [57](#)
- Panther, B., Heavens, A. F., and Jimenez, R. (2004). The mass function of the stellar component of galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. *MNRAS*, 355:764–768. [17](#)
- Panther, B., Jimenez, R., Heavens, A. F., and Charlot, S. (2007). The star formation histories of galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. *MNRAS*, 378:1550–1564. [2](#), [17](#)
- Papovich, C., Finkelstein, S. L., Ferguson, H. C., Lotz, J. M., and Giavalisco, M. (2011). The rising star formation histories of distant galaxies and implications for gas accretion with time. *MNRAS*, 412:1123–1136. [10](#), [80](#), [82](#)
- Pearson, W. J., Wang, L., Hurley, P. D., Malek, K., Buat, V., Burgarella, D., Farrah, D., Oliver, S. J., Smith, D. J. B., and van der Tak, F. F. S. (2018). Main sequence of star forming galaxies beyond the Herschel confusion limit. *ArXiv e-prints*. [4](#), [58](#), [59](#)
- Peng, Y.-j., Lilly, S. J., Kovač, K., Bolzonella, M., Pozzetti, L., Renzini, A., Zamorani, G., Ilbert, O., Knobel, C., Iovino, A., Maier, C., Cucciati, O., Tasca, L., Carollo, C. M., Silverman, J., Kampczyk, P., de Ravel, L., Sanders, D., Scoville, N., Contini, T., Mainieri, V., Scodreggio, M., Kneib, J.-P., Le Fèvre, O., Bardelli, S., Bongiorno, A., Caputi, K., Coppa, G., de la Torre, S., Franzetti, P., Garilli, B., Lamareille, F., Le Borgne, J.-F., Le Brun, V., Mignoli, M., Perez Montero, E., Pello, R., Ricciardelli, E., Tanaka, M., Tresse, L., Vergani, D., Welikala, N., Zucca, E., Oesch, P., Abbas, U., Barnes, L., Bordoloi, R., Bottini, D., Cappi, A., Cassata, P., Cimatti, A., Fumana, M., Hasinger, G., Koekemoer, A., Leauthaud, A., Maccagni, D., Marinoni, C., McCracken, H., Memeo, P., Meneux, B., Nair, P., Porciani, C., Presotto, V., and Scaramella, R. (2010). Mass and Environment as Drivers of Galaxy Evolution in SDSS and zCOSMOS and the Origin of the Schechter Function. *ApJ*, 721:193–221. [2](#), [10](#), [17](#), [59](#), [80](#), [82](#)
- Peng, Y.-j., Lilly, S. J., Renzini, A., and Carollo, M. (2012). Mass and Environment as Drivers of Galaxy Evolution. II. The Quenching of Satellite Galaxies as the Origin of Environmental Effects. *ApJ*, 757:4. [10](#)

-
- Pérez, E., Cid Fernandes, R., González Delgado, R. M., García-Benito, R., Sánchez, S. F., Husemann, B., Mast, D., Rodón, J. R., Kupko, D., Backsmann, N., de Amorim, A. L., van de Ven, G., Walcher, J., Wisotzki, L., Cortijo-Ferrero, C., and CALIFA Collaboration (2013). The Evolution of Galaxies Resolved in Space and Time: A View of Inside-out Growth from the CALIFA Survey. *ApJ*, 764:L1. [2](#), [17](#)
- Pérez-González, P. G., Rieke, G. H., Villar, V., Barro, G., Blaylock, M., Egami, E., Gallego, J., Gil de Paz, A., Pascual, S., Zamorano, J., and Donley, J. L. (2008). The Stellar Mass Assembly of Galaxies from $z = 0$ to $z = 4$: Analysis of a Sample Selected in the Rest-Frame Near-Infrared with Spitzer. *ApJ*, 675:234–261. [45](#)
- Pffor, J., Dickinson, M., Kartaltepe, J. S., Inami, H., Penner, K., and CANDELS Collaboration (2014). Comparing SFR estimators for IR-luminous galaxies at $z \sim 2$ in CANDELS. In *American Astronomical Society Meeting Abstracts #223*, volume 223 of *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, page 145.09. [54](#)
