



**CENTRO DE ASTROBIOLOGÍA**



**CSIC**  
Consejo Superior de Investigaciones Científicas



**INTA**  
Instituto Nacional de  
Técnica Aeroespacial

# **Emisión Lyman $\alpha$ en galaxias del Universo Primordial**

Memoria de prácticas

Estudiante: Sonia Torrejón de Pablos

Tutor del CAB: J. Miguel Mas-Hesse

Tutor académico del centro: Jesús Gallego Maestro

# Índice

<b>Lista de acrónimos y abreviaturas</b> .....	3
<b>1. Introducción</b> .....	4
<b>2. Modelos</b> .....	5
2.1 <i>Modelo 1 (Otí-Floranes y Mas-Hesse, 2010)</i> .....	5
2.2 <i>Modelo BPASS</i> .....	5
<b>3. Resultados</b> .....	6
3.1 <i>Modelo 1 (Otí-Floranes y Mas-Hesse, 2010)</i> .....	6
3.2 <i>Modelo BPASS</i> .....	8
3.3 <i>Comparación de modelos</i> .....	10
<b>4. Comparación de modelos con datos observacionales</b> .....	12
<b>5. Discusión y conclusiones</b> .....	15
<b>6. Bibliografía</b> .....	16
<b>7. Apéndice (Tablas de datos)</b> .....	17

## Lista de acrónimos y abreviaturas

- AGN: núcleo activo de galaxia
- EB: *extended burst* (formación continuada)
- $E_{B-V}$ : exceso de color
- EW: Anchura equivalente
- H: Hidrógeno
- HI: Hidrógeno neutro
- IB: *instantaneous burst* (formación instantánea)
- IGM: Medio intergaláctico
- IMF: Función de masa inicial
- ISM: Medio interestelar
- $Ly\alpha$ : Lyman alfa
- $N_{LyC}$ : Número de fotones ionizantes
- SED: Distribución espectral de energía
- SFH: Historia de formación estelar
- SFR: Tasa de formación estelar
- $z$ : *Redshift* (desplazamiento al rojo)

# 1. Introducción

La línea Ly $\alpha$  del HI es en principio la más brillante que emiten las galaxias que presentan intensos episodios de formación estelar. Presenta una longitud de onda en el ultravioleta de 1216 Å, y se produce por el decaimiento espontáneo entre niveles de energía de  $n=2 \rightarrow n=1$ , donde  $n$  es el número cuántico principal.

Esta línea es visible en el óptico para galaxias a alto *redshift* ( $z > 2$ ), pero es fuertemente sensible a los efectos de la extinción por los granos de polvo y al *scattering* resonante por los átomos de HI, que provocan su destrucción. Se utiliza como trazador de la SFR en estas galaxias, puesto que las estrellas jóvenes muy masivas (clases O, B) emiten fuertemente en el ultravioleta y tienen un intenso poder ionizante. Bajo esta perspectiva, el cálculo de la anchura equivalente de la línea Ly $\alpha$  es el principal objetivo de este estudio para tratar de explicar la correlación que se encuentra entre su valor y la fracción de fotones Ly $\alpha$  que se destruyen. La anchura equivalente permite conocer la intensidad relativa de los brotes de formación estelar y relaciona su emisión con el continuo producido por las estrellas de la galaxia. Una ventaja de la anchura equivalente de Ly $\alpha$  es que es un parámetro independiente de la distancia a la que se encuentran las galaxias, lo que permite obtener información sobre su estado evolutivo sin verse afectada por incertidumbres en la distancia.

La fracción de escape,  $f_{esc}$ , da cuenta de la proporción entre la intensidad de la línea que se observa y su intensidad intrínseca. Atendiendo a lo anterior, esta debe ser superior en galaxias lejanas que en galaxias cercanas, más pobres en polvo. Esta anticorrelación (Hayes et al., 2011) se muestra en la Figura 1: La fracción de escape aumenta con el *redshift*, mientras que la extinción disminuye.

Además, se ha de tener en cuenta que una parte de los fotones del continuo de Lyman ( $\lambda < 912$  Å) con capacidad de ionizar el H se destruyen y no participan en la ionización debido a la presencia de polvo. En galaxias cercanas, la cantidad de polvo es muy grande y se asume que un 30% de los fotones ionizantes se destruyen. Sin embargo, en galaxias lejanas esta cantidad es menor, puesto que los brotes de formación estelar han barrido el medio, y se asume que el 100% de los fotones son ionizantes.

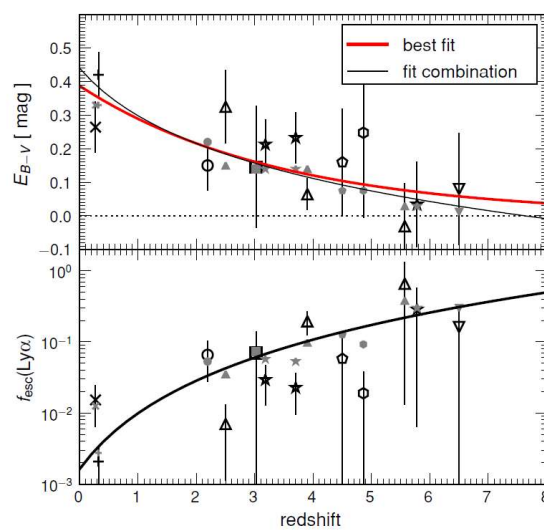


Fig. 1. Comparación entre la  $f_{esc}$  y el polvo en función del *redshift* (Hayes et al., 2011)

Para poder estudiar la anchura equivalente intrínseca de la línea Ly $\alpha$  se utilizan diferentes modelos de síntesis evolutiva. Estos permiten predecir la SED que emite una galaxia e inferir sus propiedades físicas como la SFR o su estado evolutivo. Estos modelos asumen ciertos parámetros físicos, como la evolución estelar, las atmósferas estelares, la IMF, la SFH, la emisión nebular, la atenuación y la opacidad del IGM. Además, se distingue entre dos escenarios de formación estelar: instantáneo (IB) y continuo (EB). El primero se corresponde con grupos de estrellas formadas al mismo tiempo, mientras que el segundo se corresponde con grupos de estrellas formadas de manera continua a lo largo del tiempo. En este estudio, se asumen tanto modelos de evolución estelar de estrellas individuales como de sistemas binarios, y una IMF de Salpeter. En todos los modelos que se usan, se establece una diferencia entre las propiedades de las galaxias con distintos escenarios de formación estelar y para distintas metalicidades. En concreto, se usan  $Z=0.02$  (solar) y  $Z=0.008$ .

## 2. Modelos

En este estudio se utilizan dos modelos diferentes que se recogen en los estudios de Oti-Floranes y Mas-Hesse, (2010); y Eldridge et al., (2017, de aquí en adelante modelo BPASS). Ninguno de estos modelos genera en principio la anchura equivalente de la línea Ly $\alpha$ .

### 2.1 Modelo 1 (Oti-Floranes y Mas-Hesse, 2010)

Presenta la evolución de diversos parámetros considerando únicamente estrellas individuales. Además, asume que un 30% de los fotones ionizantes son destruidos, de modo que, por las razones descritas anteriormente, se corrige este número dividiéndolo por un factor 0.7. Se representan las evoluciones con el tiempo de  $N_{\text{LyC}}$  (fotones/s) y la luminosidad del continuo ( $\text{erg s}^{-1} \text{ \AA}^{-1}$ ) a 1500, 2000 y 3500  $\text{\AA}$  normalizada a  $1 M_{\odot}$  para las dos diferentes metalicidades, tanto para modelos IB como EB. Este modelo no predice el valor de la luminosidad del continuo a 1200  $\text{\AA}$ , de modo que se tuvo que calcular el factor de conversión entre las luminosidades a 1500 y 1200  $\text{\AA}$  mediante las predicciones de los modelos Starburst99, (1999), basados en hipótesis similares.

Finalmente, se calcula la luminosidad Ly $\alpha$  según las ecuaciones:

$$L(\text{H}\alpha) = 1.36 \cdot 10^{-12} N_{\text{LyC}} \text{ erg s}^{-1} \quad (1)$$

$$L(\text{Ly}\alpha) = 8.7 L(\text{H}\alpha) \text{ erg s}^{-1} \quad (2)$$

Y la anchura equivalente por definición es:

$$\text{EW}(\text{Ly}\alpha) = \frac{L(\text{Ly}\alpha)}{L_{1200}} \quad (3)$$

### 2.2 Modelo BPASS

Introduce un factor importante a tener en cuenta a la hora de analizar la radiación ultravioleta en galaxias con formación estelar: la presencia de estrellas binarias. En estos sistemas puede ocurrir que, a medida que se consume el H, la estrella más masiva alcance el tamaño del lóbulo de Roche. Como consecuencia, se producen episodios de transferencia de masa desde la estrella más masiva (donante) a la menos masiva (receptora).

De esta forma, la presencia de estrellas masivas en las galaxias se alarga en el tiempo, así como su emisión. Según el modelo, incluso un 10% de estrellas binarias produce efectos notables en la evolución.

BPASS proporciona la distribución espectral (en  $L_{\odot} \text{ \AA}^{-1}$ ) para cada Angstrom desde 1 hasta 100000  $\text{\AA}$  ( $L_{\odot} = 3.848 \cdot 10^{26} \text{ J s}^{-1}$ ), normalizada a  $10^6 M_{\odot}$ . Para poder obtener la luminosidad del continuo a 1200  $\text{\AA}$ , afectado por la absorción estelar de  $\text{Ly}\alpha$ , se realiza un promedio entre los valores previos y posteriores al pico de absorción. La luminosidad y la anchura equivalente de  $\text{Ly}\alpha$  se obtienen a partir del flujo de fotones ionizantes, de la misma forma que en el modelo anterior.

Además, este modelo es más reciente, con una base física distinta y una abundante cantidad de datos. Debido a esto, la información que proporciona puede diferir ligeramente del modelo anterior aun considerando los mismos casos. BPASS da por separado los datos de estrellas individuales y los de sistemas binarios únicamente para modelos IB. Por tanto, se ha construido el modelo de formación continuada a partir del modelo de formación instantánea. Para ello, se realiza el sumatorio de los flujos multiplicados por el salto de tiempo, que en este caso es un paso fijo, pero en escala logarítmica:

$$F(\lambda, t) = f_0(\lambda) \Delta t_0 + \sum_i f_i(\lambda) \Delta t_i \quad \text{para } i \geq 0 \quad (4)$$

Donde  $f_0$  corresponde al flujo inicial en  $t_0 = 1 \text{ Myr}$

De esta forma se obtienen tanto la luminosidad  $\text{Ly}\alpha$  como la del continuo para cada intervalo de tiempo.

### 3. Resultados

#### 3.1 Modelo 1 (*Otí-Floranes y Mas-Hesse, 2010*)

La Figura 2 muestra los resultados obtenidos del cálculo de la luminosidad de la línea  $\text{Ly}\alpha$  y del continuo para los dos escenarios de formación estelar y para dos valores de la metalicidad.

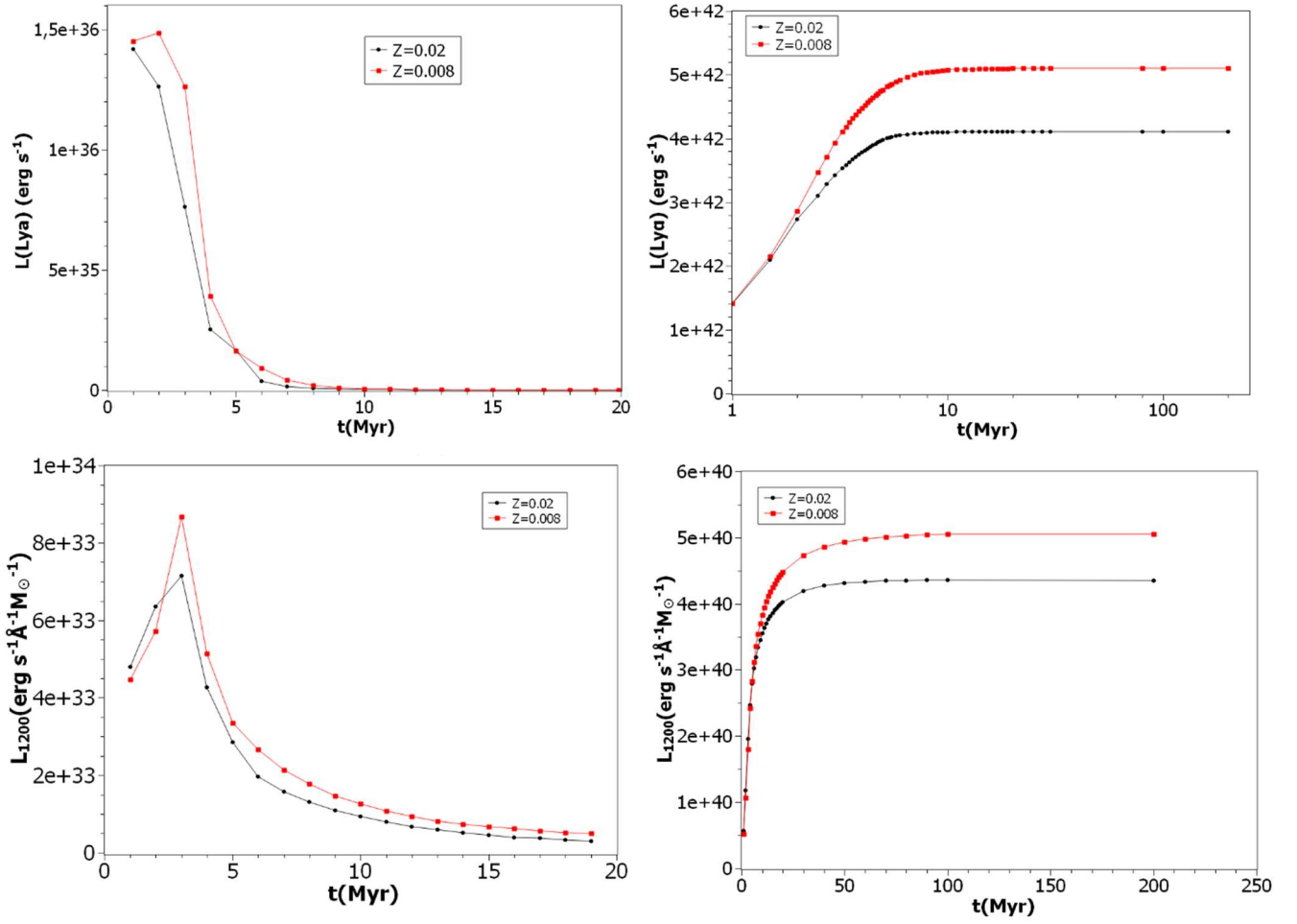


Fig. 2 Evolución de la luminosidad (arriba) y del continuo (abajo) para modelo IB (izquierda) y modelo EB (derecha)

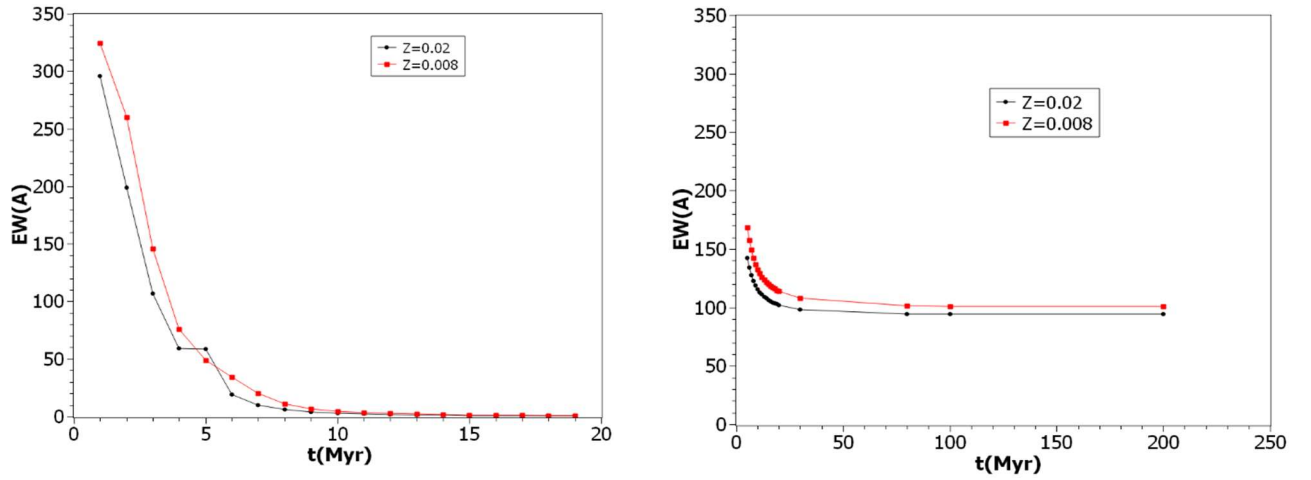


Fig. 3. Evolución de la anchura equivalente para modelo IB (izquierda) y modelo EB (derecha)

En el modelo IB se puede ver que como la vida de las estrellas masivas dura tan solo unos pocos millones de años, la anchura equivalente (Figura 3, izquierda) decrece fuertemente con la edad, hasta que se hace prácticamente cero a partir de unos 9 millones de años. En el caso de la metalicidad solar, hay un incremento del valor esperado de la anchura equivalente a los 5 millones de años. Esto se debe a que a esas edades se produce la formación de estrellas

Wolf-Rayet, que son muy ionizantes (ver Figura 4). Para la metalicidad subsolar esto no ocurre porque se forman menos estrellas de este tipo (Cerviño y Mas-Hesse, 1994).