- Pope, A., Montaña, A., Battisti, A., Limousin, M., Marchesini, D., Wilson, G. W., Alberts, S., Aretxaga, I., Avila-Reese, V., Ramón Bermejo-Climent, J., Brammer, G., Bravo-Alfaro, H., Calzetti, D., Chary, R.-R., Cybulski, R., Gialalisco, M., Hughes, D., Kado-Fong, E., Keller, E., Kirkpatrick, A., Labbe, I., Lange-Vagle, D., Lowenthal, J., Murphy, E., Oesch, P., Rosa Gonzalez, D., Sánchez-Argüelles, D., Shipley, H., Stefanon, M., Vega, O., Whitaker, K., Williams, C. C., Yun, M., Zavala, J. A., and Zeballos, M. (2017). Early Science with the Large Millimeter Telescope: Detection of Dust Emission in Multiple Images of a Normal Galaxy at $z > 4$ Lensed by a Frontier Fields Cluster. *ApJ*, 838:137. [9](#)
- Pozzetti, L., Bolzonella, M., Zucca, E., Zamorani, G., Lilly, S., Renzini, A., Moresco, M., Mignoli, M., Cassata, P., Tasca, L., Lamareille, F., Maier, C., Meneux, B., Halliday, C., Oesch, P., Vergani, D., Caputi, K., Kovač, K., Cimatti, A., Cucciati, O., Iovino, A., Peng, Y., Carollo, M., Contini, T., Kneib, J.-P., Le Fèvre, O., Mainieri, V., Scodreggio, M., Bardelli, S., Bongiorno, A., Coppa, G., de la Torre, S., de Ravel, L., Franzetti, P., Garilli, B., Kampczyk, P., Knobel, C., Le Borgne, J.-F., Le Brun, V., Pellò, R., Perez Montero, E., Ricciardelli, E., Silverman, J. D., Tanaka, M., Tresse, L., Abbas, U., Bottini, D., Cappi, A., Guzzo, L., Koekemoer, A. M., Leauthaud, A., Maccagni, D., Marinoni, C., McCracken, H. J., Memeo, P., Porciani, C., Scaramella, R., Scarlata, C., and Scoville, N. (2010). zCOSMOS - 10k-bright spectroscopic sample. The bimodality in the galaxy stellar mass function: exploring its evolution with redshift. *A&A*, 523:A13. [7](#), [64](#)
- Reddy, N. A. and Steidel, C. C. (2009). A Steep Faint-End Slope of the UV Luminosity Function at $z \sim 2-3$: Implications for the Global Stellar Mass Density and Star Formation in Low-Mass Halos. *ApJ*, 692:778–803. [12](#)
- Renzini, A. and Peng, Y.-j. (2015). An Objective Definition for the Main Sequence of Star-forming Galaxies. *ApJ*, 801:L29. [3](#), [72](#)
-

- Rodighiero, G., Cimatti, A., Gruppioni, C., Popesso, P., Andreani, P., Altieri, B., Aussel, H., Berta, S., Bongiovanni, A., Brisbin, D., Cava, A., Cepa, J., Daddi, E., Dominguez-Sanchez, H., Elbaz, D., Fontana, A., Förster Schreiber, N., Franceschini, A., Genzel, R., Grazian, A., Lutz, D., Magdis, G., Magliocchetti, M., Magnelli, B., Maiolino, R., Mancini, C., Nordon, R., Perez Garcia, A. M., Poglitsch, A., Santini, P., Sanchez-Portal, M., Pozzi, F., Riguccini, L., Saintonge, A., Shao, L., Sturm, E., Tacconi, L., Valtchanov, I., Wetzstein, M., and Wierprecht, E. (2010). The first Herschel view of the mass-SFR link in high-z galaxies. *A&A*, 518:L25. [3](#)