El modelo EB muestra cómo se estabiliza la emisión en torno a los 30 millones de años debido a que constantemente mueren las estrellas masivas, pero se forman otras nuevas. Por esta razón se muestra la anchura equivalente a partir de  $t = 5$  Myr, puesto que el interés de este modelo no radica especialmente en los primeros millones de años.

En todos los casos, la anchura equivalente, la luminosidad y el continuo son mayores para metalicidades menores. Esto es debido a que las estrellas masivas con menores metalicidades permanecen durante más tiempo calientes porque evolucionan más lentamente que las que tienen metalicidades mayores, tal y como se muestra en la Figura 5 (Cerviño y Mas-Hesse, 1994).

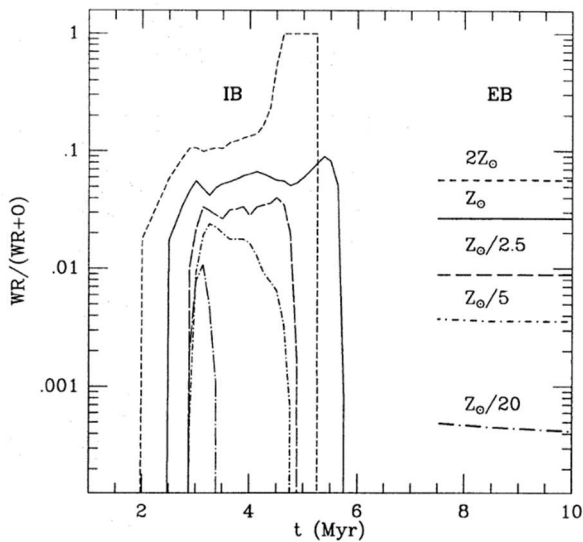


Fig. 4. Número de estrellas Wolf-Rayet en función de la metalicidad (Cerviño y Mas-Hesse, 1994)

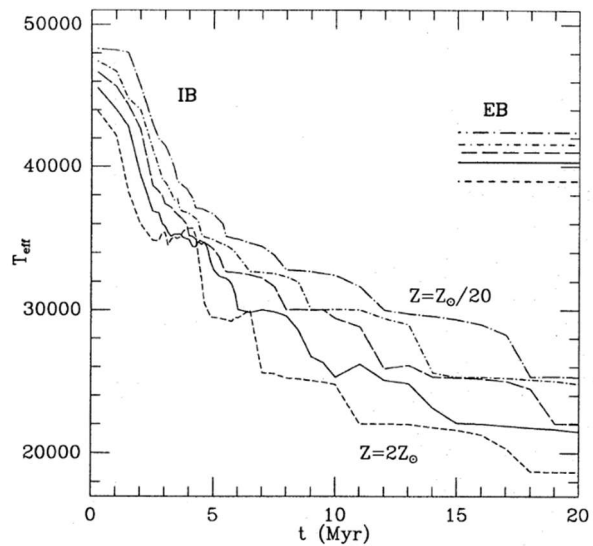


Fig. 5. Temperatura efectiva de la estrella para diferentes metalicidades (Cerviño y Mas-Hesse, 1994)

### 3.2 Modelo BPASS

La Figura 6 muestra los resultados obtenidos del cálculo de la anchura equivalente para el modelo IB. Para las dos metalicidades, la anchura equivalente tiende a cero más despacio al considerarse las binarias. Para la metalicidad solar aparece el pico de emisión debido a las estrellas Wolf-Rayet antes, en torno a los 3 millones de años.

Se enfatiza este resultado mediante la Figura 7, que muestra cómo la luminosidad  $L_{\alpha}$  desaparece en torno a los 25 millones de años cuando se consideran estrellas binarias, mientras que sin ellas lo hace a los 10 millones de años.



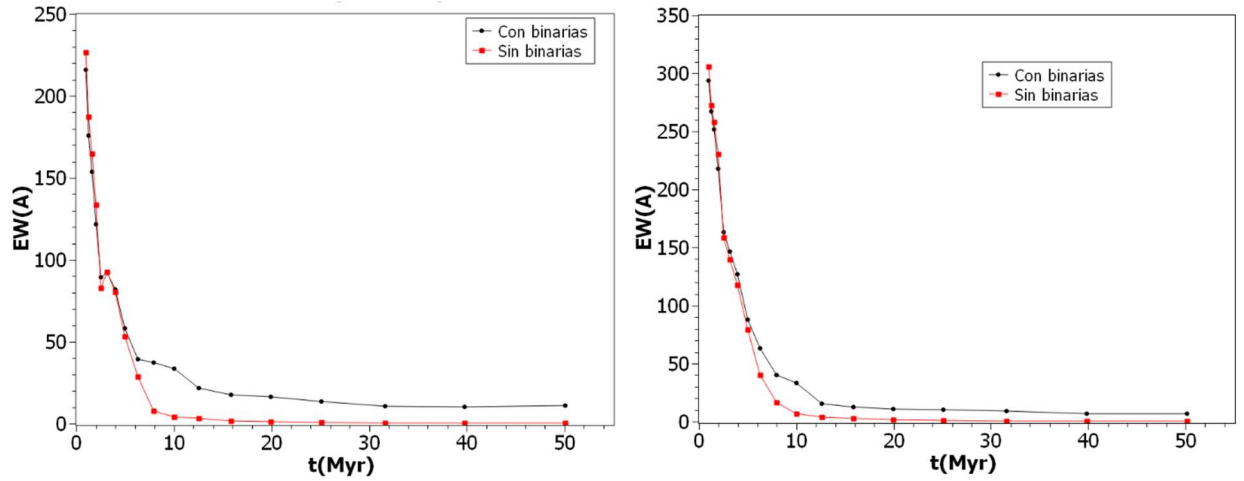


Fig. 6. Evolución de la anchura equivalente para  $Z=0.02$  (izquierda) y  $Z=0.008$  (derecha)

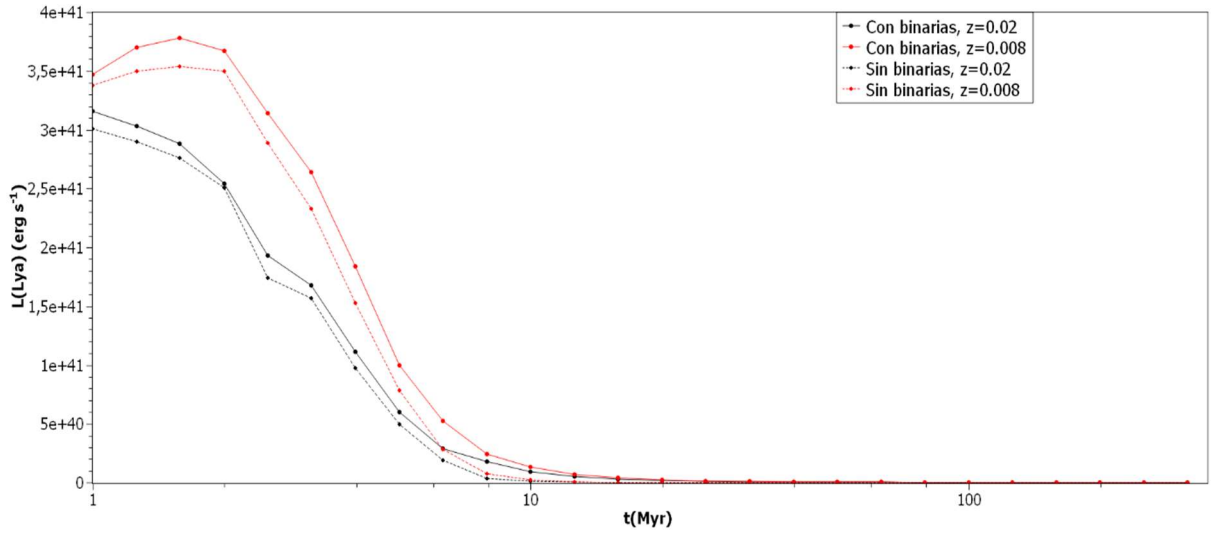


Fig. 7. Evolución de la luminosidad  $L\alpha$

A continuación, se muestran los resultados del cálculo de la luminosidad  $L\alpha$  y del continuo (Figura 8), y de la anchura equivalente para modelos EB (Figura 9). En este caso se puede ver que el efecto de las binarias depende fuertemente del escenario de formación estelar. Aunque se consideren, la producción continua de estrellas masivas individuales amortigua su efecto. Durante los primeros millones de años, no hay apenas diferencia entre considerar o no modelos con estrellas binarias. Pasados estos primeros millones de años, el efecto de la formación continuada incluso se impone sobre el efecto de estas.

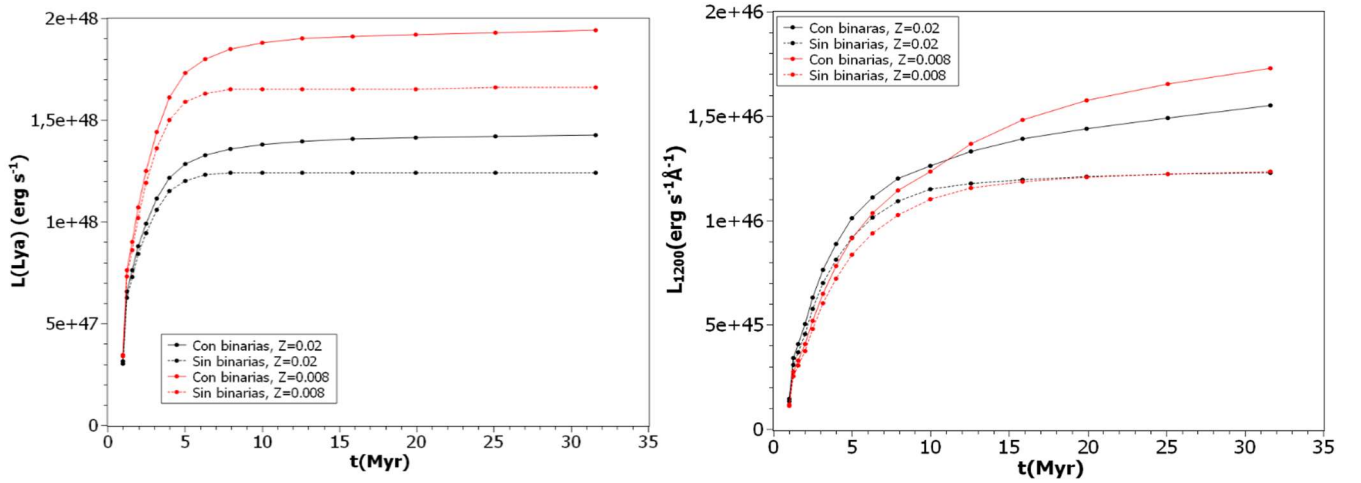


Fig. 8. Evolución de la luminosidad  $L\alpha$  (izquierda) y del continuo (derecha)

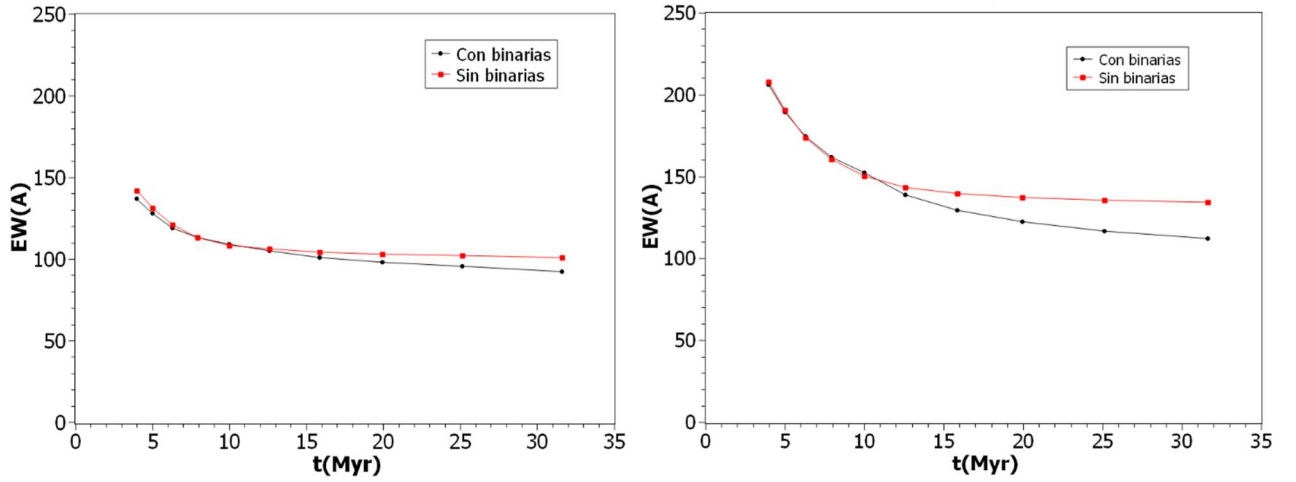


Fig. 9. Evolución de la anchura equivalente para  $Z=0.02$  (izquierda) y  $Z=0.008$  (derecha)

### 3.3 Comparación de modelos

Para aislar el efecto de las binarias de las diferencias propias de cada modelo, se comparan los dos modelos en las mismas condiciones: sin binarias. Esta comparación se muestra en la Figura 10. Para el modelo IB existen algunas diferencias entre estos dos modelos, sobre todo en la zona entre 3 y 5 millones de años, que es la zona que corresponde a la formación de estrellas Wolf-Rayet. No obstante, coinciden en que a los 10 millones de años la anchura equivalente tiende a cero. En el caso del modelo EB, para  $Z=Z_{\odot}$  las curvas son bastante similares y se estabilizan en torno a los 100 Å a partir de los 15 Myr. Para  $Z=0.008$  la diferencia entre las curvas es mayor. Estas diferencias en general se deben a las diferencias entre los parámetros físicos que se han tomado para cada modelo.