- Rodighiero, G., Daddi, E., Baronchelli, I., Cimatti, A., Renzini, A., Aussel, H., Popesso, P., Lutz, D., Andreani, P., Berta, S., Cava, A., Elbaz, D., Feltre, A., Fontana, A., Förster Schreiber, N. M., Franceschini, A., Genzel, R., Grazian, A., Gruppioni, C., Ilbert, O., Le Floch, E., Magdis, G., Magliocchetti, M., Magnelli, B., Maiolino, R., McCracken, H., Nordon, R., Poglitsch, A., Santini, P., Pozzi, F., Riguccini, L., Tacconi, L. J., Wuyts, S., and Zamorani, G. (2011). The Lesser Role of Starbursts in Star Formation at $z = 2$. *ApJ*, 739:L40. [8](#)
- Rodriguez-Gomez, V., Pillepich, A., Sales, L. V., Genel, S., Vogelsberger, M., Zhu, Q., Wellons, S., Nelson, D., Torrey, P., Springel, V., Ma, C.-P., and Hernquist, L. (2016). The stellar mass assembly of galaxies in the Illustris simulation: growth by mergers and the spatial distribution of accreted stars. *MNRAS*, 458:2371–2390. [11](#), [78](#), [85](#)
- Rodríguez-Puebla, A., Avila-Reese, V., Yang, X., Foucaud, S., Drory, N., and Jing, Y. P. (2015). The Stellar-to-Halo Mass Relation of Local Galaxies Segregates by Color. *ApJ*, 799:130. [26](#)
- Rodríguez-Puebla, A., Primack, J. R., Avila-Reese, V., and Faber, S. M. (2017). Constraining the galaxy-halo connection over the last 13.3 Gyr: star formation histories, galaxy mergers and structural properties. *MNRAS*, 470:651–687. [3](#), [11](#), [30](#), [31](#), [44](#), [45](#), [46](#), [47](#), [62](#), [63](#), [64](#), [65](#), [78](#), [85](#)
- Salim, S., Rich, R. M., Charlot, S., Brinchmann, J., Johnson, B. D., Schiminovich, D., Seibert, M., Mallery, R., Heckman, T. M., Forster, K., Friedman, P. G., Martin, D. C., Morrissey, P., Neff, S. G., Small, T., Wyder, T. K., Bianchi, L., Donas, J., Lee, Y.-W., Madore, B. F., Milliard, B., Szalay, A. S., Welsh, B. Y., and Yi, S. K. (2007). UV Star Formation Rates in the Local Universe. *ApJS*, 173:267–292. [3](#)
- Sánchez, S. F., Kennicutt, R. C., Gil de Paz, A., van de Ven, G., Vílchez, J. M., Wisotzki, L., Walcher, C. J., Mast, D., Aguerra, J. A. L., Albiol-Pérez, S., Alonso-Herrero, A., Alves, J., Bakos, J., Bartáková, T., Bland-Hawthorn, J., Boselli, A., Bomans, D. J., Castillo-Morales, A., Cortijo-Ferrero, C., de Lorenzo-Cáceres, A., Del Olmo, A., Dettmar, R.-J., Díaz, A., Ellis, S., Falcón-Barroso, J., Flores, H., Gallazzi, A., García-Lorenzo, B., González Delgado, R., Gruel, N., Haines, T., Hao, C., Husemann, B., Iglésias-Páramo, J., Jahnke, K., Johnson, B., Jungwiert, B., Kalinova, V., Kehrig, C., Kupko, D., López-Sánchez, Á. R., Lyubenova, M., Marino, R. A., Mármol-Queraltó,

-
- E., Márquez, I., Masegosa, J., Meidt, S., Mendez-Abreu, J., Monreal-Ibero, A., Montijo, C., Mourão, A. M., Palacios-Navarro, G., Papaderos, P., Pasquali, A., Peletier, R., Pérez, E., Pérez, I., Quirrenbach, A., Relaño, M., Rosales-Ortega, F. F., Roth, M. M., Ruiz-Lara, T., Sánchez-Blázquez, P., Sengupta, C., Singh, R., Stanishv, V., Trager, S. C., Vazdekis, A., Viironen, K., Wild, V., Zibetti, S., and Ziegler, B. (2012). CALIFA, the Calar Alto Legacy Integral Field Area survey. I. Survey presentation. *A&A*, 538:A8. [2](#)
- Schawinski, K., Urry, C. M., Simmons, B. D., Fortson, L., Kaviraj, S., Keel, W. C., Lintott, C. J., Masters, K. L., Nichol, R. C., Sarzi, M., Skibba, R., Treister, E., Willett, K. W., Wong, O. I., and Yi, S. K. (2014). The green valley is a red herring: Galaxy Zoo reveals two evolutionary pathways towards quenching of star formation in early- and late-type galaxies. *MNRAS*, 440:889–907. [7](#)