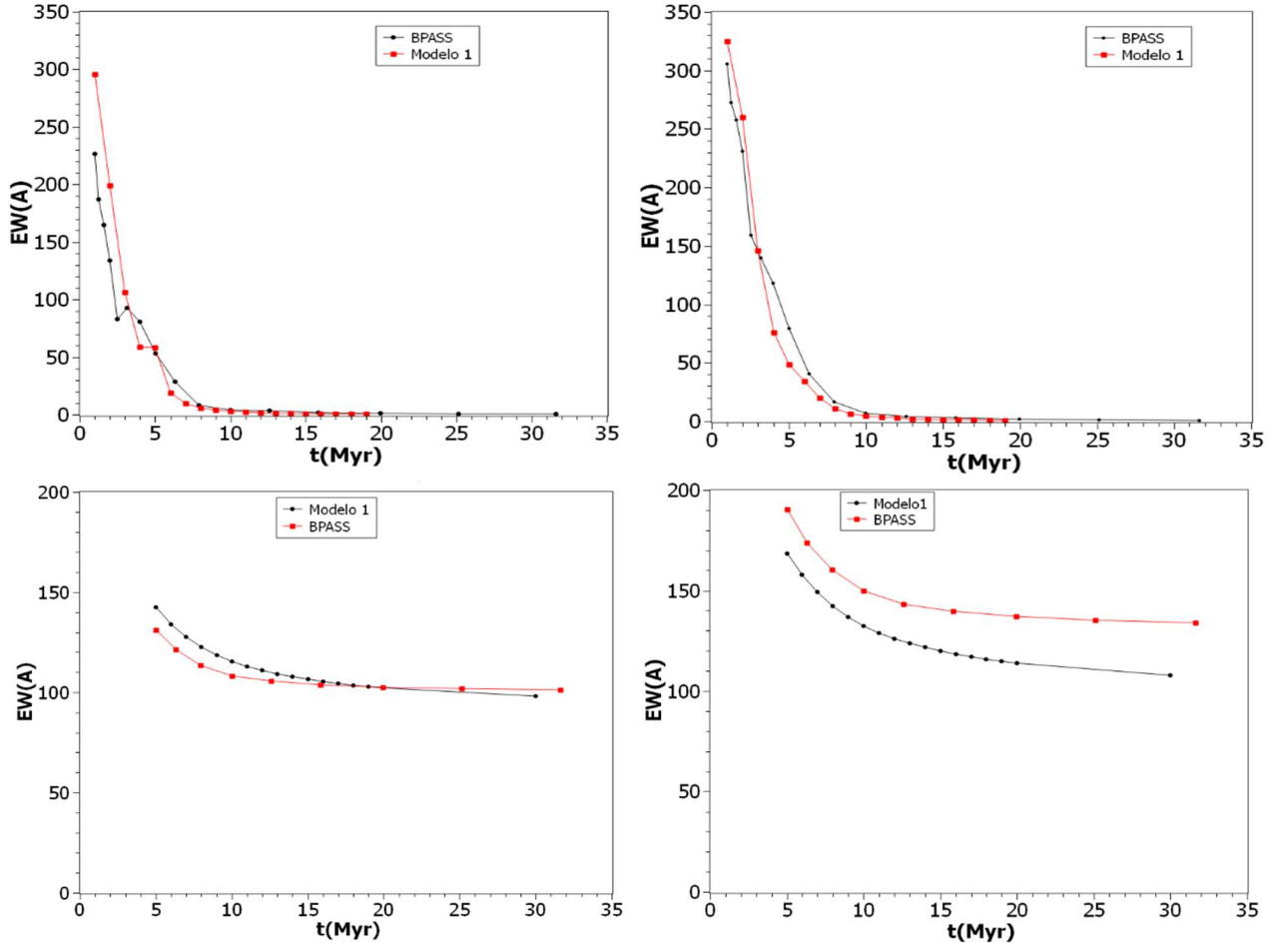


Fig. 10. Comparación de los modelos sin binarias a  $Z=0.02$  (izquierda) y  $Z=0.008$  (derecha), para modelo IB (arriba) y modelo EB (abajo)

A continuación, se muestra la comparación (Figura 11) entre el Modelo 1 y el modelo BPASS con binarias.

Para el modelo IB, a partir de unos pocos millones de años, el efecto de las binarias aumenta el tiempo que tarda la anchura equivalente en tender a cero. Durante los primeros millones de años son muy similares puesto que todavía no se han producido los episodios de transferencia de masa en las binarias.

En el caso del modelo EB, para las dos metalicidades las curvas son bastante similares por las mismas razones descritas anteriormente. El efecto que tienen las binarias sobre la anchura equivalente de  $\text{Ly}\alpha$  en el contexto de la formación estelar continuada es escaso o nulo.

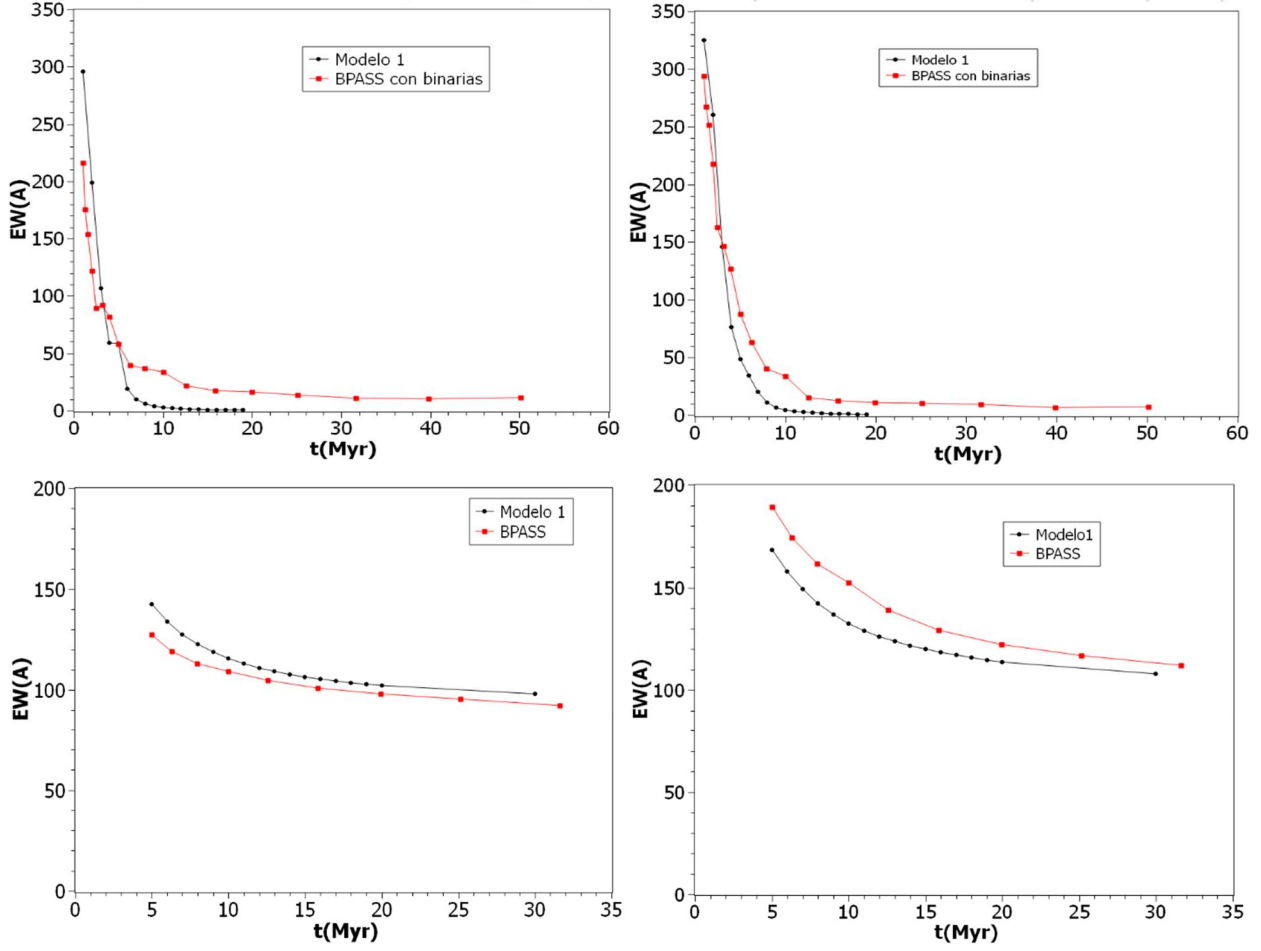


Fig. 11. Comparación Modelo 1 y BPASS con binarias, a  $Z=0.02$  (izquierda) y  $Z=0.008$  (derecha) para modelo IB (arriba) y modelo EB (abajo)

#### 4. Comparación de modelos con datos observacionales

Sobral y Matthee, (2018), encuentran de manera observacional que existe una buena correlación entre la fracción de escape de  $\text{Ly}\alpha$  y la anchura equivalente observada (Figura 12). Por tanto, deducen una calibración empírica que permite el cálculo de la fracción de escape en función de la anchura equivalente observada. Esta calibración se ajusta bastante bien a una recta de la forma:

$$f_{\text{esc}}(\text{Ly}_\alpha) = 0.0048 \text{EW}_0 \pm 0.05 \quad (5)$$

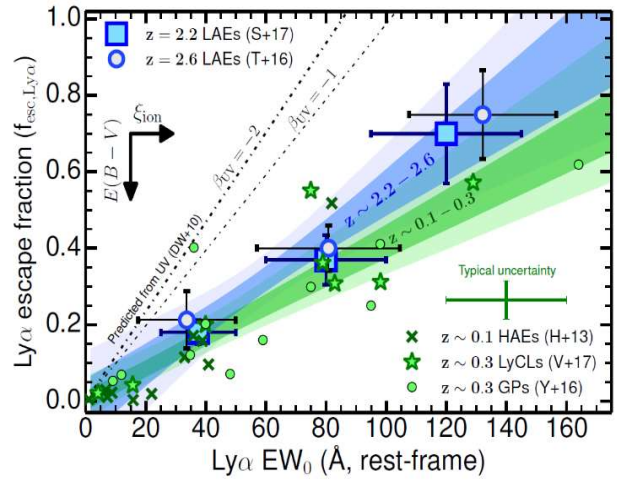


Fig. 12. Relación  $f_{\text{esc}, \text{Ly}\alpha}$  y  $\text{EW}_0$  para muestras de galaxias a  $z=2.2$  y  $z=2.6$  (Sobral y Matthee, 2018)

La Figura 12 muestra la fracción de escape medida frente a la anchura equivalente observada para varias muestras de galaxias. Se puede medir la fracción de escape de diferentes formas según el *redshift* al que se encuentren las galaxias. Para galaxias hasta  $z \sim 2.2$ , se hace comparando la cantidad de fotones Ly $\alpha$  observados con los que deberían verse si no se destruyese una parte de ellos, comparando con la luminosidad de la línea H $\alpha$ . Para ello, es preciso conocer el efecto del polvo en las galaxias, que se deduce a partir del cociente entre las líneas H $\alpha$  y H $\beta$ . Suponiendo que 100% de los fotones no se destruye, la relación entre las luminosidades Ly $\alpha$  y H $\alpha$  es:

$$L(\text{Ly}\alpha) \sim 8.7 L(\text{H}\alpha) \quad (6)$$

Para estudiar la correlación entre la anchura equivalente observada y la fracción de escape se han utilizado los datos observacionales de Sobral y Matthee, (2018), Calvi et al., (2019), y Arrabal Haro et al., (2018). Mediante la calibración de Sobral y Matthee, (2018) se obtienen las fracciones de escape de las muestras de Calvi et al., (2019) y de Arrabal Haro et al., (2018).

En el primer caso, se utilizan dos muestras de galaxias: la primera a  $z=2.2$  y la segunda a  $z=2.6$ . En el segundo caso y el tercer caso, las muestras de galaxias corresponden a  $z=6.5$  y a  $3 > z > 7$ , respectivamente. Para poder comparar entre sí las tres muestras, se representan los histogramas de las fracciones de escape.

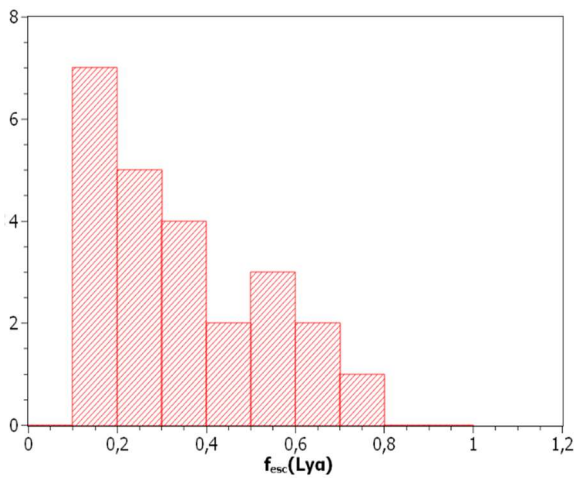


Fig. 13. Histograma de la fracción de escape la muestra de galaxias de Sobral y Matthee, (2018)

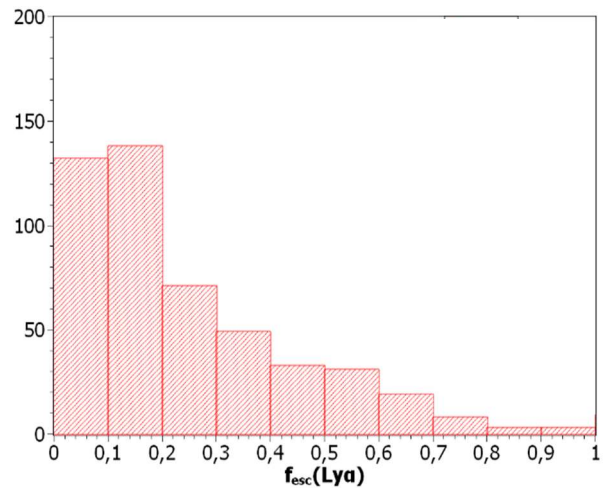


Fig. 14. Histograma de la fracción de escape la muestra de galaxias de Arrabal Haro et al., (2018)

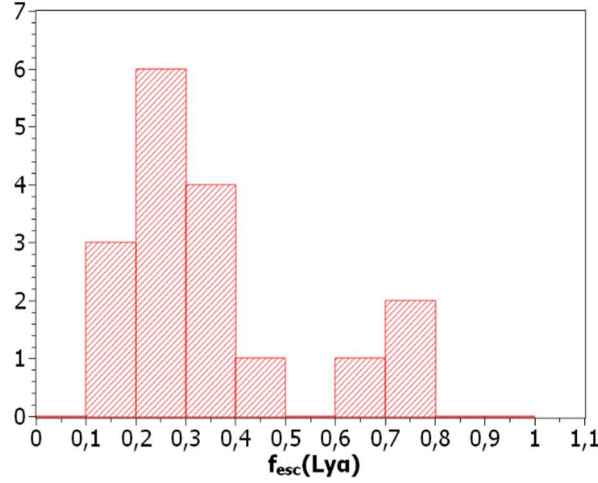


Fig. 15. Histograma de la fracción de escape de la muestra de galaxias de Calvi et al., (2019)

Dado que los modelos de síntesis evolutiva predicen la anchura equivalente intrínseca, para poder compararlos con los datos observacionales se necesita calcular la anchura equivalente intrínseca de la muestra (Figura 17):

$$EW_i = \frac{EW_0}{f_{\text{esc}}} \quad (7)$$

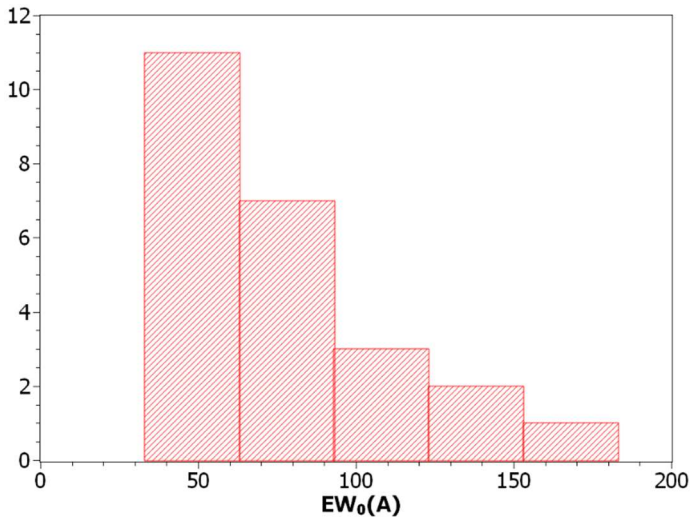


Fig. 16. Histograma de la anchura equivalente observada de la muestra de galaxias de Sobral y Matthee, (2018)

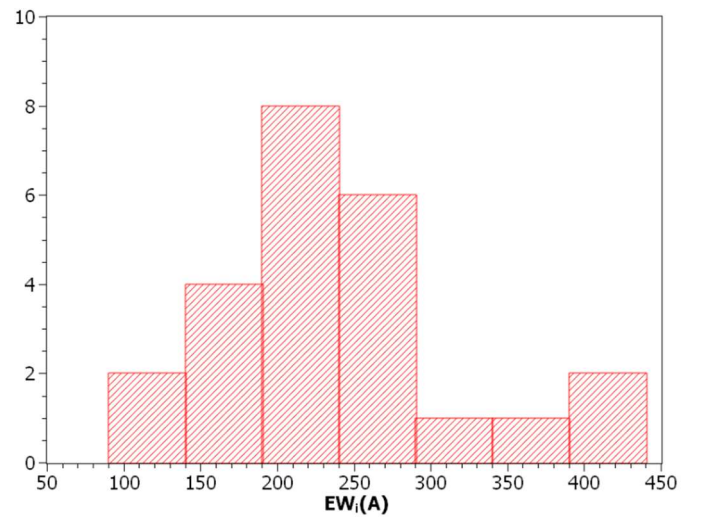


Fig. 17. Histograma de la anchura equivalente intrínseca de la muestra de galaxias de Sobral y Matthee, (2018)

La Figura 16 muestra el efecto de la baja fracción de escape (Figuras 13, 14 y 15) de los fotones  $\text{Ly}\alpha$ . La anchura equivalente que se observa presenta el pico en 50 Å, es decir, es mucho más pequeña que la anchura equivalente intrínseca. Una vez corregida, el pico de la anchura equivalente se encuentra en torno a 200 Å. La media está en 223 Å y la mediana en 222 Å. Por tanto, se puede afirmar que la correlación encontrada por Sobral y Matthee, (2018), se debe al hecho de que las galaxias estudiadas presentan un máximo claro del valor de la anchura equivalente en torno a 200 Å.