- Schawinski, K., Urry, C. M., Virani, S., Coppi, P., Bamford, S. P., Treister, E., Lintott, C. J., Sarzi, M., Keel, W. C., Kaviraj, S., Cardamone, C. N., Masters, K. L., Ross, N. P., Andreescu, D., Murray, P., Nichol, R. C., Raddick, M. J., Slosar, A., Szalay, A. S., Thomas, D., and Vandenberg, J. (2010). Galaxy Zoo: The Fundamentally Different Co-Evolution of Supermassive Black Holes and Their Early- and Late-Type Host Galaxies. *ApJ*, 711:284–302. [7](#)
- Schmidt, M. (1968). Space Distribution and Luminosity Functions of Quasi-Stellar Radio Sources. *ApJ*, 151:393. [26](#)
- Schreiber, C., Pannella, M., Elbaz, D., Béthermin, M., Inami, H., Dickinson, M., Magagnoli, B., Wang, T., Aussel, H., Daddi, E., Juneau, S., Shu, X., Sargent, M. T., Buat, V., Faber, S. M., Ferguson, H. C., Giavalisco, M., Koekemoer, A. M., Magdis, G., Morrison, G. E., Papovich, C., Santini, P., and Scott, D. (2015). The Herschel view of the dominant mode of galaxy growth from $z = 4$ to the present day. *A&A*, 575:A74. [4](#), [5](#), [8](#)
- Scoville, N., Abraham, R. G., Aussel, H., Barnes, J. E., Benson, A., Blain, A. W., Calzetti, D., Comastri, A., Capak, P., Carilli, C., Carlstrom, J. E., Carollo, C. M., Colbert, J., Daddi, E., Ellis, R. S., Elvis, M., Ewald, S. P., Fall, M., Franceschini, A., Giavalisco, M., Green, W., Griffiths, R. E., Guzzo, L., Hasinger, G., Impey, C., Kneib, J.-P., Koda, J., Koekemoer, A., Lefevre, O., Lilly, S., Liu, C. T., McCracken, H. J., Massey, R., Mellier, Y., Miyazaki, S., Mobasher, B., Mould, J., Norman, C., Refregier, A., Renzini, A., Rhodes, J., Rich, M., Sanders, D. B., Schiminovich, D., Schinnerer, E., Scodreggio, M., Sheth, K., Shopbell, P. L., Taniguchi, Y., Tyson, N. D., Urry, C. M., Van Waerbeke, L., Vettolani, P., White, S. D. M., and Yan, L. (2007). COSMOS: Hubble Space Telescope Observations. *ApJS*, 172:38–45. [2](#)
- Simha, V., Weinberg, D. H., Conroy, C., Dave, R., Fardal, M., Katz, N., and Oppenheimer, B. D. (2014). Parametrising Star Formation Histories. *ArXiv e-prints*. [22](#), [23](#)
-

BIBLIOGRAFÍA

- Speagle, J. S., Steinhardt, C. L., Capak, P. L., and Silverman, J. D. (2014). A Highly Consistent Framework for the Evolution of the Star-Forming "Main Sequence" from $z \sim 0-6$. *ApJS*, 214:15. [4](#), [47](#), [54](#), [58](#), [59](#), [85](#)
- Steinhardt, C. L., Yurk, D., and Capak, P. (2017). Reconciling mass functions with the star-forming main sequence via mergers. *MNRAS*, 468:849–856. [10](#), [11](#), [80](#), [83](#)
- Tinsley, B. M. (1972). Galactic Evolution. *A&A*, 20:383. [20](#)
- Tojeiro, R., Wilkins, S., Heavens, A. F., Panter, B., and Jimenez, R. (2009). A Public Catalog of Stellar Masses, Star Formation and Metallicity Histories, and Dust Content from the Sloan Digital Sky Survey using VESPA. *ApJS*, 185:1–19. [7](#)