## 5. Discusión y conclusiones

En general, se puede ver que las fracciones de escape para las tres muestras de galaxias observadas son muy pequeñas. Esto es debido a que el HI de la galaxia, aunque sea poco, destruye en gran medida los fotones Ly $\alpha$ . Sin embargo, en la muestra de Calvi et al., (2019), la fracción de escape es ligeramente superior porque en galaxias a tan alto *redshift* es necesario preseleccionar aquellas que no tengan gas o esté ionizado, de tal modo que sea transparente a Ly $\alpha$ .

Si comparamos la Figura 3 con la Figura 17 se concluye que las galaxias que se han observado corresponden a brotes de formación estelar muy jóvenes, de unos 2 o 3 millones de años. Además, sus valores de anchuras equivalentes intrínsecas no son compatibles con modelos EB en su estado estacionario más allá de unos 30 millones de años de edad.

Los valores por debajo del pico indican episodios un poco más evolucionados con anchuras equivalente más pequeñas.

Los valores por encima del pico pueden explicarse por otros fenómenos de fuertes emisiones en el ultravioleta que aumentan la anchura equivalente pero que no tienen relación con la emisión de las estrellas. Entre estos fenómenos pueden encontrarse las supernovas que aumentan la emisión Ly $\alpha$  al calentar el gas del ISM, o los AGNs.

En conclusión, este trabajo muestra que las galaxias que se observan en el Universo Primordial tienen que estar experimentando episodios intensos de formación estelar en sus primeros estadios, con muy pocos millones de años de edad. Y, además, son incompatibles con procesos evolucionados que hayan estado formando estrellas masivas a lo largo de muchos millones de años.

## 6. Bibliografía

- Arrabal Haro, P., Rodríguez Espinosa, J., Muñoz-Tuñón, C., Pérez-González, G., Dannerbauer, H., Bongiovanni, Á., . . . Rodighiero, G. (2018). A simultaneous search for high- $z$  LAEs and LBGs in the SHARDS survey. *Royal Astronomical Society*.
- Calvi, R., Rodríguez Espinosa, J., Chanchaiworawit, K., Guzman, R., Mas-Hesse, J., Salvador-Solé, E., . . . Marín-Franch, A. (2019). MOS spectroscopy of protocluster candidate galaxies at  $z=6.5$ .
- Cerviño, M., & Mas-Hesse, J. M. (1994). Metallicity effects in star-forming regions. *Astronomy & Astrophysics*.
- Cerviño, M., Mas-Hesse, J., & Kunth, D. (2000). Evolutionary synthesis models of starbursts IV: The effect of binary systems and X-ray emission. *Astronomy & Astrophysics*.
- Eldridge, J. J., Stanway, E. R., Xiao, L., McClelland, L. A., Taylor, G., Ng, M., . . . Bray, J. C. (2017). Binary Population and Spectral Synthesis Version 2.1: Construction, Observational Verification, and New Results. *Publications of the Astronomical Society of Australia*.
- Hayes, M., Schaerer, D., Östlin, G., Mas-Hesse, J. M., Atek, H., & Kunth, D. (2011). On the Redshift Evolution of the Ly $\alpha$  Escape Fraction and the Dust Content of Galaxies. *The Astrophysical Journal*.
- Otí-Floranes, H., & Mas-Hesse, J. M. (2010). Calibration of star formation rate tracers for short- and long-lived star formation episodes. *Astronomy & Astrophysics*.
- Otí-Floranes, H., & Mas-Hesse, J. (s.f.). *Star formation rate/strength tracer calibrations*. Obtenido de <http://www.laeff.cab.inta-csic.es/research/sfr/>
- Schaerer, D. (2012). Evolutionary synthesis models as a tool and guide towards the first galaxies.
- Sobral, D., & Matthee, J. (2018). Predicting Lyman-alpha escape fractions with a simple observable: Lyman-alpha in emission as an empirically calibrated star formation rate indicator. *Astronomy & Astrophysics*.
- Starburst99*. (1999). Obtenido de <http://www.stsci.edu/science/starburst99/docs/table-index.html>



## 7. Apéndice (Tablas de datos)

Tabla 1. Modelo 1: Luminosidad  $L_{\text{Ly}\alpha}$  ( $\text{erg s}^{-1}$ ), continuo ( $\text{erg s}^{-1} \text{\AA}^{-1}$ ) en unidades de  $M_{\odot}$ , y anchura equivalente ( $\text{\AA}$ ) para modelo IB. (Figuras 2 y 3)

t(Myr)	IB					
	Z=0.02			Z=0.008		
	L(Ly $\alpha$ )	L <sub>1200</sub>	EW	L(Ly $\alpha$ )	L <sub>1200</sub>	EW
1	1,42E+36	4,80E+33	295,79	1,45E+36	4,47E+33	324,77
2	1,26E+36	6,36E+33	198,75	1,49E+36	5,71E+33	259,96
3	7,62E+35	7,15E+33	106,56	1,26E+36	8,67E+33	145,78
4	2,52E+35	4,27E+33	59,02	3,91E+35	5,14E+33	76,07
5	1,67E+35	2,85E+33	58,53	1,63E+35	3,34E+33	48,70
6	3,73E+34	1,96E+33	19,05	9,16E+34	2,67E+33	34,30
7	1,56E+34	1,57E+33	9,89	4,28E+34	2,14E+33	20,03
8	7,62E+33	1,31E+33	5,81	1,91E+34	1,78E+33	10,74
9	4,28E+33	1,09E+33	3,92	9,59E+33	1,47E+33	6,53
10	2,47E+33	9,28E+32	2,66	5,65E+33	1,25E+33	4,50
11	1,71E+33	7,87E+32	2,17	3,73E+33	1,08E+33	3,46
12	1,08E+33	6,70E+32	1,61	2,41E+33	9,37E+32	2,57
13	7,11E+32	5,85E+32	1,22	1,56E+33	8,13E+32	1,91
14	5,39E+32	5,17E+32	1,04	1,18E+33	7,31E+32	1,61
15	3,65E+32	4,57E+32	0,80	8,16E+32	6,69E+32	1,22
16	2,90E+32	3,93E+32	0,74	6,48E+32	6,27E+32	1,03
17	2,30E+32	3,66E+32	0,63	4,92E+32	5,65E+32	0,87
18	1,63E+32	3,24E+32	0,50	3,82E+32	5,14E+32	0,74
19	1,39E+32	2,98E+32	0,47	3,10E+32	4,97E+32	0,62

Tabla 2. Igual que Tabla 1, pero para modelo EB en  $M_{\odot}/\text{año}$ . (Figuras 2 y 3)

t(My)	EB					
	Z=0.02			Z=0.008		
	L(Ly $\alpha$ )	L <sub>1200</sub>	EW	L(Ly $\alpha$ )	L <sub>1200</sub>	EW
1	1,40E+42	5,66E+39	247,62	1,41E+42	5,16E+39	273,65
2	2,73E+42	1,18E+40	230,98	2,86E+42	1,07E+40	267,72
3	3,42E+42	1,95E+40	175,23	3,93E+42	1,80E+40	218,59
4	3,78E+42	2,47E+40	153,35	4,48E+42	2,42E+40	185,28
5	3,97E+42	2,79E+40	142,45	4,77E+42	2,83E+40	168,31
6	4,05E+42	3,03E+40	133,92	4,92E+42	3,12E+40	157,78
7	4,08E+42	3,19E+40	127,60	5,01E+42	3,35E+40	149,21
8	4,09E+42	3,34E+40	122,68	5,04E+42	3,54E+40	142,22
9	4,10E+42	3,45E+40	118,71	5,06E+42	3,70E+40	136,76
10	4,10E+42	3,55E+40	115,56	5,08E+42	3,83E+40	132,50
11	4,10E+42	3,63E+40	113,02	5,08E+42	3,94E+40	129,00
12	4,11E+42	3,70E+40	110,95	5,09E+42	4,03E+40	126,08
13	4,11E+42	3,76E+40	109,21	5,09E+42	4,11E+40	123,70
14	4,11E+42	3,81E+40	107,75	5,09E+42	4,19E+40	121,70
15	4,11E+42	3,86E+40	106,46	5,10E+42	4,25E+40	119,93
16	4,11E+42	3,90E+40	105,35	5,10E+42	4,31E+40	118,38
17	4,11E+42	3,94E+40	104,39	5,10E+42	4,36E+40	117,00
18	4,11E+42	3,97E+40	103,54	5,10E+42	4,40E+40	115,85
19	4,11E+42	4,00E+40	102,81	5,10E+42	4,44E+40	114,76
20	4,11E+42	4,02E+40	102,12	5,10E+42	4,48E+40	113,77
30	4,11E+42	4,19E+40	98,06	5,10E+42	4,73E+40	107,82
80	4,11E+42	4,35E+40	94,42	5,10E+42	5,03E+40	101,41
100	4,11E+42	4,36E+40	94,23	5,10E+42	5,05E+40	100,97
200	4,11E+42	4,35E+40	94,43	5,10E+42	5,06E+40	100,90

Tabla 3. Modelo BPASS: Luminosidad Ly $\alpha$  (erg s<sup>-1</sup>) en unidades de 10<sup>6</sup>M<sub>⊙</sub> y anchura equivalente (Å) para modelo IB.  
(Figuras 6 y 7)

t(Myr)	IB							
	Z=0.02				Z=0.008			
	Con binarias		Sin binarias		Con binarias		Sin binarias	
	EW	L(Ly $\alpha$ )	EW	L(Ly $\alpha$ )	EW	L(Ly $\alpha$ )	EW	L(Ly $\alpha$ )
1,00	215,91	3,16E+41	226,53	3,01E+41	293,84	3,47E+41	305,60	3,38E+41
1,26	175,81	3,03E+41	187,25	2,90E+41	267,03	3,70E+41	272,44	3,50E+41
1,58	153,75	2,88E+41	164,79	2,76E+41	251,45	3,78E+41	257,79	3,54E+41
2,00	121,82	2,54E+41	133,66	2,51E+41	217,81	3,67E+41	230,58	3,50E+41
2,51	89,14	1,93E+41	82,98	1,74E+41	162,97	3,14E+41	158,87	2,89E+41
3,16	92,36	1,68E+41	92,60	1,57E+41	146,27	2,64E+41	139,63	2,33E+41
3,98	81,90	1,11E+41	80,40	9,74E+40	126,87	1,84E+41	117,85	1,53E+41
5,01	58,22	6,00E+40	53,40	4,95E+40	87,66	9,95E+40	79,36	7,84E+40
6,31	39,51	2,89E+40	28,60	1,90E+40	63,34	5,27E+40	40,30	2,85E+40
7,94	37,11	1,76E+40	7,78	3,27E+39	40,46	2,41E+40	16,41	7,73E+39
10,00	33,73	9,20E+39	4,05	9,98E+38	33,62	1,30E+40	7,05	2,31E+39
12,59	21,82	5,28E+39	3,31	3,15E+38	15,48	7,14E+39	3,85	7,22E+38
15,85	17,54	2,87E+39	1,82	9,85E+37	12,42	3,85E+39	2,85	2,36E+38
19,95	16,42	1,81E+39	1,14	3,49E+37	11,11	2,26E+39	1,72	7,75E+37
25,12	13,68	1,07E+39	0,76	1,34E+37	10,07	1,39E+39	1,09	3,13E+37
31,62	10,73	8,49E+38	0,51	4,68E+36	9,45	9,74E+38	0,76	1,19E+37
39,81	10,26	5,95E+38	0,33	1,62E+36	6,68	6,62E+38	0,54	4,55E+36
50,12	11,12	4,35E+38	0,85	2,03E+36	6,88	5,14E+38	0,37	1,72E+36

Tabla 4. Modelo BPASS: Luminosidad  $L_{\text{Ly}\alpha}$  ( $\text{erg s}^{-1}$ ) y continuo ( $\text{erg s}^{-1} \text{\AA}^{-1}$ ) para modelo EB en unidades de  $10^6 M_{\odot}/\text{año}$  (Figura 8)

t	EB							
	Z=0.02				Z=0.008			
	Con binarias		Sin binarias		Con binarias		Sin binarias	
	$L(\text{Ly}\alpha)$	$L_{1200}$	$L(\text{Ly}\alpha)$	$L_{1200}$	$L(\text{Ly}\alpha)$	$L_{1200}$	$L(\text{Ly}\alpha)$	$L_{1200}$
1,00	3,16E+47	1,46E+45	3,01E+47	1,33E+45	3,47E+47	1,18E+45	3,38E+47	1,11E+45
1,26	6,56E+47	3,40E+45	6,26E+47	3,06E+45	7,62E+47	2,74E+45	7,31E+47	2,55E+45
1,58	7,62E+47	4,08E+45	7,27E+47	3,68E+45	9,00E+47	3,28E+45	8,60E+47	3,05E+45
2,00	8,79E+47	5,05E+45	8,43E+47	4,54E+45	1,07E+48	4,06E+45	1,02E+48	3,75E+45
2,51	9,91E+47	6,30E+45	9,44E+47	5,76E+45	1,25E+48	5,18E+45	1,19E+48	4,81E+45
3,16	1,11E+48	7,63E+45	1,06E+48	7,00E+45	1,44E+48	6,49E+45	1,36E+48	6,02E+45
3,98	1,22E+48	8,87E+45	1,15E+48	8,11E+45	1,61E+48	7,83E+45	1,50E+48	7,21E+45
5,01	1,28E+48	1,01E+46	1,20E+48	9,18E+45	1,73E+48	9,14E+45	1,59E+48	8,36E+45
6,31	1,33E+48	1,11E+46	1,23E+48	1,01E+46	1,80E+48	1,04E+46	1,63E+48	9,39E+45
7,94	1,36E+48	1,20E+46	1,24E+48	1,09E+46	1,85E+48	1,14E+46	1,65E+48	1,03E+46
10,00	1,38E+48	1,26E+46	1,24E+48	1,15E+46	1,88E+48	1,23E+46	1,65E+48	1,10E+46
12,59	1,40E+48	1,33E+46	1,24E+48	1,18E+46	1,90E+48	1,37E+46	1,65E+48	1,16E+46
15,85	1,41E+48	1,39E+46	1,24E+48	1,20E+46	1,91E+48	1,48E+46	1,65E+48	1,19E+46
19,95	1,41E+48	1,44E+46	1,24E+48	1,21E+46	1,92E+48	1,57E+46	1,65E+48	1,21E+46
25,12	1,42E+48	1,49E+46	1,24E+48	1,22E+46	1,93E+48	1,65E+46	1,66E+48	1,22E+46
31,62	1,43E+48	1,55E+46	1,24E+48	1,23E+46	1,94E+48	1,73E+46	1,66E+48	1,23E+46

Tabla 5. Modelo BPASS: Anchura equivalente ( $\text{\AA}$ ) para modelo EB (Figura 9)

	EB			
	Z=0.02		Z=0.008	
	EW			
t(My)	Con binarias	Sin binarias	Con binarias	Sin binarias
1,00	215,91	226,53	293,84	305,60
1,26	193,07	204,29	278,60	286,83
1,58	186,47	197,70	274,06	282,04
2,00	174,16	185,50	263,30	272,44
2,51	157,21	163,82	241,69	247,51
3,16	145,90	151,26	222,34	225,68
3,98	136,95	141,53	206,06	207,88
5,01	127,63	131,24	189,06	190,32
6,31	119,21	121,47	174,36	173,84
7,94	113,25	113,45	161,56	160,58
10,00	109,29	108,03	152,30	150,06
12,59	104,68	105,57	138,89	143,17
15,85	100,93	103,85	129,21	139,59
19,95	97,96	102,66	122,19	137,22
25,12	95,38	101,80	116,78	135,38
31,62	92,22	101,24	112,11	134,13