- Tomczak, A. R., Quadri, R. F., Tran, K.-V. H., Labbé, I., Straatman, C. M. S., Papovich, C., Glazebrook, K., Allen, R., Brammer, G. B., Cowley, M., Dickinson, M., Elbaz, D., Inami, H., Kacprzak, G. G., Morrison, G. E., Nanayakkara, T., Persson, S. E., Rees, G. A., Salmon, B., Schreiber, C., Spitler, L. R., and Whitaker, K. E. (2016). The SFR-Ms Relation and Empirical Star-Formation Histories from ZFOURGE* at $0.5 < z < 4$. *ApJ*, 817:118. [3](#), [4](#), [5](#), [6](#), [10](#), [12](#)
- Tomczak, A. R., Quadri, R. F., Tran, K.-V. H., Labbé, I., Straatman, C. M. S., Papovich, C., Glazebrook, K., Allen, R., Brammer, G. B., Kacprzak, G. G., Kawinwanichakij, L., Kelson, D. D., McCarthy, P. J., Mehrrens, N., Monson, A. J., Persson, S. E., Spitler, L. R., Tilvi, V., and van Dokkum, P. (2014). Galaxy Stellar Mass Functions from ZFOURGE/CANDELS: An Excess of Low-mass Galaxies since $z = 2$ and the Rapid Buildup of Quiescent Galaxies. *ApJ*, 783:85. [61](#), [62](#), [63](#)
- van Dokkum, P. G., Leja, J., Nelson, E. J., Patel, S., Skelton, R. E., Momcheva, I., Brammer, G., Whitaker, K. E., Lundgren, B., Fumagalli, M., Conroy, C., Förster Schreiber, N., Franx, M., Kriek, M., Labbé, I., Marchesini, D., Rix, H.-W., van der Wel, A., and Wuyts, S. (2013). The Assembly of Milky-Way-like Galaxies Since $z \sim 2.5$. *ApJ*, 771:L35. [17](#)
- Vulcani, B., Poggianti, B. M., Fritz, J., Fasano, G., Moretti, A., Calvi, R., and Paccagnella, A. (2015). From Blue Star-forming to Red Passive: Galaxies in Transition in Different Environments. *ApJ*, 798:52. [7](#)
- Whitaker, K. E., Franx, M., Leja, J., van Dokkum, P. G., Henry, A., Skelton, R. E., Fumagalli, M., Momcheva, I. G., Brammer, G. B., Labbé, I., Nelson, E. J., and Rigby, J. R. (2014). Constraining the Low-mass Slope of the Star Formation Sequence at $0.5 < z < 2.5$. *ApJ*, 795:104. [3](#), [4](#), [11](#), [80](#)
- Wilkins, S. M., Trentham, N., and Hopkins, A. M. (2008). The evolution of stellar mass and the implied star formation history. *MNRAS*, 385:687–694. [12](#)
- Williams, R. J., Quadri, R. F., and Franx, M. (2011). The Diminishing Importance of Major Galaxy Mergers at Higher Redshifts. *ApJ*, 738:L25. [57](#)

- Wuyts, S., Labbé, I., Franx, M., Rudnick, G., van Dokkum, P. G., Fazio, G. G., Förster Schreiber, N. M., Huang, J., Moorwood, A. F. M., Rix, H.-W., Röttgering, H., and van der Werf, P. (2007). What Do We Learn from IRAC Observations of Galaxies at $2 < z < 3.5$? *ApJ*, 655:51–65. [57](#)
- Yang, X., Mo, H. J., van den Bosch, F. C., Zhang, Y., and Han, J. (2012). Evolution of the Galaxy-Dark Matter Connection and the Assembly of Galaxies in Dark Matter Halos. *ApJ*, 752:41. [26](#)
- Zavala, J. A., Montaña, A., Hughes, D. H., Yun, M. S., Ivison, R. J., Valiante, E., Wilner, D., Spilker, J., Aretxaga, I., Eales, S., Avila-Reese, V., Chávez, M., Cooray, A., Dannerbauer, H., Dunlop, J. S., Dunne, L., Gómez-Ruiz, A. I., Michałowski, M. J., Narayanan, G., Nayyeri, H., Oteo, I., Rosa González, D., Sánchez-Argüelles, D., Schloerb, F. P., Serjeant, S., Smith, M. W. L., Terlevich, E., Vega, O., Villalba, A., van der Werf, P., Wilson, G. W., and Zeballos, M. (2018). A dusty star-forming galaxy at $z = 6$ revealed by strong gravitational lensing. *Nature Astronomy*, 2:56–62. [9](#)